



## Keuzes voor het Nieuwe Telen Tomaat en paprika

**C. Rappoldt en AHCM Schapendonk**

**Juli 2011**



Keuzes voor Het Nieuwe Telen  
op basis van experimenten met tomaat en paprika

In opdracht van het Productschap Tuinbouw en het Ministerie van Economische zaken, Landbouw en Innovatie

# Keuzes voor Het Nieuwe Telen op basis van experimenten met tomaat en paprika

Van proefgegevens naar energiebesparing

C. Rappoldt<sup>1</sup>, A. H. C. M. Schapendonk<sup>2</sup>

<sup>1</sup>EcoCurves, Kamperfoelieweg 17, 9753 ER Haren  
E-mail: kees.rappoldt@ecocurves.nl

<sup>2</sup>Plant-Dynamics, Englaan 8, 6703 EW Wageningen  
E-mail: ad@plant-dynamics.nl

## REFERAAT

C. Rappoldt, A. H. C. M. Schapendonk, 2011. *Keuzes voor Het Nieuwe Telen op basis van experimenten met tomaat en paprika ; Van proefgegevens naar energiebesparing.* EcoCurves, Haren. Plant-Dynamics, Wageningen. 67 blz.

In dit rapport wordt verslag gedaan van berekeningen met het Explorer kasklimaat simulatiemodel. Dat model berekent het kasklimaat en de gewasgroei en simuleert daarmee zowel energiegebruik als opbrengst. Aan de hand van proeven gedaan in het kader van Het Nieuwe Telen werden met het model berekeningen gedaan naar het effect van meer of minder schermen en het effect van de wijze van verwarmen. Verder wordt uitvoerig ingegaan op het gebruik van luchtbehandeling, raamventilatie en verwarmingsbuizen voor het omlaag brengen van het vapour pressure deficit (VD) in de kas.

Trefwoorden: kasteelt, tomaat, paprika, simulatie, energiebesparing, scherm

Dit onderzoek werd gesubsidieerd door het Productschap Tuinbouw en het ministerie van LNV. We bedanken Arie de Gelder voor het beschikbaar stellen van de data en de discussies gedurende de voortgang van het project.

© 2011 EcoCurves BV & Plant-Dynamics BV  
Kamperfoelieweg 17, 9753 ER Haren (gn), Nederland  
Tel.: 050 5370979; e-mail: kees.rappoldt@ecocurves.nl

Voorplaat: “Details van paprika en tomatenteelt”

Dit rapport is to stand gekomen in samenwerking van Het Productschap Tuinbouw, het Ministerie van Landbouw, Economie en Innovatie, EcoCurves BV en Plant Dynamics BV ter stimulering van energiebesparende maatregelen in de tuinbouw. De resultaten mogen vrij gebruikt worden, mits de bronnen worden vermeld.

EcoCurves BV en Plant Dynamics BV zijn niet aansprakelijk voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de gegevens en de modelresultaten in dit rapport.

# Inhoudsopgave

<b>Lijst figuren</b>	<b>7</b>
<b>Lijst tabellen</b>	<b>8</b>
<b>Samenvatting</b>	<b>9</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>13</b>
<b>2 Model en experiment</b>	<b>15</b>
2.1 Experimenten . . . . .	15
2.1.1 Kasconfiguratie . . . . .	15
2.2 Explorer model . . . . .	16
2.2.1 Onderdelen Explorer model . . . . .	16
2.3 Werkwijze . . . . .	18
2.3.1 Validatie van het model . . . . .	19
2.3.2 Scenario berekeningen . . . . .	19
<b>3 Simulatie van de proef</b>	<b>21</b>
3.1 Teelt . . . . .	21
3.2 Kasklimaat . . . . .	23
3.3 Energiegebruik . . . . .	26
3.4 Discussie . . . . .	28
<b>4 Virtuele klimaatcomputer</b>	<b>29</b>
4.1 Temperatuur setpoints . . . . .	29
4.1.1 Scherm setpoints . . . . .	30
4.2 Teelt en energiegebruik . . . . .	31
4.3 Discussie . . . . .	32
4.3.1 Gewasmanagement . . . . .	33
<b>5 Scenario Schermstrategie</b>	<b>34</b>
5.1 Het effect van schermen . . . . .	34
5.1.1 Aanwezige schermen worden wel of niet gebruikt . . . . .	34
5.1.2 Ongebruikte schermen zijn ook niet geïnstalleerd . . . . .	35
5.2 Optimaal gebruik van het energiescherm XLS10 . . . . .	36
5.2.1 Scenario daglichtniveau . . . . .	37
5.2.2 Scenario $\Delta T$ . . . . .	37
5.3 Lichte energieschermen . . . . .	40
5.4 Minder schermen in de zomer bij paprika . . . . .	41
<b>6 Verwarming tomaat</b>	<b>46</b>
6.1 Vrucht- en koptemperatuur tomaat . . . . .	47
6.2 Wijze van verwarmen . . . . .	47

<b>7</b>	<b>Vocht</b>	<b>49</b>
7.1	Latente en convectieve warmte . . . . .	49
7.2	Het bladnatgetal . . . . .	51
7.3	LBK en/of raamventilatie . . . . .	52
7.3.1	Het opwarmen van buitenlucht . . . . .	52
7.3.2	Simulatie van raamventilatie . . . . .	53
7.4	Het VD setpoint . . . . .	54
7.4.1	Energiegebruik bij andere VD setpoints . . . . .	54
7.4.2	Energie besparen op ontvochtigen . . . . .	55
7.5	Discussie . . . . .	58
	<b>Bibliografie</b>	<b>62</b>
	<b>Appendix A Schermgebruik</b>	<b>65</b>



# Lijst van figuren

2.1	Schema van Explorer kasklimaat model . . . . .	17
2.2	Schema met klimaatbesturing uit proefgegevens . . . . .	18
3.1	Oogst gesimuleerd met de gemeten klimaatbesturing . . . . .	21
3.2	Vruchtgewicht gesimuleerd met de gemeten klimaatsturing . . . . .	22
3.3	Plantbalans gesimuleerd met gemeten klimaatsturing . . . . .	22
3.4	Gesimuleerd kasklimaat voor 2 dagen in januari . . . . .	23
3.5	Gesimuleerd kasklimaat voor 2 dagen in februari . . . . .	24
3.6	Gesimuleerd kasklimaat voor 2 dagen in april . . . . .	24
3.7	Gesimuleerde RV voor 26 en 27 april . . . . .	25
3.8	Gesimuleerd en gemeten warmtegebruik . . . . .	27
3.9	Gesimuleerd en gemeten energiegebruik LBK . . . . .	27
4.1	Oogst gesimuleerd voor geregeld kasklimaat . . . . .	30
4.2	Vruchtgewicht gesimuleerd voor geregeld kasklimaat . . . . .	31
4.3	Plantbalans gesimuleerd voor geregeld kasklimaat . . . . .	31
4.4	Warmtegebruik in de referentie . . . . .	32
5.1	Kosten en baten van toenemend gebruik van XLS10 . . . . .	37
5.2	Hetzelfde zonder ACfolie . . . . .	38
5.3	Energiescherm XLS10 sluit bij een ander temperatuurverschil $\Delta T$ met de buitenlucht . . . . .	39
5.4	Een energiescherm dat meer licht doorlaat . . . . .	40
5.5	Simulatie oogst bij paprika . . . . .	41
5.6	Paprika . . . . .	41
5.7	Fotosynthese als functie van de lichtintensiteit op 21 januari 2009 . . . . .	42
5.8	Fotosynthese en gebruik energiescherm . . . . .	43
5.9	Straling en gebruik energiescherm . . . . .	44
6.1	Groeibuizen in een jong tomatengewas . . . . .	46
7.1	Latent en convectief warmteverlies uit de kas . . . . .	50
7.2	Energiebalans voor enkele winter- en zomerdagen . . . . .	51
7.3	Bladnat risico op een relatieve schaal . . . . .	52
7.4	Energiegebruik en bladnatgetal voor raamventilatie . . . . .	54
7.5	Energiegebruik bij andere VD setpoints . . . . .	56
7.6	Energie besparen op ontvochtigen . . . . .	57
7.7	Ontvochtigen met een combinatie van verwarmen en ventileren . . . . .	57

# Lijst van tabellen

4.1	Setpoints van de (virtuele) klimaatcomputer . . . . .	30
5.1	Effect van het gebruik van schermen . . . . .	35
5.2	Effect van de installatie en het gebruik van schermen . . . . .	35
5.3	Warmteverbruik en opbrengst bij toenemend gebruik van het energiescherm . . . . .	36
5.4	Effect van schermen in de zomer op opbrengst bij paprika . . . . .	42
6.1	Warmere kop en/of vrucht . . . . .	47
6.2	Buisrail als primaire verwarming . . . . .	48

# Samenvatting

In 2009-2010 werden experimenten met onbelichte teelten van tomaat (Komeett) en paprika (Derby) uitgevoerd door Wageningen-UR op het Improvement Center in Bleiswijk. In de proeven werd gebruik gemaakt van een ACfolie, een XLS18 en een XLS10 energiescherm. Ontvochtiging vond plaats door aanzuiging van buitenlucht en opwarming in LBK's.

Het energieverbruik was voor tomaat 20.7 m<sup>3</sup> gas (buiswarmte), 2.3 m<sup>3</sup> voor de opwarming van de buitenlucht met de LBK en 8.9 KWh elektriciteit (in 48 weken).

Het energieverbruik was voor paprika 20.2 m<sup>3</sup> gas (buiswarmte), 2 m<sup>3</sup> voor de opwarming van de buitenlucht met de LBK en 7.2 KWh elektriciteit (in 50 weken).

Met het simulatiemodel Explorer Tomaat (een soort virtuele kas) werden scenario analyses verricht voor scherm-, ontvochtiging- en verwarmings-regelingen, nadat de geldigheid van het model was getoetst aan de hand van de beschikbare data van gemeten kasklimaat, energieverbruik en opbrengstcijfers. De scenario analyses resulteerden in verschillende uitkomsten voor jaaropbrengsten en energieverbruik. Vervolgens kon met die resultaten nieuwe aanknopingspunten voor energiebesparing worden bepaald.

## *Slim schermen met de inzet van energieschermen overdag*

Met schermen wordt energie bespaard door vermindering van langgolelige uitstraling en het voorkomen van convectieve warmteverliezen. In de winter is de meeste energie te besparen door langgolelige uitstraling naar het kasdek te beperken.

Het gebruik van drie schermen, zoals het in de proef daadwerkelijk werd gedaan, bespaarde 19.3 m<sup>3</sup> aardgas ten koste van 1.4 kg opbrengst.

Voor het gebruik van afzonderlijke schermen waren de gesimuleerde besparingen: 5.3 m<sup>3</sup> (AC folie met 0.3 kg opbrengstderving), 9.7 m<sup>3</sup> (energiescherm XLS10 met 0.8 kg opbrengstderving) en 11.5 m<sup>3</sup> (XLS18 met 0.5 kg opbrengstderving).

Door een drempelwaarde voor de straling, waaronder het scherm wordt gesloten, te variëren kon een besparing berekend worden van 0 - 3 m<sup>3</sup> aardgas, afhankelijk van de drempelhoogte. Het bleek dat de toename in besparing snel verminderde met toenemende drempelhoogte, terwijl de afname in opbrengst vrijwel lineair was. In Tabel 5.3 is een samenvatting gepresenteerd van het energieverbruik en opbrengsten bij verschillende drempel scenario's. Er is een bandbreedte van 3 m<sup>3</sup> aardgas die maximaal bespaard kan worden tegenover een productiederving van maximaal 4 kg.

Sluiten van een energiescherm bij een stralingsdrempel in de range van 50-75 Wm<sup>-2</sup>, gecombineerd met een schermregeling op een relatief klein temperatuurverschil  $\Delta T$

tussen kaslucht en buitenlucht, leverde de meeste energiebesparing op.<sup>1</sup> Uit simulaties bleek een extra besparing van 0.4 m<sup>3</sup> aardgas gerealiseerd te worden, wanneer de  $\Delta T$ -drempel werd verlaagd van 5°C naar 3°C. De extra opbrengstderving van deze maatregel was slechts 0.11 kg, zonder rekening te houden met de kans op Botrytis.

### *Schermschermen in de zomer*

Bij paprika wordt soms geschermd om te voorkomen dat de vruchten bij sterke instraling teveel opwarmen en om te voorkomen dat de fotosynthese van de bladeren, bovenin het gewas, in de loop van een dag afneemt, als gevolg van temperatuur stress. Binnen dit kader werd de invloed van schermen in de zomer doorberekend. Met een regeling waarbij een XLS10 scherm sluit boven 500 W m<sup>-2</sup>, bleken de effecten van schermen op de productie opmerkelijk gering te zijn. De verminderde fotosynthese, door lagere lichtinval, werd bijna volledig gecompenseerd door een hogere fotosynthese efficiëntie. Deels omdat het scherm als een diffusor werkte, deels omdat het licht dat werd weggevangen qua intensiteit verzaadigend was voor de fotosynthese, en deels omdat de huidmondjes verder openstaan onder een scherm waardoor er makkelijker koolzuur kon worden opgenomen. Het is dus niet verwonderlijk dat de effecten bij drempeling van het scherm boven 500 W m<sup>-2</sup> klein waren.

Schermen had tevens weinig effect op de gemiddelde temperatuurverdeling in het gewas (eveneens door allerlei terugkoppelingen). Wel had het een groot effect op de frequentie waarmee temperatuurpieken van de vrucht en de kop van het gewas voorkwamen. De meerwaarde van schermen in de zomer is daar te vinden, evenals in een verminderde slijtage van jongere bladeren bovenin het gewas.

### *Vervroeging oogst door verhoging vruchttemperatuur*

In de simulaties zijn geen aanwijzingen gevonden voor een abnormaal trage vruchtontwikkeling in de proef. Het tijdstip van de eerste oogst was consistent met dat van de eerste bloei.

Een hogere temperatuur van de vrucht geeft een snellere vruchtontwikkeling en daardoor een iets vroegere eerste oogst. Bij een verhoging van 0.5°C is het gesimuleerde effect 2 dagen. Verdere verhoging leidt weliswaar tot de gewenste vervroeging maar het gaat ten koste van de kwaliteit. Als de eerste bloei 1.5 week versneld werd door temperatuur, dan haalden de eerste vruchten een eindgewicht van slechts 120 g.

Het effect van de inzet van een groeibuis is consistent met de vervroeging door een iets hogere vruchttemperatuur. Met een groeibuis wordt 0.2 kg meer geoogst en 0.2 m<sup>3</sup> gas minder verbruikt dan met hetzelfde gasverbruik via het ondernet. Kleine verschillen maar wel bereikt zonder extra investeringen.

### *Vochtregulatie*

Het voordeel van de LBK boven raamventilatie is tweeledig: 1. Er kan langer geschermd worden en 2. De inbreng van droge lucht is beter verdeeld dan bij het

<sup>1</sup>Het scherm sluit als het licht buiten onder de lichtdrempel komt en als  $\Delta T$  boven de  $\Delta T$ -drempel komt.

gebruik van ramen. Verder bleek uit de berekeningen dat raamventilatie minder effectief is tegen bladnat dan inzet van de LBK.

Raamventilatie kost  $3.3\text{ m}^3$  meer warmte dan ventilatie met de LBK. De oorzaak voor het verschil is van een afgeleide orde, met als belangrijkste componenten de lage temperatuur van het luchtcompartiment bovenin de kas en de afkoeling van de schermen door de luchtbeweging bovenin. De energiezuinige ventilatie met een LBK kost echter wel wat elektriciteit (12 kWh in de controle berekening).

Een veel gehoord misverstand is dat ventilatie via luchtbehandeling (LBK) een voordelige manier is om droge buitenlucht in de kas te krijgen. Het zou energetisch gezien voordeliger zijn om de droge buitenlucht op te warmen dan de vochtige lucht in de kas. Dat klopt wel maar het verschil is verwaarloosbaar. Verzadigde lucht van  $25^\circ\text{C}$  bestaat voor 2.0 % uit waterdamp en heeft een warmtecapaciteit die 1.6 % groter is dan die van droge lucht. Droge lucht heeft dus inderdaad een lagere warmtecapaciteit dan vochtige lucht maar het verschil is erg klein.

De berekeningen in dit rapport laten zien dat ontvochtiging zowel met de LBK als met raamventilatie een risico op bladnat opleveren, hoewel minder voor de LBK. Het selectief en gericht inzetten van de buizen lijkt dat probleem te verhelpen. Ook in het experiment is dat gebeurd, als noodmaatregel in situaties waarin raamventilatie en LBK niet effectief waren. Van de noodmaatregel kan echter een geïntegreerde maatregel worden gemaakt. De VD kan nauwkeuriger gecontroleerd worden als de sturing van raamventilatie, LBK en buizen beter op elkaar afgestemd worden, rekening houdend met de te verwachten gewasverdamping en de luchtvochtigheid van de buitenlucht. Bij een hoge luchtvochtigheid buiten of een hoge verwachting voor verdamping kan de klimaatcomputer een buis bijzetten, niet als noodmaatregel, maar als onderdeel van de reguliere sturing. Dit vergt uiteraard een goede meting van het vochtgehalte buiten en van de VD op enkele hoogtes in het gewas, met name onderin. Een betere controle van de VD maakt het vervolgens mogelijk om het setpoint van de VD te verlagen zonder extra risico op bladnat. Dat bespaart veel energie. Het gebruiken van de buizen voor vochtbeheersing is dus niet in strijd met energiebesparing mits het selectief en doelgericht gebeurt, in combinatie met goede metingen en een laag setpoint.



---

# Inleiding

---

Het Nieuwe Telen (HNT) is een energiezuinige vorm van glastuinbouw, die in een aantal demo-experimenten in de afgelopen jaren is uitgetest. De resultaten zijn veelbelovend maar variabel, vanwege weerscondities en frequente bijstellingen van de klimaatregeling gedurende het verloop van een teelt. Om meer grip te krijgen op de haalbaarheid van HNT zouden de experimenten vaak herhaald moeten met een tevoren afgesproken blauwdruk voor de klimaatregeling.

Er zijn zeer veel verschillende aansturingen en setpoints voor schermen en verwarmen/ontvochtigen te bedenken die allemaal energiebesparing opleveren maar waarvan de effecten op de opbrengst niet bekend zijn. Om die combinaties allemaal experimenteel te testen kost te veel tijd en geld. Daarnaast zijn er nog talloze mogelijkheden om te variëren met de inrichting van de kas qua positie van verwarming en qua materiaal van schermen. Door middel van scenario berekeningen in een complete virtueel nagebouwde kas zijn in dit verslag gewenste regelingen, kasconfiguraties en raseigenschappen getest op consequenties voor energiegebruik en opbrengst. Op die manier kan een selectie worden gemaakt van de meest veelbelovende combinatie, die vervolgens experimenteel kan worden getest.

Dit project is gericht op het kwantificeren van opbrengsten en energiekosten van jaarrondteelten bij tomaat en paprika voor verschillende energiebesparingsscenario's. Het project past goed binnen de doelstelling van "De Kas als Energiebron omdat het project innovatieve praktijkgebonden oplossingen aandraagt voor het bepalen van de energiebalans in kassen en suggesties voor optimalisatie. Uit een voorstudie werden mogelijkheden aangedragen voor het optimaliseren van verwarmingssystemen (zowel timing als positionering) en "slim schermen" ([Schapendonk et al., 2010](#)). Door teelt en klimaatregeling af te stemmen op de eigenschappen van het ras en op het type assimilatiebelichting kan 10 tot 26 procent worden bespaard op elektriciteit en 18 tot 20% op warmte. In dit rapport worden de uitkomsten van het vooronderzoek verder uitgediept en gekoppeld aan experimentele waarnemingen.

In 2009–2010 zijn door Wageningen-UR op het Improvement Center in Bleiswijk experimenten verricht met tomaat en paprika. Die experimenten vormen de basis voor de modelberekeningen in dit rapport. Opbrengstgegevens en 5-minuten waarden van het kasklimaat fungeerden als invoer om de Explorer modellen te valideren en waren de referentie waarmee de scenario's in dit rapport werden vergeleken.

Het gebruikte Explorer Kasklimaat model van Plant-Dynamics en EcoCurves is de koppeling van een teeltmodel (tomaat of paprika) en een model voor kasklimaat. Met dit gekoppelde model worden allereerst de proeven doorgerekend (Hoofdstuk 3)

om te komen tot een consistente en correcte beschrijving van zowel de teelt als het bijbehorende kasklimaat en energiegebruik (Hoofdstuk 4). Vervolgens worden in de Hoofdstukken 5, 6 en 7 met een virtuele klimaatcomputer scenarioberekeningen gemaakt om vragen te beantwoorden over de effectiviteit van het schermen, de wijze van verwarmen en de wijze van ventileren.



---

# Model en experiment

---

De basis van het onderzoek wordt gevormd door de eerder uitgevoerde experimenten. Het explorer kasklimaat model is gebruikt om uit te rekenen hoe het zou zijn gegaan als enkele keuzes anders zouden zijn gemaakt.

## 2.1 Experimenten

De onbelichte tomatenproef werd door Wageningen-UR uitgevoerd op het Improvement Center in Bleiswijk met het ras Komeett geënt op Maxifort. Plantdatum was 23 december 2009, naast het plantgat. Op 22 januari 2010 werden de planten in het plantgat overgezet. Aantal planten:  $2.5 \text{ m}^{-2}$ . In week 5 werd per plant een extra scheut aangehouden. Tijdstip eerste bloei: week 3. De eerste tros werd op 4 vruchten gesnoeid, daarna op 5.

De onbelichte paprikaproef werd door Wageningen-UR uitgevoerd op het Improvement Center in Bleiswijk met het ras Derby. De plantdatum was 2 december 2009. Aantal planten:  $3 \text{ m}^{-2}$  en 2 stengels per plant in een twee rijen systeem met een gewasdraad per rij. De stengels werden vanaf het begin van de proef bijgemaakt. Tot oksel 3 werden de bloemen verwijderd.

### 2.1.1 Kasconfiguratie

De ontvochtiging vond deels plaats door voorverwarmen van de buitenlucht: maximaal  $5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ kas uur}^{-1}$ . Het debiet was afhankelijk van ventilator karakteristiek. De ventilator draaide meestal op 100%. Het temperatuur setpoint voor de ingebrachte lucht was gelijk aan het setpoint voor de kaslucht.

De tomatenproef en de paprikaproef werden in vergelijkbare kascompartimenten uitgevoerd. De kasconfiguratie zag er als volgt uit:

- Poothoogte 6.68 m.
- Draadhoogte 4.5 m.
- Teelt goot op ca 50 cm van de bodem.
- Hoogte verwarmingsnet: buisrail 15 cm boven de grond,  $12 \times 51 \text{ mm}$  in tralie van 9.6, groeibuis 70 en 100 cm boven de teeltgoot. Dubbele groeibuis 32 mm per teeltgoot. Gevelverwarming bestond uit een dubbele leiding. De eerste gekoppeld aan de buisrail en de tweede gekoppeld aan de groeibuis.

- Schermen: XLS 18 Firebreak: transmissie voor direct licht: 14% en voor diffuus licht 14%, energie besparing 72% XLS 10 Ultra Revolux: transmissie voor direct licht 83% en voor diffuus licht 75%, energie besparing 47% De schermen bevinden zich voor en achter de tralie en lopen tegengesteld aan elkaar. Het XLS 18 zit aan de bovenzijde van de tralie. Het XLS 10 zit aan de onderzijde van de tralie. Tot eind februari werd gebruik gemaakt van een vast AC folie (transmissie 90%).

