

# Lichtbenutting van tomaat onder LED en SON-T belichting

Tom Dueck, Jan Janse, Ad Schapendonk, Frank Kempkes, Barbara Eveleens, Kees Scheffers, Sander Pot, Govert Trouwborst, Elly Nederhoff & Leo Marcelis







# Lichtbenutting van tomaat onder LED en SON-T belichting

Tom Dueck<sup>1</sup>, Jan Janse<sup>1</sup>, Ad Schapendonk<sup>2</sup>, Frank Kempkes<sup>1</sup>, Barbara Eveleens<sup>1</sup>, Kees Scheffers<sup>1</sup>, Sander Pot<sup>2</sup>, Govert Trouwborst<sup>2</sup>, Elly Nederhoff<sup>1</sup> & Leo Marcelis<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Wageningen UR Glastuinbouw, Wageningen

<sup>2</sup> Plant Dynamics BV, Wageningen



## Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Droeendaalsesteeg 1, 6708 PB Wageningen  
: Postbus 16, 6700 AA Wageningen  
Tel. : 0317 - 48 60 01  
Fax : 0317 - 41 80 94  
E-mail : [glastuinbouw@wur.nl](mailto:glastuinbouw@wur.nl)  
Internet : [www.glastuinbouw.wur.nl](http://www.glastuinbouw.wur.nl)

# Inhoudsopgave

	pagina
Voorwoord	1
Communicatie	2
Samenvatting	4
Deel I. Experiment	4
Deel II. Scenario analyses	5
Deel I      Experiment	7
1    Inleiding	9
2    Materialen & Methoden	11
2.1    Plantmateriaal en teeltcondities	11
2.1.1    Plantmateriaal	11
2.1.2    Teeltcondities	11
2.2    Behandelingen	12
2.3    Metingen	12
2.3.1    Klimaatregistratie	12
2.3.2    Lichtintensiteit en -verdeling	13
2.3.3    Plantregistraties en -metingen	15
2.3.4    Energiestromen in de kas	17
3    Resultaten & Discussie	19
3.1    Klimaat registratie	19
3.1.1    Kasklimaat	19
3.1.2    Microklimaat	20
3.2    Lichtmetingen	21
3.2.1    Lichtintensiteit	21
3.2.2    Lichtverdeling	23
3.2.3    Lichtonderschepping en Lichtverlies	26
3.2.4    Spectrale lichtdoordringing	28
3.3    Plantregistraties en -metingen	30
3.3.1    Gewasbeoordelingen	30
3.3.2    Plantwaarnemingen	34
3.3.3    Plantmorfologie en destructieve oogst	35
3.3.4    Productie	38
3.3.5    Vruchtkwaliteit	40
3.3.6    Fotosynthese metingen	41
3.3.7    Gewastemperatuur	42
3.3.8    Wateropname	43
3.3.9    Bladhoek en -grootte metingen	45
3.3.10    Plantbewegingen	47

3.4	Energiestromen	47
3.4.1	Belichting en kasklimaat	47
3.4.2	Energie input	50
3.4.3	Energie efficiëntie	53
4	Conclusies experiment	55
Deel II	Scenario Analyses	57
5	Vergelijking SON-T en LED	59
5.1	Lichtbenuttingsefficiëntie	59
5.2	Simulaties met Optomaat Explorer	62
6	Analyse van experimenten	63
6.1	Fotosynthese	63
6.2	Huidmondjes geleidbaarheid	65
7	Scenario analyses	67
7.1	Opbrengstcomponenten voor verschillende behandelingen	67
7.2	Kruistesten met klimaatgegevens	72
7.3	Effect bladaantal	73
8	Conclusies scenario analyses	75
9	Referenties	77
Bijlage I.	Schema van kas en belichting	79
Bijlage II.	Dag- en nachttemperatuur	81
Bijlage III.	Verticale kasluchttemperatuur I	83
Bijlage IV.	Verticale kasluchttemperatuur II	85
Bijlage V.	Lichtonderschepping door het gewas	87
Bijlage VI.	Plantwaarnemingen per behandeling	89
Bijlage VII.	Vruchtkwaliteit parameters	91

# Voorwoord

De ontwikkelingen in LED-belichtingsystemen op het gebied van de techniek, in het onderzoek en in de praktijk hebben er toe geleid dat de sector een vergelijkend onderzoek wilde laten uitvoeren. De belangrijkste vragen daarbij gingen over hybridesystemen en de gevolgen ervan voor de gewasfysiologie, ontwikkeling en productie. Daarbij speelt het energieverbruik ook een belangrijke rol.

In het kader van het innovatieprogramma Kas als Energiebron is in opdracht van het Ministerie LNV en het Productschap Tuinbouw door Wageningen UR Glastuinbouw onderzoek gedaan naar de effecten van LED-belichting, al dan niet in combinatie met SON-T belichting, op het kasklimaat en energiegebruik en de groei, ontwikkeling, en productie van tomaat. De experimentele resultaten uit dit onderzoek werd vervolgens gekoppeld aan het gemeten kasklimaat om de productie van de behandelingen door te rekenen in een aantal scenario analyses. De resultaten van dit onderzoek worden in dit rapport weergegeven.

Het project werd medegefinancierd en ondersteund door de Provincie Zuid Holland, Greenport Campus, AgroEnergy en Grodan, en in natura door de LED-leveranciers Lemnis Lighting en Philips, die de belichtingsystemen leverden.

Het experiment is intensief begeleid door een BCO bestaande uit Jan Mulder, Dirk van der Kaaij en Pieter van Staalduinen, die de proef tijdens de belichtingsperiode wekelijks hebben bezocht.

Speciale dank gaat uit naar Rob Pret (installatie van de belichting), Bram van Haaster (teeltverzorging), Piet Steenbergen (oogstwaarnemingen en houdbaarheidsbepalingen) en Peter Lagas (dataverwerking).

Tom Dueck  
Wageningen UR Glastuinbouw  
november 2010



# Communicatie

## Publicaties

1. Nederhoff, E.M., T.A. Dueck & J.F.H. Snel, 2009.  
LED-licht lijkt perspectief te bieden. Gewasnieuws tomaat LTO-Groeiservice12(4): 1.
2. Anon. 2009.  
Grote LEDproef van start. Groente & Fruit Actueel, week 43, blz 13.
3. Slegers, J. & T.A. Dueck, 2009.  
Tempel der kennis. Vakblad Bloemisterij 64(52/53):36-37.
4. Anon. & T.A. Dueck, 2009.  
Lichtbenutting van tomaat onder SONT en LED-belichting. Energiek2020.nu. 2 dec. 2009.
5. Dueck, T. & B. Vegter, 2009.  
LEDs vragen ander 'lichtklimaat'. Groente & Fruit Actueel, week 50, blz 17. 8 dec. 2009.
6. Dueck, T. & H. Enthoven, 2009.  
LEDs vragen ander 'lichtklimaat'. Energiek2020.nu, 9 dec. 2009.
7. Anon. & T. Dueck, 2009.  
Proef met LEDs en SONT gestart in Bleiswijk. Onderglas 11:45.
8. Mulder, J. & H. Enthoven, 2010  
Zoeken naar het juiste klimaat. Energiek2020.nu, jan. 2010.
9. Scheffers, K. & H. Enthoven, 2010.  
Van subjectief naar objectief. Energiek2020.nu, 8 febr 2010.
10. Van Staalduinen, P. & H. Enthoven, 2010.  
Energiek2020.nu, 10 febr 2010.
11. Janse, J., 2010.  
Lichtbenutting van tomaat onder SONT en LED-belichting. Relatiedagen, Gorinchem.
12. Dueck, T. & J. Janse, 2010.  
Belichtingsproef met tomaat bij Wageningen UR Glastuinbouw. Gewasnieuwsbrief tomaat LTO-Groeiservice, 13(1): 4.
13. Anon. (interview met J. Janse). 2010.  
Kop plant mist temperatuur bij gebruik van LEDs. Groente & Fruit Actueel, week 18, blz 17.
14. Dueck, T. & J. Janse, 2010.  
Veel geleerd van belichtingsproef. Gewasnieuwsbrief tomaat LTO-Groeiservice, 13(4): 1-3.
15. Scheffers, K. & H. Enthoven, 2010.  
Een beetje paars is niet erg. Energiek2020.nu, febr. 2010.
16. Boonekamp, G. & T.A. Dueck, 2010.  
Leren van leds - de excursie (interview met o.a. Tom Dueck). Groenten en Fruit Magazine 2010 (4). - p. 40 - 42.
17. Van Staalduinen, J. & T. Dueck, 2010.  
Telen onder groeilicht is een leerproces, ongeacht het systeem. Onderglas 4:8-9.
18. Anon. (interview met T. Dueck & L. Marcelis), 2010.  
LEDs vallen tegen door gemis warmte. Vakblad voor de Bloemisterij 14:9.
19. Slegers, J. (interview met T. Dueck & L. Marcelis), 2010.  
Koude winter levert nieuwe ervaringen met LED op. Vakblad voor de Bloemisterij 15:36-37.
20. Dueck, T.A. & J. Janse, 2010.  
Veel geleerd van belichtingsproef. Gewasnieuws tomaat 13(4): 1-3.
21. Van Staalduinen, J. & T. Dueck, 2010.  
Tussenbelichting voegt waarde toe, maar rassen reageren verschillend. Onderglas 9:12-13.
22. Borkus-Henskens, T. (interview met T. Dueck), 2010.  
Heeft Ledlicht de toekomst in de glastuinbouw? De Heraut/De Tuinbouwwijzer, p.47.



### **Bezoeken aan het experiment**

23 november 2009	Adviseurs Lycopersicon, 6 personen
10 december 2009	Demokwekerij Westland, 5 personen
14 december 2009	Cursusgroep belichting tomaat GreenQ, ca. 15 personen
13 januari 2010	Demokwekerij Westland, 4 personen
18 januari 2010	Cursusgroep belichting tomaat GreenQ, ca. 15 personen
3 februari 2010	Landelijke komkommercommissie LTO-Groeiservice, ca. 15 personen
15 februari 2010	Cursusgroep belichting tomaat GreenQ, ca. 15 personen
16 maart 2010	Cursusgroep belichting tomaat GreenQ, ca. 15 personen
19 maart 2010	Adviseurs en veredelaar Syngenta, 4 personen
12 april 2010	Cursusgroep belichting tomaat GreenQ, ca. 15 personen
22 april 2010	Energiek2020, 40 personen
27 mei 2010	Noorse onderzoekers, 15 personen

Verder is de proef regelmatig door diverse andere personen bekeken, onder andere door de BCO Gewasmanagementproef tomaat.

### **Lezingen**

10 november 2009	Energiebewust belichten: een hele kunst. Seminar WU-TPK, Bleiswijk. Tom Dueck
9 februari 2010	Mogelijkheden van LED-belichting. Lunchbijeenkomst Relatiedagen, Gorinchem. Jan Janse
11 februari 2010	Lichtbenutting van tomaat onder SONT en LED-belichting. Platform Licht, Zoetermeer. Tom Dueck
25 maart 2010	Lichtbenutting van tomaat onder SONT en LED-belichting. LTO LED-dag LTO Groeiservice, Demokwekerij Honselersdijk. Tom Dueck
1 april 2010	Lichtbenutting door tomaat onder SONT en LEDs: tussenevaluatie. Lichtplatform, Bleiswijk. Tom Dueck
22 april 2010	Lichtbenutting door tomaat onder SONT en LEDs. Energiek2020, Bleiswijk. Tom Dueck
26 mei 2010	Light use by tomato under HPS and LED lighting systems. Samenwerkings-bijeenkomst met Noorwegen, Wageningen. Tom Dueck
28 juni 2010	Lichtbenutting door tomaat onder SONT en LEDs: tussenevaluatie. Lichtplatform, Bleiswijk. Tom Dueck
1 juli 2010	Lichtbenutting door tomaat onder SONT en LED-belichtingsystemen. Arenasessie Improvement Centre. Jan Janse
2 juli 2010	Light use by tomato under HPS and LED lighting systems. Lezing voor Koreanen, Bleiswijk. Tom Dueck

# Samenvatting

## Deel I. Experiment

Het gebruik van LED-belichting kan in de Nederlandse glastuinbouw een belangrijke rol gaan spelen als LED's in de winter op een energetisch efficiënte wijze de productie verhogen. Maar voordat LED's op grote schaal in de praktijk toepasbaar zijn, is meer kennis nodig over de effecten van LEDs op het gewas, hoe er het beste onder LED's kan worden geteeld en wat de energie-efficiëntie ervan precies is.

In een onderzoek bij Wageningen UR Glastuinbouw in Bleiswijk is in het seizoen 2009-2010 een onderzoek met vier belichtingssystemen uitgevoerd. Twee hybride belichtingssystemen met SON-T boven, de ene met daarbij LED-bovenbelichting en de andere met daarbij LED-tussenbelichting, werden vergeleken met een traditionele SON-T bovenbelichting en met een volledig LED-bovenbelichtingssysteem. Het onderzoek is gefinancierd door het PT en LNV vanuit het programma Kas als Energiebron, en door de Provincie Zuid-Holland en AgroEnergy. Philips leverde de LED-tussenbelichting en Lemnis Lighting de LED-bovenbelichting. Het onderzoek is uitgevoerd met de fijne cocktailpruimtomaat Sunstream en duurde van begin oktober 2009 tot eind juni 2010. Het belichtingsniveau bedroeg in alle kassen  $170 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  waarbij het licht bij de hybride systemen voor 50% van de LED's en voor 50% van de SON-T lampen afkomstig was.

### Licht en klimaat

De LED-lampen in de verschillende systemen hebben in totaal bijna 2550 uur gebrand; bij de SON-T lampen was dit circa 200 uur minder vanwege teveel warmteproductie in het voorjaar, waardoor ze eerder uitgezet zijn. In de kas met de LED-bovenbelichting is de luchttemperatuur gemiddeld  $0.3$  à  $0.4$  °C hoger geweest dan in de andere afdelingen. Bij de hybride-tussenbelichting was het verschil tussen dag- en nachttemperatuur (DIF) relatief groot. Gedurende de proefperiode waren de buitentemperaturen in de winter ten opzichte van andere jaren vrij laag. Ondanks de hogere kastemperatuur en meer schermen verliep de trosafsplitsing bij de LED-behandeling toch trager, hoogstwaarschijnlijk veroorzaakt door het ontbreken van stralingswarmte van de LED-lampen op de kop van het gewas, ofwel het groeipunt. Het verschil in trosontwikkeling tussen LED en SON-T liep in april op tot maximaal 1.4 trossen. De verticale temperatuurverschillen waren bij Hybride-boven het geringst. De gemeten lichttransmissie was bij de bovenbelichtingen met LED's zo'n 3% lager dan bij de SON-T, grotendeels als gevolg van meer lichtonderschepping door de profielen met LED's. De armaturen van de tussenbelichting zijn veelal relatief hoog in het gewas en dus dicht bij de kop gehangen, omdat er anders vrij veel bladverbranding optrad en de kop te zwak werd. Hierdoor ontstond bij dit belichtingssysteem wel wat lichtverlies naar boven toe. Het gewas groeide echter ongeveer 30 cm per week en werd elke week à 10 dagen lager gehangen. Hierdoor kon het zijn dat de relatieve hoogte van de LED-streng t.o.v. het gewas in de tijd 25-60 cm verschilde.

### Gewasstand

Van alle belichtingsbehandelingen stond het gewas bij de LED-bovenbelichting het meest generatief, waren de trossen het sterkst en hadden de koppen de meest paarse kleur. Waarschijnlijk moet bij LED-bovenbelichting eerder in de teelt naar een hogere stengeldichtheid worden gegaan om de assimilatenproductie bij dit systeem beter te benutten. Vooral in de maanden januari tot en met maart ontwikkelde het gewas bij de Hybride-tussenbelichting de langste bladeren. Bij de SON-T belichting waren de bladeren meestal het dunst en verouderden het snelst. Vooral in januari kwamen hier ook de meeste splijttrossen voor. In het algemeen blijkt er geen adaptatie van de bladeren voor de verschillende lichtkleuren te zijn. In de winter hadden de bladeren die vrij laag in het gewas hingen, bij de LED-behandeling een hogere fotosynthesecapaciteit dan die bij de SON-T boven. Bij de LED-behandeling stonden de bladeren het meest recht ten opzichte van de stengel, terwijl de bladeren bij de Hybride-tussenbelichting meer naar beneden hingen. Uit opnames met camera's bleek dat bladeren vooral in de middag de meeste bewegingen vertoonden bij de Hybride-tussenbelichting en het minst bij LED-bovenbelichting.

### Productie en kwaliteit

De eindproductie tot en met week 23 was bij de SON-T, LED, Hybride-boven en Hybride-tussen respectievelijk 25.9, 24.5, 24.3 en 25.2 kg m<sup>2</sup>. In het algemeen waren de verschillen in vruchtkwaliteit gering. Tomaten die geteeld waren onder LED-bovenbelichting waren wel minder scheurgevoelig en wat langer houdbaar.

### Energie

De totale hoeveelheid gebruikte energie (gas + elektriciteit) in de behandeling met alleen LED-bovenbelichting was 12 tot 35% hoger dan bij de andere behandelingen. Dit werd veroorzaakt doordat de LED's die boven het gewas hingen, gekoeld moesten worden via een warmtepomp en de onttrokken warmte vervolgens weer vernietigd werd. Ook moesten bij deze behandeling hogere temperaturen worden aangehouden, wat extra gas heeft gekost. De energie-efficiëntie van de geproduceerde tomaten kwam bij de SON-T, LED, Hybride-tussen en Hybride-boven uit op respectievelijk 2.46, 2.94, 2.52 en 2.72 aardgas equivalenten per kilo product als wordt uitgegaan van zowel warmte- als elektriciteitsproductie via de WKK. De SON-T en de Hybride-tussenbelichting gebruikten dus de minste energie per kilo tomaten.

## Deel II. Scenario analyses

Met behulp van Explorer Tomaat werden de experimentele resultaten en het gemeten kasklimaat gekoppeld om de productiever verschillen gefundeerd door te rekenen. In de tabel hieronder is een vergelijking gemaakt tussen de 4 behandelingen zowel voor gemeten als gesimuleerde resultaten. De simulatie voor alle teelten start op 13 november 2009 en eindigt op 31 mei 2010.

*Productie efficiency gesimuleerd en gemeten voor de verschillende behandelingen. Oogst (in kg m<sup>-2</sup>) is de tomaten oogst tot 1 juni 2010, gemeten of gesimuleerd. De kolommen 'Eff-PARin' en 'Eff-PARabs' (in g suiker m<sup>-2</sup>) geven de efficiëntie van de fotosynthese voor het hele gewas, uitgedrukt in de hoeveelheid suikers per mol licht aan de top van het gewas of de hoeveelheid licht die geabsorbeerd is.*

Belichtingsysteem	Oogst		Oogst	
	Gemeten (kg m <sup>-2</sup> )	t.o.v. SON-T (%)	Gesimuleerd (kg m <sup>-2</sup> )	t.o.v. SON-T (%)
SON-T	22.02	100.0	19.28	100.0
LED	20.79	94.4	20.46	106.1
Hybride-tussen	20.66	93.8	20.09	104.2
Hybride-boven	21.36	97.0	20.08	104.1

Belichtingsysteem	Assimilatie	Eff-PAR in	Eff-PAR abs	Oogst Eff
	(g suiker m <sup>-2</sup> )	(g suiker mol <sup>-1</sup> )	(g suiker mol <sup>-1</sup> )	(g vrucht mol <sup>-1</sup> )
SON-T	5753.4	1.20	1.72	5.77
LED	6171.6	1.29	1.58	5.25
Hybride-tussen	6133.3	1.28	1.67	5.47
Hybride-boven	6022.4	1.26	1.64	5.47

In het tabel is te zien dat van het effect van een hogere LED quantum efficiëntie voor de fotosynthese op bladniveau (+ 15%, zoals bepaald in eerdere experimenten, betrekkelijk weinig overblijft in de berekende opbrengsten op gewasniveau. Op basis van de huidige simulatie analyse leveren LED's een potentiële toename van de productie van ongeveer 4% per mol PAR. Er is, voor dit sinkgelimiteerde gewas Sunstream nauwelijks verschil tussen de gesimuleerde effecten van bovenbelichting en tussenbelichting. Deze resultaten steken nog positief af tegen de werkelijk gemeten opbrengstverschillen (kolommen 1 en 2 van het tabel). In alle LED-behandelingen werden lagere

opbrengsten gerealiseerd dan in de SON-T. Bij LED-bovenbelichting was de opbrengstvermindering 3-5% en bij LED-tussenbelichting 6%. De overeenkomst tussen de gesimuleerde en de gemeten resultaten is terug te vinden in het feit dat de opbrengstverschillen weliswaar tegengesteld maar over de hele linie bijzonder klein zijn. Wat verklaart het verschil in de richting van het LED-effect? In de simulaties is steeds uitgegaan van een lichtonderschepping van de LED-straling op bepaalde hoogtes in het gewas. Blijkbaar is die onderschepping lager geweest dan we hebben vastgesteld. Een andere verklaring is er niet want uit analyses waarbij het microklimaat van de behandelingen kruiselings werd gewisseld, bleek dat de effecten maar voor een klein gedeelte konden worden toegeschreven aan de verschillen in temperatuur en RV. Hierbij moet worden opgemerkt dat voor een gedetailleerde analyse eigenlijk meer meetpunten van de gewastemperatuur vereist zijn.

Uit eerdere analyses (Nederhof *et al.*, 2010) bleek dat een teelt die onvoldoende is afgestemd op LED's tot verliezen van 10% of meer kan leiden. Nu blijkt dat ook een goed op LED's afgestemde teelt tot iets lagere producties leidt dan met SON-T. De reden hiervoor is enerzijds de lagere lichtonderschepping door een relatief hoge positie van de tussenbelichting en de locale hoge lichtintensiteit op individuele bladeren, waardoor een goede lichtverdeling werd gehinderd .

