LED belichting en Het Nieuwe Telen
Scenario analyses Tomaat

C Rappoldt en A H C M Schapendonk

EcoCurves rapport 15, ISSN 1872-5449 januari 2012

Productschap Tuinbouw

Kas als Energiebron

Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie

LED belichting en Het Nieuwe Telen
Scenario analyses Tomaat

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

LED belichting en Het Nieuwe Telen
Scenario analyses Tomaat

C. Rappoldt[1], A. H. C. M. Schapendonk[2]

[1]EcoCurves, Kamperfoelieweg 17, 9753 ER Haren
E-mail: kees.rappoldt@ecocurves.nl

[2]Plant-Dynamics, Englaan 8, 6703 EW Wageningen
E-mail: ad@plant-dynamics.nl

EcoCurves rapport 15, januari 2012

REFERAAT

C. Rappoldt, A. H. C. M. Schapendonk, 2012. *LED belichting en Het Nieuwe Telen ; Scenario analyses Tomaat.* EcoCurves rapport 15, EcoCurves, Haren en Plant-Dynamics, Wageningen. 58 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 een experiment op het Improvement Center in Bleiswijk (2010-2011) werden berekeningen verricht om het effect van diverse klimaatregelingen te testen op opbrengsteffecten en energiekosten. Er is aandacht voor belichten, de inzet van luchtbehandeling, schermen en verwarmen.

Trefwoorden: kasteelt, assimilatiebelichting, Het Nieuwe Telen, tomaat, simulatie, energiebesparing, schermen

ISSN 1872-5449

Dit verslag is beschikbaar als PDF file op
www.ecocurves.nl/Support/Rapporten/EcoCurvesRapport15.pdf

Dit onderzoek werd gesubsidieerd door het Productschap Tuinbouw en het Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie. We bedanken de begeleidingscommissie voor de discussies gedurende de voortgang van het project.

© 2012 EcoCurves BV & Plant-Dynamics BV
Kamperfoelieweg 17, 9753 ER Haren (gn), Nederland
Tel.: 050 5370979; e–mail: kees.rappoldt@ecocurves.nl

Voorplaat: “Beelden van de teelt op het Improvement Center”

Dit rapport is tot stand gekomen in samenwerking met het Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie, Wageningen-UR, het Improvement Center en het Productschap Tuinbouw, 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 aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de gegevens en de modelresultaten in dit rapport.

[This document has been created using the LaTeX typesetting system]

Inhoudsopgave

Lijst figuren **7**

Lijst tabellen **8**

Samenvatting **9**

1 Inleiding **13**

2 Model en experiment **15**
2.1 Experiment . . . 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 . . . 18
2.3.2 Scenario berekeningen . . . 19

3 Simulatie van de proef **21**
3.1 Teelt . . . 21
3.2 Kasklimaat . . . 23
3.3 Energiegebruik . . . 26
3.4 Conclusie . . . 27

4 Virtuele klimaatcomputer **29**
4.1 Setpoints . . . 30
4.2 Teelt en energiegebruik . . . 31
4.3 Discussie . . . 32
4.3.1 Gewasmanagement . . . 33

5 Scenario Belichtingsstrategie **35**
5.1 Is er een optimale assimilatiebelichting? . . . 35
5.1.1 Bespreking van het resultaat in Figuur 5.1 . . . 37
Het scenario "LED meer absorptie" . . . 37
Keuze van het lichtniveau . . . 39
5.2 Daglicht drempel voor uitschakelen belichting . . . 39
5.3 SON-t en LED lampen . . . 41

6 Scenario Schermstrategie **44**
6.1 Het effect van schermen . . . 44
6.1.1 Aanwezige schermen worden wel of niet gebruikt . . . 44
6.1.2 Lichtonderschepping door schermpakket . . . 45
6.2 Lichtdrempel energiescherm XLS10 H2NO . . . 47
6.3 Het effect van de ΔT drempel . . . 49

6.3.1 Twee energieschermen 49
6.3.2 Drie waarden van de ΔT drempel 49
6.4 Alternatieve schermregelingen 51
6.5 Discussie schermregeling 52

7 Conclusies en aanbevelingen **54**

Referenties **58**

Lijst van figuren

2.1 Schema van Explorer kasklimaat model 16
2.2 Schema met klimaatbesturing uit proefgegevens 19

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 februari 23
3.5 Gesimuleerd kasklimaat voor 2 dagen in april 25
3.6 Gesimuleerd kasklimaat voor 2 dagen in juni 25
3.7 Gesimuleerde RV voor 26 en 27 april 26
3.8 Gesimuleerd en gemeten warmtegebruik 27

4.1 Oogst gesimuleerd voor geregeld kasklimaat 30
4.2 Vruchtgewicht gesimuleerd voor geregeld kasklimaat 31
4.3 Plantbalans gesimuleerd voor geregeld kasklimaat 32
4.4 Warmtegebruik in de referentie 33

5.1 Opbrengst als functie van het elektriciteitsverbruik voor verschillende manieren van belichten 36
5.2 Effect van een daglicht drempel bij 180 μMol aan lamplicht 40
5.3 Effect van een daglicht drempel bij 180 μMol en 165 μMol aan lamplicht 41
5.4 Een daglicht drempel in detail 42
5.5 Efficiëntie van SON-t en LED licht 43
5.6 Benodigde warmte bij gebruik van SON-t en LED licht 43

6.1 Kosten en baten van toenemend gebruik van XLS10 H2NO 48
6.2 Besparingskarakteristiek voor de lichtdrempel van het SLS10 H2NO energiescherm 48
6.3 Lichtdrempeling voor de energieschermen bij verschillende keuzes voor de ΔT 50
6.4 Besparingskarakteristieken voor de lichtdrempel toegepast op beide energieschermen. 52

Lijst van tabellen

4.1 Setpoints van de (virtuele) klimaatcomputer 30

6.1 Effect van het gebruik van schermen 45
6.2 Effect van de installatie en het gebruik van schermen 46
6.3 Warmteverbruik en opbrengst bij toenemend gebruik van het energiescherm XLS10 H2NO 47

Samenvatting

In het seizoen 2010–2011 werd een belichte teelt met het ras Komeett uitgevoerd door Wageningen-UR op het Improvement Center in Bleiswijk (Dueck *et al.*, 2011). In de proef werd gebruik gemaakt van een XLS SL 99 Revolux W/W transmissie scherm, een XLS 10 Revolux H2NO en een SLS 10 Ultra energiescherm. Ontvochtiging vond plaats door aanzuiging van buitenlucht en opwarming daarvan in LBK's.

Met het simulatiemodel Explorer Tomaat (een soort virtuele kas) zijn scenario analyses verricht voor scherm-, ontvochtiging- en verwarmings-regelingen, nadat de geldigheid van het model is getoetst aan de hand van de beschikbare data van gemeten kasklimaat, energieverbruik en opbrengstcijfers. De scenario analyses resulteren in verschillende uitkomsten voor jaaropbrengst en energieverbruik. Vervolgens kunnen met die resultaten nieuwe aanknopingspunten voor energiebesparing worden bepaald. De gesimuleerde productie is 74.1 kg terwijl in de proef 74.8 kg gemeten werd. De simulatie geeft ook een goede schatting van de totale oogst en het vruchtgewicht (gemiddeld 166 gr gesimuleerd en 168 gr gemeten).

Het totale gesimuleerde warmtegebruik van de buizen bedraagt 506 MJ, in overeenstemming met dat in de proef (505 MJ). Het totale warmtegebruik van de LBK is gebruikt voor calibratie van het model. Het wekelijks warmteverbruik wordt daarna correct beschreven met het Explorer model. Het gesimuleerde elektriciteitsverbruik van de lampen bedraagt 245 kWh en het gemeten verbruik bedroeg 253 kWh[1]. Het verschil wordt veroorzaakt door kleine afwijkingen in schakeltijden.

Minder belichten als optie voor energiebesparing

Elektriciteitsverbruik en warmteverbruik zijn niet onafhankelijk en opties voor energiebesparing dienen dan ook altijd op beide fronten te worden doorgerekend. Energiebesparing door uitschakelen van de lampen is daarom niet zo eenvoudig als op het eerste gezicht lijkt. Toch zijn op er, onder de juiste randvoorwaarden, veel kosten te besparen door licht uit te schakelen wanneer het niet optimaal wordt benut. Door de verminderde meerwaarde van oplopende lichtintensiteiten op opbrengst is het afschakelen van licht boven 300 W m^{-2} daglicht in de praktijk algemeen geaccepteerd.

De samenhang tussen opbrengst, belichting, elektriciteitsverbruik en warmtegebruik is onderzocht door in scenario berekeningen de belichting in kleine stappen te verlagen of te verhogen totdat dat het electriciteitsverbruik 50 kWh *lager* ligt dan dat in de proef of 50 kWh *hoger*. Gaan we nog lager dan krijgen we te maken

[1] In de gerapporteerde proefgegevens werd het gebruik van de LED lampen gecorrigeerd voor een toekomstige rendementsverbetering van 18% (Dueck *et al.*, 2011). Bij de simulaties kon hiermee geen rekening worden gehouden omdat nu eenmaal een reeële warmteafgifte door LED in rekening gebracht moet worden bij het simuleren van het kasklimaat.

met een lichtdrempel waaronder in de winter geen productie mogelijk is. Gaan we hoger dan dient de trosvorming gestimuleerd te worden door extra te verwarmen om gelijke tred te houden met de toename van het assimilatenaanbod. Bij nog hogere intensiteiten wordt geleidelijk een verzadiging bereikt.

Binnen het gebruikte traject blijkt het bijzonder weinig uit te maken op welke wijze het licht wordt toegediend: verschillen in intensiteit, belichtingsduur en drempeling op daglicht werden getest. De gemiddelde productie is 68 g oogstgewicht per kWh. Wanneer alleen wordt gelet op de opbrengst, is meer belichten rendabel zolang de kosten van een kWh lager zijn dan de opbrengst van 68 gram tomaat.

Omdat de opbrengst per kWu over een groot belichtingstraject *constant* is, is het electriciteitsverbruik in belangrijke mate een keuze, die alleen bepaald wordt door de prijs van een kWu en de prijs van een kilo product. Vanwege het lineaire verband, over een breed traject, is de economische optimalisatie zeer eenvoudig. Er is echter wel een complicerende factor. De lampen leveren namelijk ook warmte, en de mate waarin die warmte benut kan worden, bepaalt mede het economisch rendement van de belichting. Die effecten zijn doorberekend. De procedure om de warmte van de assimilatiebelichting optimaal te benutten is:

- Láát op de dag uitschakelen van de lampen is gunstiger voor de warmtebenutting dan vroeg uitschakelen. Dus liever langer belichten met een iets lager vermogen dan korter belichten met een hoog vermogen.
- Wanneer het gekozen uitschakel-tijdstip leidt tot een te hoog elektriciteitsverbruik (= meer licht dan gewenst), dan kan de daglicht drempel, waarboven de lampen worden uitgeschakeld, worden verlaagd om het elektriciteitsverbruik terug te brengen. Dat gaat goed tot een uitschakeldrempel van ongeveer 200 Wm^{-2} daglicht. Bij een nog lagere drempeling gaat de warmtevraag van buis en LBK weer toenemen.

De toepasbaarheid van LED's in de tomatenteelt zal grotendeels afhangen van de *elektrische efficiëntie* van de LED lampen en de lichtverliezen bij gebruik van LED lampen als tussenbelichting.

Voor de huidige proef wordt er, op basis van de modelberekeningen, nauwelijks een meerproductie door LED belichting voorspeld. Dit is voornamelijk het gevolg van de geschatte, relatief grote, lichtverliezen en de locale oververzadiging door clustering van bladeren in de nabijheid van de lichtbron. In een eerdere studie is op basis van de toen gemeten lichtinterceptie een productietoename van 10% voorspeld en ook daadwerkelijk gerealiseerd (Pot *et al.*, 2010). In die proef was echter sprake een hogere plantdichtheid, een lagere lichtintensiteit van de assimilatiebelichting en minder bladpluk.

De sleutel tot succes van tussenbelichting is naar onze mening dus een belichtingsinstallatie met een maximale gewasabsorptie en diffuse lichtemissie om lokale overbelichting van de bladeren te voorkomen. Daarnaast is er, zoals al eerder werd aangetoond, een verschuiving van het rendement van tussenbelichting over de maanden en een duidelijk raseffect (Schapendonk *et al.*, 2010). Het is dan ook niet verwonderlijk dat de resultaten met LED tussenbelichting sterk fluctueren. Desondanks is er voldoende theoretische kennis om deze effecten te kunnen voorspellen, waarbij de interactie met het verwachte weer een grote rol speelt, niet zozeer vanwege de te volgen belichtingsstrategie voor de opbrengst maar vanwege de te verwachte effecten op het energieverbruik.

© 2012 EcoCurves en Plant-Dynamics

Slim schermen met de inzet van energieschermen overdag

Met schermen wordt energie bespaard door vermindering van langgolvige uitstraling en het voorkomen van convectieve warmteverliezen. De energiebesparing door het gebruik van drie schermen is aanzienlijk, 16.0 m^3 aardgas ten koste van 1.1 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 6.1 is te zien dat de gesimuleerde besparingen door het gebruik van slechts één scherm niet bij elkaar kunnen worden opgeteld. De besparingen met enkele schermen zijn: 11.2 m^3 met *alleen* verduisteringsscherm, 1.4 m^3 met *alleen* SLS10 Ultra en 12.8 m^3 met *alleen* XLS10 H2NO. Bij elkaar opgeteld zou dat 25.4 m^3 besparing opleveren. In feite blijken de drie schermen samen een gesimuleerde besparing van 16.0 m^3 gas te realiseren.

In de simulaties worden de energieschermen gesloten als het daglichtniveau onder een bepaalde drempel komt en *tegelijkertijd* òf de ΔT (het verschil tussen de kastemperatuur en de buitentemperatuur) òf de ΔT_{buis} (het verschil tussen buistemperatuur en de kasluchttemperatuur) boven een bepaalde drempel komt. Scenario berekeningen met verschillende daglicht drempels en ΔT en ΔT_{buis} waarden laten zien:

- Dat bij daglicht onder de daglicht drempel, het eerste energiescherm gesloten kan worden zodra het buiten enkele graden kouder kouder is dan binnen. Een hogere ΔT voor het eerste scherm heeft geen zin.
- Dat de huidige energieschermen nog zoveel licht onderscheppen dat het niet loont om een *tweede* energiescherm te sluiten tenzij het buiten veel kouder is dan binnen.
- Dat het schakelen op de ΔT_{buis} inplaats van op ΔT gunstig kàn uitpakken maar is niet eenvoudig omdat de buistemperatuur zelf zal reageren op het gebruik van de schermen.
- Dat nog 1.5 m^3 aardgas extra bespaard kan worden door de daglichtdrempel te verhogen. Het opbrengstverlies neemt dan echter snel toe. Dit opbrengst verlies kan enigszins beperkt worden door de ΔT afhankelijk te maken van het daglicht niveau, dus door bij veel licht de schermen open te houden tenzij het buiten veel kouder is dan binnen.

Een substantieel grotere besparing bij dezelfde opbrengst vraagt schermen met een grotere lichtdoorlatendheid. Dan kan zonder opbrengstderving bij een hogere lichtdrempel geschermd worden. Dan komt ook een lichtafhankelijke ΔT in beeld. Daarmee kan bij een hoge lichtdrempel het opbrengstverlies verkleind worden.

© 2012 EcoCurves en Plant-Dynamics

Hoofdstuk 1

Inleiding

Er zijn zeer veel verschillende aansturingen en setpoints voor schermen en verwarmen/ontvochtigen te bedenken die allemaal energiebesparing opleveren. Helaas zijn er nauwelijks experimentele data die die de effecten van de maatregelen relateren aan de opbrengstveranderingen. Er zijn simpelweg teveel opties om integraal experimenteel te testen. Gelukkig is er een alternatief. Met een compleet nagebouwde virtuele kas, incluis een groeiend gewas, kunnen gewenste regelingen, kasconfiguraties en raseigenschappen worden getest op consequenties voor energiegebruik **en** opbrengst. Op die manier kan een voorselectie worden gemaakt van de meest veelbelovende combinaties. Deze voorselectie levert een sterk ingedikt aantal opties, waarvoor het vervolgens wel haalbaar is om een experimentele toets uit te voeren.

Op die manier wordt in dit project een analyse gemaakt van de opbrengsten en energiekosten van jaarrond teelten bij tomaat tegen de achtergrond van verschillende opties voor assimilatiebelichting en schermgebruik. Uit een eerdere studie bleek dat 10% tot 26% bespaard kan worden op elektriciteit en 18% tot 20% op warmte, afhankelijk van het gebruikte tomatenras (Schapendonk *et al.*, 2010). In deze studie wordt hierop voortgebouwd door in te zoomen op details van belichting en scherminstellingen en met een analyse waarbij de gevoeligheid van regelingen overzichtelijk in figuren wordt weergegeven. Dit geeft al een beeld van de potentie voor energiebesparing, afgezet tegen de verliezen aan productie die met de genomen maatregelen gepaard gaan. Als zodanig vormen de exercities een eerste aanzet voor verdere optimalisatie van schermstrategie en belichtingsstrategie.

De scenario analyses zijn verricht aan een dataset van een experiment dat in 2010–2011 werd uitgevoerd door Wageningen-UR op het Improvement Center in Bleiswijk met het tomatenras Komeett. Dat experiment vormt 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 vormen de referentie waarmee de scenario's in dit rapport worden vergeleken.

Het voor de analyses gebruikte Explorer-Tomaat model van Plant-Dynamics en EcoCurves is een combinatie van een teeltmodel en een kasklimaatmodel. Met dit gekoppelde model wordt allereerst een consistente en correcte beschrijving gegeven van zowel de teelt als het bijbehorende kasklimaat en energiegebruik (Hoofdstuk 3 en Hoofdstuk 4). Met de zo verkregen virtuele kas worden vervolgens scenarioberekeningen gemaakt om vragen te beantwoorden over de effectiviteit van schermen (Hoofdstuk 4.1) en assimilatiebelichting (Hoofdstuk 5).