## 2.2 Explorer model

Het schema in Figuur 2.1 toont de structuur van het Explorer kasklimaat model. Het model simuleert de fotosynthese en de gewasontwikkeling op basis van fysiologische processen en het kasklimaat. Het kasklimaat wordt samen met het gewas gesimuleerd en de interactie tussen gewas en kasklimaat wordt dus in rekening gebracht.

In hoofdstuk 2.2.1 worden de verschillende onderdelen van het Explorer kasklimaat model besproken aan de hand van Figuur 2.1.

In hoofdstuk 2.3 wordt uiteengezet hoe het model zal worden gebruikt. In het kort: Eerst wordt de proef doorgerekend. Het kasklimaat wordt daartoe gesimuleerd op basis van de *gemeten standen* van schermen, lampen, ramen en verwarming (resultaat in Hoofdstuk 3). Dan worden de gemeten standen vervangen door sturing met een *virtuele klimaatcomputer* (hoofdstuk 2.3.2, resultaat in Hoofdstuk 4). Daarmee worden vervolgens verschillende instellingen voor schermstanden, verwarming etc. doorgerekend op consequenties voor opbrengst en energiegebruik.

### 2.2.1 Onderdelen Explorer model

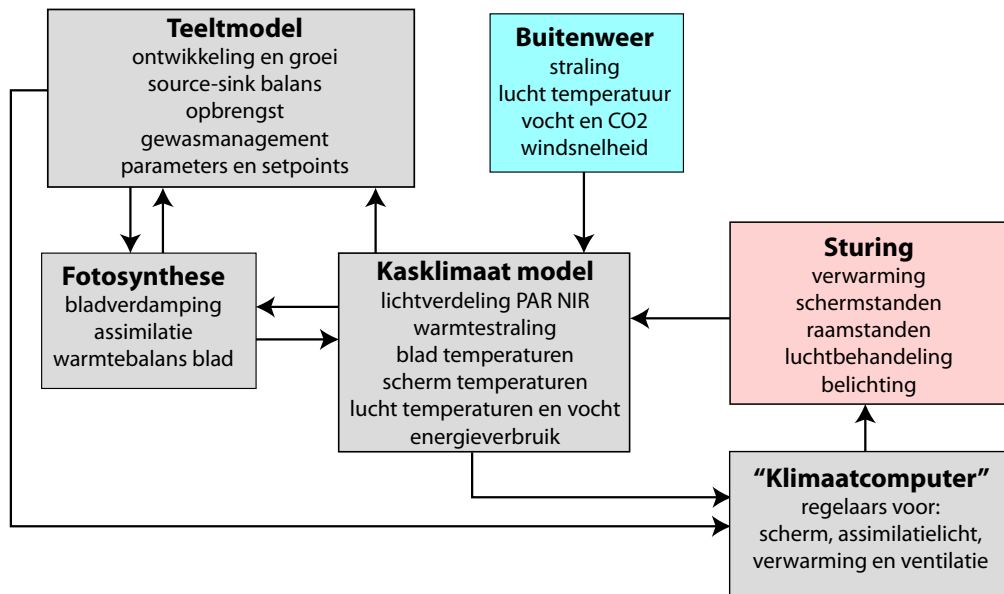
Het Explorer kasklimaat model bestaat uit verschillende modules waarvan de functie hieronder wordt toegelicht.

De module met het teeltmodel beschrijft groei en ontwikkeling van het gewas. Beide zijn afhankelijk van de temperatuur en van het aanbod van assimilaten. In het teeltmodel wordt ook het gewasmanagement geregeld zoals het laten staan van extra stengels, het oogsten van rijpe vruchten, bladpluk enz.

De module voor fotosynthese beschrijft de verdamping en de productie van assimilaten door de bladeren. Deze module is opgebouwd rond vergelijkingen uit Farquhar *et al.* (1980), Leuning (1995) en Bernacchi *et al.* (2001, 2003).

De module voor kasklimaat simuleert het actuele kasklimaat in tijdstappen van 5 minuten. De kas wordt daartoe verdeeld in een aantal compartimenten: het kasdek, de lucht tussen het schermpakket en kasdek, de verschillende schermen, enkele luchtlagen boven het gewas, een aantal gewaslagen, de lucht onder het gewas en enkele lagen in de grond. Tussen die compartimenten treedt transport van warmte op in allerlei vormen:

- Warmtegeleiding in de bodem en het glasdek,
- Transport van warmte en waterdamp door convectie (beweging van de lucht), inclusief het eventuele extra transport tengevolge van een onstabiel temperatuurprofiel (koude lucht boven warme lucht),
- De absorptie, reflectie en transmissie van PAR en NIR licht door kasdek, schermen, gewas en bodem,



**Figuur 2.1.** De modules van een Explorer kasklimaat model. Het teeltmodel is specifiek voor een gewas, in dit rapport tomaat of paprika.

- Productie van waterdamp (met gebruik van de fotosynthese module),
- De warmtestraling geproduceerd en geabsorbeerd door het kasdek, de schermen, het gewas en de bodem,
- De warmte afgegeven door de verwarmingsbuizen en de luchtbehandeling,
- De uitwisseling van warmte en waterdamp met de buitenlucht door ventilatie, het inblazen van lucht, e.d.

Het netto resultaat van al deze processen is het kasklimaat, dat op zijn beurt weer bepalend is voor de fotosynthese en de groei van het gewas. De onderdelen van het explorer kasklimaatmodel zijn geschreven op basis van de literatuur op het gebied van licht en kasklimaat (bijvoorbeeld Goudriaan, 1977; Goudriaan & van Laar, 1994; Monteith & Unsworth, 1990; de Zwart, 1996; Stanghellini, 1987; Stanghellini & de Jong, 1995) of op basis van de algemene literatuur over fysische transportverschijnselen (Bird *et al.*, 1960; Anonymous, 1990; Raithby & Hollands, 2000; Incropera *et al.*, 2006).

Het kasklimaat model kent twee groepen invoergegevens. Het lichtblauwe vak in Figuur 2.1 bevat de weerscondities zoals temperatuur en vochtgehalte van de buitenlucht, instraling en de windsnelheid.

De tweede groep invoergegevens in het roze vak in Figuur 2.1 betreft de verschillende buistemperaturen, schermstanden, raamstanden en de stand van de luchtbehandeling en eventuele assimilatiebelichting. Dit zijn stuurvariabelen waarmee het kasklimaat beïnvloed wordt. De kasklimaat module bepaalt die stuurvariabelen niet zelf, maar rekent slechts uit wat er gebeurt bij de waarden die elders worden bepaald.

In het schema van Figuur 2.1 worden de stuurvariabelen berekend door de module "klimaatcomputer". Deze module vergelijkt het gesimuleerde kasklimaat met de setpoints die door het teeltmodel opgelegd zijn. Als het te warm, te koud of te vochtig is in de kas dan worden nieuwe waarden voor de stuurvariabelen berekend

en doorgegeven aan de kasklimaat module. Op deze wijze wordt het kasklimaat geregeld door een (virtuele) klimaatcomputer.

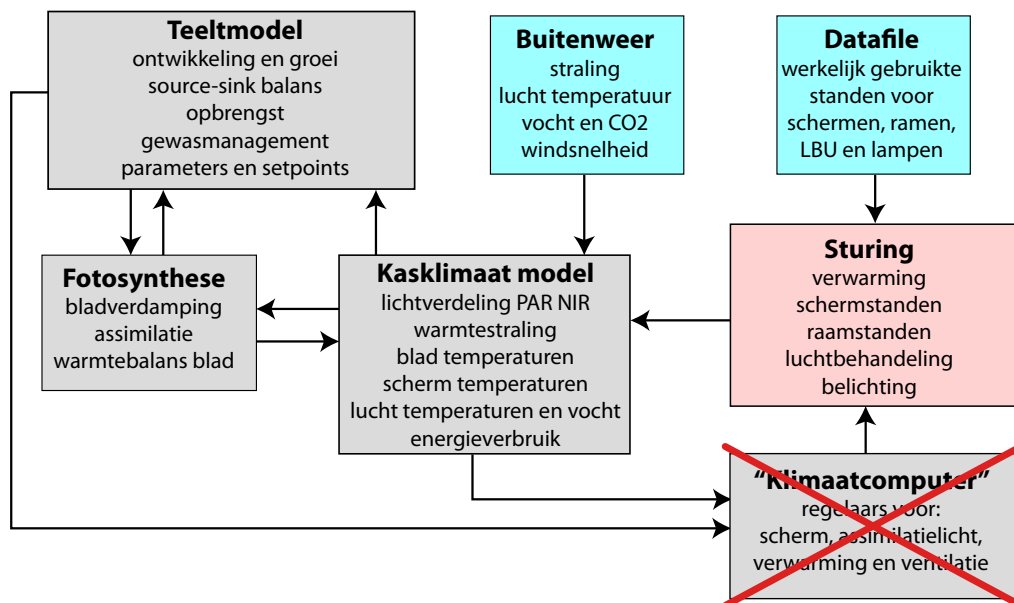
## 2.3 Werkwijze

Om een proef door te rekenen wordt de virtuele "klimaat computer" in het model eerst uitgeschakeld. Inplaats daarvan wordt het kasklimaat berekend voor de feitelijk gebruikte standen van ramen, verwarming en luchtbehandeling die tijdens de proef zijn vastgelegd. Het schema van het Explorer model verandert dan in Figuur 2.2.

De kasklimaat simulatie wordt nu helemaal aangestuurd door de weerscondities en de gemeten standen van ramen, verwarming en luchtbehandeling. Het gesimuleerde kasklimaat, de planttemperaturen, de productie en het energiegebruik moeten dan in overeenstemming zijn met de proefresultaten (zie verder hoofdstuk 2.3.1 en Hoofdstuk 3 voor het resultaat).

Als model en proef overeenkomen kunnen vervolgens scenarioberoeeningen worden gedaan. Het model wordt dan gebruikt om uit te rekenen wat er gebeurd zou zijn bij afwijkende inputs, meer of minder schermen, meer of minder verwarmen, een ander setpoint voor het vochtgehalte, etc.

In hoofdstuk 2.3.2 wordt op deze procedure uitvoerig ingegaan.



**Figuur 2.2.** De modules van een Explorer kasklimaat model worden hier aangestuurd met de geregistreerde standen voor verwarming, ramen en luchtbehandeling uit een praktijkexperiment. Het resultaat is het doorrekenen van de proef, waarbij het gesimuleerde kasklimaat, het energiegebruik en de opbrengst in overeenstemming moeten zijn met de proefresultaten.

### 2.3.1 Validatie van het model

De teeltmodules voor paprika en tomaat zijn in eerdere experimenten geparаметeriseerd (Nederhof *et al.*, 2010; Schapendonk *et al.*, 2010). Het aantal vruchten per tros en de tijdstippen waarop extra stengels werden aangehouden zijn overgenomen uit de registratie van de proeven.

Opbrengst en vruchtgewichten kunnen slechts correct worden gesimuleerd als de snelheid van bladafplitsing *goed* overeenkomt met de werkelijkheid. Deze snelheid is afhankelijk van de temperatuur en ook rasafhankelijk. In het teeltmodel wordt gebruik gemaakt van de temperatuurafhankelijkheid zoals beschreven door Heuvelink1996, in combinatie echter met een waarde bij 20°C die zodanig geschaald is dat het totaal aantal gevormde bladeren voor het gebruikte ras (bijna) gelijk is aan het aantal dat is waargenomen in het experiment. Voor Komeett resulteert een bladafplitsing bij 20°C van 2.55 bladeren per week in een gesimuleerde gemiddelde bladafplitsing van 2.40 bladeren per week versus een gemeten bladafplitsing van 2.43.

De maatvoering van alle kaselementen werd in kaart gebracht, evenals de fysische eigenschappen van de schermen. De parameters voor allerlei fysische processen binnen het Explorer kasklimaat model zijn afkomstig uit metingen (Schapendonk *et al.*, 2010) of uit de literatuur (de Zwart, 1996; Stanghellini, 1987; Yin *et al.*, 2003; de la Faille *et al.*, 2009; de Zwart *et al.*, 2010).

Voor het schatten van de effectiviteit van de ventilatie zijn enkele perioden met veel instraling en koele buitenlucht gebruikt. Op deze selectieve "ventilatie dagen" (dagen waarop echt geregeld is met de ramen) konden we goede schattingen maken van de effectiviteit van de ramen door het dagverloop van gemeten temperatuurveranderingen in relatie tot de raamstanden te bestuderen.

### 2.3.2 Scenario berekeningen

Voor scenario berekeningen is het niet voldoende om een proef correct door te rekenen op basis van gemeten weer en de geregistreerde standen van ramen, verwarming en LBK. Het weglaten van een scherm, bijvoorbeeld, leidt tot een hogere warmtebehoefte waardoor de buizen en/of de LBK anders aangestuurd moeten worden dan in de proef. Scenarioberekeningen kunnen daarom *alleen* gedaan worden *met een actieve klimaatregeling* als onderdeel van het totale model en niet direct op basis van de registraties uit de proef.

We hebben daarom naast de kasklimaat module een virtuele klimaatcomputer nodig die het gesimuleerde kasklimaat regelt. De klimaatcomputer berekent uit het gerealiseerde (gesimuleerde) kasklimaat steeds nieuwe standen voor ramen, schermen, verwarming en LBK met behulp van PI-regelaars. De berekende standen worden doorgegeven aan de kasklimaat module (zie Figuur 2.1). De kasklimaat module rekent vervolgens uit wat er gebeurt op basis van de opgegeven standen van de stuurvariabelen. Als kastemperatuur en/of VD niet (helemaal) goed zijn moet de klimaatcomputer "bijregelen", zoals dat ook in werkelijkheid het geval is. De PI-regelaars werken op basis van setpoints, die verschillend kunnen zijn voor verschillende perioden van de dag en het jaar.

Er is nu een systeem ontstaan dat zelfstandig reageert op de condities buiten de kas en dat een kasklimaat regelt en een energiegebruik simuleert. De klimaatcomputer werkt op basis van instellingen voor het schermgebruik, de verwarming met

ondernet en/of groeibuis, de vochtafvoer met ramen en/of LBK, en de setpoints voor temperatuur en VD.

Op basis van realistische instellingen voor deze regelingen dient nu eerst de uitkomst van de proef opnieuw gereproduceerd te worden (zie Hoofdstuk 4). Deze simulatie speelt een belangrijke rol in de scenario berekeningen. Het is de "referentie run" ten opzichte waarvan het effect van andere keuzes en instellingen worden doorgerekend. Het resultaat van een andere wijze van schermen, bijvoorbeeld, wordt dan uitgedrukt als een energiegebruik dat hoger of lager is dan het referentieverbruik.

Het is dus niet de proef zelf die de referentie vormt, maar de referentie wordt getoetst aan de proefresultaten. Deze werkwijze zorgt ervoor dat scenarioberekeningen worden gedaan met één consistent modelsysteem, terwijl toch de proef het uitgangspunt blijft van de doorgerekende scenario's (een afwijkende wijze van schermen, een afwijkende wijze van vochtafvoer). Door op deze wijze modelberekeningen te combineren met proefgegevens worden modellen verbeterd en worden proeven doelgerichter en effectiever.

---

# Simulatie van de proef

---

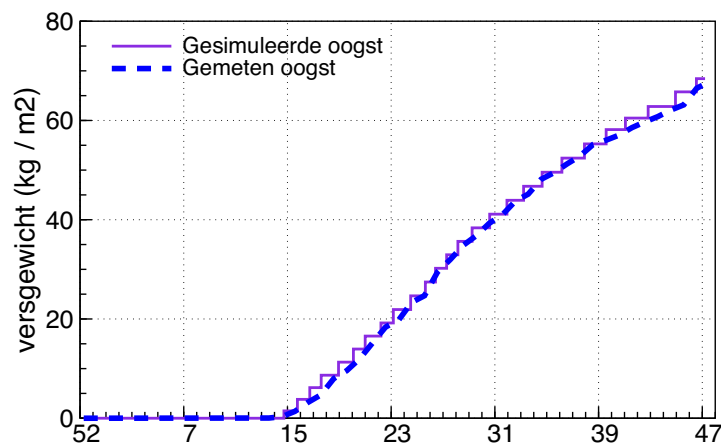
Om de proef door te rekenen met het explorer model wordt, ook in het model, het kasklimaat aangestuurd door de standen van ramen, verwarming en luchtbehandeling zoals die in werkelijkheid zijn geweest. Het gesimuleerde kasklimaat moet dan ook overeenkomen met de geregistreeerde temperatuur en luchtvochtigheid, en ook energieverbruik en teelt moeten in overeenstemming zijn met de proefresultaten (zie hoofdstuk 2.3).

Hieronder wordt de gesimuleerde proef vergeleken met de proef zelf. Achtereenvolgens wordt ingegaan op de opbrengst, het kasklimaat en het energiegebruik.

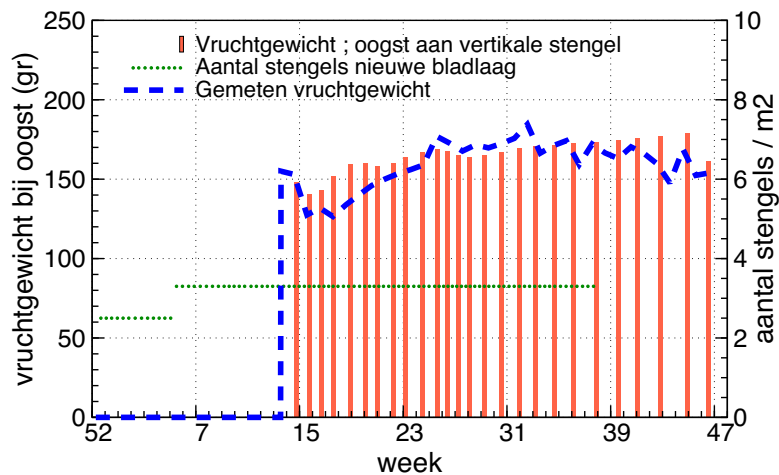
## 3.1 Teelt

Figuur 3.1 laat zien dat de gesimuleerde opbrengst uitstekend overeenkomt met de gemeten oogst. Figuur 3.2 toont de gesimuleerde en de gemeten vruchtgewichten bij de afzonderlijke oogsten. Verder is te zien dat vanaf week 5 de stengeldichtheid werd verhoogd naar  $3.3 \text{ m}^{-2}$  (groene stippellijn).

Het verloop van het vruchtgewicht wordt verklaard door de plantbalans, ofwel de verhouding tussen de beschikbare assimilaten en de vraag ten behoeve van groei. De plantbalans is de blauwe curve in Figuur 3.3. In het voorjaar stijgt de balans



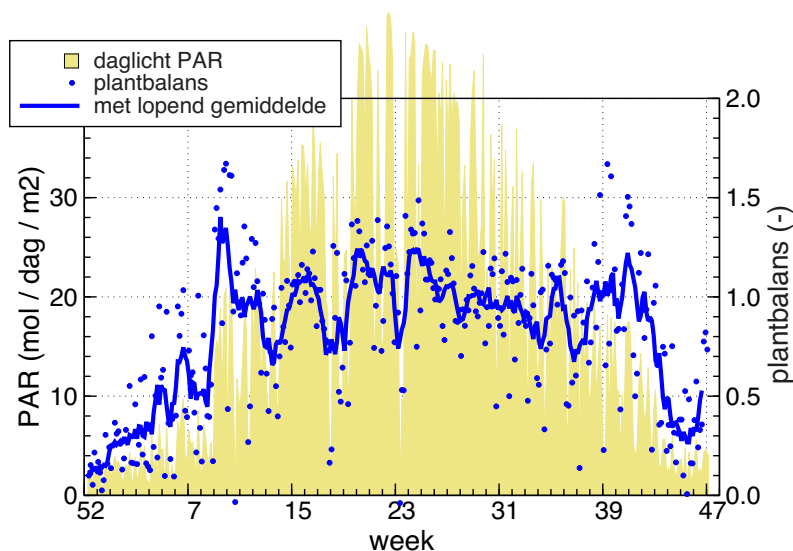
**Figuur 3.1.** Oogst gesimuleerd voor de gemeten klimaatbesturing. De in de proef gemeten oogst is weergegeven als een stippellijn.



**Figuur 3.2.** Vruchtgewicht bij oogst gesimuleerd voor de gemeten klimaatsturing. Tevens zijn het aantal stengels weergegeven (groene stippellijn; rechteras) en het gemeten gemiddelde vruchtgewicht weergegeven. In de proef zijn de eerste vruchten in week 13 geogst. Dat waren er erg weinig (in het model géén).

snel door de toenemende hoeveelheid licht en de toename in lichtonderschepping. In de zomer fluctueert de verhouding rond de waarde 1 (de evenwichtswaarde) omdat de temperaturen in de kas 's zomers hoger zijn, waardoor zowel de trosaanleg (= bladafsplittingsnelheid) en de trosafrijping evenredig toenemen.

De wat lagere vruchtgewichten rond week 15 en 16 lijken dus het resultaat van een tekort aan assimilaten. Dat tekort is in werkelijkheid iets sterker geweest dan berekend met het model (zie gemeten vruchtgewichten in Figuur 3.2 rond week 18). Een tweede kleine afwijking in de periode van week 41-week 45 is het gevolg van de berekende hoge vruchttemperaturen en daardoor een snellere vruchtontwikkeling.



**Figuur 3.3.** De dagelijks geabsorbeerde hoeveelheid PAR licht en de plantbalans gesimuleerd voor de gemeten klimaatsturing. De plantbalans wordt over een relatief lange periode rond de 1.0 gehouden door te sturen met de temperatuur. De gemiddelde plantbalans in de simulatie (source-sink verhouding) bedraagt 0.883.



Het gewicht blijft dan iets achter. Dit effect wordt door de berekeningen van de teeltmodule iets onderschat, dat wil zeggen dat het berekende vruchtgewicht wat hoger is dan het gemeten vruchtgewicht rond week 18.

Na de zomer neemt de hoeveelheid licht af maar de plantbalans blijft tot week 41 op niveau. Dit werd gerealiseerd door een lager temperatuursetpoint en een daaraan gerelateerde tragere trosontwikkelingssnelheid. Dit effect wordt geïllustreerd door de steeds grotere afstanden tussen de afzonderlijke oogsten in Figuur 3.2.