# Deel I Experiment



# 1 Inleiding

De algemene overtuiging heerst dat LED's een belangrijke rol kunnen spelen in de Nederlandse glastuinbouw door op een energetisch efficiënte wijze de productie in de winter te verhogen. Diverse vormen van LED-belichting zijn het afgelopen jaar onderzocht in proeven bij glasgroentengewassen. Daarin bleek dat bij gelijke belichtingsniveau's de productie onder LED's die onder SON-T lampen kon benaderen of zelfs iets hoger was. Aan technische verbeteringen wordt ook door leveranciers gewerkt, bijvoorbeeld verschillende combinaties en golflengtes van lichtkleuren, lenzen of spiegels voor lichtverdeling, luchtkoeling, enz., waardoor het perspectief voor LED's verhoogd wordt. Echter, voordat LED's in de praktijk op grote schaal toepasbaar zijn, is meer kennis nodig over hoe te telen met LED's. Welke effecten heeft een LED-belichtingsstelsel op het gewas, welke effecten heeft het op het kasklimaat waarmee de teler rekening moet houden?

In de teeltproeven met LED's (ondermeer Nederhoff *et al.*, 2010) zijn tot nu toe een aantal teeltkundige problemen voorgekomen, die wellicht veroorzaakt worden door het onvoldoende afstemmen van de teelttechniek op de belichting. Deze problemen lijken vooral te liggen bij planttemperatuur, plantbelasting en –balans, en invloeden op bladmorfolgie. De vraag is welke consequenties dit heeft voor het telen onder LED's.

Gewastemperatuur: SON-T produceert warmtestraling (NIR) én convectieve (voelbare) warmte i.t.t. LED's die alleen convectieve warmte afgeven, die bij sommige LED-systemen zelfs grotendeels nog wordt afgevoerd via waterkoeling. Een hogere temperatuur van het groeipunt versnelt de ontwikkeling (bladafplitsing, bloem- of trosontwikkeling) en bevordert de verwerking en het transport van assimilaten. Een hogere vruchttemperatuur versterkt de aantrekking van assimilaten. De optimale temperatuur voor fotosynthese is hoger bij meer licht. Hierdoor heeft de planttemperatuur effect op de plantbalans (vraag en aanbod van assimilaten). Maar de warmteproductie door SON-T lampen heeft ook nadelen, zoals een warmteoverschot die vooral tot uiting komt in warme winters of onder een gesloten (lichtreductie)schermb. Afluchten van warmte is dan nodig en leidt direct tot energieverlies. Bij een verplichte 100% lichtafschermingsregeling wordt dit voordeel bij gekoelde en efficiënte LEDs erg belangrijk, maar doordat er bij LED meer warmte toegevoerd moet worden, is dit voordeel relatief gezien minder groot.

Plantbelasting en –balans: Onder LED-belichting is in vorige proeven een assimilatenoverschot in bladeren waargenomen, en soms een té generatieve of vegetatieve gewasstand (scheve sink/source verhouding). Om dit te corrigeren moeten beschikbare teelttechnieken aangewend worden om het gewas bij te sturen.

Bladvervorming: Vermoedelijk door de overwegend rode kleur van de LED-belichtingsystemen, komen soms afwijkende bladeren voor, met een (sterk) naar beneden gekrulde vorm, of ook bladrandjes. In afwezigheid van zonlicht geeft LED-belichting extreem platte bladeren, naar het lichtbron toe gericht.

Mede naar aanleiding van de resultaten van recent onderzoek zijn diverse varianten van LED-belichting bedacht zoals hybridebelichting en tussenbelichting. Hybride belichting wordt gezien als een combinatie van SON-T en LED-belichting boven het gewas. Tussenbelichting is een variant daarvan met LED's die tussen het gewas hangen.

Hybride belichting heeft als voordeel dat problemen die samenhangen met een lagere planttemperatuur onder LED's, worden ondervangen door de aanwezigheid van SON-T lampen, en dat problemen die samenhangen met een warmteoverschot van SON-T lampen door de LED-lampen worden verminderd. Een hybride belichtingsstelsel met tussenbelichting zou meer perspectief kunnen bieden dan bovenbelichting met LEDs, doordat er mogelijk minder licht verloren gaat door reflectie van het gewas, als aangenomen wordt dat er geen licht boven het gewas uit komt. Theoretisch geeft dit ca. 6% meer lichtabsorptie (pers. mededeling Wim van Leperen). Bovendien komt tussenlicht terecht bij bladeren onderin het gewas die anders weinig licht zouden ontvangen. Door meer licht verouderen deze minder snel en dragen langer en meer bij aan de gewasfotosynthese. Hierdoor kan tussenbelichting ook een voordeel hebben in het voor- en najaar en niet alleen in de winter. Eerder is er onderzoek aan een hybride stelsel met tussenbelichting uitgevoerd bij komkommer door Wageningen UR (Trouwborst *et al.* 2010) en bij tomaat door



Dekker (Pot *et al.* 2010), waarvan de eerste proef resulteerde in géén productieverhoging, maar wel een productieverhoging bij Dekker met circa. 8%.

In het hieronder beschreven onderzoek werden vier verschillende belichtingsystemen met elkaar vergeleken. Twee hybride belichtingsystemen met SON-T boven, de ene met LED boven en de andere met LED tussen werd vergeleken met een traditionele SON-T bovenbelichting en ook een LED-bovenbelichtingssysteem. Effecten van belichting werden op zowel niveau van blad, plant als gewas bestudeerd. Op bladniveau werd lichtabsorptie en bladfotosynthese gemeten. Op het niveau van hele planten werd gekeken naar stuurlichteffecten, plantbalans en droge stof verdeling en op gewasniveau werd de productie en kwaliteit bepaald.

Omdat verondersteld werd dat er verschillen in kasklimaat en planttemperatuur konden optreden onder de verschillende systemen, met gevolgen voor de te volgen teeltstrategie, werden de energiestromen in alle behandelingen geanalyseerd. De hoeveelheid elektrische en thermische energie die nodig was voor elk belichtingsstelsel werd vervolgens gerelateerd aan de bijbehorende productie.

Beoogd werd zowel de productie als de energie-efficiëntie in een winterteelt tomaat met 10% te verhogen met behulp van LED-belichting of varianten daarvan, in vergelijking met SON-T belichting van gelijk belichtingsniveau. Tevens zouden de nodige teeltmaatregelen toegepast worden om in elke behandeling een optimaal gewas te realiseren, waardoor kennis werd verzameld over de gewenste teeltwijze bij LED-belichtingsystemen.

## 2 Materialen & Methoden

### 2.1 Plantmateriaal en teeltcondities

#### 2.1.1 Plantmateriaal

Het ras dat in het experiment is gebruikt is Sunstream (Enza), een fijne cocktailpruimtomaat geogst als tros. Het ras was geënt getopt op Maxifort.

#### 2.1.2 Teeltcondities

Proefplaats:	Wageningen UR Glastuinbouw in Bleiswijk
Kasafdelingen:	Kasnummers 606, 607, 608 en 609, afmetingen 15 m lang en 9.60 m breed (bruto 144 m <sup>2</sup> ), kolomhoogte 5.50 m, met doorlopende nokluchting
Kasafdelingen:	Kassen 606, 607, 608 en 609, afmetingen 15 m lang en 9.60 m breed (bruto 144 m <sup>2</sup> ), kolomhoogte 5.50 m, met doorlopende nokluchting
Hoogte gewasdraad:	4.30 m
Teeltgoten:	Eén goot (lengte 12.5 m) met één gewasrij langs beide gevels en 5 goten daar tussenin met dubbele gewasrijen (carrousel), hoogte tot bovenkant goot ca. 50 cm
Plantdatum:	15 oktober 2009 direct op het plantgat
Plantafstand:	Start op 40 cm (3.12 pl/m <sup>2</sup> )
Extra stengels	Extra aangehouden stengels: <ul style="list-style-type: none"><li>• op 14 december 2009 1 op 4 stengels (stengeldichtheid 3.9 stengels/m<sup>2</sup>, stengelafstand 32 cm)</li><li>• op 27 januari 2010 1 op 4 stengels (stengeldichtheid 4.7 stengels/m<sup>2</sup>, stengelafstand 26.7 cm)</li><li>• op 10 maart 2010 alleen in LED-afdelingen 607 en 608 1 op 8 stengels (stengeldichtheid 5.2 stengels/m<sup>2</sup>, stengelafstand 24 cm)</li></ul>
Substraatmat:	Grodan Growtop, afmetingen 133 x 20 x 7.5 cm (4 planten/mat)
Schermb:	Energiescherm (LS10 ultra) en verduisteringsscherm 95% lichtreductie (XLS 95% Black Light Revolux)
Verwarming:	<ul style="list-style-type: none"><li>• In hoogte verstelbare groeibuis (forcas 35 mm). Deze hing in de buurt van de oogsttros</li><li>• Buisrailnet (51 mm)</li></ul>
CO <sub>2</sub> -dosering:	Dosering tot ongeveer 1000 ppm met OCAP-CO <sub>2</sub> , doseercapaciteit maximaal 180 kg/ha/uur
Voeding:	Starten met startschema, er is niet gerecirculeerd
Duur proef:	Tot 1 juli 2010
Toppen	Planten zijn getopt in week 22
Trossnoei:	Trossen snoeien op 11 vruchten, dubbele trossen op 2 x 7 vruchten. Bij de LED-behandeling is tijdelijk op 12 vruchten gesnoeid (vanaf week 47 tot en met week 53)
Klimaatinstellingen:	Getracht is om het klimaat tijdens het onderzoek zoveel mogelijk per behandeling te optimaliseren. Dit is gedaan op advies van telers binnen de begeleidingscommissie (BCO) en aan de hand van de zeer frequente gewasbeoordelingen.
Overige teeltmaatregelen:	Indien nodig werden teeltmaatregelen zoals bladsnoei en watergift wat gevarieerd per behandeling. Dit was mede afhankelijk van de gewasstand en werd veelal uitgevoerd op advies van de BCO

## 2.2 Behandelingen

In de 4 kassen werden 4 belichtingsbehandelingen toegepast van gelijke lichtintensiteit. De behandelingen waren:

- SON-T belichting boven het gewas, kas 609 (SON-T)
- LED-belichting boven het gewas, kas 608 (LED)
- hybride systeem met 50% SON-T en 50% LED-belichting, beide boven het gewas, kas 606 (Hybride-boven)
- hybride systeem met 50% SON-T boven het gewas en 50% LED-belichting tussen het gewas (tussen de 2 rijen), kas 607 (Hybride-tussen).

De LED-belichting was samengesteld uit rode en blauwe LEDs, zodanig dat het geleverde licht voor 12% blauw (450 nm) en 88% rood (660 nm) was. De beoogde lichtintensiteit van het totale belichtingssysteem in elke behandeling was  $170 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  met een maximale daglengte van 18 uur. De belichting werd uitgezet ongeveer 1 uur voor zononder.

Bij ieder belichtingssysteem werd vervolgens een schakeling (dambord schakeling) aangebracht waardoor de belichting ook op 50% intensiteit kon draaien. In de hybride systemen betekende dit of de SON-T of de LED-belichting ingeschakeld.

## 2.3 Metingen

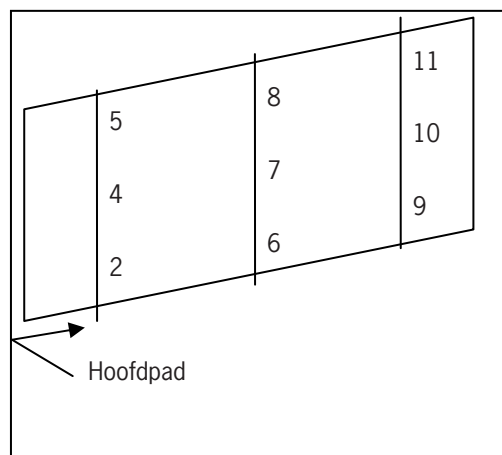
### 2.3.1 Klimaatregistratie

#### 2.3.1.1 Kasklimaat

De setpoints en het gerealiseerde klimaat in de kassen werden elke 5 minuten geregistreerd met de klimaatcomputer (Hoogendoorn Economic). Daarbij werden de kasluchttemperatuur, relatieve luchtvochtigheid,  $\text{CO}_2$ -concentratie, raamstand, globale straling en het PAR licht in de kas gemeten en opgeslagen.

#### 2.3.1.2 Microklimaat

Het microklimaat in het gewas werd vanaf januari t/m eind mei gemeten door draadloze sensoren te plaatsen tussen de tomatenplanten in de derde rij. Ze werden op 3 plaatsen in de rij en op 3 hoogtes gehangen, in totaal 9 sensoren per kascompartiment (Figuur 1). De laagste sensor hing op 1 m van de mat, de middelste op halve planthoogte, en de hoogste sensor op 0.5 m onder de kop van de plant. Meetwaarden werden elke 5 minuten geregistreerd en gemiddeld per hoogte in de kas.



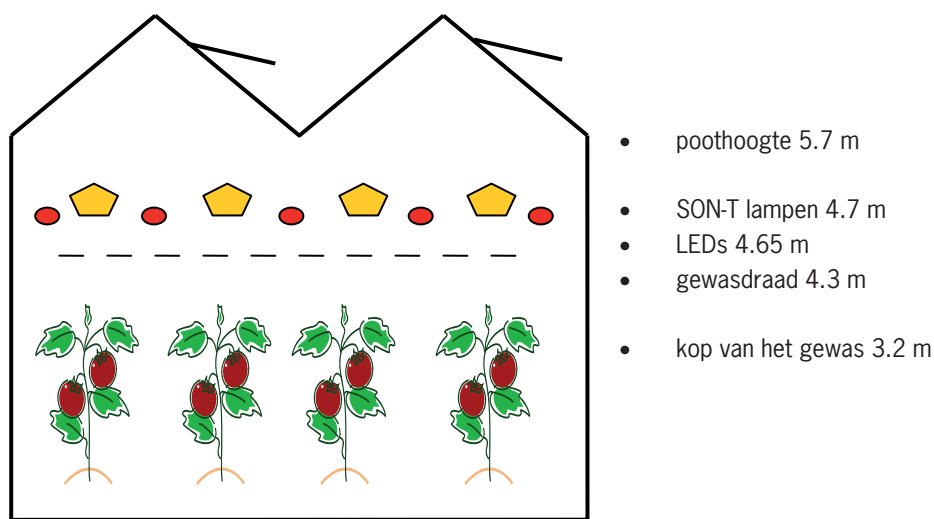
Figuur 1. Zij aanzicht van de rij waarin draadloze sensoren (met sensornummers) in elke kas zijn geplaatst.

## 2.3.2 Lichtintensiteit en -verdeling

Lichtmetingen in de kas zijn uitgevoerd met een LiCor Line quantum sensor (LI-191) met een lengte van 100 cm. Er is ook incidenteel gemeten met een Licor quantum sensor (LI-190) voor puntmetingen. Spectrale analyses zijn gemaakt met behulp van een Jaz spectrale meter van Ocean Optics.

De lichtintensiteit van het zonlicht op gewashoogte werd incidenteel gemeten, direct op gewashoogte met de LiCor line quantum sensor. Voor dag- en seizoensmetingen werd de globale straling van buiten de kas vermenigvuldigd met de transmissiefactor voor het kasdek in iedere kas.

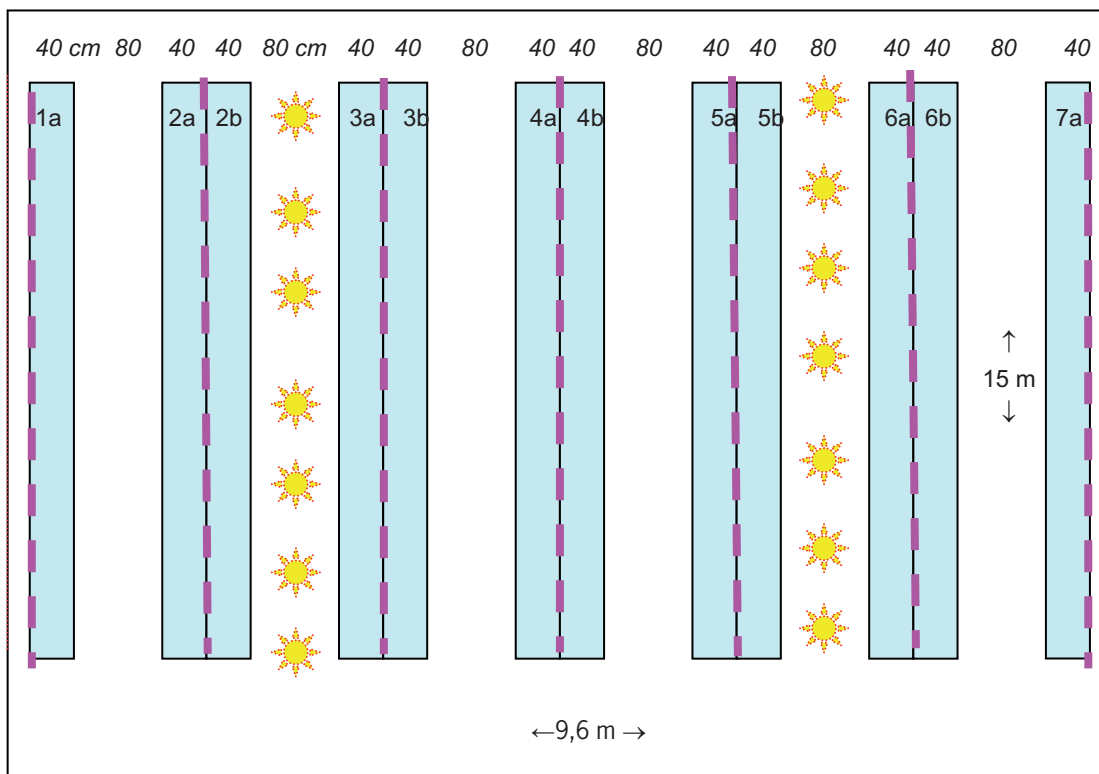
Lichtmetingen van elke belichtingsinstallatie werd uitgevoerd na zonsondergang. Gemeten werd op gewashoogte, d.w.z. daar waar de kop van het gewas werd verwacht, ongeveer 1.50 m onder de lampen (zie Figuur 2). Gemiddelde lichtintensiteiten zijn berekend voor de hele kas en apart voor gedeeltes ervan, b.v. teeltrijen, betonpad en randrijen.



*Figuur 2. Schematische weergave van hoogtes van de lampen bij bovenbelichting, gewasdraad en kop van het gewas.*

De SON-T lampen zijn opgehangen boven de paden. In de hybride behandelingen met 50% SON-T belichting, hingen 2 x 7 SON-T 600 W lampen aan 2 Canalis profielen. De afstand tussen de profielen was 4.8 m en 2.2 m tussen de lampen. In de behandeling met 100% SON-T belichting hingen 2 x 8 lampen van 1000 Watt aan 2 Canalis profielen. De afstand tussen deze lampen was 1.85 m.

In de Hybride-boven behandeling zijn de LED's boven de rijen gehangen, naast de SON-T lampen op ca 4.70 m. In de Hybride-tussen behandeling hingen ze tussen het gewas op verstelbare hoogte. De afstand tussen de rijen LED's was in alle gevallen 1.6 m en de LED's hingen ook langs de zijgevels in de randrijen. De dimensies en indeling van de kasafdelingen en lampen zijn schematisch weergegeven in Figuur 3.



Figuur 3. Schematische indeling van de hybridebelichting in de kas met paden, rijen (bedden), lampen, LEDs- en kasdimensies. Aantal en plaatsing van lampen zijn niet exact weergegeven. (— — — LED-belichting (boven of tussen het gewas; ☀ SON-T lampen).

### 2.3.2.1 Lichtverdeling

Om tot een homogene lichtverdeling te komen, is er vaker gemeten in de kassen, telkens na aanpassing van het aantal of plaatsing van de lampen. Binnen een opgezet meetveld (waarbinnen de metingen worden gedaan) werd een meetraster gekozen (punten waar de metingen worden gedaan). Er werd gemeten op 195 meetplaatsen per kasafdeling: op 15 plaatsen boven iedere gewasrij en elk pad (zie Bijlage I), met een tussenruimte van 1 meter. Bij het berekenen van de lichtverdeling en -intensiteit zijn de metingen boven het betonpad voorin de kas buiten beschouwing gelaten.

De lichtmetingen bij de Hybride-tussenbelichting zijn op dezelfde manier uitgevoerd als bij de Hybride-bovenbelichting, namelijk in het verticale vlak met de lichtbron naar beneden schijnend. Op deze wijze wordt bepaald hoeveel licht door dit systeem in de kas wordt gebracht. Hiertoe waren de twee LED-strengen tijdelijk 'gekanteld' zodat ze naar beneden schenen. De lichtintensiteiten zijn vervolgens per streng gemeten en daarna opgeteld om aan de lichtintensiteit van de tussenbelichting te komen.

### 2.3.2.2 Lichtonderschepping

Om de lichtverdeling in het gewas onder invloed van lamplicht te analyseren werden op verschillende hoogtes metingen van de lichtintensiteit van de kop van het gewas tot de teeltgoot uitgevoerd. Metingen werden uitgevoerd 's avonds als het donker was met behulp van een Sunscan Canopy analysis systeem (Delta-T Ltd, UK). De Sunscan met een lengte van 75 cm werd elke 25 cm tussen de kop van het gewas en de mat dwars in de rij gestoken. Tegelijkertijd werd er een referentiemeting uitgevoerd boven het gewas om de relatieve lichtintensiteit te bepalen; deze geeft de mate van lichtonderschepping aan.

### **2.3.2.3 Lichtverlies**

Met behulp van de Sunscan Canopy analysis systeem werd het mogelijke verlies aan lamplicht uit het tussenbelichtingsstelsel gemeten tussen twee bedden (afstand 120 cm). De lichtintensiteit werd gemeten zowel op de grond (Sunscan naar boven toe gericht), als net boven het gewas (Sunscan naar beneden toe gericht). Metingen werden uitgevoerd met alleen de LED-tussenbelichting aan en ook met zowel de LED-tussenbelichting als de SONT bovenbelichting aan.

### **2.3.2.4 Spectrale lichtdoordringing**

De doordringing van de verschillende kleuren licht in het gewas werd gemeten met een Ocean Optics Jaz systeem. De metingen zijn driemaal uitgevoerd. Er is elke 50 cm gemeten vanaf de draad tot aan de grond en 5 keer in horizontale richting tussen 2 bedden. De horizontale metingen zijn per hoogte gemiddeld.