Hoofdstuk 2

Model en experiment

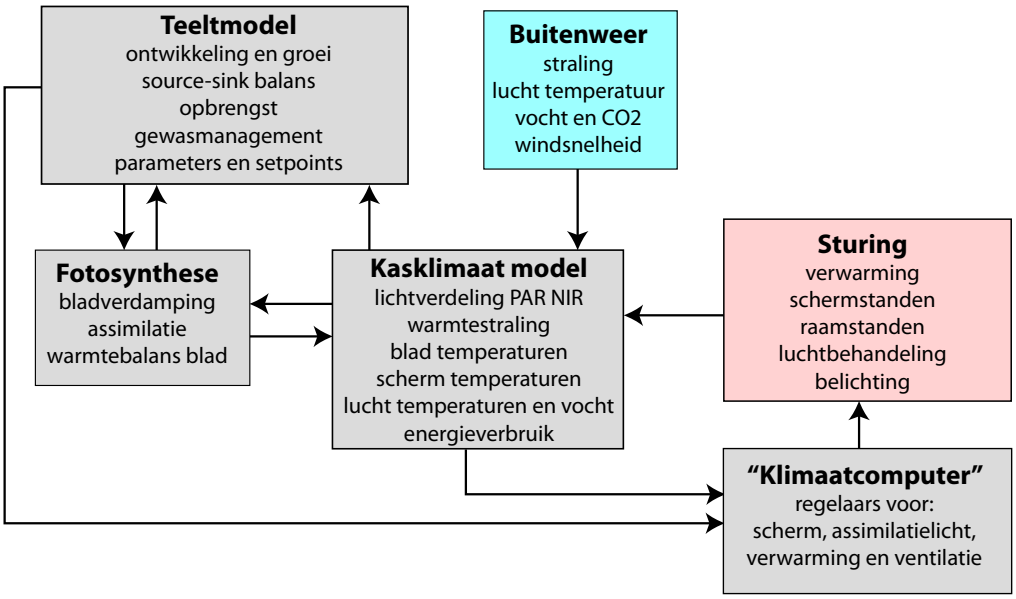
2.1 Experiment

De tomatenproef werd door Wageningen-UR uitgevoerd op het Improvement Center in Bleiswijk met het ras Komeett. De plantdatum was 7 oktober 2010. Stengeldichtheid: 2.5 m^{-2}. In week 5 2011, werd per plant een extra scheut aangehouden Tijdstip eerste bloei: week 3. De eerste tros werd op 4 vruchten gesnoeid, daarna op 5. Vanaf week 47 werd vervolgens weer op 4 vruchten per tros gesnoeid.

2.1.1 Kasconfiguratie

De ontvochtiging vond deels plaats door voorverwarmen van de buitenlucht: maximaal 5 m^3 m^{-2} 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 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, 12×51 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 SL 99 Revolux W/W transmissie voor direct licht: 0.5% en voor diffuus licht 0.5%, energie besparing 50% SLS 10 Ultra : transmissie voor direct licht 88% en voor diffuus licht 81%, energie besparing 43% XLS 10 Revolux H2NO: transmissie voor direct licht 85% en voor diffuus licht 78%, energie besparing 47% De schermen bevinden zich boven en onder de tralie en lopen tegengesteld aan elkaar. Het verduisteringsdoek bevindt zich aan de bovenzijde van de tralie samen met het SLS10 Ultra Plus energiescherm. Het XLS10 H2NO doek bevindt zich aan de onderzijde van de tralie.



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

2.2 Explorer model

Het schema in Figuur 2.1 toont de structuur van het Explorer kasklimaat model. Het model simuleert de fotosynthese, de gewasontwikkeling en het kasklimaat op basis van fysiologische processen in de plant en fysische processen in de kas. Voor het voorspellen van zowel het energiegebruik als de plantreacties is een goede simulatie van de interactie tussen gewas en kasklimaat van cruciaal belang. De gewasverdamping bepaalt bijvoorbeeld voor een aanzienlijk deel de behoefte aan ventilatie en buiswarmte. Omgekeerd worden de opname van CO_2 (en dus de groei) en de verdamping bepaald door de temperatuur, de instraling (beïnvloed door de schermen) en de luchtvochtigheid.

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.

© 2012 EcoCurves en Plant-Dynamics

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. Het is mogelijk om de interactie tussen kasklimaat en teelt op diverse manieren te beïnvloeden. Voorbeelden daarvan zijn de timing voor het aanhouden van extra kopscheuten, het punten van vruchten, bladpluk enz.

De module voor fotosynthese beschrijft de verdamping en de productie van assimilaten door de bladeren. Deze module is opgebouwd uit 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,
- 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 zoals schematisch weergegeven in Figuur 2.1. 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. Dat kan zijn door het inlezen van geregistreerde data uit een file die is aangemaakt uit door de actuele klimaatcomputer of data die aangeleverd worden door een eigen "klimaatcomputer".

In het schema van Figuur 2.1 worden de stuurvariabelen berekend door de module "klimaatcomputer". Deze module vergelijkt het gesimuleerde kasklimaat met de

© 2012 EcoCurves en Plant-Dynamics

gewenste setpoints. 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.

Uiteraard zijn er verschillende manieren om een gewenst setpoint te realiseren. Een hogere temperatuur kan bijvoorbeeld worden bereikt door een hogere buistemperatuur maar ook door meer schermen of een hogere intensiteit van de assimilatiebelichting. De consequenties voor de teelt zijn echter heel verschillend en kunnen met behulp van Explorer berekeningen worden vergeleken m.b.t. tot energiegebruik en opbrengst.

2.3 Werkwijze

Om een proef door te rekenen wordt de virtuele "klimaat computer" in eerste instantie uitgeschakeld. Inplaats daarvan wordt het kasklimaat berekend met 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 productie en het energiegebruik dienen in dat geval in overeenstemming te zijn met de gemeten proefresultaten (zie verder hoofdstuk 2.3.1 en Hoofdstuk 3 voor het resultaat). Dit is de eerste test om de werking van het kasklimaatmodel en het teeltmodel te valideren.

Als model en proef overeenkomen kunnen vervolgens scenarioberekeningen 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.

2.3.1 Validatie van het model

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).

De teeltmodules zijn in eerdere experimenten geparameteriseerd (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 bladafsplitsing *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 Heuvelink (1996), 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

© 2012 EcoCurves en Plant-Dynamics

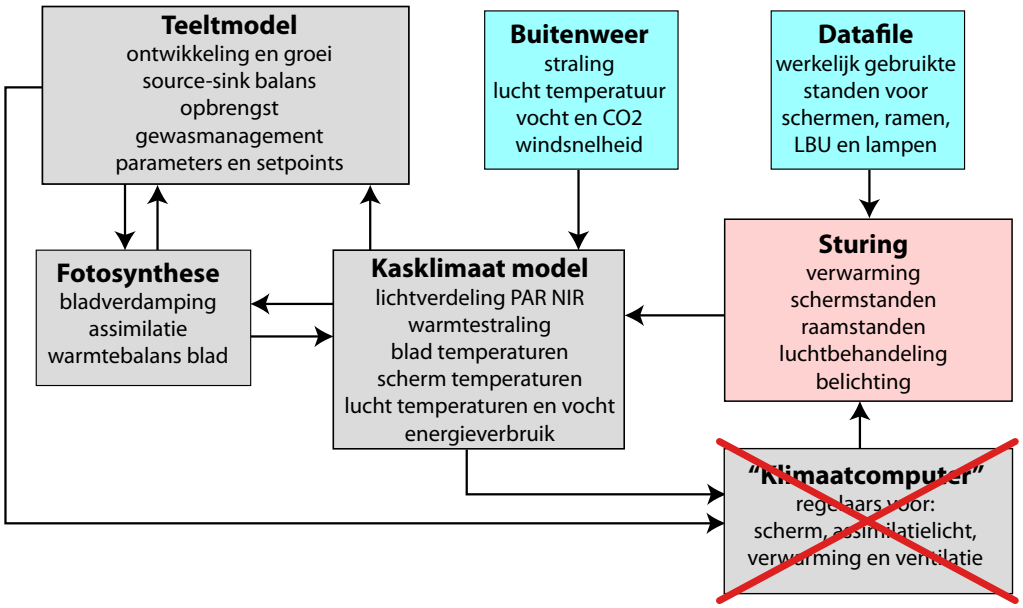
bladafsplitsing bij 20°C van 2.49 bladeren per week in een gesimuleerde gemiddelde bladafsplitsing van 2.41 bladeren per week versus een gemeten bladafsplitsing van 2.42 (32.2 bloeiende trossen in 40 weken met 3 bladeren per tros).

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 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



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.

© 2012 EcoCurves en Plant-Dynamics

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.

© 2012 EcoCurves en Plant-Dynamics

Hoofdstuk 3

Simulatie van de proef

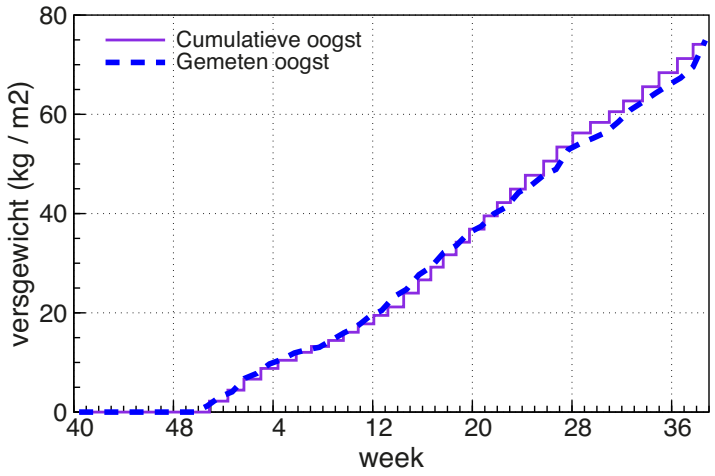
Om de proef door te rekenen met het Explorer model wordt ter controle het kasklimaat eerst gesimuleerd met de geregistreerde raamstand, buistemperatuur en luchtbehandeling. Het gesimuleerde kasklimaat moet dan ook overeenkomen met de geregistreerde temperatuur en luchtvochtigheid, en ook energieverbruik 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.

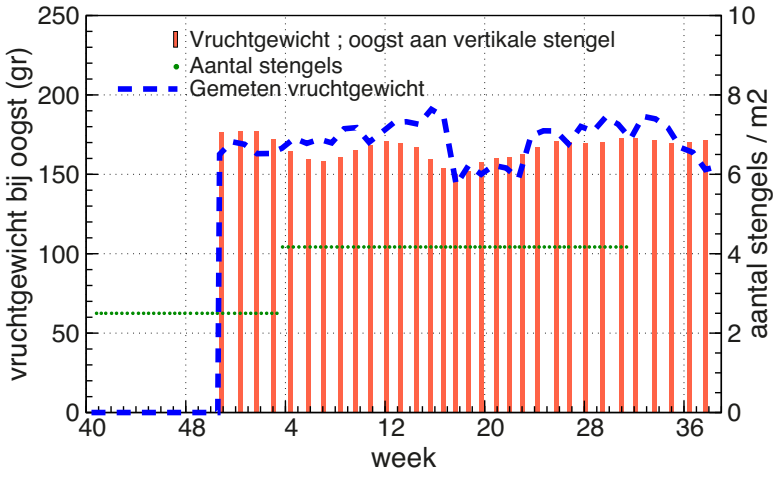
3.1 Teelt

Figuur 3.1 laat zien dat de opbrengst, gesimuleerd met gemeten kasklimaat, uitstekend overeenkomt met de gewaswaarnemingen. De gesimuleerde productie is 74.1 kg terwijl in de proef 74.8 kg gemeten is.

Figuur 3.2 toont de gesimuleerde en de gemeten vruchtgewichten bij de afzonderlijke oogsten. In dezelfde Figuur 3.2 is ook te zien dat in week 4 de stengeldichtheid is verhoogd naar 3.3 m^{-2} (groene stippellijn).



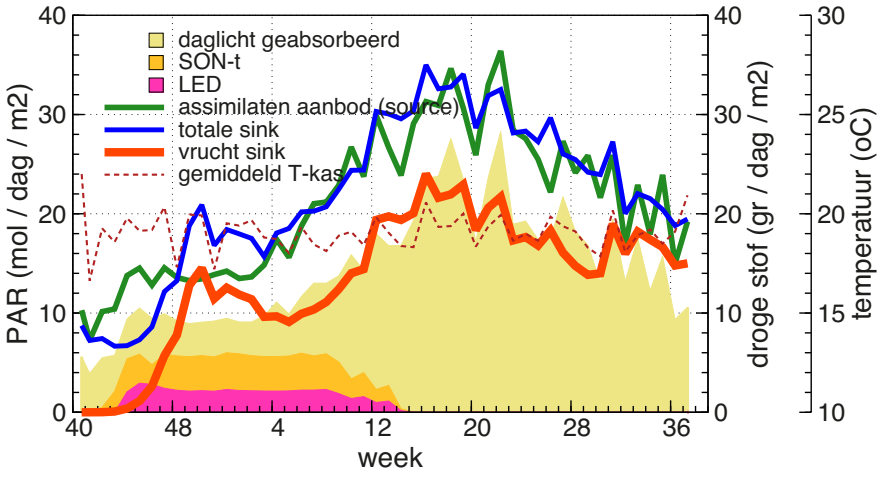
Figuur 3.1. Oogst gesimuleerd voor de gemeten klimaatbesturing. De in de proef gemeten oogst is weergegeven als een stippellijn.



Figuur 3.2. Vruchtgewicht bij oogst gesimuleerd voor de gemeten klimaatsturing. Tevens zijn het aantal stengels weergegeven (groene stippellijn;rechteras) en het gemeten vruchtgewicht weergegeven.

Een laag vruchtgewicht wordt veroorzaakt door een tekort aan assimilaten tijdens de vruchtgroei. Tijdens de laatste weken van de vruchtgroei kan dat gemakkelijk gebeuren omdat de vraag naar assimilaten van de vruchten dan hoog is, maar ook in een eerdere fase kan een tekort ontstaan waardoor de vruchten niet hun optimale oogstgewicht bereiken.

Het model berekent uit het gesimuleerde kasklimaat, de fotosynthese en de gewasontwikkeling zowel de hoeveelheid beschikbare assimilaten (aanbod) als de totale vraag van alle groeiprocessen, inclusief ademhalingskosten (vraag). Aanbod en vraag zijn weergegeven in Figuur 3.3 als een groene respectievelijk blauwe lijn. We zien twee perioden met een tekort, de periode tussen week 48 en week 6 en de periode van week 12 tot week 14. Dat leidt in het model tot een verlaagd en schommelend vruchtgewicht (Figuur 3.2). De simulaties komen overeen met de waarnemingen van het vruchtgewicht, al is er in werkelijkheid rond week 16 een



Figuur 3.3. De dagelijks geabsorbeerde hoeveelheid PAR licht, de productie van en vraag naar assimilaten, berekend voor de gemeten klimaatsturing. De plant wordt in balans gehouden gehouden door te sturen met de temperatuur. De gemiddelde plantbalans in de simulatie (gemiddelde verhouding tussen productie en vraag) bedraagt 0.970.

© 2012 EcoCurves en Plant-Dynamics

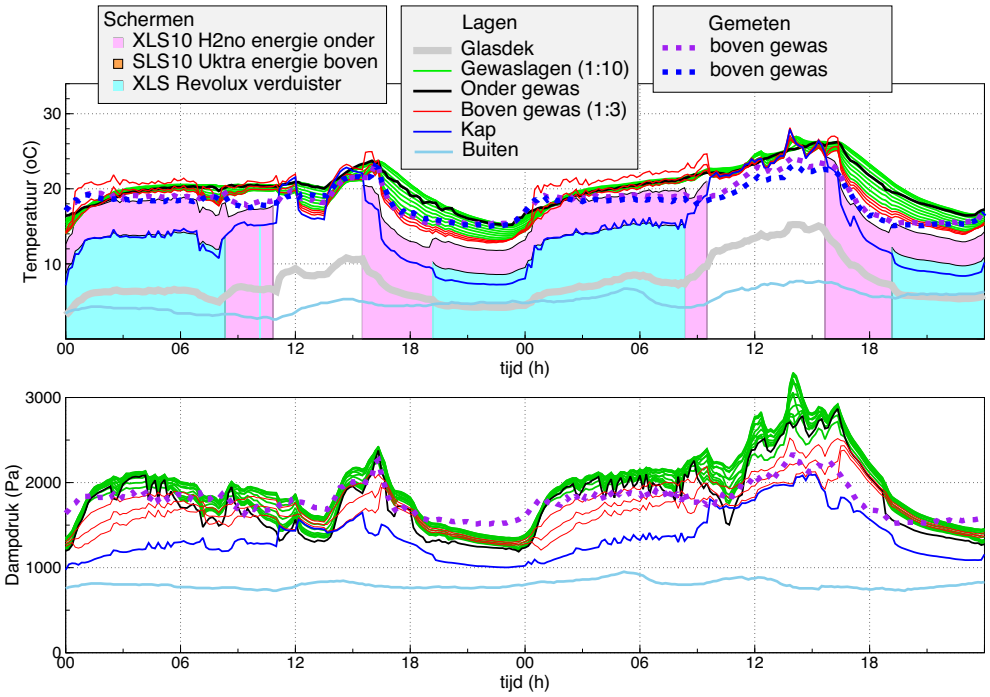
abruptere afname van het vruchtgewicht dan in de simulatie. Die nuances kunnen zowel aan kleine afwijkingen in het model als aan een aangepaste oogstmethodiek worden toegeschreven.

