



# Optimale Hybride Belichting bij Tomaat

## Perspectieven voor het nieuwe telen

A.H.C.M. Schapendonk, C.S. Pot, G Trouwborst en C. Rappoldt

Juli 2010



# Optimale Hybride Belichting bij Tomaat Persectieven voor het nieuwe telen

Ad Schapendonk<sup>1</sup>, Sander Pot<sup>1</sup>, Govert Trouwborst<sup>1</sup> en Kees Rappoldt<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Plant-Dynamics BV, Englaan 8, 6703 EW Wageningen

<sup>2</sup>EcoCurves BV, Kamperfoelieweg 17, 9753 ER Haren

E-mail: [ad@plant-dynamics.nl](mailto:ad@plant-dynamics.nl)

**PT-rapport 14092**

**Plant-Dynamics BV**

**Wageningen, juli 2010**

## REFERAAT

A.H.C.M. Schapendonk, C.S. Pot, G. Trouwborst and C. Rappoldt, 2010. *Optimale Hybride Belichting bij Tomaat ; Persectieven voor het nieuwe telen*. Plant-Dynamics en EcoCurves, Wageningen. 39 blz. ; 96 ref.

Documentation of various scenario analyses with the Explorer models of Plant-Dynamics and EcoCurves. The used models are written in FST and Fortran-90. This document contains the analyses of various light application in the horticultural practice of tomato cultivation. It describes computational methods, features of assimilation light application and virtual experiments.

Keywords: Het nieuwe Telen, belichting, LED, SON-T, simulatie, tomaat

Dit rapport is gesubsidieerd door het Productschap Tuinbouw en het ministerie van Landbouw Natuur en Voedselvoorziening in het kader van het gezamenlijk energieonderzoek binnen het programma Kas als Energiebron.

© 2010 Plant-Dynamics en EcoCurves  
Englaan 8, 6703 EW Wageningen, Nederland  
Kamperfoelieweg 17, 9753 ER Haren (gn), Nederland

e-mail: [ad@plant-dynamics.nl](mailto:ad@plant-dynamics.nl)

Voorplaat: “LED belichting Philips. Locatie Wageningen Glastuinbouw, Bleiswijk”

2010 Wageningen, Plant Dynamics BV en EcoCurves. Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van het Productschap Tuinbouw en het ministerie van LNV.

# Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Samenvatting</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Inleiding</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Minimum lichtbehoefte</b>	<b>9</b>
3.1	Conclusies analyse 'minimum lichtbehoefte'	9
3.2	Basisinformatie	9
3.3	Hoe werkt het?	10
3.4	Scenario analyse	11
3.5	Valkuil bij efficiëntie berekening	12
<b>4</b>	<b>Optimale lichtverdeling</b>	<b>13</b>
4.1	Conclusies analyse 'Optimale lichtverdeling'	13
4.2	Lichtbenuttingsefficiëntie	14
4.2.1	Compensatie van raseigenschap door aanhouden scheuten	14
<b>5</b>	<b>Temperatuur onbalans</b>	<b>16</b>
5.1	Conclusies analyse 'Temperatuur onbalans'	16
5.2	Ontkoppeling tussen IR en PAR-licht	17
5.3	Temperatuurbehoefte	17
5.4	Timing van eerste scheut	19
5.5	Energie balans LED SON-T	21
<b>6</b>	<b>Aanvullende warmtevoorziening</b>	<b>25</b>
6.1	Conclusies analyse 'Aanvullende warmtevoorziening'	25
<b>7</b>	<b>Begrenzen belichtingsduur</b>	<b>27</b>
<b>8</b>	<b>Energiebesparing door schermtoepassing.</b>	<b>29</b>
8.1	Conclusies analyse 'Energiebesparing door schermtoepassing'	29
8.2	Vervolgonderzoek	30
<b>9</b>	<b>Bijlage</b>	<b>32</b>
9.1	Wat heb je aan modellen?	32
9.2	LED's in de tuinbouw	33
9.2.1	Voorkom een lage blad-lichtbenuttingsefficiëntie	34
9.2.2	Energetisch rendement	35
9.3	Lichtkleuren	35
9.3.1	Blauw	35
9.3.2	Groen	36
9.3.3	Rood	36
	<b>Bibliografie</b>	<b>39</b>

---

# Samenvatting

---

De gepresenteerde studie is een theoretische onderbouwing van de consequenties van assimilatiebelichting en de manier waarop die wordt toegepast in de tomatenteelt. Er worden aanknopingspunten geboden voor de meest efficiënte vorm van belichting en manieren om optimaal gebruik te maken van de vrijkomende warmte. Belangrijke facetten van de teelt zoals stengeldichtheid, teeltmanagement en raseigenschappen worden toegelicht en kwantitatief benaderd. Verder worden aanknopingspunten voor nieuw experimenteel onderzoek geboden.

Aandachtspunten:

- Minimum lichtbehoefte.
- Optimale verdeling boven/tussen.
- Temperatuurbalans.
- Aanvullende warmtevoorziening bij LED-belichting.
- Energiebesparing door begrenzen belichtingsduur.
- Energiebesparing door schermtoepassing.

De berekeningen van opbrengst, lichtbenuttingsefficiëntie, warmtebalans en energiebehoefte werden verricht met Explorer tomaat en Explorer Kasklimaat. De maandelijkse teeltanalyses zijn aangevuld met berekeningen voor dagverlopen waarin, gedetailleerd van meristeem tot vrucht, de temperatuurverdeling en de fotosynthese/verdamping per gewaslaag in kaart is gebracht.

Het meten en liever nog het voorspellen van de dynamiek van de temperatuurverdeling in een kas is van groot belang voor het opstellen van een blauwdruk voor het teeltmanagement over het jaar. De hoeveelheid licht aan de kop van de plant bepaalt welke strategie daarbij het best gevolgd kan worden. Door assimilatiebelichting worden de verschillen in de gewenste strategie op maandbasis geringer omdat de maandelijkse lichtsommen dichter naar elkaar toe getrokken worden. Tegelijkertijd verandert door gebruik van de assimilatiebelichting de warmtebalans in het gewas. Door teelt en klimaatregeling op die veranderingen af te stemmen kan 10-26% bespaard worden op elektriciteit en 18-20% op warmte. De assimilatiebelichting kan maximaal benut worden door bij de lichtverdeling (boven/tussen-belichting) rekening te houden met ras, plantdatum en stengeldichtheid. De leidraad bij deze





**Figuur 1.1.** Sturen op temperatuur van de kop en temperatuur van de vruchten

exploraties is een balans tussen snelheid van trosaanleg (bepaald door de temperatuur van de kop) en snelheid van trosafrijping (bepaald door de temperatuur van de vrucht).

Daarom werden verschillende opties voor schermen, verwarmen en belichten doorgerekend en bediscussieerd in het licht van de waarnemingen die tot dat moment aan de teelt zijn verricht (Nederhof *et al.*, 2010). Op basis van langjarige stralingsgemiddelden, aangevuld met het verwachte weer worden de effecten van de verschillende opties die openstaan voor de daaropvolgende maand doorgerekend. Er is een kwantitatieve berekening gemaakt van opbrengstpotentie op maandelijkse basis en de te behalen energie efficiëntie.



---

# Inleiding

---

De wijze waarop assimilatiebelichting wordt toegediend, heeft zowel consequenties voor de fotosynthese van het gewas als voor de warmtebalans. Licht, warmte en koeling zijn energiegerelateerde factoren bij een teelt. De onderlinge verwevenheid van die factoren vraagt om een systematische aanpak. Belichten en verwarmen grijpen in een kas niet alleen in op de productie maar hebben ook grote gevolgen voor de warmtebalans en daarmee voor het energieverbruik.

Zonder dure experimenten kan op voorhand een grote diversiteit aan belichtings- en verwarmings-opties worden getoetst op opbrengsteffecten en energieverbruik. Zulke schattingen geven een kwantitatief inzicht in de samenhang van teeltprocessen en bieden vervolgens het kader waarbinnen selectieve experimenten kunnen worden verricht.

Dit onderzoek geeft richting aan de discussie hoe LED's ingepast kunnen worden in de optimalisatie van het teeltplan van tomaat. De nadruk ligt daarbij op de behoefte aan aanvullende maatregelen om de temperatuur te sturen en op welke wijze dat het meest effectief kan worden gedaan, in afhankelijkheid van plantdatum en raskeuze. Dit past binnen het kader van de complete optimalisatie van het kasklimaat. De verkenningen bestaan uit scenario analyses met Explorer tomaat en Explorer Kasklimaat die aangeven welke combinaties van schermen, buisinstelling en aangehouden stengels geëigend zijn om de gestelde doelstellingen te behalen.



**Figuur 2.1.** Tussenbelichting met rood-blauwe LED's

---

# Minimum lichtbehoefte

---

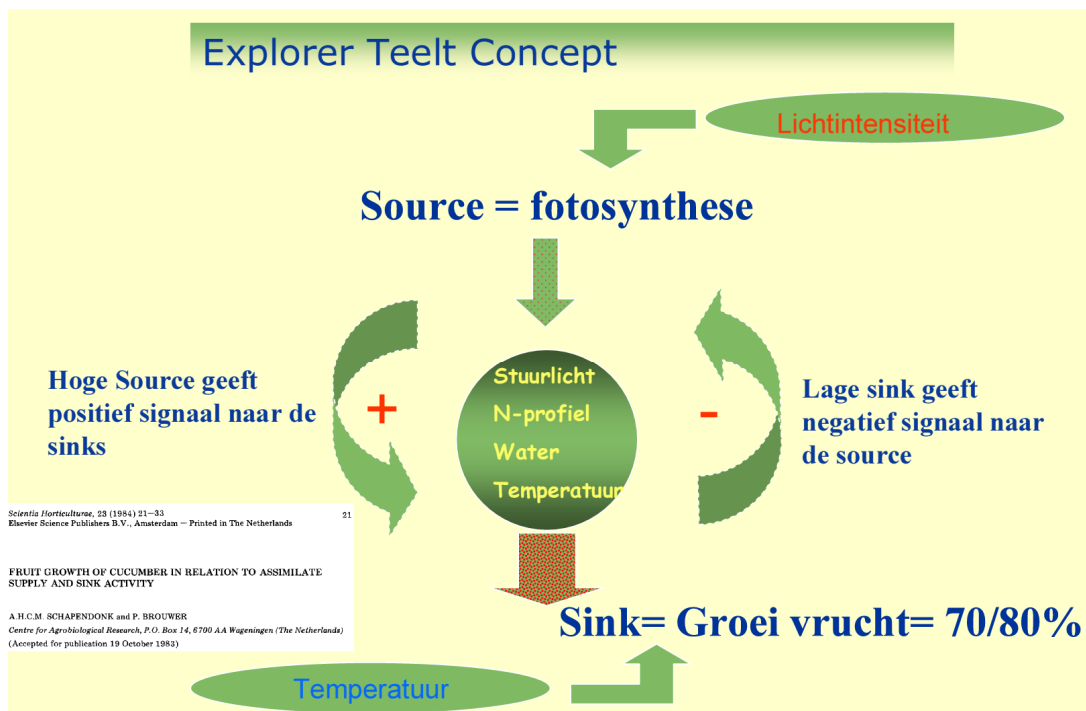
Een optimale productie wordt bereikt door temperatuur van kop en vrucht in balans te brengen met de hoeveelheid licht die binnen een tijdsbestek van 2 weken beschikbaar is.

## 3.1 Conclusies analyse 'minimum lichtbehoefte'

- Gemiddeld is de intensiteit van het daglicht in november, december, januari en februari te laag om een producerend tomaten gewas daadwerkelijk in productie te houden.
- Sink-gelimiteerde rassen zoals Sunstream hebben minder assimilatiebelichting nodig dan source gelimiteerde rassen zoals Komeett.
- De minimum lichtbehoefte in de winter is  $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (18 uur) voor Sunstream en  $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  voor Komeett.
- De lichtbehoefte neemt af bij een lagere temperatuur van de kop.
- Een lagere temperatuur van de kop mag niet samenvallen met een lagere vruchttemperatuur (te lange afrijping).
- De relatieve opbrengstverhoging als gevolg van een lichtniveau verhoging van  $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  naar  $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  is het grootst in de maanden oktober en februari.

## 3.2 Basisinformatie

De productiviteit van een tomatengewas wordt gedictieerd door de snelheid van aanmaak van de assimilaten (lichtafhankelijk) en de snelheid waarmee de assimilaten vervolgens worden omgezet in groei van bladeren en vruchten (temperatuurafhankelijk). Watergift, nutriënten voorziening en stuurlicht zijn daarnaast factoren die de grenzen bepalen waarbinnen de processen optimaal kunnen verlopen (figuur 3.1). Bij tomaat is een goed begrip van die samenhang van groot belang om een maximale opbrengst per eenheid energie-inbreng te realiseren. Niet alleen het effect op de fotosynthese (assimilatie) is daarbij dus van belang maar ook effecten op assimilatenverdeling en morfologie van de plant. Een te zware plantbelasting geeft bijvoorbeeld een remming van de vegetatieve groei. Dit vertaalt zich in een zwakke



**Figuur 3.1.** Schema van de samenhang tussen assimilatenstromen

kop en een slechte zetting. Omdat de processen zelf moeilijk continu zijn te meten is het zinvol om voorafgaand aan een teelt een blauwdruk op te stellen. Zo'n blauwdruk (met setpoints voor temperaturen, CO<sub>2</sub> en RV) kan worden samengesteld op basis van gemiddeld weer of weersverwachting en de eigenschappen van het ras, samenhangend met de fotosynthese en de vruchtontwikkeling. Een blauwdruk die op die manier wordt verkregen geeft de hoofdrichting aan de teelt maar kan steeds waar nodig op basis van actuele omstandigheden steeds op details worden bijgesteld. Met modelanalyses kunnen vervolgens scenario's worden doorberekend, op zoek naar de beste teelt met het minste energiegebruik.