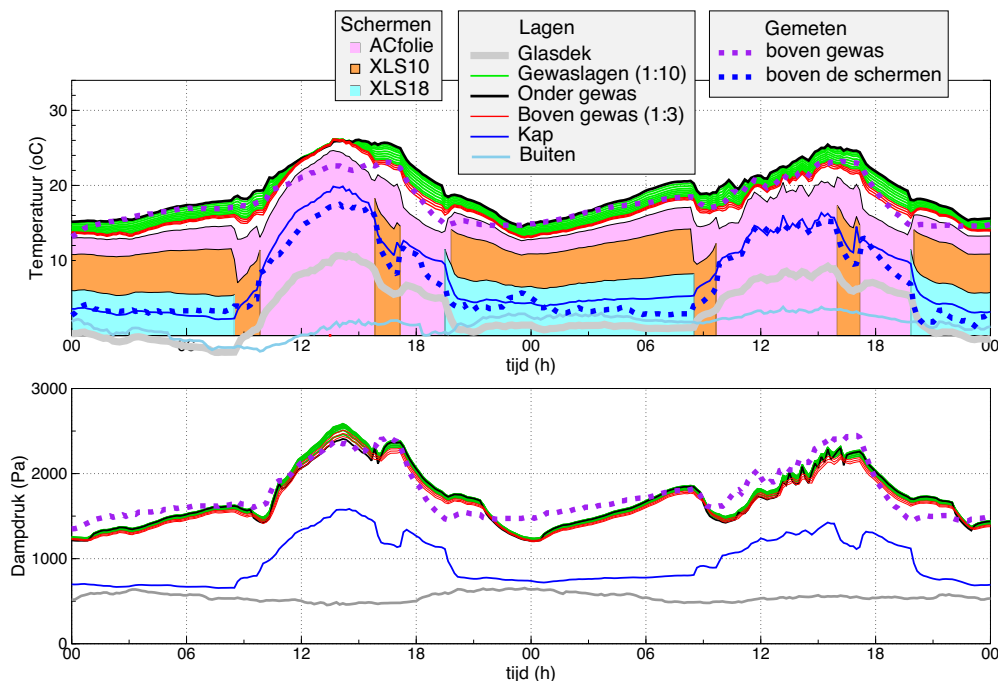
## 3.2 Kasklimaat

Voor alle 335 dagen van de proef zijn kasklimaat en plantprocessen gesimuleerd in tijdstappen van 5 minuten. Enkele relevante resultaten van het kasklimaat zijn weergegeven in de Figuren 3.4, 3.5 en 3.6.

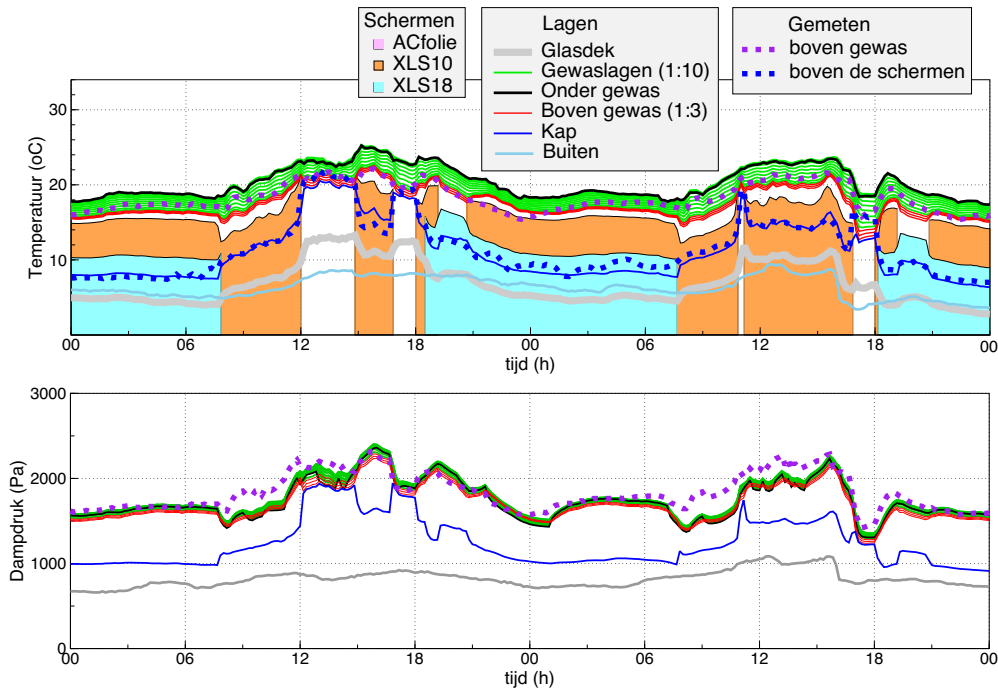
### Vergelijking met metingen

Figuur 3.4 laat gesimuleerde temperaturen (bovenste grafiek) en vochtgehalten (onderste grafiek) zien voor twee dagen in januari. De rode lijnen zijn de gesimuleerde temperatuur en dampdrukdeficit boven het gewas, de blauwe lijnen zijn de betreffende waarden boven de schermen, in de nok. De werkelijk gemeten waarden zijn weergegeven als gestippelde lijnen met overeenstemmende kleuren. Als een scherm gesloten is wordt de berekende temperatuur van dat scherm weergegeven als de bovenrand van een gekleurd vlak, behorend bij dat scherm (zie legenda Figuur 3.4).

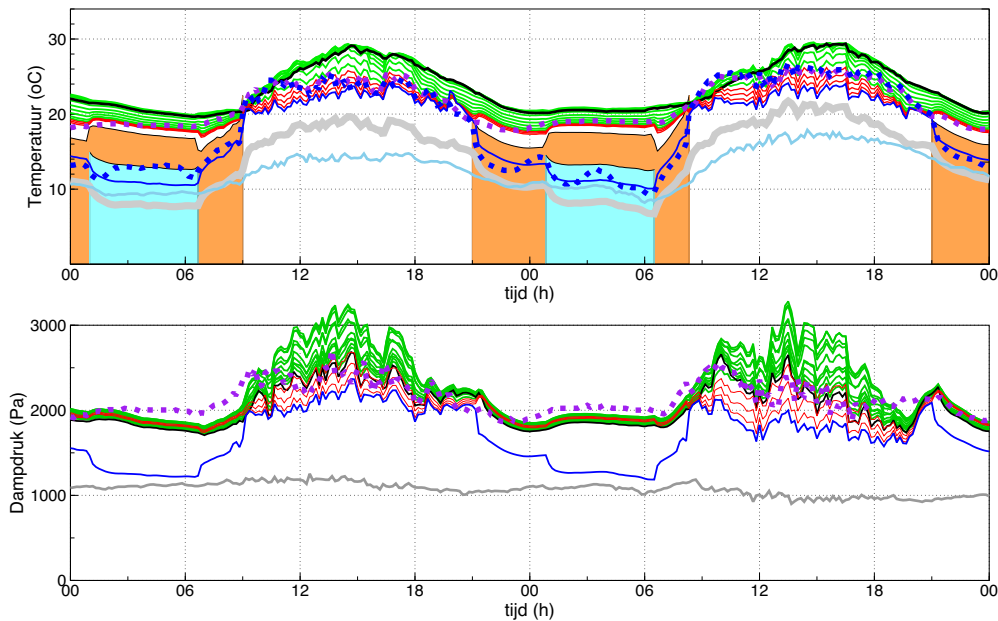
In januari is het ACfolie nog in gebruik (het roze vlak in Figuur 3.4). We zien de temperatuur van het folie enkele graden omhoog gaan als de twee overige schermen



**Figuur 3.4.** Kasklimaat gesimuleerd voor 30 en 31 januari 2010 met de gemeten schermstanden, verwarming en ventilatie. Waarden gemeten boven het gewas en boven de schermen ("kap") zijn in grafiek gebracht als stippellijnen.



**Figuur 3.5.** Kasklimaat gesimuleerd voor 27 en 28 februari 2010 met de gemeten schermstanden, verwarming en ventilatie. In de korte perioden zonder scherm lopen de temperaturen boven het gewas en in de kap ("boven de schermen") snel naar elkaar toe.



**Figuur 3.6.** Kasklimaat gesimuleerd voor 26 en 27 april 2010 met de gemeten schermstanden, verwarming en ventilatie. De zwarte lijn representeert de onderste luchtlaag en de rode lijn de bovenste luchtlaag. De groene lijnen zijn stappen daartussenin. Ook hier is te zien dat de temperatuur in de kap heftig reageert op het openen en sluiten van de schermen. Verder zien we de temperatuur van XLS10 omhoog gaan als het erboven liggende XLS18 scherm wordt gesloten. Er is veel meer licht dan in de wintermaanden en het dampdruk deficit in het gewas is hoog.

worden gesloten. De hogere temperatuur van het ACfolie leidt op zijn beurt weer tot geringere convectieve en stralingsverliezen op gewashoogte. De gewastemperatuur wordt als het ware "opgetild" als de temperatuur van het ACfolie omhoog gaat. Dat is een soort bonus voor het gebruik van dubbele schermen.

De Figuren 3.5 en 3.6 geven het kasklimaat weer voor twee dagen in respectievelijk februari en april. Het ACfolie is dan buiten gebruik en de temperatuur in de "kap" (tussen schermen en kasdek, blauwe lijn) reageert veel heftiger op het openen of sluiten van het XLS10 of het XLS18 scherm dan in januari (zie Figuur 3.4).

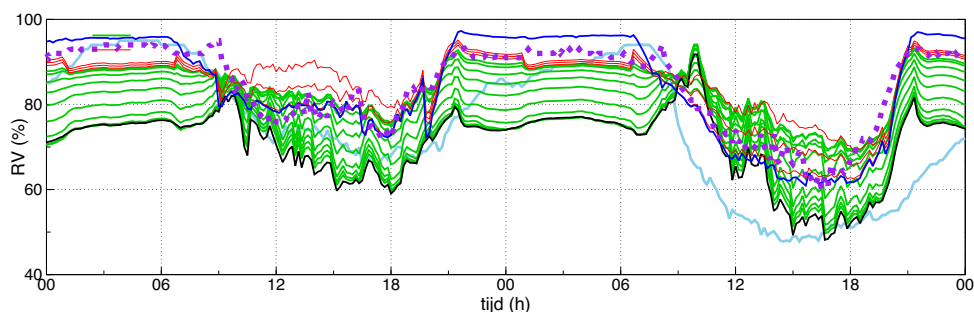
Omdat de noktemperatuur ook geregistreerd werd in het experiment (blauwe punten), kan een vergelijking gemaakt worden tussen gemeten en berekende waarden. De overeenkomst blijkt uitstekend te zijn. Omdat de voelbare warmte verliezen voornamelijk door opgaande lucht en uittredende straling bepaald worden, bevestigt de goede overeenkomst tussen de berekende en gemeten noktemperatuur dat ook de berekende temperaturen in alle onderliggende lagen onder het kasdek correct zijn berekend. Immers als de laatste schakel klopt, zijn ook de voorgaande schakels in orde. Het meten van noktemperatuur in een kas levert daarom veel op tegen een relatief kleine investering.

## Vocht

De grote uitdaging voor HNT is het inperken van hoge luchtvochtigheid in combinatie met plaatselijke koude val in de kas. Die combinatie is desastreus. De kans dat zo'n combinatie van gebeurtenissen optreedt is aanzienlijk, vanwege de focus van HNT om met schermen energie te besparen. Drogen met buitenlucht via de LBK is in veel gevallen een adequate oplossing maar helaas niet altijd afdoende. Bij een hoge buiten RV moeten aanvullende maatregelen, zoals raamventilatie met gesloten doek of via kieren uitkomst bieden.

Wanneer zijn die aanvullende maatregelen nodig?

In de winter is de verdamping relatief laag en dan is het dampdrukdeficit in de luchtlagen op verschillende hoogtes bijna gelijk (Figuur 3.4). De kleine verschillen worden dan bijna geheel door verschillen in temperatuur bepaald. Door de relatief lage AV (Absoluut Vochtgehalte) buiten, levert de LBK voldoende capaciteit om het dampdruk deficit op het gewenste setpoint te houden. De effecten van het AC-



**Figuur 3.7.** Gesimuleerd relatief vochtgehalte voor 26 en 27 april. De kleine afwijking in het nachtelijk dampdrukdeficit in Figuur 3.6 leidt tot een grotere afwijking in de RV. De zwarte lijn representeert de onderste luchtlaag en de rode lijn de bovenste luchtlaag. De groene lijnen zijn stappen daartussenin. De paarse stippellijn is de gemeten RV op tophoogte in het gewas. De lichtblauwe lijn is de RV buiten en de donkerblauwe lijn is de berekende RV in de nok

folie zien we goed door de Figuren 3.4 en 3.5 met elkaar te vergelijken. Als overdag het energiescherm wordt opengetrokken wordt het verschil tussen de noktemperatuur en de temperatuur van de lucht boven het gewas onmiddellijk genivelleerd, terwijl in aanwezigheid van het ACfolie een verschil van 5°C wordt gehandhaafd, wat uiteraard tot aanzienlijke besparingen leidt.

Bij een geringe toename van de straling wordt een toename in vocht door verdamping vaak gecompenseerd door een toename van de bladtemperatuur zodat het extra vocht niet condenseert. In dat kader heeft schermen tegengestelde consequenties: een afname van licht (afname van bladtemperatuur) en een toename in RV. De kans op condensatie neemt toe en is vaak kritisch maar kan lokaal sterk verschillen.

Dat is echter niet meer het geval in het voorjaar met erg veel straling zoals Figuur 3.6 laat zien. Overdag is door de hogere straling de verdamping veel groter dan in Figuur 3.5. De lokale effecten veroorzaakt door die toename van de verdamping zijn echter beperkt omdat ook de temperatuur van de bladeren hoger is. Het dampdrukdeficit op de verschillende hoogtes komt daardoor ver uit elkaar te liggen, (de groene lijnen), maar is op alle bladniveau's dusdanig hoog dat het systeem ongevoelig is voor verstoringen zoals koudeval<sup>1</sup>.

's Nachts liggen de vochtegehaltenes op de verschillende hoogtes dicht bij elkaar door de relatief kleine verdamping (Figuur 3.6). De temperatuurverschillen veroorzaken toch een aanzienlijke variatie in de nachtelijke RV (Figuur 3.7), die door de lagere nachttemperatuur ook op een hoger niveau ligt dan overdag. In de bovenste luchtlagen is de RV hoger dan onderin door de relatief lage temperatuur. Toch is een kans op verstoring en bladnat onderin het gewas groter dan bovenin. Dit wordt veroorzaakt doordat verstoringen via koudeval altijd onderin terecht komen waar vervolgens een kleine temperatuurverlaging al tot een groot effect op het dampdrukdeficit leidt.

In dit verband is de ook de snelle stijging van de RV in de vroege ochtend van 27 april interessant. De RV aan de onderkant van het gewas stijgt snel tot boven de 90% doordat het eerste licht de luchtvochtigheid doet toenemen terwijl de temperatuur onderin slechts langzaam reageert.

Met deze inzichten in het achterhoofd wordt de volgende stap een check op het berekende energiegebruik.

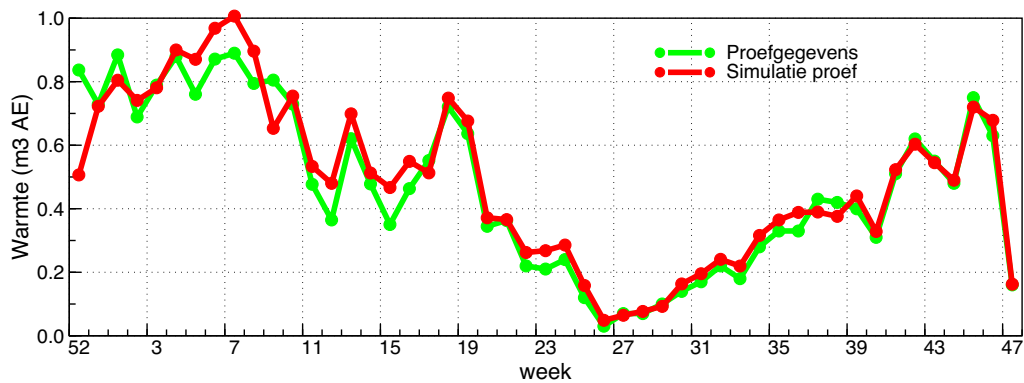
### 3.3 Energiegebruik

Om de scenario analyses te kunnen verrichten dient eerst de proef op de som genomen te worden voor de berekende energiebalans van de kas.

Het gesimuleerde warmtegebruik is de som van de warmte afgestaan door de buizen (ondernet en groeibuis) en de warmte benodigd voor het voorverwarmen van de lucht in de LBK. In Figuur 3.8 wordt het gesimuleerde verbruik vergeleken met het gemeten warmtegebruik.

Het totale gesimuleerde warmtegebruik voor de buizen in de tomatenproef bedraagt 672 MJ (dat is 20.4 m<sup>3</sup>, gemeten is 20.7 m<sup>3</sup>) en voor de luchtbehandeling 117 MJ (dat is 3.5 m<sup>3</sup>, gemeten is 2.3 m<sup>3</sup>). De in totaal gebruikte warmte (23.9 m<sup>3</sup>) is wat

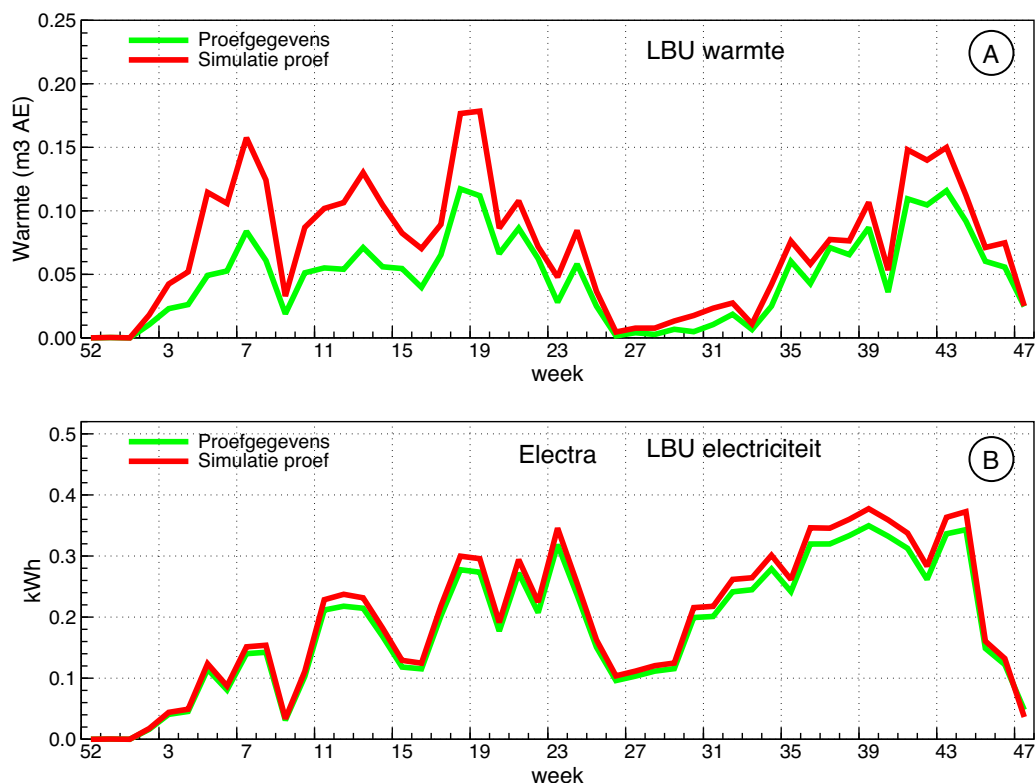
<sup>1</sup>Het is overigens niet eenvoudig om de RV of het "dampdrukdeficit" VD nauwkeurig te simuleren. Van belang is het verschil met verzadiging en dat vergt nauwkeurige waarden van zowel vochtgehalte als temperatuur. De totale verdamping wordt bovendien sterk beïnvloed door het vochtgehalte zelf, de eigenschappen van jonge en oude bladeren, en het aantal bladeren.



**Figuur 3.8.** Gemeten warmtegebruik vergeleken met het gesimuleerde warmteverbruik. Warmte is omgerekend naar aardgasequivalenten (A.E.) op basis van een energieinhoud van  $33 \text{ MJ m}^{-3}$ .

hoger dan de gemeten hoeveelheid van  $23.0 \text{ m}^3$  gas.

Het energiegebruik voor de luchtbehandeling wordt in Figuur 3.9 apart bekeken. Het elektriciteitsverbruik in de simulatie komt goed overeen met de metingen. Het verbruik bij vol vermogen ( $3.0 \text{ W m}^{-2}$ ) was zodanig gekozen dat het totale verbruik in de simulatie overeenkwam met dat in de proef. De data in Figuur 3.9 geven aan dat de inzet van de LBU correct is gesimuleerd.



**Figuur 3.9.** Gemeten energiegebruik van de LBU vergeleken met het gesimuleerde warmtegebruik. A. Warmte is omgerekend naar aardgasequivalenten (A.E.) op basis van een energieinhoud van  $33 \text{ MJ m}^{-3}$ . B. Elektriciteitsgebruik van de ventilator.

De voor het opwarmen van buitenlucht benodigde warmte wordt in het model overschat, met name in de periode voor week 20. De reden daarvan is onduidelijk. Mogelijk is bij hoge ventilatorstanden de capaciteit van de installatie onvoldoende geweest om de koude buitenlucht op te warmen tot een waarde die gelijk is aan het setpoint voor de verwarming. Met ander woorden: onder bepaalde omstandigheden zoals een lage buitentemperatuur en een hoge RV, wordt lucht met een te lage temperatuur ingeblazen. Omdat de temperatuur van de uitgeblazen lucht niet is gemeten, kan hieromtrent verder geen uitsluitsel worden gegeven.

### 3.4 Discussie

Teelresultaten, kasklimaat en energiegebruik in de simulatie komen goed overeen met die in de proef. Dat betreft niet alleen de totale oogst en het totale energiegebruik maar ook met het seizoensverloop van afrijping (Figuur 3.1) en het energiegebruik (Figuur 3.8).

Het hier bereikte resultaat lijkt moeilijk te verbeteren zonder uitgebreide metingen in de kas en aan de gebruikte materialen. De doorlatendheid van de schermen voor waterdamp bijvoorbeeld is niet goed bekend<sup>2</sup>.

Volledige simulatie van de luchtbehandeling vergt gegevens over de temperatuur van het in- en uitstromende verwarmingswater en het debiet. Voor de huidige berekeningen was alleen de ventilatiecapaciteit als fractie van een totale capaciteit bekend. Mogelijk heeft een niet lineair verband tussen debiet en fractie van de capaciteit geleid tot de afwijkingen in Figuur 3.9b. Deze afwijkingen vormen echter geen beletsel voor scenarioberekeningen. De LBK in het model heeft slechts een iets andere karakteristiek dan de echte LBK en omdat er in de scenarioberekeningen met geregeld kasklimaat wordt gewerkt speelt dat geen rol. Het energiegebruik van de LBK is bovendien slechts een bescheiden deel van het totale warmtegebruik, ongeveer 15%.

Een realistische en consistente simulatie van het energiegebruik, het kasklimaat en de opbrengst maakt het nu mogelijk om scenarioberekeningen te doen. Daartoe worden eerst de geregistreerde aansturing van het kasklimaat (raamstanden, verwarming, stand luchtbehandeling) vervangen door een (virtuele) klimaatcomputer (Figuur 2.1).

---

<sup>2</sup>Het model is overigens niet erg gevoelig voor die doorlatendheid omdat gesloten schermen het convectieve transport in ieder geval grotendeels blokkeren, maar voor "fintuning" van wat er de kap in komt en eventueel tegen het glasdek condenseert zijn de schermeigenschappen wel van belang.

---

# Virtuele klimaatcomputer

---

In scenarioberekeningen kan niet gewerkt worden met de *geregistreeerde* standen van scherm, buis, raam en LBK. De reden daarvan is eenvoudig: De verandering van één instelling heeft consequenties voor de hele klimaatbesturing en dat wordt niet meegenomen als de klimaatbesturing als een vaststaande dataset wordt ingelezen.

Het weglaten van een scherm, bijvoorbeeld, leidt tot een hogere warmtebehoefte waardoor de buizen en/of de LBK anders aangestuurd moeten worden dan in de proef. Scenarioberekeningen moeten daarom gedaan worden *met een actieve klimaatregeling* als onderdeel van het totale model en niet direct op basis van de registraties uit de proef. De samenhang tussen de verschillende stuurvariabelen wordt op die wijze gewaarborgd en alleen op die manier is het reëel om energiegebruik en opbrengst uit verschillende simulaties met elkaar te vergelijken.