## **2.3.3 Plantregistraties en –metingen**

### **2.3.3.1 Gewasbeoordelingen**

Tijdens de belichtingsperiode tot medio april is het gewas 2-3 keer per week beoordeeld. De beoordeling is uitgevoerd op basis van de stand van het gewas (vegetatief tot generatief), de kleur van de kop (groen tot paars) en trossterkte (zwak tot sterk).

### **2.3.3.2 Plantwaarnemingen**

Om veranderingen in de gewasmorfologie als gevolg van de verschillende belichtingsystemen, is de gewasgroei wekelijks gemonitord.

Wekelijks zijn per afdeling bij 2 x 10 planten in 2 telvakken de volgende parameters geregistreerd:

- lengtegroei
- kopdikte (ter hoogte van de top van de plant in de voorgaande week)
- bladlengte (eerste blad onder de bloeiende tros)
- bloeiende tros
- aantal gezette vruchten
- plantbelasting

### **2.3.3.3 Productie**

Per carrousel (dubbele plantrij op één teeltgoot) en randrij werden de volgende oogstwaarnemingen uitgevoerd:

- totaal gewicht klasse I geoogste trossen (dat is exclusief neusrot en gescheurd)
- gewicht neusrotte vruchten
- gewicht gescheurde vruchten

Oogstrijpe trossen werden in het begin wekelijks, en later 2 keer per week geoogst. Voor de productiewaarnemingen zijn steeds de vruchten van de gehele afdeling genomen.

Per veld werden de volgende oogstwaarnemingen uitgevoerd:

- netto gewicht geoogste trossen (klasse I)
- aantal trossen
- aantal goede gekleurde vruchten per tros
- aantal groene vruchten per tros
- aantal neusrot
- aantal gescheurd

Het gemiddelde vruchtgewicht werd berekend op basis van het gewicht en aantal vruchten binnen de velden met waarnemingsplanten. De oppervlakte van de 2 velden met de waarnemingsplanten bedroeg in totaal 6.4 m<sup>2</sup> per afdeling.

#### **2.3.3.4 Vruchtkwaliteit**

In totaal 5 maal zijn bij de oogst vruchten verzameld voor een houdbaarheidsproef. Per inzetdatum zijn er daarbij steeds 6 trossen met in totaal 54 à 60 vruchten per kasafdeling bewaard bij 20 °C en 80% RV. De inzetdata waren respectievelijk 17 december 2009, 14 januari, 17 februari, 24 maart en 27 mei 2010.

Met behulp van het smaakmodel van Wageningen UR Glastuinbouw is de smaak berekend op respectievelijk 21 december 2009, 18 januari, 27 januari, 16 februari en 22 maart 2010. Als onderdeel van deze bepaling is ook het % sap en de refractie gemeten. De sensorische smaak is 2 maal met een consumentenpanel beoordeeld op 28 januari en 16 februari 2010.

Het vitamine C-gehalte (ascorbinezuur) is in 2010 wekelijks gemeten vanaf week 1 tot en met week 12. Dit geldt ook voor het titreerbaar zuurgehalte en de refractie.

#### **2.3.3.5 Fotosynthese metingen**

De fotosynthesecapaciteit werd gemeten in week 3 en 12 2010 met een fotosynthesemeter (Licor 1800-14, USA) met een bladkamer van 2.0 cm<sup>2</sup>. Door de fotosynthese te meten onder vaste klimaatcondities (700 ppm CO<sub>2</sub>, 21°C, en circa 85% RV in de bladkamer) met toenemende lichtintensiteiten, werd de fotosynthesecapaciteit gemeten; dat wil zeggen de hoeveelheid CO<sub>2</sub> die het blad opneemt onder deze specifieke condities. Dit maakt het mogelijk om alle metingen gedurende de dag en in de verschillende kasafdelingen onderling te vergelijken. Metingen werden gedaan aan bladeren bovenin en onderin het gewas. De metingen werden uitgevoerd op een volgroeid blad, dat niet beschaduwd werd door bovenliggende bladeren.

#### **2.3.3.6 Plantmorfologie en destructieve oogst**

Ook werd maandelijks een destructieve bepaling uitgevoerd. Bij de destructieve bepalingen werden 5 à 6 planten per behandeling geanalyseerd. De volgende parameters werden bij de destructieve bepalingen geanalyseerd:

- Versgewicht bladeren en stengel apart per plant [g]
- Drooggewicht bladeren en stengel per plant [g]
- Bladoppervlak [m<sup>2</sup>]
- LAI per plant (leaf area index) [m<sup>2</sup>m<sup>-2</sup>]
- SLA per plant (specific leaf area) [cm<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>]

#### **2.3.3.7 Gewastemperatuur**

De gewastemperatuur werd gemeten met IR planttemperatuurcamera's (Brinkman). De camera's werden 50 tot 75 cm boven het gewas opgehangen in een hoek van ca. 80° (t.o.v. verticaal) om de temperatuur in het bovenste deel (ca. 1.5 tot 3 m<sup>2</sup>) van het gewas te meten.

Incidentele metingen van bladtemperatuur zijn uitgevoerd met een hand-held thermo-hygrometer/laser pyrometer (Humiport 05 IR). Daarmee werden 10 tot 30 bladeren bovenin het gewas gemeten onder de verschillende belichtingssystemen.

In aanvulling hierop zijn ook thermokoppels geplaatst, met de sensor in contact met de onderkant van een blad, waarmee bladtemperatuurmetingen in de tijd zijn uitgevoerd.



### **2.3.3.8 Wateropname**

De watergift per kas werd berekend aan de hand van de gift per minuut van de druppelaars vermenigvuldigd met de druppeltijd. De drain werd van de hele kasafdeling gemeten en geregistreerd via de klimaatcomputer.

### **2.3.3.9 Bladhoekmetingen**

De morfologische eigenschappen van de bladeren werden geanalyseerd door de lengte, breedte, oriëntatie (=windrichting) en bladhoek t.o.v. de stengel handmatig te meten. De metingen zijn uitgevoerd op 2 blokken van 3 planten in het midden van elke kas. De blokken (metingen) zijn apart uitgevoerd op 26 en 29 januari 2010. Alle metingen zijn gedaan op alle bladeren van iedere plant, van boven naar beneden toe. De verschillen tussen de blokken zijn statistisch getoetst.

De hoekmeting is uitgevoerd m.b.v. een gradenboog die waterpas werd gehouden, met een betrouwbaarheid van  $\pm 5$  graden.

### **2.3.3.10 Plantbewegingen**

Op 2 plaatsen op een halve meter boven het gewas werd in elke kas een webcam opgehangen. Er kon met een dubbele webcamset in 2 kassen simultaan gemeten worden; gekozen is om één set continue opnames in de kas met de SONT-behandeling te behouden als referentie. De meetperioden vonden plaats in december 2009 en januari 2010. Van de verkregen beelden werd een film gemaakt en kwalitatief geanalyseerd. De intensiteit van de plantbewegingen werden per uur vergeleken voor alle 4 behandelingen.

## **2.3.4 Energiestromen in de kas**

Voor alle belichtingsystemen (type en combinatie) is een stroommeting uitgevoerd op de spanningskabels en is vervolgens vergeleken met het theoretisch opgenomen vermogen volgens de specificaties van de leveranciers. Er zijn geen elektriciteitsmeters in de kassen geplaatst, maar het elektraverbruik is berekend aan de hand van het theoretisch vermogen en het signaal 'assimilatiebelichting aan'.

Voor wat betreft de verwarming en indien aanwezig ook de koeling, zijn alle afzonderlijke circuits voorzien van warmtemeters. Deze zijn gecontroleerd door aan de hand van de buistemperaturen, buisdiameters en buislengte en de kasluchttemperatuur het afgegeven vermogen te berekenen. Op afdelingsniveau (groeibuis + buisrail) zijn de verschillen tussen gemeten en berekende energie gebruik minder dan 4%.

Voor de koeling, in de afdelingen 'Hybride-boven' en 'LED', kan deze controleberekening niet goed gemaakt worden. Dit komt omdat een deel van het koelsysteem ook condensatiewarmte opneemt en dat is in de twee afdelingen verschillend. Daarnaast is het effect van het VO (verwarmend –koelend– oppervlak) van de trafo's die in gekoelde kisten zitten en voor een deel koud is, niet bekend.

Wel dient opgemerkt te worden dat door het koelen op deze temperaturen, de kaslucht ook gekoeld wordt waarna extra warmte in de buizen gestopt moet worden om deze koeling te compenseren.

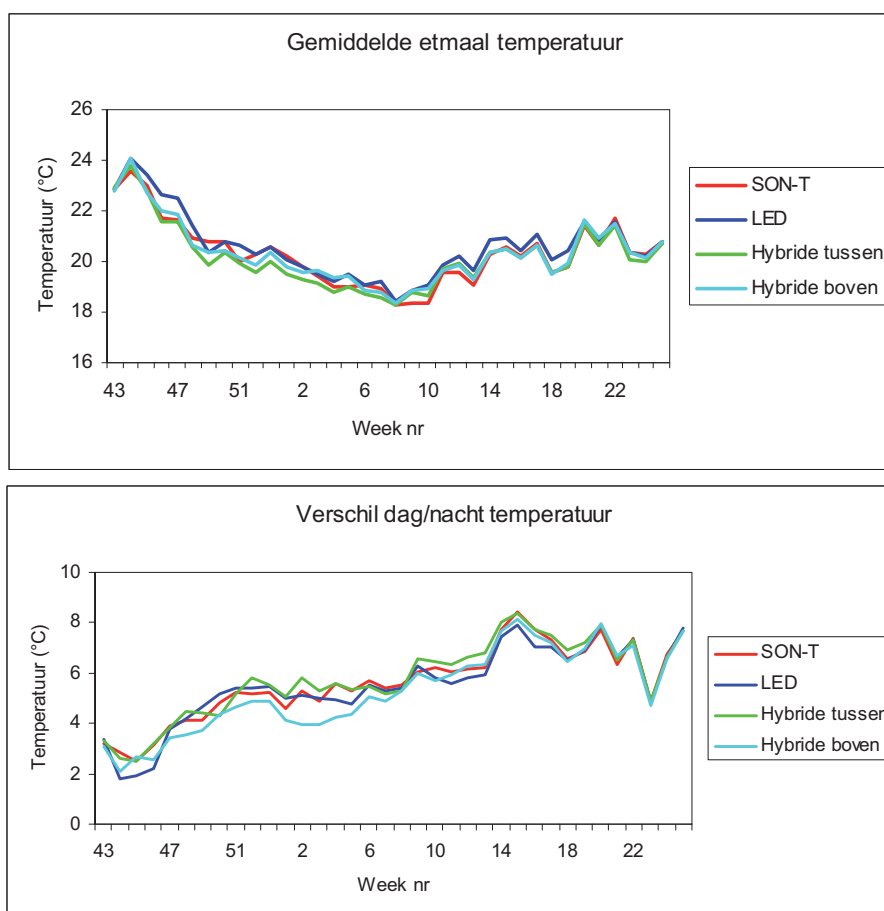


## 3 Resultaten & Discussie

### 3.1 Klimaat registratie

#### 3.1.1 Kasklimaat

In Tabel 1 zijn de gemiddelde etmaal kasklimaat parameters weergegeven (zie ook Bijlage II). De verschillen in temperatuur en CO<sub>2</sub>-concentratie in de kas tussen de verschillende lichtsystemen zijn niet groot, maar de verschillen in de tijd (Figuur 4, boven) laten zien dat het verschil van 0.3-0.4 °C (hoger) bij LED dan bij de overige belichtsystemen vrij constant is gedurende de belichtingsperiode tot week 20 (medio mei), wanneer de belichting uitging. Dit kwam met name door een hogere temperatuur setpoint in de ochtend uren en een hogere maximumbuistemperatuur in de LED-behandeling. Het gemiddelde vochtdeficiet geeft aan dat in de SON-T en Hybride-tussen behandelingen, een lagere luchtvochtigheid heerste. In de bovenbelichtingsystemen met LED's was het vochtdeficiet gedurende het experiment 0.5-0.6 g m<sup>-3</sup> lager, wat vooral in de LED-behandeling zichtbaar werd door condens op het glas. Dit suggereert dat het gewas onder LED meer verdampt moet hebben. Belangrijker is waarschijnlijk de invloed van de raamopening, die inderdaad verschilde tussen behandelingen. De raamopening aan de luwe zijde was tussen november tot en met maart 5.0 (SON-T), 2.3 (LED), 4.6 (Hybride-tussen) en 2.4% (Hybride-boven). Bij SON-T en Hybride-tussen is de raamopening dus ongeveer 2 keer zo groot geweest dan bij LED en Hybride-boven, waardoor er in eerstgenoemde behandelingen meer vochtige lucht afgevoerd zal zijn, wat resulteerde in een hoger vochtdeficiet.



Figuur 4. Gemiddelde etmaaltemperatuur en verschil in dag/nacht temperatuur gedurende het experiment.

De kasluchttemperatuur zakte van ongeveer 23 °C naar 19 °C tot eind februari, waarna het hoger werd (tot ongeveer 22 °C) in het voorjaar. Het verschil in dag/nacht temperatuur, weergegeven in Figuur 4 (boven), bedroeg 5-6 °C tijdens de wintermaanden toen het gewas volgroeid was. Gedurende het winterseizoen van week 47 tot week 14 was het verschil in dag/nacht temperatuur het laagst bij de Hybride-boven (4,9°C) vanwege het extra stoken in de morgenuren, en het hoogst bij de Hybride-tussen behandeling (5,6°C), met de LED en SON-T behandelingen daar tussenin.

Het CO<sub>2</sub>-gehalte op de dag is bij de vier behandelingen nauwelijks verschillend geweest.

*Tabel 1. Kasklimaat gedurende het experiment: kasluchttemperatuur (°C), vochtdeficiet (g m<sup>-3</sup>) en gemiddelde CO<sub>2</sub>-concentratie tijdens de dag (ppm).*

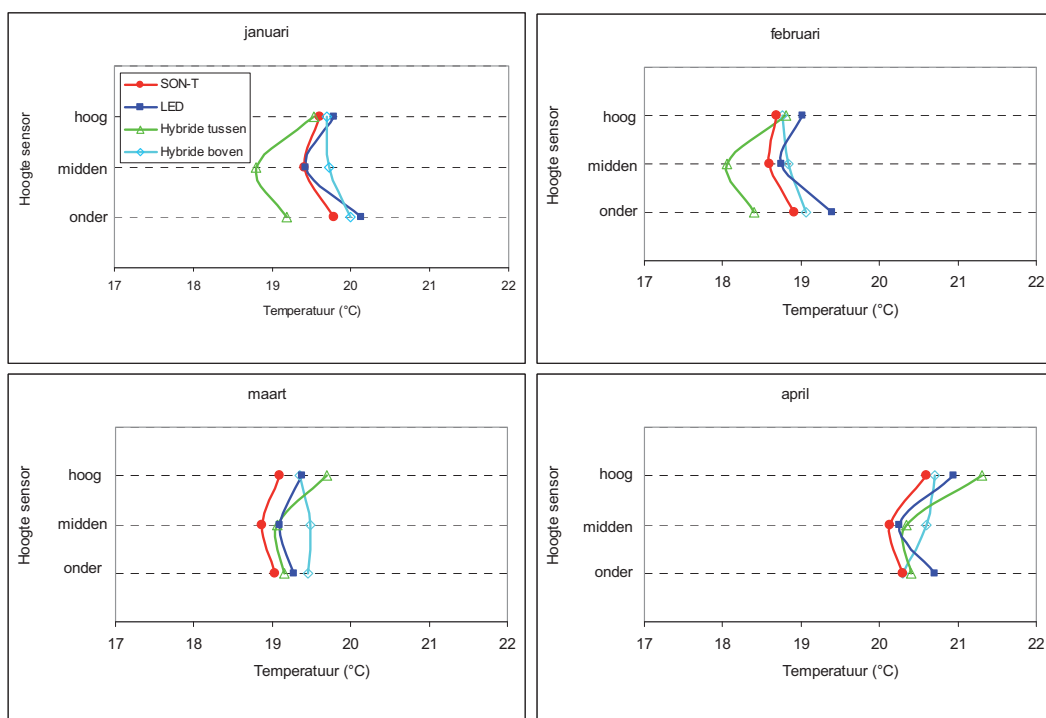
	Temperatuur (°C)	Vochtdeficiet (g m <sup>-3</sup> )	CO <sub>2</sub> (ppm)
SON-T	20.3	4.0	1016
LED	20.6	3.4	1045
Hybride-tussen	20.2	4.0	1043
Hybride-boven	20.3	3.5	1008

### 3.1.2 Microklimaat

Het microklimaat in het gewas is continu gemeten, en in Figuur 5 is de gemiddelde temperatuur onder, midden en hoog in het gewas weergegeven. In Bijlagen III en IV de cyclisch gemiddelde dagtemperatuur voor de drie plaatsen in het gewas weergegeven voor de maand januari. Bij alle behandelingen hoog in het gewas zou een gelijke temperatuur verwacht mogen worden omdat het zo ingesteld was. Naar het voorjaar toe zijn de temperatuurverschillen tussen de behandelingen hoog in het gewas echter groter geworden.

In bijna alle maanden was het middenin het gewas iets koeler dan hoog of laag in het gewas, veroorzaakt door de warmte van de lampen (hoog) en warmte van de verwarmingsbuis (laag) in het gewas. In januari 2010 is te zien dat de temperatuur bij Hybride-tussen midden en laag in het gewas ongeveer 1 °C lager was dan in de overige behandelingen, wat vreemd overkomt vanwege de warmtebron (LED-strengen) midden in het gewas.

In Bijlage III is de cyclische gemiddelde dagtemperatuur gegeven voor januari, waarin geen grote verschillen tussen gewaslagen lijken te zijn, behalve bij de Hybride-tussen waar de kop van het gewas warmer lijkt te zijn dan lager in het gewas. In Bijlage IV is de y-as uitvergroot waardoor de temperatuur per gewaslaag beter zichtbaar wordt gedurende de nachtelijke uren waarin alleen de lampen branden (0-9 uur). Hierin is te zien dat bij de Hybride-boven er weinig verschil is tussen de gemiddelde kasluchttemperatuur en de temperatuur in de drie gewaslagen. Bij de Hybride-tussen is de temperatuur onderin en midden in het gewas 0.5-1.0 °C lager dan de kasluchttemperatuur, waarschijnlijk doordat er minder is gestookt in die behandeling. Immers, de LED-strengen in het gewas werkten als een minimumbuis. De gemeten temperatuur van de aluminium profielen direct onder de brandende LED's was namelijk gemiddeld zo'n 9 °C hoger dan de luchttemperatuur. Vanwege het feit dat er meer gestookt moest worden bij de LED-behandeling is de temperatuur onderin het gewas hoger dan het kasgemiddelde. Bij de SON-T behandeling is de temperatuur in alle drie gewaslagen lager dan de gemiddelde temperatuur gemeten boven het gewas en is sterk beïnvloed door de lampen.



Figuur 5. Gemiddelde etmaaltemperaturen (°C) per maand in het gewas. De sensoren werden geplaatst laag, midden en hoog in het gewas.

Dat de temperatuur bij de LED vooral laag, maar ook hoog in het gewas hoger was dan bij SON-T, komt waarschijnlijk doordat de kasafdeling met LED's hoger gestookt moest worden met hogere buistemperaturen om de kasluchttemperatuur op het gewenste niveau te houden, waardoor ook de gemiddelde etmaaltemperatuur in deze behandeling het hoogst was.

Bij de Hybride-boven is er nagenoeg geen temperatuurgradiënt zichtbaar. Blijkbaar is er een betere balans tussen verwarming van boven (SON-T lampen) en onderin (verwarmingsbuis) waardoor er geen gradiënt is ontstaan.

## 3.2 Lichtmetingen

### 3.2.1 Lichtintensiteit

De hoeveelheid licht die het gewas kreeg onder ieder belichtingssysteem is weergegeven in Tabel 2. Er is een verschil in kasdektransmissie gemeten variërend van 65% bij de LED en Hybride-boven behandeling tot 68% bij de SON-T behandeling. Het verschil is 3% meer licht ten gunste van het SON-T kascompartiment, en heeft ongetwijfeld gevolgen gehad voor de productiever verschillen die geconstateerd zijn (zie paragraaf 3.1.3.4). Het verschil in transmissie werd ondermeer veroorzaakt door het aantal en oppervlak van de armaturen in de verschillende behandelingen. Rekening houdend met het oppervlak en de diepte van de SON-T en LED-armaturen, is de potentiële lichtonderschepping door de armaturen berekend (Tabel 2). De armaturen in de SON-T behandeling onderschepten minder licht dan de Hybride-boven behandeling (met zowel LED als SON-T armaturen) en de LED-behandeling (LED-armaturen) wat het verschil van 3% deels kan verklaren. Bij de Hybride-tussen behandelingen (met alleen SON-T armaturen boven het gewas) werd 2% meer lichtverlies gemeten t.o.v. de SON-T behandeling met een berekend lichtverlies als gevolg van de armaturen. Deze verschillen in lichtverlies, grotendeels veroorzaakt door de lichtarmaturen, verklaren in grote lijnen de gemeten verschillen in lichttransmissie ter hoogte van het gewas.

Tabel 2. Lichtintensiteit afkomstig van de zon en de lampen op het gewas tijdens het experiment tot 18 mei 2010.

Belichtingsstelsel	Kasdek transmissie (%)	Lichtverlies a.g.v. armaturen (%)	Zonlicht op gewashoogte (mol m <sup>-2</sup> )	Lamplicht op gewashoogte (mol m <sup>-2</sup> )	Totaal licht (mol m <sup>-2</sup> )
SON-T	68	3.3	2065	1708	3772
LED	65	4.6	1974	1796	3770
Hybride-tussen	66	3.4	2004	1747	3751
Hybride-boven	65	8.0	1974	1733	3707

Het belichtingsseizoen (18 uur belichten bij 170  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) eindigt begin april, waarna de belichting zowel minder lang als minder intens is gaan branden, d.w.z. op dagen met meer zonlicht zijn de belichtingsstelsels op 50% gaan branden. Tot begin april bedroeg het verschil in branduren tussen de behandelingen maximaal 9 uur. Als de lampen op 50% gingen branden, waren dat vooral de LED-lampen, vanwege de lagere warmteafgifte van de armaturen. Daarmee wordt het verschil in lamplicht verklaard, wat vooral tussen 5 april en 18 mei tot stand is gekomen. Het invloed van (de helft van) de lampen in april en mei was waarschijnlijk erg klein. Na 18 mei zijn de lampen helemaal uitgegaan.