### 3.3 Hoe werkt het?

Van een ras worden de fotosynthese eigenschappen in kaart gebracht (CO<sub>2</sub> opname capaciteit en huidmondjesgeleidbaarheid) in verschillende seizoenen en op diverse hoogtes in het gewas. Daarnaast wordt de maximale groeisnelheid van de tros gemeten en de hoeveelheid CO<sub>2</sub> die nodig is om die groei te realiseren als functie van de trostempatuur. Samen met de temperatuurafhankelijke snelheid van trosvorming, gekoppeld aan de bladafplitsingssnelheid, kan de totale assimilatenbehoefte dan op elk moment worden berekend. De assimilatenbehoefte kan worden vergeleken met het aanbod uit de fotosynthese. Is er een overschot dan kan generatief worden gestuurd. Is er een tekort dan dient er meer vegetatief te worden gestuurd.

**Tabel 3.1.** 20 jarig maandgemiddelden van straling en gemiddelde minimum/maximum temperaturen

dagnr	KJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	T <sub>min</sub>	T <sub>max</sub>
1	1900	-0.1	4.9
15	2100	-0.7	4.3
46	4400	-0.6	5.4
74	7800	1.2	8.9
105	13000	3.3	12.4
135	16300	7.3	17.3
166	17500	10.3	20.5
196	15600	12.2	21.4
227	13800	12	21.5
258	10000	9.7	18.9
288	5800	6.5	14.3
319	2700	2.9	8.6
349	1700	0.6	5.5
365	1900	-0.1	4.9

### 3.4 Scenario analyse

Voor deze studie werd gewerkt met langjarige klimaatgegevens. Om de analyses te verrichten werden deze data getransformeerd naar realistisch dagelijks weer. Vanuit de gemiddelde dagwaarden werd, rekening houdend met daglengte, met stappen van 5 minuten een buitenklimaat gegenereerd dat representatief is voor de betreffende gemiddelde maand.

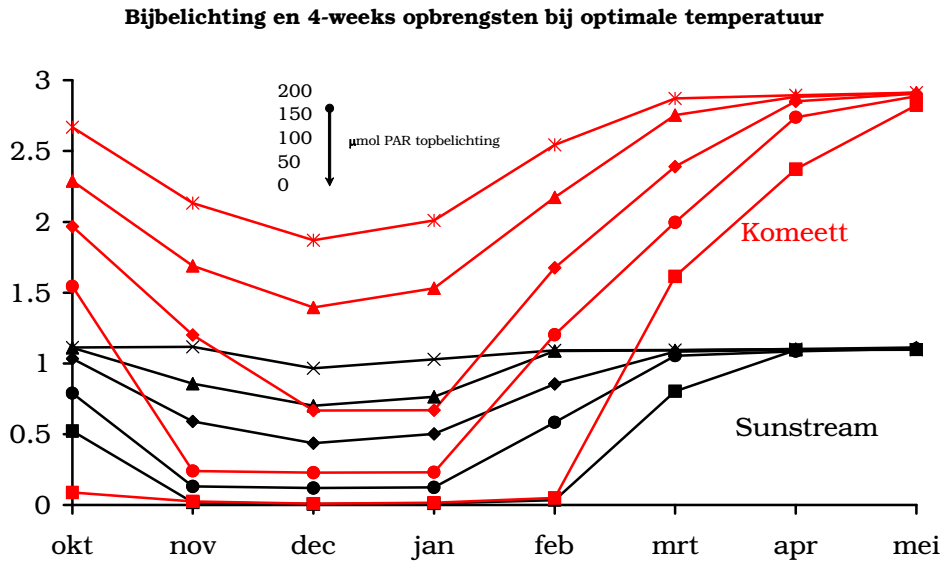
Het klimaat in de kas werd, evenals in de realiteit, geregeld op setpoints maar dan nu modelmatig met een virtuele klimaatcomputer, waarmee we nieuwe, zelf ontwikkelde, regelaars kunnen testen ( figuur 9.1).

De energiebalans in de kas werd met stappen van 5 minuten berekend op basis van buis- en groei-buistemperatuur, schermstanden, energie-inbreng via lampen of IR-stralers, convectief warmteverlies, ventilatieverlies, langgolvlige uitstraling en de verdampingsactiviteit van het gewas. De kosten van elektriciteit en verwarming zijn dus een realistische afspiegeling van de kosten bij een echte teelt met vergelijkbare setpoints.

Het model simuleert planteigenschappen, en microklimaat in de tijd met realistische terugkoppelingen. Het model bestaat uit twee hoofdrubrieken met de onderliggende deelprocessen. De hoofdrubrieken in het teeltmodel fotosynthese (en gerelateerde verdamping) (source) en groeiprocessen van verschillende plantendelen zoals bladeren, vruchten (sink). Het verloop van de balans tussen source en sink werd in Optomaat Explorer continu berekend.

In figuur 4.1 is op die manier voor de rassen Sunstream en Komeett de 4-wekelijkse productie berekend voor herfst en winter met aanvullende assimilatiebelichting oplopend in 4 stappen van 50 tot 200  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  SON-T aan de top van het gewas. Sunstream heeft een lagere lichtbehoefte dan Komeett. In de maanden november, december en januari is tomatenteelt met een volgroeid gewas zonder assimilatiebelichting niet mogelijk, voor Komeett komt daar de maand februari bij.





**Figuur 3.2.** Opbrengst in kg per 4 weken bij de rassen Komeett en Sunstream bij verschillende niveaus voor bijbelichting ( van 0 tot 200  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). De dagelijkse belichtingsduur was 18 uur.

### 3.5 Valkuil bij efficiëntie berekening

In feite bestaat er een drempel voor de maandelijkse lichtsom waar beneden geen tomatenproductie mogelijk is vanwege onderhoudsprocessen, die evenveel kosten als er aan assimilaten wordt geleverd en vanwege het feit dat er een minimale lichthoeveelheid nodig is om een tros te laten ontwikkelen (figuur 4.1). Wanneer dit drempel effect wordt genegeerd, worden verkeerde conclusies getrokken over de efficiëntie van extra licht.

Voorbeeld: Als met 150  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  assimilatiebelichting 2 keer zoveel geoogst wordt als met 100  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , wil dat niet zeggen dat de fotonen in de laatste 50  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  tweemaal zo efficiënt zijn als de fotonen van eerste 100  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Op het eerste gezicht lijkt dat namelijk de meest logische conclusie: met 50% extra licht de productie van 100  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  erbij. De schijnbaar hogere efficiëntie wordt echter veroorzaakt doordat de eerste 100  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  maar gedeeltelijk heeft bijgedragen aan de productie vanwege de drempeling. Hoe hoger de drempel des te groter de toename in de efficiëntie van extra licht zal lijken te zijn.

De hier beschreven vergissing wordt nog steeds veel gemaakt en leidt tot grote verwarring in de discussie over belichtingsefficiënties van lampen en armaturen, vooral ook omdat er rasverschillen zijn in de hoogte van de drempeling. Vandaar het belang van een goede theoretische onderbouwing van de hoogte van de drempel waaronder geen productie plaats vindt en die zoals we gezien hebben rassespecifiek is.



---

# Optimale lichtverdeling

---

Een optimale lichtverdeling in het gewas heeft twee aspecten om rekening mee te houden:

1. Een zo hoog mogelijke lichtbenuttingsefficiëntie.
2. Een optimale temperatuuropbouw in het gewas (Hoofdstuk 5).

## 4.1 Conclusies analyse 'Optimale lichtverdeling'

- In de winter neemt de productie bij grote tomaten (Komeett) vrijwel lineair toe met een hogere fractie tussenbelichting.
- Voor de kleinere tomaten is er een optimum bij  $150 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  SON-T boven en  $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  LED tussen.
- De optimum verhouding tussen/boven verschuift naar hogere waarden bij een hogere temperatuur van de kaslucht en bij een hoger aantal stengels (=stimulering van de sink). Bij 4 stengels is het optimum voor Sunstream  $100/100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .
- In het najaar zijn de positieve effecten van tussenbelichten veel geringer en is er zowel voor grote als kleine tomaten een optimale situatie bij een gelijke verdeling van  $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  SON-T boven en LED tussen.
- Het is duidelijk dat er grote interacties zijn tussen ras, plantdatum en verwachte effect. In het ideale geval zou de lichtverdeling in het gewas aangepast moeten worden aan de veranderende omstandigheden. Een rasafhankelijke optimalisatie is gewenst. Verder is het te overwegen om de lichtverdeling over het seizoen in afhankelijkheid van de stengeldichtheid aan te passen.
- Door de grotere behoefte van additionele warmte bij LED-belichting wordt, in het geval dat een WKK in de energiebehoefte voorziet, deze vaker aangesproken. Wanneer het gebruik van LED's toeneemt zal daardoor in vergelijking met SON-T een groter percentage van de elektriciteitsbehoefte worden gedekt door de WKK, als het gebruik daarvan is afgestemd op de warmtebehoefte.
- Bij gebruik van WKK is een bijbelichting van 100 micromol ongeveer in balans met de warmtevraag in de donkerste maanden.

## 4.2 Lichtbenuttingsefficiëntie

De lichtbenuttingsefficiëntie wordt groter:

1. Naarmate meer licht wordt onderschept.
2. Naarmate de fotosynthese van het geabsorbeerde licht groter is.

Punt 1 wordt bereikt door voldoende bladeren aan te houden en een stengeldichtheid te kiezen waarbij de source-sink verhouding gelijk is aan 1. Punt 2 wordt bereikt door te voorkomen dat bladeren licht-verzadigd geraken. Een betere lichtverdeling over het gewas (lees: tussenbelichting) heeft daarom positieve effecten op de totale gewasfotosynthese.

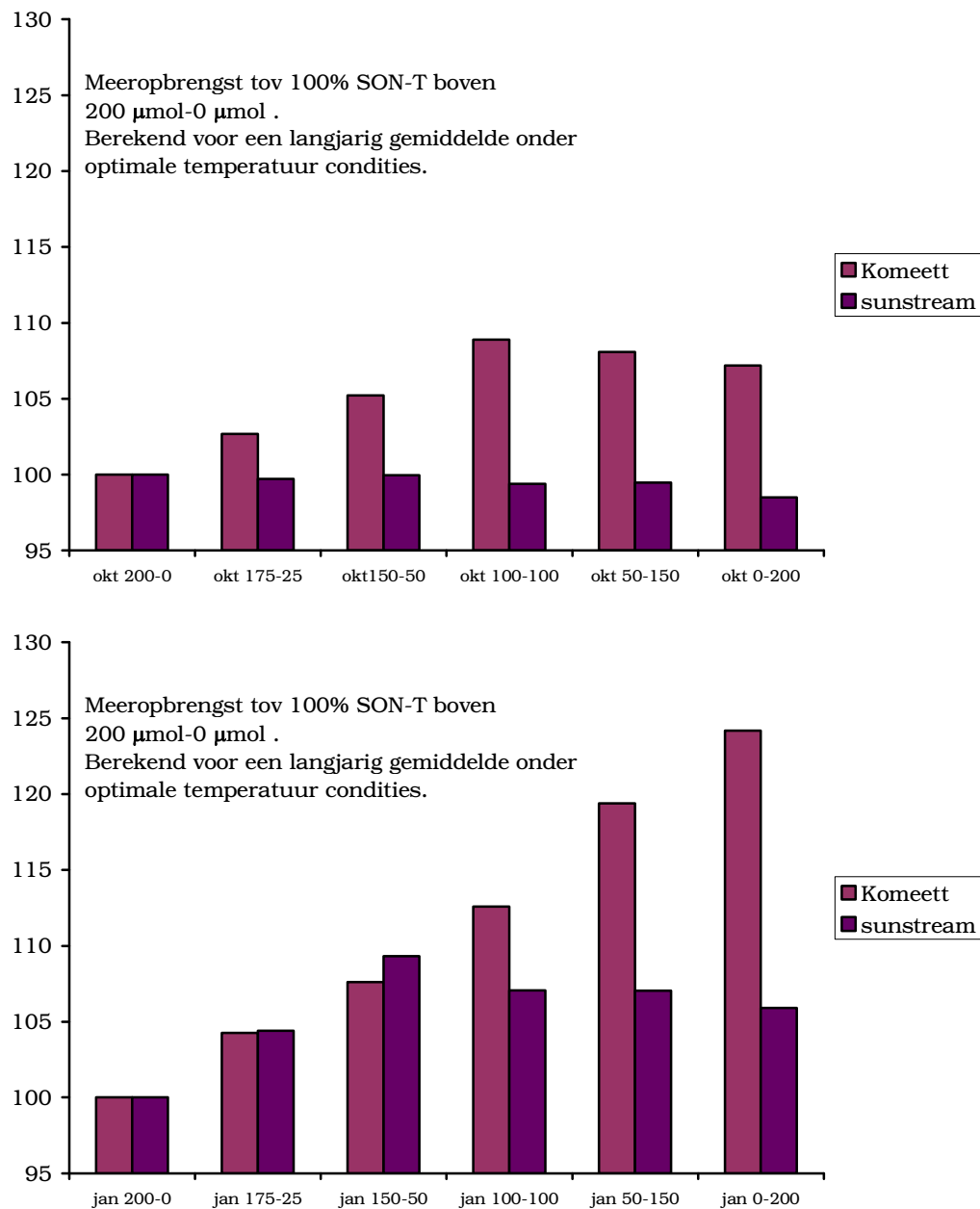
Wanneer we met alle factoren rekening houdend berekeningen maken voor de verwachte opbrengst van een vol producerend gewas per maand, krijgen we een beeld dat veel mogelijkheden biedt voor optimalisatie (figuur 4.1). Op de eerste plaats is er niet zoiets als een 'vaste beste verhouding' tussen bovenbelichting en tussenbelichting. Op de tweede plaats blijkt het effect van LED's meer bepaald te worden door de positie van de armaturen, dan door het feit dat het LED- of SON-T armaturen zijn die ertussen hangen en op de derde plaats is er een belangrijk effect van het ras. Bij het raseffect spelen de temperatuureffecten een cruciale rol (paragraaf 5.3). We willen dan ook benadrukken dat de effecten van de meeropbrengsten alleen tot uiting komen bij de optimale temperatuurverdeling over het gewas.