In de periode met veel licht rond week 20 volgen de oogsten in het model elkaar sneller op (de rode staafjes in Figuur 3.2 staan dichter op elkaar). Dit wordt veroorzaakt door de snellere bladafsplitsing en de daarmee samenhangende snellere trosafsplitsing door de relatief hoge temperaturen van het groeipunt. Hierdoor ontstaat een toenemende concurrentie tussen de trossen onderling en verloopt de rijping sneller, waardoor de vruchtgewichten (in het model) niet het optimale niveau bereiken.

Het gerealiseerde oogstgewicht is in de periode met assimilatiebelichting meestal een fractie groter dan het gesimuleerde oogstgewicht (Figuur 3.2). Het is echter moeilijk om de werkelijkheid dichter te benaderen dan we hier hebben gedaan. Een vruchtgewicht is immers het resultaat van de plantbalans over een lange periode. De interne regulering van de assimilatenverdeling en de eventuele rol van reserves daarbij is niet volledig bekend. De simulatie geeft echter een goede schatting van de totale oogst en een redelijke schatting van het vruchtgewicht, waarvan in ieder geval het gemiddelde voldoende nauwkeurig is (166 gr gesimuleerd en 168 gr gemeten).

3.2 Kasklimaat

De berekeningen van het kasklimaat in dit hoofdstuk zijn gebaseerd op de elke 5 minuten vastgelegde buistemperatuur, schermstanden, LBK instellingen en instellingen van de assimilatiebelichting. In combinatie met de weergegevens en de invloed van het gewas kan met die gegevens kasklimaat gesimuleerd worden. De



Figuur 3.4. Kasklimaat gesimuleerd voor 2 en 3 februari 2011 met de gemeten schermstanden, verwarming en ventilatie. De werkelijk gemeten temperatuur en dampdruk boven het gewas zijn in grafiek gebracht als stippellijnen.

© 2012 EcoCurves en Plant-Dynamics

invloed van het gewas op het klimaat is daarbij cruciaal. Berekeningen van het kasklimaat zonder daarbij de interactie met het gewas te verdisconteren zijn nutteloos.

Voor alle 352 dagen van de proef zijn kasklimaat en plantprocessen gesimuleerd in tijdstappen van 5 minuten. Figuren 3.4, 3.5 en 3.6 laten resultaten zien van het dagelijkse verloop van kenmerkende kasparameters in winter, voorjaar en zomer.

Vergelijking met metingen

Figuur 3.4 op bladzijde 23 laat gesimuleerde temperaturen (bovenste grafiek) en gesimuleerde vochtgehalten (onderste grafiek) zien voor twee dagen in februari. De dunne rode lijnen in de twee grafieken zijn de gesimuleerde temperatuur en het dampdrukdeficit boven het gewas, de blauwe lijnen zijn de betreffende gesimuleerde waarden in de nok, boven de schermen. De werkelijk gemeten waarden zijn weergegeven als rood en blauw gestippelde lijnen (beide boven het gewas). Als een scherm gesloten is wordt de berekende temperatuur van dat scherm weergegeven als de bovenrand van het gekleurde vlak, behorend bij dat scherm (zie legenda Figuur 3.4).

In Figuur 3.4 zijn de lampen aan gedurende een periode die overeenkomt met de sluiting van het XLS10 H2NO doek (roze vlak). We zien alle temperaturen oplopen als de lampen aangaan rond middernacht, vooral die in de kap (dunne blauwe lijn). Verder is te zien dat de temperaturen in de kas als het ware "drijven" op de schermtemperaturen. Dat wordt uiteraard veroorzaakt door de isolerende werking van de schermen.

Een tweede duidelijk effect van de schermen is dat de noktemperatuur (de dunne blauwe lijn) naar beneden duikt telkens als er een scherm gesloten wordt. Gemeten noktemperaturen in de HNT proef zonder belichting (Rappoldt & Schapendonk, 2011) laten zien dat dit effect met het model realistisch wordt gesimuleerd. Het grote temperatuurverschil over de schermen is weer het gevolg van de isolerende werking. Zodra de schermen open gaan zien we de noktemperatuur min of meer samenvallen met die van de lucht boven het gewas.

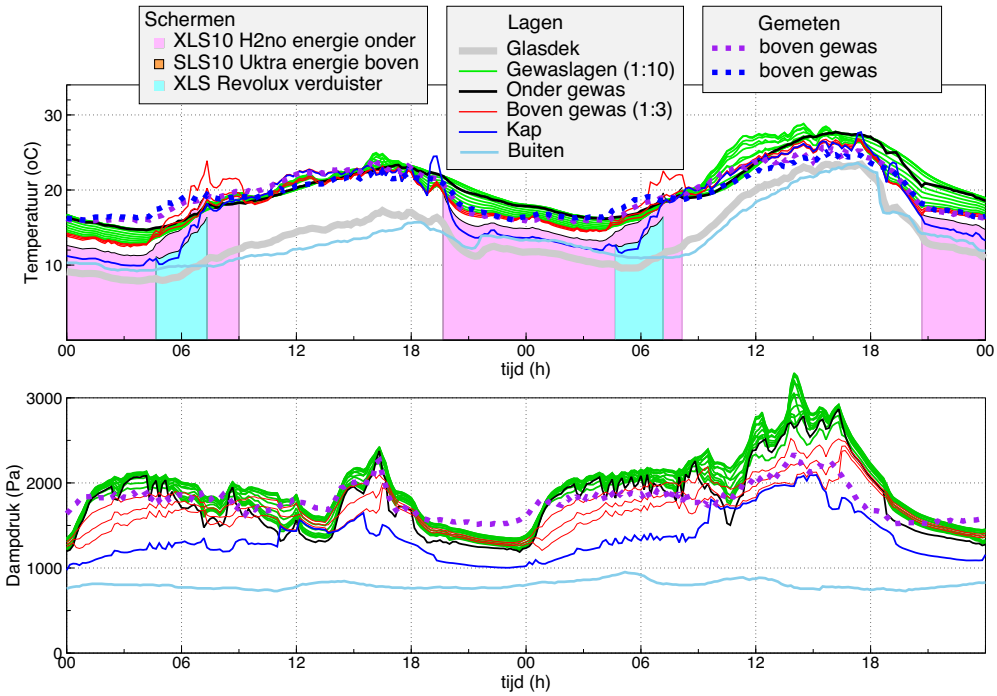
Met gemeten temperaturen van de lucht in de nok en onder het gewas kunnen modelresultaten in meer detail getoetst worden waardoor ook scenarioberekeningen ("wat gebeurd er als ...") nauwkeuriger kunnen worden gedaan. Het is daarom naar onze mening belangrijk om ook in de belichte teelt extra temperatuurmetingen uit te voeren.

Vocht

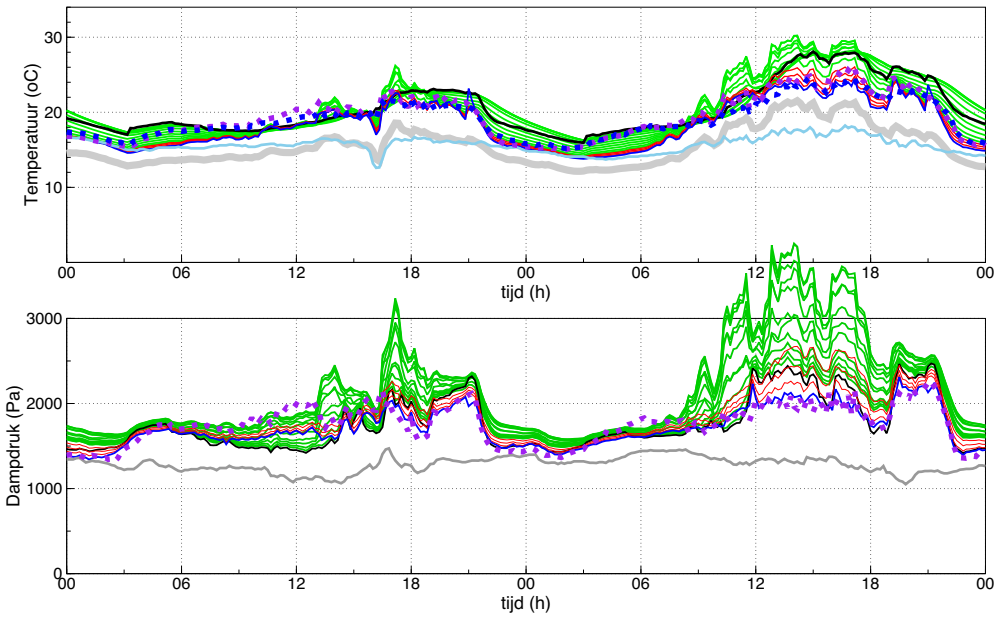
In de winter is de verdamping relatief laag en dan is de dampdruk op verschillende hoogtes bijna gelijk (Figuur 3.4). Omdat de temperatuur op verschillende hoogtes in het gewas vrijwel hetzelfde is, liggen ook het dampdruk deficit en de RV op de verschillende hoogtes dichtbij elkaar.

In de zomer (Figuur 3.6) is overdag door de hoge instraling de verdamping veel groter. Dat leidt tot aanzienlijke verschillen in dampdruk en bladtemperatuur. In Figuur 3.7 is te zien hoe dat uitwerkt op de RV. Op zowel 22 als 23 juni stijgt de gesimuleerde RV in de nanacht tot kritische waarden door een langzame daling van de temperatuur. De gemeten RV rond 6:00 's morgens is minder hoog, vermoedelijk doordat de temperaturen in de simulatie iets te laag zijn.

© 2012 EcoCurves en Plant-Dynamics

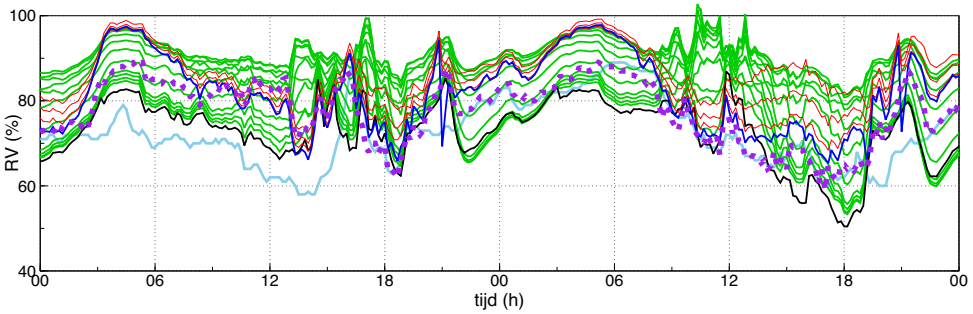


Figuur 3.5. Kasklimaat gesimuleerd voor 1 en 2 april 2011. De berekeningen zijn gebaseerd op de gemeten schermstanden, verwarming en ventilatie. In de korte perioden zonder scherm lopen de temperaturen boven het gewas en in de kap (”boven de schermen”) snel naar elkaar toe.



Figuur 3.6. Kasklimaat gesimuleerd voor 22 en 23 juni 2011. De berekeningen zijn gebaseerd op de gemeten schermstanden, verwarming en ventilatie. De zwarte lijnen representeren de temperatuur en dampdruk van de onderste luchtlaag in de kas en de rode lijnen die van de luchtlaag boven het gewas. De groene lijnen representeren de waarden voor de gewaslagen daartussen. Er is veel meer licht dan in de wintermaanden en het dampdruk deficit in het gewas is hoog.

© 2012 EcoCurves en Plant-Dynamics



Figuur 3.7. Gesimuleerde relatieve vochtgehalten op verschillende plaatsen in de kas voor 22 en 23 juni 2011. De kleine schommelingen in het nachtelijk dampdrukdeficit in Figuur 3.6 leiden tot veel grotere schommelingen in de RV. De zwarte en rode lijnen representeren de RV van de lucht *onder*, respectievelijk *boven* het gewas. De groene lijnen representeren de waarden voor de gewaslagen daartussen. 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

Interessant is dat, bij zonsopgang in de zomer (als voorbeeld hier 23 juni), de verdamping snel toeneemt maar de temperatuur slechts langzaam. Daardoor ontstaat *in het gewas* een hoog vochtgehalte gedurende de ochtenduren. *Boven* het gewas is dat niet het geval, noch voor de gemeten waarden, noch voor de gesimuleerde waarden. In hoeverre dit ook in werkelijkheid optreedt kan alleen met extra RV metingen worden vastgesteld. Ook hier geldt dus dat we met behulp van extra metingen de simulatie zouden kunnen verbeteren, waardoor vervolgens ideeën voor een beter of zuiniger vocht management nauwkeuriger kunnen worden doorgerekend.

3.3 Energiegebruik

In de gesimuleerde proef bedroeg het warmtegebruik van de buizen (ondernet en groeibuis) in totaal 506 MJ. De feitelijk in de proef gemeten hoeveelheid is 505 MJ. Die nauwkeurigheid komt tot stand doordat de warmteafgifte van warmte buizen goed bekend is. Als de warmtebalans van de kas goed wordt berekend en de gesimuleerde luchttemperatuur is correct (zie hoofdstuk 3.2), dan is "vanzelf" het gesimuleerde energieverbruik ook in orde.

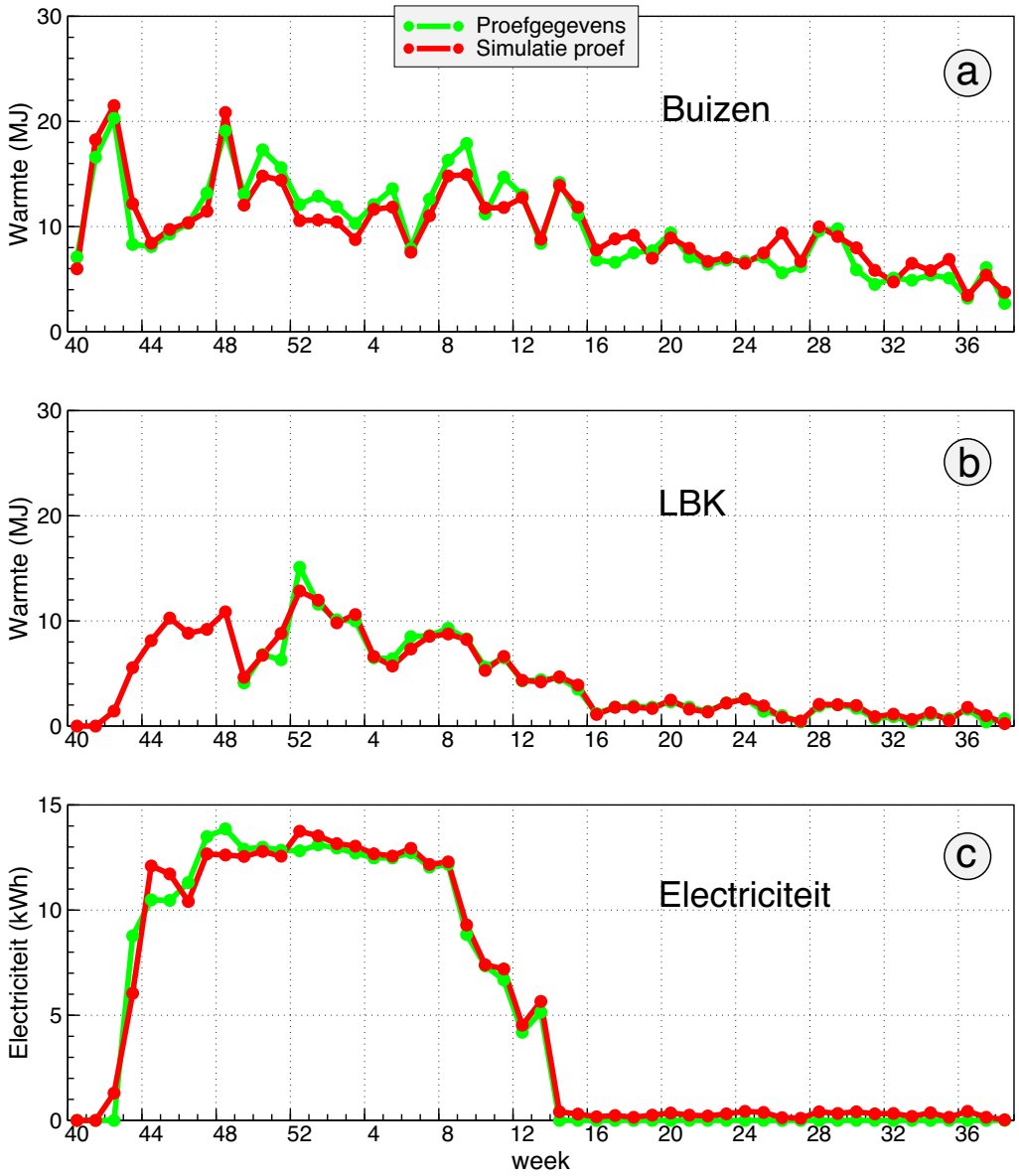
In Figuur 3.8a wordt het wekelijks energieverbruik van de buizen in de simulatie vergeleken met het gemeten verbruik. Behalve het totale verbruik, wordt ook de wijze waarop het verbruik reageert op verschillen in weer en/of veranderingen in de aansturing goed gereproduceerd in de simulatie[1].

Het warmteverbruik van de LBK hangt af van het debiet en de temperatuur van de in- en uitgaande lucht. Omdat de gemeten ventilatorstand niet evenredig is met het debiet is het *totaal* gemeten energiegebruik van de LBK gebruikt voor een calibratie. Figuur 3.8b geeft vervolgens het wekelijks energiegebruik in de simulatie en dat in de proef (waarvan de eerste weken ontbreken). Ook hier zien we een correct gesimuleerd verloop.

In Figuur 3.8c wordt tenslotte het elektriciteitsverbruik weergegeven dat gedomineerd wordt door de lampen. Omdat de lampen in de simulatie aan- en uitgeschakeld worden volgens de klimaatregistratiedata, klopt het gesimuleerde verbruik natuurlijk met het gemeten verbruik.