De som van zon- en lamplicht laat zien dat de SON-T en LED-behandelingen het meeste licht hebben ontvangen, gevolgd door de Hybride-tussen behandelingen. De Hybride-boven behandeling kreeg het minste licht in totaal (ca. 60 mol m<sup>-2</sup>).



SON-T

LED

Hybride-tussen

Hybride-boven

Het gewas onder de verschillende belichtingsstelsels.

Tabel 3. Gemeten lichtintensiteit ( $\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ ) op gewashoogte (1.5 m onder de lampen). Gemiddelde van 195 meetpunten in de hele kas (behalve het betonpad).

Belichtingsstelsel	Lichtintensiteit ( $\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ )		
	SON-T	LED	Totaal
SON-T	172	-	172
LED	-	171	171
Hybride-tussen	89	78	167
Hybride-boven	89	82	171

De beoogde lichtintensiteit in de behandelingen was  $170 \mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ . Vanwege de verbeterde LED-systemen bij LED-bovenbelichting, wezen de eerste metingen aanzienlijk hogere lichtintensiteiten uit (ca.  $200 \mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$  bij de Hybride-boven). Het was niet mogelijk om het Hybride-tussen belichtingsstelsel aan te passen, zodat er uiteindelijk voor een iets hogere lichtintensiteit is gekozen, namelijk  $170 \mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ . Vervolgens zijn de overige belichtingsstelsels aangepast totdat een gemiddelde lichtintensiteit van  $170 \mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$  werd bereikt (Tabel 3). Volgens modelsimulaties (Schapendonk *et al.* 2010) is de optimale hoeveelheid licht voor het geteelde ras Sunstream,  $200 \mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ , wat iets meer is dan in dit experiment. Desondanks moet de gebruikte lichtintensiteit voldoende zijn voor een goede opbrengst.

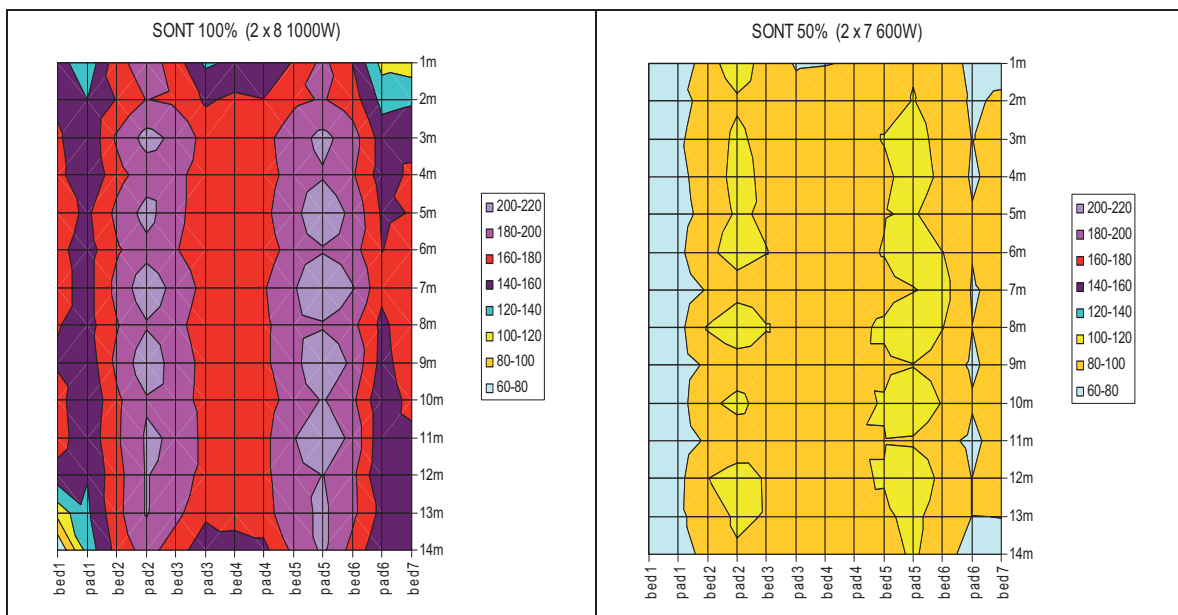
### 3.2.2 Lichtverdeling

In alle kasafdelingen is de lichtintensiteit en lichtverdeling gemeten tussen 7 oktober en 11 november 2009. Naar aanleiding van de tussentijdse meetresultaten werden de nodige aanpassingen gedaan (verplaatsen van lampen/LED-armaturen, verwijderen van een deel van de LED's uit de armaturen), totdat de lichtintensiteit in alle afdelingen vergelijkbaar was en tevens met een homogene lichtverdeling.

**SON-T lampen:** Alle lichtmetingen zijn ook uitgevoerd op een hoogte van 150 cm onder de lampen; altijd na zonsondergang. De beoogde lichtintensiteit van  $170 \mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$  werd bereikt in de 100% SON-T behandeling door gebruik te maken van 1000W lampen. Uiteindelijk zijn er 2 x 8 lampen gebruikt met een onderlinge afstand van 2.2 m. Bij de hybride behandelingen (ca.  $85 \mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ ) zijn er 2 x 7 lampen van 600W gebruikt, 1.85 m uit elkaar geplaatst. De gemeten lichtintensiteiten bij 50% en 100% SON-T in de eindconfiguraties zijn weergegeven in Tabel 3, waarin is te zien dat de beoogde belichtingsniveaus goed gerealiseerd zijn. Bij SON-T 50% is de gemiddelde gemeten lichtintensiteit in de hele kas (inclusief betonpad) gelijk aan  $89 \mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ , dichtbij het lichtplan dat een lichtintensiteit  $90 \mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$  aangaf. Bij SON-T 100% is de gemiddelde gemeten lichtintensiteit in de hele kas (inclusief betonpad) gelijk aan  $171 \mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ , en dat is gelijk aan de waarde van het lichtplan ( $171 \mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ ).

De lichtverdeling van de belichtingsstelsels met SON-T lampen wordt weergegeven in Figuur 6. Hoewel de lichtverdeling redelijk goed is, komt er duidelijk meer licht direct onder de lampen en minder tussen of naast de lampen. Een deel van het licht valt op het betonpad en achterin de kas.

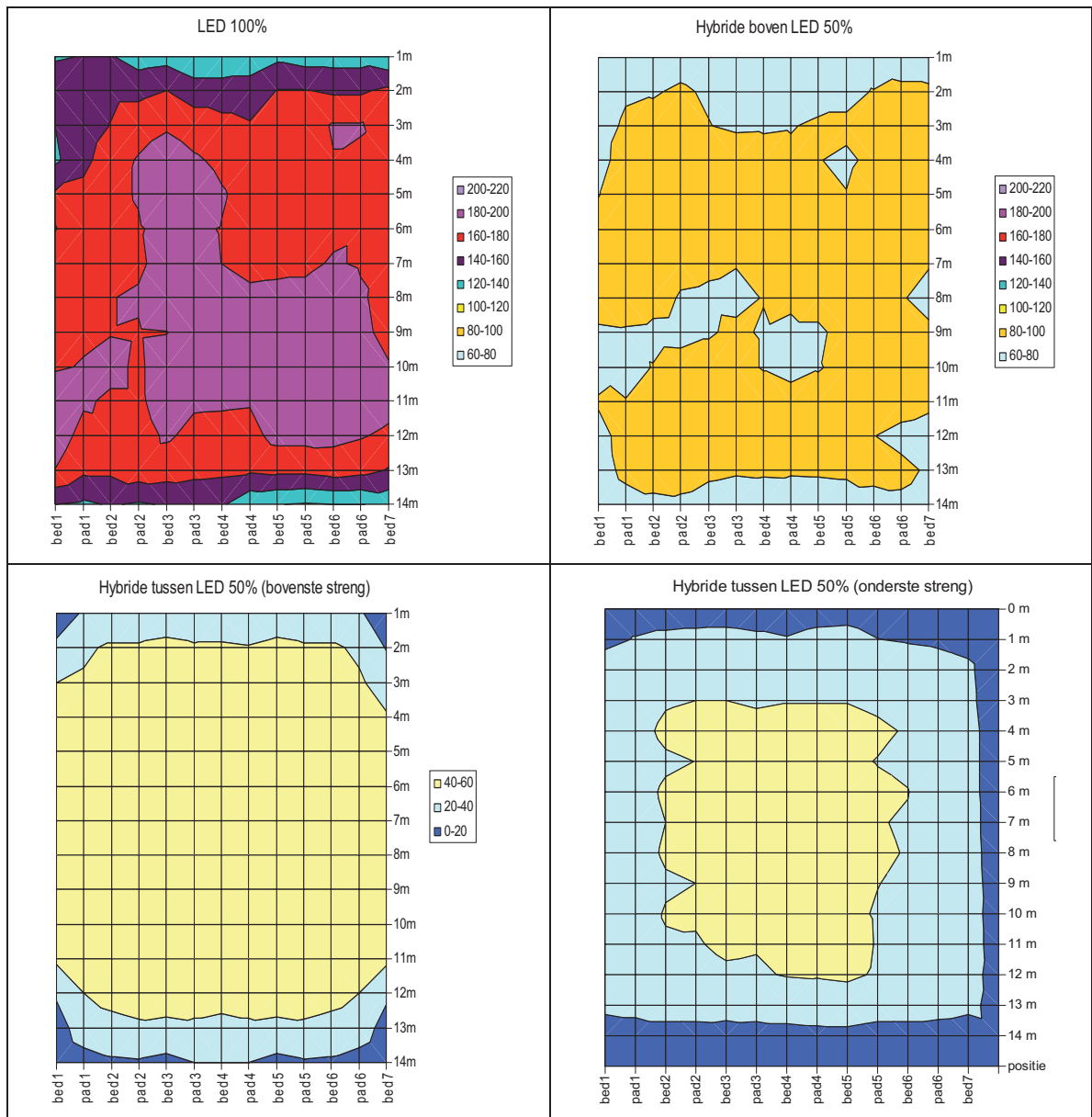




Figuur 6. Lichtverdeling onder SON-T lampen bij 100% SON-T belichting (links) en 50% SON-T belichting (rechts).

**LED-lampen (boven):** Het lichtniveau bleek veel hoger te zijn dan gewenst, mede doordat extra capaciteit in de armaturen was ingebouwd en doordat de nieuwe LED's efficiënter bleken te zijn dan die van het vorige experiment. Na de initiële metingen is eerst 25% van de LED's handmatig losgekoppeld. Op 10 november zijn de armaturen teruggebracht met 20%. De 'gaten' zijn zo goed mogelijk verdeeld over de hele kas. Tabel 3 geeft de resultaten weer voor de LED-belichtingssystemen. Bij de LED-behandeling was de gemiddelde lichtintensiteit  $171 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  en bij de hybride behandelingen  $82 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . In beide gevallen blijkt dat de beoogde lichtintensiteiten bereikt werden en goed overeen kwamen met die van de andere afdelingen.

In Figuur 7 is de lichtverdeling van de belichtingssystemen met alleen de LED-belichting aan, weergegeven. Daarin is een goed homogene lichtverdeling te zien.



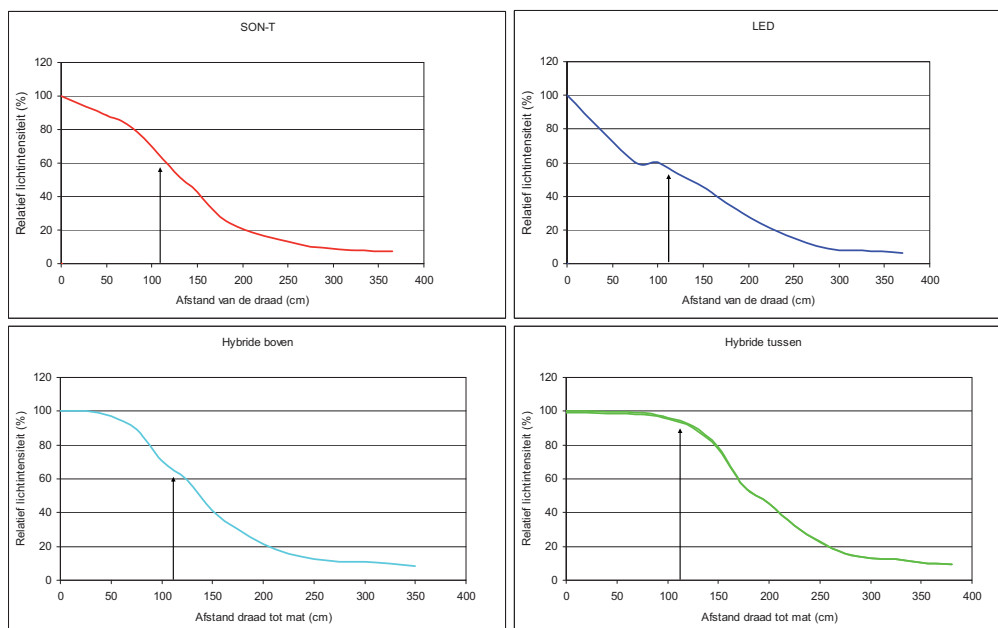
Figuur 7. Lichtverdeling onder LEDs. Boven links de lichtverdeling bij LED (100%) en rechts bij Hybride-boven (50%). Onder links de lichtverdeling van de bovenste streng van de Hybride-tussen, en rechts van de onderste streng.

**Hybride-tussen:** De LED-tussenbelichting werd gemeten in twee meetsessies. Beide strengen werden omhoog gehesen (ter hoogte van de SON-T lampen) en gekanteld. Daarna werd de lichtintensiteit apart gemeten voor beide strengen en resultaten werden gesommeerd. In Tabel 3 zijn de resultaten te zien, waaruit blijkt dat de lichtintensiteiten tussen de afdelingen weinig verschilden. De eventuele verschillen zijn groter voor het betonpad en de randrijen. Dit komt doordat de Hybride-tussenbelichting alleen boven de rijen (bedden) ligt en niet boven het betonpad, zoals bij de andere installaties het geval is. Ook hier worden de lichtverdeling en -intensiteit weergegeven in Figuur 7 en Tabel 3.

### 3.2.3 Lichtonderschepping en Lichtverlies

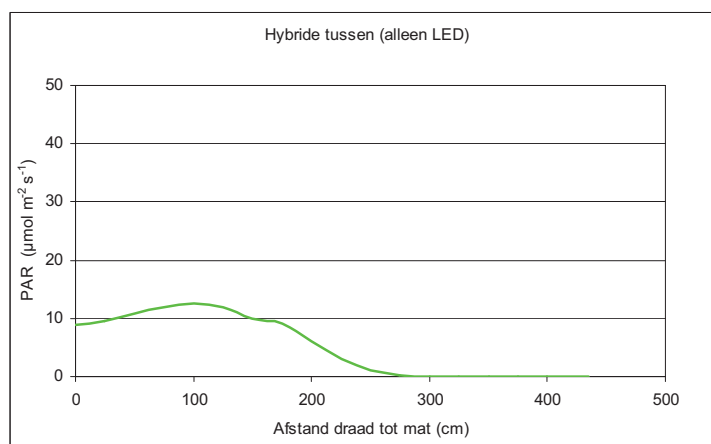
#### Lichtonderschepping

De metingen aan lichtonderschepping door het gewas zijn onder uitsluitend lamplicht in de avond uitgevoerd eind januari en begin februari. Metingen zijn uitgevoerd in de 2 rijen naast pad 5 waarboven de SON-T lampen hingen (zie Figuur 3, bedden 5 en 6).



*Figuur 8. Lichtintensiteit in het gewas vanaf de draad naar de mat De pijl is een indicatie voor de gemiddelde hoogte van het gewas (zie ook Bijlage V).*

Zoals in Figuur 8 met de pijl is aangegeven, was de beoogde kophoogte van het gewas 110 cm onder de draad en 150 cm onder de lampen. Op de dag van de metingen kon de kophoogte in de verschillende behandelingen variëren doordat het gewas niet gelijktijdig was gezakt. Tijdens deze meting was de kop van het gewas bij SON-T 75 cm onder de draad, bij LED 90 cm, bij de Hybride-boven op 100 cm en bij de Hybride-tussen op 50 cm onder de draad.



*Figuur 9. Lichtintensiteit (in horizontale richting) van uitsluitend de LEDs bij het Hybride-tussen systeem gemeten midden in het pad, vanaf de draad naar de mat.*

De metingen zijn begonnen bij de draad met de lampen 40 cm daarboven. Gevolg daarvan is dat, al is de relatieve lichtintensiteit in alle behandelingen 100% bij de draad, de actuele lichtintensiteiten veel verschillen vertoonden. De gemeten lichtintensiteit onder SON-T was veel hoger dan van de overige behandelingen (zie Bijlage V voor de absolute lichtintensiteiten), omdat in die behandeling 1000W lampen hingen, en er werd gemeten in de rijen net naast de lampen. Zowel de LED als het Hybride-boven belichtingssysteem vertoonden een gelijkmatige lichtinterceptie door het gewas. Van het Hybride-tussen belichtingssysteem werd vanaf de draad eerst alleen licht van de 600W SON-T lampen gemeten, maar omdat de LED-tussenbelichting hoog in het gewas was geplaatst, werd snel ook het LED-licht meegemeten. Hierdoor kreeg de bovenste helft van het gewas meer licht en resulteerde in een gelijke hoeveelheid licht in de eerste meter onder de draad (Figuur 8).

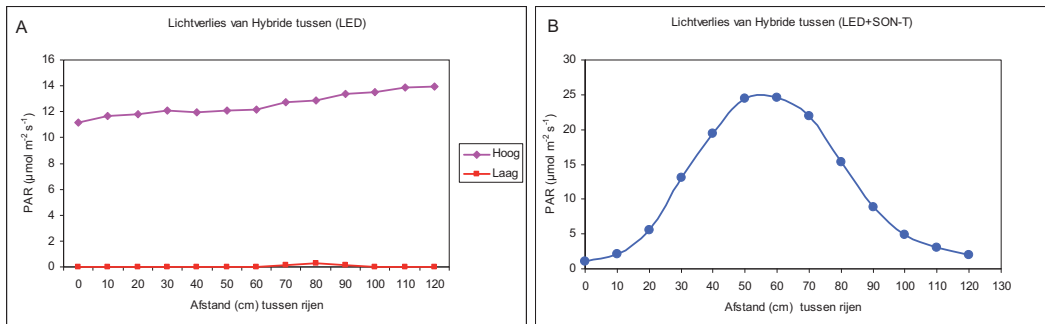


*Hybride-tussen belichtingssysteem.*

Vervolgens zijn bij de Hybride-tussen behandeling de SON-T lampen uitgezet en het licht van de tussen-LED's gemeten in horizontale richting van boven naar beneden naar de mat toe. Met de Sunscan werd er dus gemeten in het pad, met de lichtsensoren naar opzij gericht. Daarmee werd het LED-licht gemeten dat horizontaal door het gewas scheen (Figuur 9). Daarin is te zien dat er weinig licht door het gewas kwam,  $10-15 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , en dat er ongeveer  $10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  licht boven het gewas werd gemeten (lichtverlies). Dat betekent dat het gewas ongeveer 60 van de  $85 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  licht van de tussen-LED's absorbeerde.

#### **Lichtverlies bij tussenbelichting**

Op 15 februari werd het lichtverlies uit het gewas naar boven toe op een andere wijze gemeten bij het Hybride-tussen belichtingssysteem. In Figuur 10A werden de metingen uitgevoerd met alleen de tussenbelichting aan, de SON-T was uitgezet. Daarin is te zien dat LED-licht nauwelijks de vloer van de kas bereikte, maar dat er wel licht uit het gewas naar boven toe werd verloren, ongeveer  $12-14 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Dit zal nadelig zijn geweest voor de groei en productie, en betekent dat er in de toekomst rekening gehouden moet worden met dit lichtverlies naar boven toe, terwijl er ook voldoende licht moet zijn in de kop van het gewas. Echter, de bovenste LED-streng werd relatief hoog in het gewas gehangen doordat het gewas dat volgens de BCO nodig had. De metingen in Figuur 10 zijn een momentopname. Het gewas groeide rond de 30 cm per week en werd elke week à 10 dagen lager gehangen. Hierdoor kon het zijn dat de relatieve hoogte van de LED-streng t.o.v. het gewas in de tijd 25-60 cm verschilde.



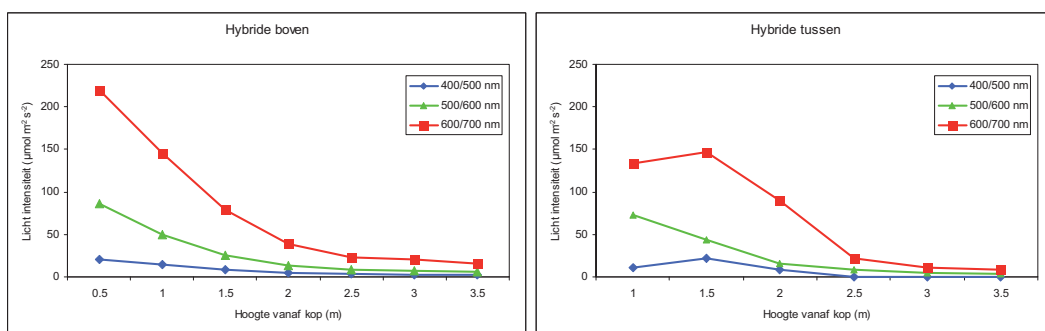
**Figuur 10.** A. Lichtverlies uit het gewas naar boven toe (hoog) en naar de grond (laag) bij de Hybride-tussen belichting met alleen de LED-lampen aan;  
 B. Lichtverlies uit het gewas naar de grond bij de Hybride-tussen belichting met zowel de LED's als SON-T belichting aan. De afstand op de x-as is de afstand midden onder de plantenbedden van 2 naast elkaar gelegen rijen.

In Figuur 10B is het licht op de grond tussen twee rijen gemeten, met zowel de SON-T en LED-belichting aan. Het geeft aan hoeveel licht er op de grond (in de pad) terecht komt, wat als lichtverlies beschouwd mag worden. Daarin is zien dat relatief veel licht op de pad terecht komt. Dat moet dan vooral komen door de SON-T belichting van boven die vrijwel direct naar beneden scheen. Dit blijkt een normaal beeld van het lichtverlies naar het pad toe te zijn bij bovenbelichting, met nagenoeg geen reflectie vanaf de grond.