In de winter (onderste grafiek figuur 4.1) neemt de productie bij grote trostomaten vrijwel lineair toe met een hogere fractie tussenbelichting.

### 4.2.1 Compensatie van raseigenschap door aanhouden scheuten

Voor de kleinere trostomaat is er een optimum bij  $150 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  SON-T boven en  $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  LED-T tussen. Dit optimum wordt bepaald door de eigenschappen van lichtonderschepping en de warmtebalans in relatie tot de sinkfunctie van de vruchten. Meer sinks betekent een relatief grotere behoefte aan het aandeel tussenbelichting. Dat betekent meer tussenbelichting bij een hogere temperatuur van de kop en/of vruchten en bij een hoger aantal stengels (=stimulering van de sink). Bij 4 stengels is het optimum 100/100.

In het najaar (bovenste grafiek) zijn de positieve effecten van tussenbelichten veel geringer en is er zowel voor grote als kleine trostomaten een optimale situatie bij een gelijke verdeling van  $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  SON-T boven en LED tussen. Het is duidelijk dat er grote interacties zijn tussen ras, plantdatum en het verwachte effect.



**Figuur 4.1.** Relatieve opbrengstverandering bij een toename van de fractie tussenbelichting voor de rassen Komeett en Sunstream in oktober (bovenste grafiek en in januari (onderste grafiek). De berekeningen zijn gemaakt voor een stengedichtheid van 3. Maximale belichtingsduur 18 uur. De bijchriften op de X-as:  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  SON-T of LED

---

# Temperatuur onbalans

---

Assimilatiebelichting is een grote post van de totale energiebalans in een kas. De bijdrage bestaat uit stralingswarmte en convectieve warmteoverdracht, de laatste voornamelijk via de armaturen. Belichting met SON-T geeft per Watt geïnstalleerd vermogen ongeveer evenveel PAR als belichting met LED. De totale straling (PAR + NIR) is echter met SON-T tweemaal zo hoog. Grofweg kan gesteld worden dat de NIR straling van SON-T equivalent is aan het convectief warmteverlies in de LED-chips en de armaturen. Dit heeft uiteraard consequenties voor de warmtebalans in het gewas. In dit hoofdstuk worden die consequenties berekend en wordt een analyse gemaakt van effecten daarvan op de teelt. Ook worden er oplossingen aangedragen om de effecten van een onbalans in de temperatuurverdeling op te heffen.

## 5.1 Conclusies analyse 'Temperatuur onbalans'

1. LED-belichting geeft een grotere onbalans in temperatuuropbouw dan SON-T belichting
2. Wanneer de temperatuur op verschillende hoogtes in het gewas bij de LED tussenbelichting hetzelfde zou zijn als in de SON-T dan zou de opbrengst met LED tussenbelichting 8% hoger kunnen zijn dan de gerealiseerde opbrengstverhoging in praktijkprojecten (0-12%).
3. De verschillen in koptympatuur worden gedeeltelijk verklaard door het NIR aandeel in de SON-T.
4. Een belangrijk bijkomend effect bij SON-T, is een verminderde uitstraling van warmte naar kasdek en scherm door opwarming van de armaturen.
5. De plaats waar de warmte LED bij LED-tussenbelichting wordt overgedragen is van cruciaal belang voor de warmtebalans. In de huidige berekeningen is verondersteld dat de stralingswarmte uit het PAR-aandeel wel, maar de convectieve warmte aan de achterkant van het armatuur niet **in** het gewas terecht komt maar **daarboven**. Bepaling van de exacte warmteoverdracht door LED armaturen is een belangrijk onderzoeksdoel. Als de warmte van de chips op een of andere manier convectief in de bovenste gewaslaag zou komen, in plaats van naar boven afgevoerd te worden, dan kan in dat geval niet anders geconcludeerd worden dat de verschillen in warmteverdeling tussen SON-T en LED tussenbelichting alleen veroorzaakt worden door verschillen

in langgolvlige uitstraling naar scherm en kasdek (punt 4) en/of verschillen in afvoer van latente warmte door verdamping.

6. Nauwkeurige metingen van verticale temperatuurverdeling in combinatie met bladtemperaturen zijn belangrijk om aan te tonen waar de warmte van de LED armaturen blijft.
7. Door de lage extinctie coëfficiënt van NIR, kan die straling van SON-T diep doordringen in het gewas. Er is dus niet alleen een positief effect op de bladafplitsing maar ook op de ontwikkelingssnelheid van de jonge vruchten en een beetje op de oudere vruchten.

## 5.2 Ontkoppeling tussen IR en PAR-licht

Het effect van de ontkoppeling van PAR en warmtestraling kan met het model effectief worden geëvalueerd. Vrijwel alle kortgolvlige straling (zowel PAR als NIR) komt uiteindelijk, na absorptie door het blad, vrij als warmte. Het aandeel PAR dat door de fotosyntheseprocessen wordt benut is niet groter dan 5% en van het NIR aandeel 0%. Omdat SON-T en daglicht naast PAR ook veel NIR bevatten, is het warmtepatroon met LED's, waar geen NIR in het emissiespectrum aanwezig is, anders dan met daglicht of SON-T. Of dit positief dan wel negatieve consequenties heeft, is uiteraard helemaal afhankelijk van het type teelt en het seizoen. Bij hoge buitentemperaturen is een lage NIR (bijvoorbeeld door relatief veel LED te installeren) positief omdat de lichtbron de kop en de vruchten op temperatuur houdt. Omgekeerd kan juist een hoge NIR straling positief zijn wanneer het gewas te generatief is. Een algemene regel is daarom niet te geven.

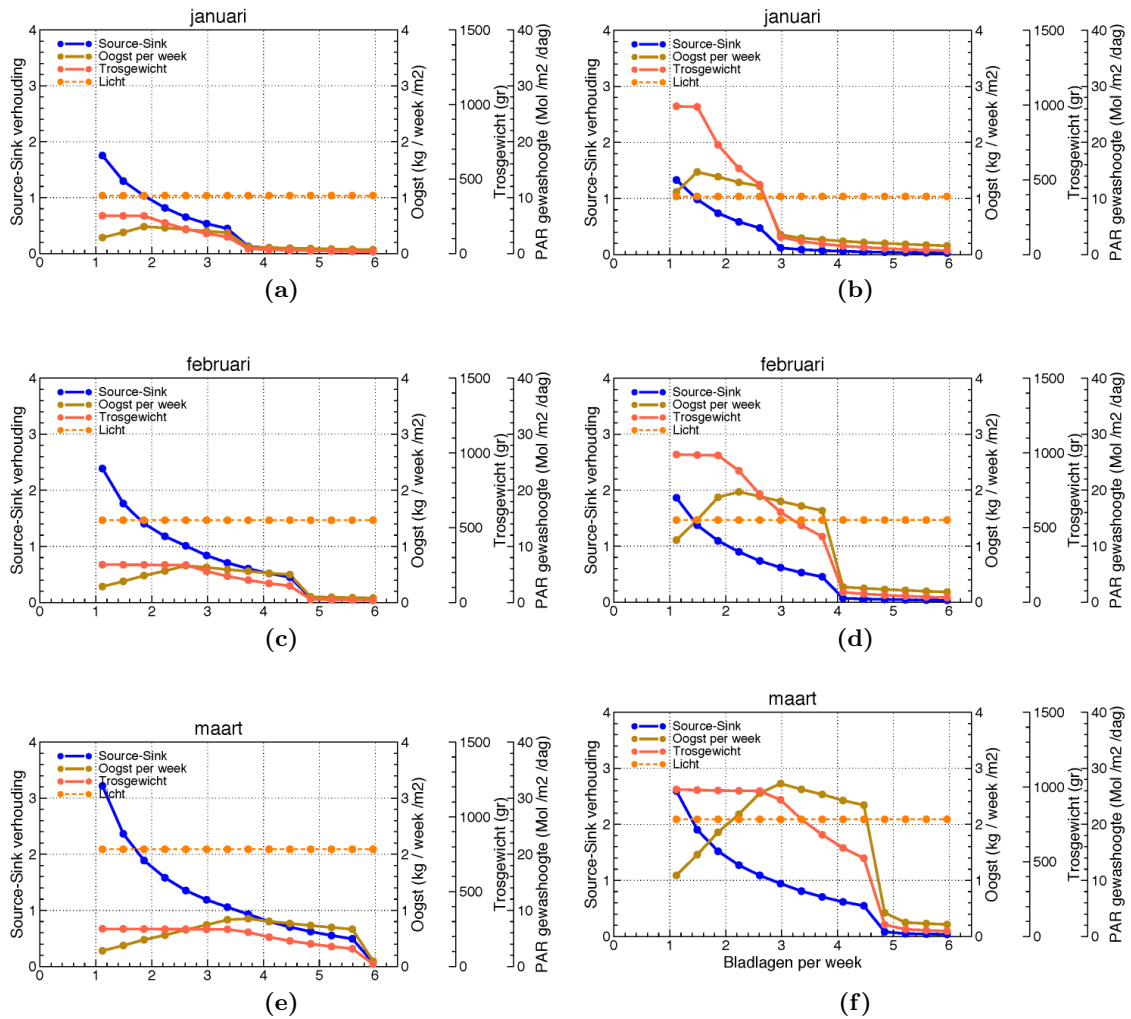
Zeker in de belichte teelt is de temperatuurregeling het stuur waarmee richting wordt gegeven aan de balans tussen assimilaten-aanbod en assimilaten-gebruik. De efficiëntie van belichting voor de fotosynthese zal toenemen bij hogere temperatuur tot een bepaald optimum. Daarnaast heeft de temperatuur een positief effect op de uitgroeisnelheid van bladeren (betere lichtonderschepping) en de snelheid van vruchtgroei. Met het Explorer model krijgt deze balans een extra dimensie omdat voor beide kanten een onafhankelijke boekhouding wordt bijgehouden. Het is daarom mogelijk om de effecten van een onbalans zeer realistisch te berekenen.

## 5.3 Temperatuurbehoefte

De snelheid van bladafplitsing bepaalt de snelheid van trosaanleg, die op zijn beurt, vermenigvuldigd met de snelheid van uitgroei de uiteindelijke vruchtsink uitmaakt. Hoe meer sinks er worden afgesplitst des te groter de behoefte aan assimilaten. In figuur 5.1 is de bladafplitsingssnelheid voor de rassen Komeett en Sunstream geoptimaliseerd als functie van het gemiddelde maandelijks assimilatenaanbod.

De optimalisatie is gebaseerd op de draagkracht van de plant, die wordt weergegeven door de blauwe lijn: de sink-source balans. Wanneer de sink-source balans gelijk is aan 1 is de plant in evenwicht en worden er juist voldoende assimilaten aangemaakt om te voldoen aan de vraag van de vruchtuitgroei, die wordt gedreven door de trosafplitsing (= bladafplitsing gedeeld door 3) en de vraag van overige sinks zoals bladeren wortels en stengels.