[1] De simulatie van de proef wordt gedaan met de *gemeten* buistemperaturen, op wat voor wijze dan ook tot stand gekomen.

© 2012 EcoCurves en Plant-Dynamics



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

3.4 Conclusie

Het model is goed gevalideerd. Simulatieresultaten van teelt, kasklimaat en energiegebruik komen overeen met de experimentele resultaten. Dat betreft niet alleen de totale oogst en het totale energiegebruik maar ook het seizoensverloop, zowel voor de teelt (Figuur 3.1) als voor het energiegebruik (Figuur 3.8).

Het hier bereikte resultaat is een goede basis voor de scenario analyses. Een aandachtspunt voor verdere verbeteringen zijn metingen van de temperatuur en RV op verschillende plaatsen in de kas en metingen aan de gebruikte materialen. De

© 2012 EcoCurves en Plant-Dynamics

fysische eigenschappen van schermen, met name de porositeit voor lucht en waterdamp, zijn niet goed bekend[2].

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 aansturing met een (virtuele) klimaatcomputer (Figuur 2.1).

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

© 2012 EcoCurves en Plant-Dynamics

Hoofdstuk 4

Virtuele klimaatcomputer

Zoals in hoofdstuk 2.3 werd aangegeven kunnen realistische scenario analyses niet simpelweg worden uitgevoerd door te rekenen met enkelvoudige veranderingen van schermstanden, buistemperaturen e.d. Het eerder of later sluiten van een scherm, bijvoorbeeld leidt tot een ander warmteverlies, waardoor in de realiteit ook een andere buistemperatuur nodig is om om de gewenste temperatuur te bereiken.

Dat betekent dat een scenario met een andere schermregeling niet kan worden doorgerekend met de experimenteel gemeten buistemperatuur. Er dient een aangepaste buistemperatuur berekend te worden, gebaseerd op een actieve regeling van de buistemperatuur in combinatie met de nieuw gesimuleerde schermstanden. Een analyse van het effect van meer of minder schermen, of van een willekeurige andere maatregel, kan dus niet met de experimenteel gemeten instellingen worden uitgevoerd, maar alleen met actieve regelingen die reageren op de aangebrachte wijzigingen.

Allereerst wordt daarom de geregistreerde aansturing die gebruikt is in Hoofdstuk 3 vervangen door een (virtuele) klimaatcomputer die het kasklimaat regelt (zie Figuur 2.1 op bladzijde 16). Het kasklimaat wordt dan gestuurd door enkele PI-regelaars voor de verwarming, ventilatie, en het openen en sluiten van de schermen.

Een geregeld kasklimaat vergt setpoints voor de temperatuur en de vochtigheid en verder een schema voor het openen en sluiten van de schermen en het aan- en afschakelen van de lampen. Als deze regelingen ingesteld worden zoals in de proef, dat moeten ook de proefresultaten weer (ongeveer) gereproduceerd worden. Pas dan zijn we in de gelegenheid uit te rekenen "wat zou er gebeurd zijn als ...". In dit hoofdstuk gaat het om de voorbereiding daarop, het narekenen van de proef met een geregeld kasklimaat.

Omdat de setpoints tijdens de proef steeds werden aangepast, was het niet eenvoudig om met een virtuele klimaatcomputer het verloop van de proef exact te reproduceren. Er is een compromis gevonden met een zeer acceptabel resultaat door het jaar onder te verdelen in zes perioden, waarin verschillende setpoints gelden. Net als in werkelijkheid zijn verschillende setpoints nodig om door het jaar heen een goede plantbalans te handhaven.

Tabel 4.1. Setpoints van de (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.

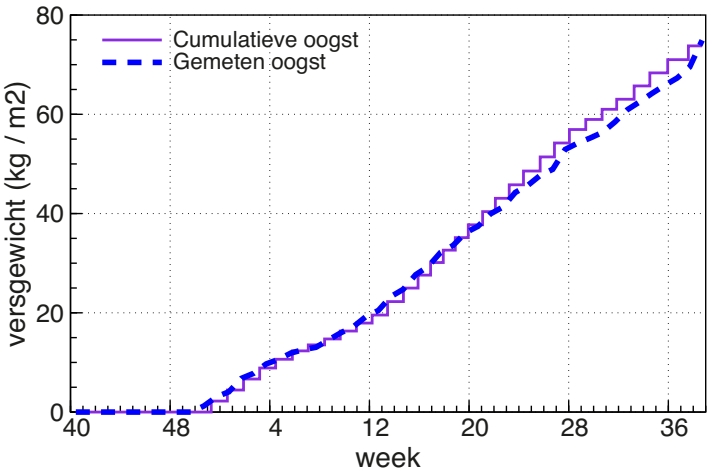
vanaf	temperatuur hoog (°C)				temperatuur laag (°C)			
week	dag	voornacht	nacht	nanacht	dag	voornacht	nacht	nanacht
40	23.0	20.0	21.0	22.0	20.0	17.0	18.0	19.0
44	23.0	20.0	21.0	22.0	19.0	16.0	17.0	18.0
4	22.0	20.0	21.0	21.0	18.0	16.0	17.0	17.0
8	22.0	20.0	21.0	21.0	18.0	16.0	17.0	17.0
14	24.0	22.0	21.0	23.0	17.0	15.0	15.0	16.0
35	21.0	19.0	19.0	20.0	16.0	14.0	14.0	15.0

4.1 Setpoints

In Tabel 4.1 staan de temperatuur setpoints voor de virtuele klimaatcomputer waarmee de proefresultaten opnieuw zijn gereproduceerd. Vanaf week 14 zijn de nachttemperaturen verder verlaagd, eerst om te compenseren voor de hoge temperaturen overdag en vervolgens om in de herfst de bladafsplitsing wat af te remmen. Voor het VD setpoint zijn etmaal waarden gebruikt, voor de 6 perioden in Tabel 4.1 zijn dat 2.8, 2.8, 2.5, 1.8, 1.3 en $1.2\,\mathrm{g\,m^{-3}}$.

In het belichtingsseizoen is het verduisteringsdoek overdag open. In de voornacht, nacht en nanacht sluit het als het setpoint voor verwarming tenminste 1°C boven de buitentemperatuur ligt. Het XLS10 H2NO doek sluit als aan twee voorwaarden voldaan is: De instraling is minder dan $70\,\mathrm{Wm^{-2}}$ en het temperatuurverschil ΔT tussen het setpoint voor verwarmen en de buitentemperatuur is meer dan 5°C. Het scherm opent vervolgens als de instraling boven de $100\,\mathrm{Wm^{-2}}$ komt of als ΔT onder de 3°C komt.

Het SLS10 Ultra doek wordt weinig gebruikt. Het kan alleen overdag gebruikt worden als het verduisteringsdoek open is omdat het op dezelfde tralie is opgehangen



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

© 2012 EcoCurves en Plant-Dynamics

als het verduisteringsdoek. De criteria voor sluiting zijn vergelijkbaar met die voor het XLS10 H2NO doek maar de ΔT waarden zijn 15°C en 10°C.

Vanaf week 14 is het verduisteringsdoek ook 's nachts niet meer gebruikt, in overeenstemming met de registraties uit de proef. Het XLS10 H2NO wordt behalve overdag ook in de nanacht gebruikt en verder zijn de criteria voor sluiten en openen gelijk gehouden.

Met deze regeling konden de daadwerkelijk gerealiseerde schermstanden in het experiment worden gereconstrueerd. Dit is daarmee tevens de uitgangssituatie voor de in Hoofdstuk 5 en Hoofdstuk 6 beschreven scenario's voor belichting en schermen en de daaraan gekoppelde effecten op energiegebruik en opbrengst.

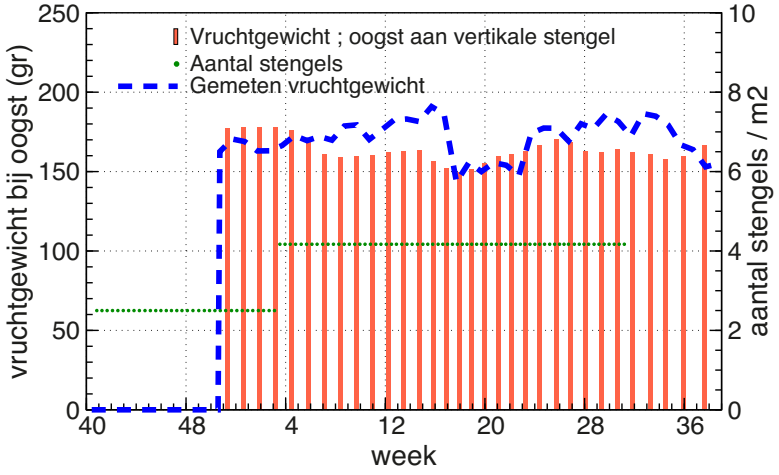
4.2 Teelt en energiegebruik

Alvorens de scenario analyses voor energiegebruik te kunnen uitvoeren dient eerst de proef op de som genomen te worden door de simulaties met de virtuele regeling te vergelijken met de daadwerkelijk gerealiseerde experimentele resultaten.

In analogie met de simulatie in Hoofdstuk 3 *zonder* klimaatcomputer laat Figuur 4.1 de gesimuleerde opbrengst zien, nu berekend *met* de virtuele klimaatcomputer (vergelijk Figuur 3.1 op bladzijde 21). Op dezelfde manier als in Figuur 3.2, toont Figuur 4.2 weer de vruchtgewichten bij de afzonderlijke oogsten in het simulatiemodel, nu met virtuele klimaatcomputer.

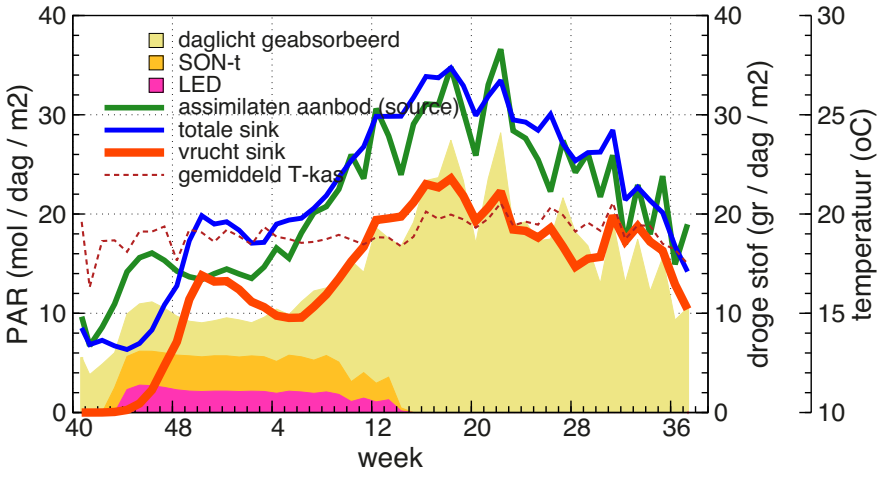
Simulatie met de setpoints uit Tabel 4.1 en de hierboven beschreven schermregeling leveren een gemiddelde bladafsplitsing op van 2.404 bladlagen per week. Dat is vrijwel identiek aan de bladafsplitsing in de gesimuleerde proef (2.408 per week.). De totale oogst bedraagt 73.8 kg (74.1 kg in de gesimuleerde proef) en het gemiddeld vruchtgewicht 163 gr (166 gr in de gesimuleerde proef).

Figuur 4.3 laat voor de plantbalans *met* virtuele klimaatcomputer hetzelfde jaarverloop zien als Figuur 3.3 (op bladzijde 22) *zonder* klimaatcomputer. Het iets lagere vruchtgewicht suggereert een gemiddelde plantbalans die ook iets ongunstiger is en dat is inderdaad het geval (0.962 vs. 0.970 voor de gemiddelde source sink verhouding).



Figuur 4.2. Vruchtgewicht bij oogst gesimuleerd voor geregeld kasklimaat.

© 2012 EcoCurves en Plant-Dynamics



Figuur 4.3. De dagelijks geabsorbeerde hoeveelheid PAR licht, de productie van en vraag naar assimilaten, berekend voor geregeld kasklimaat. De gemiddelde plantbalans in de simulatie (gemiddelde verhouding tussen productie en vraag) bedraagt 0.962.

Figuur 4.4 laat het wekelijks warmtegebruik zien samen met de eerder in Figuur 3.8 getoonde curves. Het totale gesimuleerde warmtegebruik van de buizen bedraagt 509 MJ en dat van de LBK bedraagt 227 MJ, in overeenstemming met dat in de simulatie van de proef (506 MJ respectievelijk 227 MJ).

Omdat de lampen op bekende kloktijden worden geschakeld is de simulatie van het elektriciteitsverbruik opnieuw geen probleem. Het gesimuleerde verbruik bedroeg 272 kWh en het verbruik met gebruik van de schakeltijden uit de proef (gemeten kasklimaat, Hoofdstuk 3) bedraagt 262 kWh[1]. Het verschil wordt veroorzaakt door kleine afwijkingen in schakeltijden of door een andere regel voor "lichten uit"[2].

4.3 Discussie

De simulatie met de virtuele klimaatcomputer verschilt op details van de simulatie met geregistreerde klimaatsturing in Hoofdstuk 3. 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 met die in de gesimuleerde proef.

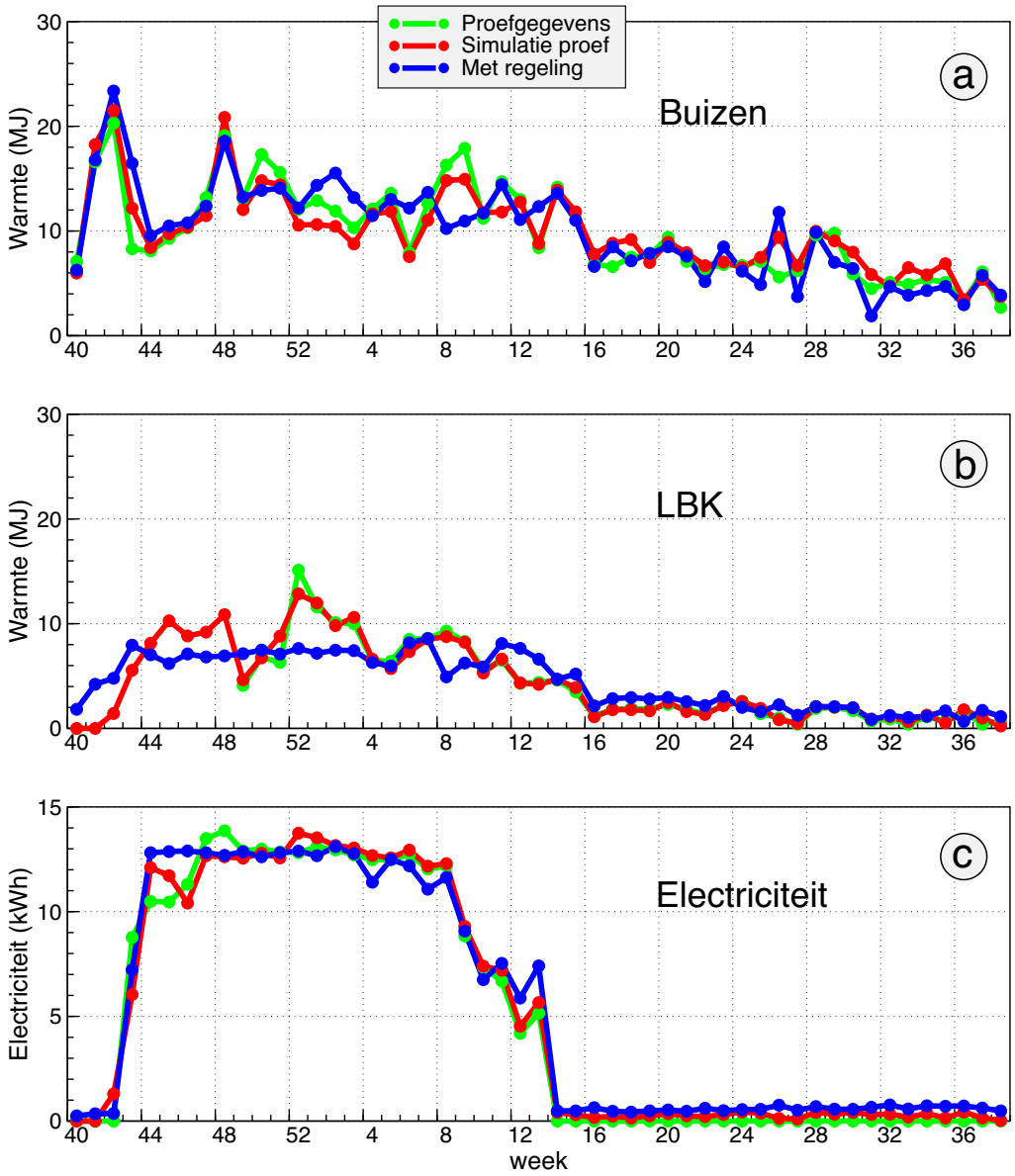
Ondanks de kleine verschillen worden opbrengst en energiegebruik met de setpoints uit hoofdstuk 4.1 correct beschreven. Het gebruik van verschillende setpoints voor de temperatuur is realistisch. De bladafsplitsing wordt erdoor beïnvloed op zodanige wijze dat de plantbalans over een groot deel van de 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.

De virtuele klimaatcomputer in combinatie met het kasklimaatmodel en het teelt model maken het nu mogelijk om consequenties van allerlei scenario's door te re-

[1] Het overgrote deel van het electriciteitsverbruik betreft de SON-t en LED lampen, 246 kWh met virtuele klimaatcomputer en 245 kWh in de gesimuleerde proef.

[2] De virtuele klimaatcomputer schakelt de lampen uit bij meer dan 300 Wm^{-2} daglicht en weer aan bij 150 Wm^{-2}. Dat kan iets verschillen van de in werkelijkheid gebruikte regel(s).

