



Model-gebaseerde teeltadvisering voor paprika

Teeltbegeleiding voor een energie-efficiënte teelt
van paprika in semi-gesloten en conventionele kassen

Fokke Buwalda¹, Feije de Zwart¹, Gert Jan Swinkels¹, Jan Bontsema¹, Anne Elings¹,
Arie de Gelder¹, Fleur Sterk¹ en Caroline van der Mark²



© 2010 Wageningen, Wageningen UR Glastuinbouw

Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Bornsesteeg 65, 6708 PD Wageningen
: Postbus 16, 6700 AA Wageningen
Tel. : 0317 - 47 70 01
Fax : 0317 - 41 80 94
E-mail : glastuinbouw@wur.nl
Internet : www.glastuinbouw.wur.nl

Inhoudsopgave

1	Inleiding	5
1.1	Teeltinnovatie: nieuwe mogelijkheden leren benutten	5
1.1.1	‘Opnieuw leren telen’	5
1.1.2	Aircokas	5
1.2	Sensoren en modellen	6
1.2.1	Sensoren	6
1.2.2	Modellen	7
1.2.3	Modellen zijn nooit perfect	8
1.2.4	De ‘Missing Link’	8
1.3	Teeltbegeleidingssysteem paprika	9
1.4	Vraagstelling	9
2	Materiaal en methoden	11
2.1	Opbouw van het automatische adviessysteem	11
2.1.1	Informatiebron 1 – prognose van toekomstige omstandigheden	12
2.1.2	Informatiebron 2 – de relatie tussen kasklimaatcomputerinstellingen en het resulterende kasklimaat en energiegebruik	12
2.1.3	Informatiebron 3 - de relatie tussen kasklimaatfactoren en gewasontwikkeling	13
2.1.4	Informatiebron 4 - actuele gewastoestand	13
2.1.5	Informatiebron 5 – aanvullende historische informatie	13
2.2	Automatische adviesgenerator	14
2.3	Dataopslag en communicatie	15
2.4	Deelnemende bedrijven	16
2.5	Communicatie met de bedrijven	16
3	Resultaten	17
3.1	Calibratie	17
3.1.1	Instellen parameters kasmodel	17
3.1.2	Optimaliseren parameters gewasmodel	18
3.1.3	Correctie getelde zetting	21
3.2	Evaluatie met gebruikers	21
3.2.1	van Schie	21
3.2.2	Energie bij van Schie	21
3.2.3	van der Harg	21
3.2.4	Energie bij van der Harg	22
3.2.5	Kwekerij de Wieringermeer	22
3.2.6	Energie bij kwekerij de Wieringermeer	23
3.3	Informatieuitwisseling binnen het projectteam	24
3.3.1	Kasklimaat	24
3.3.2	Gewasmodellen	25
3.3.3	Verdamping	27

4	Discussie	31
4.1	Wat is er bereikt	31
4.2	Opmerkingen	31
4.2.1	Tijdigheid	32
4.2.2	Interface	32
4.2.3	Gegevens invoeren en bijhouden	32
4.2.4	Teeltadviseurs	33
4.2.5	Kwaliteitsbewaking	33
4.2.6	Leren vooruit te kijken	34
4.2.7	Hoeveel mogelijkheden om te evalueren?	34
4.2.8	Synthese	35
4.3	Conclusies	36
5	Referenties	37
Bijlage I	Overzicht rekenresultaten van het gewasmodel Papigrow per rekenslag	39
Bijlage II	Overzicht rekenresultaten Gewasmodel INTKAM	41
Bijlage III	Datacommunicatie van het ventilatievoud-model (Bontsema et al., 2007)	43
Bijlage IV	Output van het simulatiemodel voor kasklimaat en energie (KASPRO)	45

1 Inleiding

1.1 Teeltinnovatie: nieuwe mogelijkheden leren benutten

De glastuinbouw is een innovatieve sector. Bezorgdheid over het broeikaseffect en over de prijzen van fossiele brandstoffen hebben het innovatieproces een sterke impuls gegeven. Voortdurend zijn nieuwe ideeën aan de orde met betrekking tot technische besparingsmogelijkheden en teeltstrategieën om deze mogelijkheden optimaal te combineren met het behalen van goede teeltresultaten. Innovaties in de sfeer van het geconditioneerd of (semi)gesloten telen brengen vaak een verhoging van het investeringsniveau met zich mee voor warmtepompen, luchtbehandeling, extra schermen, ventilatoren, luchtslurven of nevelleidingen. Om rendabel te kunnen worden toegepast moeten deze extra kosten worden goedgeemaakt door een besparing op energiekosten of een verbetering van het teeltresultaat. Teeltkundige verbeteringen zijn niet denkbeeldig, omdat door toepassing van deze technieken de mogelijkheden om de teeltcondities te verbeteren worden uitgebreid. Meer dan in conventionele kassen kunnen de factoren temperatuur, CO₂ en vochtgehalte van de kaslucht onafhankelijk van het lichtniveau worden geregeld. Met de toename van technische beheersingstechnieken enerzijds, en het kostenniveau anderzijds (rente en afschrijving op investeringen, gasprijs) wordt de vraag steeds belangrijker hoe we al die mogelijkheden het meest efficiënt kunnen benutten.

1.1.1 ‘Opnieuw leren telen’

De productie in kassen is complex, waardoor de afwijking van de gangbare praktijk die met een innovatie samenhangt soms onverwachte gevolgen kan hebben. Doordat één aspect van de teeltcondities is veranderd blijkt dan een hele serie aanpassingen in het teeltrecept nodig te zijn om het gewenste teeltresultaat ook werkelijk te kunnen realiseren. Dit is vaak een proces van vallen en opstaan, omdat de beschikbare praktische teeltkennis over het algemeen is ontstaan onder omstandigheden waarin de betreffende innovatie of techniek niet werd toegepast. Bij het testen van het ‘gesloten kas’-concept werd in dit verband zelfs gesproken van “opnieuw leren telen”. De meest toegepaste werkvorm bij het opdoen van ervaring met nieuwe technieken is die van vergelijkende teeltproeven met begeleiding van deskundigen, al of niet ondersteund door toepassing van monitoring- en sensortechnieken.

1.1.2 Aircokas

Een belangrijke ontwikkeling is het geconditioneerd telen in gesloten of semi-gesloten kassen. Het gebruik van verdampingskoeling op basis van verneveling onder hoge druk en het gebruik van luchtbehandelingskasten voegt nieuwe elementen toe aan de conventionele klimaatregeling met behulp van verwarmingsbuizen en luchtramen. In het Aircokas-concept (www.aircokas.nl) wordt op het biologische bedrijf van teler Van Schie in Ens geëxperimenteerd met deze technieken.

In het teeltseizoen 2007 is er bij Van Schie paprika aangeplant. De uitdaging bij paprika blijft om het gewas in balans en op regelmaat te houden, en in dit geval om dat te combineren met het efficiënt benutten van de bijzondere mogelijkheden van een semi-gesloten kas. Hierbij zijn twee aspecten van belang:

1. hoe krijgt de teler inzicht in de klimaatomstandigheden die nodig zijn om de gewenste gewasontwikkeling te bereiken.
2. hoe krijgt de teler inzicht in de meest energie-efficiënte inzet van ventilatie, luchtbeweging, verneveling en de warmtepomp om deze klimaatomstandigheden te bereiken?

Om antwoord te krijgen op deze vragen is in de kassen op het bedrijf van van Schie een uitgebreid netwerk van meet-sensoren geïnstalleerd. Daarnaast worden regelmatig gewaswaarnemingen uitgevoerd, aanvullend aan de routinematige registraties die de teler uitvoert. Een team van deskundigen (fysioloog, gewaskundige, klimaatspecialist, systeemontwikkelaar) interpreteert de waarnemingen, registraties en meetgegevens en adviseert de teler hoe de verneveling en de overige opties optimaal kunnen worden ingezet in de teelt. De teler houdt zelf de verantwoordelijkheid en is vrij om beslissingen te nemen met betrekking tot het opvolgen van deze adviezen.

1.2 Sensoren en modellen

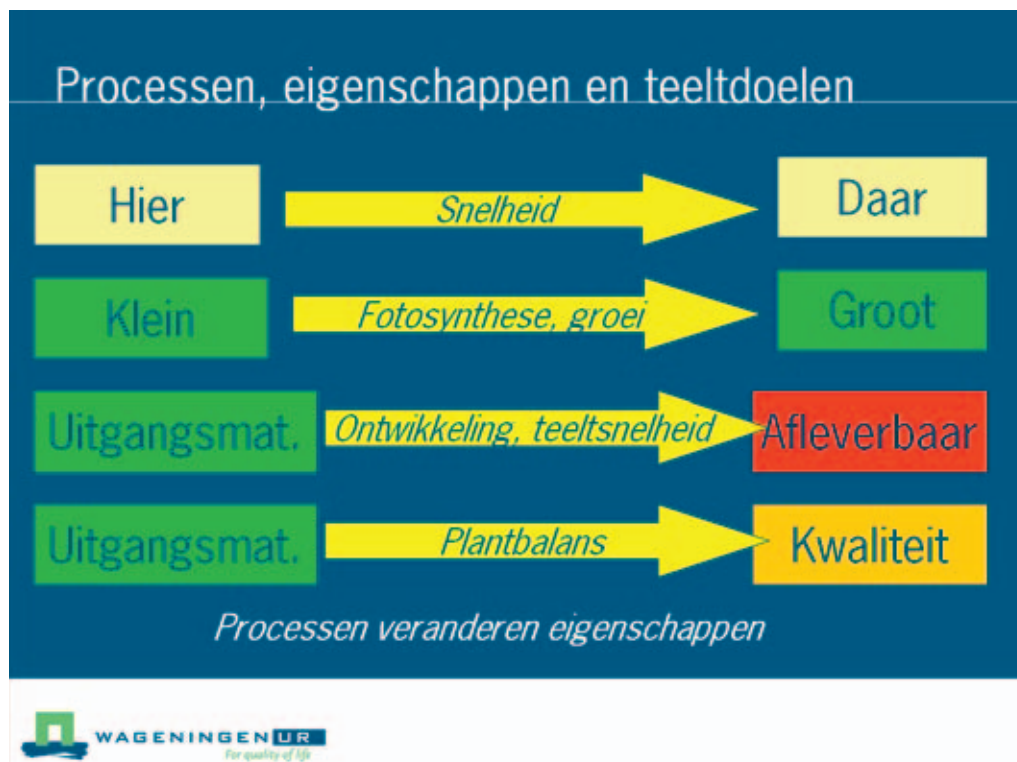
Middelbare scholieren leren tijdens de algebra-lessen bij wiskunde hoe ze twee vergelijkingen met twee onbekenden kunnen oplossen. Eén vergelijking met twee onbekenden is onmogelijk op te lossen. Er ontbreekt in dat geval essentiële informatie, en zelfs de meest briljante wiskundige komt in een dergelijk geval niet verder dan een middelbare scholier. Deskundigheid levert dus alleen meerwaarde op als er voldoende informatie beschikbaar is. Dat geldt natuurlijk ook voor telers, teeltadviseurs en onderzoekers die betrokken zijn bij de ontwikkeling van energie-efficiënte teeltinnovaties. Juist in nieuwe situaties zal regelmatig blijken dat er informatie ontbreekt waardoor het inschatten van de stand van zaken dubieus wordt en beslissingen niet met zekerheid kunnen worden genomen. Het is in dergelijke situaties dus van belang om over aanvullende informatie te kunnen beschikken. Sensoren en modellen kunnen belangrijke bronnen van extra informatie vormen. In het hier gerapporteerde project is geprobeerd om die bron van extra informatie te realiseren, om de gebruikswaarde in een praktijksituatie te kunnen beoordelen.

1.2.1 Sensoren

Monitoringstechnieken op basis van sensoren kunnen schattingen/metingen geven van luchtbeweging, temperatuur, luchtvochtigheid, bladtemperatuur, lichtdoordringing in verschillende lagen van het gewas, huidmondjesopening, bladdikte, sapstroom, 'plantivity', etc. Op deze manier vormen sensortechnieken een belangrijke aanvulling op de traditionele waarnemingsmethode van tellen, meten en wegen van planten, bloemen en vruchten.

De vraag is echter of deskundigen op deze manier voldoende informatie in handen krijgen om de situatie in de kas correct in te schatten en op grond daarvan de relevante adviezen te kunnen geven. Er bestaan verschillende belangrijke beperkingen bij het gebruik van sensoren:

1. Een aantal belangrijke factoren die het teeltresultaat beïnvloeden is niet direct meetbaar, zoals de assimilatenvraag van verschillende plantendelen, de beschikbaarheid van assimilaten, hormoonbalansen of de actuele trend in de eigen dynamiek het gewas met betrekking tot vruchtzetting en plantbelasting.
2. De relaties tussen de variabelen die wel kunnen worden gemeten en het nagestreefde teeltresultaat zijn niet altijd duidelijk. Zo is het bijvoorbeeld erg lastig om aan de hand van de gemeten fotosynthese of lichtbenuttingsefficiëntie van één klein stukje blad iets te zeggen over de actuele fotosynthesesnelheid van een heel gewas met meerdere bladlagen en bijbehorende verschillen in microklimaat. Vervolgens valt het niet mee om op grond van de actuele fotosynthesesnelheid iets te zeggen over de groei op die dag of de verdeling daarvan over de verschillende plantendelen zoals de groeipunt en de vruchten. Hierbij wordt het teeltresultaat uiteindelijk bepaald door het samengestelde effect van vele dagen groei en assimilatenverdeling (zie Figuur 1.). Op een vergelijkbare manier is de relatie tussen watergehalte van het blad en openingstoestand van de huidmondjes over het algemeen niet eenduidig, evenmin als die tussen huidmondjes en fotosynthesesnelheid. Verder wordt het teeltresultaat in veel gevallen niet alleen bepaald door de geproduceerde kilo's, maar ook door factoren zoals productkwaliteit en tijdigheid.
3. Een teeltmaatregel die op korte termijn voordelig is kan op langere termijn juist averechts werken. Zo kan bijvoorbeeld bij vruchtgroentegewassen het verhogen van de temperatuur op korte termijn leiden tot een hoge productie doordat bestaande vruchten sneller afrijpen. Echter op wat langere termijn zal het gewas door deze maatregel uitputten waardoor het totale effect juist negatief uitpakt. Bij het vooraf beoordelen van het te verwachten effect van teeltmaatregelen moet dus altijd rekening worden gehouden met de eigen dynamiek van het gewas. De effecten van die dynamiek zijn van groot belang voor het teeltresultaat, maar zijn fundamenteel niet meetbaar, omdat ze nog in de toekomst besloten liggen.



Figuur 1. Het verband tussen toestanden en processen bij het reizen en in de tuinbouw. Doordat de processen groei en ontwikkeling een tijd lang met een bepaalde snelheid op een gewas inwerken verandert de gewastoeestand geleidelijk van klein in groot/zwaar, en van jong/onrijp in rijp/oogstbaar. Dit is te vergelijken met een reiziger die zich met een bepaalde snelheid verplaatst, waardoor in de loop van de tijd zijn toestand (de plek waar hij zich bevindt) verandert. Teelt-doelen en reisdoelen (wat brengt de teler naar de veiling en wanneer; waar komt de reiziger aan en hoe laat) zijn meestal toestanden en geen processen.

1.2.2 Modellen

Het beschrijven van eigenschappen van kassen en gewassen in de vorm van rekenmodellen is een gespecialiseerde methode om kennis te organiseren. In een model worden rekenkundige formules van alle relevante onderdelen en processen van een systeem geïntegreerd. Dit maakt het mogelijk om op een systematische manier met de interacties tussen processen en dynamische eigenschappen van het systeem rekening te kunnen houden.

Van de belangrijkste gewasprocessen zoals fotosynthese, groei en ontwikkeling (bijv. Adams, 2006, Boote & Scholberg, 2006) zijn algemene modellen beschikbaar. Voor verschillende gewassen zoals tomaat, roos, paprika, komkommer, chrysant, Ficus en Kalanchoe zijn ook gespecialiseerde gewasmodellen ontwikkeld (o.a. Dijkshoorn-Dekker 1999, Heuvelink 1996, Marcelis 1994, Seginer *et al.* 1998). Voor de relatie tussen weer, kastemperatuur en energieverbruik bestaan modellen zoals KASPRO (de Zwart, 1996, Swinkels, 2006).

Modellen spelen een belangrijke rol in theoretisch onderzoek naar de fundamentele eigenschappen van complexe systemen of bij het verkennen van nieuwe mogelijkheden in scenariostudies. In dergelijke studies voor de tuinbouw wordt meestal uitgegaan van een representatieve, gemiddelde kas en standaard weer (bijvoorbeeld het SEL-jaar, Breuer & van de Braak 1989). In principe is het ook mogelijk om een model te laten rekenen op basis van specifieke bedrijfseigenschappen en actuele meet – en registratiegegevens afkomstig van het bedrijf in kwestie. De modelberekeningen vormen dan een afspiegeling van de actuele toestand op dat bedrijf. Op basis van de actuele gewastoeestand en verwachtingen van het weer en de klimaatinstellingen kunnen ook prognoses worden berekend van de toekomstige gewasontwikkeling, zodat een indicatie wordt verkregen van de uitwerking van maatregelen in de toekomst. Sensoren meten alleen in het heden, en kunnen geen informatie geven over de toekomst. Verwachtingen van het toekomstige verloop van de teelt, berekend met dynamische modellen, kunnen daarmee een nuttige aanvulling vormen op de informatie die wordt verzameld met behulp van sensortechnieken.

1.2.3 Modellen zijn nooit perfect

Een model is een vereenvoudigde afspiegeling van de werkelijkheid. Door die vereenvoudiging is het mogelijk om op basis van beperkte informatie toch belangrijke conclusies te trekken. Het is daarbij wel essentieel om kritisch met die conclusies om te gaan en ze voor zover mogelijk te toetsen aan de waarneembare werkelijkheid. Vanwege die vereenvoudiging zullen de rekenresultaten nooit helemaal kloppen.

Voor diverse processen of gewassen zijn in de loop van de tijd verschillende modellen ontwikkeld. De redenen daarvoor kunnen uiteenlopen: verschil van inzicht tussen onderzoekers of voortschrijdend inzicht, de eisen die voortvloeien uit verschillende doeleinden waarvoor een model oorspronkelijk werd ontwikkeld, het niet vrijelijk beschikbaar zijn van een model, etc. Het kan heel interessant en leerzaam zijn om met verschillende modellen aan een zelfde situatie te rekenen en dan de simulatieresultaten te vergelijken.

Hierbij geldt dat de kwaliteit van de rekenresultaten nooit beter kan zijn dan die van de informatie op basis waarvan gerekend wordt (de 'input'). Zo zijn bijvoorbeeld licht, temperatuur en CO₂ belangrijke input-variabelen voor de meeste gewasmodellen. Het is bekend dat de lichtbeschikbaarheid op gewasniveau moeilijk te schatten is op basis van gemeten buitenstraling. De temperatuur is vaak gemeten met behulp van een klimaatmeetbox in de kas, waarbij bekend is dat de temperatuurverdeling in de kas nooit homogeen is, terwijl ook de meetbox zelf afwijkingen kan vertonen (Campen & de Gelder, 2007).