Voor deze studie hebben we een assimilatiebelichting van  $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Het aantal stengels is 3. Aan de hand van figuur 5.1a zullen we het principe van de

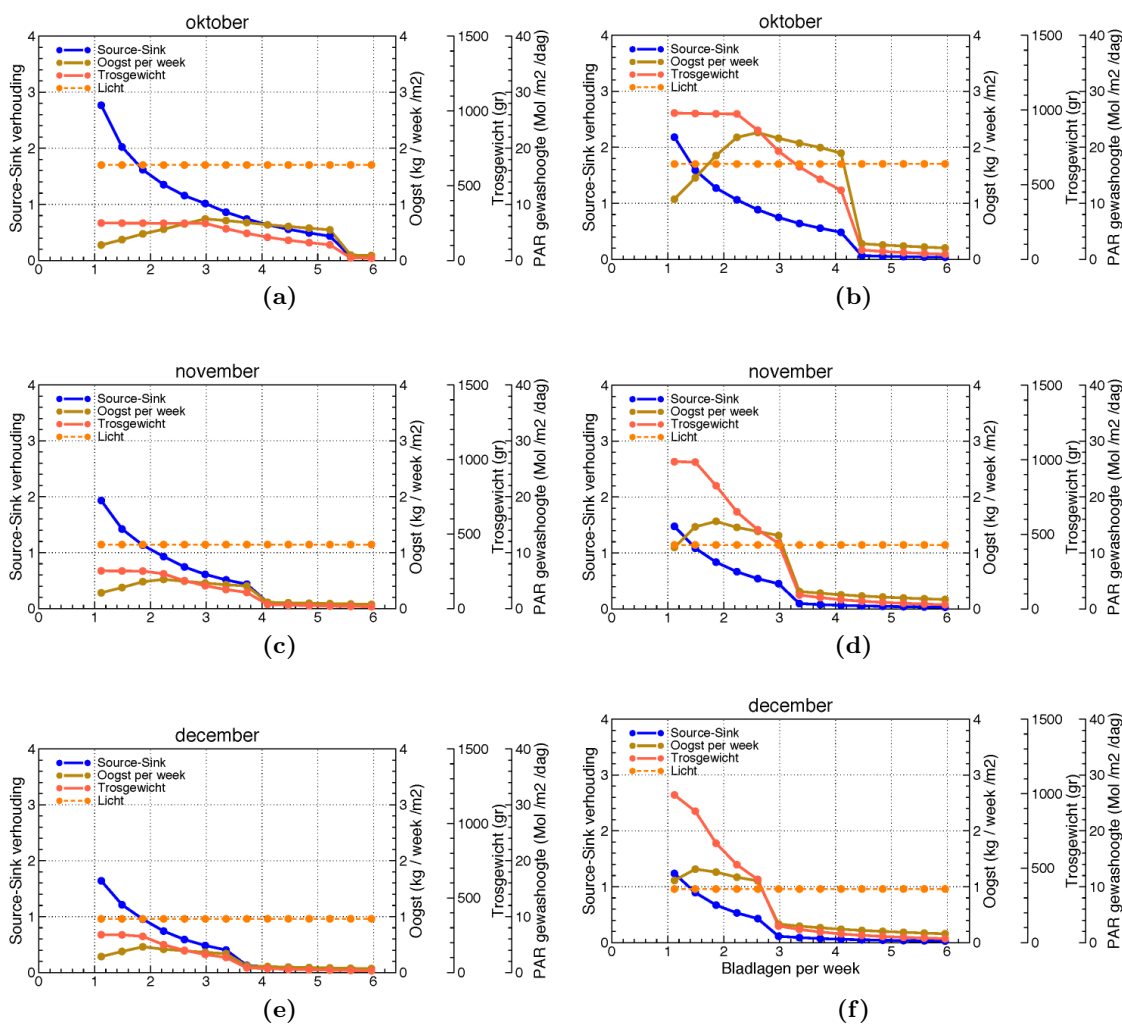


**Figuur 5.1.** Effect van de snelheid van bladafplitsing per week (x-as), op Trosgewicht (beige), Source-sink verhouding (blauw) en Gemiddelde oogst per week (beige). De oranje lijn is de gemiddelde PAR aan de kop van het gewas in de betreffende maand. Linker kolom het ras Sunstream en rechterkolom het ras Komeett

optimalisatie verder uitleggen. De rechter kolom zijn berekeningen voor het ras Sunstream en de linker kolom voor het ras Komeett. In januari is de optimale bladafplitsingssnelheid bij een stengeldichtheid van 3 ongeveer 1,9. Dit is het punt waar de blauwe lijn een source-sink verhouding van 1 snijdt. Zo'n lage bladafplitsingssnelheid is alleen te realiseren bij zulke lage temperaturen dat de vruchtuitgroei stopt. De oplossing is om de stengeldichtheid te verlagen waardoor het aantal uitgroeiende trossen per m<sup>2</sup> daalt.

Voor het ras Komeett dat een hogere assimilatenbehoefte heeft per tros zal de gewenste bladafplitsingssnelheid (of de stengeldichtheid) lager zijn dan voor het ras Sunstream. De optimale bladafplitsing wordt met  $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  bijbelichting en een stengeldichtheid voor sunstream begin maart bereikt en voor Komeett eind maart. Met deze procedure kan een blauwdruk worden ontwikkeld voor het aantal



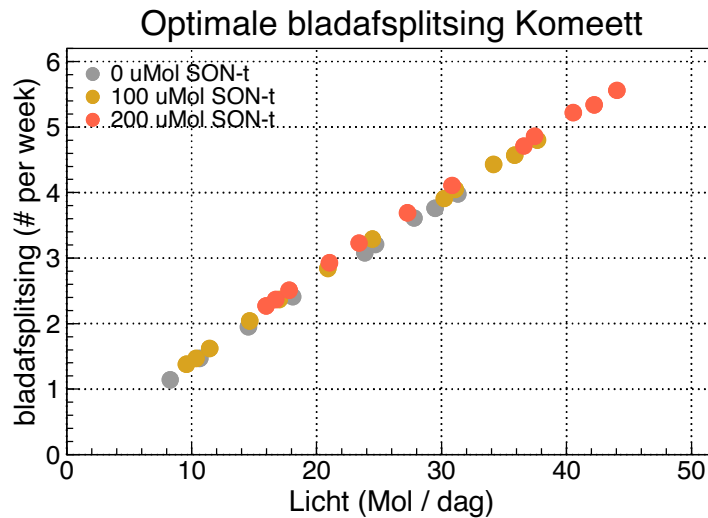
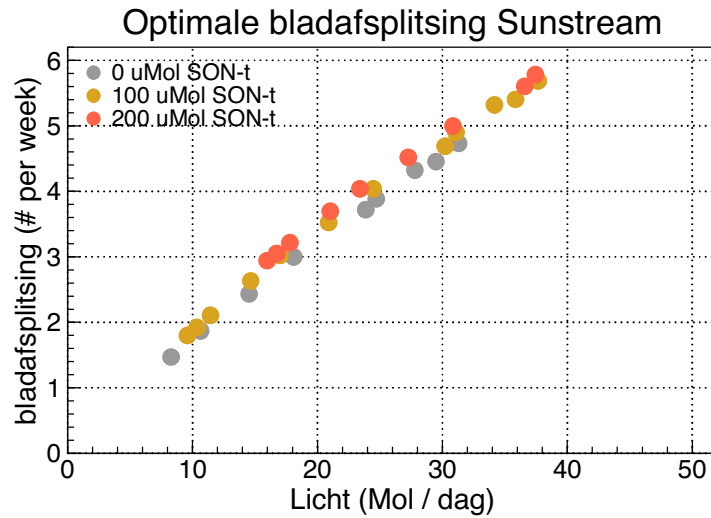


**Figuur 5.2.** Effect van de snelheid van bladafplitsing per week (x-as), op Trosgewicht (beige), Source-sink verhouding (blauw) en Gemiddelde oogst per week (beige). De oranje lijn is de gemiddelde PAR aan de kop van het gewas in de betreffende maand. Linker kolom het ras Sunstream en rechterkolom het ras Komeett

stengels dat moet worden aangehouden. Belangrijk is daarbij dat het bladaantal hoog is zodat er veel van het assimilatielicht wordt opgevangen.

## 5.4 Timing van eerste scheut

Een onderdeel van de Optomaat Explorer is de mogelijkheid om blauwdrukken voor toekomstig teeltmanagement te testen en om de resultaten van reeds afgeronde teelten te evalueren. Uiteraard is het ook mogelijk om op het "toekomstig microklimaat" varianten los te laten en die in interactie met het teeltmanagement door te rekenen. In de hierna beschreven analyses is gerekend met een stengeldichtheid van 3, tenzij anders is aangegeven. De effecten van extra scheuten zijn een methode



**Figuur 5.3.** Gewenste snelheid van bladafplitsing als functie van de stralingssom bij een stengeldichtheid van 3. Wanneer de gewenste bladafplitsing boven de waarde 3,5 is het niet realistisch om te verwachten dat dergelijke snelheden ook daadwerkelijk worden gehaald. De oplossing is dan een extra stengel aan te houden om te compenseren voor het gebrek aan mogelijkheden om sneller bladeren af te splitsen dan 3,5 per week.

om de sinkactiviteit van het gewas te verhogen. Wanneer de berekende gewenste bladafplitsing bij hoge dagelijkse lichtsommen boven een waarde 3,5 uitkomt, is het niet realistisch om te verwachten dat dergelijke snelheden ook daadwerkelijk worden gehaald. De oplossing is dan een extra stengel aan te houden om te compenseren voor het gebrek aan mogelijkheden om sneller bladeren af te splitsen dan 3,5 per week. De positieve werking van meer scheuten wordt uiteraard steeds groter bij hogere lichtintensiteiten, vanwege de initiële verhoging van de sink/source balans. Later draait dat effect om vanwege de hogere lichtonderschepping. We kunnen de

conclusie trekken dat de lichtonderschepping naar een veel hoger plan kan worden getild. Overigens neemt de gemiddelde vruchtgrootte in Januari met 8–12% af door een extra stengel. Het is mogelijk dat deze afname in het vruchtgewicht, commercieel gezien, niet opweegt tegen de hogere producties. Dat hangt af van de prijsvorming.

Uit de helling van de lijnen in figuur 5.3 is af te lijden dat de gewenste bladafplitsing bij dezelfde gerealiseerde lichtintensiteiten, hoger wordt als het aandeel SON-T toeneemt. Dit geldt vooral voor het sink-gelimiteerde ras Sunstream en is het gevolg van de gewijzigde warmtebalans. De verschillen zijn echter opvallend gering wat erop duidt dat SON-T licht en daglicht qua energiebalans erg op elkaar lijken.

## 5.5 Energie balans LED SON-T

Het onderdeel van de Explorer Kasmodellen waarin effecten van de energiebalans worden beschreven is op fysische wetmatigheden gestoeld. Het is robuust en bevat geen statistische beschrijvingen. Er is een gedetailleerde subroutine waarmee de interacties met het gewas worden doorberekend, voornamelijk geconcentreerd op huidmondjesgeleidbaarheid per bladlaag en de wisselwerking tussen verdamping en andere warmte processen. De temperatuur van de bladeren wordt in het model berekend uit de energiebalans tussen verdamping, convectief warmtetransport (van/naar de lucht bij het blad), de zichtbare straling (direct en diffuus), het nabij infrarood en de warmtestraling. De bladtemperatuur wordt berekend voor een aantal gewaslagen. De verdeling van de straling in het gewas wordt berekend als een verticaal profiel dat verschillend is voor direct zichtbaar licht, diffuus zichtbaar licht, direct NIR (InfraRood A) diffuus (NIR) en InfraRood C (warmtestraling). Daarbij wordt rekening gehouden met de bodemreflectie en met de warmtestraling van/naar het glasdek/energiescherm en het ondernet. Eventueel kan daaraan nog worden toegevoegd een warmtelamp in het InfraRood B.

Allerlei toevallige lokale verschillen tussen bladtemperatuur voortkomend uit bladhoek en onderlinge beschaduwning worden niet in rekening gebracht. Berekende gewasproducties geven ons tot dusver geen aanleiding te veronderstellen dat dergelijke verschillen van groot belang zijn. Het probleem treedt al helemaal niet op bij lichtniveaus waarbij de fotosynthese lineair van de lichtsterkte afhangt.