© 2012 EcoCurves en Plant-Dynamics



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.

kenen. De simulatie wordt immers alleen nog met weerscondities aangestuurd. Minder schermen, bijvoorbeeld, zal in de simulatie leiden tot meer licht, meer verdamping en meer groei. De (virtuele) klimaatcomputer zorgt er dan voor dat de ingestelde setpoints worden gehandhaafd. De grotere warmteverliezen leiden dan tot meer verwarming en daardoor tot een hoger energiegebruik.

4.3.1 Gewasmanagement

Wanneer een doorgerekend scenario een erg groot effect heeft op het gewas zou er in principe ook een aangepast management gevoerd moeten worden. In de scenario berekeningen van de volgende hoofdstukken, wordt het gewasmagement echter gelijk gehouden aan dat in de proef.

© 2012 EcoCurves en Plant-Dynamics

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 bladafsplitsing mogelijk, waardoor het optimale setpoint voor de kastemperatuur 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.

© 2012 EcoCurves en Plant-Dynamics

Hoofdstuk 5

Scenario Belichtingsstrategie

In dit hoofdstuk gaan we in op de effectiviteit van de assimilatiebelichting, het nut van een daglicht drempel waarboven de lampen uitgaan, en het verschil in efficiëntie tussen SON-t en LED lampen.

We gaan daarbij uit van een referentie-simulatie met een klimaatregeling zoals beschreven in Hoofdstuk 4 en we bekijken wat er verandert als we wijzigingen aanbrengen in de regeling van de belichtingsduur, belichtingsintensiteit en/of belichtingsarmaturen.

5.1 Is er een optimale assimilatiebelichting?

Voor het maken van keuzes met betrekking tot de belichting is het uiteraard van groot belang om te weten hoeveel de opbrengst verandert en wat de consequenties zijn voor de warmtebalans. In het bijzonder zijn we geïnteresseerd in het verloop van de verwachte afnemende meeropbrengst, dat wil zeggen een vermindering van de effectiviteit van extra licht.

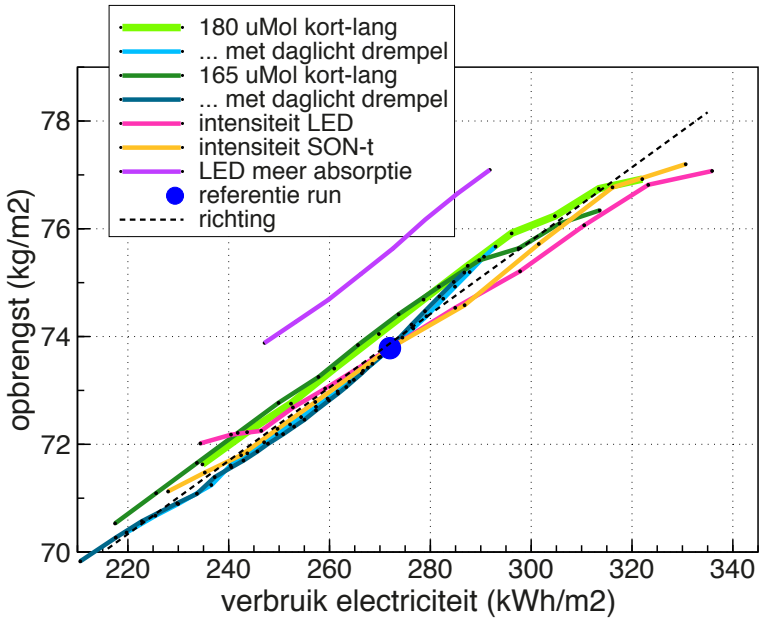
In de proef is 16 uur belicht met 100 μMol SON-t en 80 μMol LED. De lampen waren in principe tot 16:00 aan, maar gingen uit boven een daglicht niveau van 300 Wm^{-2}. *Het grote blauwe punt* in Figuur 5.1 geeft deze *referentiebelichting* weer als een elektriciteitsverbruik op de x-as van 273 kWh m^{-2} en een gesimuleerde opbrengst op de y-as van 73.8 kg.

De lijnen in Figuur 5.1 zijn het resultaat van scenario analyses. Elke lijn is opgebouwd uit tenminste tien berekeningen, telkens voor een heel jaar. Op verschillende manieren is de hoeveelheid assimilatielicht stapsgewijs verkleind en vergroot ten opzichte van de referentiebelichting. Voor iedere manier is de opbrengst op de y-as uitgezet tegen het elektriciteitsverbruik op de x-as[1].

De verschillende lijnen in Figuur 5.1 hebben dus betrekking op verschillende manieren waarop de hoeveelheid gegeven licht gevarieerd is. De legenda van de figuur bevat daarvan slechts een korte aanduiding. Een volledigere beschrijving is:

180 μMol kort-lang De daglicht drempel is uitgeschakeld en de tijd waarover de lampen branden is gevarieerd door de uitschakeltijd in de middag te variëren. De uitschakeltijd varieert tussen 12:30 en 17:30 met stappen van een half uur.

[1] De berekeningen zijn gemaakt met het werkelijke elektriciteitsverbruik van de SON-t en LED lampen. Een hypothetische toekomstige verhoging van de elektrische efficiëntie van de LED lampen is hier dus *niet* verdisconteerd.



Figuur 5.1. Opbrengst afhankelijk van het elektriciteitsverbruik voor verschillende manieren om de belichting te vergroten of te verkleinen. Zie de tekst voor een uitvoerige toelichting en de bespreking deze figuur in hoofdstuk 5.1.1.

180 μMol met daglicht drempel Hetzelfde vermogen (180 μMol) met de uitschakeltijd uit de proef (16:00 uur). De verschillende lichtdoseringen zijn nu gerealiseerd door de daglichtdrempel waarop het licht wordt uitgeschakeld stapsgewijs te variëren. De punten links van het referentiepunt zijn gerealiseerd door de lampen vaak uit te schakelen, dus bij een laag daglichtniveau. De punten rechts van het referentiepunt zijn gerealiseerd door de lampen pas uit te schakelen bij een hoog daglichtniveau. Het uitschakelniveau varieert tussen 110 en 600 Wm^{-2}. In de referentie wordt uitgeschakeld bij 300 Wm^{-2} daglicht. Het daglichtniveau waarbij het licht weer wordt ingeschakeld (zolang de definitieve uitschakeltijd van 16:00 nog niet bereikt is) is steeds 100 Wm^{-2} *lager* dan het uitschakelniveau.

165 μMol kort-lang Het lampvermogen is gereduceerd, maar de verhouding tussen SON-t en LED is gelijk gehouden. De punten op de lijn zijn gerealiseerd door de uitschakeltijd te variëren tussen 12:30 en 18:30 met stappen van een half uur. De keuze voor een intensiteit van 165 μMol is gemaakt omdat bij die intensiteit, *zonder daglicht drempel* en met een uitschakeltijd van 16:00 uur, precies het elektriciteitsverbruik uit de referentierun (*met daglichtdrempel*) wordt gerealiseerd. Met andere woorden, het is een manier om de teelt bij een vaste (lagere) lichtintensiteit te vergelijken met een gedrempeld scenario.

165 μMol met daglicht drempel Hetzelfde vermogen als in de vorige situatie (165 μMol) met de uitschakeltijd uit de proef (16:00 uur). De verschillende lichtdoseringen zijn gerealiseerd door de daglichtdrempel waarop het licht wordt uitgeschakeld stapsgewijs weer te variëren tussen 110 en 600 Wm^{-2}.

Intensiteit LED De referentie situatie (dus met belichting tot 16:00 en daglicht drempel van 300 Wm^{-2}), maar met verschillende vermogens aan LED belichting. De LED belichting is gevarieerd tussen 50 en 130 $\mu\mathrm{Mol\,m}^{-2}$.

© 2012 EcoCurves en Plant-Dynamics

Intensiteit SON-t De referentie situatie (dus met belichting tot 16:00 en daglicht drempel van 300 Wm^{-2}) maar met verschillende vermogens aan SON-t belichting. De SON-t belichting is gevarieerd tussen 70 en 140 $\mu\mathrm{Mol\,m}^{-2}$.

LED meer absorptie Nogmaals de referentie situatie met verschillende vermogens aan LED belichting, maar nu met geringere verliezen van het LED licht naar boven en beneden resulterend in een 12% hogere gewasabsorptie. De LED belichting is gevarieerd tussen 60 en 95 $\mu\mathrm{Mol\,m}^{-2}$.

Afgezien van de laatste lijn voor een verhoogde absorptie van het LED licht, liggen alle lijnen in Figuur 5.1 opvallend dicht bij elkaar in de buurt. De verschillen komen tot stand door andere tijdstippen van belichten of door andere intensiteiten, maar de relatie tussen het electriciteitsverbruik en de opbrengst is opvallend robuust. Hieronder wordt daar verder op ingegaan.

5.1.1 Bespreking van het resultaat in Figuur 5.1

Uit de gemiddelde hellingshoek van de lijnen in Figuur 5.1 kan de productie per kilowattuur worden berekend. Die is 68 gram per kWh. Deze waarde geldt voor een electriciteitsverbruik tussen 220 en 310 $\mathrm{kWh\,m}^{-2}$ en niet buiten dit traject. De reden daarvan is dat voor zowel een erg lage als een erg hoge belichting kwalitatieve veranderingen optreden.

Bij een laag electriciteitsverbruik (en evenredig minder assimilatiebelichting) is er te weinig licht voor een goede vegetatieve ontwikkeling. Het licht dat er dan nog is wordt dan niet effectief gebruikt en de winteropbrengst stort in. Daarom is er beneden een bepaalde assimilatiebelichting in de winter geen commerciële vruchtproductie mogelijk. Deze belichtingsdrempel wordt nader beschouwd in het kader op bladzijde 38.

Bij een heel hoge assimilatiebelichting zal uiteindelijk lichtverzadiging optreden. De afvlakking in Figuur 5.1 van de lijnen voor LED en SON-t boven 320 $\mathrm{kWh\,m}^{-2}$ is overigens nog niet het gevolg van lichtverzadiging, maar komt doordat snelheid van trosvorming de productie begrenst. De gewastemperatuur zou bij dat electriciteitsverbruik dus wat omhoog moeten om de trosvorming te stimuleren.

Tussen de belichtingsdrempel voor productie aan de éne kant en lichtverzadiging aan de andere kant maakt het weinig uit op welke manier een bepaalde dosis assimilatielicht gegeven wordt. De verschillen tussen de lijnen in Figuur 5.1 onderling zijn grotendeels het gevolg van allerlei subtiliteiten met betrekking tot de temperatuur van het gewas en de daaruit volgende consequenties voor de source-sink balans.

Het scenario "LED meer absorptie"

Er is één duidelijke uitzondering en die betreft het scenario "LED meer absorptie" met een verhoogde gewasabsorptie van het LED tussenlicht. Dat scheelt bijna twee kilogram productie (in de winter). Het LED licht *kan* dus inderdaad effectiever zijn dan SON-t licht, maar alleen als de verliezen kleiner zijn dan die we hebben gebruikt bij het simuleren van de proef[2].

De in de referentierun berekende absorptie van LED licht bedraagt slechts 51%. Deze waarde is gebaseerd op exploratieve metingen aan de lichtverdeling. Een

[2]De berekende gemiddelde gewasabsorptie in de referentierun bedraagt 66% voor SON-t licht en 51% voor LED licht. In het scenario "LED meer absorptie" is de gewasabsorptie van LED tussenlicht verhoogd tot 63%.

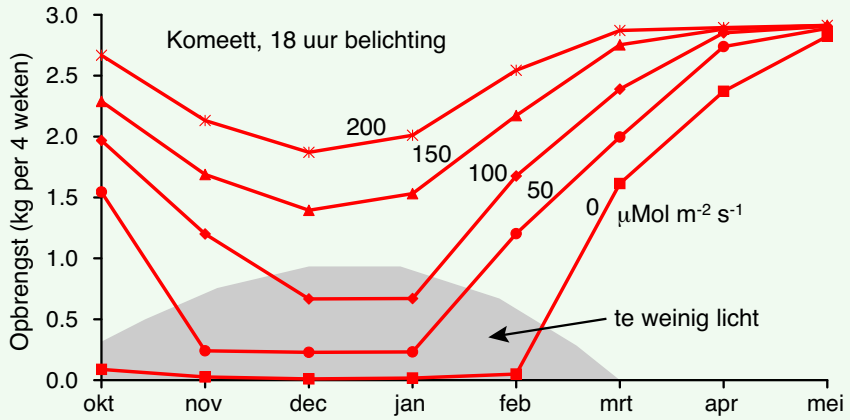
© 2012 EcoCurves en Plant-Dynamics

Valkuil bij efficiëntie bepaling: belichtingsdrempel voor productie

Er bestaat een drempel voor de maandelijkse lichtsom waar beneden geen tomatenproductie mogelijk is vanwege de vegetatieve groei en onderhoudsprocessen, die dan evenveel kosten als er aan assimilaten wordt geleverd. Met minder dan deze minimale hoeveelheid licht kunnen de vruchten zich niet goed ontwikkelen. Wanneer dit drempeleffect wordt genegeerd, worden verkeerde conclusies getrokken over de efficiëntie van extra licht.

Voorbeeld: Als met $150\,\mu\text{mol}\,\text{m}^{-2}\,\text{s}^{-1}$ assimilatiebelichting twee keer zoveel geoogst wordt als met $100\,\mu\text{mol}\,\text{m}^{-2}\,\text{s}^{-1}$, dan wil dat niet zeggen dat de fotonen in de laatste $50\,\mu\text{mol}\,\text{m}^{-2}\,\text{s}^{-1}$ tweemaal zo efficiënt zijn als de fotonen van eerste $100\,\mu\text{mol}\,\text{m}^{-2}\,\text{s}^{-1}$. Op het eerste gezicht lijkt dat het geval: met 50% extra licht een verdubbeling van de de productie. De hoge extra opbrengst komt echter alleen tot stand als de eerste $100\,\mu\text{mol}\,\text{m}^{-2}\,\text{s}^{-1}$ er ook is. Hoe hoger de drempel voor vruchtproductie des te groter de efficiëntie van extra licht lijkt te zijn.

Als het extra licht wordt gegeven in het kader van een proef, dan kan een grote opbrengstverhoging gemakkelijk verkeerd worden geïnterpreteerd. Dat leidt regelmatig tot grote verwarring in de discussie over belichtingsefficiënties van lampen en armaturen, vooral omdat er ook nog rasverschillen zijn. Vandaar het belang van een goede theoretische onderbouwing van de hoogte van de drempel waaronder geen productie plaats vindt en die rasspecifiek is (Schapendonk *et al.*, 2010).



Opbrengst voor Komeett bij een assimilatiebelichting tussen 0 en $200\,\mu\text{mol}\,\text{m}^{-2}\,\text{s}^{-1}$. De dagelijkse belichtingsduur was 18 uur. Figuur uit Schapendonk *et al.* (2010).

In bovenstaande figuur is de 4-wekelijkse productie van een volgroeid Komeett gewas berekend met aanvullende assimilatiebelichting, stapsgewijs oplopend tot $200\,\mu\text{mol}\,\text{m}^{-2}\,\text{s}^{-1}$ SON-t aan de top van het gewas. In de maanden november tot en met februari is vruchtgroei zonder assimilatiebelichting niet mogelijk. Voor kleinere trostomaten geldt een kortere periode.

absorptie van 51% lijkt klein en is inderdaad kleiner dan de SON-t licht absorptie van 66%.

Hierbij moet bedacht worden dat tussenbelichting (in dit geval LED belichting) veel gevoeliger is voor de gewasstructuur dan bovenbelichting (in dit geval SON-t licht). Licht uit een horizontaal hangend LED armatuur (bijvoorbeeld op halve hoogte in het gewas) "ziet" boven of beneden slechts de helft van het gewas. Een

© 2012 EcoCurves en Plant-Dynamics

gewasabsorptie die vergelijkbaar is met die van SON-t licht kan daarom alleen tot stand komen als het LED licht grotendeels in horizontale richting wordt uitgestraald en tegelijkertijd een diffuus karakter heeft. Een hoge LAI, boven en onder de LED armaturen, is in dit verband van belang omdat er minder licht kan ontsnappen.In de praktijk wordt de ontwikkeling van de LAI zelden gemeten en de gehanteerde schattingen zijn vaak te hoog waardoor te snel wordt overgegaan op bladpluk.

De hier gedemonstreerde gevoeligheid voor de gewasabsorptie van het LED licht betekent dat het van belang is hier goede metingen aan te doen. Een reeks op de juiste wijze uitgevoerde lichtmetingen kan uitsluitsel geven.

Keuze van het lichtniveau

Omdat de meeropbrengsten bij extra licht in de verschillende scenario's ongeveer gelijk zijn is dit criterium irrelevant voor de te maken keuzes (even afgezien van het scenario "LED meer absorptie"). Andere factoren kunnen de keuze bepalen, zolang de hoeveelheid licht maar boven de productiedrempel ligt en niet zo hoog is dat lichtverzadiging optreedt.

Wij kunnen daarbij denken aan "slijtage"bij heel veel licht waardoor het gewas in het voorjaar snel aftakelt. Verder kunnen ziektepreventie of lichtuitstoot een rol spelen waardoor er een voorkeur kan zijn voor een bepaalde hoeveelheid licht. Maar of er nu 240 kWh of 320 kWh m^{-2} in de lampen moet worden "verstookt" wordt in elk geval niet bepaald door een afnemende efficiëntie bij extra licht.

In de rest van dit hoofdstuk gaan we ervan uit dat een bepaalde hoeveelheid assimilatielicht wordt toegepast. Het electriciteitsverbruik licht daarmee vast (gegeven een bepaalde elektrische efficiëntie van de lampen). Het gebruik van warmte voor ontvochtiging ligt echter niet vast. De vraag is dus hoe dat licht moet worden toegediend. Dat wil zeggen, op welke wijze kan het warmteverbruik zo klein mogelijk worden gehouden en kan het best gebruik gemaakt worden van de lampwarmte.