De tijdens de proef geregistreeerde aansturing die gebruikt is in Hoofdstuk 3 wordt daarom vervangen door een eenvoudige (virtuele) klimaatcomputer die het gesimuleerde kasklimaat regelt (zie Figuur 2.1 op bladzijde 17). Het kasklimaat wordt geregeld met enkele PI-regelaars voor de verwarming en de ventilatie, en door middel van regelaars voor het openen en sluiten van de schermen.

Omdat de gebruikte setpoints tijdens de proef nogal eens zijn aangepast is het niet eenvoudig om met een virtuele klimaatcomputer het verloop van de proef exact te reproduceren. Het blijkt echter dat een zeer acceptabel resultaat verkregen wordt met setpoints voor vijf perioden. Net als in werkelijkheid zijn verschillende setpoints nodig om door het jaar heen een goede plantbalans te handhaven.

## 4.1 Temperatuur setpoints

In Tabel 4.1 staan de temperatuur setpoints voor de virtuele klimaatcomputer waarmee de proefresultaten opnieuw zijn gereproduceerd. De tabel is in feite een vereenvoudiging van de in werkelijkheid gebruikte setpoints. Voor het VD setpoint zijn etmaal waarden gebruikt.

De temperatuur is tot week 10 tamelijk hoog gehouden, vermoedelijk om de generatieve ontwikkeling snel te laten plaatsvinden. In de zomer zijn de nachttemperaturen verlaagd, eerst om te compenseren voor de hoge temperaturen overdag en vervolgens om in de herfst de bladafsplitting wat af te remmen.

**Tabel 4.1.** Setpoints van de eenvoudige (virtuele) klimaatcomputer gebruikt voor het reproduceren van de opbrengst en het energieverbruik van de proef. De dag is de periode tussen zonsopgang en zonsondergang, de voornacht eindigt om 23:00 uur, de nacht eindigt om 4:00 uur. De eenheid van VD (vapour pressure deficit) is  $\text{g m}^{-3}$ .

periode	temperatuur laag ( $^{\circ}\text{C}$ )				temp hoog etmaal	VD etmaal
	dag	voornacht	nacht	nanacht		
vanaf start	21.0	16.0	17.0	19.0	25.0	2.1
vanaf week 10	18.0	16.0	17.0	18.0	25.0	2.1
vanaf week 22	18.0	16.0	16.0	17.0	25.0	2.1
vanaf week 42	18.0	16.0	16.0	17.0	25.0	1.4
laatste 5 dagen	16.0	16.0	16.0	17.0	25.0	1.4

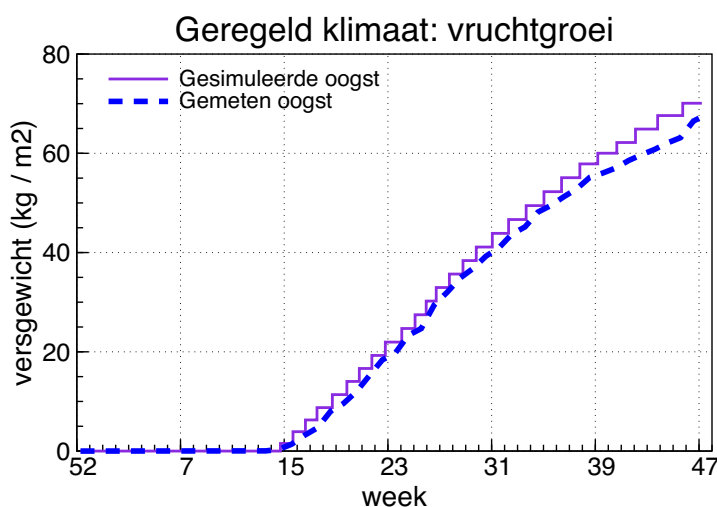
#### 4.1.1 Scherm setpoints

Het XLS18 scherm wordt overdag nooit gebruikt. De regeling is afgesteld op een verschil tussen de buiten en de binnentemperatuur. Het scherm wordt gesloten als de temperatuur buiten  $3^{\circ}\text{C}$  lager is dan het setpoint voor de verwarming en opent het scherm als dat temperatuurverschil kleiner wordt dan  $1^{\circ}\text{C}$ .

Het energiescherm sluit ook als de instraling (buiten) kleiner is dan  $50 \text{ Wm}^{-2}$  en opent weer als de straling hoger wordt dan  $100 \text{ Wm}^{-2}$ . Het sluit bovendien als de temperatuur buiten  $5^{\circ}\text{C}$  lager is dan het setpoint voor de verwarming (en het opent als dat temperatuurverschil kleiner wordt dan  $3^{\circ}\text{C}$ ). Het scherm sluit pas als aan beide voorwaarden voldaan is.

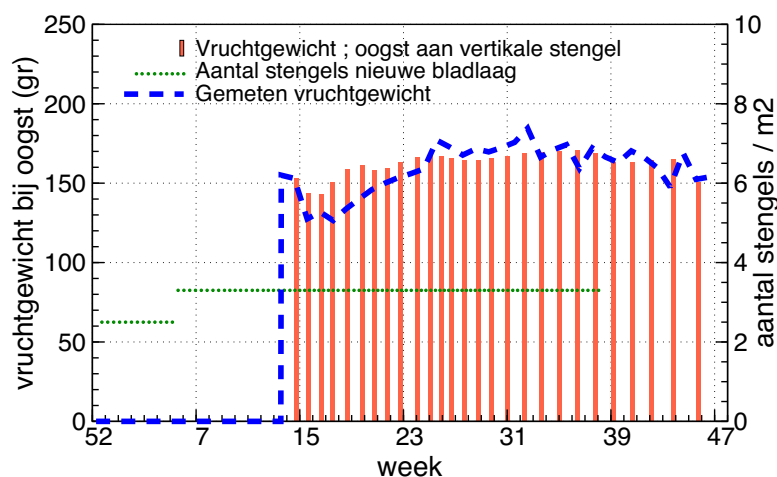
Deze regels reproduceren de schermstanden die daadwerkelijk tijdens de proef werden gerealiseerd. Ter illustratie worden in Appendix A acht dagen gesimuleerde schermstanden vergeleken met waargenomen schermstanden.

Het ACfolie is permanent aanwezig geweest tot 26 februari en is daarna uit de kas verwijderd.



**Figuur 4.1.** Oogst gesimuleerd voor geregeld kasklimaat. De in de proef gemeten oogst is weergegeven als een stippellijn.





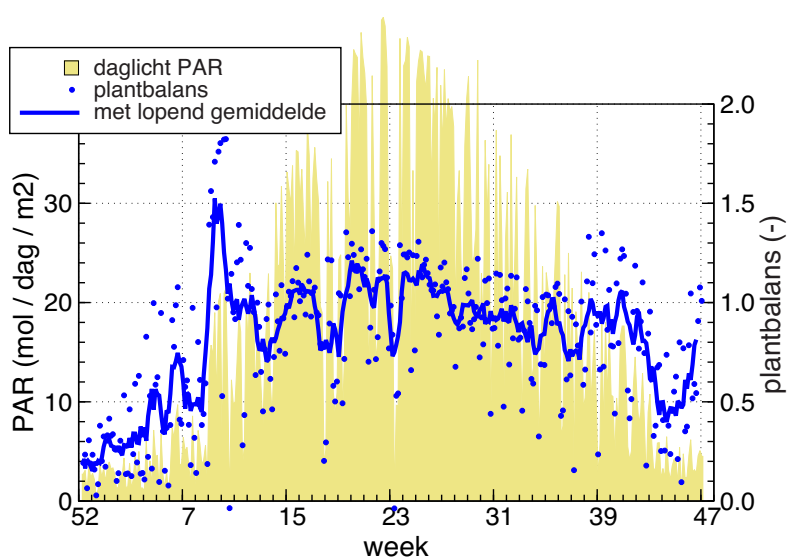
**Figuur 4.2.** Vruchtgewicht bij oogst gesimuleerd voor geregeld kasklimaat.

## 4.2 Teelt en energiegebruik

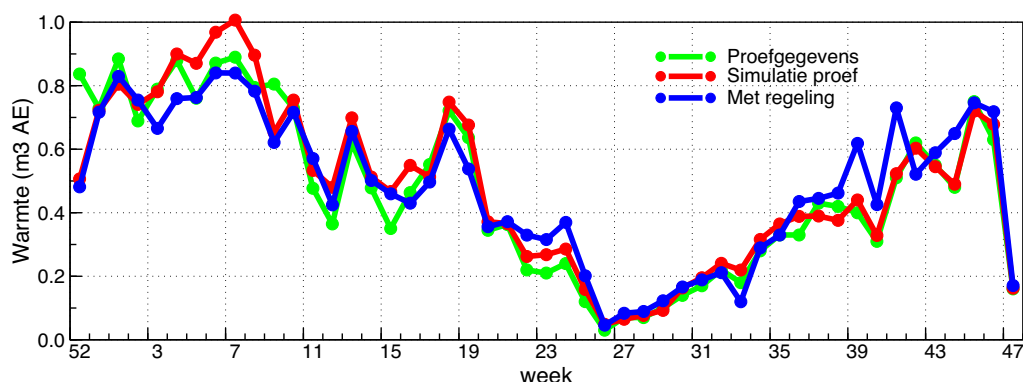
Figuur 4.1 laat de gesimuleerde opbrengst zien, weer in combinatie met de gemeten oogst. Figuur 4.2 toont de vruchtgewichten bij de afzonderlijke oogsten in het simulatiemodel.

Vergelijking van Figuur 4.1 en Figuur 4.2 met de Figuren 3.1 en 3.2 in hoofdstuk 3.1 laat zien dat de eerste oogst nu iets eerder plaatsvindt. De gemiddelde bladafsplitting in de simulatie met klimaatcomputer is ook wat hoger, 2.48 bladeren per week (in de simulatie met waargenomen setpoints was de bladafsplitting 2.40 bladeren per week).

De totale oogst van 70.1 kg is hoger dan die in de gesimuleerde proef (68.4 kg) en de vruchten gemiddeld iets lichter (162 g versus 165 g). De gemiddelde source-sink verhouding in Figuur 4.3 is vrijwel gelijk (0.903 versus 0.904).



**Figuur 4.3.** Plantbalans gesimuleerd voor geregeld kasklimaat. De gemiddelde plantbalans (source-sink verhouding) bedraagt 0.875.



**Figuur 4.4.** Warmtegebruik gesimuleerd met behulp van de virtuele klimaatcomputer op basis van de setpoints in hoofdstuk 4.1 (blauwe lijn). Tevens zijn de beide lijnen uit Figuur 3.8 hier nogmaals weergegeven.

Figuur 4.4 laat het wekelijkse warmtegebruik zien samen met de eerder in Figuur 3.8 getoonde curves. Het totale warmtegebruik bedraagt 660 MJ voor de buizen en 120 MJ voor de ingeblazen lucht. Dat komt overeen met een totaal van  $23.6 \text{ m}^3$  aardgas. Dat is bijna gelijk aan dat in de proef ( $23.0 \text{ m}^3$ ) en iets lager dan dat in de gesimuleerde proef ( $20.4 + 3.5 = 23.9 \text{ m}^3$  aardgas).

### 4.3 Discussie

De simulatie met de virtuele klimaatcomputer verschilt op details van de simulatie met geregistreerde klimaatsturing in Hoofdstuk 3. Een voorbeeld daarvan is te zien in Appendix A. Het is echter niet mogelijk om dichterbij de werkelijkheid te komen zonder uitvoerige (maar nutteloze) tuning van de setpoints. Voor de simulaties met en zonder klimaatcomputer is het teeltmodel identiek en naarmate de virtuele regeling de werking van de echte klimaatcomputer beter benadert, zullen steeds meer details in het gesimuleerde verloop van temperatuur en luchtvochtigheid overeen komen.

Ondanks de kleine verschillen worden opbrengst en energiegebruik met de setpoints uit hoofdstuk 4.1 correct beschreven. Het gebruik van verschillende setpoints voor de temperatuur is realistisch. De bladafplitsing wordt erdoor beïnvloed op zodanige wijze dat de plantbalans over een groot deel van de teeltperiode rond de evenwichtswaarde van 1.0 schommelt en het vruchtgewicht redelijk constant blijft. Het stuur van de teelt (i.e. de temperatuur) is dus effectief gehanteerd.

Het setpoint voor de dampdruk deficit is in de laatste 5 weken van de simulatie verlaagd naar  $1.4 \text{ g m}^{-3}$  (Tabel 4.1). Doen we dat niet dan wordt het energiegebruik in die laatste weken erg hoog. Het betreft hier de periode aan het eind van de teelt waarin de plant niet verder groeit doordat de top eruit gehaald is (in week 38). Het kan zijn dat in werkelijkheid niet het setpoint is verlaagd maar dat verdamping en energiegebruik zijn afgenomen door een afname van de LAI en de veroudering van de bladeren. Omdat het hier slechts de laatste periode van 5 weken betreft is dat niet uitgezocht.

De virtuele klimaatcomputer in combinatie met het kasklimaatmodel en het teeltmodel maken het nu mogelijk om consequenties van allerlei scenario's voor klimaatsturing door te rekenen. De simulatie wordt immers alleen nog met de weerscondities aangestuurd. Minder schermen, bijvoorbeeld, zal in de simulatie leiden

tot meer licht, meer verdamping en meer groei. De (virtuele) klimaatcomputer zorgt er tevens voor dat de ingestelde setpoints worden gehandhaafd. De grotere warmteverliezen leiden dan echter wel tot meer verwarming en daardoor een hoger energiegebruik.

#### 4.3.1 Gewasmanagement

Wanneer verschillende scenario's erg grote effecten hebben op het gewas zou er in principe ook een aangepast management gevoerd moeten worden. In de scenario berekeningen van de volgende hoofdstukken, wordt het gewasmanagement echter gelijk gehouden aan dat in de proef.

In het voorbeeld van méér licht door minder schermen zijn de *directe effecten*: een hogere groei en een hoger energiegebruik. Maar in principe is er een iets snellere bladafplitsing mogelijk, waardoor het optimale setpoint voor de kas temperatuur mogelijk iets omhoog zou kunnen. Daardoor zou ook het energiegebruik nog iets verder stijgen dan alleen door minder schermen. Een dergelijk *additioneel effect* van een aangepast gewasmanagement wordt in deze studie dus niet meegenomen. Het is klein ten opzichte van het directe effect van de ingreep en het berekenen van een optimaal gewasmanagement is erg gecompliceerd.

---

# Scenario Schermstrategie

---

In dit hoofdstuk worden scenario's doorgerekend omtrent het gebruik van schermen. Ter oriëntatie rekenen we eerst uit wat er gebeurt als één of meer van de aanwezige schermen niet gebruikt worden. Daarna gaan we in op de besturing van de schermen, het effect van het lichtniveau en de buitentemperatuur waarbij het scherm gesloten wordt.

## 5.1 Het effect van schermen

### 5.1.1 Aanwezige schermen worden wel of niet gebruikt

Tabel 5.1 laat zien hoe het energiegebruik en de opbrengst veranderen (ten opzichte van de situatie geheel zonder schermgebruik) als we eerst één, dan twee en tenslotte alle drie de schermen gebruiken. De laatste situatie correspondeert dan met de simulatie uit Hoofdstuk 4. De regels voor het sluiten en openen van de wèl gebruikte schermen zijn ook dezelfde als die uit Hoofdstuk 4.

De energiebesparing door het gebruik van drie schermen is aanzienlijk,  $19.3\text{ m}^3$  ten koste van  $1.4\text{ kg}$  opbrengst. Omdat de schermen praktisch alleen in de koude maanden van het jaar gebruikt zijn, heeft deze opbrengstvermindering vrijwel alleen betrekking op die maanden.

In Tabel 5.1 is verder te zien dat de besparingen door het gebruik van slechts één scherm niet bij elkaar kunnen worden opgesteld<sup>1</sup>. De extra besparing door een extra scherm neemt dus af als er al andere schermen zijn.

Uit Tabel 5.1 is ook af te lezen wat er gebeurt als één van de schermen in de simulatie niet wordt gebruikt. We gaan dan van de situatie met 3 schermen naar twee schermen. Het weglaten van het ACfolie leidt tot  $19.3 - 17.2 = 2.1\text{ m}^3$  extra gasgebruik en tot  $1.4 - 1.1 = 0.3\text{ kg}$  extra opbrengst.

Het ongebruikt laten van XLS10 leidt tot  $19.3 - 15.1 = 4.2\text{ m}^3$  extra gasgebruik en tot  $1.4 - 0.8 = 0.6\text{ kg}$  extra opbrengst. Het ongebruikt laten van XLS18 leidt tot  $19.3 - 12.9 = 6.4\text{ m}^3$  extra gasgebruik en tot slechts  $1.4 - 1.0 = 0.4\text{ kg}$  extra opbrengst.

De effecten op de opbrengst in Tabel 5.1 zijn vrij klein. Dat omdat de schermen alleen in de donkere en koude perioden van het jaar gebruikt worden en de totale lichtsom over het jaar wordt slechts weinig beïnvloed. De schermen hebben

---

<sup>1</sup>De besparingen van  $5.3\text{ m}^3$  met *alleen* ACfolie, van  $9.7\text{ m}^3$  met *alleen* XLS10 en van  $11.5\text{ m}^3$  met *alleen* XLS18 zijn opgeteld  $26.5\text{ m}^3$  terwijl de drie schermen samen  $19.3\text{ m}^3$  gas besparen.

echter wel degelijk effect op die totale lichtsom, namelijk doordat het scherm pakket van open schermen ook in de zomer licht onderschept. We hebben daarom de berekeningen nog een keer gedaan rekening houdend met ook dat effect.

### 5.1.2 Ongebruikte schermen zijn ook niet geïnstalleerd

We hebben aangenomen dat een geïnstalleerd scherm pakket 4% van verticaal invallend daglicht onderschept. De simulatie zonder schermen is weer het uitgangspunt. De lichtsom zonder schermen in Tabel 5.2 is inderdaad een stuk hoger dan die

**Tabel 5.1.** Verandering van energiegebruik en opbrengst ten opzichte van een run *zonder gebruik van de schermen*. De simulatie met 3 schermen als basisregeling is besproken in Hoofdstuk 4. De kolom gewas PAR betreft de gemiddelde, dagelijkse, hoeveelheid licht op gewashoogte.

ingreep	gewas PAR mol day <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup>	effect op:	
		energiegebruik m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> A.E.	opbrengst kg m <sup>-2</sup>
Geen schermen	16.9	0.0	0.0
Acfolie	16.8	-5.3	-0.3
XLS10	16.8	-9.7	-0.8
XLS18	16.9	-11.5	-0.5
Acfolie+XLS10	16.7	-12.9	-1.0
Acfolie+XLS18	16.8	-15.1	-0.8
XLS10+XLS18	16.8	-17.2	-1.1
3 schermen	16.7	-19.3	-1.4

**Tabel 5.2.** Verandering van energiegebruik en opbrengst ten opzichte van een run *zonder schermen*. Aangenomen is dat het weglaten van XLS10 en/of XLS18 *per scherm* het verlies van verticaal invallend licht met 4% vermindert. De simulatie met 3 schermen is de basisregeling besproken in Hoofdstuk 4. De kolom gewas PAR betreft de gemiddelde, dagelijkse, hoeveelheid licht op gewashoogte.

De "nul" opbrengst zonder schermen ligt dus 4.0 kg hoger dan die in Tabel 5.1 doordat de scherm pakketten nu ook zijn weggehaald.

ingreep	gewas PAR mol day <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup>	effect op:	
		energiegebruik m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> A.E.	opbrengst kg m <sup>-2</sup>
Geen schermen	19.1	0.0	0.0
Acfolie	18.9	-5.0	0.3
XLS10	17.8	-10.2	-1.2
XLS18	17.9	-12.0	-0.8
Acfolie+XLS10	17.7	-13.5	-1.4
Acfolie+XLS18	17.8	-15.5	-1.1
XLS10+XLS18	16.8	-18.3	-5.2
3 schermen	16.7	-20.5	-5.4

met twee ongebruikte scherpakketten in Tabel 5.1, namelijk 19.1 mol PAR tegen 16.9 mol PAR gemiddeld per dag. De opbrengst is daardoor 4 kg hoger.

Ten opzichte van deze situatie worden nu achtereenvolgens alle schermen "geïnstalleerd" en gebruikt. Tabel 5.2 laat weer zien wat de afzonderlijke en de totale bijdragen zijn van de 3 schermen aan de gerealiseerde energiebesparing en de effecten ervan op de productie.

Gebruik van alleen het ACfolie bespaart  $5.0 \text{ m}^3$  gas en leidt *tot een verhoging* van de productie met 0.3 kg. Deze geringe verhoging komt tot stand door heel kleine effecten van de gesimuleerde temperaturen op de gewasontwikkeling in de winter. De verhoging van 0.3 kg moet daarom worden gelezen als "nihil".

Tabel 5.2 laat verder zien dat de besparingen op het gasgebruik ongeveer even groot zijn als in Tabel 5.1, maar dat de effecten op licht en opbrengst groter zijn, in het bijzonder voor de combinatie van XLS10 en XLS18.

## 5.2 Optimaal gebruik van het energiescherm XLS10

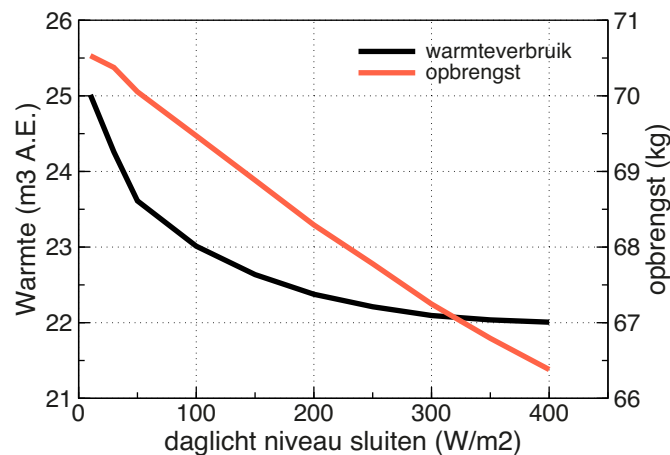
De energiebesparing door schermen is grotendeels gebaseerd op de vermindering van het convectief warmtetransport naar het kasdek. Verder wordt bij een koud kasdek aanzienlijk bespaard op warmteverliezen door verminderde uitstraling. Behalve de langgolvlige uitstraling blokkeert een scherm echter ook het inkomend daglicht, wat ten koste gaat van de productiviteit. Daarom is het belangrijk om inzicht te verkrijgen in het kantelpunt waar PAR-effecten op productie economisch belangrijker worden dan de energie-effecten.

Het energiescherm XLS10 heeft een transmissie voor direct PAR van ongeveer 88% en een reflectie van 6%. Voor diffuus PAR zijn dit 81% respectievelijk 10%. Het daglicht niveau waaronder het energiescherm sluit was in de referentieregeling  $50 \text{ Wm}^{-2}$ .