### 3.2.4 Spectrale lichtdoordringing

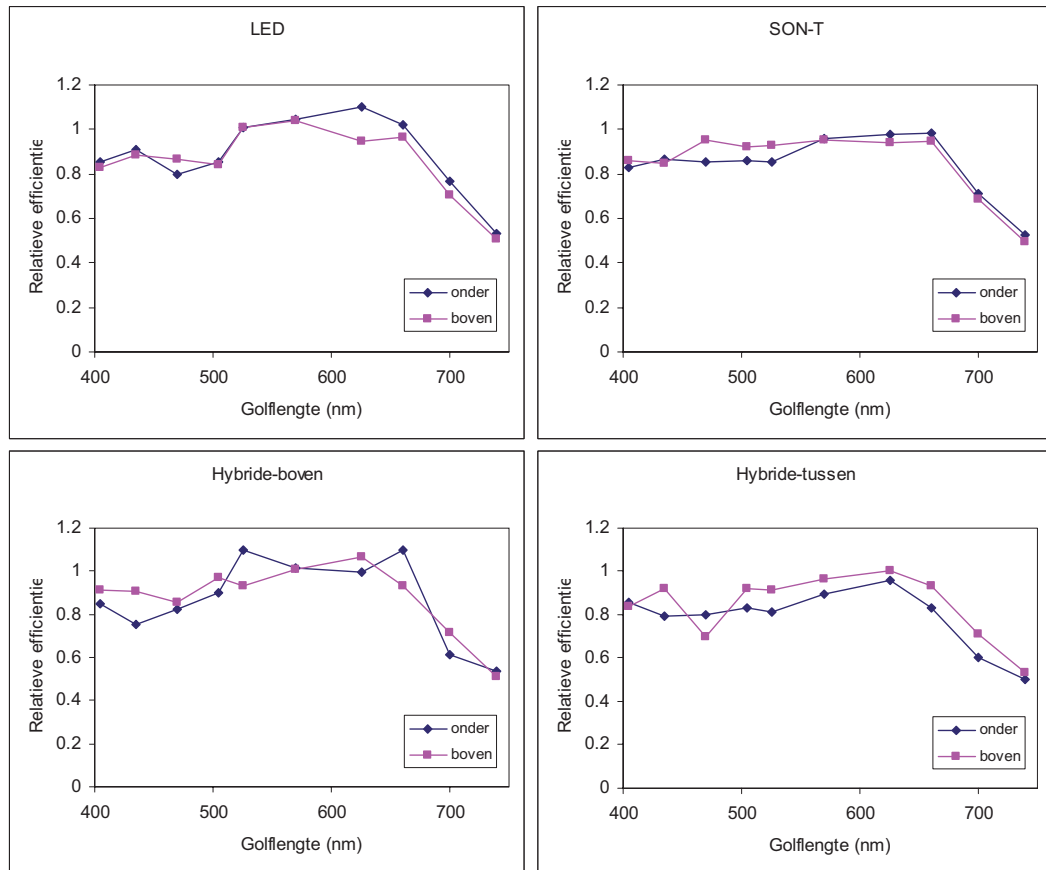
Met de Jaz spectroradiometer werd de verandering in lichtintensiteit in het gewas gemeten voor 3 gebieden in het PAR spectrum op momenten dat de lampen aan waren, maar het buiten donker was. De rode LED's hadden een golflengte van 660 nm en de blauwe LED's 450 nm (bovenbelichting) en 460 nm (tussenbelichting). Onderaan in Figuur 11 wordt het verschil in lichtintensiteit bij de Hybride-boven (links) en Hybride-tussen (rechts) belichtingssystemen in het gewas weergegeven.

Wanneer het gewas met LED's van boven (links) werd belicht is er een natuurlijke, geleidelijke afname in lichtintensiteit te zien.



**Figuur 11.** Spectrale metingen in het gewas die de intensiteiten van de golflengtes 400-500 nm, 500-600 nm en 600-700 nm weergeven op verschillende hoogtes in het gewas. De tussenbelichtingsstrengen hingen op ca. 80 cm en 150 cm onder de kop van het gewas.

De grootste hoeveelheid licht is rood vanwege de samenstelling van het LED-systeem (88% rode LED's), en het groene deel van het spectrum is afkomstig van de SON-T lampen. Het licht in zowel het rode, groene als blauwe gebied nemen af naar lage waarden onderin het gewas. Wanneer gemeten wordt bij het Hybride-tussen belichtingssysteem, is duidelijk te zien waar de tussenbelichting hing: op ongeveer 150 cm onder de kop van het gewas waar een verhoging van de rode en blauwe lichtintensiteiten is te zien.



*Figuur 12. Relatieve spectrale efficiëntie van fotosynthese t.o.v. het PAR spectrum van bladeren onderin en bovenin het gewas.*

Daarna is in januari 2010 de relatieve spectrale efficiëntie van de fotosynthese voor het gewas bij de verschillende belichtingssystemen bepaald, d.w.z. hoe efficiënt de fotosynthese is voor het geabsorbeerd licht van bladeren bij verschillende golflengtes in het PAR gebied. Daartoe is deze efficiëntie in verschillende delen van het PAR spectrum aan bladeren bovenin en onderin het gewas gemeten. In Figuur 12 is de relatieve efficiëntie van fotosynthese uitgezet tegen de golflengte.

In kassen met LED-belichting zijn bladeren wat efficiënter in het rode gebied van het spectrum. Met SON-T belichting (erbij) vlakkt dit spectrum wat af en wordt het verschil tussen efficiëntie in het blauw, groen en rood minder groot. Dit is vooral te zien tussen bladeren uit de kas met alleen LED boven en alleen SON-T.

Bij de SON-T belichting (rechts boven) waren er geen verschillen te zien in spectrale efficiëntie boven en onderin het gewas. Wat opvalt is dat de efficiëntie voor bijna het hele spectrum nagenoeg gelijk is, d.w.z. de fotosynthese in het rode en blauwe deel van het spectrum zijn niet efficiënter dan in het groene. Bij de LED-bovenbelichting (links boven), zijn er ook geen verschillen in spectrale efficiëntie tussen bladeren onderin en bovenin het gewas. De hoogste efficiëntie blijkt zoals verwacht, wel in het rode gedeelte van het spectrum (550-680nm) te zijn.

Er is geen verschil in de spectrale efficiëntie van lichtabsorptie waar te nemen tussen bladeren bovenin en onderin het gewas bij het Hybride-boven belichtingssysteem. In het blauwe gebied (400-450nm) lijken de bladeren onderin iets minder efficiënt te zijn. Bladeren bovenin het gewas lijken bij het Hybride-tussen belichtingssysteem over het hele spectrum iets efficiënter te zijn, hoewel de verschillen minimaal zijn.

In het algemeen blijkt dat er geen adaptatie van absorptie-eigenschappen (optische eigenschappen) van de bladeren voor de verschillende lichtkleuren is. Er zijn kleine verschillen waar te nemen bij de metingen onderin en bovenin het gewas, maar er is geen algemene trend in spectrale efficiëntie waar te nemen.

## 3.3 Plantregistraties en –metingen

### 3.3.1 Gewasbeoordelingen

#### Opvallende waarnemingen tijdens de belichtingsperiode door de teeltbegeleiders

November

- Bij iedere behandeling werd in principe hetzelfde belichtingsregiem aangehouden en verder zou elke behandeling zo optimaal mogelijk geteeld (gestuurd) worden. Na de eerste belichtingsweek zijn gedurende enkele dagen echter enige verschillen in belichtingsuren gemaakt en zijn er vooral temperatuuraanpassingen gedaan om de gewassen in de 4 afdelingen gelijk te krijgen.
- In het begin van de belichtingsperiode heeft de Hybride-tussenbelichting als bovenbelichting gehangen, naar beneden toe. Toen het gewas hoger werd, zijn de LED-strengen geleidelijk lager tussen het gewas gehangen. Op 5 november is de onderste streng gekanteld (horizontaal gericht). De bovenste streng bleef nog boven het gewas hangen. Op 19 november is de bovenste streng tussen het gewas gehangen. Eind november zijn beide strengen iets hoger in het gewas gehangen omdat er bladverbranding door de LEDs optrad en de kop minder sterk werd. De afstand tussen beide strengen was 40 cm.
- Half november is de maximumbuis temperatuur bij de LED-bovenbelichting op 75 °C gezet, omdat de gewenste hogere kasttemperatuur niet werd gehaald.
- Bij LED wordt op 12 vruchtjes gesnoeid (i.p.v. 11 zoals bij de overige behandelingen), vanwege de sterke kop. Hier trad condens tegen de gevel op a.g.v. weinig ventileren.
- Gevelschemer ging open bij een instraling 70 W m<sup>2</sup> en dicht bij 55 W m<sup>2</sup>.
- Eind van de maand staan alle gewassen (behandelingen) goed in balans, ongeveer gelijk aan elkaar.



*Bezoek aan het experiment.*



## December

- Streefgewicht voor de vruchten is 24 g, de vruchten zijn over het algemeen te fijn. Regelmatig wordt er een blaadje uit de kop gehaald om meer assimilaten naar de vruchten te sturen.
- De gewassen stonden sterk en daardoor werd een extra stengel aangehouden, naar 3.9 stengels m<sup>2</sup>. Tegen het einde van de maand zijn er in alle behandelingen rond de 8e tros splijttrossen waargenomen.
- Bij Hybride-tussenbelichting zijn beide strengen hoger gehangen omdat de kop te dun werd en het gewas achteruit is gegaan door te weinig licht. Het was steeds zoeken naar de optimale hoogte van de LED-strengen. Gesteld werd dat de stand van de kop de beste graadmeter hiervoor is. De strengen zouden in de bovenste 1.50 m van het gewas moeten hangen. Lager hangen zou teveel bladverbranding veroorzaken en er zou steeds meer licht worden weggenomen voor de rest van het gewas. In de loop van december is het gewas bij deze belichtingsbehandeling duidelijk verbeterd.
- Het gewas onder LED stond beter dan bij Van der Kaaij in de praktijk, waarschijnlijk door een hogere lichtintensiteit.
- Er heeft een verkeerde lichtschakeling plaatsgevonden bij het SON-T belichtingssysteem, en omdat het gewas hierdoor wat minder sterk door was geworden, werd de achterstand in hoeveelheid licht in de loop van 7 dagen gecorrigeerd.
- Bevlieging door hommels is in behandelingen met SON-T tijdelijk matig geweest, waardoor de zetting werd vertraagd.
- Het gewas in de SON-T behandeling heeft steeds het meeste last van meeldauw en de LED boven het minst.
- Het scherm moest wat meer open gelaten worden, in iedere geval van 10 tot 14.30 uur.
- Draadloze sensoren t.b.v. het verticaal kasklimaat en camera's t.b.v. plantbewegingen werden geplaatst.

## Januari

- Bij alle behandelingen werd er in het begin van de maand bij zwakke planten een tros uitgehaald. In de tweede helft van de maand werd de stengeldichtheid verhoogd tot 4.7 m<sup>2</sup>.
- Na de destructieve oogst werd geconstateerd dat de stengel bij LED het zwaarste en bij Hybride-tussen het lichtste was. Het blad bij SON-T was dunner dan bij de overige belichtingsystemen.
- Onder het LED-belichtingssysteem leek de kracht in het gewas niet omgezet te worden in vruchtproductie. Er zijn wel meer vruchten aangehouden, maar (achteraf) werd geconcludeerd dat er eerder meer stengels aangehouden hadden moeten worden of nauwer geplant had moeten worden. Dat had mogelijk de koudere kop (inherent aan LED-boven) kunnen compenseren. Toch is bij de LED langer geschermd en hogere kastemperaturen aangehouden dan in de andere afdelingen.
- Het gewas staat in de afdeling met de Hybride-tussenbelichting nogal eens aan de zwakke kant.
- De hoeveelheid splijttrossen bij de SON-T behandeling is opgevallen en dit werd vanaf januari bijgehouden. Er bleek toen 2 keer zoveel splijttrossen bij SON-T te zijn dan bij de andere behandelingen. Er komen ook meer splijttrossen voor in de zonrij ten opzichte van de schaduwrij. Het optreden van splijttrossen heeft waarschijnlijk te maken met (grote) temperatuurverschillen tussen de dag en de nacht en ruime beschikbaarheid van assimilaten.
- Bevlieging door hommels was begin januari nog steeds matig.

## Februari

- Er kwam geregeld wat meer instraling in de kas en er werd besloten terug te gaan van 18 naar 16 uur belichten en bij een instraling boven de 350 W m<sup>2</sup> de helft van de lampen uit te zetten. Bij Hybride-tussen de SON-T geheel uit en de LED geheel aan; bij de overige behandelingen 50% uit bij ieder lamptype. Later is de straling minder geworden en is weer naar 18 uur belichten gegaan. De LED's werden later in de maand pas uitgezet bij 600 W m<sup>2</sup> om zoveel mogelijk het LEDlicht te benutten. De temperatuur zou meer afgestemd worden op de instraling.
- In week 6 hangen er bij LED boven 32 vruchtjes m<sup>2</sup> minder aan dan bij SON-T.

## Maart

- Op Hybride-tussen na, zijn er in alle behandelingen redelijk veel bladpuntjes geconstateerd. Alle gewassen stonden er in het algemeen goed voor.



- In beide hybride behandelingen werden half maart extra stengels aangehouden waardoor de stengeldichtheid daar op 5.2 m<sup>2</sup> uitkwam, terwijl bij LED en SON-T de stengeldichtheid op 4.7 m<sup>2</sup> werd gehouden. Eind van de maand stonden alle gewassen goed in balans.
- Bij Hybride-tussen zijn de LED-strengen iets lager gehangen i.v.m het mooie weer. Lager mocht niet omdat het licht zo belangrijk is op de donkere dagen.
- In maart liep SON-T qua productie uit op LED.
- De lampen werden voor 50% uitgezet bij 300 W m<sup>2</sup> en voor 100% bij 550 W m<sup>2</sup>. Eind van de maand ging de instraling omhoog waardoor gekozen werd om alle lampen voor 50% uit te zetten bij 240 W m<sup>2</sup>, SON-T helemaal uit boven 450 W m<sup>2</sup> en de LED's helemaal uit boven 550 W m<sup>2</sup>. Bij een verwachte stralingssom van respectievelijk 1000 en 1400 J cm<sup>-2</sup> gingen de lampen bij respectievelijk alleen SON-T en LED boven ook uit.

April

- Alle gewassen stonden er goed voor in april. Begin april zijn er relatief veel gescheurde vruchten geconstateerd, vooral bij de SON-T en bij de hybride behandeling met SON-T en LED boven, waarschijnlijk mede a.g.v. een minder goede zetting in februari/maart en sterk wisselende weersomstandigheden. Er werd daarom voor gekozen om 2x per week te oogsten.
- Er werd afgesproken om de belichting, vooral de SON-T lampen minder te laten branden vanaf medio april en de LEDs zolang mogelijk te laten branden.

### Samenvatting gewasbeoordeling

In Figuur 13 en Tabel 4 worden middels het monitoren van 3 gewasparameters, de stand van het gewas gedurende het winterseizoen weergegeven.

**Stand van het gewas.** In het algemeen stond het gewas er het meest generatief op bij alleen de LED-belichting. Bij LED-belichting wordt de laagste gemiddelde beoordeling (=generatiever) gegeven (Tabel 4). Onder het Hybride-tussen belichtingssysteem en de SON-T groeide meestal een meer vegetatief gewas; het gewas bij Hybride-boven zat hier wat tussenin.

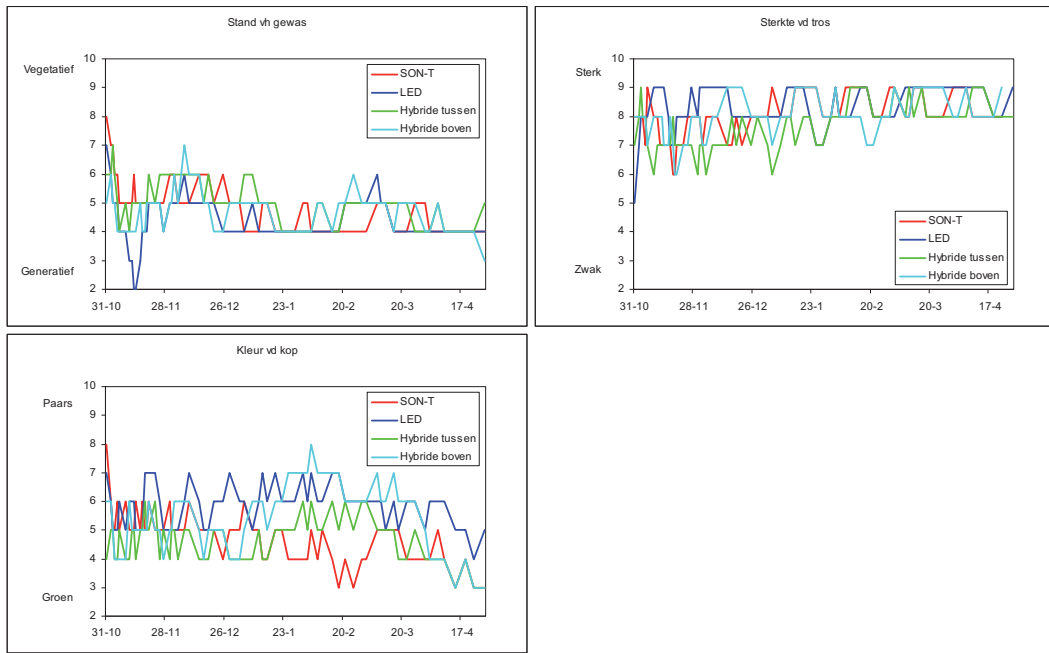
Tabel 4. Gemiddelde van gewasbeoordelingen op stand gewas (1=generatief, 10=vegetatief), sterkte van de tros (1=zwak, 10=sterk) en kleur van de kop (1=groen, 10=paars) in de periode van 31 oktober 2009 tot en met 28 april 2010 (n=66).

	Stand van gewas	Sterkte van tros	Kleur van kop
SON-T	4.9	8.0	4.8
LED	4.4	8.3	5.9
Hybride-tussen	5.0	7.6	4.7
Hybride-boven	4.7	8.0	5.4

**Sterkte van de tros.** Vaak was de tros het sterkst bij alleen de LED-verlichting en het zwakst bij het Hybride-tussen belichtingssysteem. De Hybride-tussenbelichting liet vooral in het begin van de teelt een zwakkere tros zien. De andere 2 belichtingsbehandelingen zaten hier wat tussenin.

**Kleur van de kop.** De meeste paarsheid in de kop werd gevonden bij de LED-belichting. De koppen bij het Hybride-tussen belichtingssysteem en alleen SON-T belichting vertoonden de minst paarse kleur.

In de kas met alleen de LED-belichting stond het gewas dus het meest generatief, waren de trossen het sterkst en hadden de koppen de meest paarse kleur. Voor een overzicht per behandeling zie Bijlage VI.



Figuur 13. Gewasbeoordelingen tijdens de belichtingsperiode: stand van het gewas (van generatief tot vegetatief); sterkte van de tros (van zwak tot sterk); kleur van de kop (groen tot paars).

### 3.3.2 Plantwaarnemingen

Tabel 5. *Plantwaarnemingen gedurende de belichtingsperiode. Plantlengte (cm), trosbloei (nr), cumulatief aantal gezette vruchten en plantbelasting (aantal vruchten/m<sup>2</sup>) zijn data van het einde van de maand. De kopdikte (mm) en bladlengte (cm) zijn gemiddeld over de maand ( $\pm$ SE). (n=14).*

Waarneming	Belichting-systeem	Nov	Dec	Jan	Febr	Mrt	April
Plantlengte (cm)	SON-T	269	417	522	636	761	886
	LED	252	380	471	581	706	833
	Hybr-tus	254	386	484	594	713	836
	Hybr-bov	259	396	498	614	746	873
Kopdikte (mm)	SON-T	10.5 $\pm$ 0.1	10.3 $\pm$ 0.2	9.3 $\pm$ 0.1	8.7 $\pm$ 0.2	9.2 $\pm$ 0.2	9.3 $\pm$ 0.0
	LED	10.9 $\pm$ 0.2	10.1 $\pm$ 0.3	9.6 $\pm$ 0.1	9.5 $\pm$ 0.1	9.9 $\pm$ 0.2	10.3 $\pm$ 0.1
	Hybr-tus	10.5 $\pm$ 0.1	9.9 $\pm$ 0.2	9.6 $\pm$ 0.2	9.2 $\pm$ 0.1	9.7 $\pm$ 0.2	9.5 $\pm$ 0.1
	Hybr-bov	10.9 $\pm$ 0.2	10.5 $\pm$ 0.3	9.6 $\pm$ 0.1	9.1 $\pm$ 0.1	9.6 $\pm$ 0.3	9.8 $\pm$ 0.1
Bladlengte (cm)	SON-T	48.6 $\pm$ 1.4	47.0 $\pm$ 1.1	40.2 $\pm$ 0.3	39.0 $\pm$ 0.8	37.1 $\pm$ 0.5	39.7 $\pm$ 0.7
	LED	48.9 $\pm$ 1.2	44.5 $\pm$ 1.8	39.6 $\pm$ 0.4	39.2 $\pm$ 0.5	40.4 $\pm$ 1.0	44.0 $\pm$ 0.1
	Hybr-tus	50.2 $\pm$ 1.2	47.8 $\pm$ 1.2	44.2 $\pm$ 0.3	43.1 $\pm$ 0.4	44.8 $\pm$ 0.6	45.5 $\pm$ 0.4
	Hybr-bov	49.8 $\pm$ 0.7	45.4 $\pm$ 1.8	38.8 $\pm$ 0.2	37.7 $\pm$ 0.5	39.9 $\pm$ 1.3	42.4 $\pm$ 0.3
Trosbloei (nr)	SON-T	7.9	13.2	17.2	21.3	25.5	29.7
	LED	7.9	12.9	16.3	20.0	24.1	28.3
	Hybr-tus	7.7	12.7	16.6	20.3	24.4	28.8
	Hybr-bov	7.8	12.8	16.8	20.5	24.5	29.0
Gezette vruchten (aantal)	SON-T	239	428	656	850	1046	1235
	LED	243	431	633	814	986	1210
	Hybr-tus	210	397	606	788	974	1172
	Hybr-bov	220	408	620	808	990	1189
Plantbelasting (vruchten m <sup>2</sup> )	SON-T	239	336	410	425	456	407
	LED	243	331	370	385	424	414
	Hybr-tus	210	318	378	408	433	389
	Hybr-bov	220	326	368	401	419	409

Vooraf in de wintermaanden werden de planten in de afdeling met SON-T het langst en bleven de planten bij de LED het kortst. Het verschil komt waarschijnlijk door het verschil in stralingswarmte in de kop van het gewas en de relatief koude winter. Het verschil in lengte groeide uit van 17 cm in november tot 55 cm in februari, waarna het stabiel bleef tot het einde van het experiment. De lengtegroei van het gewas bij de Hybride-tussenbelichting was iets groter dan bij de LED. De DIF bij de Hybride-boven was het laagst gedurende week 48 tot week 8 (Figuur 4), met weinig verschil bij de overige behandelingen, waardoor er minder strekking bij de Hybride-boven verwacht mag worden.