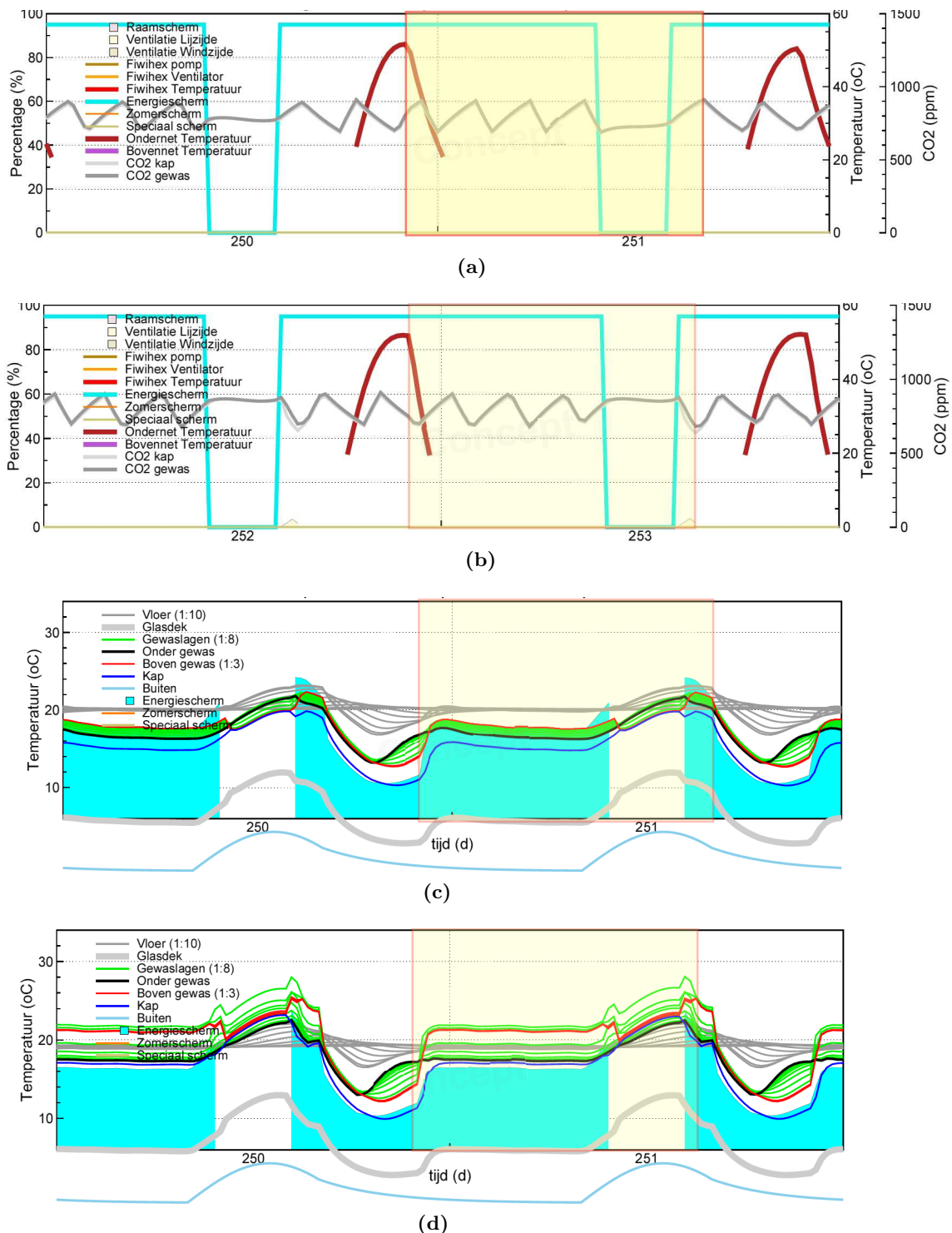
Wanneer we de meest logische gedachtegang volgen dat de alle warmte van de LED armaturen terecht komt in de gewaslaag op de betreffende hoogte van die armaturen krijgen we een beeld waarbij op details verschillen zijn te zien maar op hoofdlijnen een grote overeenstemming is tussen beide belichtingsscenario's. In de nacht en het begin van de belichtingsperiode is de temperatuurgradiënt iets groter bij de LED behandeling. De temperatuur onderin het gewas is iets hoger dan in de SON-T door meer warmtelevering van het ondernet (figuur 5.4a en figuur 5.4b). Tijdens de belichtingsperiode zien we bij SON-T een kleinere gradiënt dan bij LED. De temperatuur in de LED behandeling is onderin lager vanwege de geringe NIR. NIR dringt diep door in het gewas en zorgt in de SON-T voor opwarming. Het meest treffend is de hoge gesimuleerde koptemperatuur in de LED behandeling (rode lijn in 5.4d) in vergelijking met 5.4c in de SON-T. Dit wordt dus gerealiseerd wanneer we aannemen dat de convectieve warmte van de LED's in de kop van het gewas terecht komt. De uitkomst van de berekeningen geven dus een ander beeld dan de metingen. Blijkbaar gaat de warmte verloren. Een ander mogelijkheid is dat de temperatuur van de kop bij LED tussenbelichting in feite hoger is dan we nu denken. Het is bekend dat bij infrarood metingen in Bleiswijk hogere temperaturen werden gemeten maar dat dit werd toegeschreven aan het feit dat de armaturen zelf

werden meegenomen bij de meting. Vooralsnog kunnen we hier geen uitsluitel over geven. Het is echter waarschijnlijk dat het direct effect van SON-T meer onderin het gewas een effect heeft. Indirect is er ook een positief effect bovenin vanwege de genoemde geringere uitstraling.

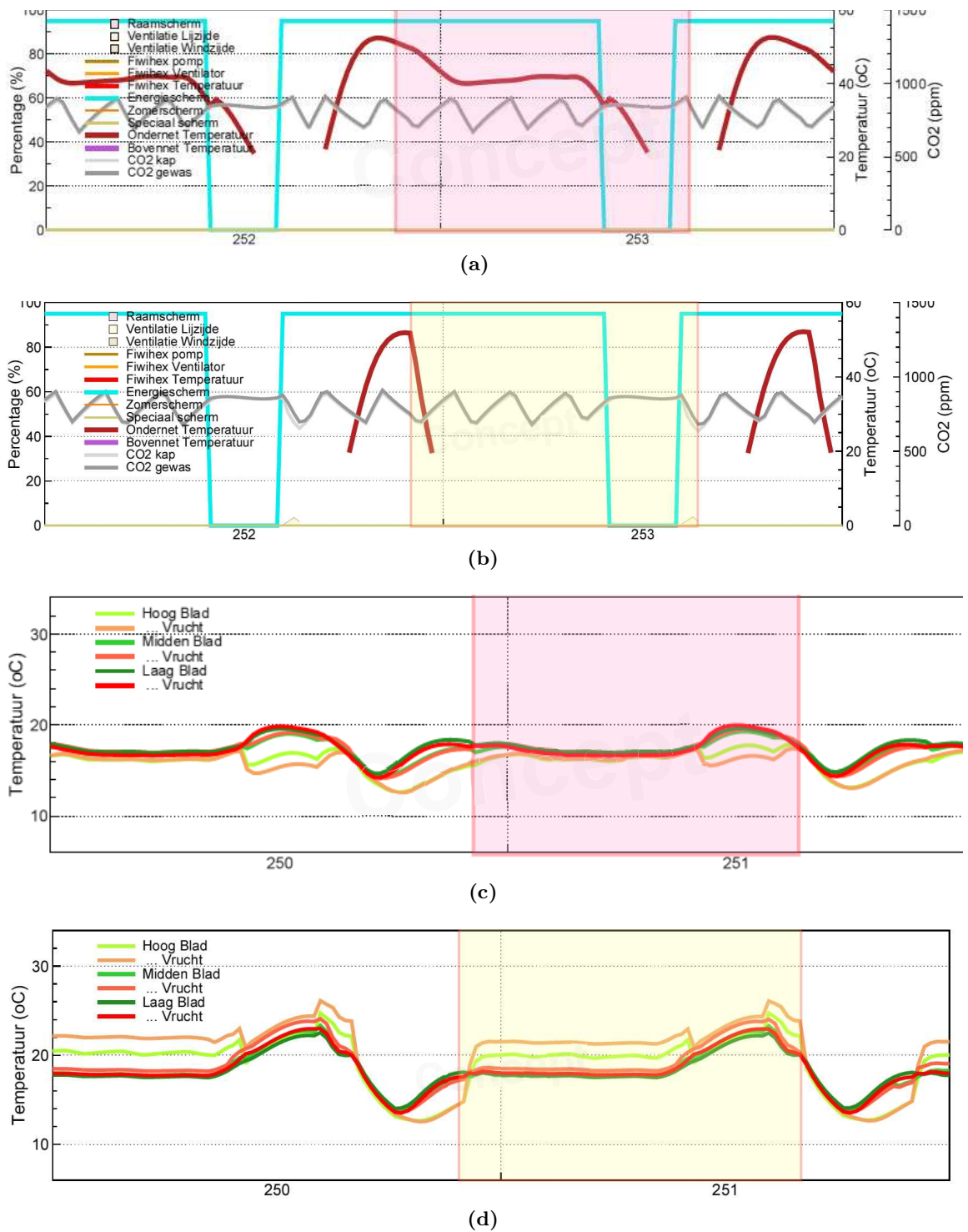
De plaats waar de warmte van de LEDs wordt overgedragen is van cruciale belang voor de warmtebalans. Als de warmte van de chips op een of andere manier convectief wordt afgevoerd en niet in de gewaslagen, grenzend aan de LED armaturen terecht zou komen, dan zien we een extreem groot verschil tussen de warmteverdeling voor de scenario's 'warmtebehoud' (figuur 5.5d) en 'warmteverlies' (figuur 5.5c). In scenario 'warmtebehoud' komt alle warmte van de LED-chips in het gewas, grenzend aan de armaturen terecht. Vandaar vindt vervolgens latente warmteoverdracht plaats door verdamping (afhankelijk van de huidmondjesgeleidbaarheid) en convectief warmtetransport naar andere bladeren en de luchtlagen boven het gewas. In het scenario 'warmteverlies' gaan we ervan uit dat alle warmte uit de LED-chips convectief naar lagen boven het gewas diffundeert en daar (afhankelijk van schermstand) naar het kasdek wordt afgevoerd.

In Figuur 5.5a en figuur 5.5b zien we dat in het geval van 'warmteverlies', de vraag van het ondernet aanzienlijk verhoogd is, vooral in de belichtingsperiode in vergelijking met het scenario 'warmtebehoud'. Door de grotere warmtevraag, wordt het convectieve warmteverlies naar het kasdek gecompenseerd en omdat er nauwelijks opwarming van bovenaf is, is er ook geen temperatuurgradient tijdens de belichtingsperiode. Wanneer we de profielen in figuren 5.5c en figuur 5.5d vergelijken, dan komt het patroon in figuur 5.5c dichterbij de werkelijkheid dan figuur 5.5d en dat zou dus betekenen dat in de praktijk de warmte van de LED armaturen als convectieve verliezen verloren gaat. Het is waarschijnlijk dat dit inderdaad het geval is. De warmte kan als een parallelle stroom worden meegenomen in de opwaartse convectieve stroom, die in een kas meestal optreedt. Het betreft in deze scenario analyse weliswaar erg hoge lichtintensiteiten ( $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) en de effecten zijn daardoor misschien wat uitvergroot maar het illustreert hoe belangrijk de kwestie van de warmteafgifte door belichtingsarmaturen kan zijn.

De vruchttemperatuur is bij de tomatenteelt van groot belang. De ontwikkelingsnelheid en de daaraan gekoppelde rijpingsduur is voornamelijk afhankelijk van die temperatuur. Bij gebruik van het ondernet zal de temperatuur van de onderste vruchten sterk toenemen, ook omdat de vruchten nauwelijks verdampen. Daardoor is het gesimuleerde effect van het ondernet op de vruchten onderin ook groter dan op de bladeren op die plek (oranje versus groen in figuren 5.5c en 5.5d). Dat geldt dus ook voor de afrijpende vruchten onderin. Het overheersend effect van een LED belichting in het scenario 'warmtebehoud' (figuur 5.5d) is een snelle afrijping van de onderste vruchten en een iets hogere trosontwikkelingssnelheid. Dit zou in elk geval tot kleinere vruchten moeten leiden. Ook hierin vinden we een aanwijzing dat dit scenario niet realistisch is omdat in het algemeen onder LED's grotere vruchten worden geoogst.



**Figuur 5.4.** A) SON-T ( $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) en B) LED ( $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Regeling kas voor het ras Sunstream in januari 2010 (2 dagen). Setpoint  $24.0^\circ\text{C}$ . A en B) Temperaturen van het ondernet (bruine lijnen). Lichtgele vakken markeren de periodes van assimilatiebelichting (22:00u tot 16:00 u). Lichtblauwe lijn: energiescherm open/dicht. De zwarte verticale stippellijn geeft de aanvang van de dag aan. C) SON-T en D) LED. Temperatuurprofielen in de kas. De rode lijn geeft het verloop van de temperatuur in de bovenste gewaslaag. De lichtgroene lijnen geven het temperatuurverloop van de lagere gewaslagen en de zwarte lijn de onderste gewaslaag. De lichtblauwe vlakken laten het verloop van de temperatuur van het energiescherm zien en de donkerblauwe lijn de kastemperatuur in de kap boven het scherm.



**Figuur 5.5.** LED ( $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Scenario analyse waarbij de warmte van de LED armaturen verloren gaat door convectief transport naar kasdek en scherm (figure a en c) ofwel direct wordt toegewezen aan de gewaslagen waar de armaturen hangen (b en d). Regeling kas voor het ras Komeett in januari 2010 (2 dagen). Setpoint  $18.0^\circ\text{C}$ . In figuren a en b is de gerealiseerde buistemperatuur van het ondernet aangegeven. Als de verwarming uit staat is de lijn onderbroken. In figuren c en d zijn de temperaturen van bladeren en vruchten op 3 hoogtes gegeven. De kleurencodering voor de bladeren is groen en voor de vruchten rood. Lichte kleuren hebben een positie bovenin donkere kleuren meer onderin.



---

# Aanvullende warmtevoorziening

---

Bij LED tussenbelichting moet iets meer warmte in het gewas worden gebracht. De hoeveelheid is nog ter discussie vanwege de onduidelijkheid over het convectieve warmtetransport van de LED armaturen (paragraaf 5.5). Bij een normale buisverwarming gebeurt dat door meer buis bij te zetten (figuur 5.4). Dat lost het temperatuurtekort voor de afrijpende vruchten op (figuur 5.5b) maar niet voor de kop. Extra warmte bovenin kan uitkomst brengen.

## 6.1 Conclusies analyse 'Aanvullende warmtevoorziening'

- Het heeft de voorkeur om een tekort aan warmte bij de LED behandelingen te compenseren met een NIR bron die PAR bevat. IR stralers hebben weliswaar het gewenste effect maar bieden geen meerwaarde. Het aantal stengels is een cruciale factor bij de beoordeling van het temperatuur effect (figuur 6.1).
- De effecten van NIR op de gewastemperatuur worden overigens vaak ernstig overschat. Veel van de effecten zijn terug te voeren op verminderde langgolvlige uitstraling.
- Een belangrijk bijkomend effect is een verminderde uitstraling van de kop naar het scherm door opwarming van de SON-T armaturen.
- Een tweede kansrijke optie is sturing van koptemperatuur via een combinatie van scherm en groeibuis (liefst hoog).
- De sturing van de gewenste koptemperatuur kan worden ontwikkeld op basis van schermstand en belichting (NB het probleem van de convectieve LED warmte dient wel opgelost te zijn).
- Door de lage extinctie coëfficiënt van NIR, kan die straling diep doordringen in het gewas. Er is dus niet alleen een positief effect op de bladafplitsing maar ook op de ontwikkelingssnelheid van de jonge vruchten en een beetje op de oudere vruchten.