1.2.4 De 'Missing Link'

De vraag die in dit project centraal staat is dus of de potentiële meerwaarde van het meerekenen met modellen op basis van actuele, specifieke bedrijfsgegevens inderdaad kan worden gerealiseerd. Rekenmodellen van kassen en gewassen bestaan al vrij lang, maar in de dagelijkse praktijk op tuinbouwbedrijven vinden ze tot nu toe nauwelijks toepassing. Het lijkt er daarom op dat er nog iets essentieels mist om modellen daadwerkelijk 'op de werkvloer' toe te kunnen passen. Het hier gerapporteerde project ging uit van de veronderstelling dat belangrijke hinderpalen voor toepassing van modellen in de praktijk worden weggenomen als op een efficiënte manier 'real-time' rekenresultaten voor een specifieke teelt op het eigen bedrijf beschikbaar kunnen worden gesteld. Om die reden is een model-gebaseerd adviesstelsel, toegespitst op het combineren van energie-efficiëntie met het behalen van goede teeltresultaten, ontwikkeld en getest.

1.3 Teeltbegeleidingssysteem paprika

Om een adviesstelsysteem te ontwikkelen volgens de in paragraaf 1.2 besproken principes zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

1. rekenen aan lopende teelten op basis van 'real time' actuele informatie;
2. Waar mogelijk meerdere modellen aan hetzelfde proces laten rekenen;
3. Maximale koppeling van klimaat-, energie en teeltsimulaties;
4. Maximale automatisering van procedures;
5. Dagelijks beschikbaar hebben van rekenresultaten;
6. Slimme keuze van een subset aan rekenresultaten;
7. Eenvoudige en overzichtelijke presentatie naar telers en teeltbegeleiders;
8. Voor het projectteam zelf dagelijks wel alle informatie beschikbaar.

De bedoeling was dus om data-acquisitie, aanroepen van modellen en het zichtbaar maken van de resultaten volledig te automatiseren. Analooq aan de werkwijze van meteorologen, die in hun 'weerkamer' allerlei datastromen van weerstations, satellieten en simulatiemodellen integreren, wordt het systeem zo ingericht dat in elk gewenst stadium extra modellen of datastromen in de automatische verwerking kunnen worden opgenomen. Ook modellen die pas in de loop van het project operationeel worden kunnen op die manier snel worden geïntegreerd.

1.4 Vraagstelling

Samenvattend komen hierbij de volgende vragen aan de orde:

1. Hoe kan real-time het meerekenen met lopende teelten technisch zo worden gerealiseerd dat het automatisch en met minimale inzet van arbeid kan werken?
2. Hoe gaan we om met het gegeven dat er voor vele processen verschillende modellen bestaan
3. Hoe kan de kwaliteit van de rekenresultaten worden gewaarborgd?
4. Hoe kan, uitgaande van de enorme hoeveelheid beschikbare rekenresultaten, efficiënt en tijdig met de gebruikers worden gecommuniceerd?
5. Levert het systeem inderdaad meerwaarde bij het ontwikkelen van meer energie-efficiënte teeltstrategieën?

2 Materiaal en methoden

2.1 Opbouw van het automatische adviessysteem

Doel van dit project was het op elk gewenst moment beschikbaar maken van een actueel, bedrijfs- en teeltspecifiek overzicht van de verwachte gewasontwikkeling en het daarbij behorende energieverbruik afhankelijk van het weer, bedrijfsuitrusting en de klimaatinstellingen. Om deze prognose op elk willekeurig moment te kunnen maken is een geautomatiseerd systeem nodig. Het handmatig uitvoeren van de benodigde berekeningen is veel te arbeidsintensief om praktisch uitvoerbaar te zijn. In eerdere projecten is al ervaring opgedaan met automatische rekenroutines. Het gaat om Hydron-line (Gieling *et al.*, 2005), Proof of Principle (Buwalda *et al.*, 2009a) en Kijk in de Kas (Buwalda *et al.*, 2009b). De uitdaging in het hier gerapporteerde project was juist om gedetailleerde informatie voor bedrijven op een praktische en overzichtelijke manier beschikbaar en toegankelijk te maken. Het projectteam zelf had daarnaast de verantwoordelijkheid om de kwaliteit van de rekenresultaten te beoordelen en te bewaken. Het ontwikkelde rekensysteem genereerde daarom 'voor intern gebruik' bij elke rekenslag nog aanzienlijke hoeveelheden extra informatie.

Voor het berekenen van een actueel, bedrijfs- en teeltspecifiek overzicht van de verwachte gewasontwikkeling en het daarbij behorende energieverbruik afhankelijk van het weer, bedrijfsuitrusting en de klimaatinstellingen is informatie nodig over:

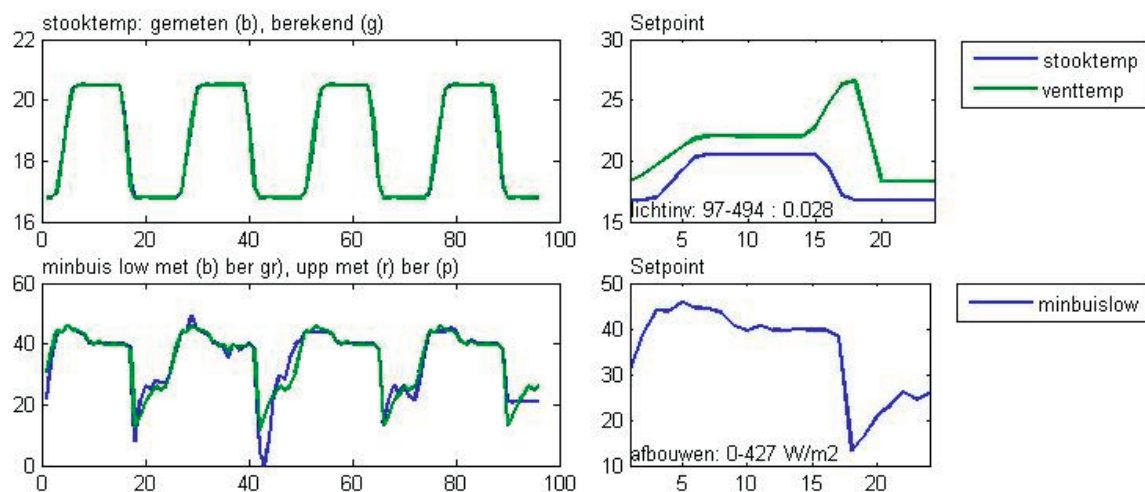
1. omstandigheden in de toekomst
2. de relatie tussen kasklimaatcomputerinstellingen en het resulterende kasklimaat en energiegebruik
3. de relatie tussen kasklimaatfactoren en gewasontwikkeling
4. de toestand waarin het gewas zich bevindt
5. aanvullende historische informatie (gewas- en klimaatregistraties)

2.1.1 Informatiebron 1 – prognose van toekomstige omstandigheden

Een van de meest bepalende invloeden van buitenaf op het teeltproces is het weer. Een prognose van teeltverloop en energieverbruik is daarom alleen zinvol op basis van een weersverwachting. Het te verwachten weer bestaat uit twee stukken, namelijk de weersverwachting voor de komende dagen en de weersverwachting voor de daarna resterende teeltperiode. De weersverwachting voor de komende dagen kan worden betrokken van meteorologische diensten, waarbij er natuurlijk een grotere foutmarge zal gaan optreden naarmate de verwachting verder vooruit wordt opgevraagd.

Het weer dat voor de rest van de teeltperiode verwacht mag worden kan alleen uit historische data met betrekking tot het gemiddelde weer worden betrokken. Voor dit doel is gebruik gemaakt van het SEL-jaar, een gestandaardiseerd referentiejaar voor de Nederlandse glastuinbouw (Breuer & van de Braak, 1989).

Daarnaast is informatie nodig over geplande teelthandelingen (zoals bijv. toppen, groen oogsten) en klimaatinstellingen zoals de stooklijn, de ventilatielijn en het minimumbuisgebruik, die in de tijd behoorlijk kunnen variëren en dus regelmatig moeten worden bijgesteld. In het streven om alle routines te automatiseren is voor de dagelijkse rekencyclus een schatter ontwikkeld die de instellingen voor stoken en luchten kon schatten op basis van recente gegevens opgehaald uit de klimaatcomputer van de deelnemende bedrijven (Figuur 2.1.)



Figuur 2.1. Instellingen voor stook- en luchtingstemperatuur en buistemperaturen werden per bedrijf dagelijks automatisch geschat op basis van gegevens van de laatste 4 dagen, opgehaald uit de betreffende klimaatcomputer.

2.1.2 Informatiebron 2 – de relatie tussen kasklimaatcomputerinstellingen en het resulterende kasklimaat en energiegebruik

Deze informatiebron levert gegevens op over de teeltcondities die in de toekomst verwacht mogen worden. Deze zijn natuurlijk voor een (groot) deel afhankelijk van het buitenklimaat, maar ook van de kas en van de wijze waarop de tuinder met zijn klimaatcomputer omgaat. Daarom wordt deze informatie met het kasklimaatmodel Kaspro gegenereerd (de Zwart, 1996). Dit model moet daartoe geparameteriseerd worden voor de kasuitrusting (lichttransmissie, bufferafmeting, WKK ja/nee, belichting, schermen etc.), maar ook voor de wijze waarop de tuinder met deze kasuitrusting omgaat. Veel van deze parameters kunnen eenmalig worden ingevoerd, andere werden automatisch geschat (Figuur 2.1.).

2.1.3 Informatiebron 3 - de relatie tussen kasklimaatfactoren en gewasontwikkeling

Dynamische gewasmodellen berekenen de verandering in eigenschappen van het gewas in de tijd als functie van de teeltcondities en de actuele gewastoestand. Een model is eigenlijk een methode om kennis en informatie te organiseren. Het model bevat informatie over de toestand van het gewas en over alle processen die die toestand beïnvloeden. Vele van die processen worden bepaald door de gewastoestand en door omgevingsfactoren. Om een voorbeeld te geven: fotosynthese is afhankelijk van de hoeveelheid blad aan een plant (gewastoestand) en de omgevingsfactoren licht en CO₂. Bij elke rekenstap van het model speelt die gewastoestand dus een sleutelrol.

2.1.4 Informatiebron 4 - actuele gewastoestand

Als de actuele gewastoestand volledig bekend zou zijn, dan zou een goede prognose van de te verwachten ontwikkeling in relatie tot energieverbruik in principe mogelijk zijn zonder het verleden van het gewas te kennen. Helaas is dat in de meeste gevallen niet gemakkelijk om aan deze informatie te komen. De belangrijkste reden is dat een aantal bepalende interne gewastoestanden, zoals de actuele source/sink ratio en de fysiologische leeftijd van de vruchten, niet met het blote oog of sensoren is vast te stellen.

Voor systemen met een direct meetbare actuele toestand is het mogelijk om met behulp van een model prognoses te berekenen als alleen de te verwachten uitwendige omstandigheden (informatiebron 1) bekend zijn. In de tuinbouw valt daarbij te denken aan eenvoudige procesmodellen die genoeg hebben aan informatie uit Vision-systemen of gewassen-soren. In het geval van het berekenen van productie met behulp van complexe gewasmodellen is dat over het algemeen niet mogelijk. Voor het berekenen van de actuele gewastoestand op basis van de teelthistorie is in dat geval eigenlijk altijd aanvullend historische informatie nodig in de vorm van klimaat- en gewasregistraties (zie punt 2.1.5)

2.1.5 Informatiebron 5 – aanvullende historische informatie

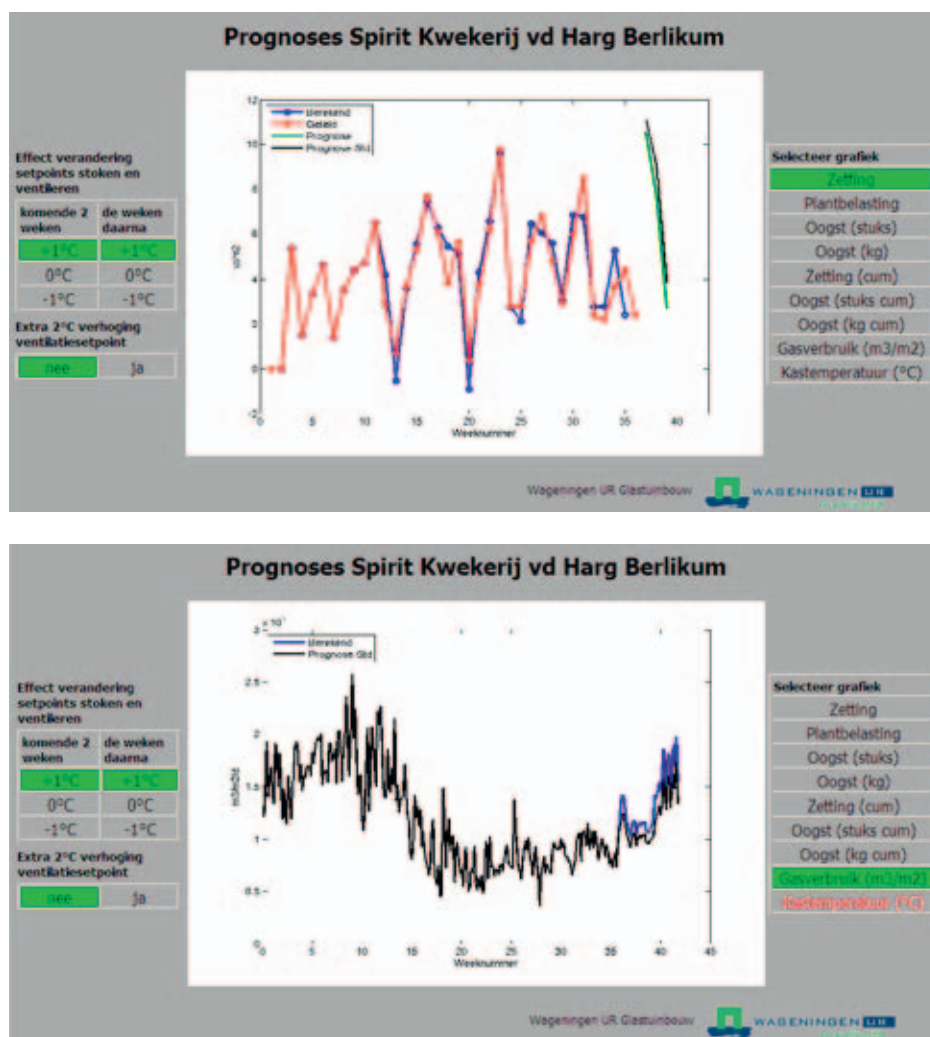
De teelthistorie omvat het teeltbeleid: plantdatum, stengeldichtheid en snoeimethode, vruchtsnoei, toppen en (voor zover relevant) bladplukken, extra stengels aanhouden, etc. Deze informatie wordt geleverd door de tuinder. Daarnaast is ook historische informatie nodig over de klimaatfactoren temperatuur, CO₂-concentratie, luchtvochtigheid en lichtintensiteit in het betreffende teeltjaar, in dit geval 2007. In het huidige project is deze informatie rechtstreeks opgehaald uit de database van LetsGrow.com, waarheen de klimaatcomputers op de deelnemende bedrijven hun data exporteerden.

Vergelijking van het berekende teeltverloop tot nu toe met registraties van gemakkelijk meetbare gewaseigenschappen zoals lengte, aantal internodiën, vruchtzetting, plantbelasting en productie vormt een goede basis voor het beoordelen van de kwaliteit van de modelberekeningen. Naarmate de gewasregistraties beter overeenkomen met het berekende historische teeltverloop is het waarschijnlijker dat de berekende actuele gewastoestand zal kloppen en dat ook een betrouwbare prognose van het toekomstige teeltverloop kan worden berekend.

In een eerder project (Buwalda *et al.*, 2009a) is geconstateerd dat de kwaliteit van de modelberekeningen kon worden verbeterd door de berekende vruchtzetting te corrigeren op basis van getelde zetting. Voor het hier gerapporteerde project is die procedure geautomatiseerd. De door de deelnemende telers aangeleverde informatie werd wekelijks overgenomen in een Excel spreadsheet. Het model nam deze gegevens vervolgens automatisch over.

Afhankelijk van het type project en de aard van de vraagstelling kan verder allerlei aanvullende informatie bij het rekenproces worden betrokken. Te denken valt aan sensorinformatie, bepaalde berekeningen die door meerdere modellen parallel worden uitgevoerd, of extra modellen die worden toegevoegd om bepaalde niet-essentiële berekeningen uit te voeren. Dergelijke informatie kan bijvoorbeeld worden gebruikt voor interne kwaliteitsbewaking. In het hier gerapporteerde project is van deze mogelijkheden gebruik gemaakt door voor diverse processen (gewasgroei en ontwikkeling, productie, ventilatievoud en verdamping) verschillende modelberekeningen parallel te laten draaien.

2.2 Automatische adviesgenerator



Figuur 2.1. Twee voorbeelden van het outputschermb van de automatische scenariogenerator. De linkermarge was voor de selectie van een van de 18 scenario's, in de rechterkolom kon uit 9 output-variabelen worden gekozen. Hoewel het scherm er eenvoudig en overzichtelijk uitziet, konden dus steeds 162 verschillende grafieken worden getoond.

Volgens de in paragraaf 1.3 geschetste principes is een automatische adviesgenerator ontwikkeld die was gebaseerd op het optimalisatiesysteem dat is gebouwd voor het project Proof of Principle (Buwalda *et al.*, 2009a). Het gewasmodel uit dat systeem, dat de werktitel 'Papigrow' heeft gekregen, is verder ook gebruikt bij de begeleiding van de teelt van paprika in de gesloten kas bij Themato in 2006 (De Gelder *et al.*, 2007). De wekelijkse berekeningen van de stand van het gewas en de prognoses van vruchtzetting, plantbelasting, oogst en vruchtkwaliteit (sortering) zijn een goede basis gebleken voor het tussentijds evalueren van de klimaatregelstrategie in het licht van de gestelde teeltdoelen. Daarnaast heeft ook het model INTKAM de mogelijkheid om de teelt van paprika te simuleren (o.a. Grashoff *et al.*, 2003, Dieleman *et al.*, 2006). Als referentie is het INTKAM-model ook ingebouwd in het adviesstelsel. Voor het simuleren van kasklimaat, energie in relatie tot het weer, de technische infrastructuur en instellingen van de klimaatregelaar is het model (KASPRO, de Zwart 1996) beschikbaar. Daarnaast is recentelijk door Bontsema een onafhankelijke methode voor het schatten van gewasverdamping en ventilatie beschikbaar gekomen (het Observer-model; Bontsema *et al.*, 2007).

Door ook deze modellen allebei in te bouwen zijn mogelijkheden geschapen om simulatieresultaten onderling te vergelijken en na te denken over nauwkeurigheid en precisie van de verschillende modellen onder een reeks van omstandigheden.