Met de basisregeling besproken in hoofdstuk 4.1.1 op bladzijde 30 sluit het energiescherm *als aan twee voorwaarden voldaan is*. Het daglichtniveau moet onder een drempel komen *en* het temperatuurverschil  $\Delta T$  tussen het setpoint voor verwarmen

**Tabel 5.3.** De consequenties van het toenemend gebruik van het energiescherm. Het daglichtniveau waarbij het scherm wordt gesloten staat in de kolom "dicht". Het scherm gaat weer open bij het "open" niveau. De referentie is de run voor de combinatie 50 en  $100 \text{ Wm}^{-2}$ . Alle hoeveelheden zijn uitgedrukt per  $\text{m}^2$  kas.

daglicht ( $\text{Wm}^{-2}$ )		warmtegebruik	Mol PAR	opbrengst
dicht	open	$\text{m}^3$ (A.E.)	$\text{mol day}^{-1}$	kg
10	20	25.01	17.50	70.53
30	60	24.26	17.46	70.37
50	100	23.61	17.41	70.05
100	150	23.01	17.31	69.47
150	200	22.64	17.21	68.88
200	250	22.38	17.11	68.29
250	300	22.21	17.02	67.78
300	350	22.10	16.92	67.25
350	400	22.04	16.83	66.79
400	450	22.01	16.75	66.38



**Figuur 5.1.** Warmteverbruik en gemiddelde vruchtbijgroei (per m<sup>2</sup> kas) bij toenemend gebruik van het energiescherm. Het scherm sluit bij een temperatuurverschil van tenminste 5°C tussen het setpoint voor verwarming en de buitentemperatuur (tenzij het licht boven de drempel uitkomt) en opent bij een verschil van 3°C.

en de buitentemperatuur moet boven een grenswaarde uitkomen. In hoofdstuk 5.2.1 wordt de daglichtdrempel gevarieerd en in hoofdstuk 5.2.2 worden bovendien de grenswaarden van  $\Delta T$  gevarieerd.

### 5.2.1 Scenario daglichtniveau

Tabel 5.3 geeft het warmtegebruik, de gemiddelde lichtsom en de totale opbrengst voor verschillende keuzes van het daglichtniveau waarbij het scherm sluit en opent. De simulaties zijn alle gedaan voor de  $\Delta T$  keuze zoals besproken in hoofdstuk 4.1.1: sluiten bij 5°C, tenzij er veel licht is, en open bij 3°C.

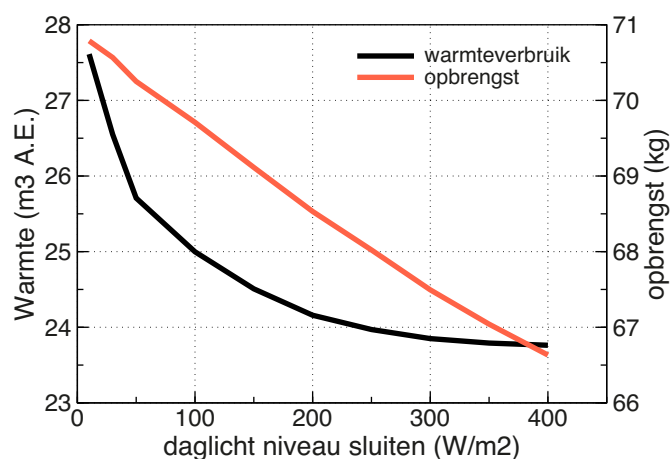
In Figuur 5.1 zijn het warmtegebruik en de opbrengst in grafiek gebracht als functie van het daglichtniveau, waar beneden het XLS10 energiescherm sluit. Het warmtegebruik daalt van ongeveer 25 m<sup>3</sup> naar 22 m<sup>3</sup>, maar daalt daarna niet verder. De opbrengst blijft echter dalen omdat het toenemend schermgebruik meer en meer licht blokkeert.

Het optimale daglichtniveau voor sluiting hangt af van de prijs van tomaten en die van warmte. Het in de referentie gebruikte niveau van 50 Wm<sup>-2</sup> lijkt goed gekozen. Bij een verhoging van 50 Wm<sup>-2</sup> naar 100 Wm<sup>-2</sup> wordt 0.58 kg minder geproduceerd, tegenover een besparing van 0.6 m<sup>3</sup> aardgas.

Figuur 5.2 laat dezelfde analyse zien, maar nu zonder gebruik van AC folie. De opbrengstderving bij 400 Wm<sup>-2</sup> is vergelijkbaar, maar de besparing is groter vooral bij een lage instelling van de lichtdrempel. Voor een drempel van 100 Wm<sup>-2</sup> wordt nu door het XLS10 scherm 2.6 m<sup>3</sup> aardgas bespaard (2.0 m<sup>3</sup> met AC folie) tegen een opbrengstderving van 1.08 kg (1.06 kg met AC folie). Daar moet wel bij worden aangetekend dat het energieverbruik zonder AC folie hoger is (vergelijk de schalen tussen Figuur 5.1 en Figuur 5.2).

### 5.2.2 Scenario $\Delta T$

De grenswaarden voor  $\Delta T$  bieden, additioneel aan de lichtdrempeling, ook kansen om energiebesparing te maximaliseren en opbrengstderving te minimaliseren.



**Figuur 5.2.** Herhaling van de analyse van Figuur 5.1 zonder het ACfolie.

In de controle regeling zijn de gebruikte grenzen voor  $\Delta T$ : sluiten bij  $5^{\circ}\text{C}$ , tenzij er veel licht is, en open bij  $3^{\circ}\text{C}$ . In Figuur 5.3b wordt de grafiek voor die grenzen nogmaals gegeven (identiek aan Figuur 5.1).

Figuur 5.3a laat zien wat er verandert als deze grenzen verlaagd worden naar  $3^{\circ}\text{C}$  en  $1^{\circ}\text{C}$ . Er wordt dan *eerder* geschermd en zowel de energiebesparing als de opbrengstderving zijn daarom groter dan in Figuur 5.3b.

Bij een lage lichtdrempeling van  $50 \text{ Wm}^{-2}$  leidt een verlaging van de grenswaarden voor  $\Delta T$  tot een extra opbrengstderving van slechts  $0.12 \text{ kg}$  op jaarbasis en tot een energiebesparing van  $0.4 \text{ m}^3$  aardgas. Dat is een gunstige verhouding.

Voor een hogere lichtdrempeling blijft de extra energiebesparing bijna gelijk ( $0.5 \text{ m}^3$  bij  $400 \text{ Wm}^{-2}$ ) terwijl de extra opbrengstderving toeneemt tot  $0.96 \text{ kg}$ . Dat is ook begrijpelijk omdat het schermen bij een redelijk grote hoeveelheid licht (van bijvoorbeeld  $300 \text{ Wm}^{-2}$ ), als het buiten slechts  $3^{\circ}\text{C}$  kouder is dan binnen, nauwelijks energie zal besparen (het licht warmt de kas op) en wel ten koste gaat van de opbrengst.

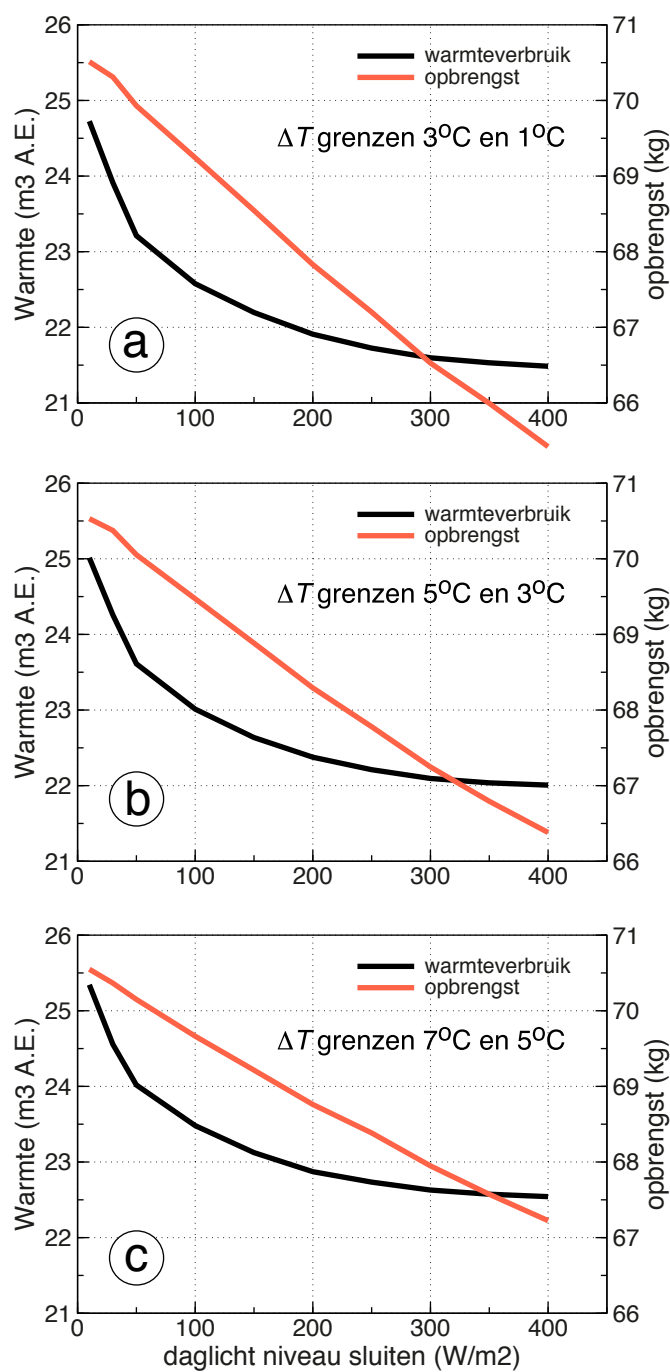
Figuur 5.3c toont de resultaten voor  $\Delta T$  grenzen van  $7^{\circ}\text{C}$  en  $5^{\circ}\text{C}$ , weer met de lichtdrempeling zoals aangegeven op de X-as. Er wordt dan *minder snel* geschermd en zowel de besparing als de opbrengstderving zijn kleiner dan in Figuur 5.3b. Kwantitatief is het verschil met Figuur 5.3b ongeveer hetzelfde als voor Figuur 5.3a, alleen in omgekeerde richting.

We zien dat bij een laag lichtniveau een lage  $\Delta T$  voordelig is. Immers, als slechts weinig licht verloren gaat dan hoeft met schermen niet gewacht te worden totdat het buiten vele graden kouder is dan binnen. Als bij een hoger lichtniveau wordt geschermd, om een grote energiebesparing te bereiken, dan hangt het effect op de opbrengst sterk af van de gebruikte  $\Delta T$ . Het sluiten van de schermen als het buiten slechts weinig kouder is dan binnen is dan onvoordelig.

Dit biedt perspectieven voor verdere optimalisatie maar dat vraagt wel een kwantitatief inzicht in de complexe samenhang tussen schermeigenschappen, lichtverlies, verdamping, warmteverlies en opbrengstverlies. Het effect van lichtverlies op de verdamping en productie moet immers expliciet meegenomen worden.

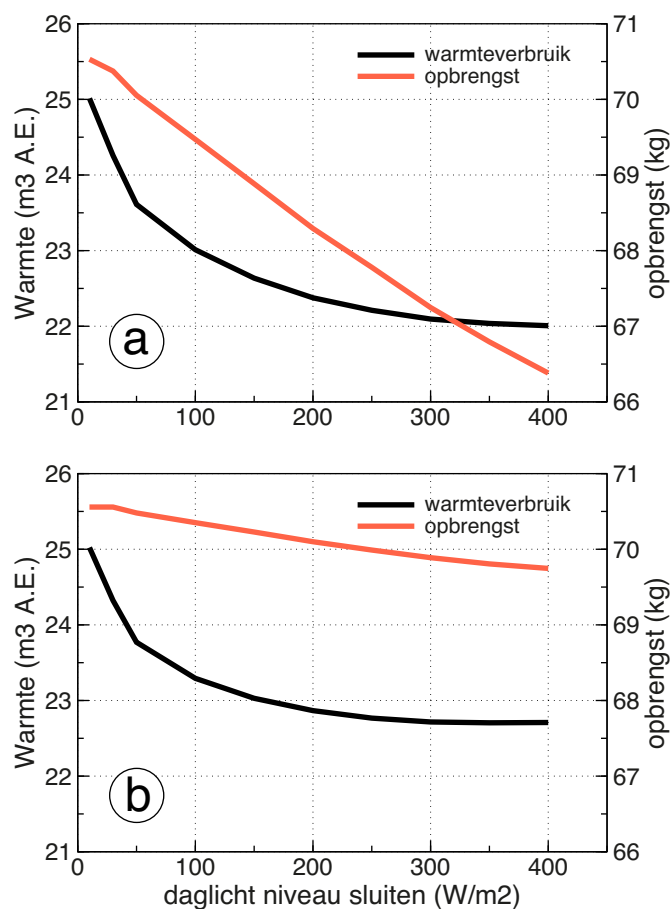
Voorlopig kan geconcludeerd worden dat sluiten van een energiescherm bij een instraling in de range van  $50\text{-}75 \text{ Wm}^{-2}$  in ieder geval voordelig is omdat dat veel energie bespaart. Dat kan plaatsvinden in combinatie met een relatief lage  $\Delta T$ .





**Figuur 5.3.** De analyse van Figuur 5.1 voor verschillende grenswaarden van  $\Delta T$ . In de referentierun sluit het XLS10 scherm als  $\Delta T$  boven 5°C komt (tenzij de lichtdrempel wordt overschreden) en opent als  $\Delta T$  onder 3°C komt. De verschillende keuzes voor de  $\Delta T$  drempelwaarden zijn in de drie grafieken aangegeven.

De extra besparing is 0.4 m<sup>3</sup> aardgas wanneer van  $\Delta T$  grenzen (5°C, 3°C) wordt overgeschakeld naar  $\Delta T$  grenzen (3°C, 1°C). De extra opbrengstderving is in dat geval slechts 0.12 kg.



**Figuur 5.4.** Warmteverbruik en opbrengst bij gebruik van een lichter energiescherm. (a) de controle met een schermtransmissie van 83% voor direct en 75% voor diffuus licht (identiek aan Figuur 5.1). (b) een schermtransmissie van 95% voor zowel diffuus als direct daglicht.

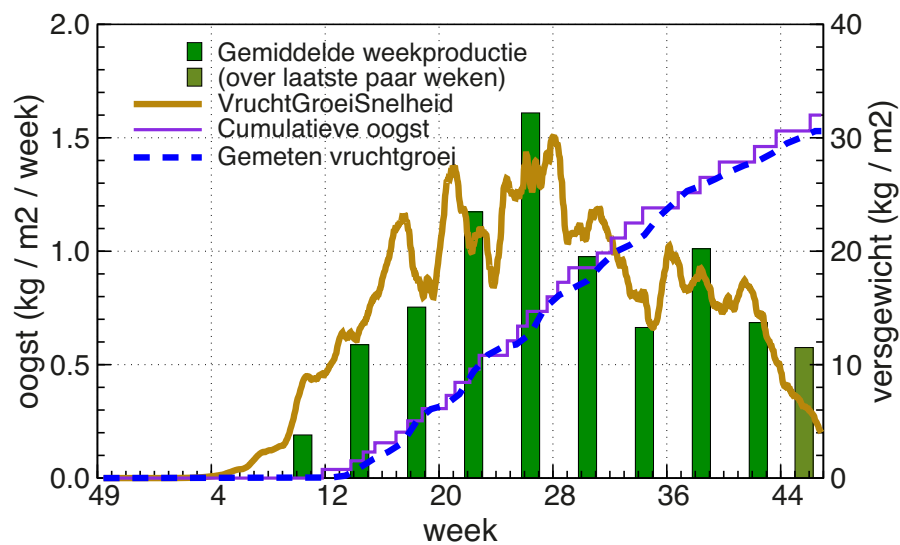
### 5.3 Lichte energieschermen

De optische eigenschappen van het scherm zijn van groot belang voor het bepalen van de juiste schermstrategie. Ter illustratie daarvan zijn de berekeningen herhaald voor een scherm dat meer licht doorlaat, 95% van zowel direct als diffuus PAR in plaats van 83% voor direct en 75% voor diffuus licht. De  $\Delta T$  drempeling is die van de referentie ( $5^{\circ}\text{C}$  en  $3^{\circ}\text{C}$ ).

In Figuur 5.4b zien we een groot effect van de hogere doorlatendheid op de productie ten opzichte van de controle in Figuur 5.4a (identiek aan Figuur 5.1).

Voor een drempel van  $100\text{ Wm}^{-2}$  wordt een meeropbrengst gerealiseerd van  $0.88\text{ kg}$  tegen een extra warmteverbruik van  $0.28\text{ m}^3$  gas (als gevolg van de hogere verdamping). Omdat de meerproductie in de winter wordt gerealiseerd bij hoge veilingprijzen is een ontwikkeling in de richting van lichtere schermen zeker aan te bevelen.

Een tweede belangrijk aspect is de langzame afname van de productie wanneer eerder (beneden een hogere drempel) geschermd wordt (vergelijk de hellingen van de rode lijnen in Figuur 5.4a en Figuur 5.4b). Het optimale daglichtniveau voor sluiting zal voor een lichter scherm hoger zijn waardoor meer energie bespaard kan worden.



**Figuur 5.5.** Oogst gesimuleerd voor de gemeten klimaatbesturing. De in de proef gemeten oogstopbrengsten zijn weergegeven als een stippellijn.

## 5.4 Minder schermen in de zomer bij paprika

De vraagstelling voor het gewas paprika was gericht op de effecten van het gebruik van het XLS10 scherm in de zomer. Neemt de opbrengst door gebruik van het scherm toe (door minder warmtestress) of juist af (door minder licht? Om een antwoord op deze vraag te formuleren werden scenario analyses verricht met Explorer Paprika. Evenals bij tomaat werd dat model eerst getoetst aan de hand van gemeten data. Met meetresultaten uit een eerder experiment, met het ras Derby, werden de fysiologische parameters ingesteld (Nederhof *et al.*, 2010).

Explorer Paprika werd vervolgens getoetst met als invoer het buitenklimaat en de gemeten scherm- buis- en ventilatorstanden uit een experiment, verricht op het Improvement Center in Bleiswijk in 2009-2010. In Figuur 5.5 zijn de resultaten van een vergelijking tussen experiment en simulatie weergegeven. Het tijdsafhankelijke verloop van de opbrengsten is in overeenstemming met de gemeten opbrengst.



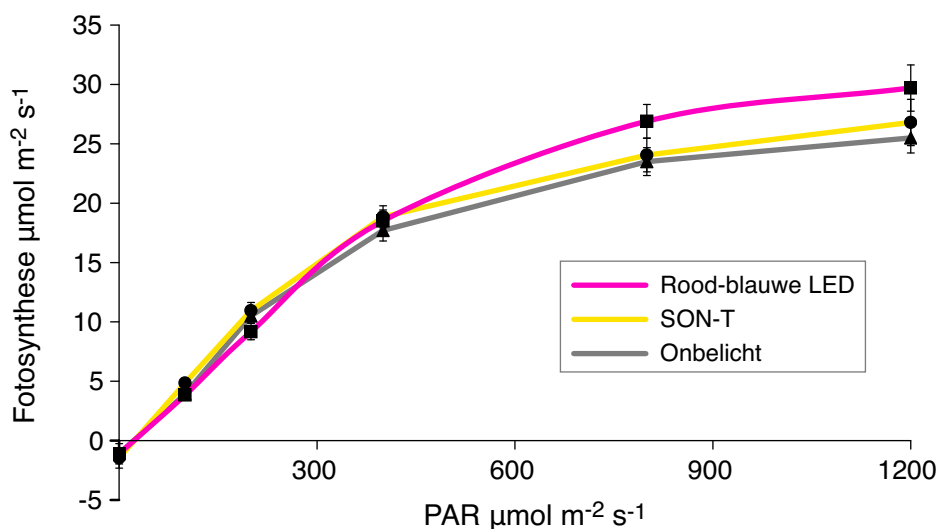
**Figuur 5.6.** Vruchten van paprika kunnen in direct licht eenzijdig tot 7°C boven de kasluchttemperatuur opwarmen.

**Tabel 5.4.** De consequenties van het sluiten of open laten van XLS10 scherm bij een drempelwaarde van de straling Het daglichtniveau waarboven het scherm wordt gesloten (behandeling *dicht*) of juist open blijft, (behandeling *open*). De drempel waarboven het scherm wordt geregeld staat in de eerste kolom. Voor verdere uitleg zie de tekst. Alle hoeveelheden zijn uitgedrukt per m<sup>2</sup> kas.

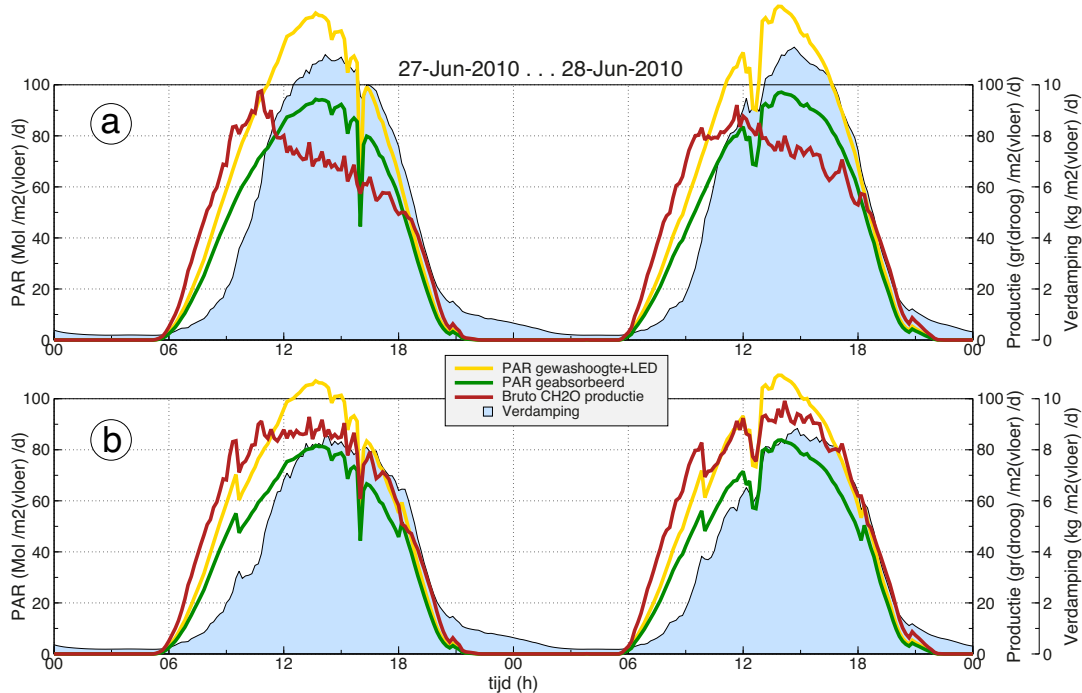
W m <sup>-2</sup>	Opbrengst (kg m <sup>-2</sup> )			Total light (Mol m <sup>-2</sup> )		
	open	dicht	delta (%)	open	dicht	delta (%)
800.00	32.00	32.07	0.22	5750	5661	-1.58
700.00	31.92	32.02	0.29	5799	5577	-4.00
600.00	31.90	32.01	0.35	5829	5475	-6.47
500.00	31.88	31.94	0.17	5844	5360	-9.03

In het kader van scenario analyses werd gekeken naar de invloed van schermstanden in de zomer. Bij paprika wordt soms geschermd om te voorkomen dat de vruchten bij sterke instraling teveel opwarmen. Bij hoge instraling kan de temperatuur van het direct belichte deel van de vrucht met 7°C toenemen (Figuur 5.6). Dit zou de sink functie van de vrucht kunnen beïnvloeden. Helaas hebben we geen gegevens over de temperatuur-afhankelijke groei van vruchten bij paprika bij temperaturen boven 35°C. Wat echter wel onderzocht kon worden was het effect van de schermregeling op de warmtebalans in de kas en de temperatuur van de vruchten.