De verschillen tussen de energiebalans bij SON-T en LED zijn voor de integrale energiebalans nauwelijks verschillend. Dit is een verrassende conclusie als we die tegen het licht houden van de ervaringen uit praktijkproeven in de afgelopen jaren [Nederhof \*et al.\* \(2010\)](#). Het verschil wordt gemaakt doordat 40% van de energie bij SON-T als NIR en bij LED's als convectieve warmte wordt ingebracht.

Behandeling	stengels/m2	blad/week	source/sink	oogst (kg) /week	Trosgewicht (g)	PAR absorbed (mol/dag)	gram vers/mol inkomend licht	CO2 kg/dag	Kwh m2 (jan)	gas m3 (jan)
120 umol LED	2.5	2.50	0.85	0.37	179	4.78	4.97	380	33	12.3
120 umol LED	3	2.43	0.81	0.42	171	5.31	5.57	397	33	12.3
120 umol LED	3.5	2.37	0.77	0.45	164	5.76	6.09	410	33	12.4
120 umol LED	4	2.32	0.74	0.49	157	6.15	6.54	425	33	12.4
120 umolLED +37.2 W IR	2.5	2.56	0.83	0.37	172	4.75	4.91	382	51	8.5
120 umolLED +37.2 W IR	3	2.49	0.79	0.41	165	5.27	5.50	397	51	8.6
120 umolLED +37.2 W IR	3.5	2.43	0.75	0.45	158	5.72	6.01	409	51	8.6
120 umolLED +37.2 W IR	4	2.37	0.72	0.48	152	6.12	6.47	424	51	8.6
120 umolLED + 70 uMol SON-T	2.5	2.91	1.12	0.51	209	7.38	4.74	452	51	9.1
120 umolLED + 70 uMol SON-T	3	2.85	1.07	0.59	209	8.26	5.56	479	54	9.2
120 umolLED + 70 uMol SON-T	3.5	2.78	1.03	0.68	209	9.02	6.34	497	51	9.2
120 umolLED + 70 uMol SON-T	4	2.72	0.99	0.75	207	9.65	7.08	527	51	9.3

**Figuur 6.1.** De effecten van het aantal stengels (oplopend van 2,5 naar 4) en de toevoeging van NIR op een aantal opbrengstfactoren bij het ras Sunstream. NIR werd toegediend met een zuivere NIR A-B straler op 1 meter boven het gewas of via een extra SON-T belichting met een NIR hoeveelheid die gelijk was aan de NIR van de NIR A-B straler.

Het is met de huidige teelt van belang om bij LED tussenbelichting de kop van de plant op eenzelfde temperatuur te krijgen als met SON-T. Veel is daar niet voor nodig. De temperatuurverlopen onderin het gewas zijn bij SON-T niet veel anders dan bij LED. Hoe komt dat? Enerzijds omdat de NIR straling van de SON-T door de lage extinctiewaarde diep in de onderste bladlagen doordringt en daar de temperatuur verhoogt. Anderzijds omdat we ervan uitgaan (totdat het tegendeel is aangetoond) dat er toch aanzienlijke convectieve warmteverliezen van LED's optreden naar het compartiment boven het gewas. Hierdoor neemt de warmtevraag, vooral met een koud kasdek toe, waardoor onderin de buistemperatuur toeneemt en vervolgens de temperatuur van de onderste bladlagen toeneemt.

Conclusie: het heeft de voorkeur om een tekort aan warmte bij de LED behandelingen te compenseren met een NIR bron die PAR bevat = SON-T (figuur 6.1). Vooral bij een source gelimiteerd gewas zoals Komeett of bij een Sunstream met veel stengels heeft toevoeging van IR alleen een positief effect als ook het lichtniveau wordt verhoogd. In een situatie dat er sprake is van een sterke source limitering, werkt het toedienen van IR-straling averechts. Het is dus zaak om continu een beeld te hebben van de balans en dat is in praktijkcondities geen gemakkelijke opgave, vooral omdat effect en resultaat niet synchroon lopen. De directe effecten van NIR op de gewastemperatuur worden overigens vaak ernstig overschat. Veel van de effecten zijn terug te voeren op verminderde langgolvlige uitstraling.

Een tweede kansrijke optie is sturing van koptemperatuur via een combinatie van scherm en groeibuis (liefst hoog). IR stralers hebben weliswaar het gewenste effect maar bieden geen meerwaarde. De sturing van IR stralers is overigens wel makkelijker dan in eerste instantie gedacht (eenvoudige PID regeling op berekende bladtemperatuur). De risico's om in het geval van een sourcelimitering, het gewas te oversturen blijven echter levensgroot aanwezig tenzij de straling homogeen verdeeld kan worden over het gewas en het geïnstalleerde vermogen niet te groot is zodat een grote amplitude van de wisselingen voorkomen kan worden.

---

## Begrenzen belichtingsduur

---

Assimilatiebelichting en warmtebalans zijn niet onafhankelijk en opties voor energiebesparing dienen dan ook altijd op beide fronten te worden doorberekend. Energiebesparing door uitschakelen van de lampen is daarom niet zo voor de hand liggend 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 een  $300 \text{ W m}^{-2}$  straling in de praktijk al algemeen geaccepteerd. Vooral ook omdat de geleverde lampwarmte bij die instraling niet volledig benut kan worden. In tabel 7.1 is een schatting gemaakt van de effecten van het afschakelen van de assimilatiebelichting boven een bepaald stralingsniveau.

**Tabel 7.1.** Effecten van afschakelen van de assimilatiebelichting boven een bepaalde stralingsdrempel ( $\text{W m}^{-2}$ ) in de kas voor de maand januari 2010.

$\text{W m}^{-2}$	opbrengst (%)	KWh(%)	g vers/mol(%)
<b>Komeett</b>			
100	91	74	106
200	99	90	104
300	100	100	100
<b>Sunstream</b>			
$\text{W m}^{-2}$	opbrengst (%)	KWh(%)	g vers/mol(%)
100	98	74	85
200	100	90	94
300	100	100	100

Bij Sunstream kan maximaal 26% elektriciteit bespaart worden met slechts 2% opbrengstverliezen. Bij Komeett zijn de besparingsmogelijkheden aanzienlijk kleiner (10%) met een gering productieverlies van 2%. Een besparing van 26% is weliswaar mogelijk maar dan loopt het verlies aan productie op naar 9%.

De berekeningen geven een orde grootte van de te verwachten effecten. Ongetwijfeld zal de praktijk genuanceerder blijken te zijn. In een koude winter zal bij een sink gelimiteerd gewas al snel alle warmte van de lampen benut kunnen worden. Uitschakelen van de lampen bij een koud kasdek en een instraling van  $100 \text{ W m}^{-2}$  zorgt dan voor een acute toename van de warmtevraag van het ondernet. Uit

verkennende berekeningen blijkt het gasverbruik daardoor met 18% toe te nemen. Uiteraard is daar door een optimalisatie van de scherminstellingen verbetering in aan te brengen. De uiteindelijke economische evaluatie zal de doorslag geven. Factoren als het al dan niet inzetten van een WKK, warmtepompen of effectieve scherminstallaties hebben grote invloed op de uiteindelijke besparingscijfers. Met behulp van Explorer analyses kunnen de potentiële effecten van deze factoren worden berekend.

# Energiebesparing door schermtoepassing.

Samen met de sturing van de vruchttemperatuur (buis) kan een slimme regelalgoritme de behoefte aan warmte in de kop berekenen (zie paragraaf 5.3). Mogelijkheden om warmte toe te dienen zijn eerder besproken. Besparing op de toe te voegen warmte kan, aanvullend op het gebruik van een energiedoek, het beste behaald worden door, in de koudste maanden overdag, langgolvlige uitstraling (NIR-C) naar het kasdek te verminderen. Zeer lichte schermen die tevens als diffusor dienen zijn daarbij een goede optie. Er zijn in de winter grote besparingen mogelijk bij geringe productieverliezen. De besparingen op belichting (paragraaf 7) en schermen zijn niet additief omdat het gebruik van het XLS10-Ultra scherm een grote interactie vertoont met de soort belichting en de gehanteerde intensiteit.

**Tabel 8.1.** Kengetallen voor opbrengst en energie input in een gemiddelde januarimaand met SON-T en LED assimilatiebelichting. Effecten van dichttrekken van het scherm bij netto uitstraling. Het gesimuleerde energieverbruik heeft betrekking op de de teelt van Sunstream met een setpoint van 22.0°C dag in de maand januari 2010.

200 $\mu\text{mol}$	Source/Sink	Kg/week	Tros (g)	g vers/Mol	Kwh	m <sup>3</sup> gas
SON-T	0.98	0.72	216.92	6.03	53.09	3.61
SONt+XLS10-Ultra	0.96	0.70	208.34	6.00	53.09	2.95
LED	1.16	0.73	221.82	6.30	55.59	3.22
LED+XLS10-Ultra	1.13	0.73	218.25	6.46	55.59	3.00
150 $\mu\text{mol}$						
SON-T	0.76	0.55	169.71	5.67	39.82	5.59
SONt+XLS10-Ultra	0.73	0.54	162.97	5.69	39.82	4.61
LED	0.95	0.69	217.34	7.37	41.69	4.68
LED+XLS10-Ultra	0.92	0.67	207.28	7.37	41.69	4.06

## 8.1 Conclusies analyse 'Energiebesparing door schermtoepassing'

- Er zijn in de winter grote besparingen mogelijk bij geringe productieverliezen. 18% minder verwarming bij SON-T en 7.5% bij LED en slechts 3% minder opbrengst is mogelijk in de donkerste maanden bij een belichting van 200

$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

- Bij lagere lichtintensiteiten ( $150 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), neemt het besparingspercentage af voor SON-T (17.5 %) maar toe voor de LED (12.2%). De oorzaak is gelegen in de uitstraling naar het scherm en de verschillen in convectieve en NIR straling bij SON-T en LED's.
- Samen met de sturing van de vruchttemperatuur (buis) kan een slimme regelalgoritme de behoefte aan warmte in de kop berekenen. Toediening van die warmte is eerder besproken. Besparing op de toe te voegen warmte kan eenvoudig door in het licht langgolvlige uitstraling (NIR-C) naar het kasdek te verminderen. Zeer lichte schermen die tevens als diffusor dienen zijn daarbij een goede optie.
- De besparingen op belichting en schermen zijn niet additief omdat het scherm effect het grootst is bij een relatief hoge belichting.
- Bij hogere intensiteiten van de assimilatiebelichting wordt het effect groter.
- Bij langere dagen (vooral bij een lage kasdektemperatuur wordt het effect groter).
- Door de grotere behoefte van additionele warmte bij LED-belichting wordt in een toenemend percentage van de elektriciteitsbehoefte voorzien bij een toename van het percentage LED tussenbelichting.

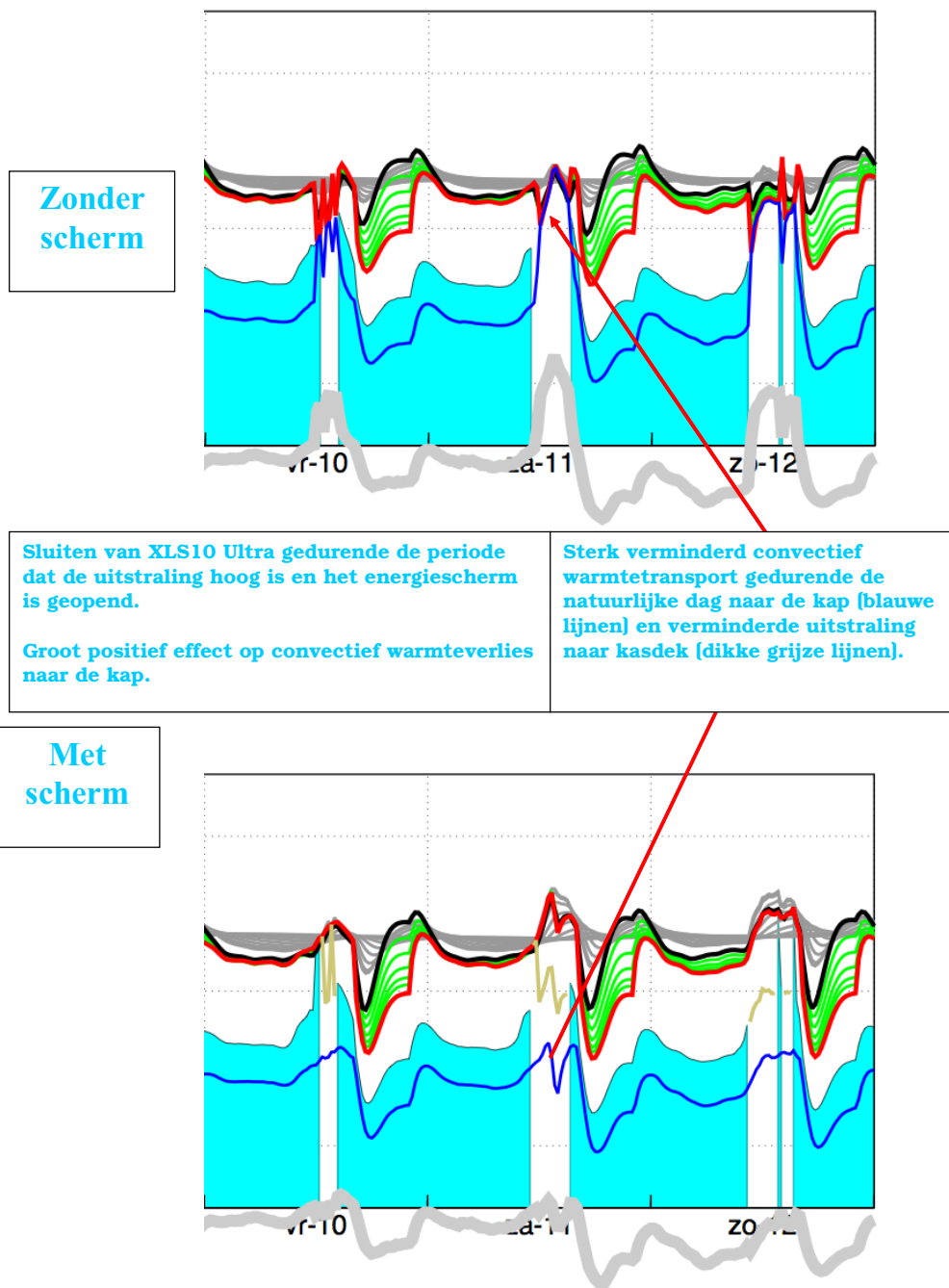
In figuur 8.1 is de werking van een transparant scherm, dat in de lichtperiode wordt toegepast, gedemonstreerd. De energiestromen die daar zijn uitgebeeld voor 2 willekeurige dagen in de maand januari 2010 zijn in tabel 8.1 voor de hele maand gekwantificeerd. Er is een sterk verminderd convectief warmtetransport gedurende de natuurlijke dag naar de kap (blauwe lijnen) en verminderde uitstraling naar kasdek (dikke grijze lijnen). De effecten van het scherm op de lichtbenutting zijn verwaarloosbaar klein. Wel zijn er effecten op de trosgrootte. Meer schermen heeft een verlaging van het trosgewicht tot gevolg. In de berekeningen is nog geen rekening gehouden met de kosten van ontvochtiging. De RV loopt bij gebruik van het scherm overdag hoog op en er valt niet aan te ontkomen dat daar op geanticipeerd zal moeten worden. De grenswaarden die daarbij gehanteerd gaan worden en de eigenschappen van het doek bepalen in grote mate hoe deze kosten gaan uitpakken. Op dit moment beschikken we over onvoldoende kennis om hier een schatting voor te maken.