De automatische adviesgenerator leverde bij elke rekenslag een grote hoeveelheid informatie op (zie Tabellen in bijlage I, II, III en IV). De uitdaging in dit project was om op basis van deze informatie telers efficiënt en overzichtelijk inzicht te geven in de actuele stand van zaken en het effect van verschillende keuzes wat betreft klimaatinstellingen op gewasgroei en energieverbruik. In dit project is voor de aanpak gekozen om routinematig 18 scenario's te berekenen die betrekking hadden op de temperatuurinstellingen van de kasklimaatcomputer. De 18 scenario's bestonden uit alle mogelijke combinaties van (a) variaties op de huidige stooklijn (plus of min 2 °C), waar bij de luchttingslijn volgens de huidige instellingen meevariëerde met de stooklijn; (b) de opties om aanpassingen voor de komende 2 weken te laten gelden en/of voor de periode daarna tot aan het einde van de teelt, en (c) hier bovenop de optie van een extra verhoging van de luchttingslijn (ventilatiesetpoint) met 2 °C. Zodoende gold:

N = Aantal scenario's

TP1 = 3 temperatuurniveaus voor de komende 2 weken (-2, +2 of ongewijzigd);

TP2 = 3 temperatuurniveaus voor de resterende periode (-2, +2 of ongewijzigd);

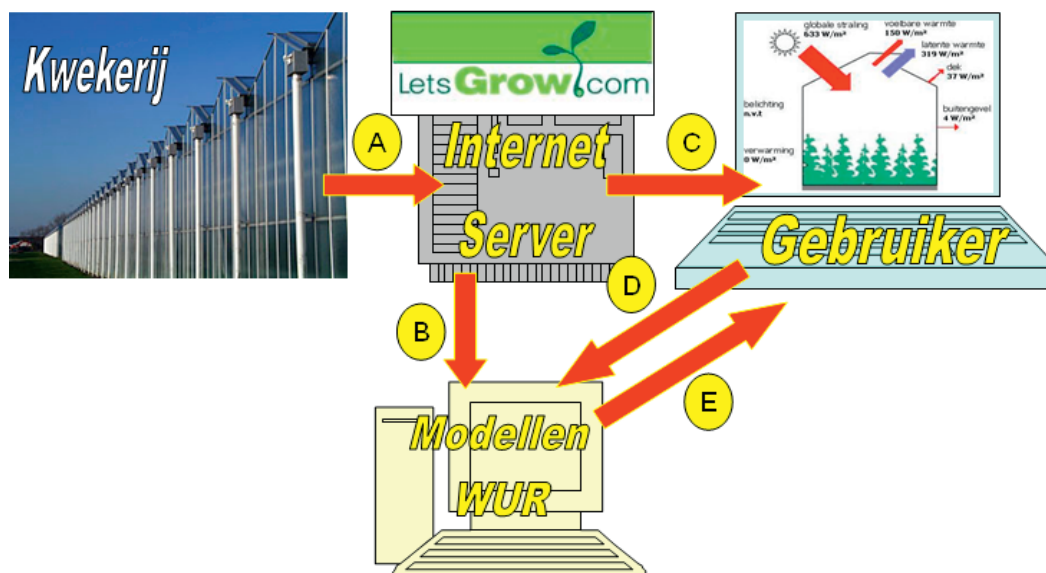
TL = 2 niveaus voor extra aanpassing ventilatiesetpoint (+2 of ongewijzigd) en

$$N = TP1 (3) * TP2 (3) * TL (2) = 18$$

Behalve informatie over de te verwachten gewasontwikkeling levert het systeem ook voorspellingen van de kasttemperatuur en het energieverbruik dat hiermee gemoeid is (Figuur 2.1.). De grafieken werden in JPEG of PNG-format geproduceerd door Matlab. Voor het outputscherf zelf werd gebruik gemaakt van HTML-code. Om snelle aanpassingen mogelijk te maken werd de HTML-code gegenereerd door een Matlab-programma.

2.3 Dataopslag en communicatie

Het datatransport werd verzorgd door LetsGrow.com. De standaard dienst van dit bedrijf omvat het automatisch ophalen van gegevens uit de klimaatcomputers van deelnemende bedrijven, het opslaan van deze gegevens in een centrale internet-database en het beschikbaar stellen ervan via een web-portal, met gebruikmaking van een systeem van beheer van toegangsrechten. In samenwerking met LetsGrow-com is in het kader van dit project speciale software ontwikkeld waarmee de adviesgenerator automatisch en rechtstreeks kon communiceren met de LetsGrow-database (Figuur 2.2.).



Figuur 2.2. Schematische weergave van de datastromen: (A) actuele instellingen van de klimaatcomputer en meetgegevens uit de kas (elke 5 min); (B) actuele instellingen van de klimaatcomputer en meetgegevens uit de kas, lokale weekweersverwachting (dagelijks); (C) Gebruiker heeft via web-portal zelf inzage in de geëxporteerde gegevens van alle deelnemende bedrijven in het project (elk gewenst moment); (D) Teler levert via e-mail tellingen en oogstregistraties van zijn gewas (wekelijks); (E) Projectteam levert via e-mail teeltscenario's aan deelnemende bedrijven (wekelijks, of zo vaak als nodig is).

2.4 Deelnemende bedrijven

Ruud van Schie B.V. in Ens is een Biologische kwekerij van tomaat en paprika. Vanaf 1997 is Ruud van Schie begonnen met een nieuw bedrijf in de Noordoostpolder. Op het 3 ha grote kassencomplex worden het ene jaar trostomaten geteeld en het andere jaar paprika's. In 2000 is er een nieuw bedrijf bijgekomen, 3 hectare groot, waar zowel trostomaten als paprika's geteeld worden. Het bedrijf is in 2006 nog met 2 hectare gegroeid en heeft nu in totaal 8 hectare kassen voor de tomaten- en paprikateelt. Vanwege de biologische principes die worden toegepast worden de gewassen in de grond geteeld, zonder gebruik van kunstmest en chemische gewasbescherming. Website: www.greenshield.nl

Fa. van der Harg van Winden in Bemmelen is een modern, conventioneel werkend paprikabedrijf van 8 ha in het Bergerdencomplex. Bijzonderheden van dit bedrijf zijn dat assimilatiebelichting wordt toegepast en dat er een eigen verpakkinglijn aanwezig is. Het bedrijf levert een belangrijk deel van de productie rechtstreeks aan de afnemer. Er wordt daardoor relatief veel aan gewasmanagement gedaan om het productieniveau zo constant mogelijk te houden. Website: www.verseoogst.nl

Kwekerij de Wieringermeer is een zeer groot, nieuw bedrijf in Middenmeer (Agriport A7). Ten tijde van de uitvoeringsfase van het project werd voor het eerst geteeld in fase 1 (20 ha), terwijl aan fase 2 werd gebouwd. Bijzonder was dat de telers, die op zich zeer competent en ervaren waren, deze gloednieuwe kas nog moesten leren kennen. De teeltwijze op zichzelf was tamelijk standaard. Website: www.kwekerijdewieringermeer.nl

2.5 Communicatie met de bedrijven

De communicatie met de bedrijven vond voornamelijk plaats via e-mail: de telers stuurden wekelijks hun tellingen op en kregen meestal dezelfde dag of een dag later de rekenresultaten teruggestuurd. Aanvankelijk hadden de grafieken het format van een PDF-file, tegen het eind van het project kregen ze per e-mail een link naar een website waar de resultaten klaarstonden. Het contact via e-mail werd aangevuld door enkele bedrijfsbezoeken om bedrijfsspecifieke informatie te verzamelen en uitleg te geven. Aan het eind van de teelt vond een uitgebreide evaluatiebespreking plaats.

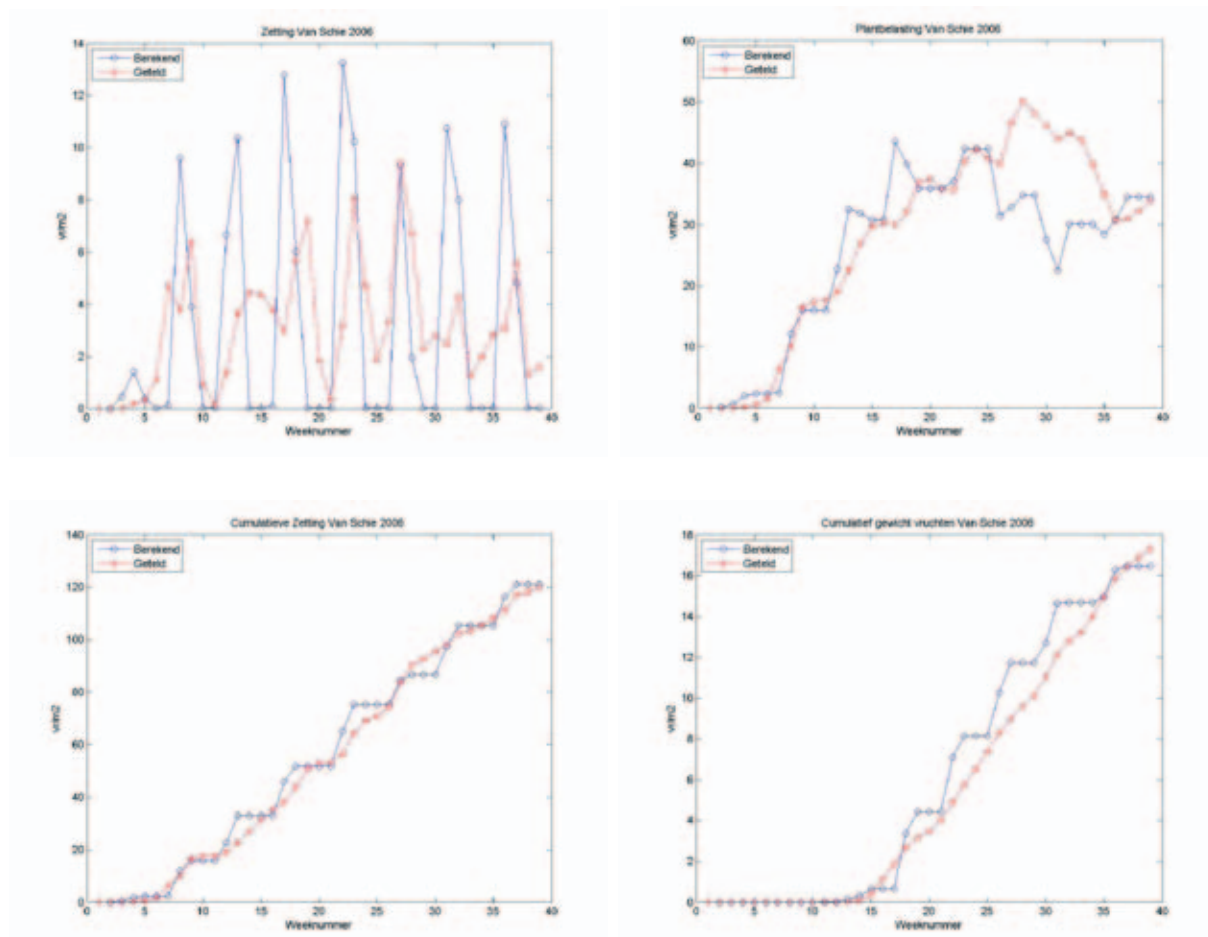
3 Resultaten

3.1 Calibratie

Voor de routineberekeningen van kasklimaat en energie is uitgegaan van het model Kaspro, terwijl voor de productieberekeningen het “Papigrow” model is gebruikt.

3.1.1 Instellen parameters kasmodel

Binnen het bestek van dit project was het niet mogelijk om de calibratie van het Kaspro-model te optimaliseren omdat geen onafhankelijke metingen van de energiestromen zijn uitgevoerd. Wat betreft berekening van de verdamping en ventilatie is Kaspro vergeleken met verschillende andere modellen. Met dit model is in eerdere projecten veel ervaring opgedaan, en de uitkomsten worden algemeen als vrij realistisch beschouwd. Wel is het mogelijk om het model voor uiteenlopende situaties wat betreft kastype en bouwjaar en technische bedrijfsuitrusting te parameteriseren. Dit is uiteraard in het hier beschreven project ook gebeurd. Voor het doel van dit project was het voldoende om voor de doelgroep herkenbare rekenresultaten beschikbaar te hebben, waarbij relatieve effecten van keuzes op het gebied van klimaatinstellingen van meer belang waren dan de absolute precisie.



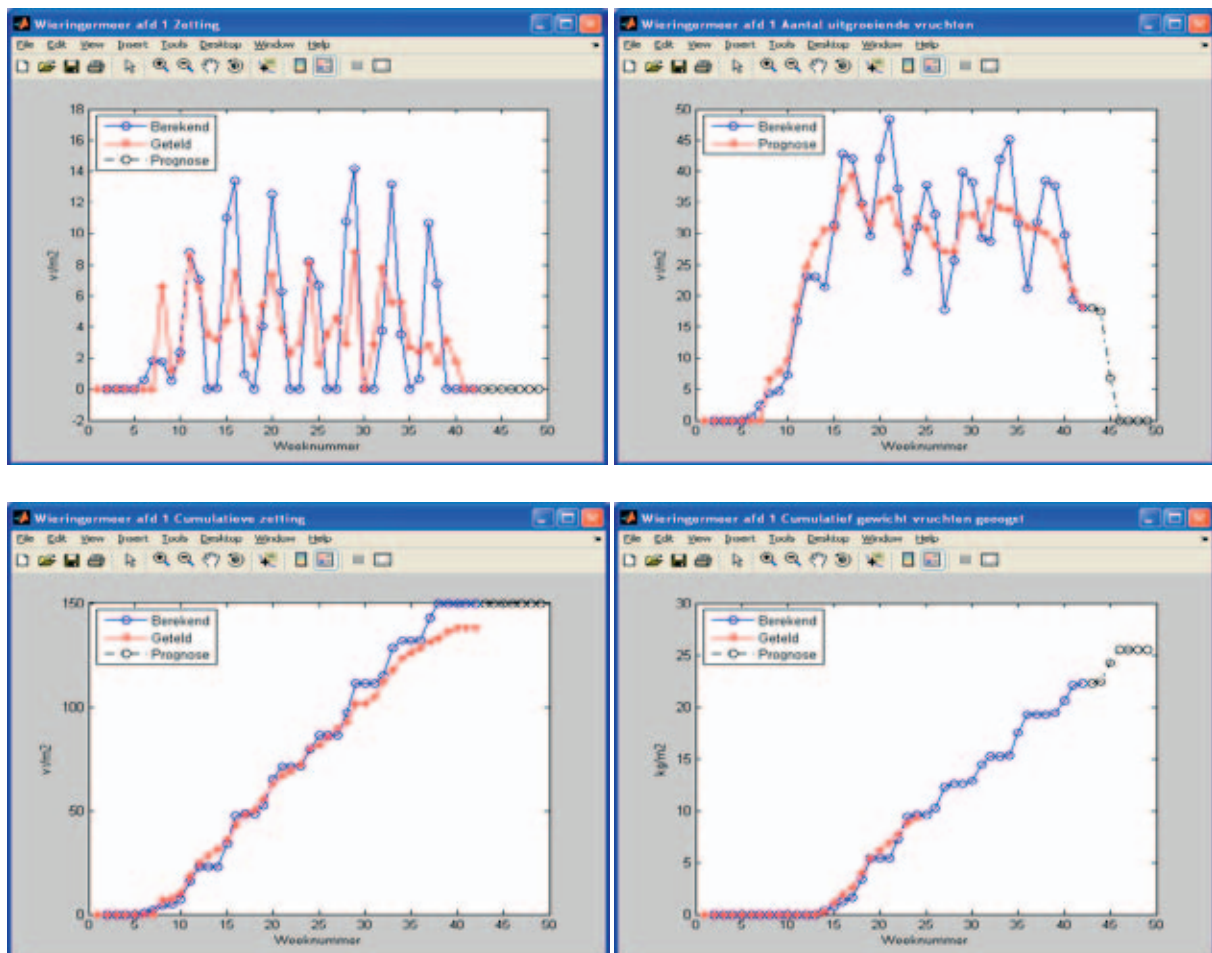
Figuur 3.1. Calibratie van het gewasmodel op teelt- en klimaatgegevens uit het voorafgaande teeltjaar (2006) op het bedrijf van van Schie. Getelde en gesimuleerde vruchtzetting (links boven) en plantbelasting (rechts boven) in $\text{vr m}^2 \text{ wk}^{-1}$, geregistreerd (rood, sterretjes) en berekend (blauw, bolletjes). Linksonder de cumulatieve zetting (vr m^2) en rechtsonder de oogst (kg m^2). Van het jaar 2007 zijn helaas geen gegevens beschikbaar door het voortijdig afbreken van de teelt.

3.1.2 Optimaliseren parameters gewasmodel

De drie bedrijven die in het kader van dit project werden gevolgd verschilden onderling in enkele essentiële aspecten. Het belangrijkste verschil is te vinden in het wortelmilieu. Het bedrijf van teler Ruud van Schie werkt volgens de principes van de Biologische teelt. Dat betekent onder andere dat het gewas in kasgrond wordt geteeld, waarbij de bemesting plaatsvindt op basis van uitsluitend natuurlijke meststoffen. Structureel liggen de productiecijfers van biologische telers ($15 - 20 \text{ kg m}^{-2} \text{ jr}^{-1}$) iets lager dan die van conventioneel werkende bedrijven ($25-30 \text{ kg m}^{-2} \text{ jr}^{-1}$). Het was de vraag of het paprika-model zo kan worden gecalibreerd dat een dergelijke teelt kan worden nagerekend. Dit model is ontwikkeld op basis van datasets afkomstig van conventionele bedrijven, dus met substraatteelt en gebruik van kunstmest. Uit Figuur 3.1. blijkt dat de calibratie van het model inderdaad zo kon worden aangepast dat de opeenvolging van zettingsgolven (frequentie), de cumulatieve zetting (vruchten per m^2) en productie (kg m^{-2}) redelijk goed overeenkwamen met de registratiecijfers. Om dit te bereiken moest de parameter voor graaddagensom per vrucht met 10% worden verhoogd, terwijl de parameters voor het lichteffect op de fotosynthese met 15% moesten worden verlaagd. De relatief hoge getelde vruchtbelasting in de periode van wk 27 – 35 kon niet met het model worden verklaard. Normaal geldt voor de wekelijkse cijfers van vruchtzetting, aantal vruchten aan de plant en het aantal geoogste vruchten dat elk van de reeksen uit de overige twee kan worden berekend, dus plantbelasting uit zetting en stuksoogst, zetting uit plantbelasting en stuksoogst en stuksoogst uit zetting en plantbelasting. In het geval van de tellingen bij van Schie uit 2006 bleken deze reeksen niet met elkaar te kloppen, waarbij inderdaad vooral de hoge plantbelasting in de tweede helft van de teelt voor tegenstrijdigheden zorgde. De cumulatieve productie is een vrij fundamenteel kengetal. De verminderde instellingen voor fotosynthese in het model waren nodig om een correcte simulatie van de cumulatieve productie te bereiken. Het gewasmodel is natuurlijk maar een vereenvoudigde afspiegeling van de fysiologische werkelijkheid. Twee voor de hand liggende verschillen tussen de biologische teelt en de gangbare steenwolteelten kunnen resulteren in de noodzaak om de fotosyntheseparameters van het model aan te passen: (i) een lager stikstofgehalte in het blad met daarmee samenhangend een verminderde fotosynthesecapaciteit; (ii) in verband met de grondteelt moest dit gewas naar verhouding meer biomassa investeren in wortels, ofwel door een verhoogde 'turn-over', of doordat er gewoon meer wortels nodig zijn om het bodemvolume te exploiteren dat nodig is voor voldoende mineraalopname.