Vooraf in de maanden januari tot en met maart waren de bladeren bij de Hybride-tussenbelichting duidelijk langer dan bij de overige behandelingen, wat goed overeen kwam met resultaten uit de tussenbelichtingen bij het Improvement Centre en Dekker Tomaat (mond. meded. Marc Grootsholten en Ad Schapendonk).

Vanaf februari waren de koppen van het gewas bij de LED's dikker dan bij de overige behandelingen. In dezelfde periode zijn de koppen van de planten bij de SON-T juist het dunst van alle behandelingen. Dat heeft waarschijnlijk te maken met de hoge plantbelasting bij deze behandeling.

Vanaf december loopt het verschil in bloeiende tros tussen SON-T en LED's op: eind april is het verschil opgelopen tot 1.4 trossen in het voordeel van de SON-T belichting. Dit moet het gevolg zijn van verschillen in temperatuur van het groeipunt. In de eerste maanden blijft de bloei bij het Hybride-tussen belichtingssysteem wat achter bij de andere behandelingen.

In de eerste 2 maanden ligt het aantal gezette vruchten bij de SON-T en LED-belichting het hoogst. De Hybride-tussenbelichting blijft qua aantal gezette vruchten hierbij wat achter, mogelijk door minder licht in de kop van het gewas a.g.v. het laag hangen van de bovenste LED-streng in het gewas.

Met uitzondering van november en april is de plantbelasting bij SON-T steeds het hoogst. Halverwege de proef is er geconstateerd dat de gewassen onder alleen LED-belichting capaciteit over hadden. Er hadden waarschijnlijk eerder meer stengels aangehouden kunnen worden. Mede door het aanhouden van meer stengels vanaf medio januari nam de plantbelasting tot in maart bij alle belichtingssystemen toe. Door meer instraling en hogere temperaturen nam de plantbelasting daarna weer af. Over het gehele belichtingsseizoen gezien lijkt het aannemelijk dat wanneer het aantal stengels en/of aantal vruchten per tros bij de LED-behandeling eerder in het seizoen verhoogd was, er uiteindelijk meer tomaten geoogst hadden kunnen worden. Beide hybride behandelingen (vooral tussen) hadden een lagere plantbelasting, maar konden geen hogere plantbelasting verdragen. Dit was te zien aan de meestal wat zwakkere en groenere kop (Tabel 4).

### 3.3.3 Plantmorfologie en destructieve oogst

Naast de gemeten plantmorfologische parameters, is er ook een aantal observaties m.b.t. de morfologie onder LED-belichtingssystemen. Gedurende de belichtingsseizoenen waren er op verschillende tijdstippen sterk gekrulde bladeren waargenomen (Foto 1). Deze worden vaker waargenomen onder LED-belichting, vnl. onder rood licht.

Op de bladstelen onder LED-belichting, vooral bij de Hybride-tussen behandeling, zijn er kleine 'plantjes' waargenomen (Foto 2). Of dit een gevolg is van lichtkleur op de hormoonhuishouding is niet duidelijk, maar dit verschijnsel was opmerkelijk.



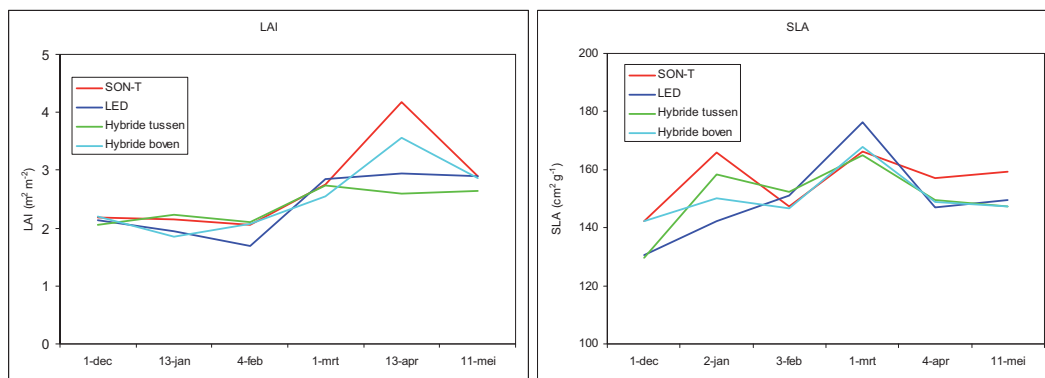
*Gekrulde bladeren onder LED-belichting.*



*Ontstaan van kleine plantjes op de bladsteel.*

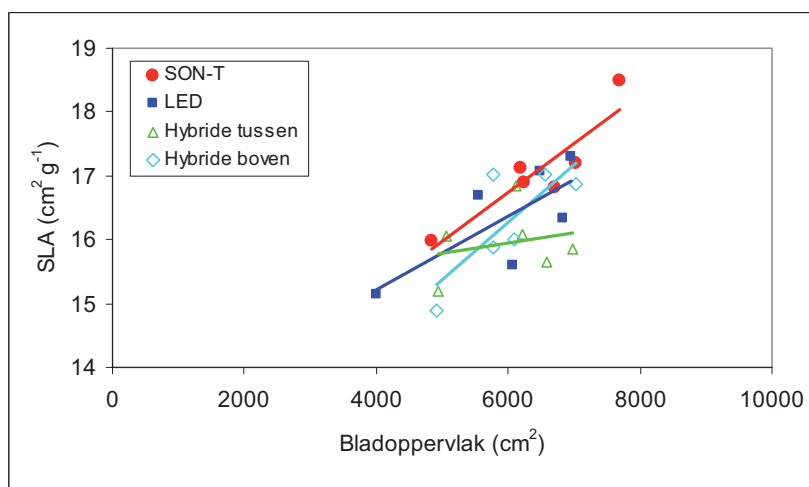
Tot maart blijft de LAI bij de verschillende belichtingsystemen min of meer gelijk (Figuur 14, links), daarna wordt de LAI van SON-T en Hybride-boven hoger (en op de laatste meting is alles weer gelijk). De hoeveelheid droge stof van het geplukte blad onderin de plant is bij SON-T vrijwel steeds het laagst; blijkbaar zijn de bladeren onder SON-T dunner, vooral in het begin en aan het einde van de teelt, doordat het gewas meer 'aan de rand' worden geteeld.

De Specific Leaf Area, ofwel SLA, is de verhouding tussen bladoppervlakte en bladgewicht. Een lage SLA wil zeggen dat het blad dik is. De SLA van de LED-behandeling vertoont opmerkelijke veranderingen. In het begin van de teelt werd er dikker blad gevormd, begin maart werd het veel dunner en op het einde van de proef was het weer gelijk aan de overige LED-combinaties. SON-T lijkt stelselmatig een dunner blad te produceren en heeft een groter bladoppervlak per gram versgewicht. Dat er bij SON-T veelal dunner blad voor komt verklaart ten dele de observaties van de teeltbegeleiders tijdens de belichtingsseizoenen dat het blad bij SON-T het snelst lijkt te verouderen.



Figuur 14. LAI (links) en SLA (rechts) gemeten op verschillende tijdstippen in het verloop van het experiment.

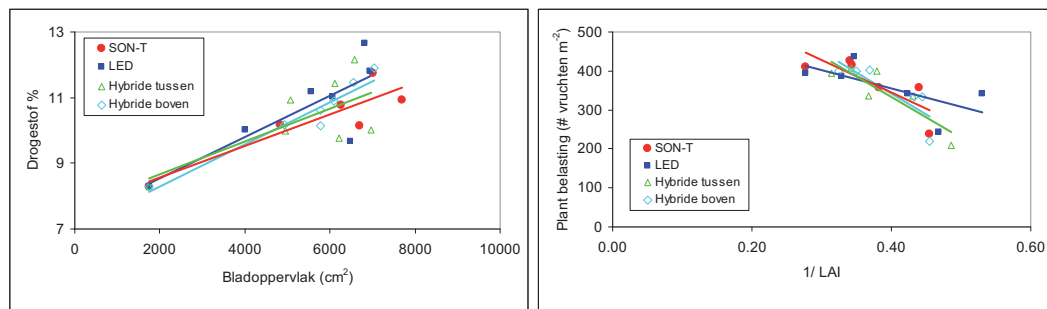
In Figuur 15 wordt de relatie tussen bladoppervlak en SLA weergegeven. Daarin blijkt er een positieve relatie te zijn: bij een groter bladoppervlak wordt het blad dunner, het heeft een groter oppervlak per g versgewicht. Alleen bij de Hybride-tussen behandeling is de relatie nauwelijks aanwezig. De reden hiervoor is onduidelijk omdat erbij een hogere temperatuur, de SLA meestal hoger is, en de temperaturen in de kop van het gewas bij alle 4 behandelingen in januari en februari vergelijkbaar was.



Figuur 15. SLA in relatie tot het bladoppervlak, waarbij de SLA op basis van versgewicht is weergegeven.

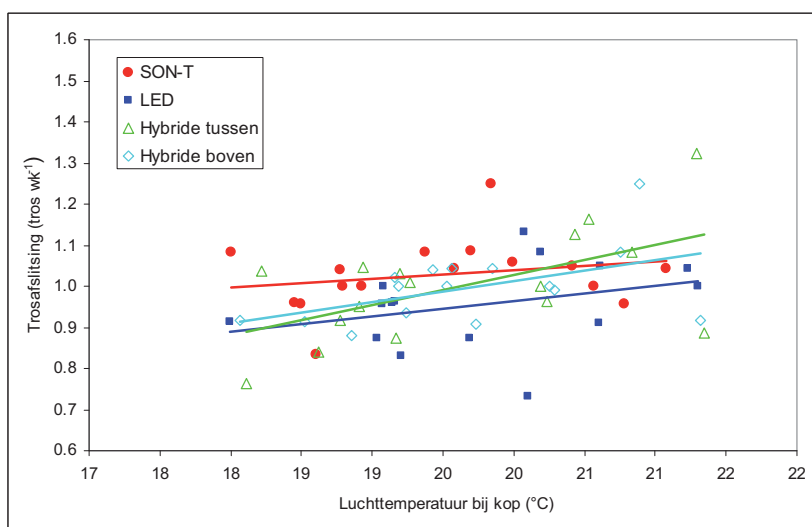
Figuur 16 links ondersteunt de conclusies getrokken uit Figuur 15: bij een groter bladoppervlak wordt het blad dunner. De bladeren met een lagere SLA (dikker blad) hebben dan ook een hoger vochtgehalte.

Er wordt in de praktijk vaker gebruik gemaakt van  $1/LAI$  als een maat voor de vegetatieve ontwikkeling van het gewas. In het rechter deel van Figuur 16 wordt de 'vegetativiteit', ofwel  $1/LAI$  in relatie gebracht met de plantbelasting. Hierin is een licht negatieve relatie te zien. Dit bevestigt de gedachte dat hoe hoger de plantbelasting, hoe generatiever het gewas is.



Figuur 16. Relatie tussen het bladoppervlak en het drogestof percentage (links) en rechts de plantbelasting in relatie tot de inverse van de LAI ( $1/LAI$ ) wordt gezien als een maat voor vegetativiteit).

Verondersteld wordt dat er een sterke relatie bestaat tussen de koptemperatuur van het gewas en de trosafplitsing; men gaat uit van een temperatuur-gestuurde blad- en trosafplitsing. De temperatuur in de kop van een tomatenplant is echter moeilijk te meten omdat het omringd is door kleine, harige ontwikkelende bladeren wat de eigenlijke kop (groepje meristeemcellen) isoleert van de temperatuur in de omgeving. Uitgaande van een koptemperatuur die, ondanks het isolerende karakter ervan, de kasluchttemperatuur dichtbij de kop benadert, is het beeld in Figuur 17 gemaakt. Er lijkt een zwak positieve relatie tussen de kasluchttemperatuur dichtbij de kop van het gewas en de trosafplitsing te zijn. Vooral de beide hybride behandelingen lijken een hogere trosafplitsing te hebben met toenemende temperatuur. Deze relatie is echter niet overtuigend, maar dit komt waarschijnlijk doordat de koptemperatuur niet precies kon worden gemeten.



Figuur 17. Relatie tussen de kasluchttemperatuur (bij de kop van het gewas) en de trosafplitsing (tros week<sup>-1</sup>).

### 3.3.4 Productie

Het gewenste gewicht van de individuele vruchten voor de consument ligt bij ongeveer 20-22 g. Dat gewicht is niet bereikt in het experiment, het gemiddelde vruchtgewicht lag tussen 16 en 18 g. In de meeste maanden geeft de Hybride-bovenbelichting de zwaarste vruchten. In december, februari en april zijn de vruchten vanuit de SON-T afdeling het lichtst in gewicht. Er moeten dus meer vruchten geoogst zijn in de SON-T teelt omdat de productie daar het hoogst was.

De productie in kg vruchten was vanaf februari het hoogst in de SON-T afdeling. Tot en met februari was de productie bij de overige behandelingen wat achter gebleven, waarbij de koude winter waarschijnlijk een rol heeft gespeeld. In april lag de productie bij de Hybride-boven ongeveer tussenin die van de LED-belichting en de overige 2 behandelingen, al moet benadrukt worden dat er geen significante verschillen tussen de behandelingen zijn.

Tabel 6. De productieparameters gemiddeld vruchtgewicht (g), totaalgewicht aan geoogste vruchten (kg m<sup>2</sup>), gemiddeld % splijttrossen en gemiddeld % gescheurde vruchten (op gewichtsbasis). ( $\pm$ SE). De gegevens zijn afkomstig van 2 telvakken per kas.

Waarneming	Belichting-systeem	Nov	Dec	Jan	Febr	Mrt	April
Vrucht gewicht (g)	SON-T	-	16.5 $\pm$ 0.4	15.2 $\pm$ 0.2	15.2 $\pm$ 0.2	16.0 $\pm$ 0.2	16.8 $\pm$ 0.2
	LED	-	17.6 $\pm$ 0.5	16.4 $\pm$ 0.2	15.8 $\pm$ 0.3	15.6 $\pm$ 0.2	17.3 $\pm$ 0.2
	Hybr-tussen	-	17.8 $\pm$ 0.4	15.2 $\pm$ 0.4	15.8 $\pm$ 0.4	15.7 $\pm$ 0.2	17.1 $\pm$ 0.3
	Hybr-boven	-	18.3 $\pm$ 0.5	16.7 $\pm$ 0.2	15.9 $\pm$ 0.1	16.1 $\pm$ 0.3	17.2 $\pm$ 0.1
Productie (kg m <sup>2</sup> )	SON-T	-	2.10	4.84	7.37	11.20	16.80
	LED	-	2.17	4.96	7.24	10.14	15.22
	Hybr-tussen	-	2.00	4.53	6.69	10.16	15.57
	Hybr-boven	-	2.04	4.74	7.05	10.90	16.23
Splijttrossen (%)	SON-T	-		12.4	14.1	13.7	12.1
	LED	-		9.5	12.1	12.1	11.2
	Hybr-tussen	-		9.5	12.4	12.0	11.4
	Hybr-boven	-		7.8	9.3	9.0	9.0
Gescheurde vruchten (%)	SON-T	-	-	1.9 $\pm$ 1.3	2.3 $\pm$ 1.3	3.7 $\pm$ 1.2	2.3 $\pm$ 1.3
	LED	-	-	0.2 $\pm$ 0.1	0.2 $\pm$ 0.1	0.6 $\pm$ 0.3	0.2 $\pm$ 0.1
	Hybr-tussen	-	-	0.4 $\pm$ 0.2	2.3 $\pm$ 0.8	0.8 $\pm$ 0.2	2.3 $\pm$ 0.8
	Hybr-boven	-	-	0.3 $\pm$ 0.2	1.1 $\pm$ 0.7	2.1 $\pm$ 1.7	1.1 $\pm$ 0.7

De modelsimulaties van Schapendonk *et al.* (2010) suggereren dat het ras Sunstream een meer sink- dan source-gelimeerde tomatensoort is. Sunstream is een ras met kleine vruchten, waardoor snelheid (snelle trosafplitsing) nodig is om de gewenste plantbalans te krijgen. Dat betekent dat er een optimum bestaat voor de hoeveelheid licht waarbij het ras het beste presteert. Het optimum is mede-afhankelijk van de lichtonderschepping en warmtebalans in relatie tot de sinksterkte van de vruchten. Bij Sunstream worden de sinks (vruchten) beperkt. De trossen werden op 11 vruchtjes gehouden (bij LED boven tijdelijk op 12) en de individuele vruchtjes kunnen niet onbeperkt gevuld worden en blijven groeien, al is het zo dat het gewenste vruchtgewicht hoger is dan hier gerealiseerd werd (ca. 21 g tegenover 17 g). Mogelijk gingen er minder assimilaten naar de vruchten, maar er was wat dit betreft weinig verschil tussen de behandelingen. Bij een meer source-gelimeerd ras zoals Komeett, dat goed kan profiteren van meer licht, worden de vruchten alsmar groter met toenemend licht, en volgens de simulaties vooral bij tussenlicht. Daarom is het aannemelijk dat het voordeel van tussenlicht in dit experiment beperkt was. De lichtintensiteit was iets lager dan



de berekende optimale lichtintensiteit (170 i.p.v. 200  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), maar de verhouding was volgens Schapendonk *et al.* (2010) niet optimaal; het berekende optimum was in de wintermaanden 3:1 (bovenbelichting:tussenbelichting). In dit experiment was de verhouding 1:1, met dus relatief meer tussenlicht en mogelijk te weinig licht van boven.



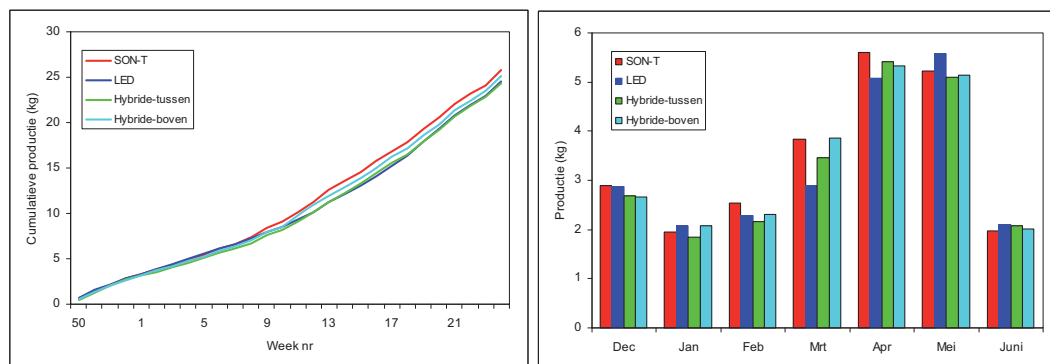
*Slijttrossen*



*Productie tomaten*

Vanaf januari werden er in de proef slijttrossen gesignaleerd. Vooral in januari werden er relatief veel slijttrossen bij SON-T geogst. Eind januari/begin februari zijn er ook gescheurde vruchten geconstateerd. Daarom is in het vervolg ook het percentage gescheurde vruchten gemeten.

Het laagste percentage gescheurde vruchten werd geogst in de afdeling met alleen LED-belichting boven het gewas. In de SON-T afdeling waren er daarentegen relatief veel gescheurde vruchtjes. Hiervoor is niet direct een voor de hand liggende verklaring.



*Figuur 18. Cumulatieve productie (links) en maandproductie (rechts) in kg vruchtgewicht  $\text{m}^{-2}$  tot 22 juni 2010 bij de 4 belichtingssystemen.*

De hoeveelheid geogste vruchten per vierkante meter onder de 4 belichtingssystemen wordt gegeven in Figuur 18, cumulatief (links) en per maand (rechts). De cumulatieve productie onder SON-T werd zichtbaar hoger vanaf week 8 (eind februari). SON-T bleef het het beste doen tot mei. De LED en Hybride-tussen produceerde wat minder en Hybride-boven zat daar tussenin, maar de verschillen tussen de behandelingen zijn niet groot. In mei lijkt de productie van het LED gewas hoger te worden en dat van SON-T te overstijgen. In juni is het gewas getopt.

Het verschil in totaalproductie tot en met week 24 bedroeg bij de 4 belichtingssystemen maximaal 1.6 kg  $\text{m}^{-2}$ .