## 8.2 Vervolgonderzoek

Een goed inzicht in energiestromen in een kas is een voorwaarde om gerichte energiebesparing te realiseren. Kwantitatieve kennis van gewasinvloeden op die energiestromen, zowel actief, bijvoorbeeld via verdamping als passief, door invloed op luchtbewegingen, is cruciaal om de effectiviteit van verschillende energiebesparingsopties in te schatten.

Hiervoor is een stevig inspanning vereist waarbij experimentele aanpak en modelaanpak elkaar versterken. Het is daarbij van belang om in te zoomen, zowel in de ruimte, in de tijd als in detail. Differentiatie van jaaropbrengsten naar maandelijkse producties, meer aandacht voor de ruimtelijke dynamiek van het kasklimaat en exploitatie van proceskennis door die in te bouwen in mechanistische modellen.





**Figuur 8.1.**  $150 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  LED belichting. Relatieve temperatuurverlopen van kasconstructie (lichtblauw=energiescherm, donkerblauw= lucht boven kap, grijs=kasdek, zwart = onderste bladlaag, rood = bovenste bladlaag, groen, tussenliggende lagen, donkergrijs = bodemlagen).

---

# Bijlage

---

## 9.1 Wat heb je aan modellen?

Bij modelberekeningen wordt nogal eens gedacht aan voorspellingen. Het voorspellen van absolute opbrengsten (in  $\text{kg m}^{-2}$ ) is echter moeilijk omdat allerlei gevoeligheden dan precies goed gekwantificeerd moeten zijn. Voorspellende berekeningen vereisen dus een goed getest model in combinatie met nauwkeurige waarden voor de kritische gewaseigenschappen.

Veel succesvoller kunnen modellen zoals de Explorer reeks ingezet worden in combinatie met metingen of proeven. Het gaat dan niet zozeer om nauwkeurige kwantitatieve voorspellingen, maar om de interpretatie van waarnemingen en metingen. Bijvoorbeeld:

- Het narekenen van het resultaat van een vergelijkende proef om te zien of de grootte van het waargenomen effect kan worden begrepen en in een "logisch" verband kan worden gebracht met fotosynthese, groei en ontwikkeling van de planten.
- Het verkennen van gevoeligheden: Welke eigenschappen van gewas of kas zijn het meest bepalend voor het resultaat?
- In een vergelijkende proef is in theorie alles hetzelfde behalve de onderzochte maatregel (wel of geen LED verlichting, verwarming boven of onder, etc.). In de praktijk zijn er echter nogal eens verschillen tussen de behandelingen die er eigenlijk niet hadden moeten zijn. Bijvoorbeeld een verschil in plantdatum of een technisch verschil tussen de gebruikte kassen. In zulke situaties kunnen we met behulp van modelberekeningen nagaan of het waargenomen effect mogelijk het gevolg kan zijn geweest van de storende factoren.
- Het kan ook wenselijk zijn om *voordat* een proef wordt opgezet een verondersteld effect door te rekenen om te zien hoe groot het *ongeveer* kan zijn.
- Een teelt kan worden doorgerekend op basis van gemeten licht en kasklimaat om te zien hoe goed het model werkt. Vervolgens kunnen verkennende berekeningen worden gemaakt: "Wat zou de opbrengst geweest zijn bij een andere belichting?", "Wat zou er gebeurd zijn bij een (iets) ander gewasmanagement?", "Wat zou de opbrengst geweest zijn als het weer dat van vorig jaar was geweest?"

Al deze toepassingen hebben met elkaar gemeen dat de modelberekeningen een vergelijkend karakter hebben en worden uitgevoerd in nauwe samenhang met metingen, de cijfers van een voorbije teelt of de waarnemingen tijdens een proef.

Samenvattend kunnen we stellen dat modelberekeningen in de eerste plaats tot doel hebben de interpretatie van metingen en proeven te vergemakkelijken en te verbeteren. Consistentie tussen enerzijds de empirische resultaten (van proef of teeltseizoen) en anderzijds een mechanistisch model verhoogt de zekerheid waarmee conclusies kunnen worden getrokken. En dat verhoogt de doelmatigheid van proeven. Modelberekeningen met een zuiver voorspellend karakter zijn slechts een extreem (en zeldzaam) geval: rekenwerk *zonder* nieuwe metingen.

## 9.2 LED's in de tuinbouw

De ontwikkeling van nieuwe Light Emitting Diode's (LED's) met een hoge lichtopbrengst biedt perspectieven voor de toepassing in de tuinbouw. Voor de **fotosynthese** is vooral het lichtniveau in het fotosynthetisch actieve deel van het spectrum (PAR gebied, ca 400–700 nm) bepalend met hierin een spectrale verdeling volgens de gevoeligheidscurve van het gewas (Monteith, 1973). Voor de **gewasontwikkeling** zijn vooral spectrale criteria belangrijk zoals bijvoorbeeld de verhouding rood-verrood en de hoeveelheid blauw licht (Monteith, 1973). De voordelen van LED's in vergelijking met de huidige SON-T belichting zijn:

- LED's emitteren geen warmtestraling waardoor de belichting dichtbij de plant gebracht kan worden geïnstalleerd.
- De uitstraling uit de kas kan met LED's sterk verlaagd worden, hetgeen een belangrijk milieu-aspect is.
- De intensiteit van LED's kan eenvoudig geregeld worden met dimmers i.t.t. de huidige kasverlichting.
- LED's zijn klein en handelbaar. Daardoor kunnen ze in matrices en rijen tussen het gewas worden geïnstalleerd, bijvoorbeeld op de aanwezige verwarmingsbuizen, waardoor geen lichtonderschepping van het daglicht optreedt.
- LED's hebben een lange economische levensduur (20.000 – misschien 30.000 uur) en ze zijn zeer bestendig tegen stoten en vibraties.
- LED's zijn veilig omdat ze geen glas bevatten en op laagspanning werken.
- LED's zijn leverbaar met verschillende emissie spectra waardoor het mogelijk wordt om processen te sturen met licht van verschillende golflengten.

Uiteraard zijn er als keerzijde van de medaille ook nadelen:

- De hoge aanschafprijs.
- De ongrijpbare convectieve warmteoverdracht. De operationele kosten die nu nog 3-5 maal hoger zijn dan voor SON-T belichting.

Bij de keuze voor LED's is in de afgelopen jaren vooral veel nadruk gelegd op de hypothetische hoge lichtbenutting in vergelijking met SON-T. Al snel bleek dat de verwachtingen te hoog gespannen waren. Op basis van het daglichtspectrum en de verschillen in absorptie van het blad kan worden berekend dat de lichtbenutting van

rood-blauwe LED's op bladbasis 10-20% hoger is dan van daglicht en op gewasbasis 6-8%.

Als we het daglicht bekijken zien we grote verschillen in het PAR gebied tussen 400 en 700 nm voor een aantal veel voorkomende stralingscondities (figuur 9.2). Direct zonlicht heeft veel rood en de emissie neemt af naar het blauw. Diffuus daglicht bevat meer blauw dan direct zonlicht. Met andere woorden het spectrum van daglicht is moeilijk onder een noemer te vangen. Over het algemeen wordt aangenomen dat licht met een spectrum vergelijkbaar met zonlicht een normale plantontwikkeling garandeert. Gemiddeld bevat zonlicht, uitgedrukt als percentage van alle fotonen tussen 400 en 800 nm, ca. 21% blauw (400–500nm), 26% groen (500–600nm), 27% rood (600–700 nm) en 26% ver-rood licht (Maas, 1989).

Op basis van de specifieke absorptie van de bladeren, kan het effect van de belichtingsstrategie worden berekend. De verschillen in absorptie ontstaan door veranderingen in blad dikte en verschillen in de concentratie van bepaalde pigmenten. De efficiëntie is in het rode gebied gemiddeld 15% hoger is dan van het gemiddelde daglicht. Op gewasniveau blijkt dit voordeel veel geringer (minder dan 6-8%) door strooiing van licht in het gewas.

Bladpluk en stengeldichtheid hebben een veel grotere impact op de totale lichtinvang dan de specifieke verschillen tussen LED en SON-T op bladbasis. Het optimum voor het aantal bladeren per scheut en het aantal scheuten bepalen de lichtonderschepping. Daarnaast zijn er nog indirecte effecten zoals een mogelijk hogere sinkfunctie van de vruchten, wanneer deze direct belicht worden. Voor een deel wordt dit bepaald door de effecten van de straling op de vruchttemperatuur en voor een deel door onbekende hormonale effecten. Deze hormonale effecten zijn in de simulatie niet meegewogen omdat er onvoldoende kennis is om dat effect te kwantificeren. Het is echter een breed gedragen inzicht dat licht een direct effect heeft op de zetting en uitgroei van vruchten bij tomaat en komkommer (Schapendonk & Brouwer, 1984) en dat dit effect mogelijk door hormonen zoals cytokinine en auxine wordt bepaald. Zowel bladpluk als de timing van het aanhouden van nieuwe scheuten zijn belangrijke management beslissingen. Behalve de netto effecten op opbrengst heeft het schuiven met de datum van scheutuitloop ook grote consequenties voor de grofheid van de vruchten.

### 9.2.1 Voorkom een lage blad-lichtbenuttingsefficiëntie

Fotosynthese is de motor van de groei. Het in kaart brengen van rasverschillen en effecten van omgevingsfactoren op de fotosynthese zijn een belangrijk onderdeel van de strategie om tot een energiezuinige en productievere tuinbouw te komen. Metingen op locatie zijn daarbij onontbeerlijk (figuur 9.3).

De huidmondjes geleidbaarheid (gs) is een belangrijke grootte die bepaalt of er voldoende CO<sub>2</sub> kan worden opgenomen in het blad. Een hoge geleidbaarheid betekent dat de fotosynthese niet beperkt wordt door gesloten huidmondjes. De opname van CO<sub>2</sub> in het blad is dus niet gehinderd. Een hoge geleidbaarheid betekent ook vaak een hoge verdamping. Hierdoor zijn verdamping en fotosynthese (bij gelijk dampdruk deficit) aan elkaar gekoppeld. Onder SON-T is de geleidbaarheid van de bovenste bladeren hoger dan onder LED bovenbelichting. Bij LED tussenbelichting neemt de verdamping echter aanzienlijk toe. De positieve effecten daarvan op de fotosynthese zijn verwaarloosbaar omdat de huidmondjesgeleidbaarheid bij de betrekkelijk lage lichtintensiteiten op hoogtes onder de top, niet limiterend is. We verwachten wel een hogere verdamping, vooropgesteld dat het ondernet voldoende verwarmt om de tekorten als gevolg van het gebrek aan NIR te compenseren.

De meest voorkomende oorzaak voor een lage lichtbenuttinsefficiëntie is een lage huidmondjesgeleidbaarheid. Dan daalt de CO<sub>2</sub> concentratie in het blad, waardoor de fotorespiratie toeneemt en de netto fotosynthese daalt. Dit treedt meestal op in

situaties met hoge straling waarbij de bladtemperatuur en het dampdruk deficit van het blad ( $VPD_l$ ) hoog oplopen. Huidmondjes sluiten namelijk om uitdroging van het blad te voorkomen.