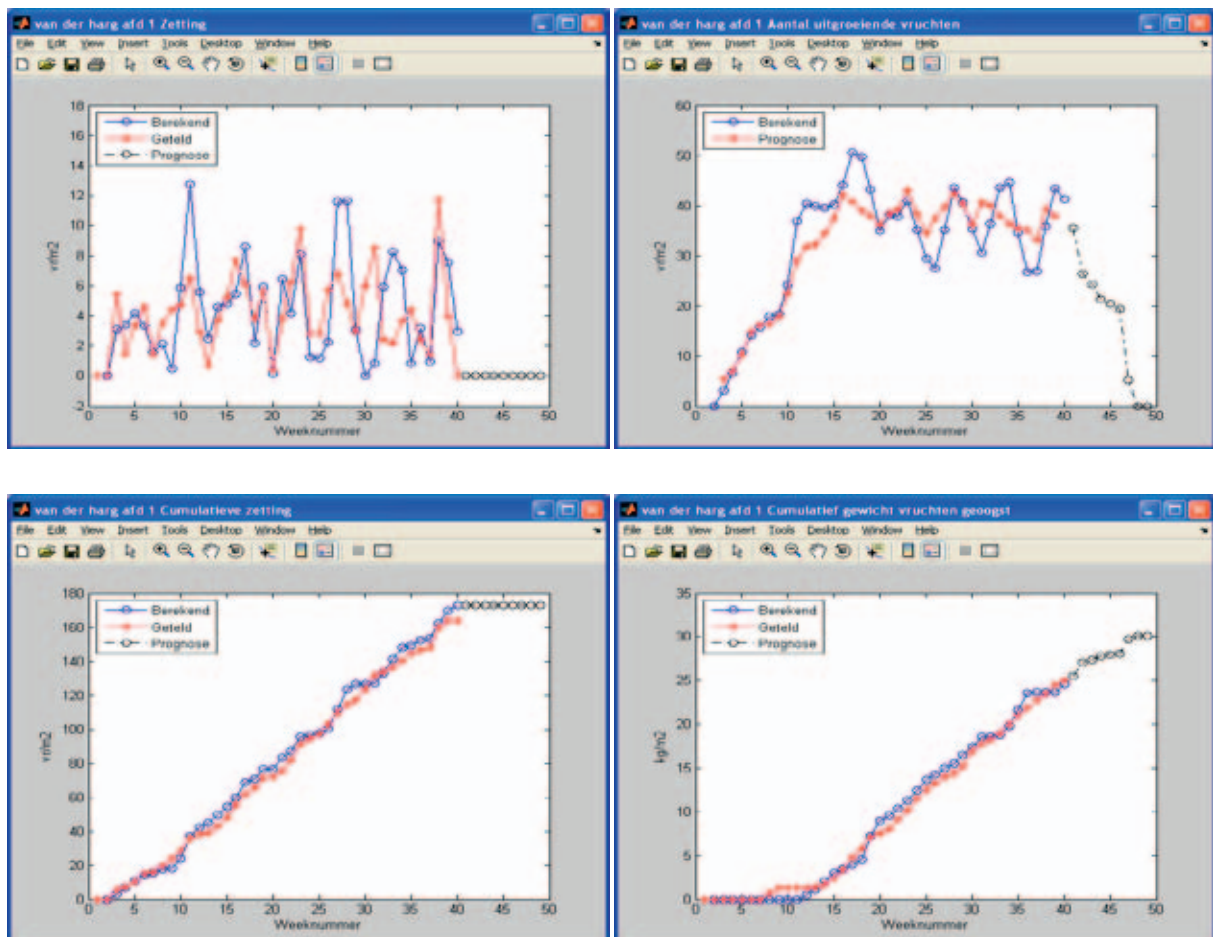
Bij de teelt van 2007 bij van Schie die in het hier gerapporteerde project werd gevolgd bleken helaas al vrij snel na het planten teeltproblemen op te duiken, waardoor al snel moest worden geconcludeerd dat het weinig zin zou hebben om aan dit gewas te meten of te rekenen. Kort na de start heeft de teler daarom ook besloten om het gewas te rooien. Er is daarom uiteindelijk voor dit bedrijf niet meegerekend met een lopende teelt.

Bij een van de overige twee bedrijven, Kwekerij de Wieringermeer in Middenmeer was geen voorafgaande teeltinformatie beschikbaar omdat het bedrijf nog te nieuw was. Voor deze teelten werd het model daarom gaandeweg het teeltseizoen 2007 gecalibreerd. Omdat op dit bedrijf het ras 'Ferrari' werd geteeld, het zelfde ras als waarvoor het model oorspronkelijk was ontwikkeld, waren de simulatieresultaten al snel relatief bevredigend (Figuur 3.2.). Te zien is dat de vruchtzetting zoals die door het gewasmodel werd berekend goed overeenkwam met de registraties die op het bedrijf zijn uitgevoerd. Zowel de frequentie van de opeenvolgende zettingsgolven (Figuur 3.2. links boven) als de cumulatieve zetting werden vrij goed gesimuleerd. De getelde aantallen vruchten vertoonden wat minder variatie dan de berekende aantallen. Dit komt doordat het model geen rekening houdt met de natuurlijke variatie die in elk reëel bestaand gewas aanwezig is. Het model rekent dus aan een 'ideaal' en homogeen gewas. Dit verschil heeft - vanuit 'technisch' oogpunt gezien - geen effect op de kwaliteit van de berekeningen, maar bleek door telers wel als bezwaarlijk ('minder in overeenstemming met de werkelijkheid, dus slechter') te worden ervaren. In week 26 is de teler in een nieuw telveldje begonnen te registreren, wat te zien is als een trendbreuk in de grafieken. Na week 30 werd de zetting iets te laag berekend. Na wk 25 ontbreken helaas de oogstgegevens (Figuur 3.2. rechts onder). Op basis van de tamelijk exacte simulatie van de kilo's gedurende de eerste helft van het teeltseizoen mag worden verondersteld dat de door het model berekende oogstgewichten in de tweede helft ook redelijk betrouwbaar waren.

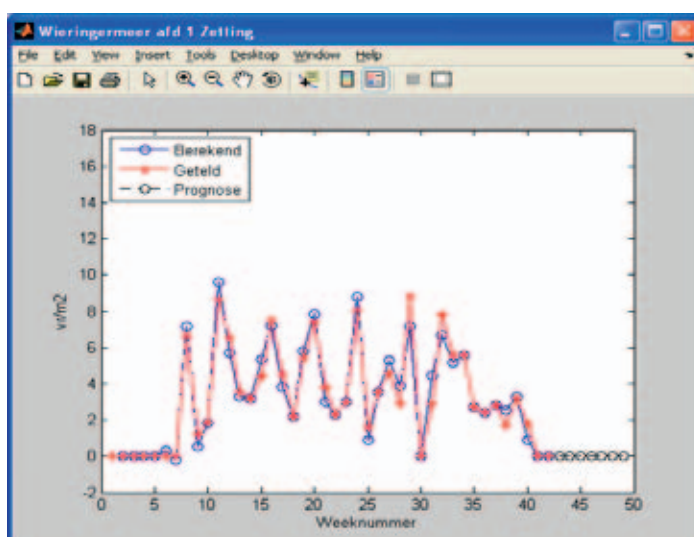


Figuur 3.2. Getelde en gesimuleerde vruchtzetting (links boven) en plantbelasting (rechts boven) in $\text{vr m}^{-2} \text{wk}^{-1}$, geregistreerd in 2007 op het bedrijf Wieringermeer (rood, sterretjes) en berekend (blauw, bolletjes). Linksonder de cumulatieve zetting (vr m^{-2}) en rechtsonder de oogst (kg m^{-2}). Vanaf wk 26 zijn de telgegevens afkomstig uit een ander telveldje. Het bedrijf gaf er de voorkeur aan om na week 24 geen productiecijfers in $\text{kg m}^{-2} \text{wk}^{-1}$ meer openbaar te maken. Gegevens van de geoogste aantallen zijn wel van het complete teeltseizoen voorhanden.

Op het bedrijf van van der Harg werd in de gevolgte teelt in het jaar 2007 het ras 'Spider' geteeld. Het model kreeg redelijk grip op de dynamiek van de vruchtzetting en productie (Figuur 3.3.) maar wel wat minder goed dan bij het andere bedrijf. Bij navraag bleek dat de teeltchef zeer actief stuurde op een gelijkmatig afzetpatroon door middel van vruchtsnoei en groen of bont oogsten. Aanvankelijk kon het adviesstelsel hier niet mee omgaan, maar gaandeweg de teelt zijn aanpassingen aan de software ontwikkeld die daarmee enigszins rekening konden houden (zie de volgende paragraaf). De beperking hierbij is dat een beslissing om groen of bont te oogsten niet te voorspellen was, evenmin als het effect daarvan op de vruchtzetting in de weken daarna.



Figuur 3.3. Getelde en gesimuleerde vruchtzetting (links boven) en plantbelasting (rechts boven) in $\text{vr m}^{-2} \text{wk}^{-1}$, geregistreerd op het bedrijf van der Harg (rood, sterretjes) en berekend (blauw, bolletjes). Linksonder de cumulatieve zetting (vr m^{-2}) en rechtsonder de oogst (kg m^{-2}).



Figuur 3.4. Het zelfde plaatje als Figuur 3.2. links boven, maar dan met de berekende vruchtzetting gecorrigeerd voor de getelde aantallen.

3.1.3 Correctie getelde zetting

Het voorspellen van vruchtzetting was duidelijk het meest gevoelige (en meest dynamisch berekende) element van de productiesimulatie. Niet alleen reageerde de berekende zetting sterk op veranderende klimaatomstandigheden (vooral licht, CO₂ en temperatuur), maar ook op de toestand van het gewas zelf (vooral de plantbelasting). Dit gold des te sterker omdat de plantbelasting mede bepaald werd door de zetting. En uiteindelijk waren zetting en plantbelasting natuurlijk bepalend voor de productie. Daarnaast bleek de zetting ook het onderdeel waar de telers het meest kritisch naar keken. Om die reden had het adviessysteem de mogelijkheid om de berekende zetting te corrigeren op basis van de getelde zetting (zie ook Buwalda *et al.*, 2009a). Door te werken met getelde zetting werd ook meer rekening gehouden met de natuurlijke variatie binnen het gewas, die er voor zorgt dat de getelde zettingsgolven minder ‘alles-of-niets’ zijn dan de zetting berekend door het model. De ongecorrigeerde berekening werd regelmatig uitgevoerd om de calibratie van het model te controleren, om zodoende een indicatie te hebben van de betrouwbaarheid van de prognoses. Voor het berekenen van de telersadviezen vormden de gecorrigeerde berekeningen de basis.

3.2 Evaluatie met gebruikers

3.2.1 van Schie

De communicatie met teler van Schie verliep via het projectteam van het project Bio-optimaalkas. De te volgen teelt werd al in een vroeg stadium gestopt. Hierdoor is er met betrekking tot dit bedrijf inhoudelijk geen noemenswaardige interactie ontstaan over de toepassing van teeltadvisering.

3.2.2 Energie bij van Schie

In de kas bij van Schie werd geëxperimenteerd met klimatisering volgens het Aircokas-principe, wat ruwweg kan worden beschouwd als een tussenstap tussen de semi-gesloten kas en Het Nieuwe Telen. Voor dat doel was nogal wat meetapparatuur opgesteld. Juist van het meerekenen met deze teelt en het modelmatig verkennen van stuuropties en grenzen werd het meest verwacht wat betreft energiebesparing. Het is daarom extra teleurstellend geweest dat juist deze teelt voortijdig is beëindigd.

3.2.3 van der Harg

De communicatie met het bedrijf van van der Harg verliep via de teeltchef. Deze heeft een verleden als potplantenteler, waardoor hij een wat ander perspectief op de teelt heeft dan meeste van zijn collega-paprikatelers. Dit komt vooral tot uiting in een sterk ketengerichte benadering van de teelt. Het bedrijf heeft een eigen sorteer- en verpakkingslijn en probeert een zo groot mogelijk deel van de productie direct bij klanten (zoals lokale supermarkten) af te zetten. Omdat dit aanzienlijk meer oplevert dan de veilingprijs wordt er gestreefd naar een zo gelijkmatig mogelijke productie met vruchten van constante kwaliteit en grootte. Om dit te bereiken wordt actief gestuurd, onder andere door heel regelmatig de vruchten van het rode ras ‘Spider’ groen te oogsten. Vermoed werd dat dit sturen ten koste ging van de maximale productie, maar dat werd voor lief genomen. Als teeltdoel werden dus niet de kilo’s geoptimaliseerd maar de economische waarde van de productie.

Doordat op dit bedrijf het gewas meer gestuurd wordt dan op de meeste paprikabedrijven, ziet de teeltchef als belangrijkste nuttige bijdrage van een modelondersteund adviessysteem de mogelijkheid om vooraf een indicatie te krijgen van de effecten van teeltmaatregelen zoals vruchtsnoei en groen oogsten. Verder wordt belang gehecht aan de prognose van vruchtzetting en oogst vanwege de gewenste gelijkmatigheid in verband met de directe levering aan grote klanten. Het gewasmodel was niet berekend op het correct verwerken van de vele ingrepen (vruchtsnoei en groen oogsten) die op dit bedrijf werden toegepast. Hierdoor waren de simulaties van mindere kwaliteit dan op een bedrijf waar men het gewas een meer 'naturel' plantbelasting laat ontwikkelen. Desondanks groeide in de loop van de teelt het vertrouwen van de teeltchef in de berekeningen. Bepalend daarbij waren enkele situaties waarin de prognoses van het gewasmodel tegen de intuïtie van de teler in gingen maar toch bleken te kloppen. Aan het eind van de teelt gaf hij aan dat hij het belang van dergelijke modellen duidelijk zag, en dat hij zeker interesse had om een volgend seizoen weer mee te doen.

3.2.4 Energie bij van der Harg

Energiebesparing werd op dit bedrijf zeer belangrijk genoemd, met name vanwege het kostenaspect. Er werd om die reden ook temperatuurintegratie toegepast. Er werd echter geen direct verband gelegd tussen klimaatmaatregelen ten behoeve van energiebesparing en gewassturing, hoewel er zeker sprake was van belangstelling voor dat verband. De informatie die het adviessysteem wekelijks leverde was (zeker in het begin) niet toereikend om hierin verandering te brengen. De advisering op het gebied van energie concentreerde zich op het tonen van de effecten van stapsgewijze aanpassingen van het stook- en luchtingssetpoint in de komende periode. De effecten werden getoond als verschuivingen van de energieverbruik-grafiek ten opzichte van de ongewijzigde instellingen, in samenhang met prognoses over vruchtzetting, plantbelasting en oogst. Hoewel de getoonde besparingen, afhankelijk van het seizoen, wel 30 % of meer konden belopen, werd dat door de teler niet als aanleiding gezien om zijn klimaatregelstrategie te wijzigen. Dat had verschillende redenen: op het bedrijf werd al temperatuurintegratie toegepast, waardoor de referentie eigenlijk niet zuiver was en teler het gevoel had dat een groot deel van de voorgespiegelde winst op zijn bedrijf al werd gerealiseerd. Verder werd aangegeven dat de betrouwbaarheid van het gewasmodel eerst beter zou moeten zijn aangetoond voordat het als leidraad zou kunnen dienen voor flinke afwijkingen van de gangbare teeltstrategie. Algemeen werd verwacht dat het voor langere tijd aanhouden van een verlaagde teelttemperatuur zou leiden tot het uit balans raken van het gewas. Wel werd verwacht dat deze benadering van modelgebaseerd teeltadvies in de toekomst kan leiden tot een nuttig instrument dat in een verbetering van de teelt en een verhoging van de energie-efficiëntie zal resulteren. De energiewinst wat betreft dit bedrijf bestond dus vooral uit een bevestiging van de ingeslagen weg van model-gebaseerde teeltadvisering en de ervaring die is opgedaan bij deze poging tot toepassing van het principe.

De vaste teeltadviseur van dit bedrijf was niet direct betrokken bij de informatie-uitwisseling rondom het adviessysteem.

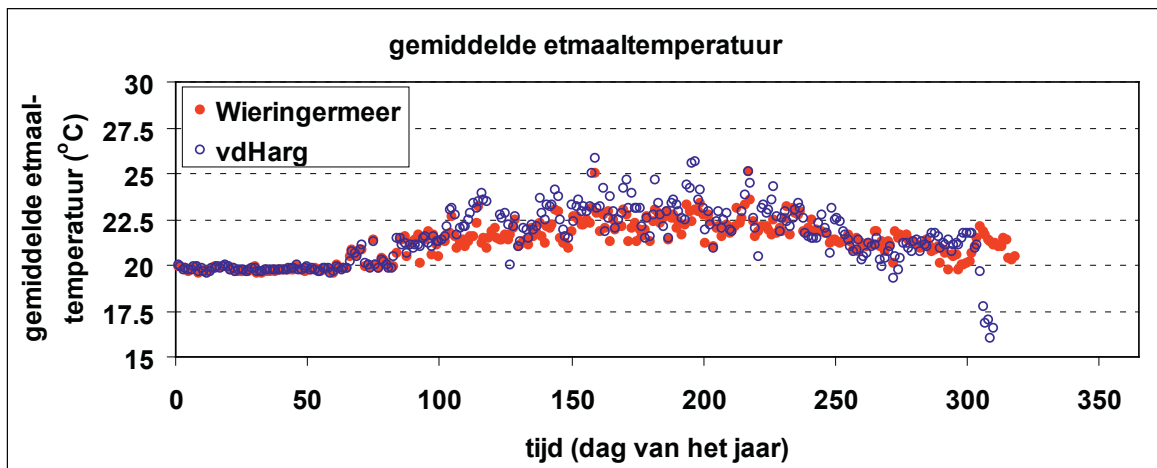
3.2.5 Kwekerij de Wieringermeer

Kwekerij de Wieringermeer is een groot nieuw bedrijf. De communicatie rondom het adviessysteem liep voornamelijk via de compagnon verantwoordelijk voor de teelt. Het was erg druk op het bedrijf, met veel parallelle teelten, het inwerken van nieuw personeel, het uittesten van nieuwe installaties en nieuwbouwactiviteiten, zodat er weinig tijd was om zich in het systeem te verdiepen.

Interessant aspect op dit bedrijf was dat het zo nieuw was dat men nog druk bezig was om de bestaande ervaringskennis in de nieuwe situatie te herijken. Deze situatie vertoont duidelijke gelijkenissen met veranderingen die overschakeling op een innovatieve, energiezuinige teeltmethode (zoals 'Het Nieuwe Telen') met zich meebrengen.

Ook op dit bedrijf was er sprake van een geleidelijke groei van vertrouwen in de uitkomsten van de modelberekeningen. Doordat op dit bedrijf minder gestuurd werd volgde het gewas meer een normaal ontwikkelingstraject, waardoor de kwaliteit van de simulaties beter was dan bij van der Harg. Ook bij het meerekenen met deze teelt is het enkele malen voorgekomen dat het model correct een bepaalde gewasreactie voorspelde die door de teler niet werd verwacht.

Na afloop van de teelt gaf ook deze teler aan dat hij duidelijk meerwaarde zag van het toepassen van het adviesstelsysteem, en dat hij er in het volgende teeltseizoen graag mee door zou gaan. De belangrijkste meerwaarde die de (teeltgerichte) teler zag van toepassing van een dergelijk adviesstelsysteem was het standaardiseren van de communicatie tussen de bedrijfsleider verantwoordelijk voor de teelt en de teeltchefs, waarvan er op dit grote bedrijf meerdere rondliepen. Gehoopt werd dat daardoor de verschillende teeltchefs elkaar ook zouden kunnen vervangen bij de wekelijkse besprekingen van de stand van het gewas de evaluatie van het teeltverloop de afgelopen week en de instellingen en maatregelen voor de komende week.



Figuur 3.5. Verloop van de gemiddelde etmaaltemperatuur in de kas op de bedrijven van der Harg en Wieringermeer. De temperatuur bij van der Harg varieerde aanzienlijk meer dan die bij de Wieringermeer. Dit lag deels aan de toepassing van temperatuurintegratie bij van der Harg, deels ook aan een actievere inzet van de klimaatregeling om het gewas te sturen.