5.2 Daglicht drempel voor uitschakelen belichting

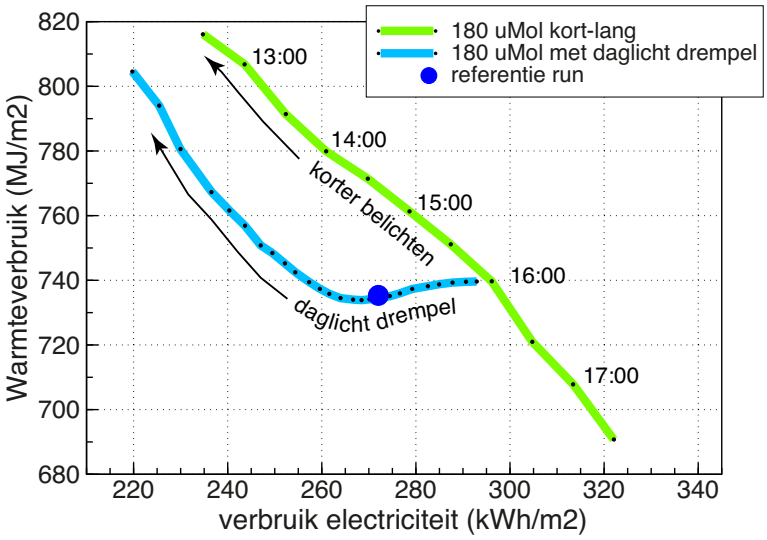
De totale hoeveelheid assimilatielicht is het resultaat van (1) het lampvermogen, in de proef 180 μMol, (2) de schakeltijd, in de proef van 0:00 tot 16:00 uur en (3) de hoogte van een daglicht drempel (in de proef lampen uit bij meer dan 300 Wm^{-2} daglicht en weer aan bij 150 Wm^{-2}).

Als eenmaal een totale hoeveelheid licht is gekozen, dan hangen de andere keuzes natuurlijk met elkaar samen. Je kunt bijvoorbeeld een kleiner lampvermogen kiezen zonder daglicht drempel, of een groter lampvermogen maar dan wel met daglicht drempel. De vraag die we hier stellen is op welke manier optimaal gebruik kan worden gemaakt van de assimilatiebelichting om het *warmteverbruik* zo laag mogelijk te krijgen?

Voor het beantwoorden van die vraag hebben we berekeningen gedaan met twee lampvermogens, een reeks van verschillende uitschakeltijden en een reeks verschillende daglicht drempels.

Figuur 5.2 laat het warmteverbruik van buis en LBK zien bij verschillende belichtingssenario's met 180 μMol. Horizontaal staat weer het daarmee samenhangende elektriciteitsverbruik. Aan dat verbruik is een opbrengst gerelateerd zoals eerder beredeneerd (zie Figuur 5.1 en hoofdstuk 5.1.1). Op de Y-as staat het warmtever-

© 2012 EcoCurves en Plant-Dynamics



Figuur 5.2. Warmteverbruik als functie van het elektriciteitsverbruik bij verschillende uitschakeltijden *zonder daglicht drempel* en bij uitschakelen om 16:00 *met* daglicht drempel.

bruik, dat bij het belichtingsscenario hoort. Elk punt op de lijn is een jaarrond berekening.

De groene lijn in Figuur 5.2 is tot stand gekomen door het tijdstip waarop de belichting wordt uitgeschakeld, te variëren *zonder* gebruik van een daglicht drempel. Het warmteverbruik neemt af naarmate het licht langer aanblijft, vanwege de warmte die door de lampen wordt afgegeven.

De blauwe lijn is berekend voor een alternatief scenario waarbij het licht op een vaste tijd (16:00 u) wordt uitgeschakeld in combinatie met verschillende niveau's voor drempeling, op basis van de daglichtintensiteit. Waar de twee lijnen bij elkaar komen is de daglicht drempel zo hoog dat de lampen eigenlijk nooit meer uitgaan (tenminste niet op basis van de drempeling) en krijgen we het warmte- en elektriciteitsgebruik voor een vaste uitschakeltijd van 16:00 terug (ongeveer 740 MJ en 295 kWh per m^2).

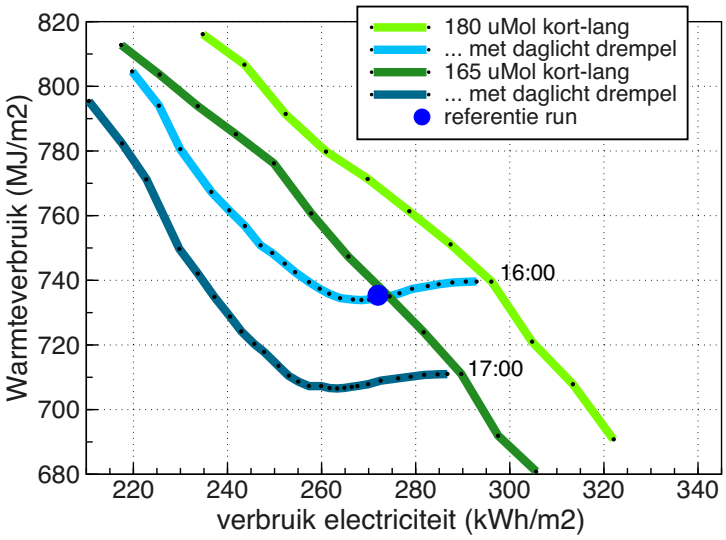
We zien in de Figuur 5.2 dat het hanteren van een daglichtdrempel *warmte* bespaart ten opzichte van een regiem met kortere belichtingsduur, *bij hetzelfde elektriciteitsgebruik*. De reden daarvan is dat er, bij gebruik van een daglicht drempel, op die momenten wordt belicht waarop ook de warmte van de lampen goed wordt gebruikt. Dat wil zeggen juist *niet* wanneer er via daglicht al genoeg warmte de kas binnenkomt.

Kijken we naar de proef (het blauwe punt Figuur 5.2 voor de referentierun), dan zien we dat de gebruikte daglichtdrempel goed gekozen is. Het warmteverbruik is ongeveer het laagste dat mogelijk is met een lampvermogen van 180 μMol s^{-1} en een uitschakeltijd van 16:00 uur.

We zien verder dat met behulp van een daglichtdrempel het elektriciteitsverbruik tussen 290 en 260 kWh m^{-2} gevariëerd kan worden zonder dat dit voor het warmteverbruik veel uitmaakt. Pas bij een (uitschakel-)drempel van ongeveer 200 Wm^{-2} begint het warmteverbruik weer te stijgen (bij het begin van de pijl langs de blauwe lijn in Figuur 5.2).

Figuur 5.3 bevat dezelfde resultaten als Figuur 5.2 met daaraan toegevoegd berekeningen voor 165 μMol s^{-1} lamplicht. Interessant is dat de donkergroene lijn voor

© 2012 EcoCurves en Plant-Dynamics



Figuur 5.3. Warmteverbruik als functie van het elektriciteitsgebruik bij verschillende uitschakeltijden *zonder daglicht drempel* en *met* daglicht drempel. De resultaten zijn gegeven voor twee belichtingsniveau's, 165 μMol s^{-1} (daglicht drempels voor uitschakelen om 17:00) en 180 μMol s^{-1} (daglicht drempels voor uitschakelen om 16:00).

een uitschakeltijd van 16:00 heel dicht langs de referentierun komt. Dat wil zeggen, het maakt heel weinig uit of 165 μMol s^{-1} lamplicht gegeven wordt tot 16:00, of dat 180 μMol s^{-1} lamplicht gegeven wordt met een drempel van 300 Wm^{-2} daglicht (en een uitschakeltijd van 16:00). En daglichtdrempel bespaart dus géén warmte ten opzichte van een lager lampvermogen.

Ook voor 165 μMol s^{-1} lamplicht is in Figuur 5.3 het effect van een daglicht drempel weergegeven, maar nu met een eindtijd van de belichting van 17:00. We zien dat het warmtegebruik dan nog *onder* dat van de referentie komt.

Samenvattend is de procedure om het warmteverbruik zo laag mogelijk te krijgen:

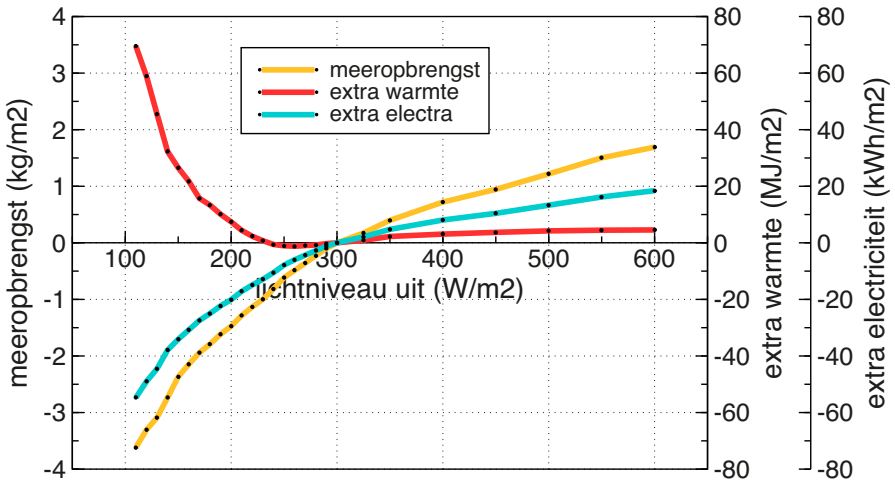
- Láát uitschakelen van de lampen is gunstiger voor het warmteverbruik dan vroeg uitschakelen. Dus liever langer belichten met een iets lager vermogen dan korter belichten met een hoog vermogen.
- Wanneer het gekozen uitschakeltijdstip leidt tot een te hoog elektriciteitsverbruik (en tot meer licht dan gewenst), dan kan een daglicht drempel gebruikt worden om het elektriciteitsverbruik terug te brengen. Dat gaat goed tot een uitschakeldrempel van ongeveer 200 Wm^{-2} daglicht. Bij een nog lagere drempeling gaat de warmtevraag van buis en LBK weer toenemen.

Tenslotte wordt in Figuur 5.4 de daglicht drempel uit Figuur 5.2 nog eens in detail bekeken met een groot aantal jaarrond berekeningen. Over een grote range aan drempelwaarden is de warmtevraag van buis en LBK vrijwel constant, ondanks de grote verschillen in belichting. Dat kan dus worden gebruikt bij het kiezen van een totale hoeveelheid lamplicht voor de winter.

5.3 SON-t en LED lampen

De resultaten uit Figuur 5.1 voor SON-t en LED lampen worden hier nog eens in detail bekeken. Figuur 5.5 laat de meeropbrengst ten opzichte van de referentie zien

© 2012 EcoCurves en Plant-Dynamics



Figuur 5.4. Effect van de daglichtdrempel voor het uitschakelen van de belichting. Voor opbrengst, warmtegebruik en elektriciteitsgebruik is de verandering in grafiek gebracht ten opzichte van de referentiewaarde, uitschakelen bij 300 Wm^{-2}.

voor een verandering van de lichtintensiteit van SON-t lampen, van LED's zoals in de huidige proef en van LED tussenbelichting met een hogere 12% lichtabsorptie door het gewas. Elk punt is een jaarrond berekening en de licht intensiteit is in stapjes van 5 $\mu\mathrm{Mol\,s}^{-1}$ veranderd. Het blauwe punt is het referentie scenario (het experiment).

We zien dat de benutting van het LED licht iets kleiner is dan die van SON-t licht. Dat komt door de lichtverliezen uit het gewas naar bodem en kasdek/scherm. Als die verliezen verkleind worden, dan levert dat een sprong in de gesimuleerde opbrengst [3] en een efficiëntie (helling paarse lijn in Figuur 5.5) die vrijwel gelijk wordt aan die van het SON-t licht.

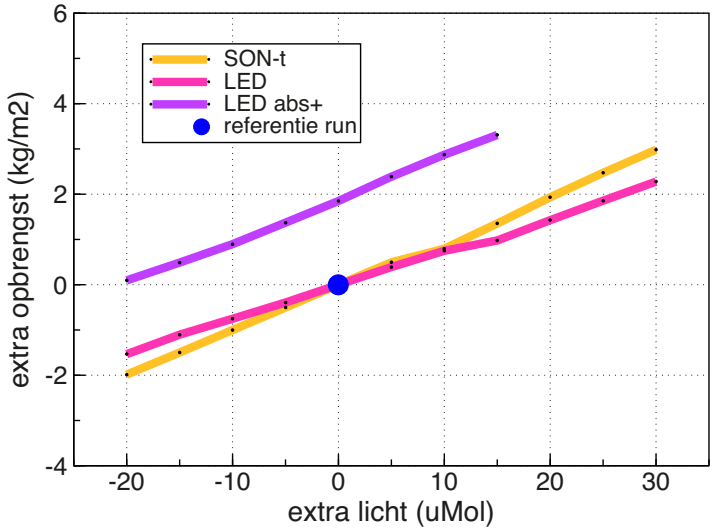
In Figuur 5.6 wordt het extra warmtegebruik in grafiek gebracht. Voor het warmtegebruik is extra SON-t licht gunstiger dan extra LED licht. Daarnaast vergt de meerproductie bij een verbeterde LED tussenbelichting ook *meer* warmte vanwege de grotere gewasverdamping. Beide observaties zijn consistent met het feit dat LED licht "koud" is, dat wil zeggen niet vergezeld gaat van een dosis NIR licht die door het gewas ook in warmte wordt omgezet.

Volgens deze berekeningen zal het toekomstige nut van LED's in de tomatenteelt grotendeels afhangen van de *elektrische efficiëntie* van de LED lampen (die in Figuur 5.5 geen rol speelt). Verder is van cruciaal belang dat meer inzicht wordt verkregen in de lichtverliezen bij gebruik van LED lampen als tussenbelichting. Het is mogelijk dat de waarde die wij gebruikt hebben voor de absorptie van het licht in de referentie run aan de lage kant is geweest, maar dat is beslist niet zeker.

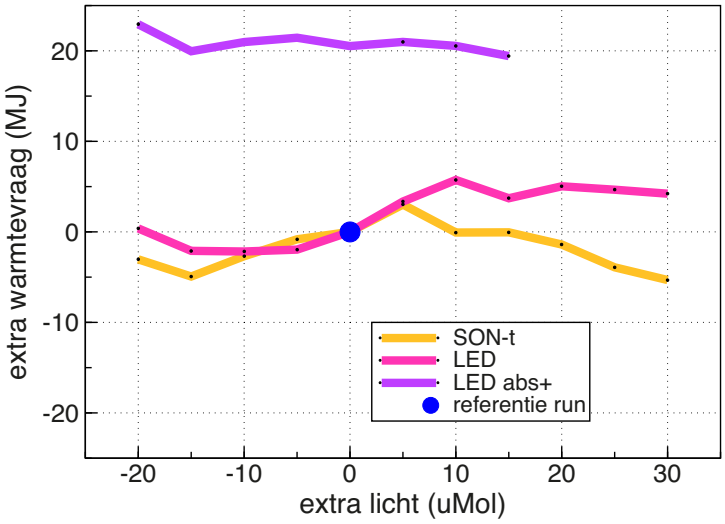
In een eerdere studie met LED tussenbelichting is een productietoename van 10% gerealiseerd (Pot *et al.*, 2010) en die toename werd ook voorspeld op basis van simulaties met de gemeten lichtinterceptie. In die proef was de plantdichtheid echter hoger en er was minder bladpluk. De sleutel tot succes van tussenbelichting is een hoge absorptie en het vermijden van locale overbelichting van de bladeren. Goede metingen aan de lichtverliezen zijn daarom van groot belang om de juiste plant-lamp configuratie te realiseren.

[3] Het lichtverlies worden verkleind voor *al* het LED licht en niet alleen voor de extra hoeveelheid.

© 2012 EcoCurves en Plant-Dynamics



Figuur 5.5. Meeropbrengst bij verandering van de toegepaste lichtsterkte van SON-t lampen, LED lampen en voor LED lampen met daarnaast een vermindering van het lichtverlies in het gewas (LED abs+). De berekeningen zijn gedaan voor een uitschakeldrempel van 300 Wm^{-2} daglicht en met een uitschakeltijd van 16:00, zoals ook voor het simuleren van de proef zijn gebruikt.



Figuur 5.6. Extra warmtebehoefte bij verandering van de toegepaste lichtsterkte van SON-t lampen, LED lampen en voor LED lampen met daarnaast een vermindering van het lichtverlies in het gewas (LED abs+).

© 2012 EcoCurves en Plant-Dynamics

Hoofdstuk 6

Scenario Schermstrategie

Er zijn in de winter grote besparingen mogelijk bij geringe productieverliezen (Rappoldt & Schapendonk, 2011). De besparingen op belichting en schermen zijn niet additief omdat het gebruik van een scherm een grote interactie heeft met belichting en de gehanteerde intensiteit .

In dit hoofdstuk worden scenario's doorgerekend voor jaarrond teelten in afhankelijkheid van het gebruik van diverse schermen. Ter oriëntatie rekenen we eerst uit wat er gebeurd zou zijn als één of meer van de aanwezige schermen niet gebruikt zou worden. Daarna gaan we in op de besturing van de schermen,waaronder het effect van drempeling op buitenlicht en drempeling op buitentemperatuur.

6.1 Het effect van schermen

6.1.1 Aanwezige schermen worden wel of niet gebruikt

Tabel 6.1 laat zien hoe het energiegebruik en de opbrengst veranderen (ten opzichte van een situatie zonder schermgebruik) als we eerst één, dan twee en tenslotte alle drie de schermen gebruiken. De laatste situatie correspondeert dan met de referentie simulatie uit Hoofdstuk 4. De regels voor het sluiten en openen van de wèl gebruikte schermen zijn dezelfde als die uit Hoofdstuk 4.