De bovengrens van de  $CO_2$  concentratie, waarboven nauwelijks meer effect is op de productie, ligt bij tomaat met een relatief hoge huidmondjesgeleidbaarheid ( $g_s$ ) bij 800-1000 ppm, waarbij een hogere waarde geldt voor hoge lichtintensiteiten en/of hoge temperaturen. Als  $g_s$  echter laag is, neemt de  $CO_2$  concentratie in het blad af en dan zal de gewenste instelling van de  $CO_2$  concentratie in de kas hoger worden omdat er een hogere gradiënt nodig is om dezelfde interne concentratie te realiseren als bij een hogere  $g_s$ . Bij tomaat is de geleidbaarheid vrijwel altijd hoog genoeg om geen beperkende factor te zijn voor de  $CO_2$  opname in de belichte teeltperiode. De verschillen zijn hier dus niet relevant.

### 9.2.2 Energetisch rendement

Het energetisch rendement is de verhouding tussen de energie die een lichtbron in gaat en de emissie (mol PAR). Voor commercieel verkrijgbare LED's varieert de energie efficiëntie tussen  $1,35 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{W}^{-1}$  voor blauwe LED's en  $1,82 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{W}^{-1}$  voor rode LED's. SON-T heeft op lamp niveau een efficiëntie van  $1,9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{W}^{-1}$ . Het is duidelijk dat LED's, gemiddeld over het spectrum, (nog) inefficiënter zijn dan SON-T. Omdat energieverliezen geheel als warmte vrijkomen betekent dit tevens dat LED's gemiddeld evenveel warmte produceren als SON-T. Voor de ontwikkeling van rode LED's kan gesteld worden dat de huidige prototypen zodanig zijn verbeterd dat de efficiëntie van SON-T wordt geëvenaard of zelfs al wordt overtroffen.

**Tabel 9.1.** Voorbeeld van belichtingsrendementen met SON-T in een praktijkkas.

SON-T	600 W philips greenpower	
geïnstalleerd totaal	680	W/armatuur
Lampdichtheid	0.13	lamp/m <sup>2</sup>
Geïnstalleerd lamp	78	W m <sup>-2</sup>
Efficiëntie	1.9	$\mu\text{mol s}^{-1} \text{W}^{-1}$
Lichtopbrengst	150	$\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$
Armatuurverlies	130	$\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$
Uursom (bruto)	0.47	mol uur <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup>
PAR-licht	1.5	Kwh Mol <sup>-1</sup>

De verwachting is dat de efficiëntie van (rode) LED's binnen 2 jaar zal toenemen tot  $2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{W}^{-1}$ . Met name bij een slim gebruik (optisch, tussenbelichting, koeling etc) kan de toepassing van LED dan tot tot een belichtingssysteem leiden dat efficiënter is dan de op het moment gangbare systemen.

## 9.3 Lichtkleuren

### 9.3.1 Blauw

Blauw licht is duur vanwege de hoge energieinhoud per foton (ongeveer 2x de energieinhoud van een rood foton), de lagere  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{W}^{-1}$  en vanwege de

hogere kosten van de LED's. Hoe minder blauw er nodig is in een armatuur, des te hoger het economisch rendement. De minimale hoeveelheid blauw licht die nodig is voor het verkrijgen van een normale plantontwikkeling verschilt per plantensoort. Voor in kassen geteelde gewassen is de hoeveelheid blauw licht afkomstig van het binnentredende zonlicht over het algemeen voldoende. Voor een aantal plantensoorten opgekweekt onder uitsluitend kunstlicht is vastgesteld wat de minimale hoeveelheid blauw licht is om een normale plantontwikkeling te krijgen. Afhankelijk van de soort plant en de beschikbaarheid van daglicht, bedraagt de minimale hoeveelheid blauw licht 6% van de totale hoeveelheid fotosynthetisch actieve straling of moet van het licht tenminste  $15 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  blauw licht (400–500 nm) zijn.

### 9.3.2 Groen

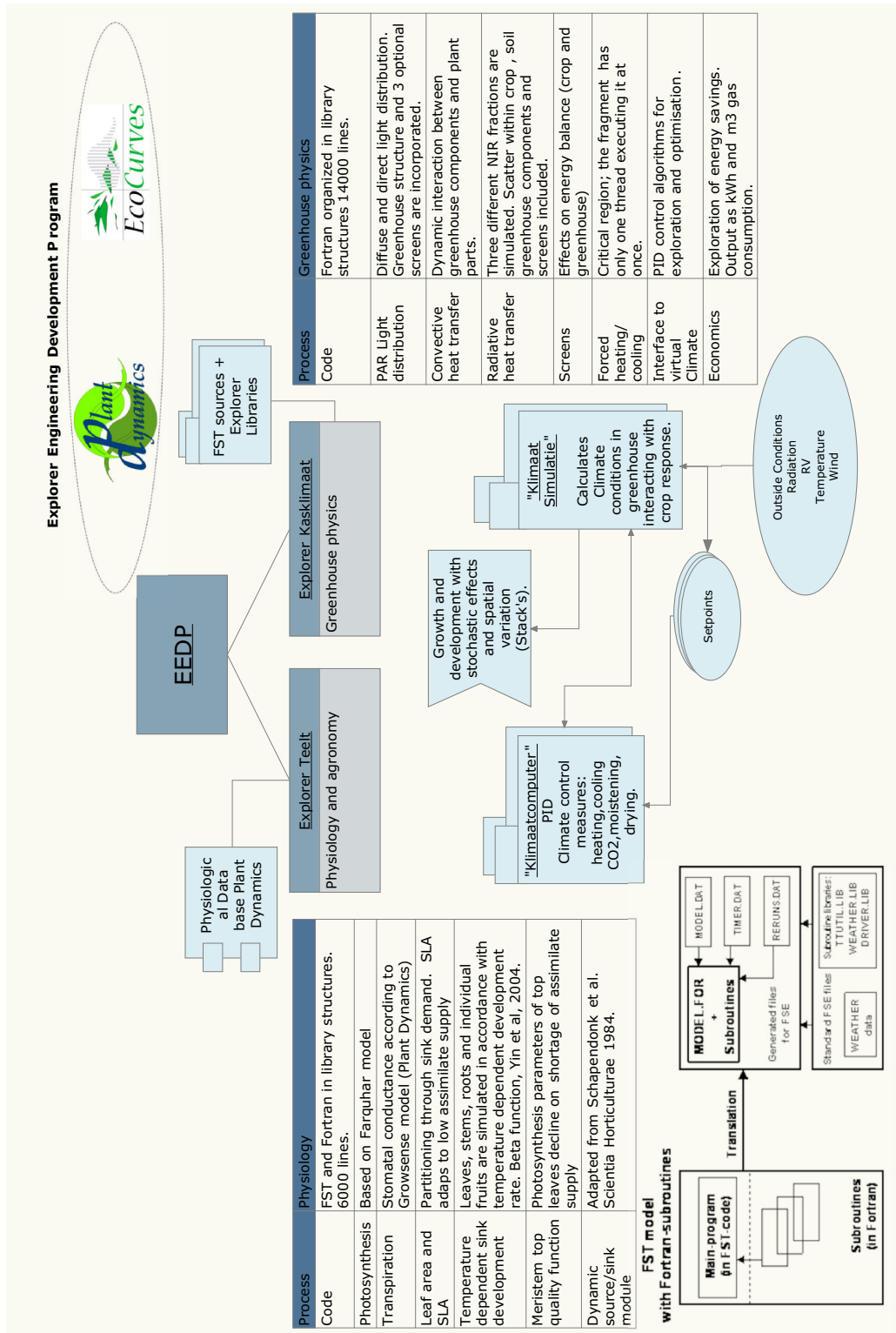
Een veelgehoord misverstand is dat groene planten weinig doen met groen licht. Dit is beslist niet het geval (Nishio, 2000). In een situatie dat planten dikke bladeren hebben of een gewas met een hoge LAI wordt ongeveer 80–90% van het groene licht geabsorbeerd (Rabideau *et al.*, 1946; Moss & Loomis, 1952; Inada, 1976). Door de relatief lage extinctie coëfficiënt van groen licht wordt het ook nog eens beter verdeeld over het transect van het blad of het gewas waardoor minder snel lichtverzadiging zal optreden. Dit plaatst groen licht in een ander perspectief. In tegenstelling tot blauw licht met een relatief laag energierendement, heeft groen licht een theoretisch voordeel dat bij hoge intensiteiten een hoog rendement kan worden gehaald. In de praktijk levert dit echter niets op omdat de intensiteiten bij assimilatiebelichting nooit het gevraagde niveau halen. Bovendien is de afscherming van licht door carotenoïden en flavonolen, wat in het blauwe deel voor een verlaging van de efficiëntie leidt in het groene deel afwezig.

Er is weinig bekend over stuurlichteffecten in het groen/gele gebied. Dougher & Bugbee (2001) vonden een remming van de groei bij SLA/ Mogelijk via een stuurlichteffect op de huidmondjes.

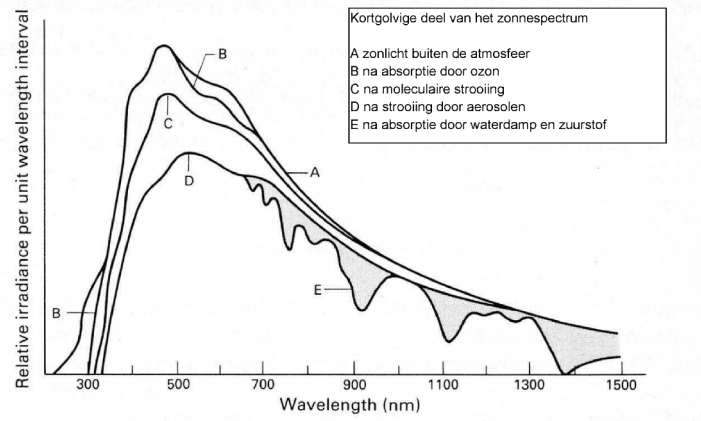
### 9.3.3 Rood

Zoals blijkt uit een groot aantal experimenten ligt het maximum voor de quantum efficiëntie voor veel planten bij 590–600 nm (Evans, 1987; McCree, 1972). De oorzaak is de efficiënte opvulling van het "absorptiegat" door carotenoïden, waaronder de pigmenten uit de xanthophyll cyclus in het gebied tussen 460 en 580 nm. Daarnaast is het amberkleurig licht van een dussdanige samenstelling dat het de 'samenwerking' tussen fotosysteem 2 en fotosysteem 1 bevordert. De ratio tussen de hoeveelheid licht dat door beide fotosystemen wordt geabsorbeerd is 1 bij 600 nm. Bij 460 nm is deze ratio 2 en bij 690 nm is de ratio 0,5. Dit betekent dat de energieverdeling bij 600 nm optimaal is.





Figuur 9.1



**Figuur 9.2.** Spectrale verdeling van het zonlicht (exclusief het infrarood en warmtestraling) na filtering door de atmosfeer



**Figuur 9.3.** LiCor-6400 meetapparatuur. Assimilatieparameters en fluorescentie (ETR) werden gemeten met de LiCor 6400. In de meet cuvette van deze apparatuur (aan boven- en onderzijde van het ingeklemde blad) worden lichtintensiteit,  $\text{CO}_2$  concentratie, temperatuur en de relatieve luchtvochtigheid door een computerprogramma ingesteld en gevarieerd. Hierdoor kan de reactie van de assimilatie op deze veranderingen bepaald worden. Een fotosynthese van  $10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  op bladoppervlakte basis, komt overeen met een groei van 1 gram drogestof per  $\text{m}^2$  blad per uur. Stel dat we een dergelijke fotosynthese gedurende 10 uur kunnen handhaven dan is er voldoende energie vastgelegd om 10 g drogestof te assimileren per vierkante meter blad.

# Referenties

- Dougher, T. A. O., Bugbee, B., 2001. Differences in the response of wheat, soybean and lettuce to reduced blue radiation. *Photochemistry and Photobiology* 73, 199–207.
- Evans, J., 1987. The dependence of quantum yield on wavelength and growth irradiance. *Aust J Plant Physiol* 14, 69–79.
- Inada, K., 1976. Action spectra for photosynthesis in higher plants. *Plant and Cell Physiology* 17, 355–365.
- Maas, F. M., 1989. Plantengroei in kunstlicht literatuuroverzicht ten behoeve van verlichting nieuwe klimaatkamers. CABO Cabo verslag nr 127, 22.
- McCree, K. J., 1972. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agric Meteorol* 10, 443–453.
- Monteith, J. L., 1973. Principles of environmental physics. Edward Arnold, London.
- Moss, D. N., Loomis, W. E., 1952. Absorption spectra of leaves in the visible spectrum. *Plant Physiology* 27, 370–391.
- Nederhof, E., de Boer, P., Schapendonk, A., Pot, S., Dueck, T., 2010. Tomaten telen onder led belichting in de praktijk. Verslagen Productschap Tuinbouw en Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit. In kader van Kas als Energiebron PT14092, 104.
- Nishio, J., 2000. Why are higher plants green? evolution of the higher plant photosynthetic pigment complement. *Plant, Cell and Environment* 23, 539–548.
- Rabideau, G. S., French, C., Holt, A. S., 1946. The absorption and reflection spectra of leaves chloroplast suspension and chloroplast fragments as measured in an ultraviolet sphere. *American Journal of Botany* 33.
- Schapendonk, A. H. C. M., Brouwer, P., 1984. Fruit growth of cucumber in relation to assimilate supply and sink activity. *Scientia Horticulturae* pp. 21–33.