3.2.6 Energie bij kwekerij de Wieringermeer

Ook op dit bedrijf was energie een belangrijk thema, waarbij werd geïnvesteerd in de modernste bedrijfsuitrusting, met o.a. een warmtekracht-installatie (WKK). Ook op dit bedrijf werd er echter geen direct verband gelegd tussen gewasmanagement en energie-efficiëntie. Teeltmanagement en energiemanagement vielen onder verantwoordelijkheid van twee verschillende compagnons. De verantwoordelijke voor het energiemanagement was gedurende het complete teeltseizoen waarin dit project liep volledig in beslag genomen door de nieuwbouw-activiteiten. Bij de evaluatie van het project werd echter wel gesteld dat het idee om bij elke gewas-stuuractie ook meteen de energiekosten in beeld te krijgen toekomstpotentieel heeft. Ook wat betreft dit bedrijf bestond de energiewinst van het project dus uit een bevestiging van het principe van model-ondersteunde teeltadvisering en de ervaring die is opgedaan bij deze poging tot toepassing van het principe. Ook op dit bedrijf was overigens de vaste teeltadviseur niet direct betrokken bij de informatie-uitwisseling rondom het adviesstelsysteem.

3.3 Informatieuitwisseling binnen het projectteam

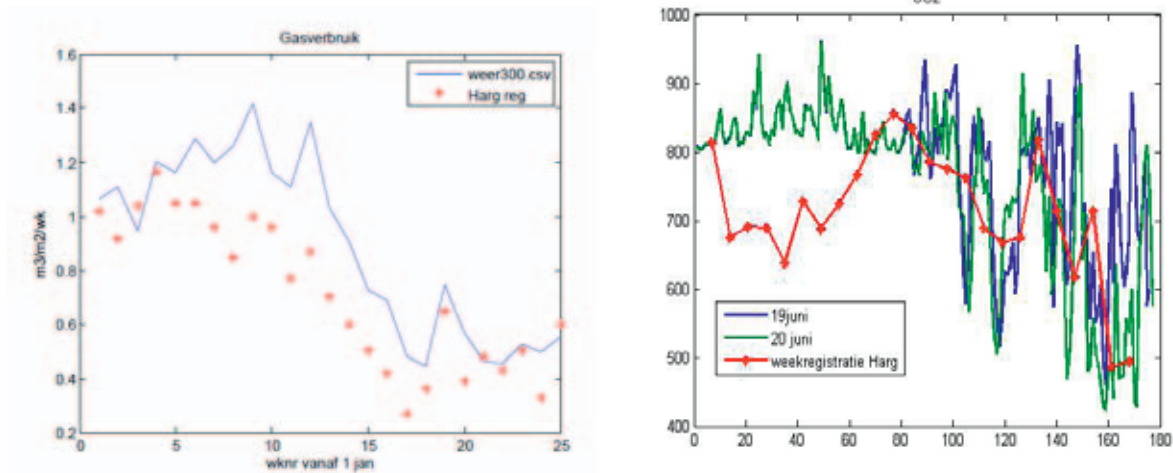
De geautomatiseerd rekenende modellen leverden bij elke rekenslag een grote hoeveelheid informatie op (zie bijlage I t.m. IV). Of de rekenresultaten kloppen is afhankelijk van de juistheid van de gegevens die als input worden gebruikt (weerdere data, gewasregistraties), de gekozen fysieke kenmerken van de kas en het gewas waaraan wordt gerekend, en de gekozen instellingen. Deze instellingen werden deels automatisch geschat (Figuur 2.1), en deels handmatig ingevoerd. De juistheid van de berekeningen kon worden gecontroleerd door vergelijking met registraties afkomstig van het bedrijf zelf. In principe kunnen overigens die registraties ook nog afwijkingen bevatten. Daarnaast konden voor processen waarvoor verschillende modellen beschikbaar waren de uitkomsten onderling worden vergeleken. In dit project werd het controleren van de juistheid van de berekeningen als een verantwoordelijkheid van het projectteam beschouwd. Van de doelgroep (de telers) kom niet worden verwacht dat ze op procesniveau meepuzzelden vanwege het ontbreken van de benodigde specialistische kennis, maar ook praktisch vanwege de aanzienlijke hoeveelheid tijd die nodig was om alle resultaten te beoordelen. In de loop van het project werd daarom binnen het projectteam wekelijks aandacht besteed aan het beoordelen van de kwaliteit van de modelberekeningen.

3.3.1 Kasklimaat

Het kasklimaat/energiemodel Kaspro is een instrument dat een voorspelling kan geven van het toekomstige kasklimaat in afhankelijkheid van het verwachte weer en gerelateerd aan de bedrijfsspecifieke omstandigheden. Daarnaast moet dit model ook nog aangeven hoe groot het energieverbruik is dat nodig is voor een bepaald kasklimaat. Zowel de relaties tussen buitenklimaat en kasklimaat en tussen kasklimaat en energieverbruik zijn van veel factoren afhankelijk. Denk hierbij aan de kasuitrusting (Heeft het bedrijf een scherm en, zo ja, wat voor type scherm? Welk verwarmend oppervlak hebben de verwarmingsnetten? Heeft het bedrijf een grote buffertank zodat er veel CO₂ gedoseerd kan worden? Heeft het bedrijf een luchtbevochtigingsinstallatie zodat overtollige warmte bij een relatief klein ventilatiedebiet kan worden afgevoerd?), maar ook aan kasklimaat-regelaar instellingen (Liggen de stook- en ventilatielijnen ver uit elkaar of dicht op elkaar? Hoe is de schermstrategie? Welke minimum buistemperaturen worden er gebruikt en voor welk verwarmingsnet gelden die?). Wanneer deze zaken bekend zijn is het kasklimaat-simulatiemodel KASPRO bij uitstek geschikt om de gezochte relaties op te leveren. Immers, KASPRO beschrijft niet alleen de fysische processen in de kas, maar beschikt ook over een behoorlijk praktijkgetrouwe representatie van een kasklimaatregelaar.

De gegevens die KASPRO ten aanzien van de kasklimaatcondities berekent betreffen de kasluchttemperatuur, maar ook de hoeveelheid licht die het gewas bereikt (eventueel aangevuld met assimilatiebelichting), de relatieve luchtvochtigheid en de CO₂-concentratie, en daarnaast de benodigde hoeveelheid energie om dit klimaat onder de gegeven omstandigheden te realiseren. Om deze kasklimaat-grootheden te bepalen berekent KASPRO een heel scala aan onderling samenhangende warmte, vocht en CO₂-stromen, maar feitelijk zijn die tegen de achtergrond van dit project slechts interne hulpvariabelen. Het gaat immers uiteindelijk om de vraag welke gewasproductie uiteindelijk staat tegenover de hoeveelheid energie die is geïnvesteerd om een bepaald kasklimaat te realiseren, en die vraag moet worden beantwoord door een gewasgroeisimulatiemodel.

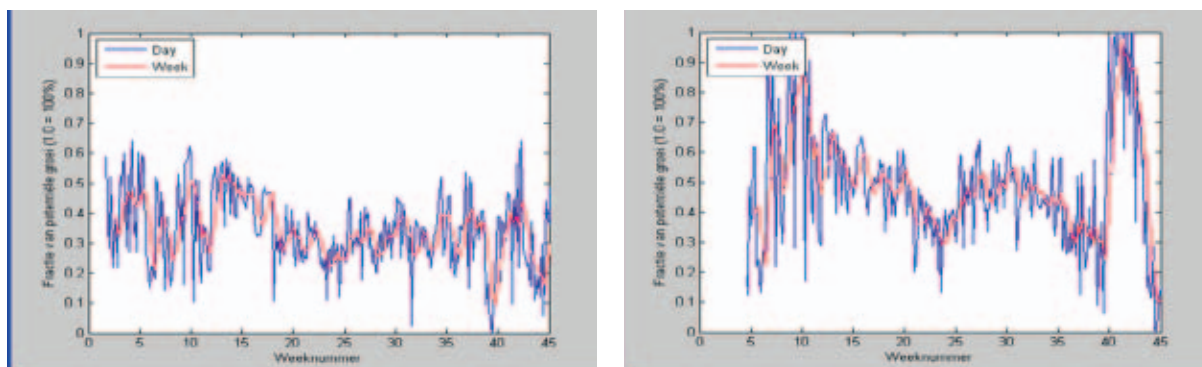
In de praktijk veranderen telers de instellingen van hun klimaatcomputer regelmatig. In het adviesstelsel zoals dat in dit project werd toegepast werd maar één instelling gebruikt. Hierdoor was bij de evaluatie van de kwaliteit van de rekenresultaten regelmatig te zien dat voor de meest recente weken de berekende en gemeten waarden aanzienlijk beter in overeenstemming waren dan in de periode daaraan voorafgaand. Het is technisch goed mogelijk om Kaspro per periode van het jaar of tijdvak binnen een etmaal met verschillende instellingen te laten rekenen, en dat is in een vervolgproject ook zo gerealiseerd (Energiezuinige Teeltplanning voor Potplanten).



Figuur 3.6. Twee voorbeelden van tussentijdse vergelijkingen van berekend en gemeten waarden die betrekking hebben op klimaat en energie. Links berekend en geregistreerd gasverbruik, rechts berekende en gemeten CO_2 -concentratie. Het aantal grafieken dat routinematig werd geëvalueerd nam in de loop van het project toe tot enkele tientallen per week.

3.3.2 Gewasmodellen

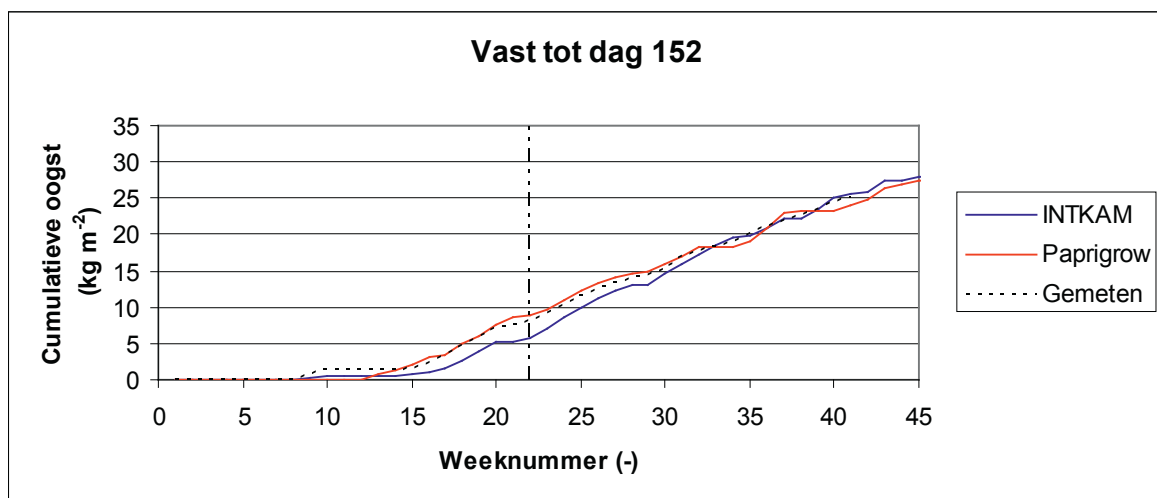
Om te kunnen bestuderen in hoeverre verschillende gewasgroeimodellen tot vergelijkbare conclusies komen is in dit project gebruik gemaakt van twee van zulke modellen, te weten Papigrow en Intkam. Behalve als instrument voor de voorspelling van de ontwikkeling van het gewas in de toekomst kunnen deze modellen worden gebruikt als tool om meer inzicht in de stand van het gewas te kunnen verkrijgen dan aan de buitenkant is te zien. Daarmee zijn deze modellen tevens te beschouwen als 'Soft-sensor' die, nog voordat uiterlijke kenmerken zichtbaar worden, iets kunnen zeggen over de interne fysiologische toestand van het gewas ('plantbalans'). Beide modellen gebruikten het door KASPRO opgestelde kasklimaat, aangevuld met door de tuinder waargenomen gegevens (het aantal aangelegde en geoogste vruchten, geoogste kilo's) als input. Papigrow en Intkam zijn beide dynamische modellen die de gewasgroei- en ontwikkeling simuleren. Dynamisch omdat er stapsgewijs door de tijd heen wordt gerekend en de situatie van het heden van invloed is op de situatie op het volgende moment. De groei van organen wordt berekend (in $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$), waaruit op ieder moment de orgaangewichten (in g m^{-2}) worden afgeleid. Ook de ontwikkeling van het paprikagewas wordt gesimuleerd, uitgedrukt in het aantal vruchten dat door de tijd heen is gevormd. Papigrow en Intkam kennen beide beschrijvingen van fotosynthese, onderhoudsademhaling, netto groei, drogestofverdeling over de organen, vruchtvorming en oogstmoment. Intkam simuleert daarnaast de gewasverdamping en wateropname, en de nutriëntenbalans.



Figuur 3.7. Een voorbeeld van een 'interne' gewasparameter, de 'Sink satisfaction' van de vruchten. Hiermee wordt uitgedrukt in welk deel van de potentiële groei van de vruchten het gewas dagelijks kan voorzien ($1.0 = 100\%$). Door onderlinge concurrentie krijgt elke individuele vrucht minder assimilaten dan hij zou kunnen verwerken, waardoor de vruchten uiteindelijk kleiner blijven dan ze zonder concurrentie zouden zijn geworden.

Intkam levert dus naast gewasfysiologische output ook nog informatie over meer fysische processen, zoals de gewasverdamping die op grond van de klimaatcondities verwacht mag worden. Aan gewasverdamping is in dit project extra aandacht besteed vanwege de actualiteit van het thema, en omdat er vier verschillende modellen beschikbaar waren (zie paragraaf 3.3.3). Papigrow en Intkam verschillen in het niveau van detaillering van de beschrijving van onderliggende fysiologische processen. Ten aanzien van vruchtzetting kent Papigrow een empirische beschrijving afhankelijk van het verschil tussen de berekende belastbaarheid (draagcapaciteit) van het gewas en de berekende assimilatenvraag van de vruchten. Bij Intkam zijn de gesimuleerde zettingsgolven de resultante van potentiële vruchtaanleg, abortie, en fysiologische groeiduur voor de oogst plaatsvindt. Vergelijkbare verschillen treden op bij de beschrijving van andere fysiologische processen. Het maakt het ene model niet beter of slechter dan het andere; ze geven beide slechts op een andere manier een beschrijving van de werkelijkheid. Toepassing van beide modellen geeft de mogelijkheid om op een meer genuanceerde manier een oordeel te vormen over de toekomstverwachtingen.

Telers zijn zeer geïnteresseerd in de zetting. Samen met de oogst van vruchten resulteert dit in de plantbelasting, die men zo stabiel mogelijk wil houden. Zetting bij paprika kent een golfpatroon dat wordt veroorzaakt door de relatief sterke vraag naar assimilaten door groeiende vruchten aan de plant, die voorkomt dat pas gevormde jonge vruchtjes voldoende assimilaten kunnen aanzuigen. Deze jonge vruchtjes aborteren. Pas als er voldoende reeds bestaande vruchten zijn afgerijpt, en er voldoende assimilaten zijn om ook aan de vraag van zeer jonge vruchtjes te voldoen, kunnen deze laatste doorgroeien. Dit resulteert in een golfbeweging van de zetting, en in de regel ook – met enige vertraging – in een golfbeweging van de oogst. De teler wil graag inzicht in de verwachte golfbeweging van de oogst omdat dit in rechtstreeks verband staat met eventuele leveringsafspraken en –wensen. Hiervan afgeleid is de interesse in de zettingsgolven. Interesse in een eventuele golfbeweging van de plantbelasting is ook gekoppeld aan oogstpatronen, maar ook aan het stabiliseren van de assimilatenbalans (Elings *et al.*, 2006), wat op theoretische gronden tot hogere oogsten zou kunnen leiden.



Figuur 3.8. Voorbeeld van vergelijking van oogstgegevens tussen de twee gewasmodellen Intkam en Papigrow

De modellen worden gevoed met gewaswaarnemingen, zodat de plantbelasting van de modellen sporen met de werkelijke plantbelasting. De vraag is bijvoorbeeld of het model een voorspelling kan geven van de eerstvolgende zettingsgolf en de eerstvolgende oogstgolf. Het zou mooi zijn als meerdere golven gesimuleerd zouden kunnen worden, maar naarmate de voorspelde periode langer is, neemt de onzekerheid in de gesimuleerde gewasontwikkeling toe. Immers, de langere termijn ontwikkeling is gebaseerd op het gemiddelde weer, terwijl in het verloop van de gewasontwikkeling die uiteindelijk in werkelijkheid zal optreden zal worden beïnvloed door feitelijke weersomstandigheden die een doorwerkend effect op de gewastoeestand zullen hebben. Tabel 3.1 geeft de resultaten van een vergelijking tussen Papigrow en Intkam. Beoordeeld of de eerstvolgende zettings- en oogstgolf adequaat zijn gesimuleerd in termen van moment en omvang. Per eerste van iedere maand werd een simulatie uitgevoerd, waarbij de zettings- en oogstgegevens tot aan dat moment aan het model werden opgelegd (de handmatige invoer van Figuur 3.4.). In geval van beide bedrijven werd in meer dan de helft van de gevallen de eerstvolgende piek goed gesimuleerd. Overigens bleek bij de evaluatie met de telers achteraf dat op het bedrijf van van der Harg zeer actief gestuurd werd door middel van vruchtdunning en groen oogsten van vruchten.

Deze complexe informatie kon niet door de modellen worden verwerkt, waardoor de rekenresultaten niet goed overeenkwamen met de werkelijkheid. De rekenresultaten waren aanzienlijk beter voor het andere bedrijf in de Wieringermeer, waar het aantal uitgroeiende vruchten aan de plant zich vele meer 'natuurlijk' ontwikkelde. De geconstateerde beperking van het model heeft in een later project geresulteerd in de ontwikkeling van een verdere ontwikkeling van het systeem voor verwerking van gewasregistraties in de modelberekeningen.

Tabel 3.1. Vergelijking van simulatieresultaten van de modellen Intkam en Papigrow met betrekking tot zetting en oogst bij van der Harg. Er is beoordeeld of de eerstvolgende piek goed werd voorspeld.

Vrucht-dynamiek	Moment	Papigrow		Intkam	
		moment	hoogte	moment	hoogte
Zetting	1 april	te vroeg (1-2 wk)	te hoog (11 ipv 8)	OK	OK
	1 juni	OK	OK	OK	OK
	1 aug.	OK	te laag (7 ipv 9)	OK	te laag (7 ipv 9)
Oogst	1 april	Te vroeg (2 wk)	Te laag (5 ipv 7)	Te vroeg (1-2 wk)	Te laag (5 ipv 7)
	1 juni	OK	OK	OK	OK
	1 aug.	OK	OK	OK	OK
Plant-belaasting	1 april	iets hoger fluctuatie dan de waarnemingen		iets hoger niveau dan de waarnemingen	
	1 juni				
	1 aug.				