De energiebesparing door het gebruik van drie schermen is aanzienlijk, $16.0\,m^3$ ten koste van $1.1\,kg$ 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 6.1 is verder te zien dat de besparingen door het gebruik van slechts één scherm niet bij elkaar kunnen worden opgeteld[1]. De extra besparing door een toegevoegd scherm neemt af als het betreffende scherm in combinatie met andere schermen wordt gebruikt.

Uit Tabel 6.1 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 open laten van het verduisteringsdoek leidt tot $16.0-13.2=2.8\,m^3$ extra gasgebruik en tot $1.2-1.1=0.1\,kg$ extra opbrengst.

[1] De besparingen van $11.2\,m^3$ met *alleen* verduistering, van $1.4\,m^3$ met *alleen* SLS10 Ultra en van $12.8\,m^3$ met *alleen* XLS10 H2NO zijn opgeteld $25.4\,m^3$ terwijl de drie schermen samen $16.0\,m^3$ gas besparen.

Tabel 6.1. 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.

Scenario	gewas PAR $\mathrm{mol\,day^{-1}m^{-2}}$	effect op: energiegebruik $\mathrm{m^3\,m^{-2}}$ A.E.	opbrengst $\mathrm{kg\,m^{-2}}$
Geen schermgebruik	18.7	0.0	0.0
Verduistering	18.7	-11.2	0.7
SLS10 Ultra	18.6	-1.4	-0.1
XLS10 H2NO	18.6	-12.8	-0.6
Verduistering + SLS10 Ultra	18.7	-12.5	0.2
Verduistering + XLS10 H2NO	18.6	-15.8	-0.8
SLS10 Ultra + XLS10 H2NO	18.5	-13.2	-1.1
3 schermen	18.6	-16.0	-1.2

Het ongebruikt laten van SLS10 Ultra leidt tot $16.0{-}15.8 = 0.2\,\mathrm{m^3}$ extra gasgebruik en tot $1.2 - 0.8 = 0.4\,\mathrm{kg}$ extra opbrengst. Het ongebruikt laten van XLS10 H2NO leidt tot $16.0 - 12.5 = 3.6\,\mathrm{m^3}$ extra gasgebruik en tot slechts $1.2 + 0.2 = 1.4\,\mathrm{kg}$ extra opbrengst.

Het gebruik van de schermen heeft betrekkelijk kleine effecten op de opbrengst (Tabel 6.1). Dat komt omdat het schermgebruik zowel positieve als negatieve effecten op de opbrengst heeft. Een onverwacht voorbeeld is het positief effect van een scherm op de lichtcondities in het gewas. Een deel van het licht dat door het gewas wordt gereflecteerd, wordt namelijk weer teruggekaatst naar het gewas door gesloten schermen. Dat betekent dat de schermen tijdens de belichting leiden tot een *verhoogde* absorptie van SON-t en LED licht. Dat is geen groot effect maar het is tegengesteld aan de *vermindering* van het licht bij schermen overdag. Het toch al kleine opbrengsteffect is bovendien nogal gevoelig voor de mate waarin ook de temperatuur en de bladafsplitsing veranderen tengevolge veranderingen in de warmtebalans in het gewas.

Omdat de schermen alleen in de donkere en koude perioden van het jaar gebruikt worden, wordt de totale lichtsom in de kas door het schermgebruik, geïntegreerd over het jaar, slechts weinig beïnvloed. Hoewel het *schermgebruik* slechts een gering effect heeft, zorgt de *installatie* van schermen wel degelijk voor lichtvermindering in de kas, doordat het *schermpakket* van open schermen ook in de zomer licht onderschept. We hebben daarom de berekeningen nog eens keer gedaan rekening houdend met dat effect.

6.1.2 Lichtonderschepping door schermpakket

In de volgende scenario's wordt verondersteld dat een scherm dat niet gebruikt wordt, óók niet geïnstalleerd is, dit in tegenstelling tot de situatie in Tabel 6.1. We hebben daarbij aangenomen dat een geïnstalleerd schermpakket 3% van verticaal invallend daglicht onderschept en het weghalen van een scherm dus ook extra licht oplevert. De simulatie zonder schermen is ook hier weer het referentiepunt.

© 2012 EcoCurves en Plant-Dynamics

Tabel 6.2. 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 3% 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 6.1 doordat de schermpakketten nu ook zijn weggehaald.

ingreep	gewas PAR $\mathrm{mol\,day^{-1}m^{-2}}$	effect op: energiegebruik $\mathrm{m^3\,m^{-2}}$ A.E.	opbrengst $\mathrm{kg\,m^{-2}}$
Geen schermen	20.8	0.0	0.0
Verduistering	20.1	-11.2	-0.2
SLS10 Ultra	20.0	-1.4	-1.0
XLS10 H2NO	19.9	-12.8	-2.2
Verduistering + SLS10 Ultra	19.3	-12.8	-2.7
Verduistering + XLS10 H2NO	19.3	-16.0	-3.3
SLS10 Ultra + XLS10 H2NO	19.2	-13.5	-3.9
3 schermen	18.6	-16.5	-5.7

De lichtsom zonder geïnstalleerde schermen in Tabel 6.2 is inderdaad een stuk hoger dan die met drie ongebruikte schermen in Tabel 6.1, namelijk 20.8 mol PAR tegen 18.7 mol PAR gemiddeld per dag. De jaaropbrengst is daardoor 4.6 kg hoger.

Achtereenvolgens worden nu alle schermen "geïnstalleerd" en gebruikt. Tabel 6.2 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 verduisteringsdoek bespaart 11.2 $\mathrm{m^3}$ gas en leidt tot een verlaging van de productie met 0.2 kg. Tabel 6.2 laat ook in andere gevallen zien dat de besparingen op het gasgebruik ongeveer even groot zijn als in Tabel 6.1, maar dat de effecten op licht en opbrengst groter zijn. Dat komt natuurlijk omdat de ongebruikte schermen in Tabel 6.2 ook daadwerkelijk "zijn verwijderd" hetgeen in de zomer, maar ook in de winter tot extra licht leidt.

Het SLS10 Ultra scherm is in het experiment weinig gebruikt. Wanneer dit scherm helemaal niet gebruikt zou zijn zou dat slechts 0.2 $\mathrm{m^3}$ gas extra kosten (zie Tabel 6.1 en hoofdstuk 6.1). Het helemaal weglaten van dit scherm kost iets meer, 0.5 $\mathrm{m^3}$ gas[2], maar levert 2.4 kg tomaten op door toename van de lichtinval in de kas.

Hieruit kan de conclusie worden getrokken dat het SLS10 Ultra scherm niet erg nuttig is geweest. In deze berekeningen wordt echter aangenomen dat een schermpakket, ook als het niet gebruikt wordt, 3% van het daglicht onderschept. Dat is een schatting, die door middel van lichtmetingen zeker verbeterd kan worden.

De hier besproken simulaties hebben betrekking op het schermgebruik, zoals dat ook in de proef heeft plaatsgevonden. In de volgende hoofdstukken wordt aandacht besteed aan de vraag hoe dat met andere schermregelingen verbeterd zou kunnen worden.

[2]De resultaten in Tabel 6.2 voor 3 schermen en voor "Verduistering + XLS10 H2NO" geven $16.5-16.0=0.5\,\mathrm{m^3}$ extra gasgebruik en 2.4 kg extra oogst voor het weglaten van SLS10 Ultra.

© 2012 EcoCurves en Plant-Dynamics

6.2 Lichtdrempel energiescherm XLS10 H2NO

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 door een verminderde uitstraling. Behalve de langgolvige uitstraling absorbeert een scherm echter 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 energie-effecten.

Het energiescherm XLS10 H2NO heeft een transmissie voor direct PAR van ongeveer 88% en een reflectie van 6%. Voor diffuus PAR zijn dit 81% respectievelijk 10%.

Met de basisregeling besproken in hoofdstuk 4.1 op bladzijde 30 sluit het energiescherm *als aan twee voorwaarden voldaan is*. Het daglichtniveau moet onder een drempel komen *en* het temperatuurverschil ΔT tussen het setpoint voor verwarmen en de buitentemperatuur moet boven een grenswaarde uitkomen.

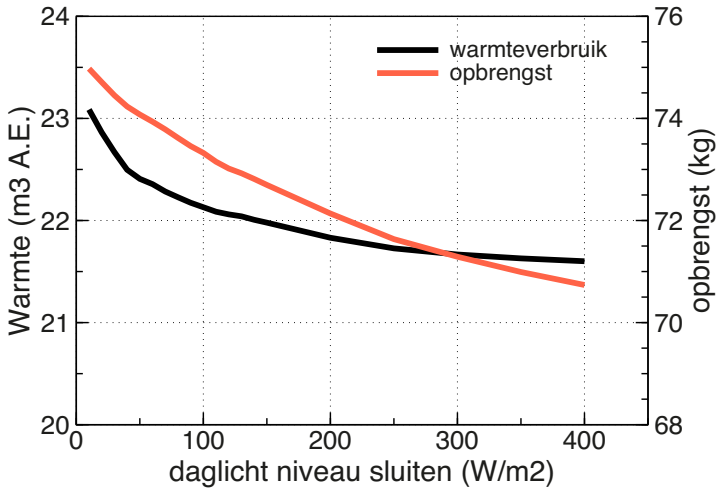
Het daglicht niveau waaronder het energiescherm sluit is in de referentieregeling $70\,\mathrm{Wm^{-2}}$ (Hoofdstuk 4). We beginnen met het variëren van deze daglichtdrempel. In hoofdstuk 6.3 wordt vervolgens geanalyseerd wat het effect is van de grenswaarden voor de ΔT.

Tabel 6.3 geeft het warmtegebruik, de gemiddelde dagelijkse lichtsom op gewas-

Tabel 6.3. De consequenties van een toenemend gebruik van het energiescherm XLS10 H2NO. 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 $100\,\mathrm{Wm^{-2}}$. Alle hoeveelheden zijn uitgedrukt per $\mathrm{m^2}$ kas.

daglicht ($\mathrm{Wm^{-2}}$) dicht	open	warmtegebruik $\mathrm{m^3}$ (A.E.)	Mol PAR $\mathrm{mol\,day^{-1}}$	opbrengst kg
10	20	23.09	18.66	74.98
20	40	22.86	18.65	74.71
30	60	22.67	18.63	74.45
40	70	22.50	18.61	74.23
50	80	22.41	18.60	74.08
60	90	22.36	18.58	73.94
70	100	22.28	18.57	73.79
80	110	22.23	18.55	73.62
90	120	22.17	18.53	73.46
100	130	22.13	18.52	73.32
110	140	22.09	18.50	73.15
120	150	22.06	18.48	73.02
130	160	22.04	18.47	72.93
140	170	22.01	18.46	72.81
150	180	21.98	18.44	72.70
200	230	21.83	18.37	72.14
250	280	21.73	18.30	71.64
300	330	21.67	18.25	71.29
350	380	21.63	18.19	70.99
400	430	21.60	18.15	70.74

© 2012 EcoCurves en Plant-Dynamics

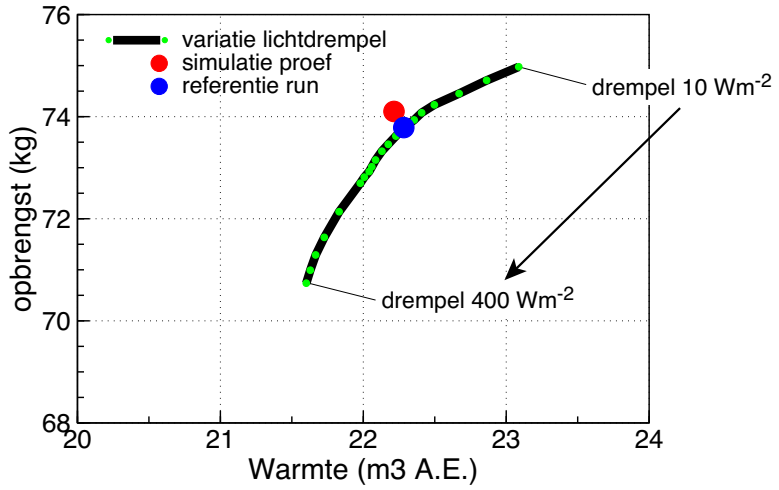


Figuur 6.1. Warmteverbruik en opbrengst (per m^2 kas) bij toenemend gebruik van het onderste energiescherm XLS10 H2NO. Het scherm sluit bij een temperatuurverschil van tenminste 5°C tussen het setpoint voor verwarming en de buitentemperatuur (tenzij het licht boven de drempel uitkomt) en opent bij een verschil van 3°C.

niveau en de totale opbrengst voor verschillende keuzes van het daglichtniveau waarbij het scherm sluit en opent. De simulaties zijn alle gedaan voor de ΔT keuze zoals besproken in hoofdstuk 4.1: sluiten bij 5°C, tenzij er veel licht is, en open bij 3°C.

In Figuur 6.1 zijn het warmtegebruik en de opbrengst in grafiek gebracht, als functie van het daglichtniveau, waar beneden het XLS10 energiescherm sluit. Het warmtegebruik neemt af van ongeveer $23\,m^3$ naar $21.5\,m^3$, 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 $70\,Wm^{-2}$ lijkt goed geko-



Figuur 6.2. Besparingskarakteristiek voor het SLS10 H2NO energiescherm. Dat is de relatie tussen warmtegebruik en opbrengst bij een daglichtdrempel tussen $10\,Wm^{-2}$ en $400\,Wm^{-2}$. De curve is gebaseerd op de waarden in Tabel 6.3 en Figuur 6.1.

© 2012 EcoCurves en Plant-Dynamics

zen. Bij een verhoging van de drempel van 70 Wm^{-2} naar 150 Wm^{-2} wordt 1.1 kg minder geproduceerd, tegenover een besparing van slechts 0.31 m^3 aardgas. Het verband tussen warmtegebruik en opbrengst kan ook expliciet in beeld gebracht worden. We krijgen dan de besparingskarakteristiek in Figuur 6.2. De curve is gebaseerd op de data in Tabel 6.3 en brengt in beeld hoe de meeropbrengst verloopt als functie van de gebruikte energie voor buis en LBK. De toename van het warmtegebruik is daarbij het gevolg van minder schermen (minder schermen betekent hier een lagere drempel waaronder het scherm sluit).

In Figuur 6.2 zien we inderdaad dat de opbrengst toeneemt bij gebruik van meer warmte (en minder schermen). We zien ook dat de resultaten van de simulaties voor de gemeten waarden van het experiment en de referentie run met het geregelde kasklimaat goed overeenkomen (het rode en het blauwe punt).

Met een de curve zoals die in Figuur 6.2, kan ook een economisch optimum voor de lichtdrempel worden afgeleid. Dat volgt onmiddellijk uit de substitutie van de prijs van warmte en de prijs van tomaten voor de warmte- en opbrengst-variabelen.

6.3 Het effect van de ΔT drempel

6.3.1 Twee energieschermen

In het hoofdstuk 6.2 is de lichtdrempel gevariëerd voor *alleen* voor het SLS10 H2NO scherm. De lichtdrempel voor het bovenste, en overigens weinig gebruikte energiescherm SLS10 Ultra werd daarbij op de constante referentiewaarde gehouden. In dit hoofdstuk wordt steeds dezelfde lichtdrempel gebruikt voor *beide energieschermen.*

Uit berekeningen blijkt dat het *tegelijk* sluiten en openen[3] van beide energieschermen onvoordelig uitpakt. Het tweede scherm dient pas gesloten worden als het relatief kleine *extra energievoordeel*[4] opweegt tegen de vermindering van de opbrengst als gevolg van een verdere afname van het daglicht[5].

Voor de berekeningen in dit hoofdstuk zijn daarom de ΔT waarden voor het bovenste SLS10 Ultra scherm 10°C hoger gezet dan de waarden voor het onderste SLS10 H2NO scherm. Dat betekent dat het bovenste scherm *alleen* sluit als het buiten echt koud is. Dat is een keuze die de proefresultaten en de referentie run uit Hoofdstuk 4 weer goed reproduceert.

6.3.2 Drie waarden van de ΔT drempel

We hebben allereerst simulaties uitgevoerd voor een reeks lichtdrempels bij de referentiewaarde van ΔT: sluiten bij 5°C, tenzij het licht boven de drempel uitkomt, en open bij 3°C. Dat levert resultaten op die lijken op die in Tabel 6.3. De waarden zijn iets anders omdat het tweede scherm anders wordt aangestuurd (zie hoofdstuk 6.3.1).

[3] 's Nachts als het verduisteringsdoek dicht is kan het bovenste energiescherm niet gebruikt worden, maar overdag kan het worden aangestuurd met dezelfde regels voor openen en sluiten als het onderste energiescherm.