In Tabel 5.4 zijn opbrengsteffecten en lichteffecten van de scherminstellingen samengevat. De scenario's omvatten berekeningen van 8 jaarrondteelten. In 4 scenario's was in de zomer het XLS10 scherm volledig gesloten boven een bepaalde buitenstraling en in 4 andere scenario's was het XLS10 scherm volledig geopend.



**Figuur 5.7.** Fotosynthese als functie van de lichtintensiteit in verschillende lichtbehandelingen bij paprika, gemeten op 21 januari. De CO<sub>2</sub> concentratie werd constant gehouden op 1000 ppm.



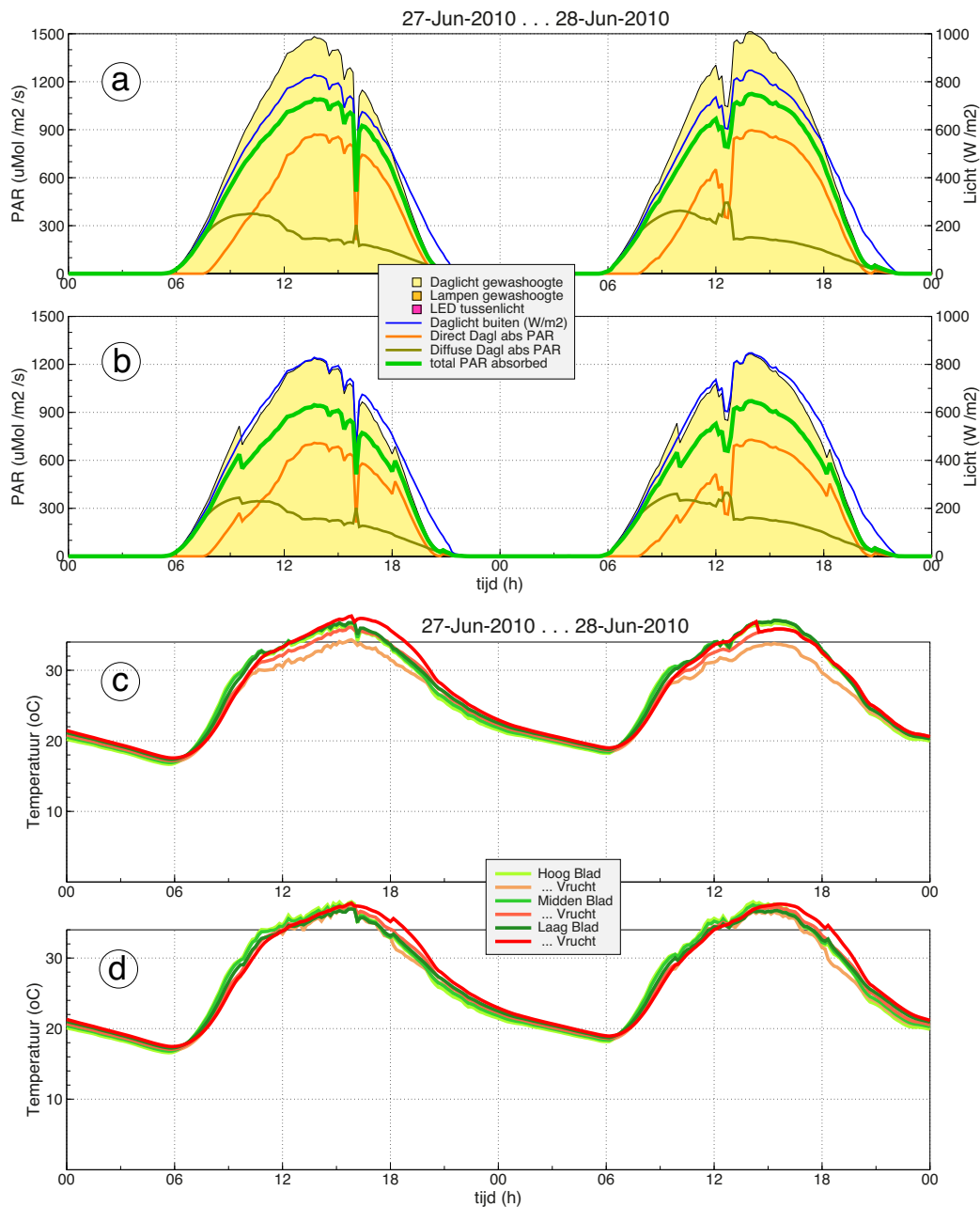
**Figuur 5.8.** Lichtverdeling, verdamping en bruto fotosynthese in de kas (a) wanneer er niet geschermd en (b) wanneer er geschermd wordt met een XLS10 scherm boven  $500 \text{ W m}^{-2}$  en wanneer het scherm niet wordt gesloten boven  $500 \text{ W m}^{-2}$ . Het scherm sluit in beide situaties ook via een parallele regeling bij een temperatuurverschil van tenminste  $5^\circ\text{C}$  tussen het setpoint voor verwarming en de buitentemperatuur (en opent bij een verschil van  $3^\circ\text{C}$ ). De schermtransmissie is 83% voor direct en 75% voor diffuus licht.

Het is opmerkelijk dat sluiting van het scherm nauwelijks effecten heeft op de opbrengst. De effecten zijn minder dan 0,5% voor alle drempelwaarden.

De reden hiervoor is de relatief hoge drempeling. Het effect van straling boven  $500 \text{ W m}^{-2}$  is nu eenmaal gering vanwege de sterk afvlakkende fotosynthese response (Figuur 5.7). Bovendien wordt door het gebruik van een scherm, beschadiging van het fotosynthese apparaat voorkomen en dat effect compenseert voor een deel voor de verliezen door lichtvermindering.

Daarnaast is er een positief effect van schermen op de huidmondjes opening waardoor de opname van  $\text{CO}_2$  wordt gestimuleerd. Dit is duidelijk te zien in Figuur 5.8, waar voor 2 zeer zonnige dagen, rond de langste dag, de geabsorbeerde hoeveelheid PAR, de hoeveelheid verdamping en de fotosynthese zijn geplot voor een geschermd kas (boven  $500 \text{ W m}^{-2}$  (Figuur 5.9b)) en een ongeschermd kas (Figuur 5.8a). Hoewel de hoeveelheid geabsorbeerde straling en de verdamping in de ongeschermd kas hoger zijn dan in de geschermd kas, is de fotosynthese nauwelijks lager. In de ongeschermd kas zien we tegen de middag een duidelijke dip, die niet te zien is in de geschermd kas.

Wanneer we de ongeschermd behandeling Figuur 5.9a en de geschermd behandelingen Figuur 5.9b vergelijken zien we een afname van 20% van het daglicht op gewashoogte voor de geschermd behandeling. Wanneer er niet geschermd wordt is de lichtintensiteit bij loodrechte zoninval, door interne reflecties, zelfs hoger dan de buitenstraling. Door schermen vermindert vooral de directe fractie van het licht terwijl de diffuse fractie van het inkomend daglicht, (grijze lijnen) nauwelijks



**Figuur 5.9.** Lichtverdeling in de kas wanneer er niet geschermd wordt (a) of wanneer er geschermd wordt met een XLS10 scherm boven  $500 \text{ W m}^{-2}$ . De schermtransmissie is 83% voor direct licht en 75% voor diffuus licht. (c) Vrucht en bladtemperatuur bij open scherm boven  $500 \text{ W m}^{-2}$  en (d) gesloten scherm boven  $500 \text{ W m}^{-2}$ .

verandert. Het scherm werkt als het ware als een diffusor. Dat resulteert in een relatief hoge lichtabsorptie (lichtgroene lijnen) en een toename van de fotosynthese efficiëntie.

Het effect op gemiddelde vrucht en bladtemperatuur (Figuren 5.9c en 5.9d) laat zien dat ook hier compenserende mechanismen aan het werk zijn. Noch de gemiddelde vruchttemperatuur, noch de gemiddelde bladtemperaturen zijn erg verschillend. Wat zijn die compenserende factoren?

- De geschermdde kas kan minder warmte kwijt via afgifte van latente warmte dan de niet-geschermdde kas.
- De geschermdde kas krijgt minder warmte binnen vanwege de blokkade van het scherm.

De uiteindelijke consequentie is dat de vruchttemperaturen op verschillende hoogtes voor beide behandelingen ongeveer gelijk zijn. Je zou zelfs kunnen concluderen dat de vruchttemperatuur gemiddeld in de bovenste laag iets hoger is dan in de niet-geschermdde teelt. Omdat we in de simulaties geen onderscheid maken tussen de direct belichte en de schaduwzijde van de vrucht, kunnen er lokaal grote afwijkingen optreden. Ook vanwege de heterogeniteit van de directe straling en de spreiding over de dag is het beter om naar de spreiding van piektemperaturen te kijken. Dat is in deze studie buiten beschouwing gebleven.

---

## Verwarming tomaat

---

In dit hoofdstuk wordt een vergelijking gemaakt tussen het gebruik van groeibuizen als verwarming ofwel het buisrail systeem. Tevens wordt nagegaan wat aan de relatief late eerste oogst gedaan had kunnen worden. De hoogte van de buisrail is 15 cm boven de grond, 12 buizen van 51 mm in een tralie van 9.6 meter. De hoogte van de dubbele groeibuis was 70 en 100 cm boven elke teeltgoot.



**Figuur 6.1.** Groeibuizen in een jong tomatengewas.



## 6.1 Vrucht- en koptemperatuur tomaat

Een hogere temperatuur aan de kop leidt tot een hogere bladafplitsing. Als er voldoende assimilaten zijn leidt dat weer tot een hogere opbrengst, maar als er onvoldoende assimilaten zijn worden de vruchten kleiner. Ter illustratie van dit effect zijn simulaties gedaan waarin bij kop- of vruchttemperatuur  $0.5^{\circ}\text{C}$  is opgeteld, zonder dat die warmte ergens vandaan komt.

In Tabel 6.1 wordt aangegeven wat de belangrijkste gevolgen zijn. In de controle valt de eerste oogst in week 14. Dat is in overeenstemming met de waarnemingen. Er waren weliswaar rijpe trossen in week 13, maar dat waren er erg weinig. Een warmere kop leidt tot een hogere bladafplitsing en (daardoor) tot een iets kleiner vruchtgewicht. Een warmere kop leidt in het explorer model echter *niet* tot een vroegere eerste oogst om de eenvoudige reden dat een snellere bladafplitsing en een daarmee samenhangende snellere trosafplitsing pas veel later tot uiting komt. Als niet de week van eerste bloei maar de bladlaag met de eerste bloemen vastligt, dan heeft een verhoging van de koptemperatuur natuurlijk wel een effect op het tijdstip van de eerste oogst. Dat is mogelijk de reden dat in een belichte teelt de bloei (en eerste oogst) eerder plaatsvinden.

Een hogere temperatuur van de vrucht leidt echter wel tot een snellere vruchtontwikkeling en daardoor tot een iets vroegere eerste oogst. Bij een verhoging van  $0.5^{\circ}\text{C}$  is het effect 2 dagen. Verdere verhoging leidt weliswaar tot de gewenste vroeging maar de vruchten worden onacceptabel klein. Dit is het gevolg van een assimilaten tekort zoals Figuur 4.3 op bladzijde 31 laat zien voor de eerste 8 weken van de teelt. Als de eerste bloei vroeger zou zijn, dan zouden de vruchtgewichten zeker kleiner geweest zijn. Een simulatie met 1.5 week bloeivroeging (in week 3) levert slechts 120 g op gedurende de eerste drie weken van de productie. De eerste oogst valt dan wel op 2 april.

De enige manier om vroegere productie te realiseren met behoud van kwaliteit is bijbelichting. Op basis van het geregistreerde verloop van de plantbalans zou een energiezuinig belichtingsprotocol ontwikkeld kunnen worden.

## 6.2 Wijze van verwarmen

De controle regeling waarmee de resultaten uit Hoofdstuk 4 zijn berekend veronderstellen primaire verwarming met de groeibuis. Dat wil zeggen, bij warmtevraag werd eerst warmte gevraagd van de groeibuizen en pas daarna, als dat onvoldoende bleek te zijn, werd de buisrail opgewarmd.

**Tabel 6.1.** Enkele simulatie resultaten als bij de kop en/of de vruchttemperatuur eenvoudigweg  $0.5^{\circ}\text{C}$  wordt opgeteld. De hogere temperatuur heeft geen basis in extra verwarming. Het energiegebruik is daarom steeds gelijk aan dat van de controle regeling in Hoofdstuk 4.

run	Bladafplitsing per week	Opbrengst kg	Vruchtgewicht gram	Eerste oogst datum
Referentie	2.47	70.3	162.0	9-Apr-2010
Kop + $0.5^{\circ}\text{C}$	2.53	69.9	156.7	9-Apr-2010
Vruchten + $0.5^{\circ}\text{C}$	2.47	70.4	160.1	7-Apr-2010
beide	2.53	70.0	155.7	6-Apr-2010

Het idee van de groeibuis is de warmte dichterbij de vruchten te brengen. In het kasklimaat model kan de prioriteit worden omgedraaid om te bestuderen of de effecten van prioritering naast opbrengst ook gevolgen heeft voor het energieverbruik. Tabel 6.2 laat een vergelijking zien tussen de twee scenario's. De verschillen zijn bijzonder klein. Het effect van de inzet van een groeibuis op het tijdstip van eerste oogst is consistent met de vervroeging door een iets hogere vruchttemperatuur zoals ook werd waargenomen bij een opgelegde verhoging (Tabel 6.1). Met een groeibuis wordt 0.2 kg meer geoogst en 0.2 m<sup>3</sup> gas minder verbruikt. Kleine verschillen maar wel bereikt zonder extra investeringen. Verder zullen we in het volgende hoofdstuk zien dat prioritering van de buisrail effectiever is in het voorkomen van bladnat.

**Tabel 6.2.** Energiegebruik voor de referentie situatie en bij gebruik van de buisrail als primaire verwarmingsbron.

prioriteit	Bladafsplitsing per week	Opbrengst kg	Warmte m <sup>3</sup> (A.E.)	Electra kWh	Eerste oogst datum
Groeibuis	2.47	70.27	23.6	11.6	9-Apr-2010
Buisrail	2.46	70.08	23.8	12.0	11-Apr-2010

---

# Vocht

---

In dit hoofdstuk worden scenario's doorberekend voor verschillende manieren van ontvochtigen en de consequenties voor opbrengst en energieverbruik. Daarbij wordt aandacht besteed aan:

- De hoeveelheid latente en convectieve warmte die de kas door ventilatie verlaat,
- een vergelijking tussen ventilatie via LBK en ventilatie via de ramen,
- de relatie tussen het VD setpoint en het risico op condensatie aan de bladeren (bladnat),
- suggesties voor het energetisch voordelig gebruik van een minimum buis

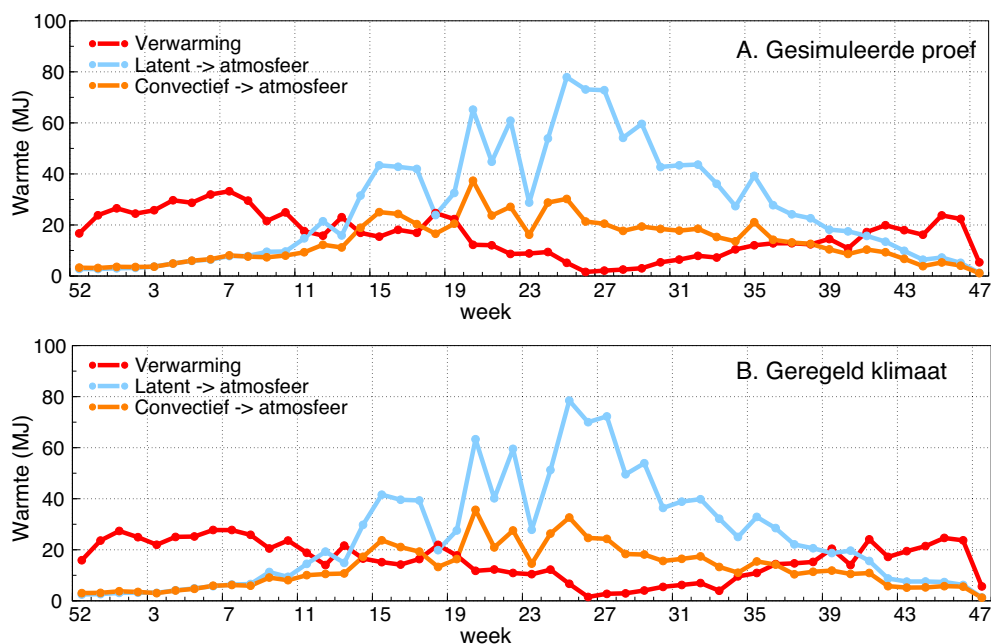
De bedoeling van deze scenarioberekeningen is om inzicht te krijgen in de relatie tussen energiegebruik, opbrengst, vochtgehalte en bladnat risico. Met dat inzicht kunnen toekomstige experimenten effectiever worden opgezet en kan worden bepaald welke data gemeten moeten worden en op welke plek die metingen in de kas verricht dienen te worden.

## 7.1 Latente en convectieve warmte

In Figuur 7.1 zijn de wekelijkse hoeveelheden latente en convectieve warmte weergegeven die de kas netto verlaten in het tomaten experiment. De berekeningen zijn zowel met *gemeten* waarden van buis, scherm, en raamstanden verricht als met de virtuele klimaatcomputer (voor uitleg over die simulaties zie Hoofdstuk 3 en Hoofdstuk 4). De goede overeenkomst tussen de uitkomsten van de berekeningen geeft aan dat de instellingen in de virtuele klimaatcomputer correct zijn zodat daarmee correcte scenario's kunnen worden doorberekend.

Het totale verlies aan latente warmte bedraagt 545 liter. Condensatie aan het kasdek bedraagt 80 liter (dat is gemiddeld 0.22 mm per dag waarvan wordt aangenomen dat het wordt afgevoerd). Samen staat dat voor de gesimuleerde gewasverdamping van 625 liter water.

Dat komt redelijk overeen met de totale geregistreeerde netto watergift van 737 liter (gift minus drainage) waarvan immers 70 liter in de geogste tomaten gaat zitten en enkele tientallen liters in de stengels en bladeren. Voor de simulatie met de virtuele klimaatcomputer bedraagt de totale gewasverdamping 618 liter.



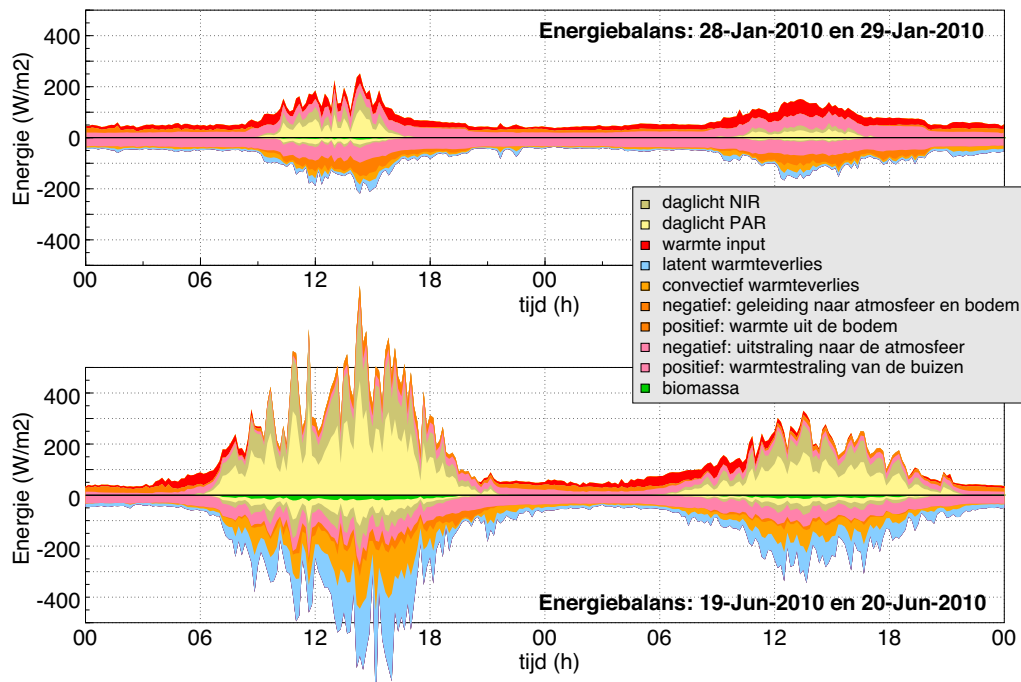
**Figuur 7.1.** Het warmteverbruik in de buizen en luchtbehandeling samen met het latent en convectief warmteverlies uit de kas. A. Voor de gesimuleerde proef (zie ook Figuur 3.8 op bladzijde 27) met een totaal warmteverbruik van 789 MJ of  $23.9 \text{ m}^3$  (A.E.). B. De simulatie met geregeld kasklimaat (zie ook Figuur 4.4 op bladzijde 32) met een totaal verbruik van 779 MJ of  $23.6 \text{ m}^3$  (A.E.).

In Figuur 7.1 is te zien dat in de wintermaanden (de periode tot week 10) de toevoer van warmte via verwarming en luchtbehandeling veel groter is dan het warmteverlies (latent+convectief) naar buiten. Waarom dat zo is wordt duidelijk uit de energiebalans voor enkele winterdagen in Figuur 7.2A. Het warmteverlies bestaat 's winters grotendeels uit langgolvlige uitstraling. Overdag komt er weinig licht binnen en ook de warmte die daaruit ontstaat wordt grotendeels afgevoerd via uitstraling en geleiding via het kasdek. De afvoer in de vorm van latente warmte is erg klein.

Dat verklaart het grote effect van schermen in de winter. De schermen voorkomen de toevoer van warmte naar het kasdek, zowel door het verhinderen van het convectief transport door bewegende lucht, als door het blokkeren van de warmtestraling vanaf het gewas. Dat leidt tot een verlaging van de temperatuur van het kasdek waardoor de warmteafvoer naar buiten verminderd wordt. Het verdient aanbeveling om de langgolvlige uitstraling vanaf het kasdek te registreren, evenals de temperatuur van de nok. Op die manier kan een beter beeld verkregen worden van momenten waarop energiebesparing daadwerkelijk het meeste oplevert.

's Zomers is het beeld heel anders (Figuur 7.2B). Het daglicht domineert de energiebalans en de daardoor ontstane warmte wordt grotendeels afgevoerd in de vorm van latente en voelbare warmte. Voor de hier beschouwde teelt blijken de latente warmteverliezen ongeveer het dubbele van de convectieve verliezen van voelbare warmte te zijn (Figuur 7.1). Er is maar één manier om die grote hoeveelheid vocht kwijt te raken en dat is via ventilatie.

Samengevat: in de winter is de meeste energie te besparen door het warmtetransport naar het kasdek te verhinderen. Schermen spelen daarin de hoofdrol. Die blokkeren niet alleen het transport van voelbare warmte maar ook de warmtestra-



**Figuur 7.2.** De balans tussen aanvoer (positief) en afvoer van energie (negatief). Daarbij zijn de bodem en de atmosfeer de "buitenwereld". De verwarming bestaat uit warmte afgestaan door de buisrail, de groeibuizen en bij de verwarming van de ingeblazen lucht. Dat zijn positieve rode (voelbaar) en roze (warmtestraling) vlakken. Afgevoerde latente warmte is lichtblauw en afgevoerde convectieve warmte is licht-oker.

ling vanaf het gewas. Bij hogere lichtintensiteiten, en vooral bij een hoge RV buiten, zijn de meeste besparingen te realiseren door energiezuinig veel vocht kwijt te raken of door te voorkomen dat er veel vocht wordt geproduceerd (ironisch genoeg via het handhaven van een hoge RV).