3.3.3 Verdamping

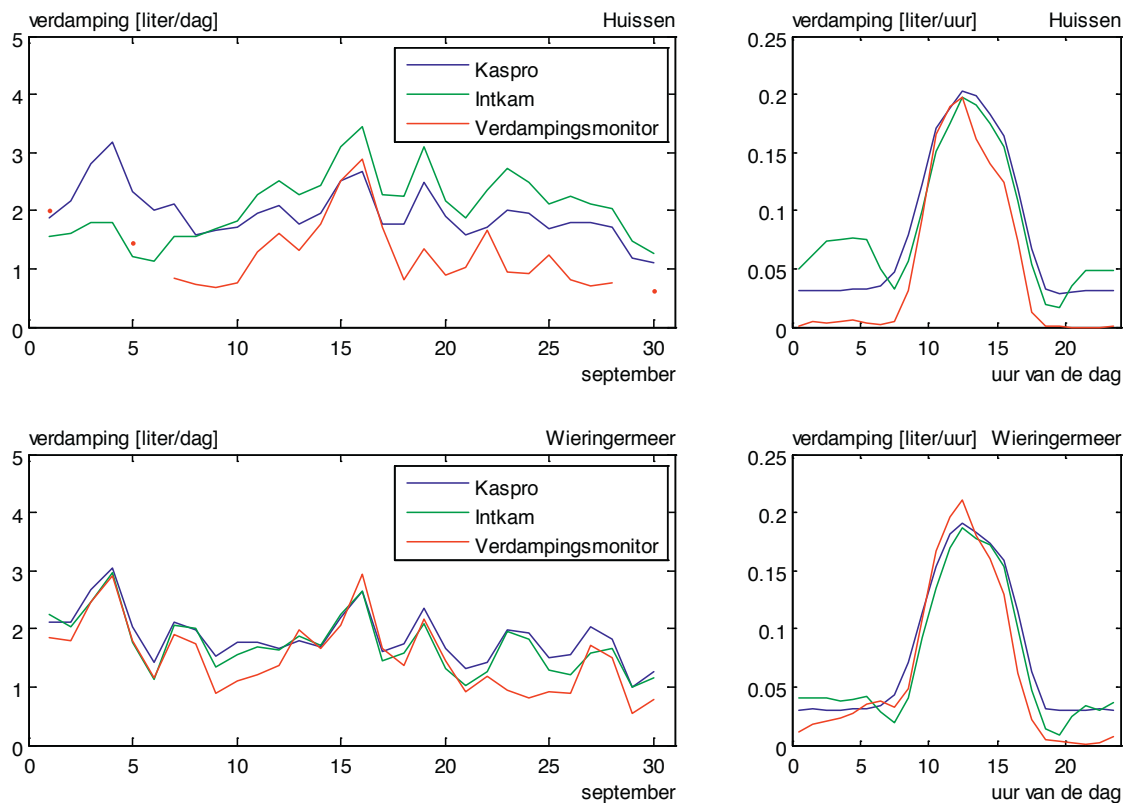
De verdamping van een kas-gewas is een zeer belangrijke grootheid. Middels het verdampen van water transporteert het gewas nutriënten naar de bladeren en andere organen. Daarnaast vervult de gewasverdamping een zeer belangrijke rol in de koeling van de bladeren. Zonder verdamping zouden bladeren bij hoge zonbelasting al gauw 5 tot 10 °C warmer zijn dan gebruikelijk. Het vocht dat doorverdamping in de kaslucht komt moet worden afgevoerd vanwege de kans op infectieproblemen (met name Botrytis) die bij hoge vochtgehalten kunnen optreden. Voor de afvoer van vocht is het onder bepaalde omstandigheden voldoende om de luchtramen te openen, maar er is toch regelmatig extra warmte bij nodig. Een aanzienlijk deel van het verbruik van fossiele brandstoffen in kassen hangt samen met vochttafvoer. De energiebehoefte van het teeltproces wordt daarom in aanzienlijke mate door ontvochtiging bepaald (ongeveer de helft, Bootsvelt & van Wolferen, 2006).

Vanwege het belang van deze grootheid is in het voorliggende project een vergelijking gemaakt tussen de verdamping die door KASPRO, Intkam en de verdampingsmonitor worden berekend.

Alle drie deze modellen werken op grond van een energiebalans die zegt dat de energie die naar het gewas (voorgesteld als een grote hoeveelheid bladmassa) stroomt in een bepaalde mate wordt omgezet in latente warmte, en dus in verdamping. Deze benadering is overigens niets specifiek voor de drie genoemde modellen, maar is zeer algemeen in (kas) klimaat-modellen. Het verschil tussen individuele modellen zit dan ook niet in het werkingsprincipe, maar in de berekening van de energiestroom naar het gewas en de verdeling van de toegevoerde energie in voelbare en latente warmte.

De energiestroom naar het gewas verloopt langs drie processen, namelijk de absorptie van kortgolvlige straling (zonlicht, kunstlicht), de absorptie van langgolvlige straling (thermisch infra-rood) en de voelbare warmteuitwisseling met de kaslucht. Voelbare warmte en langgolvlige straling zijn overdag meestal netto negatieve grootheden (verliesposten van energie), en 's nachts meestal positieve grootheden (het gewas is dan kouder dan zijn omgeving). KASPRO en Intkam hebben beide een uitgebreid stelsel vergelijkingen waarlangs de berekening van deze energiestroom plaats vindt.

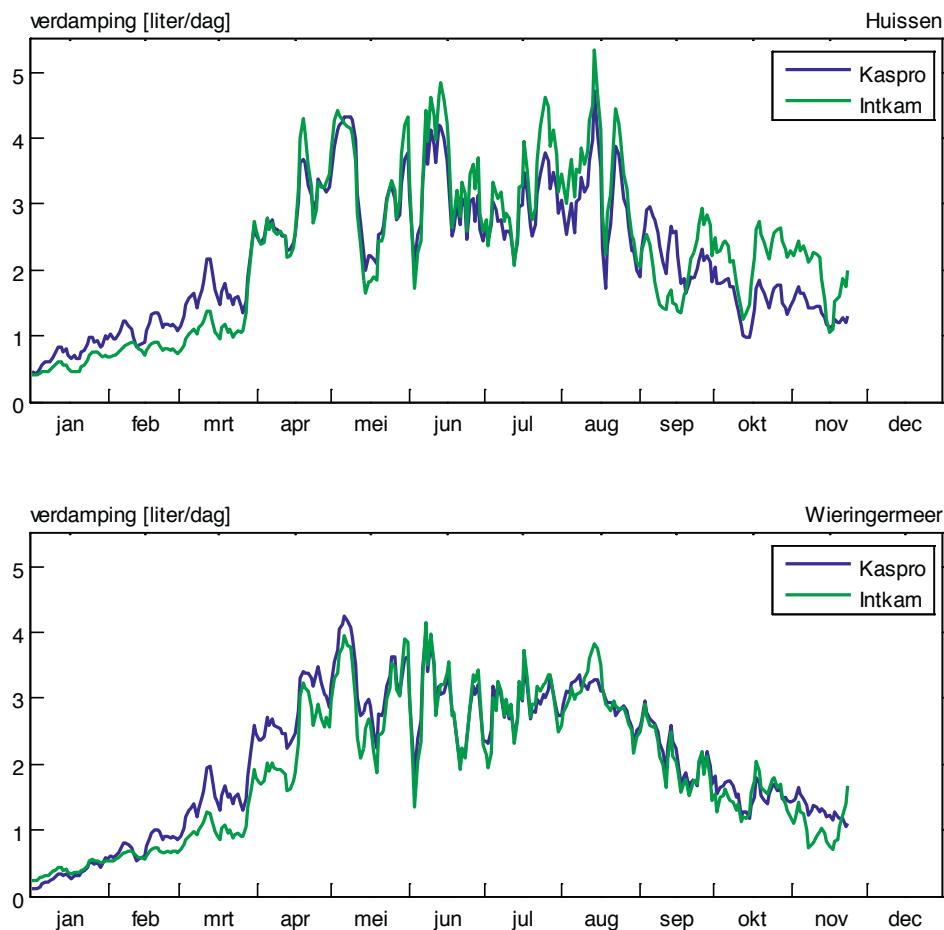
Al deze vergelijkingen hebben een duidelijke fysische basis, maar de parameterisatie van de fysische wetmatigheden berust voor een groot deel op empirische bevindingen. Het is dan ook met name in deze parameterisatie waarin KASPRO en Intkam enigszins verschillen. Overigens komen die verschillen vooral 's avonds en 's nachts tot uiting. Overdag vallen de inschattings-verschillen van de voelbare warmte en langgolvlige straling al gauw weg in de alles overheersende warmtestroom uit de absorptie van zonlicht. Het is dan ook tegen deze achtergrond dat de huidige versie van de verdampingsmonitor geen aandacht besteedt aan deze componenten in de energie-toestroom, maar zich uitsluitend richt op de absorptie van zonlicht. Oorspronkelijk lag de focus voor de ontwikkeling van de transpiratiemonitor immers op een tool die het ventilatieverlies gedurende de dag kon monitoren.



Figuur 3.9. De door de verschillende modellen berekende verdamping voor het bedrijf in Huissen (boven) en de Wieringermeer (onder) in september. De linker grafiek toont het verloop van de dagtotalen over de maand. De rechter grafiek laat het gemiddelde verloop over het etmaal in de maand september zien.

Het tweede punt in verdampingsberekening modellen, de verdeling van toegevoerde energie in voelbare en latente warmte, wordt zowel in KASPRO als in Intkam niet expliciet berekend, maar is een resultaat van een iteratieve evenwichtsberekening. De achtergrond is dat naarmate een blad meer gaat verdampen de onttrokken warmte het blad zal laten afkoelen, waardoor de verdamping minder wordt. Ergens is er dus een evenwichtspunt bij een zekere combinatie van bladtemperatuur en verdamping en dit evenwichtspunt hangt van heel veel factoren af. Deze invloedsfactoren zijn pure fysische factoren (stralingsintensiteit, kasluchttemperatuur, luchtvochtigheid etc.), maar ook variërende biologische factoren, zoals het huidmondjesgedrag. Het huidmondjesgedrag is in Kaspro en Intkam geparameteriseerd aan de hand literatuurgegevens (Stanghellini 1987, Bakker 1991, Nederhoff & de Graaf, 1993) en daarmee gebaseerd op multivariabele regressie. De huidige versie van de verdampingsmonitor heeft al deze nuanceringsen ten aanzien van de verdeling van energie over voelbare en latente warmte niet. Geabsorbeerde warmte wordt met een vaste fractie in voelbare warmte omgezet. Deze fractie is uiteraard zodanig gekozen dat deze gemiddeld genomen goed is. Overigens wordt er op dit moment gewerkt aan een verbetering van de verdampingsmonitor, precies op dit punt.

Gezien de gelijke basisuitgangspunten, maar de (zeer) verschillende uitwerking is het niet verwonderlijk dat er veel overeenkomsten, maar ook veel verschillen tussen de berekende gewasverdamping tussen Kaspro, Intkam en de verdampingsmonitor werden gevonden. Figuur 3.9. toont de berekende verdamping in de maand september voor het bedrijf in Huissen (boven). In de linker grafiek staat de dagelijkse verdamping per dag en in de rechter grafiek staat het gemiddelde profiel van deze verdamping over het etmaal. De Figuur laat zien dat de berekende verdamping voor het bedrijf in Huissen op dagbasis voor de drie modellen vaak flink uit elkaar loopt. Uit de rechter grafiek is af te lezen dat deze verschillen evenwel vooral in de nachtperiode zitten omdat de modellen voor de dagperiode behoorlijk eensgezind zijn. In het begin waren er wat problemen met de calibratie van de verdampingsmonitor zodat er bij de eerste dagen in september een paar gegevens ontbreken.

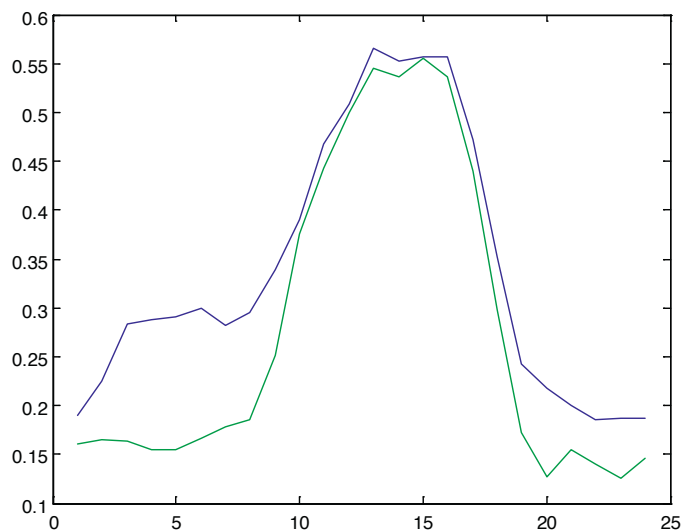


Figuur 3.10. Het door de verschillende modellen berekende jaarverloop van de verdamping voor het bedrijf in Huissen (boven) en de Wieringermeer (beneden).

De vergelijking van de resultaten van de verschillende modellen voor de maand september voor het bedrijf in de Wieringermeer laat een behoorlijke overeenstemming zien (Figuur 3.9.). De grootste verschillen zitten met name in de nacht. Voor het bedrijf in Huissen komt Intkam duidelijk hoger en de verdampingsmonitor duidelijk lager uit dan Kaspro en ook hier komt het verschil vooral uit de verdamping die voor de nachtperiode berekend wordt. Dit beeld is voor het bedrijf in de Wieringermeer in wezen hetzelfde, maar minder opvallend omdat de verschillen daar kleiner zijn.

Het feit dat de verdampingsmonitor 's nachts zoveel afwijkt van de andere twee modellen ligt vooral aan de oorsprong van de verdampingsmonitor, namelijk de beschrijving van het ventilatieproces overdag. Het grote verschil tussen Intkam en Kaspro met betrekking tot de nachtelijke verdamping van het bedrijf in Huissen komt doordat de luchtvochtigheid in Huissen lager wordt gehouden en Intkam 's nachts een veel sterkere relatie tussen luchtvochtigheid en verdamping hanteert dan Kaspro. Helaas zijn er van deze bedrijven voor de betreffende afdelingen geen gemeten verdampingsgegevens beschikbaar (bijvoorbeeld gegevens uit een weeggoot).

Als we naar de berekende verdamping over het hele jaar kijken zien we dat Kaspro en Intkam in de zomerperiode sterk overeenkomen voor wat betreft de dagelijkse verdamping, maar in de koudere periode van het jaar (september t/m maart) sterk gaan verschillen. De verschillen tussen de resultaten van de twee modellen zijn voor het bedrijf in Huissen steeds groter dan voor het bedrijf in de Wieringermeer. Uit Figuur 3.10. blijkt dat het Stanghellini-model binnen Kaspro, en het Intkam model, vergelijkbare verdampingssnelheden berekenen. Intkam geeft in het voorjaar iets lagere waarden dan Kaspro, terwijl de situatie in het najaar andersom is. De dag-tot-dag variatie in verdamping wordt door beide modellen op vergelijkbare wijze gesimuleerd, wat een direct gevolg is van het feit dat de beide modellen in beginsel gelijk aan elkaar zijn, en dat slechts de parameterisering enige verschillen vertoont. Intkam simuleert voor het bedrijf in Huissen een hogere verdamping gedurende de nacht dan voor het bedrijf in de Wieringermeer. De oorzaak hiervan is de minder vochtige lucht in de nacht op het bedrijf in Huissen (Figuur 3.11.). Het dampdruktekort (VPD) is voor het Intkam model de enige drijvende kracht achter de nachtelijke verdamping. Het verschilt hierin van Kaspro, die ook CO₂ en temperatuur meeneemt.



Figuur 3.11. Het gemiddelde verloop van de VPD (kPa) op de bedrijven in Huissen (blauw) en in de Wieringermeer (groen) in de maand september.

4 Discussie

Het hier gerapporteerde project is uitgevoerd in ongeveer dezelfde periode waarin het project Kijk in de Kas (Buwalda *et al.* 2009b) liep. De twee projecten vertonen enkele duidelijke overeenkomsten, maar ook even duidelijke verschillen. Gemeenschappelijk is het thema: zichtbaar te maken wat de consequenties zijn van algemene fysische en fysiologische principes in specifieke, actuele situaties op tuinbouwbedrijven, door middel van modellen die volledig geautomatiseerd rekenen op basis van bedrijfsspecifieke real-time gegevens. Een tweede belangrijke overeenkomst was het doel om door middel van vergroting van inzicht energiebesparing te verenigen met het realiseren van de gestelde teeltdoelen. Er was ook een duidelijk verschil: omdat Kijk in de Kas openbaar was en gericht op een brede doelgroep, waren de deelnemende voorbeeldtelers niet bereid om concrete productiecijfers te laten zien. De uitgewisselde informatie was daardoor noodzakelijkerwijs vrij algemeen en daardoor enigszins oppervlakkig van aard (Buwalda *et al.* 2009b). In het hier gerapporteerde project gold die beperking niet omdat de informatie niet openbaar was maar rechtstreeks met elk van de deelnemende bedrijven apart werd uitgewisseld. In dit project kon dus meer diepgang worden bereikt op het gebied van gewasprocessen en productiecijfers in relatie met klimaatregeling en energieverbruik.

4.1 Wat is er bereikt

Een belangrijk thema binnen het energie-transitieprogramma 'Kas als energiebron' is de vraag hoe de teler inzicht kan krijgen in de klimaatomstandigheden die nodig zijn voor de gewenste gewasontwikkeling, en in de meest energiezuinige manier om die omstandigheden te realiseren. De bij dit project betrokken telers onderschreven het belang van dit thema, en zagen dus perspectief in de benadering van het koppelen van gewasmonitoring/teeltprognose aan energieberekeningen om dit inzicht te verschaffen. Het project heeft laten zien dat het technisch mogelijk is om geautomatiseerd en 'real-time' met specifieke, lopende teelten op tuinbouwbedrijven mee te rekenen.

De betrokken telers gaven aan dat ze een duidelijke meerwaarde zagen in de informatie die ze ontvingen, en dat ze dit soort informatie in de volgende teelt graag weer ter beschikking zouden hebben. Hiermee wordt bevestigd dat de methode een ondersteunende rol kan spelen bij de ontwikkeling van meer energiezuinige bedrijfssystemen en teeltconcepten.

Voor het projectteam heeft het project veel bruikbare nieuwe ervaring opgeleverd met betrekking tot het modelmatig meerekenen met lopende teelten en de teeltadvisering op basis daarvan. Voor kennisinstellingen zoals WUR-glastuinbouw vormt het meerekenen met lopende teelten een perspectiefvol nieuw communicatiekanaal, als aanvulling op de desk-studies met scenarioberekeningen voor een denkbeeldig standaardbedrijf. Hierbij kan 'op de werkvloer' zichtbaar worden gemaakt wat de consequenties zijn van de algemene, complexe, procesgerelateerde kennis van onderzoekers in concrete, actuele situaties.

4.2 Opmerkingen

Ondanks dit succes zijn wel enkele kritische opmerkingen te maken. Het is ook duidelijk geworden waar nog verbeteringen mogelijk (en noodzakelijk) zijn om deze nieuwe mogelijkheden sectorbreed toe te kunnen passen.

Omdat de teelt bij van Schie al snel werd beëindigd is deze ervaring slechts gebaseerd op contacten met twee telers. Er is dus zeker geen sprake van een representatieve steekproef. Echter omdat modeltoepassing in de praktijk echt nog pionierswerk is, kan de opgedane ervaring toch als interessant en belangwekkend worden beschouwd (zie paragraaf 1.2.4 'de missing link').