### 3.3.5 Vruchtkwaliteit

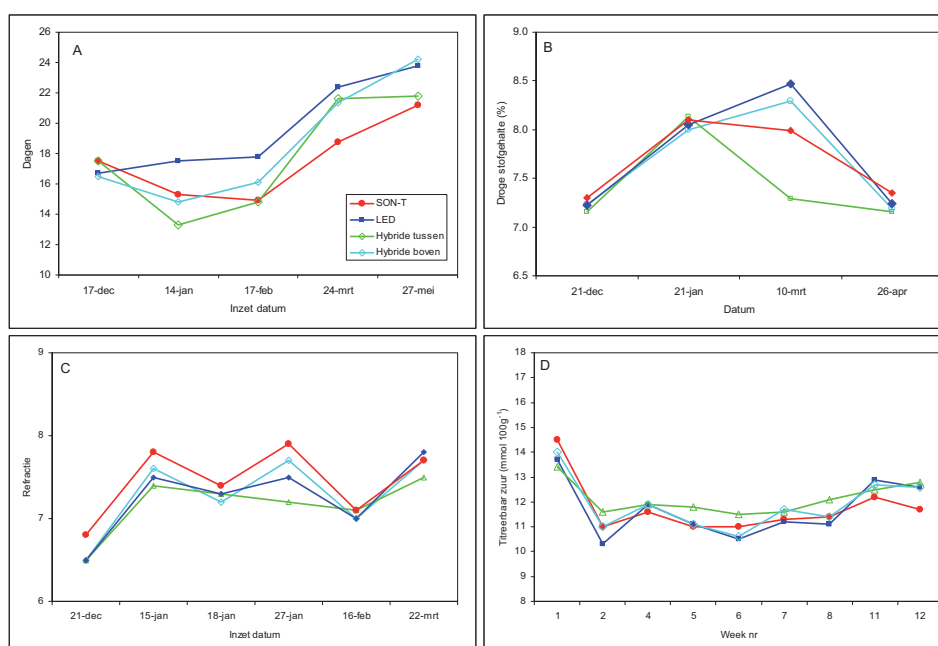
Tabel 7. Overzicht van een aantal criteria voor vruchtkwaliteit onder 4 belichtingsystemen (zie ook Bijlage VII).

Parameter	Behandeling			
	SON-T	LED	Hybride-tussen	Hybride-boven
Houdbaarheid (dagen)	17,5	19,6	17,8	18,6
Drogestof vrucht (%)	7,7	7,6	7,7	7,7
Sap (%)	35	30	31	31
Refractie (°Brix)	7,7	7,2	7,3	7,5
Titreerbaar zuur (mmol/100 g)	11,0	11,2	11,6	11,4
Vitamine C (mg/100 g)	29	31	29	30
Smaak model	56	57	57	58
Smaak sensorisch	53	52	49	54

De LED-belichting (alleen boven) resulteerde meestal in een wat langere houdbaarheid. Bij SON-T is de houdbaarheid vooral op de laatste inzetdata het kortst (zie Figuur 19A).

Het droge stofgehalte is in maart bij het Hybride-tussen belichtingssysteem veel lager. Hiervoor is niet direct een verklaring te geven (zie Figuur 19B). In het algemeen is de refractie bij de SON-T belichting hoger dan bij de andere belichtingsystemen (zie Figuur 19C). Het titreerbaar zuurgehalte is bij SON-T en LED boven wat lager dan bij het Hybride-tussenbelichtingssysteem. In de eerste analyseweek is het titreerbaar zuurgehalte bij alle 4 belichtingsystemen hoog (zie Figuur 19D). Dit komt overeen met ervaringen in andere proeven, waarin de tomaten van de eerste trossen ook vaak een hoog zuurgehalte hebben. Het % sap is het hoogst bij SON-T.

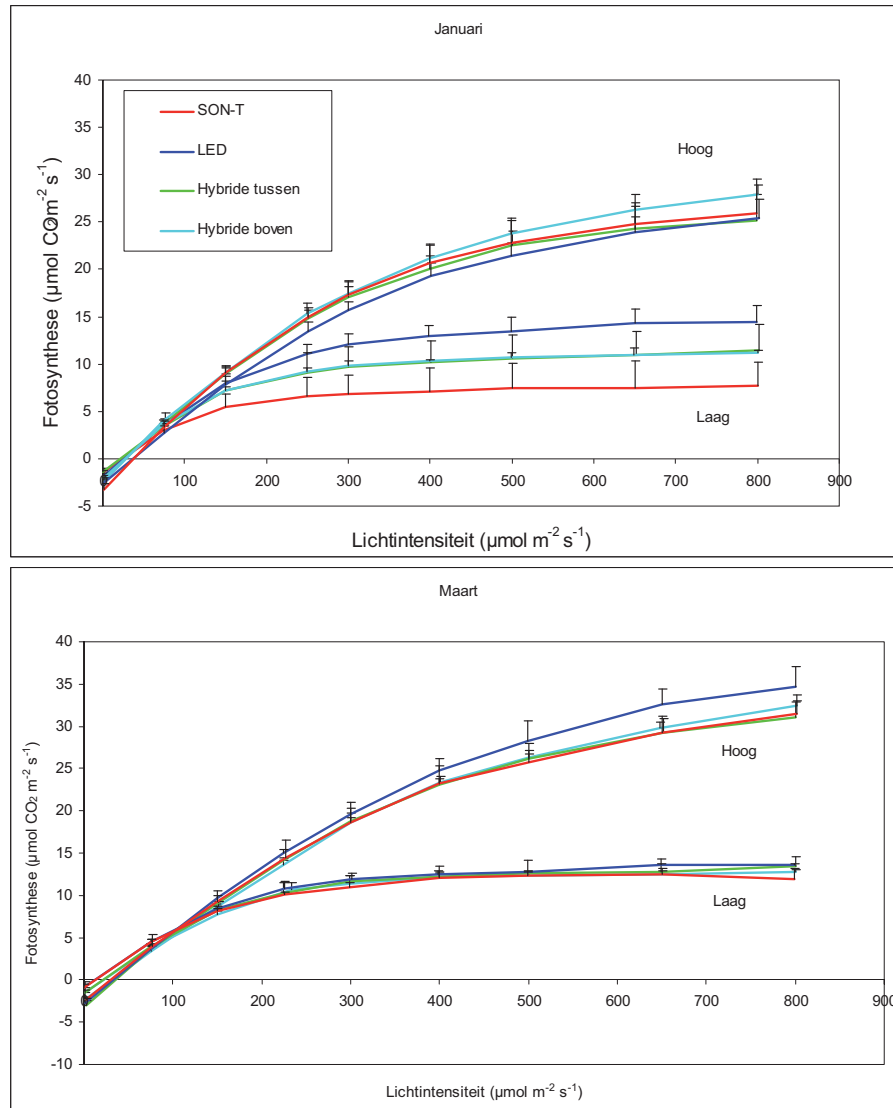
In de smaakproeven met een consumentenpanel lijken de tomaten uit de kas met Hybride-tussenbelichting iets lager op smaak te scoren. Dit heeft mogelijk te maken met het vrij hoge zuurgehalte.



Figuur 19. Verloop van parameters voor vruchtkwaliteit: A. houdbaarheid; B. drogestofpercentage; C. refractie; en D. Titreerbaar zuur.

### 3.3.6 Fotosynthese metingen

De fotosynthesecapaciteit is op 2 hoogtes in het gewas gemeten eind januari en eind maart. Daarmee wordt de capaciteit van het gewas bovenin en onderin het gewas gegeven, bij verschillende lichtintensiteiten tot  $800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .



*Figuur 20. De gemiddelde fotosynthesecapaciteit ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )  $\pm$  SE, gemeten in januari en maart bovenin het gewas en onderin het gewas. De condities in het cuvet waren  $21^\circ\text{C}$ , 85% RV en  $700 \text{ppm CO}_2$ ,  $n=3$ .*

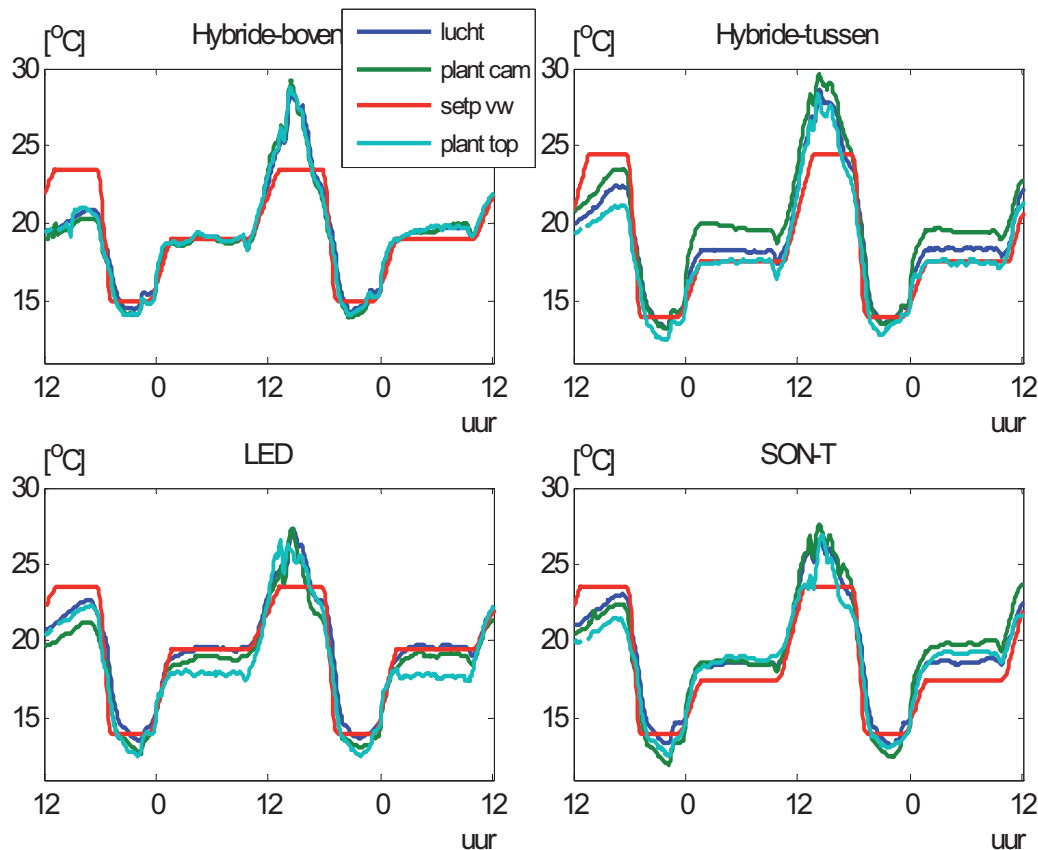
Eind januari is er weinig verschil in fotosynthetisch vermogen bovenin het gewas te zien, al neigt de Hybride-boven naar een hogere capaciteit met toenemend licht. In deze periode heeft licht uit de lampen een grote invloed op de bladontwikkeling, omdat er relatief veel uren zonder (veel) daglicht zijn. Daardoor kan het zijn dat er een verschil optreedt bij de verschillende behandelingen, temeer wanneer het licht dieper in het gewas doordringt. Het lijkt erop dat het licht afkomstig van LED's in het algemeen in dikkere bladeren resulteert waardoor die bladeren, wanneer ze onderin het gewas terecht komen, een hogere potentiële fotosynthese kunnen hebben. Dit is te zien in de onderste 4 curves in de januari-grafiek van Figuur 20. Daarin blijkt dat LED het hoogste en SON-T de laagste capaciteit hadden, wat correleert met de bladdikte (zie Figuur 14). De fotosynthesecapaciteit van bladeren in beide hybride behandelingen ligt tussen dat van SON-T en LED, en beide lijnen liggen precies op elkaar.

Eind maart zijn de niveau's hoger, wat logisch is omdat er meer zonlicht in de kas komt. Onderin zijn de onderlinge verschillen verdwenen. Ook dat is logisch omdat de bladdikteverschillen bij het ontwikkelen van het blad nagenoeg gelijk zijn bij hoge (gelijke) lichtintensiteiten. Bovenin lijkt LED een iets groter fotosynthetisch vermogen te hebben.

### 3.3.7 Gewastemperatuur

In Figuur 21 is een voorbeeld van 2 dagen metingen van de bladtemperatuur bovenin het gewas. Metingen van de koeltemperatuur is erg lastig gebleken, maar voor enkele dagen in januari is dat gelukt.

Door de genomen teeltmaatregelen als gevolg van de gewasontwikkeling verschilt de setpoint temperatuur (rode lijn) tussen de behandelingen. Er vallen een aantal zaken op. Bij de Hybride-boven behandeling volgen de gemiddelde kasluchttemperatuur, de gewastemperatuur (met de IR camera) en de bladtemperatuur (met thermokoppel gemeten) de setpoint temperatuur vrij goed. De setpoint tijdens de nachturen bij de Hybride-tussen blijft 0.5-1°C lager dan bij de overige behandelingen. De LED-strengen werkten immers als een minimumbuis, waardoor er minder hoge kastemperaturen aangehouden moesten worden.



Figuur 21. Bladtemperatuur gemeten met een IR camera (groene lijn) en thermokoppel (lichtblauwe lijn) in relatie tot kaslucht setpointtemperatuur (rode lijn) en gemeten kasluchttemperatuur (donkerblauwe lijn).



*Bladtemperatuur meting met een thermokoppel.*

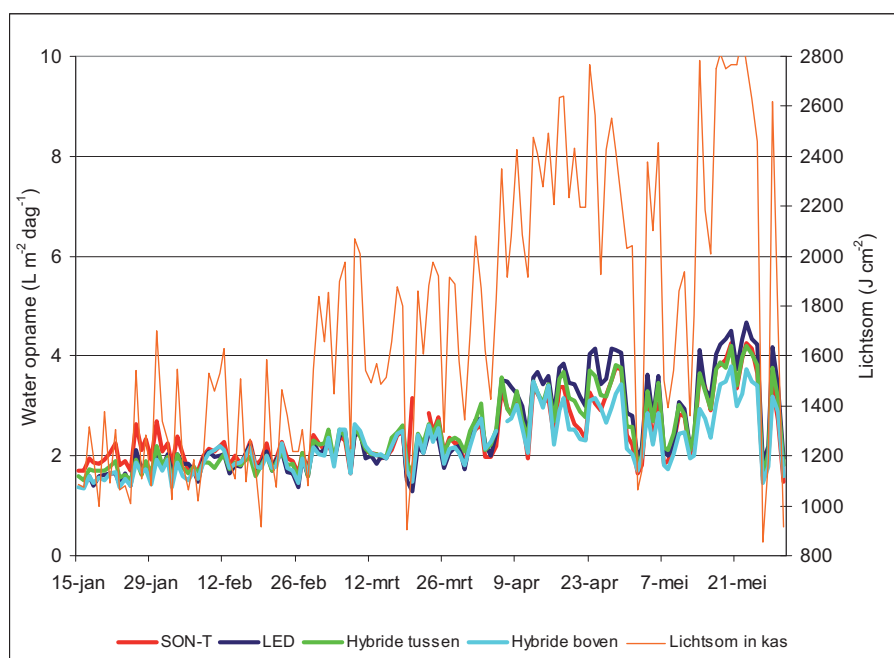
In de LED-behandeling was de meting van de IR camera nagenoeg gelijk aan de luchttemperatuur, terwijl de thermokoppel een lagere temperatuur aangaf. Bij de Hybride-tussen was het net andersom, met de thermokoppel gelijk aan de luchttemperatuur en de IR camera 1-2 °C ruim daarboven. Kennelijk neemt de IR camera ook de warmte afgifte van de LED-strengen van de Hybride-tussen mee in de metingen.

Verder valt het op dat alle temperatuurmetingen gelijk of lager waren dan de setpoint bij de LED-behandeling, en dat ze allemaal hoger dan de setpoint waren bij de SON-T behandeling. Opgemerkt moet worden dat de setpoint in de LED-behandeling ruim 2°C hoger lag dan die in de SON-T behandeling. Dit geeft aan hoe sterk de stralingswarmte van de SON-T lampen de kaslucht- en planttemperatuur beïnvloedt.

### 3.3.8 Wateropname

Vanaf 15 januari 2010 is de gemiddelde wateropname per m<sup>2</sup> per dag berekend door de drain (L m<sup>-2</sup> dag<sup>-1</sup>) af te trekken van de watergift (L m<sup>-2</sup> dag<sup>-1</sup>). Deze metingen zijn afkomstig van de klimaatcomputer en zowel de drain als de gift is met de hand gecontroleerd.

Bij benadering kan hierdoor iets over de verdamping geconcludeerd worden. Dit zal niet alleen afhankelijk van de belichting zijn. De temperatuur en de verticale temperatuuropbouw in de kassen kunnen invloed hebben op de verdamping.



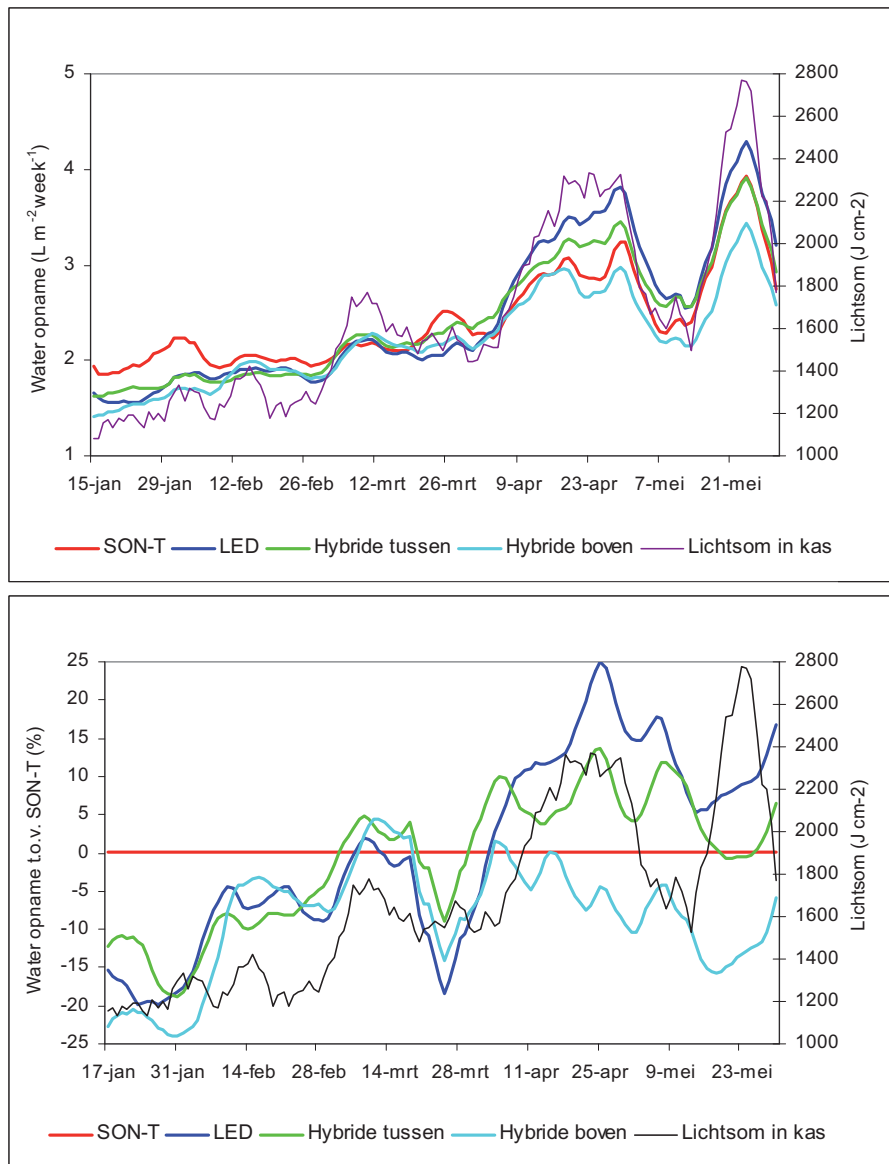
Figuur 22. Wateropname door het gewas ( $L m^{-2} dag^{-1}$ ) en de lichtsom ( $J cm^{-2}$ ) gemeten in de kas tussen januari en mei 2010.

Tabel 8. De gemiddelde drain, watergift en opname per dag vanaf medio januari t/m mei.

	SON-T	LED	Hybride-tussen	Hybride-boven
Drain (%)	43,0	39,5	46,3	46,2
Gift ( $L Im^{-2}$ )	4,4	4,3	4,3	4,0
Wateropname ( $L Im^{-2}$ )	2,51	2,60	2,31	2,15

In Figuur 22 is het dagelijkse verloop van watergift en de lichtsom weergegeven met de gemiddelde dagelijkse gift, drain en wateropname afzonderlijk in Tabel 8. De hoeveelheid opgenomen water neemt logischerwijze toe met een toenemende hoeveelheid licht dat het gewas krijgt. Het belichtingssysteem speelt hierin ook een rol door de mate van (extra) warmte dat het systeem genereert. Het Hybride-boven systeem heeft gemiddeld het minste water toegediend gekregen,  $4 L m^{-2}$ . De drain is bij beide hybride-systemen het hoogst wat suggereert dat deze systemen het minste verdampen, vooral geldt dit voor de Hybride-boven omdat die ook de minste hoeveelheid water heeft gekregen. De LED en SONT hebben in de gehele meetperiode het meeste water verbruikt. Het waterverbruik van het Hybride-boven belichtingssysteem volgt in grote lijnen dat van SON-T.

Figuur 23 laat de wateropname op weekbasis zien met de bijbehorende lichtsom in de kas (boven), en met daaronder de relatieve opname t.o.v. de opname van het gewas onder SON-T belichting. Daarin is te zien dat in de belichtingsperiode tot eind maart, het gewas onder SON-T belichting het meeste water verbruikt (opneemt en verdampt), waarschijnlijk als gevolg van de stralingswarmte. Vanaf begin april wordt de wateropname van de Hybride-tussen en LED veel hoger dan dat van SON-T en lijkt sterk beïnvloed te worden door de globale straling (Figuur 23, onder), en het feit dat er in de LED-teelt 'meer gewas stond'. In deze periode hebben de LED's ook langer gebrand dan de SON-T lampen, wat ook zeker een rol heeft gespeeld.



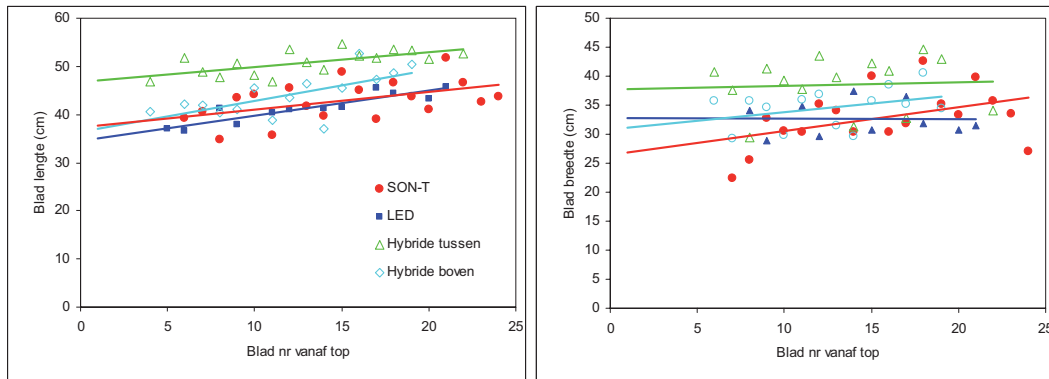
Figuur 23. Wateropname door het gewas ( $l\ m^{-2}\ week^{-1}$ ) en de lichtsom ( $J\ cm^{-2}$ ) gemeten in de kas tussen januari en mei 2010 (boven) en het verschil in wateropname tussen de SON-T en overige behandelingen (onder).