## 7.2 Het bladnatgetal

Een hoge luchtvochtigheid handhaven heeft verscheidene voordelen. De geleidbaarheid van de huidmondjes is hoog en de verdamping is laag door een laag dampdruk deficit van het blad en door de hoge concentratie van waterdamp. En tenslotte kan de afvoer van vocht snel en effectief plaatsvinden, indien gewenst.

Toch zijn tuinders huiverig om bij een laag dampdruk deficit te telen. Een belangrijke reden is de ziektedruk als gevolg van lokale en/of tijdelijke bladnat periodes die daarmee samenhangen. Water condenseert op de bladeren als de luchtvochtigheid hoger is dan het verzadigd vochtgehalte bij bladtemperatuur. Condensatie kan zeer lokaal optreden, bijvoorbeeld als bladeren dicht op elkaar geclusterd zijn. In het huidige model wordt het gewas beschreven als een aantal homogene lagen. Condensatie kan in principe in iedere laag optreden. Lokale effecten door clustering ontbreken dus in het model, waardoor waarschijnlijk een onderschatting van het werkelijke optreden van bladnat ontstaat.

Om uit de simulatie toch een beeld te krijgen van het risico op bladnat, wordt berekend hoe lang het vochtgehalte zich in een bepaalde "gevaarzone" bevindt. Voor deze gevaarzone is een waarde gekozen van 140 Pa (dat is ongeveer  $1 \text{ g m}^{-3}$ ).

Als het vochtgehalte van de lucht, op een bepaalde positie in het gewas minder dan 140 Pa verwijderd is van het condensatiepunt op dat punt, dan wordt een "potentiële condensatie" berekend. Deze condensatie wordt opgeteld over alle gewaslagen en leidt uiteindelijk tot een totale "condensatie" in millimeters. Dat is geen condensatie die werkelijk heeft plaatsgevonden (ook niet in het model), maar een maat voor het risico van bladnat.

Dit zogenaamde bladnatgetal is een relatieve maat in vergelijkende berekeningen. In Figuur 7.3 worden wekelijkse waarden gegeven voor de gesimuleerde proef en de simulatie met klimaatregeling (de simulaties uit Hoofdstuk 3 en Hoofdstuk 4).

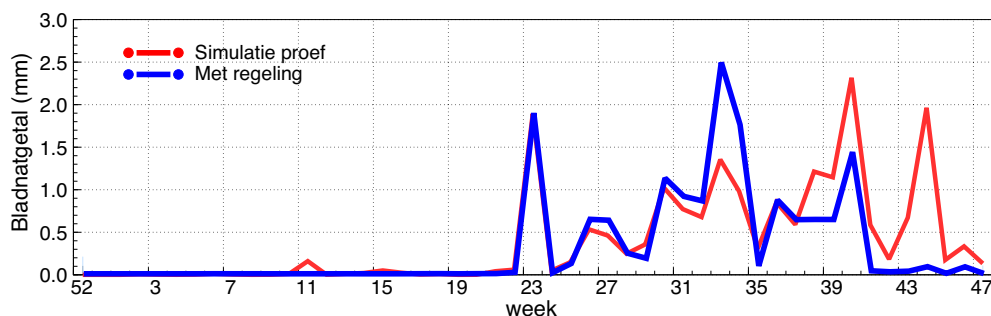
Bladnatgetallen zoals die in Figuur 7.3 laten zien dat de periodes met het hoogste risico de zomer en de herfst zijn. Met behulp van dit inzicht kunnen vervolgens scenario analyses worden verricht die het risico op bladnat verkleinen. Dat is een belangrijke stap om tot acceptatie van bepaalde energiebesparende maatregelen te komen. Die maatregelen veroorzaken immers vaak een hoge luchtvochtigheid. De kans op bladnat kan namelijk veel kleiner zijn dan in Figuur 7.3, afhankelijk van de wijze van ontvochtiging. Hierbij speelt ruimtelijke gelijkmatigheid een belangrijke rol. Bij welke waarde het acceptabele risico *in werkelijkheid* ligt kan echter niet zonder gedetailleerde experimenten worden vastgesteld.

## 7.3 LBK en/of raamventilatie

De LBK maakt het mogelijk om langer te schermen en om de ventilatielucht homogeen in de kas te verdelen. In dit hoofdstuk worden de effecten van ventileren via LBK of ramen kwantitatief vergeleken, zowel voor de productie als voor het energieverbruik.

### 7.3.1 Het opwarmen van buitenlucht

In het geval van raamventilatie gaat de kaslucht het raam uit en komt er buitenlucht naar binnen die (in de winter) door middel van het ondernet en groeibuis op kastemperatuur wordt gebracht. In het geval van ventilatie via de LBK wordt de lucht al verwarmd voordat ze in de kas wordt geblazen. Dat voorkomt dat koele buitenlucht op het gewas valt, maar het komt energetisch gezien op hetzelfde neer. Er zijn echter zeer grote verschillen in ruimtelijke verdeling van luchtstromen en daardoor op allerlei warmte-overdracht processen. DE LBK brengt buitenlucht in zonder verdere bij-effecten, gelijkmatig in tijd en ruimte, terwijl raamventilatie lokale temperatuurverschillen veroorzaakt en minder goed is te doseren. Een bij-



**Figuur 7.3.** Het bladnatgetal: het risico op bladnat gekwantificeerd als de mate waarin het vochtgehalte binnen 140 Pa ( $\approx 1 \text{ g m}^{-3}$ ) komt van de waarde waarbij condensatie op de bladeren optreedt. Voor verdere toelichting zie tekst.

komend negatief effect van raamventilatie, gecombineerd met schermen is een toename van het warmteverlies door langgolvlige uitstraling naar de sterk afgekoelde schermen.

Het verwijderen van latente warmte is alleen effectief door uitwisseling tussen kaslucht en buitenlucht als de buitenlucht voldoende droog is. Als de buitenlucht niet droog genoeg is dan moet de VD in de kas omlaag gebracht worden door de kas temperatuur te verhogen ("minimumbuis op RV"). Dit kost uiteraard energie maar dat hoeft niet persé veel te zijn zoals later in dit hoofdstuk zal blijken.

Een veel gehoord misverstand is dat ventilatie via luchtbehandeling een voordelige manier is om droge buitenlucht in de kas te krijgen. Het zou energetisch gezien voordeliger zijn om droge buitenlucht op te warmen dan vochtige lucht in de kas. Dit effect bestaat wel maar het is erg klein, zoals blijkt uit het volgende voorbeeld.

De warmtecapaciteit van droge lucht bij constante druk bedraagt  $1.01 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . De warmtecapaciteit van waterdamp is inderdaad hoger,  $1.84 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . De fractie waterdamp in vochtige lucht is echter klein. Verzadigde lucht van  $10^\circ\text{C}$  bestaat slechts voor 0.8% uit waterdamp (op gewichtsbasis) en de warmtecapaciteit is slechts 0.6% groter dan die van droge lucht. Verzadigde lucht van  $25^\circ\text{C}$  bestaat voor 2.0% uit waterdamp en heeft een warmtecapaciteit die 1.6% groter is dan die van droge lucht. Droge lucht heeft dus inderdaad een lagere warmtecapaciteit dan vochtige lucht maar het verschil is klein.

### 7.3.2 Simulatie van raamventilatie

Met de controle regeling uit Hoofdstuk 4 als uitgangspunt zijn simulaties gedaan met *alleen* raamventilatie. Als de schermen gesloten zijn wordt er alleen vocht door het scherm en via lekken afgevoerd. Dit is geen praktijksituatie maar dien slechts als referentie voor de andere scenario's. Het warmteverbruik stijgt dan van  $23.6 \text{ m}^3$  naar  $25.3 \text{ m}^3$  (Figuur 7.4B). Dat wordt veroorzaakt door een lage luchttemperatuur boven het scherm, lage schermtemperaturen en daardoor grotere warmteverliezen via geleiding en uitstraling.

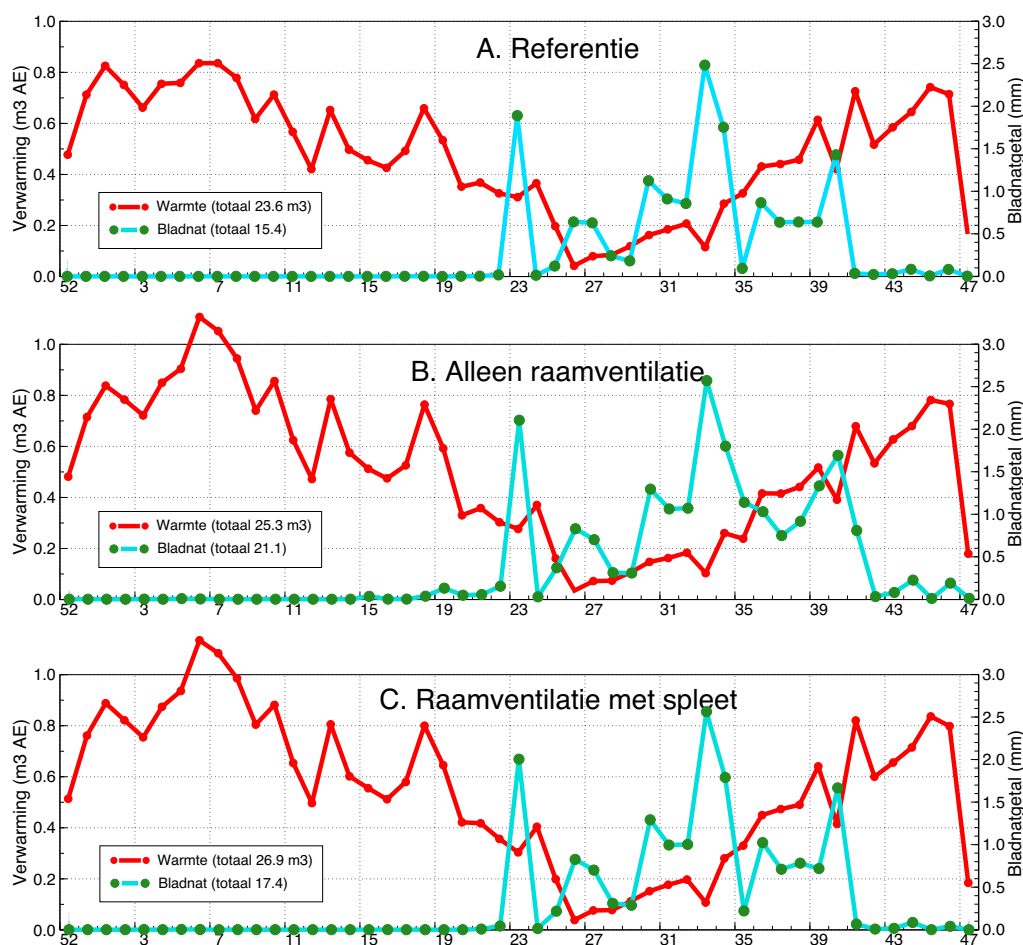
Verder is raamventilatie minder effectief tegen bladnat dan de LBK hetgeen blijkt uit het hogere bladnatgetal. De effectiviteit van de raamventilatie kan worden verhoogd door de schermen niet volledig te sluiten. Dan daalt het bladnatgetal, maar het energiegebruik stijgt verder naar  $26.9 \text{ m}^3$  (Figuur 7.4C)<sup>1</sup>.

Het probleem van raamventilatie in combinatie met schermen(kier)is uit de praktijk bekend. De precieze consequenties hangen sterk af van de doorlatendheid van de schermen voor lucht en waterdamp. Helaas zijn juist die grootheden niet nauwkeurig bekend, veel minder goed dan de optische eigenschappen.

Raamventilatie kost meer warmte dan ventilatie met de LBK. De oorzaak voor het verschil is van een afgeleide orde, met als belangrijkste componenten de lage temperatuur van het luchtcompartiment bovenin de kas en de afkoeling van de schermen door de luchtbeweging bovenin. De energiezuinige ventilatie met een LBK kost echter wel wat elektriciteit (12 kWh in de controle berekening).

Beide methoden bieden onvoldoende perspectief voor een effectieve controle van het bladnat risico. Niet de methode zelf is daar debet aan maar de aansturing van de VD op basis van metingen boven in het gewas in plaats van onderin.

<sup>1</sup>Een kier in de schermen levert op zichzelf een risico op lokale afkoeling en bladnat. Dit extra risico van een kier werd in de simulaties niet gekwantificeerd. alleen een betere werking van de raamventilatie wordt waargenomen.



**Figuur 7.4.** Energiegebruik en bladnatgetal voor A. De referentierun met luchtbehandeling uit Hoofdstuk 4, B. Zonder luchtbehandeling, dus alleen raamventilatie, C. Raamventilatie met een schermkier.

## 7.4 Het VD setpoint

Zoals geconstateerd in hoofdstuk 7.3.1 levert de uitwisseling van kaslucht met buitenlucht problemen op als de luchtvochtigheid buiten hoog is. Onder sommige omstandigheden is het niet mogelijk om met *alleen* buitenlucht de VD te controleren.

We hebben daarom met het explorer model een regeling ontwikkeld, waarmee het vochtgehalte wordt gecontroleerd door een combinatie van verwarmen en ventileren. De regeling maakt het mogelijk om het setpoint voor de VD omlaag te brengen zonder dat het bladnatgetal stijgt, met als resultaat een lager energiegebruik.

### 7.4.1 Energiegebruik bij andere VD setpoints

Allereerst zijn *telkens voor een heel jaar* berekeningen gemaakt door in de virtuele klimaatcomputer van de controle run (Hoofdstuk 4) verschillende waarden in te stellen voor het VD setpoint. Figuur 7.5A laat het resultaat zien. De controle run zelf is gedaan met een setpoint van  $2.1\text{g m}^{-3}$  (zie Tabel 4.1 op bladzijde 30). Voor



lagere en hogere waarden op de assen van de figuur, veranderen energiegebruik en bladnatgetal.

### Figuur 7.5A

De laagst gekozen waarde voor het dampdruk deficit is  $1.5 \text{ g m}^{-3}$  met een warmtegebruik voor het hele jaar van minder dan  $20 \text{ m}^3$  (de rode curve in Figuur 7.5A). De kas is echter zo vochtig dat het bladnatgetal relatief hoog is. Bij een regeling op een hogere VD wordt er meer geventileerd, neemt het bladnatgetal af en het energiegebruik toe.

De jaarlijkse gewasverdamping stijgt minder dan het energieverbruik bij een hoger VD setpoint. Voor een setpoint van  $1.5 \text{ g m}^{-3}$  is de verdamping 578 liter en voor een setpoint van  $2.7 \text{ g m}^{-3}$  is dat 665 liter. De reden is dat veel verdamping plaatsvindt terwijl de kas geventileerd wordt om warmte kwijt te raken. Deze verdamping wordt niet beïnvloed door het VD setpoint.

Voor een hogere VD daalt het bladnatgetal omdat het vochtgehalte minder vaak in de buurt komt van waarden waarbij condensatie optreedt (zie hoofdstuk 7.2). Wanneer de buitenlucht erg vochtig is, dan wordt het VD setpoint niet gehaald, ook niet met de ventilatie "op volle kracht" en dan wordt door het model een risico op bladnat gesignaleerd. Het niet *verder* afnemen van het bladnatgetal (vanaf een setpoint van 1.9) betekent dat zulke omstandigheden zich voordoen.

In Figuur 7.5A zien we dat het bladnatgetal feitelijk weer iets stijgt. Dat is een artefact van de klimaatregeling in het Explorer model<sup>2</sup>.

### Figuur 7.5B en Figuur 7.5C

De simulaties voor Figuur 7.5B zijn gedaan met één extra maatregel. Als de VD regelaar in verzadiging dreigt te raken (meer dan 80% van de ventilatiecapaciteit wordt benut), dan wordt de verwarming aangezet (prioriteit met groeibuis) met een maximum van 30% van de capaciteit. Dit komt erop neer dat in alle gevallen waarin ventilatie het vochtprobleem niet verhelpt, de groeibuizen worden ingezet. Als er al verwarming plaatsvindt op basis van ingestelde temperatuur setpoint, dan gebeurt er niets extra.

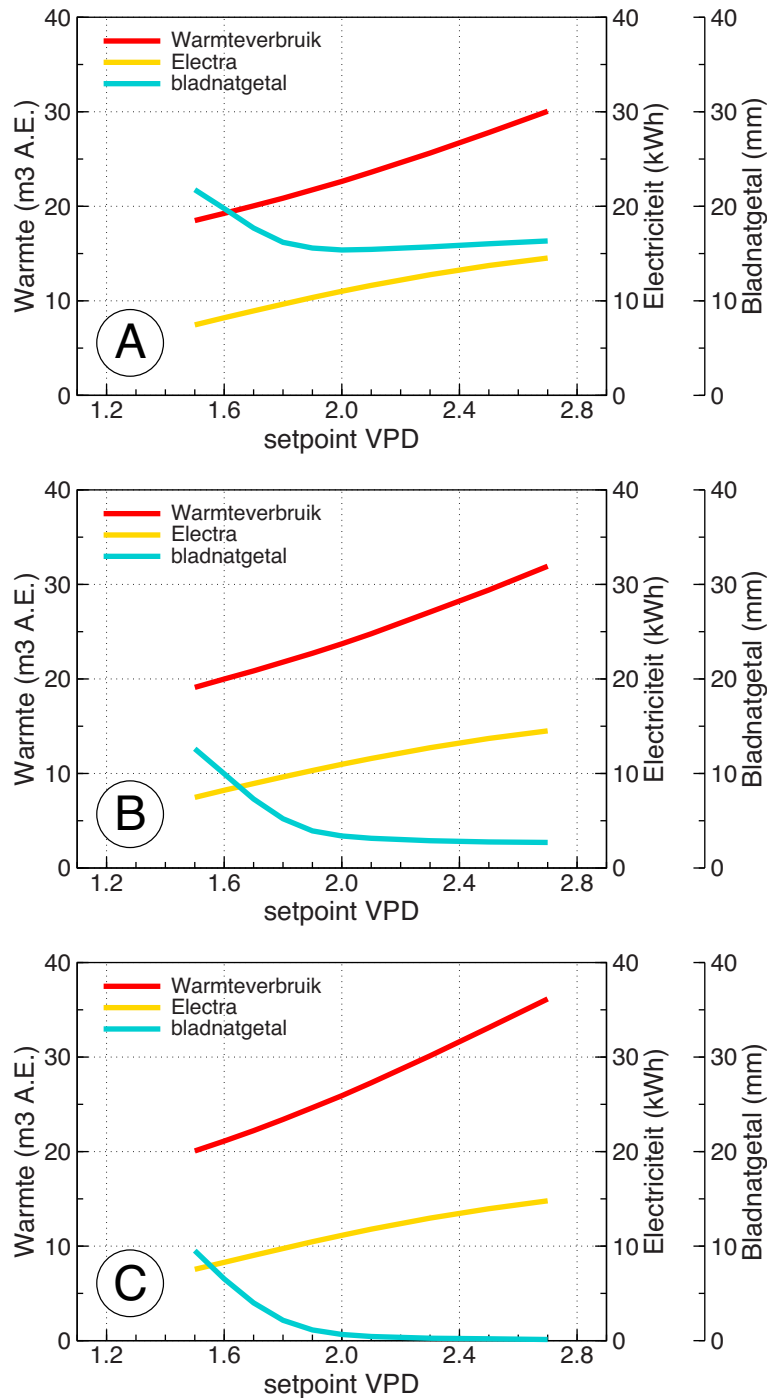
We zien de verwachte stijging van het energiegebruik maar het bladnatgetal is over de hele VD range lager en daalt tot een stabiel niveau.

Voor Figuur 7.5C geldt precies hetzelfde alleen nu is de prioriteit van de verwarming op de buisrail gezet. Het energiegebruik stijgt naar erg hoge waarden, maar het bladnat risico is volledig onder controle.

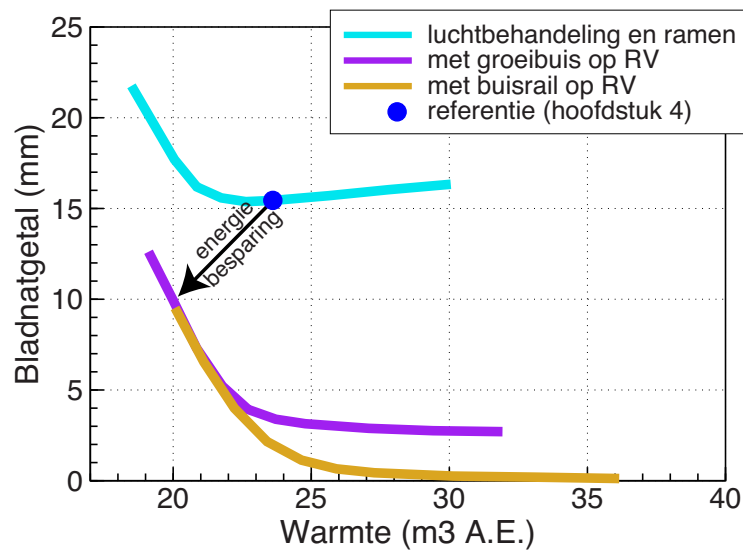
## 7.4.2 Energie besparen op ontvochtigen

In Figuur 7.6 worden de resultaten uit Figuur 7.5 op een andere manier tegen elkaar uitgezet. Op de horizontale as staat het warmteverbruik (buisen en luchtbehandeling). Op de verticale as staat het bladnatgetal. De drie beschouwde situaties in

<sup>2</sup>De klimaatregeling in het explorer model werkt met 4 periodes per dag die plotseling in elkaar overgaan. Als regelaars helemaal in verzadiging lopen, zoals in dit geval de VD regeling, dan kunnen zich bij de overgang tussen periodes, of na het uitschakelen van de verwarming, fluctuaties voordoen die tot een extra, klein bladnat risico leiden. Dat gebeurt iets vaker naarmate de regelaar vaker in verzadiging loopt, dus bij een hoog ingesteld setpoint.



**Figuur 7.5.** Het verband tussen het ingestelde VD setpoint voor de klimaatregeling en het gesimuleerde warmtegebruik, elektriciteitsverbruik (van de luchtbehandeling) en het bladnatgetal. A. Voor VD regeling met luchtbehandeling (prioriteit) en raamventilatie, net zoals in de referentie simulatie uit Hoofdstuk 4. B. Met een warme groeibuis als de VD regeling boven de 80% van zijn capaciteit komt. C. Met warme buisrail als de VD regeling boven de 80% van zijn capaciteit komt.