4.2.1 Tijdigheid

Een belangrijk aspect van het meerekenen met lopende teelten is dat de rekenresultaten beschikbaar zijn in de concrete, actuele situatie. Hierdoor kunnen ze in principe een nuttige aanvulling vormen op de praktijkkennis van de teler. Tijdigheid is hier dus een kritische succesfactor; de informatie moet eigenlijk beschikbaar zijn op het moment dat de beslissing over teeltmaatregelen wordt genomen.

In de paprikateelt is het gebruikelijk om wekelijks de stand van het gewas op te nemen, vruchtzetting, plantbelasting en oogst te registreren, en te beslissen over het gewas- en klimaatmanagement voor de komende week. Het projectteam kreeg inderdaad wekelijks de registraties per mail aangeleverd en reageerde steeds zo snel als praktisch mogelijk op, doorgaans binnen 24 uur. Dit is natuurlijk nog niet echt heel erg 'real-time' te noemen. Het is dus denkbaar dat de advisering door een kortere doorlooptijd effectiever zou zijn geweest. Om dit technisch mogelijk te maken is een verdergaande automatisering noodzakelijk, met name het registreren en automatisch verwerken van gewasregistraties en het ook weer geautomatiseerd beschikbaar maken van de rekenresultaten aan het deelnemende bedrijf. Op basis van de ervaring opgedaan in het hier gerapporteerde project is in diverse vervolprojecten (Energiezuinige Teeltplanning voor Potplanten, 40 kg paprika, Topmodel4all) veel aandacht besteed aan automatisch dataverkeer tussen rekensystemen en gebruikers via Internet.

4.2.2 Interface

Het rekensysteem had vrij grote hoeveelheden informatie nodig als invoer. Het leverde ook grote hoeveelheden rekenresultaten op. Telers zijn over het algemeen niet gewend om met dergelijke hoeveelheden informatie om te gaan. Na het bekijken van een beperkt aantal grafieken leek er bij hen al een zekere informatieverzadiging op te treden. Praktisch gesproken zijn telers ook vaak gewoon te druk zijn om zich in ingewikkelde zaken te verdiepen. Ze zouden misschien het liefst alleen 'het pijltje van de TomTom' te zien krijgen, en erop willen kunnen vertrouwen dat de onderliggende berekeningen correct zijn zodat het pijltje de goede kant op wijst. Het bleek wel ongeveer de hele teeltperiode te kosten om dat vertrouwen inderdaad op te bouwen, maar aan het eind gaven ze toch aan dat bij hen dat punt was bereikt. In die periode heeft er een ontwikkeling plaatsgevonden wat betreft het presenteren van gegevens. Uiteindelijk heeft dat geresulteerd in een grafiek zoals getoond in Figuur 2.1. waar de teler 'doorheen kon klikken' om in een eenduidig format allerlei samenhangende informatie te bekijken. Deze grafiek werd door het adviessysteem na elke keer rekenen automatisch met resultaten gevuld. Per berekening was de grafiek (of eigenlijk grafiekenset) vrij groot (ca 5 MB), wat verzending via e-mail bemoeilijkte. Ook het uitpakken en kopiëren naar een directory om de resultaten te kunnen bekijken vergde enig geduld en wat computervaardigheid, wat voor drukbezette ondernemers al snel drempelverhogend werkt.

In latere projecten zijn hier drie oplossingen voor ontwikkeld, n.l. (1) plaatsen van de resultaten op een website in plaats van verzending via de mail, zoals bij Kijk in de Kas (Buwalda *et al.* 2009b) werd toegepast, (2) het adviessysteem op de lokale PC van het bedrijf installeren, zodat alle gegevens met een klik op de knop volledig automatisch binnen worden gehaald, (3) de rekenresultaten uploaden als grafieklijnen in de LetsGrow.com database. Net als bij Kijk in de Kas leek ook hier het effect op te treden dat de informatie bijzonder efficiënt en 'hapklaar' moest worden aangeboden, waarbij elke muisklik een drempel vormt. De informatie moet dus laagdrempelig beschikbaar zijn en niet teveel 'gedoe' of computervaardigheden kosten. Verder gaven de deelnemende telers achteraf aan dat ze naast de feitelijke informatie ook behoefte hadden aan begeleiding in de vorm van interpretatie en daarop gebaseerd advies.

4.2.3 Gegevens invoeren en bijhouden

Ook bij het voeden van het adviessysteem met gegevens gold dat efficiëntie zeer noodzakelijk was. De klimaatgegevens werden weliswaar automatisch uit de LetsGrow database opgehaald, maar het koppelen van deze gegevens aan de rekenroutines en het correct parameteriseren van het kasklimaatmodel met de bedrijfsspecifieke instellingen bij de start van de teelt bleek een forse klus. Bij deelname van meerdere bedrijven kost het invoeren en bijhouden van bedrijfsspecifieke gegevens is al snel meer tijd dan onderzoekers kunnen opbrengen. Voor drukbezette en praktisch ingestelde telers moet de moeite die ze aan een adviessysteem besteden in redelijke verhouding staan tot het voordeel dat ze ervan verwachten.

Bij een meer algemene toepassing van dit soort systemen is het dringend gewenst om door verregaande standaardisatie tot efficiëntieverbetering te komen. Er ligt hier mogelijk een mooie rol voor de IT-dienstverleners in de tuinbouw door het exporteren van meetgegevens en instellingen uit klimaatcomputers nog veel verder te standaardiseren en te automatiseren dan nu het geval is. Het invoeren van de gewasregistratiegegevens was in dit project handwerk. Ongemerkt kostte dit bij elkaar ook veel tijd. In latere projecten zijn hier betere oplossingen voor ontwikkeld, waarbij de teler of teeltadviseur zelf de registratiegegevens invoert, ofwel direct in het model (Energiezuinige Teeltplanning voor Potplanten) of in een registratieTabel op een internetpagina van LetsGrow.com (40 kg Paprika).

4.2.4 Teeltadviseurs

Teeltadviseurs zijn in het hier gerapporteerde project niet betrokken geweest bij de toepassing van het adviessysteem. Het betrekken van de adviseurs is bij de opzet van het project over het hoofd gezien. Achteraf gezien is dat jammer, omdat zij juist in hun regelmatige begeleidingsgesprekken op de bedrijven de gang van zaken en de strategie voor de komende periode met de teler bespreken. In dit soort gesprekken komen dus in principe precies de afwegingen aan de orde waarvoor het adviessysteem bedoeld is, en waarin deze aanpak zijn meerwaarde kan bewijzen. Als adviseurs niet betrokken worden bestaat ook de kans dat het projectteam belangrijke informatie mist. In de loop van de uitvoeringsfase is met de teeltadviseurs van vd Harg en De Wieringermeer wel contact gezocht, maar dit heeft helaas niet tot een meer structurele betrokkenheid geleid.

Het advies vanuit de kennisinstellingen zou door adviseurs mogelijk kunnen worden beschouwd als concurrentie. Hierdoor zouden ze zich misschien extra kritisch op kunnen stellen tegenover het systeem waardoor de teler zijn vertrouwen verliest of ontmoedigd raakt. Ook als de teeltadviseur zich neutraal maar passief opstelt kan het zijn dat het systeem niet erg effectief werkt wanneer de teler zich te onzeker voelt om zelfstandig een ingrijpende beslissing te nemen. Een actief betrokken adviseur kan de teler in geval van onzekerheid kunnen helpen om de knoop door te hakken. Door de teler de kans te bieden om regelmatig samen naar het systeem te kijken realiseert een betrokken adviseur in ieder geval al meerwaarde, zowel voor het systeem als wat betreft de eigen adviespraktijk. Om deze reden zijn in verschillende vervolgprojecten de adviseurs betrokken als partner.

4.2.5 Kwaliteitsbewaking

Om met een lopende teelt mee te kunnen rekenen zijn aanzienlijke hoeveelheden informatie nodig: weer, regelgedrag van de klimaatcomputer, gewaswaarnemingen en de kwantitatieve eigenschappen van de diverse onderdelen van de technische bedrijfsuitrusting, etc. De kwaliteit van prognoses, energie- en scenarioberekeningen staat of valt met de accurate van deze invoergegevens. Daarnaast geldt nog dat er voor diverse processen meerdere rekenmodellen beschikbaar zijn. Voor het projectteam bleek het zeer tijdrovend om de kwaliteit van de datastromen, modellen en berekeningen goed te beoordelen en te bewaken. Op onverwachte momenten doken ook problemen, storingen of onverklaarbare resultaten op. Het benodigde 'troubleshooten' is vaak erg precies en intensief werk, dat meestal meer tijd kost dan gedacht en zich vanwege het onvoorspelbare karakter slecht verhoudt met een planmatige organisatiecultuur. In ieder geval is duidelijk geworden dat de mogelijke rol van telers bij het controleren van deze informatiestromen en het optimaliseren van parameters niet moet worden overschat (uitzonderingen daargelaten uiteraard). Mogelijk dat teeltadviseurs een rol kunnen krijgen op het terrein van kwaliteitsbewaking, maar ook van die groep kan waarschijnlijk niet worden verwacht dat ze deze taken volledig zelfstandig voor hun rekening nemen. Hoewel iedereen het er over eens is dat kwaliteitsbewaking belangrijk is, zal het niet snel een urgent probleem worden. Onder de drukke omstandigheden is de kans dan groot dat in de dagelijkse routine kwaliteit niet voldoende aandacht krijgt (Emmerik, 2007). Kwaliteitsbewaking moet dus goed worden gewaarborgd. Zodra de adviessystemen verder uitontwikkeld en gestandaardiseerd zijn zouden er een diagnostisch kwaliteitsbewakingssysteem kunnen worden toegevoegd dat duidelijke foutmeldingen genereert bij storingen of onrealistische waarden. Verder kan het toepassen van adviessystemen in excursiegroep-verband de deelnemers stimuleren om 'bij de les te blijven'.

4.2.6 Leren vooruit te kijken

De informatie die het adviessysteem opleverde leek niet altijd zonder meer in het 'denkpatroon' van telers te passen. Telers zijn gewend te kijken naar historische informatie (teelt- en klimaatregistraties) en actuele informatie (de huidige stand van het gewas, actuele verschillen tussen realisatie en streefwaarden). Wat betreft de actuele stand gaan telers meestal uit van een bepaald idee over hoe het gewas er bij zou moeten staan. In het geval dat de feitelijke stand van het gewas afwijkt van dit streefbeeld, dan zal dit aanleiding zijn om in te grijpen. Deze regelstrategie komt in principe overeen met het regelen van het kasklimaat op basis van setpoints. Hierbij geldt dat de stand van het gewas vooral het resultaat is van de teelthistorie; op het moment dat afwijkingen zichtbaar zijn is het leed al in de voorafgaande dagen of weken geschied. Ook dit is in zekere zin dus kijken naar het verleden, en komt de bijsturing altijd te laat. Dit is eigenlijk een vreemde situatie, omdat er aan het verleden niets meer te veranderen valt, terwijl de teeltdoelen, zoals het oogsten van vruchten van een gewenste kwaliteit in een bepaalde week, juist in de toekomst liggen en nog wel degelijk kunnen worden beïnvloed. Ook voor energie geldt dat er aan het gasverbruik niets meer te veranderen valt als het eenmaal verstookt is. Alleen door in het heden een slimme klimaatregelstrategie te kiezen kan in de toekomst energie worden gespaard. Het in dit project geteste adviessysteem biedt de telers een blik in de toekomst in de vorm van prognoses. Hoe beperkt die blik momenteel dan ook nog is, op deze manier wordt het mogelijk om inderdaad vooruit te kijken. Werken met een modelgebaseerd adviessysteem vraagt een omschakeling in denkpatroon en regelstrategie, van reactief naar pro-actief (anticiperend), zowel bij telers als bij teeltadviseurs. De eis dat een adviessysteem moet aansluiten bij de informatiebehoefte van de teler is daarom eigenlijk te beperkt en te beperkend. Het is een 'kip of het ei'-situatie: de informatiebehoefte waar het systeem in kan voorzien is voornamelijk latent aanwezig en kan allen worden opgewekt door telers met het systeem vertrouwd te maken. Het valt te overwegen om hiervoor, zowel voor telers als teeltadviseurs, een opleidingstraject op te zetten, mogelijk in excursiegroep-verband.

4.2.7 Hoeveel mogelijkheden om te evalueren?

Een belangrijke vraag is hoe complex de modellen en het advies moeten zijn. Ondanks dat het (ook voor tuinders) een tijdrovend proces is om te werken met de modellen en dat het een tijd duurt voordat het vertrouwen gewonnen is, wordt wel duidelijk de meerwaarde van deze werkwijze ingezien.

De alternatieve mogelijkheden om de teelt bij te sturen waren in het in dit project geteste adviessysteem vrij beperkt: alleen het verhogen of verlagen van de temperatuursetpoints voor verwarmen en ventileren kon worden beïnvloed met vaste stappen van 2 °C. Effecten daarvan op de beschikbare concentratie CO₂, de RV en het gasverbruik werden door het kasklimaatmodel op uurbasis berekend. Actuele bedrijfsspecifieke instellingen voor minimum buis en het verloop van stook- en luchtingssetpoint werden hierbij geschat uit de klimaatregistraties van de afgelopen week. Het adviessysteem in deze vorm biedt dus maar een zeer beperkte basis voor het vooraf uitpuzzelen van optimaal energie-efficiënte klimaatinstellingen. Echter, om met Cruijff te spreken ("elk nadeel heb z'n voordeel"): het is eenvoudig en daardoor begrijpelijk en laagdrempelig, en geeft misschien juist door het beperkte karakter wel een bruikbare indicatie.

Er zijn echter vele mogelijkheden om een bepaalde streeftemperatuur te realiseren, afhankelijk van de stook- en luchtingsprofielen binnen het etmaal, de streefwaarde CO₂, scherminstellingen, minimum buis en raamstand, vochtbegrenzing, bandbreedte temperatuurintegratie, enzovoort. De keuzes die hierin worden gemaakt hebben een aanzienlijke invloed op de relatie tussen streeftemperatuur en energieverbruik. In het vervolgproject Energiezuinige Teeltplanning voor Potplanten is voor de benadering gekozen om in het adviessysteem een nagenoeg complete afspiegeling van alle instellingen van de klimaatcomputer in te kunnen voeren. De prijs die wordt betaald voor de sterk toegenomen mogelijkheden om alternatieve instellingen af te wegen is een sterke toename in complexiteit die maakt dat veel telers er niet uit zichzelf aan beginnen. Er is dus een spanningsveld tussen hoe informatief een adviessysteem is (met hoeveel mogelijkheden het rekening kan houden) en hoe bruikbaar het voor telers is. De kunst van het ontwerpen van gebruikersvriendelijke software zit in het efficiënt communiceren met de gebruiker, door stroomlijning (vermijden van overbodige stappen, weglaten van niet-relevante informatie), consistentie (logische samenhang, groeperen van gelijksoortige zaken) en uniformiteit (vergelijkbare zaken zien er zo veel mogelijk hetzelfde uit, voor vergelijkbare taken is steeds zo veel mogelijk dezelfde aanpak nodig).

Hoe efficiënter een adviessysteem is, hoe meer keuzemogelijkheden het nog kan laten zien zonder voor de teler onpraktisch te worden.

Een voorbeeld van technische efficiëntieverbeteringen zou kunnen zijn om het klimaatgedeelte van het adviessysteem exact de zelfde grafische interface te geven als aanwezig op de eigen klimaatcomputer. Nog een stap verder zou het adviessysteem zelfstandig in staat zijn om de instellingen direct uit de klimaatcomputer te halen, zodat de gebruiker ze niet handmatig hoeft in te stellen. Dit vereist echter nog de nodige stappen van de leveranciers van klimaatcomputers. Op die manier wordt het zelfs denkbaar om klimaatregeling, productiemanagement, registratie en prognose volledig te integreren, met het moment 'nu' in het midden van alle grafieken en Tabellen... Verder kan worden overwogen om systemen te ontwikkelen met een eenvoudige versie voor dagelijks gebruik die alleen overzichtelijke registratie- en monitorfuncties omvat, en een puzzelversie met uitgebreide mogelijkheden voor het vergelijken en optimaliseren van energie-efficiënte teeltscenario's. Hiermee zou het dilemma tussen simpel/laagdrempelig en uitgebreid/complex kunnen worden omzeild.

4.2.8 Synthese

Het hier gerapporteerde project was een stuk pionierswerk. Niet alleen ging het om de vraag of het technisch mogelijk was om verschillende modellen te koppelen en routinematig te laten rekenen aan real-time bedrijfsspecifieke gegevens, maar ook om de vraag hoe zoiets organisatorisch moet worden opgezet wil het een succes worden.

Gebleken is dat verschillende modellen technisch prima zijn te koppelen en in te bouwen in een rekensysteem. Ook het koppelen aan bedrijfsspecifieke data is technisch mogelijk en voldoende betrouwbaar te maken, maar blijkt veel tijd te kosten. Ook het bijhouden van de rekenresultaten en daarover communiceren, zowel intern als naar de bedrijven toe, bleek erg arbeidsintensief. De bottleneck zit in kritische evaluatie, de duiding en het leggen van verbanden. Vaak is er geen directe aanleiding om zich hier in te verdiepen. Ondanks het belang van de kritische blik wordt het zelden urgent. In de sterk taakgerichte cultuur van onderzoekers is een goed procesmanagement nodig, anders blijkt het werk toch regelmatig te blijven liggen. In dit geval ging het nog maar om een beperkt aantal bedrijven; bij meer grootschalige toepassing zal deze beperking al snel een onoverkomelijk bezwaar opleveren. Vergroting van de efficiëntie van het systeem kan een deel van de oplossing bieden. Kwaliteitscontrole en het leggen van verbanden kan voor een aanzienlijk deel worden geautomatiseerd en met een goede gebruikersinterface kan een grotere hoeveelheid informatie met minder inspanning worden beoordeeld. Hierbij moet nog wel de vraag worden gesteld of dit soort activiteiten eigenlijk wel tot de kerntaken van onderzoekers gerekend zouden moeten worden. Voor routinematige, commerciële dienstverlening is een heel andere instelling nodig als voor het doen van onderzoek, en ook vereist dit soort activiteiten een ander type organisatie. Een andere oplossing kan mogelijk zijn om andere partijen te betrekken bij het proces. Met name kan hierbij worden gekeken naar een rol voor de voorlichters en teeltadviseurs. Hiervan zijn er honderden werkzaam in de tuinbouwsector, ze kennen de bedrijven en teelten, en ze bezoeken de telers regelmatig. Juist in een dergelijke relatie kan een adviessysteem zijn meerwaarde bewijzen.

De mogelijkheden die dergelijke adviessystemen bieden sluiten niet automatisch aan bij de bestaande werkwijze en informatiebehoefte op bedrijven. Modelgebaseerde advisering 'op de werkvloer' schept de voorwaarden voor een overgang van het afzonderlijk regelen van klimaat en gewas aan de hand van setpoints naar een meer dynamische, pro-actieve en geïntegreerde teeltwijze. Mogelijk dat gerichte opleiding nodig zal zijn om telers te helpen bij het zetten van deze stap.

Door nu de juiste beslissingen te nemen kan een teler bereiken dat in de toekomst energie wordt bespaard. Bij de afwisseling die het weer en de seizoenen met zich meebrengen is het goed om die mogelijkheden van tevoren te zien aankomen. Door niet alleen naar het klimaat te kijken maar ook vooraf de effecten van verschillende keuzemogelijkheden op het gewas te kennen kan de teler beoordelen welke besparingsmogelijkheden benut kunnen worden, of omgekeerd, hoe een gewenst gewasbeeld of teelt doel het meest energie-efficiënt kan worden bereikt. Prognoses gebaseerd op modelberekeningen ontsluiten hiermee mogelijkheden die in conventionele, recept-gebaseerde teeltstrategieën ongebruikt bleven. Meerekenen met lopende teelten kan hierdoor helpen bij het realiseren van de doelstellingen van 'Het Nieuwe Telen'.