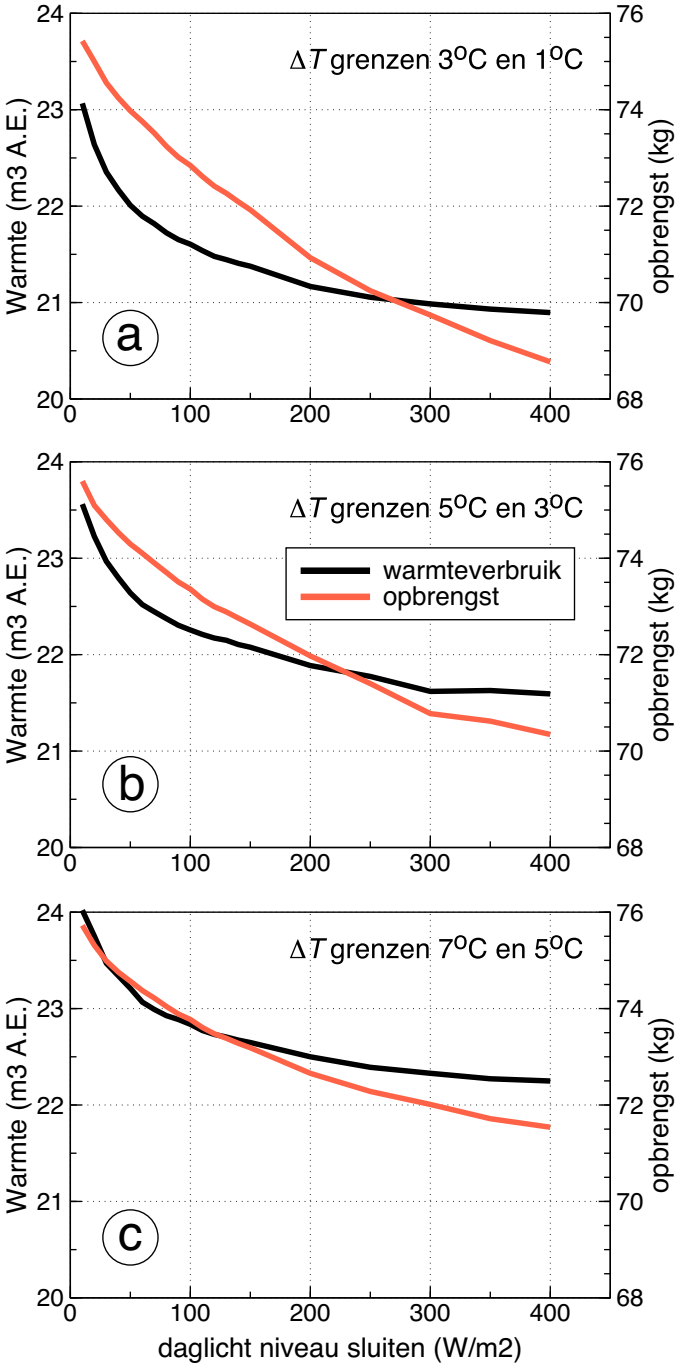
[4] In hoofdstuk 6.1 zagen we dat de energiebesparing bij het gelijktijdig gebruik van meerdere schermen niet gewoon een optelling is. Het *additionele* voordeel van het sluiten van een tweede scherm is kleiner dan dat van het sluiten van datzelfde scherm, als enkelvoudig scherm gebruikt.

[5] Ook in de proef is om die reden het bovenste energiescherm relatief weinig dicht geweest.

© 2012 EcoCurves en Plant-Dynamics

Vervolgens zijn ook voor lagere ΔT (3°C en 1°C) en hogere ΔT grenzen (7°C en 5°C) de berekeningen gedaan. Het resultaat is te vinden in de vorm van de drie grafieken in Figuur 6.3.

Het effect van een verandering van ΔT hangt sterk af van de lichtdrempel. Bij een lage lichtdrempel van 50 Wm^{-2} leidt een verlaging van de grenswaarden voor ΔT



Figuur 6.3. Warmteverbruik en opbrengst (per m^2 kas) bij toenemende lichtdrempel voor de aansturing van de energieschermen XLS10 H2NO (bij de ΔT waarden in de grafieken) en XLS10 Ultra (bij ΔT waarden 10°C hoger).

© 2012 EcoCurves en Plant-Dynamics

van (5°C,3°C) naar (3°C,1°C) tot een extra opbrengstderving van slechts 0.32 kg op jaarbasis en tot een energiebesparing van 0.63 m^3 aardgas (zie de Figuren 6.3a en 6.3b). Dat is een gunstige verhouding.

Bij een hogere lichtdrempeling (en dezelfde verlaging van ΔT) blijft de extra energiebesparing bijna gelijk (0.70 m^3 bij 400 Wm^{-2}) terwijl de opbrengstderving maar liefst 1.6 kg bedraagt. Dat is ook begrijpelijk omdat het sluiten van schermen bij een grotere hoeveelheid licht (van bijvoorbeeld 300 Wm^{-2}) nauwelijks energie zal besparen als het buiten slechts 3°C kouder is dan binnen (het licht warmt de kas op), maar wel ten koste gaat van de opbrengst.

We zien dat bij een laag lichtniveau een lage ΔT voordelig is. Immers, als slechts weinig licht verloren gaat dan hoeft met schermen niet gewacht te worden totdat het buiten veel kouder is geworden. 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 ΔT. Het sluiten van de schermen als het buiten slechts weinig kouder is dan binnen is dan onvoordelig.

Dat biedt perspectieven voor verdere optimalisatie. Het is denkbaar om de grenswaarden voor ΔT afhankelijk te maken van het lichtniveau buiten. Daarmee kan voorkomen worden dat een grote hoeveelheid licht wordt weggeschermd, terwijl het buiten slechts enkele graden kouder is dan binnen. In het volgende hoofdstuk wordt op basis van dit principe een verkennende berekening gemaakt.

6.4 Alternatieve schermregelingen

In Figuur 6.4 is een samenvatting gepresenteerd van de besparingskarakteristieken[6] voor de hierboven beschouwde schermregelingen. De *zwarte curves* tonen het verband tussen warmtegebruik en opbrengst voor drie grenswaarden van ΔT (dezelfde waarden als die in Figuur 6.3).

Warmtegebruik en opbrengst voor de gesimuleerde proef (Hoofdstuk 3) en voor de referentie berekeningen met geregeld kasklimaat (Hoofdstuk 4) zijn in Figuur 6.4 weergegeven als een rode, respectievelijk blauwe punt.

Bekijken we nu eerst *alleen de drie zwarte curves*, dan zien we dat een opbrengst van bijvoorbeeld 74 kg het voordeligst gehaald kan worden met ΔT grenzen 3°C en 1°C (de dikke zwarte lijn in Figuur 6.4)[7]. *Omdat de zwarte curves elkaar niet snijden zijn lage ΔT grenzen altijd gunstiger dan hoge.*

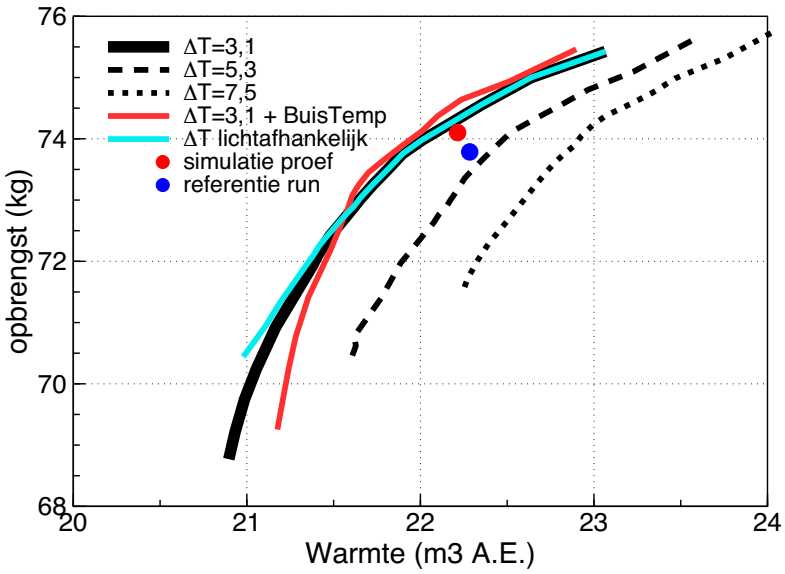
De rode curve in Figuur 6.4 is berekend voor een reeks lichtdrempels tussen 10 en 400 Wm^{-2}. Voor het eerste energiescherm XLS10 H2NO is daaraan een ΔT voorwaarde toegevoegd met grenzen van 3°C en 1°C (net zoals voor de vette zwarte lijn). Het tweede energiescherm XLS10 Ultra loopt dicht bij een buistemperatuur boven de 40°C en weer open bij een buistemperatuur van 25°C.

We zien dat voor een opbrengst rond 74 kg, het gebruik van de buistemperatuur voor de schermsturing een klein voordeel oplevert boven een regeling op ΔT omdat effectiever op warmteverliezen wordt gestuurd. In hoeverre dit voordeel nog verder toeneemt als de temperatuurdrempel voor de buis omlaag wordt gebracht is nog niet uitgezocht.

[6] De curves in Figuur 6.4 zijn van hetzelfde type als die in Figuur 6.2 op bladzijde 48. De curve voor ΔT grenzen 5°C en 3°C is net niet precies dezelfde als die in Figuur 6.2, omdat de lichtdrempeling hier *ook* gebruikt is voor het tweede energiescherm (zie hoofdstuk 6.3.1).

[7] Voor alle regelingen geldt dat het scherm open blijft als het lichtniveau boven de lichtdrempel ligt. De lichtdrempel varieert langs de curve (zie ook Figuur 6.2).

© 2012 EcoCurves en Plant-Dynamics



Figuur 6.4. Besparingskarakteristieken voor de lichtdrempel toegepast op beide energieschermen. De *dikke en gestreepte zwarte* curves geven de resultaten weer uit Figuur 6.3. De rode curve is berekend voor sluiting van het tweede energiescherm SLS10 Ultra bij een buistemperatuur boven de 40°C. De cyaankleurige curve is berekend met een daglichtafhankelijke grenswaarde van ΔT. De gesimuleerde proef en de referentie regeling zijn als losse punten in de grafiek gezet. Zie de tekst voor meer toelichting.

We bekijken tenslotte nog een tweede alternatief. De cyaankleurige curve in Figuur 6.4 is weer berekend met ΔT grenzen voor beide schermen. Deze zijn nu echter dynamisch afhankelijk van het lichtniveau. Tot 50 $\mathrm{Wm^{-2}}$ daglicht is gerekend met de "gewone" grenzen van 3°C en 1°C. Daarboven zijn de drempels verhoogd met 1°C voor iedere 50 $\mathrm{Wm^{-2}}$. Bij een hoge stralingsdrempel voorkomt deze constructie dat licht wordt afgeschermd als het temperatuur verschil met de buitenlucht slechts enkele graden bedraagt. Bij een lichtniveau van 300 $\mathrm{Wm^{-2}}$ bijvoorbeeld is de ΔT voor sluiting 6°C.

Het in hoofdstuk 6.3.2 op bladzijde 51 gesuggereerde effect van een lichtafhankelijke ΔT drempel treedt dus inderdaad op. Het effect valt in Figuur 6.4 niet erg op, maar bij een warmtegebruik van 21 $\mathrm{m^3}$ A.E. (gerealiseerd met een hoge lichtdrempel van rond 400 $\mathrm{Wm^{-2}}$) is de zwarte curve voor een vaste ΔT drempel erg steil (linkerkant van de figuur). Dat betekent dat een dergelijk hoge lichtdrempel eigenlijk nooit voordelig is (de opbrengstderving is te groot). De karakteristiek voor een lichtafhankelijke ΔT drempel ligt daarentegen voor hetzelfde warmtegebruik aanzienlijk gunstiger (cyaankleurige curve).

6.5 Discussie schermregeling

Er kan geconcludeerd worden dat het sluiten van een energiescherm bij een instraling in de range van 50–100 $\mathrm{Wm^{-2}}$ in ieder geval voordelig is omdat dat veel energie bespaart. De lichtdrempel kan worden gecombineerd met lage ΔT grenzen.

Bekijken we nogmaals de besparingskarakteristiek in Figuur 6.4 dan lijkt het erop dat er bij een opbrengst van 74 kg niet heel veel meer energiebesparing mogelijk is. Nog kleinere ΔT grenzen kunnen nog wat extra opleveren en ook is het schakelen op buistemperatuur in plaats van op ΔT is nog niet uitputtend onderzocht. Het

© 2012 EcoCurves en Plant-Dynamics

gebruik van de buistemperatuur zou ook toegepast kunnen worden op het primaire energiescherm. Er moet dan wel zodanig worden geschakeld dat het scherm niet gaat oscilleren (buis aan – scherm dicht – buis uit – scherm open – buis aan, ...).

Een substantieel grotere besparing bij dezelfde opbrengst vraagt schermen met een grotere lichtdoorlatendheid. Dan kan zonder opbrengstderving bij een hogere lichtdrempel geschermd worden. Dan komt ook een lichtafhankelijke ΔT in beeld. Daarmee kan bij een hoge lichtdrempel het opbrengstverlies verkleind worden.

© 2012 EcoCurves en Plant-Dynamics

Hoofdstuk 7

Conclusies en aanbevelingen

Wat zijn de perspectieven voor Het Nieuwe Telen in termen van opbrengst en energiebesparing? Wat zijn de verbeterpunten?

Op die twee vragen wordt in de hierna volgende alinea's een antwoord geformuleerd, gebaseerd op de huidige analyses en eerdere studies (Schapendonk *et al.*, 2010; Rappoldt & Schapendonk, 2011).

Belichting

Bij Komeet levert tussenbelichting een productiewinst (maximaal 15%) op, mits een goede lichtonderschepping wordt gewaarborgd. Door bladpluk of teveel clustering van bladeren bij de lichtbron is dit niet altijd het geval. Minder bladpluk geeft wel weer meer verdamping waardoor (zeker met LED) niet ontkomen wordt aan meer buisverwarming.

Belichting tot een hoog niveau (inzet van 310 kWh) leidt tot een meerproductie die lineair toeneemt met de totale hoeveelheid toegediend licht. Die toename is vrijwel onafhankelijk van de manier waarop de belichting wordt gedoseerd: ofwel via intensiteitsverhoging, ofwel via verlenging van de dag, dan wel via verlaging van de daglichtdrempel, waarboven het licht wordt aangeschakeld. De keuzes hebben echter wel gevolgen voor de hoeveelheid energie die bespaard kan worden op de verwarming.

Wanneer we energie-besparingsmogelijkheden bekijken, dan is een verhoging van de daglichtdrempel waarboven de lampen worden aangeschakeld, gunstiger dan een (in tijd vastgelegde) kortere belichtingsduur, vanwege de betere benutting van de restwarmte van de lampen. Om dezelfde reden is belichten met een lagere intensiteit en een langere belichtingsduur gunstiger dan korter belichten met een hogere intensiteit.

Schermregeling

Met de huidige lichtdoorlatendheid van de schermen, is het sluiten van een energiescherm bij een instraling in de range van 50–100 Wm^{-2} rendabel. De beste resultaten worden dan verkregen door de lichtdrempel te combineren met lage $\Delta T_{\mathrm{lucht}}$ en/of lage ΔT_{buis}. Desondanks zijn de besparingen niet erg groot en dat is te wijten aan de grote lichtverliezen door de schermen.

Een substantieel grotere energiebesparing is mogelijk met behulp van energieschermen met een grotere lichtdoorlatendheid. Dan kan zonder extra opbrengstderving beneden een hogere lichtdrempel geschermd worden. Voor een optimale energiebesparing dient de ΔT_{lucht} (verschil tussen kas- en buitentemperatuur waaronder het scherm open blijft) dan afhankelijk gemaakt te worden van het daglichtniveau. Dat wil zeggen dat de weggeschermde hoeveelheid licht afhankelijk wordt gemaakt van de ΔT_{lucht}. Zo'n lichtafhankelijke ΔT_{lucht} is waarschijnlijk beter dan ΔT_{buis} als criterium[1].

LBK en raamventilatie

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

Raamventilatie kost op jaarbasis $3.3\,\text{m}^3$ meer energie dan ventilatie met de LBK. De oorzaak voor het verschil is 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).

Ontvochtigen met LBK en ramen gecoördineerd uitvoeren, 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 als onderdeel van de reguliere sturing. Dit vergt uiteraard een goede meting van het vochtgehalte buiten en van de dampdruk op enkele hoogtes in het gewas, met name onderin.

Een betere controle van het dampdruk deficit (VD) maakt het vervolgens mogelijk om het setpoint voor VD te verlagen zonder extra risico op bladnat. Dat bespaart veel energie (Rappoldt & Schapendonk, 2011).

Met behulp van metingen van de temperatuur en de dampdruk op *verschillende* hoogtes in de kas (*ook boven de schermen*) kunnen bovendien kritische modelparameters beter geschat worden. Dat is van belang voor nauwkeuriger simulaties en voor kwantitatieve optimalisatie berekeningen die binnenkort met het Explorer model mogelijk zijn.

[1] De buistemperatuur is zelf een regelinstrument dat reageert op de instelling van het setpoint voor de kasluchtverwarming en als zodanig reageert ΔT_{buis} op het sluiten van schermen. Bij additioneel gebruik van ΔT_{buis} als criterium voor de sluiting van de schermen kunnen dan oscillaties ontstaan.

© 2012 EcoCurves en Plant-Dynamics

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 lichtdoorlatende 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 simuklation model. Ph.D. thesis, Institute of Agricultural and Environmental Engineering, Agricultural University Wageningen, The Netherlands.

Dueck, T., Nieboer, S., Janse, J., Valstar, W., Eveleens, B., Grootscholten, M., 2011. Led belichting en het nieuwe telen bij tomaat. Technical report, Wageningen UR Glastuinbouw, Wageningen. Onderzoeksrapport Wageningen-UR, in prep.

Farquhar, G. D., Gaemmerer, S. V., Berry, J. A., 1980. A biochemical-model of photosynthetic CO_2 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.

Heuvelink, E., 1996. Dry matter partitioning in tomato: validation of a dynamic simulation model. Annals of Botany 77, 71–80.

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_3 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.

Pot, S., Trouwborst, G., Schapendonk, A., 2010. Led tussenbelichting in de tomatenteelt: Praktijkonderzoek bij dekker glascultures. Verslagen Productschap Tuinbouw en Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit. In kader van Kas als Energiebron PT13840, 28.

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.

Rappoldt, C., Schapendonk, A., 2011. Keuzes voor het nieuwe telen op basis van experimenten met tomaat en paprika. Technical report, Ecocurves and Plant Dynamics, Wageningen. Onderzoeksrapport PT projectnummer 14237.

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.

© 2012 EcoCurves en Plant-Dynamics