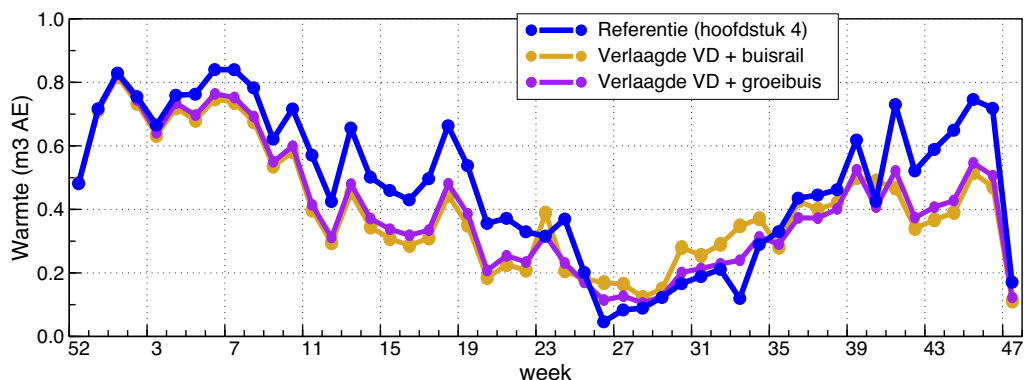


**Figuur 7.6.** Het berekende verband tussen de verbruikte warmte en het gerealiseerde bladnatgetal voor 3 wijzen van ontvochtiging: 1. alleen luchtbehandeling en raamventilatie, 2. met daarbij een warme groeibuis als de VD regeling meer dan 80% van de ventilatiecapaciteit aanstuurt, en 3. hetzelfde alleen met buisrail. Het bladnatgetal is een *relatieve* maat voor het risico op bladnat (zie hoofdstuk 7.2).

Figuur 7.5 (geen warmtegebruik voor ontvochtiging, gebruik van groeibuis, gebruik van buisrail) leveren dan elk een curve op. Ter vereenvoudiging is het elektriciteitsverbruik weggelaten. Dat is klein vergeleken met het warmteverbruik.

Het apart ingetekende blauwe punt in Figuur 7.6 is de referentierun, de simulatie met virtuele klimaatcomputer uit Hoofdstuk 4.

Uitgaande van deze referentierun kan het warmtegebruik nu worden verlaagd tot een waarde rond  $20\text{ m}^3$  gas *zonder een vergroot risico op bladnat*. In Figuur 7.6 wordt deze actie aangegeven met de pijl "energiebesparing". Deze pijl laat zien dat het warmtegebruik wordt teruggebracht en dat *tegelijkertijd* het bladnat risico daalt.



**Figuur 7.7.** Wekelijk warmteverbruik voor 1. De referentie run bij een VD setpoint van  $2.1\text{ g m}^{-3}$  (de blauwe lijn, dezelfde lijn als in Figuur 4.4 op bladzijde 32) en 2. Een simulatie met ontvochtiging door middel van een combinatie van verwarmen en ventileren bij een VD setpoint van  $1.5\text{ g m}^{-3}$  (de grijsblauwe lijn).

Voorwaarde is dat onder extreme omstandigheden, als luchtbehandeling en raamventilatie onvoldoende blijken, een warme buis wordt gebruikt. Als dat gedaan wordt, kan het setpoint voor de VD worden verlaagd zonder extra risico.

In Figuur 7.7 worden de situaties bij de pijl "energiebesparing" in Figuur 7.6 nog eens vergeleken. Het warmtegebruik "referentie" is dat voor de blauwe punt in Figuur 7.6 en is hetzelfde als dat in Figuur 4.4 op bladzijde 32. De okerkleurige lijn in Figuur 7.7 is berekend met een VD setpoint van  $1.5 \text{ g m}^{-3}$  in combinatie met het gebruik van de buisrail. De paarse lijn is berekend met een VD setpoint van  $1.6 \text{ g m}^{-3}$  in combinatie met het gebruik van de groeibuis. Voor beide strategieën is het totaal gesimuleerde warmtegebruik ongeveer  $20 \text{ m}^3$  (A.E.).

Het wekelijks warmtegebruik in Figuur 7.7 laat zien dat er in de zomer en nazomer een beetje meer warmte nodig is dan in de referentie. Dat komt natuurlijk door het bijzetten van de buisrail of groeibuis voor ontvochtiging als dat met ventilatie of LBK niet meer gaat/footnote in de referentierun wordt het VD setpoint dan gewoon niet gehaald hetgeen dan ook leidt tot een hoger bladnat risico.. Dat wordt echter meer dan goedgemaakt door de besparingen in de winter en in het voorjaar<sup>3</sup>.

## 7.5 Discussie

De in het bovenstaande "virtuele experiment" gebruikte referentierun is uitgevoerd volgens de regels van Het Nieuwe Telen. Vochtafvoer wordt zoveel mogelijk met de LBK gedaan en zo weinig mogelijk met de ramen. Verder zijn de buizen *alleen* gebruikt voor verwarming en niet bij een te hoog vochtgehalte. Dat leidt ertoe dat het VD setpoint niet onder alle omstandigheden gehaald kon worden, met alle risico's van dien.

De in het virtuele experiment bereikte energiebesparing komt tot stand door een verbeterde vochtregeling. Er wordt een buis bijgezet als dat niet anders kan. Daardoor kan bij een lagere VD geteeld worden en dat bespaart energie. Het selectief en gericht inzetten van de buisverwarming gaat dus prima samen met energiebesparing, mits de buizen alleen worden gebruikt als ontvochtiging door middel van buitenlucht niet goed werkt.

Tijdens de bespreking van deze resultaten kwam naar voren dat het inzetten van de buizen voor ontvochtiging ook in het uitgevoerde experiment heeft plaatsgevonden, namelijk als noodmaatregel, als LBK en raamventilatie onvoldoende werkten. Het lijkt ons dat de nagestreefde energiebesparing in de praktijk gemakkelijker gehaald kan worden als het gebruik van de buizen voor ontvochtiging niet als "noodmaatregel" gehanteerd wordt maar als onderdeel van de HNT methodiek.

Daaruit komt het volgende beeld naar voren van een verbeterde vochtregeling. Uit de (verwachte) hoeveelheid licht en de VD kan geschat worden hoeveel verdampingsvocht moet worden afgevoerd. De klimaatcomputer rekent uit welke combinatie van ventileren en verwarmen energetisch het gunstigst is. In het geval van vochtige buitenlucht wordt een buistemperatuur berekend om het vocht bij een iets hogere kasttemperatuur en een hoger absoluut vochtgehalte af te voeren via ventilatie. Als de lucht buiten voldoende droog is, zijn raamventilatie of LBK zonder verwarming voordeliger.

Door op verschillende hoogtes in het gewas de VD te meten kan dit proces onder controle worden gehouden en kan uiteindelijk bij een lagere VD worden geteeld

<sup>3</sup>Het warmteverbruik gedurende de laatste weken van de teelt is niet erg goed gesimuleerd. Aan dit deel van de grafiek moet dus niet teveel waarde worden gehecht. Zie daarover ook hoofdstuk 4.3.

---

waardoor een aanzienlijke hoeveelheid energie kan worden bespaard. Waarnemingen van bladnat of andere problemen kunnen in verband worden gebracht met de op meerdere hoogtes gemeten VD, zodat uiteindelijk een verantwoorde keuze voor een VD setpoint kan worden gemaakt.



# Referenties

- Anonymous, 1990. Handbook of chemistry and physics. CRC Press, Boca Raton, USA.
- Bernacchi, C. J., Pimentel, C., Long, S. P., 2003. *In vivo* temperature response functions of parameters required to model RuBP-limited photosynthesis. *Plant, Cell and environment* 26, 1419–1430.
- Bernacchi, C. J., Singsaas, E. L., Pimentel, C., Portis, A. R., Long, S. P., 2001. Improved temperature response functions for models of rubisco-limited photosynthesis. *Plant, Cell and environment* 24, 253–259.
- Bird, R. B., Stewart, W. E., Lightfoot, E. N., 1960. Transport phenomena. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- de la Faille, L. B., Campen, J., Oversloot, H., 2009. U-waarde kas met scherm. meetprotocol voor schermdoeken. Technical report, TNO Bouw en Ondergrond, Delft, the Netherlands. TNO rapport 034-DTM-2009-04659.
- de Zwart, H., Stanghellini, C., van der Knaap, L., 2010. Hoog isolerende en licht-doorlatende schermconfiguraties. Technical report, Wageningen-UR, Wageningen, the Netherlands. PT project 13733.
- de Zwart, H. F., 1996. Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model. Ph.D. thesis, Institute of Agricultural and Environmental Engineering, Agricultural University Wageningen, The Netherlands.
- Farquhar, G. D., Gaemmerer, S. V., Berry, J. A., 1980. A biochemical-model of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of c-3 species. *Planta* 149, 78–90.
- Goudriaan, J., 1977. Crop micrometeorology: a simulation study. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen. PhD thesis Agricultural University Wageningen.
- Goudriaan, J., van Laar, H. H., 1994. Modelling potential crop growth processes. Textbook with exercises. Current Issues in Production Ecology, Volume 2. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., Levine, A. S., 2006. Fundamentals of heat and mass transfer. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 6th edition.
- Leuning, R., 1995. A critical appraisal of a combined stomatal-photosynthesis model for C<sub>3</sub> plants. *Plant, Cell and environment* 18, 339–255.
- Monteith, J. L., Unsworth, M. H., 1990. Principles of environmental physics. Arnold, London.

- Nederhof, E., de Boer, P., Schapendonk, A., Pot, S., Dueck, T., 2010. Stuur led's en energiebesparing bij paprika. Verslagen Productschap Tuinbouw en Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit. In kader van Kas als Energiebron PT13417, 106.
- Raithby, G. D., Hollands, K., 2000. Natural convection. In: Kreith, F. (Ed.) The CRC handbook of thermal engineering, pp. 3.15–3.26. CRC Press, Boca Raton.
- Schapendonk, A. H. C. M., Pot, C. S., Trouwborst, G., Rappoldt, C., 2010. Optimale hybride belichting bij tomaat, perspectieven voor het nieuwe telen. Technical report, Plant-Dynamics, Wageningen. Onderzoeksrapport PT projectnummer 14092.
- Stanghellini, C., 1987. Transpiration of greenhouse crops: an aid to climate management. Agricultural University Wageningen, Wageningen. PhD thesis.
- Stanghellini, C., de Jong, T., 1995. A model of humidity and its applications in a greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology* 76, 129–148.
- Yin, X., Goudriaan, J., Lantinga, E. A., Vos, J., Spiertz, H. J., 2003. A flexible sigmoid function of determinate growth. *Annals of Botany* 91, 361–371.



# Appendices



---

# Schermggebruik

---

Dit voorbeeld illustreert dat het volledig gesimuleerd schermgebruik (zie Hoofdstuk 4) *ongeveer* gelijk is aan het schermgebruik tijdens de proef. Omdat de regels voor het schermgebruik niet precies zijn vastgelegd en ook tijdens de proef wel eens zijn veranderd is gekozen voor de eenvoudige schermregeling zoals beschreven in hoofdstuk 4.1.1 op bladzijde 30.

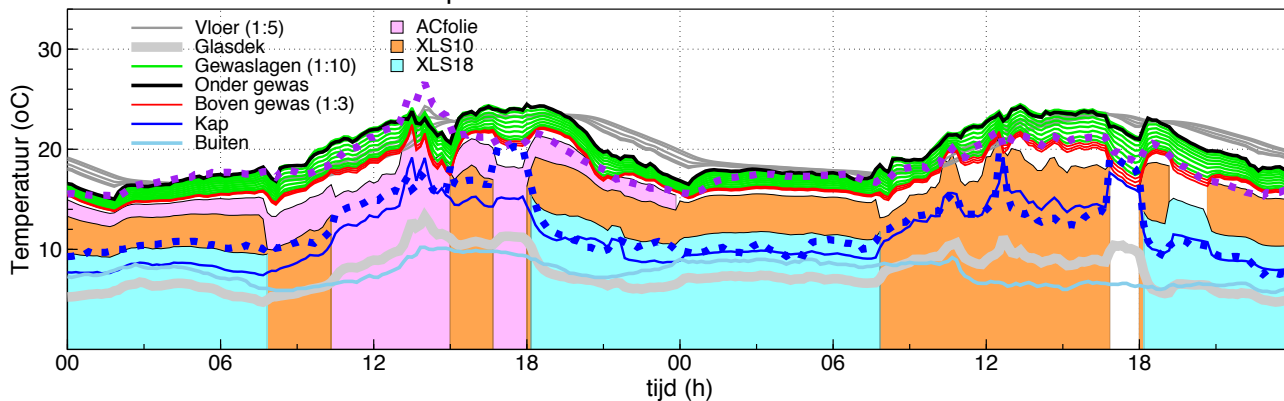
Op de volgende twee bladzijden staat een deel van het klimaatrapport van de simulaties met geregistreerd en gesimuleerd schermgebruik. Als een scherm gesloten is wordt de berekende schermtemperatuur door de bovenrand van een gekleurd vlak weergegeven. De legenda is te vinden in het bovenste figuur met de temperaturen voor 25 en 26 februari 2010.

Het ACfolie is permanent gesloten geweest tot 26 februari. Dat wordt daarom niet geregeld maar de verwijdering van het folie is als een gebeurtenis in het model opgenomen.

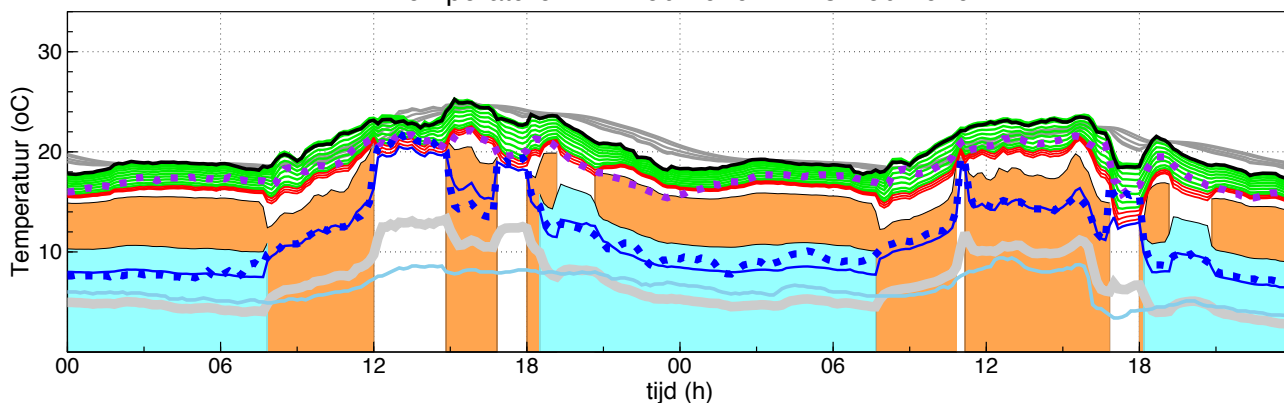
# Simulatie met schermgebruik volgens de proefgegevens



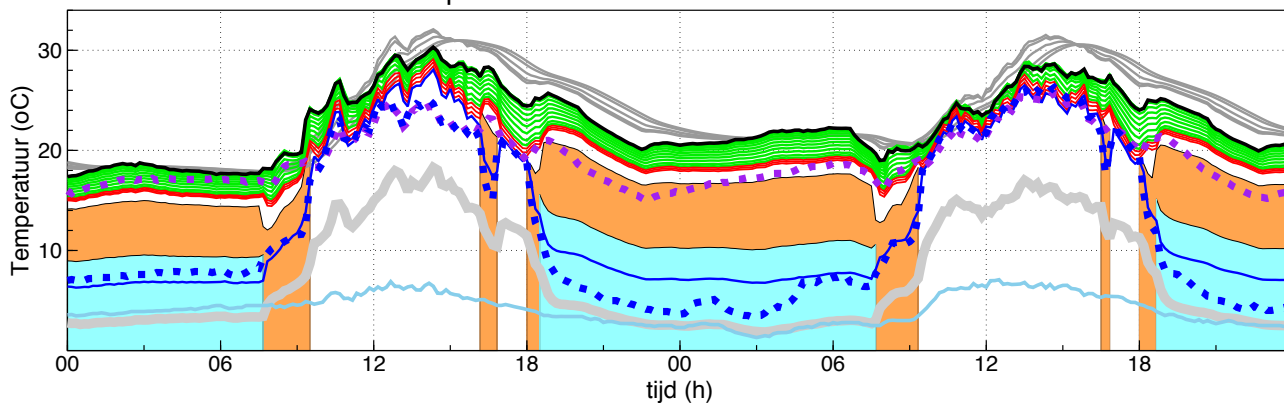
Temperaturen: 25-Feb-2010 . . . 26-Feb-2010



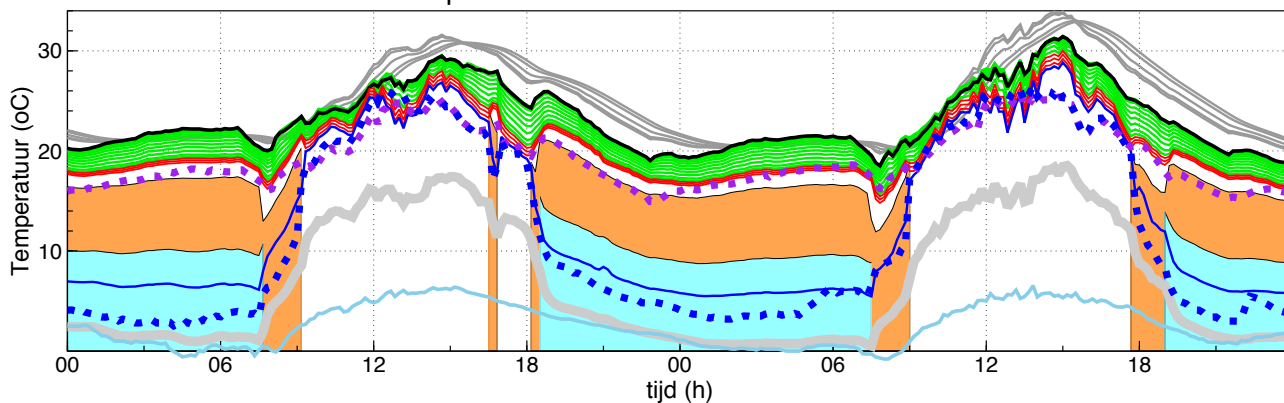
Temperaturen: 27-Feb-2010 . . . 28-Feb-2010



Temperaturen: 01-Mar-2010 . . . 02-Mar-2010



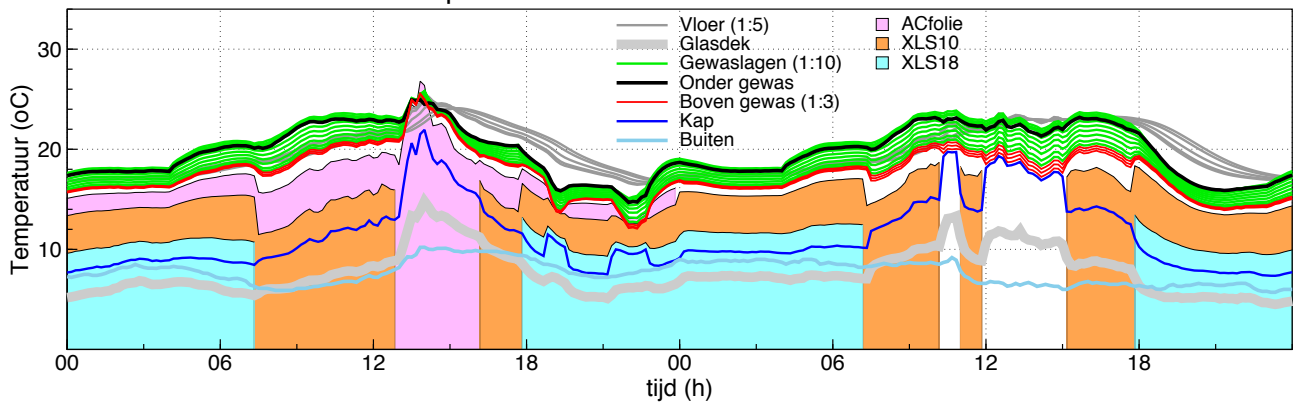
Temperaturen: 03-Mar-2010 . . . 04-Mar-2010



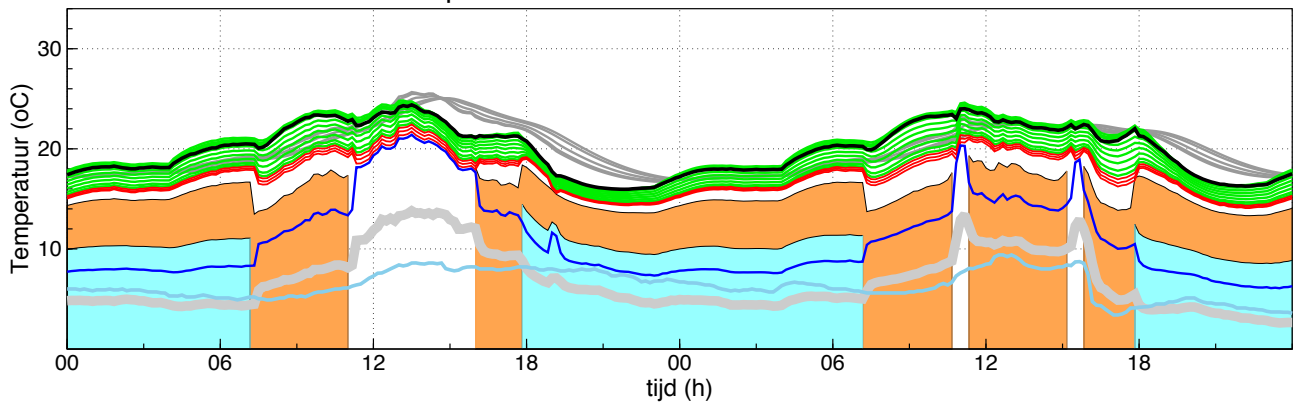
# Simulatie met schermgebruik volgens virtuele klimaatcomputer



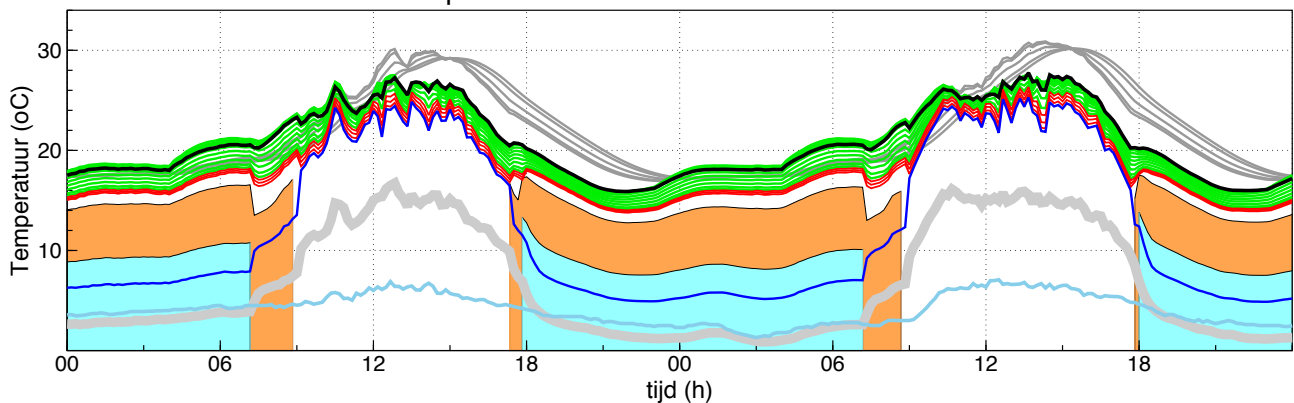
Temperaturen: 25-Feb-2010 . . . 26-Feb-2010



Temperaturen: 27-Feb-2010 . . . 28-Feb-2010



Temperaturen: 01-Mar-2010 . . . 02-Mar-2010



Temperaturen: 03-Mar-2010 . . . 04-Mar-2010