4.3 Conclusies

Modellen koppelen en laten meerekenen met bedrijfsspecifieke, actuele gegevens is technisch goed mogelijk.

Zeer efficiënte verwerking en presentatie van informatie is essentieel om meerekenen met lopende teelten op tuinbouw-bedrijven praktisch uitvoerbaar te maken.

Meerekenen met lopende teelten vormt een nieuwe manier van kennisdoorstroming van kennisinstellingen naar tuinbouw-bedrijven, maar ook in de omgekeerde richting.

Modellen hoeven niet perfect te zijn om nuttig te kunnen zijn. Door alle onzekerheden in de ingevoerde gegevens en de modellen zelf is het al heel mooi als de nauwkeurigheid van het weerbericht wordt benaderd: je weet van tevoren dat het nooit helemaal klopt, maar je zou de informatie toch niet willen missen.

Belangrijk is dat modellen de samenhang tussen verschillende processen en invloedsfactoren laten zien, en in ieder geval de goede kant op wijzen.

Kwaliteitscontrole van inputgegevens en rekenresultaten is essentieel. Omdat het al snel erg bewerkelijk kan zijn moet het zo veel mogelijk worden geautomatiseerd. Desondanks moet kwaliteitsmanagement een integraal onderdeel vormen van het werken met modelgebaseerde adviessystemen.

De twee telers die in dit project betrokken waren bij het adviessysteem waren van mening dat deze benadering duidelijk meerwaarde biedt. Beide onderschreven de verwachting dat op deze manier effectiever gewasmanagement kan worden gecombineerd met een toename van de energie-efficiëntie.

Bij een bredere invoering van deze benadering is het nodig om andere partijen te betrekken bij de praktische toepassing. Dit zorgt dat onderzoekers hun handen vrij hebben voor nieuwe toepassingen.

De mogelijkheden die dergelijke adviessystemen bieden sluiten niet automatisch aan bij de bestaande werkwijze en informatiebehoefte op bedrijven. Gerichte opleiding zal waarschijnlijk nodig zijn om telers te helpen bij het zetten van deze stap.

Meerekenen met modellen met lopende teelten kan helpen bij het realiseren van de doelstellingen van 'Het Nieuwe Telen'.

5 Referenties

Bakker, J.C., 1991.

Leaf conductance of four glasshouse vegetable crops as affected by air humidity. *Agric. Forest Met.* 5:23-36.

Bontsema, J., Hemming, J., Stanghellini, C., Visser, P.H.B. de, Henten, E.J. van, Budding, J., Rieswijk, T. & Nieboer, S. (2007)

On-line monitoring van transpiratie en fotosyntheseactiviteit. Wageningen UR, Glastuinbouw, Nota 451, Wageningen.

Bootsveld, N.R., van Wolferen, J (2006)

Ontvochtigen van kassen met bestaande technieken uit de utiliteitsbouw. TNO-rapport 2006-AR0070/B.

Breuer, J.J.G & van de Braak, N.J. (1989)

Reference year for Dutch Greenhouses. *Acta Hort.* 248: 101-108.

Buwalda, F., de Zwart, F., van Henten, E. en Hogendonk, L. (2005)

Dynamische beslissingsondersteuning in de Paprikateelt. PPO Publicatie 41616094, Naaldwijk

Buwalda, F., de Zwart, H.F., van Henten, E.J., de Gelder, A., Hemming, J., Bontsema J., Lagas P. & van der Mark, C. (2009a)

Proof of Principle - Testen van dynamische optimalisatie als methode om doelgerichte sturing van de teelt te combineren met energiebesparing. Wageningen UR Glastuinbouw Rapport 238.

Buwalda F., van der Mark C., Swinkels GJ, de Zwart F., van Gastel T., Burema C., Kamminga H. & Kipp J. (2009b)

Kijk in de Kas - Een interactieve leeromgeving over tuinbouw en energie. Wageningen UR Glastuinbouw Rapport 238.

Campen, J.B. en de Gelder, A. (2007)

Horizontale variatie. *Plant Research International*, Nota 131, Wageningen.

Dieleman, J.A. Marcelis, L.F.M. Elings, A. Dueck T.A. and Meinen E. (2006)

Energy Saving in Greenhouses: Optimal Use of Climate Conditions and Crop Management. *Acta Hort.* 718: 203-209.

Dijkshoorn-Dekker, M.W.C. Eveleens-Clark, B.A., 1999

Introduction of a marketoriented information system for growth control of *Ficus benjamina*. *Acta Hort.* 507:99-105.

Elings, A. & W. Voogt, 2008. Management of greenhouse crop transpiration: the way forward. *Acta Hort.* (submitted).

Elings, A.; Zwart, H.F. de; Janse, J.; Buwalda, F.; Marcelis, L.F.M. (2006)

Flexibele meerdaagse temperatuurstelling op basis van de assimilatenbalans van het gewas Wageningen : *Plant Research International*, (PRI Nota 383)

Emmerik, R. (2007)

Kwaliteitsmanagement. Pearson Education Uitgeverij, ISBN-13: 9789043012676; 326 blz.

Gelder, A. de, Raaphorst, M., Hoon, M. de, Breugem, F. (2007) – Paprikateelt in de gesloten kas: resultaten bij Themato in 2006. Nota Wageningen UR Glastuinbouw, Naaldwijk.

Gieling, T.H.H., Corver, F.J.M., Janssen, H.J.J., van Straten, G., van Ooteghem, R.J.C. and van Dijk, G.J. 2005. Hydrioline, towards a closed system for water and nutrients: feedback control of water and nutrients in the drain. *Acta Hort.* (ISHS) 691:259-266

Gijzen, H. & S. Stanghellini, 2007. Onderzoek naar de validiteit van berekeningen aan verdamping in Intkam. Intern rapport. 24 p.

Henten, E.J. van, J. Bontsema, J.G. Kornet & J. Hemming, 2006. On-line schatting van het ventilatievoud van kassen. *Plant Research International*, 60 p.

Heuvelink, E, 1996

Dry matter partitioning in tomato: Validation of a dynamic simulation model. *Ann. Bot.* 77:71-80.

Monteith, J.L., 1965. Evaporation and Environment. In: Fogg, G.E. (Ed.) *The State and Movement of Water in Living Organisms*, 19th Symp. Soc. Exp. Biol. Cambridge University Press, London. p. 205-234.

- Grashoff, C., Stanghellini, C., Kempkes, F.L.K., Elings, A., Marcelis, L.F.M. (2003)
Energiebesparing door bladplukken bij paprika: haalbaarheidsstudie op basis van modellen. Plant Research International Nota 310, Wageningen.
- Marcelis, L.F.M., 1994
A simulation model for dry matter partitioning in cucumber. Ann. Bot. 74:43-52.
- Nederhoff, E.M. & Graaf, R. de, 1993. Effects of CO₂ on leaf conductance and canopy transpiration of greenhouse grown cucumber and tomato. J. of Hort. Science 68:925-937.
- Seginer, I., F. Buwalda & G. van Straten, 1998
Nitrate concentration in greenhouse lettuce: a modelling study. Acta Hort 456: 189-197.
- Stanghellini, C., 1987. Transpiration of Greenhouse Crops. PhD Dissertation Wageningen University. 150 pages.
- De Zwart, H.F., 1996. Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model. Ph.D. Thesis. Wageningen Agricultural University

Bijlage I Overzicht rekenresultaten van het gewasmodel Papigrow per rekenslag

	parameter	dimensie
1	dagnr	
2	STSact	(J/cm ² /d global radiation outside)
3	Tact, Average Daily Temperature	(°C)
4	LAI	(m ² blad / m ² bodem)
5	PARGEW, geabsorbeerde straling	(MJ PAR/m ² /d)
6	FCp, fotosyntheseflux naar de common C-pool	(gDW/m ² /d)
7	DEVSTEP, grootte van ontwikkelingsstap per dag.	genormaliseerd op aantal graaddagen boven drem- peltemperatuur benodigd voor een vrucht om zich van zetting (0.0) tot 100% rijp (1.0) te ontwikkelen
8	sum(SACTFL) gesommeerde output van PBRichcombi2.m	(gDW/m ² /d)
9	sum(MACTFL), gesommeerde output van BRichcombi2.m: groeipotentieel vruchten met meervoudige Richards- kromme	(gDW/m ² /d)
10	sum(PFCvf) gesommeerde potential growth vruchten	(gDW/m ² /d)
11	PFCvp, potential growth vegetatieve plant	(gDW/m ² /d)
12	PFCmf, onderhoudsademhaling vruchten	(gDW/m ² /d)
13	PFCmp, onderhoudsademhaling vegetatieve plant	(gDW/m ² /d)
14	PFCve, potentiële flux naar het excess C compartment	(gDW/m ² /d)
15	FCev, flux van C uit excess C compartment	(gDW/m ² /d)
16	Source, FCp + FCev - FCmf - FCmv + ongebruikte C van vorige dag	(gDW/m ² /d)
17	Sink, sum(PFCvf) + PFCvp + PFCve	(gDW/m ² /d)
18	SoSi, ratio 16/17	(dimensieloos)
19	hs, min(SoSi, 1)	(dimensieloos)
20	ZETTING	aantal vruchten/m ² /d
21	AMPLITUDE	gDW/m ² /d
22	POTFL, CfSource * FruitbearingCapacity	gDW/m ² /d
23	FCvp, gerealiseerde groei vegetatieve plant	(gDW/m ² /d)
24	FCvf, gerealiseerde groei vruchten	(gDW/m ² /d)
25	FCmp, onderhoudsademhaling vegetatieve plant (gelijk aan 13)	(gDW/m ² /d)
26	FCmf, onderhoudsademhaling vruchten (gelijk aan 12)	(gDW/m ² /d)
27	FCve, gerealiseerde flux naar het excess C compartment	(gDW/m ² /d)
28	VacBalans, track of er na een rekenslag nog onverdeelde C overblijft in de common pool (hoort 0 gDW/m ² /d te zijn)	(gDW/m ² /d)
29	ExcBalans, Net flux in (positief) of uit (negatief) het excess C compartiment	(gDW/m ² /d)
30	sum(VMAT(:,4)), totaal C in uitgroeiende vruchten	(gDW/m ²)
31	sum(VMAT(:,5)), totaal C in veg. plant	(gDW/m ²)
32	VMAT(dagnr, 6) hoeveelheid C in common pool aan het eind van de dag	(gDW/m ²)
33	VMAT(dagnr,7) hoeveelheid C in excess C compartment aan het eind van de dag	(gDW/m ²)
34	NVROOGST aantal geoogste vruchten per dag	(vr/d)
35	WTOOGST hoeveelheid C in geoogste vruchten per dag	(gDW/m ² /d)
36	PBELVRUCHT aantal uitgroeiende vruchten	(vr/m ²)

	parameter	dimensie
37	NVROOGSTcum = cumulatieve NVROOGST (col 34)	vr/m ²
38	WTOOGSTcum = cumulatieve WTOOGST (col 35)	gDW/m ²
39	HARVst, EHAF(dagnr) = stadium waarin vruchten worden geoogst.	1.0 = 100% rijp, 0.9 = wat telers in de zomer als criterium gebruiken.
40	FruitBearingCapacity	(gDW/m ² /d)
41	DWVeg sum(VMAT(:,5), totaal C in veg. plant; gelijk aan 31	(gDW/m ²)
42	FeedBackFruits feedbacksignaal voor zettingsfunctie	(gDW/m ² /d)
43	CO ₂	(ppm)

Bijlage II Overzicht rekenresultaten Gewasmodel INTKAM

Eigenschap	Frequentie	Dimensie
Bruto fotosynthese	dagelijks	$\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
Onderhoudsademhaling	dagelijks	$\text{g DM m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
Reserves	dagelijks	g m^{-2}
Gewichtstoename droog gehele plant = sinksterkte	dagelijks	$\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
Gewichtstoename droog bladeren	dagelijks	$\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
Gewichtstoename droog stengels	dagelijks	$\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
Gewichtstoename droog vruchten	dagelijks	$\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
Gewichtstoename droog wortels	dagelijks	$\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
Gewichtstoename vers gehele plant	dagelijks	$\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
Gewichtstoename vers bladeren	dagelijks	$\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
Gewichtstoename vers stengels	dagelijks	$\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
Gewichtstoename vers vruchten	dagelijks	$\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
Gewichtstoename vers wortels	dagelijks	$\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
Actueel gewicht droog gehele plant	dagelijks	g m^{-2}
Actueel gewicht droog bladeren	dagelijks	g m^{-2}
Actueel gewicht droog stengels	dagelijks	g m^{-2}
Actueel gewicht droog vruchten	dagelijks	g m^{-2}
Actueel gewicht droog wortels	dagelijks	g m^{-2}
Actueel gewicht vers gehele plant	dagelijks	g m^{-2}
Actueel gewicht vers bladeren	dagelijks	g m^{-2}
Actueel gewicht vers stengels	dagelijks	g m^{-2}
Actueel gewicht vers vruchten	dagelijks	g m^{-2}
Actueel gewicht vers wortels	dagelijks	g m^{-2}
Cumulatief gewicht droog gehele plant	dagelijks	g m^{-2}
Cumulatief gewicht droog bladeren	dagelijks	g m^{-2}
Cumulatief gewicht droog stengels	dagelijks	g m^{-2}
Cumulatief gewicht droog vruchten	dagelijks	g m^{-2}
Cumulatief gewicht droog wortels	dagelijks	g m^{-2}
Cumulatief gewicht vers gehele plant	dagelijks	g m^{-2}
Cumulatief gewicht vers bladeren	dagelijks	g m^{-2}
Cumulatief gewicht vers vruchten	dagelijks	g m^{-2}
Cumulatief gewicht vers stengels	dagelijks	g m^{-2}
Cumulatief gewicht vers wortels	dagelijks	g m^{-2}
LAI	dagelijks	$\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$
SLA	dagelijks	g m^{-2}
Drogestofverdeling vruchten/totaal	dagelijks	-
Sourcesterkte: generatief	dagelijks	$\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
Sourcesterkte: vegetatief	dagelijks	$\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
Sourcesterkte: totaal	dagelijks	$\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
assimilatenbalans	dagelijks	-
Zetting	Dagelijks / wekelijks	vruchten $\text{m}^2 \text{ w}^{-1}$
Cumulatieve zetting	Dagelijks / wekelijks	vruchten m^2
Plantbelasting	Dagelijks / wekelijks	vruchten m^2

Eigenschap	Frequentie	Dimensie
Verdamping	Dagelijks	$\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
Wateropname	Dagelijks	$\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$

Bijlage III Datacommunicatie van het ventilatievoud-model (Bontsema et al., 2007)

Input:		
Ventilatievoud		
Temperatuur buiten (T_out);		
Temperatuur binnen (T_air);		
Globale straling (I_glob);		
Temperatuur verwarmingsnetten (buizen) (T_pipe1/2/3);		
Schermtstanden (Screen1/2)		
Om afgeleide vocht en CO ₂ stromen te kunnen berekenen additioneel:		
RV binnen (RV_in);		
RV buiten (RV_out);		
CO ₂ concentratie binnen(CO ₂ _in);		
CO ₂ concentratie buiten (CO ₂ _out);		
CO ₂ -supply		
Om ventilatiemodel van de Jong te kunnen mee laten lopen additioneel:		
Raamstand leezijde (WA_ls);		
Raamstand windzijde (WA_ws);		
Windsnelheid buiten (W_speed);		
Om evt. evapotranspiratie te berekenen additioneel:		
RV binnen (RV_in);		
RV buiten (RV_out);		
LAI		

Output:		
variabele	frequentie	dimensie
Ventilatievoud	5 min	aantal malen uur-1
Energiestroom door ventilatie	5 min	W m ²
Vochtstroom door ventilatie	5 min	mg H ₂ O m ² s ⁻¹
CO ₂ -stroom door ventilatie	5 min	mg CO ₂ m ² s ⁻¹
Verdamping	5 min	g H ₂ O m ² s ⁻¹

Bijlage IV Output van het simulatiemodel voor kasklimaat en energie (KASPRO)

Parameter	Eenheid	Omschrijving
MVTranspCan.Value	[kg/m ² .s]	Gewasverdamping
fVent	[m ³ /m ² /s]	ventilatie flux vanuit kas naar buiten
Co2air.totalinflux	[-] [kg/ha/uur]	totale CO ₂ flux naar de kas
Weather.Iglob	[W/m ²]	globale straling buiten
TAir	[°C]	luchttemperatuur binnen
CO ₂ Air	[kg/m ³]	CO ₂ binnen
Light.Elevat	[graden]	elevation zon
Crop.LAI	[-]	LAI
PConTupp	[W/m ²]	warmteafgifte bovennet
PConTlow	[W/m ²]	warmteafgifte ondernet
tout	[°C]	luchttemperatuur buiten
tsky	[°C]	temperatuur hemel
Datalogger.Daynr	[-]	dagnummer
HAirOut	[W/m ²]	warmteverlies kaslucht naar buitenlucht (dek)
HGevel.Value	[W/m ²]	warmteverlies door gevel
H2OAir	[kg/m ³]	watergehalte lucht binnen
H2oAir.RV	[%]	relatieve vochtgehalte lucht binnen
HAirOut	[W/m ²]	warmteverlies kaslucht naar buiten (dek)
HTopOut	[W/m ²]	warmteverlies kaslucht in het topcompartiment naar buiten (dek). Het topcompartiment bestaat als het scherm meer dan 80% gesloten is, anders is er 1 compartiment
HcovOut	[W/m ²]	warmteverlies van kasdek naar buitenlucht
MvAirOut	[kg/m ² .s]	waterdamp transport van kaslucht naar buitenlucht
MvTopOut	[kg/m ² .s]	waterdamptransport van topcompartiment naar de buitenlucht
RCovSky	[W/m ²]	Stralingsenergie tussen kasdek en hemel
PSWRcan	[W/m ²]	Short wave radiation die door gewas wordt onderschept
PSWRflr	[W/m ²]	Short wave radiation die door de vloer wordt onderschept
PSWRscr	[W/m ²]	Short wave radiation die door het scherm wordt onderschept
pSWRair	[W/m ²]	alle straling die die door constructiedelen of kastoebeloren (buisen armaturen schermen) wordt onderschept komt indirect ten goede aan de kaslucht
SC	[-] fractie	schermstand
pAluAir	[W/m ²]	Warmteverlies van verlichting naar de kaslucht
ConWin.WinLeeProc	[%]	raamstand lezijde
Tlow	[°C]	temperatuur ondernet
Setpoints.SpTair	[°C]	setpoint luchttemperatuur
Light.PARAbsCan	[W/m ²]	absorbtie van PAR straling door gewas
ConCO ₂ .CO ₂ Meting	[ppm]	gemeten CO ₂ concentratie binnen
Light.ParDir	[W/m ²]	directe straling
Light.ParDiff	[W/m ²]	diffuse straling
Weather.H2Oout	[kg/m ³]	watergehalte lucht buiten
weather.windsp	[m/s]	windsnelheid buiten
ConBrander.Gas	[m ³ /m ² /s]	gasgebruik van de ketel
TLow.Value	[°C]	buistemperatuur onder