### 3.3.9 Bladhoek en -grootte metingen

Bij de eerste (=hoogste en jongste) 8 internodiën nam de bladlengte toe, daarna vlakke het af en werd de bladlengte meer constant (Figuur 24 en Tabel 9). Onder LED ontwikkelden zich de kortste en onder Hybride-tussen de langste bladeren. Mogelijk kwam dit doordat bij Hybride-tussen er minder licht beschikbaar was bij de (bovenste) ontwikkelende bladeren, waardoor het gewas dit mindere licht compenseerde door het vergroten van het bladoppervlak.

Ook de bladbreedte was het grootst bij de Hybride-tussen, maar de smalste bladeren ontwikkelden zich onder de SON-T belichting. Het lijkt erop dat onder SON-T belichting er zoveel licht beschikbaar was bij de bovenste bladeren dat zij minder oppervlak ontwikkelden.

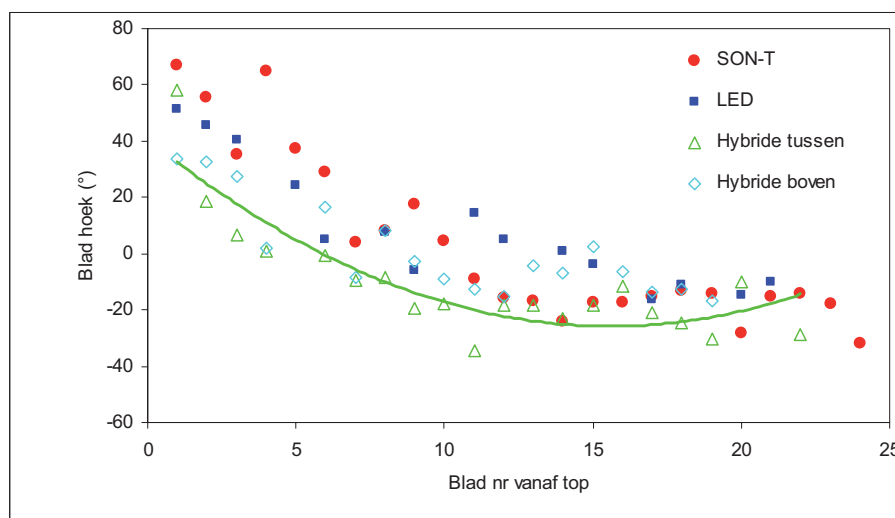
De gemiddelde hellingshoek t.o.v. de stengel lijkt tussen de behandelingen te verschillen, zie Tabel 9. Bij 100% LED belichting lijken de bladeren het meest rechtop te staan, of minder te gaan hangen dan in de overige behandelingen. Dit is ook te zien in Figuur 25, waarbij tevens blijkt dat de Hybride-tussen behandeling het blad het meest laat zakken. Dit is waarschijnlijk een aanpassing om meer licht van het tussenlicht op te vangen.



Figuur 24. Bladlengte (links) en breedte (rechts) van volgroeide bladeren in de 4 belichtingsystemen. Er is een lineaire trendlijn door de punten getrokken.  $n=20$ .

Tabel 9. Bladhoek, lengte en breedte (gemiddelde  $\pm$  SE) van volgroeide bladeren in de 4 belichtingsystemen.  $n=25$ .

Belichtingsstelsysteem	Bladlengte (cm)	Bladbreedte (cm)	Bladhoek ( $^{\circ}$ )
SON-T	$40.7 \pm 0.56$	$36.2 \pm 0.82$	$2.95 \pm 2.07$
LED	$36.7 \pm 0.65$	$30.8 \pm 0.95$	$10.6 \pm 2.44$
Hybride-tussen	$47.3 \pm 0.65$	$42.9 \pm 0.94$	$-9.98 \pm 1.78$
Hybride-boven	$41.2 \pm 0.76$	$38.7 \pm 1.11$	$0.65 \pm 2.09$



Figuur 25. Bladhoek gemeten t.o.v. de stengel. Er is voor de Hybride-tussen behandeling een trendlijn getrokken.

### 3.3.10 Plantbewegingen

Bladbewegingen gedurende de dag worden vaker waargenomen. Of deze bewegingen louter fototropisch zijn of een gevolg zijn van de lichtintensiteit, het Lichtspectrum of interne waterstatus van de plant is onbekend. Omdat de lichtintensiteit gelijk was in alle behandelingen, is gekeken of de verschillen in spectrum verantwoordelijk zouden kunnen zijn voor eventuele verschillen in beweging.



*Camera's om bladbewegingen te registreren*

Uit een kwalitatieve analyse van bewegende beelden van iedere behandeling is gebleken dat (1) de bladeren direct na het aangaan van de belichting sterk beginnen te bewegen, en (2) de bladeren in alle 4 behandelingen meer bewogen in de middag dan in de ochtenduren. In alle behandelingen betrof de beweging het samengestelde blad van de bladlagen 5 tot 10, en bestond daarbij uit een roterende beweging rond een horizontale as. Gedurende de middag, wanneer de meeste bladbewegingen waargenomen zijn, is gebleken dat bladeren onder SON-T lampen met LED-tussenbelichting (=Hybride-tussen) aanzienlijk meer bewogen dan onder SON-T, en Hybride-boven. Daarnaast liet de LED-behandeling juist minder bladbeweging zien dan de laatst genoemde 2 behandelingen.

## 3.4 Energiestromen

### 3.4.1 Belichting en kasklimaat

In Tabel 10 is een omschrijving gegeven van de opzet van de belichtingssystemen met het theoretisch opgenomen vermogen volgens specificaties van de leveranciers.



Tabel 10. Opzet lichtbronnen met opgenomen vermogen (theoretisch) in kW voor een afdeling van 144 m<sup>2</sup>.

Afd.	Bron	Omschrijving opzet	Elektrisch geïnstalleerd	Theoretisch vermogen	Gemeten vermogen
hybride	LED	50% boven Lemnis	100% was 10.6 kW, 20% uitgeschakeld	8,6	8,6
	SON-T	50% boven	14 armaturen, à 635 W/stuk	8,9	8,9
tussen	LED	50% tussen Philips	156 modules à 40 W	6,2	6,5
	SON-T	50% boven	14 armaturen, à 635 W/stuk	8,9	8,7
LED boven	LED	100% boven Lemnis	100% was 21.2 kW, 20% uitgeschakeld	17,2	16,7
SON-T	SON-T	100% boven	16 armaturen, à 1030 W/stuk	16,5	15,9

Deze theoretische waarden komen goed (binnen 5%) overeen met een stroommeting op de spanningskabels van de belichtingssystemen.

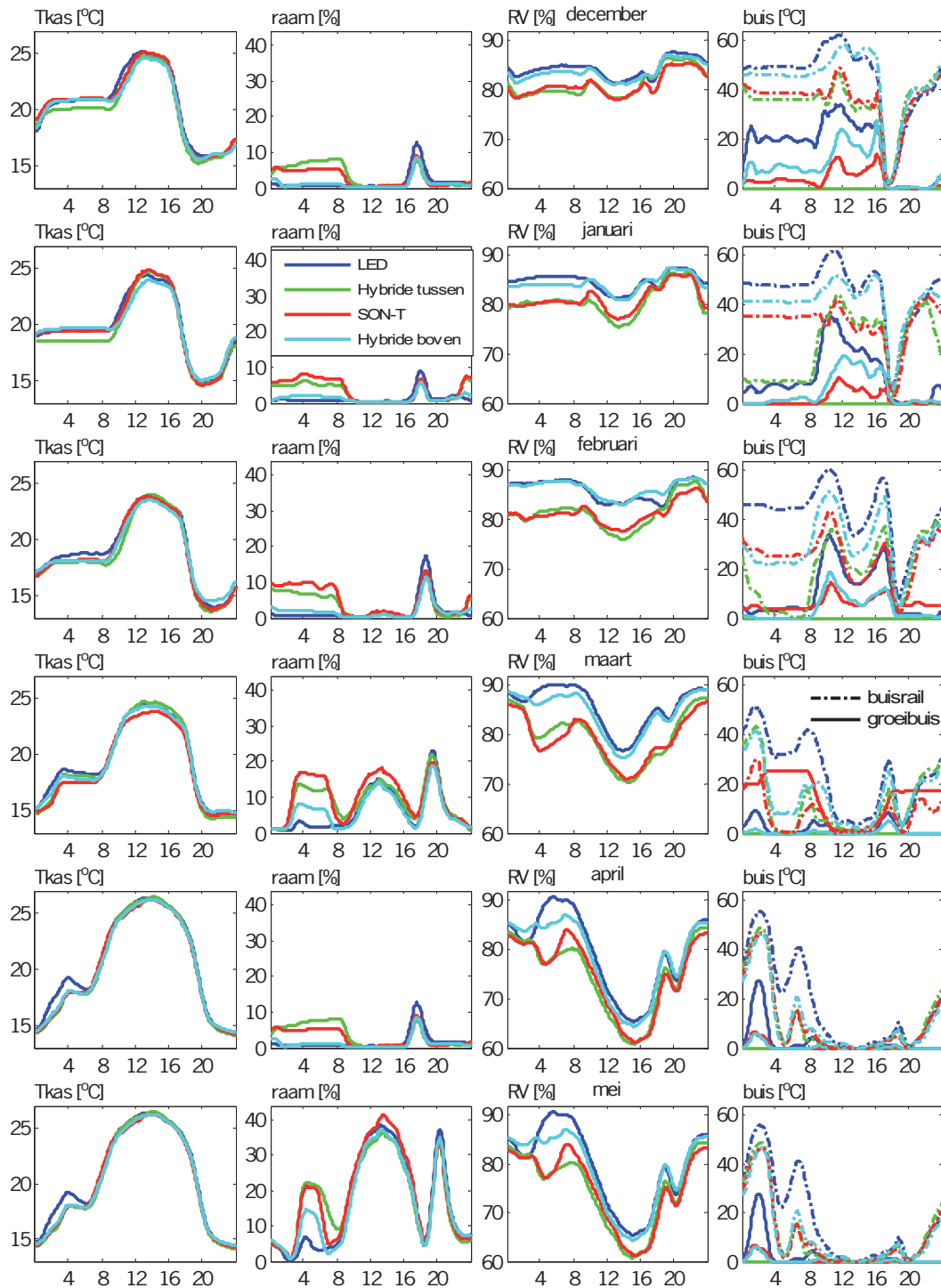
In deze periode (18 november t/m 23 mei) heeft de belichting volgens de in Tabel 11 aangegeven uren vollast gebrand.

Tabel 11. Belichtingsuren per system.

Afdeling	Bron	Uren belichting aan
Hybride-boven	LED	2451
	SON-T	2215
Hybride-tussen	LED	2471
	SON-T	2219
LED	LED	2414
SON-T	SON-T	2295

Gedurende de teelt is er in de verschillende behandelingen verschillend gestuurd, wat in een verschil in gerealiseerd kasklimaat en energiegebruik zal resulteren. Dit betreft met name de extra uren in mei dat de SON-T lampen niet, en LED-belichting wel werd gebruikt.

In Figuur 26 zijn van een aantal belangrijke kasklimaatparameters de maandelijkse cyclische gemiddelden gemaakt. Deze zijn behulpzaam bij het verklaren van verschillen in energiegebruik.



Figuur 26. Maandelijks cyclisch gemiddelde van de kasluchttemperatuur, raamstand, RV en buistemperaturen van buisrail en groeibuis.

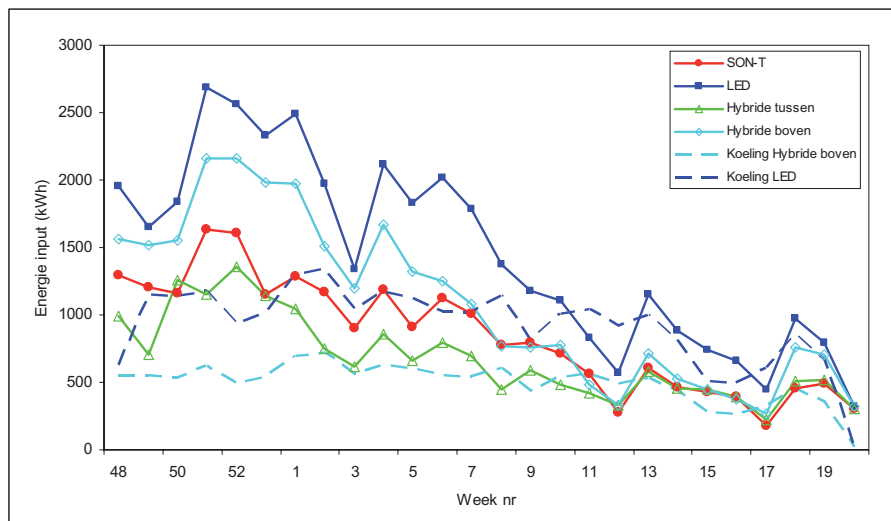
Figuur 26 laat zien dat bij de tussenbelichting in december en januari in de nacht koeler is geteeld.

Echter gelijktijdig is er in deze en de SONT-afdeling ook meer geventileerd, wat tot een droger kasklimaat leidt.

De buistemperaturen van de LED-afdeling met LED-koeling liggen altijd beduidend hoger dan de andere afdelingen. Doordat de LEDs gekoeld worden, moet deze warmte, die bij de tussenbelichting en de SONT systemen niet

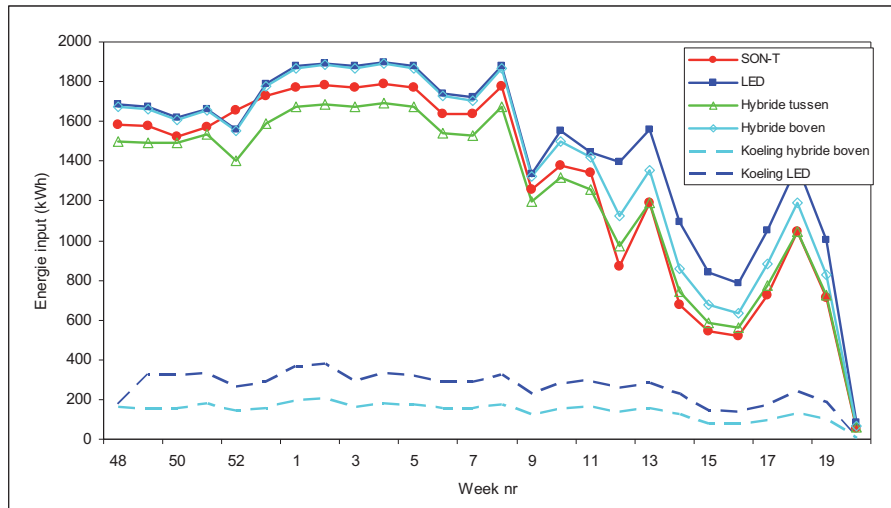
afgevoerd wordt, alsnog worden ingebracht. Tot het moment waarbij eigenlijk een warmteoverschot ontstaat, blijft dit in stand. Dat is ook de reden dat de Hybride-boven afdeling de op één na hoogste buistemperaturen realiseert. Immers daar wordt de helft van de belichting gekoeld. De tussenbelichting heeft de minst aanvullende warmte nodig. Deze werd echter in de winter ook minder warm gestookt, met name in de nacht. Doordat er bij de LED-belichting minder wordt geventileerd is deze afdeling ook duidelijk een stuk vochtiger (minder vochtafvoer). Doordat schermen in de nacht vaak geheel of gedeeltelijk gesloten zijn, wordt de ventilatiecapaciteit gedempt. Vanaf maart wordt de afdeling met LED sneller opgewarmd. Dit kost dan ook duidelijk meer verwarmingsenergie. In maart is in de SON-T afdeling de regelprioriteit van de groeibuis omgewisseld met de buisrail.

### 3.4.2 Energie input



Figuur 27. Energie-input in het verwarmingssysteem voor de gehele afdeling en de onttrokken warmte door het koelsysteem van de LEDs in het Hybride-boven belichtingssysteem en de LED-afdeling.

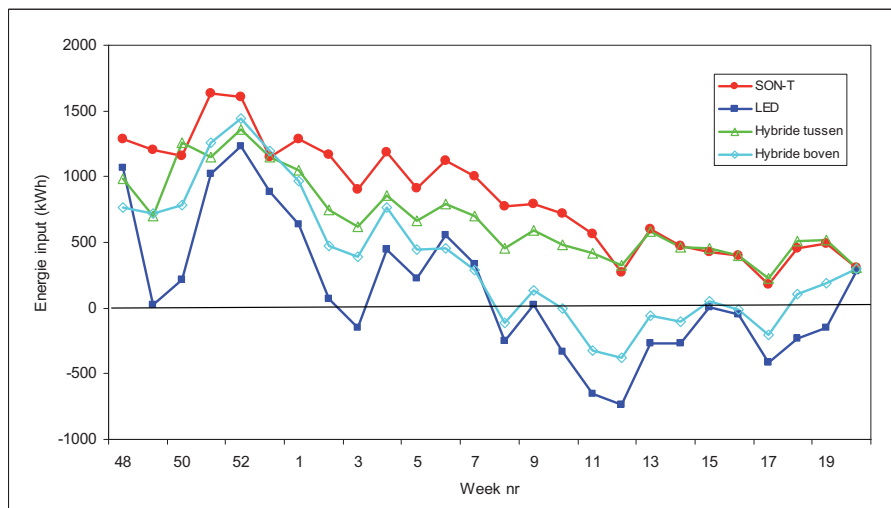
In Figuur 27 worden de energiegebruiken tot 23 mei 2010 opgesplitst in buiswarmte, onttrokken energie door de koeling en elektrische input voor de belichting. De figuur laat duidelijk zien dat er de gehele teeltperiode meer warmte in de LED boven is gegaan. Daar is ook de meeste warmte aan het belichtingssysteem onttrokken. In de laatste fase van de teelt wordt er soms meer warmte (op weekbasis) aan de kas onttrokken via de koeling van de LED-strengen dan er via de buizen wordt ingebracht. Op die momenten is de koeling van de LED-systemen dus blijkbaar ook nog de kas aan het koelen (week 12 en 17).



*Figuur 28. Energie-input voor de belichting van het gewasoppervlak en de voor een warmtepomp benodigde elektriciteit om het koelwater te maken in de afdelingen met gekoelde LED's.*

In het verloop van de teelt neemt de belichtingsintensiteit af, wat ook tot een afname in het elektriciteitsgebruik heeft geleid (Figuur 28).

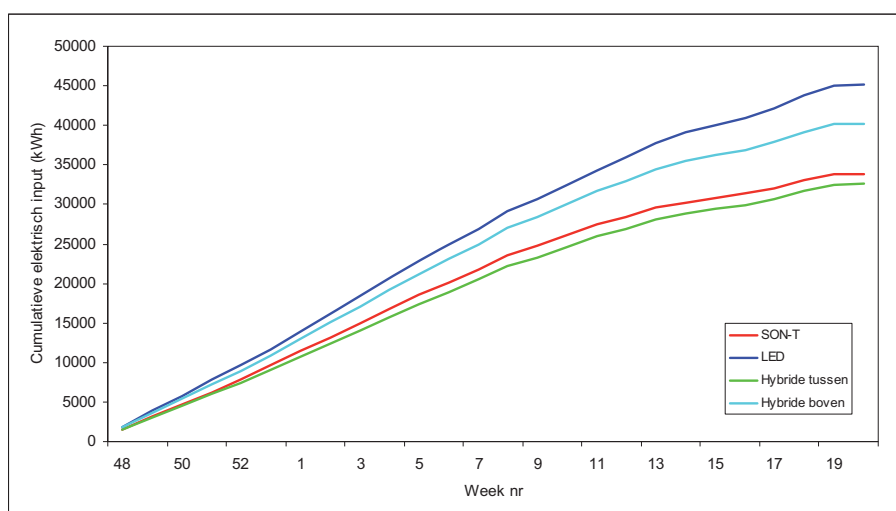
Bij de koeling is het de vraag waar de koude vandaan komt. Het koelwater wordt van ca. 15 °C opgewarmd tot 18 en 22 °C (Hybride-boven en LED) en wordt ook wel warmte-oogst genoemd. Het is de vraag of deze warmte direct in een warmtepomp kan worden gebruikt voor verwarming van de kas. Het zou wel wenselijk zijn, maar deze warmte is in dit experiment niet benut.



*Figuur 29. Energie-input voor de verwarming na aftrek van de warmteproductie van de warmtepomp in de Hybride-boven en LED-behandelingen. Negatieve getallen betekenen op weekbasis een warmteoverschot.*

Voor de koude productie zal immers een warmtepomp ingezet moeten worden. Bij een COP (Coëfficiënt of Performance)<sup>1</sup> voor de koude van 5, is voor de productie van 1 GJ koude ca. 75 kWh elektrisch nodig. Naast de koude levert dit dan ook nog 1.2 GJ warmte op. Deze warmte heeft een temperatuurniveau waarvoor wel een circuit beschikbaar moet zijn voor de laagwaardige warmte. De voor de warmtepomp benodigde elektriciteit is in Figuur 28 al weergegeven (onderbroken lijnen). De warmte die uit de warmtepomp komt moet in de kas worden ingebracht. In Figuur 29 is de energie input voor de verwarming, na aftrek van de warmteproductie van de warmtepomp in de afdelingen 'Hybride-boven' en 'LED' gegeven. Negatieve getallen betekenen in dit geval op weekbasis een warmteoverschot. Bij de productie van koud water voor de koeling komt zoveel warmte vrij dat de warmtevraag van de kas, in die gevallen, er ruimschoots mee kan worden voldaan.

Door gebruik te maken van de warmtepomp zal het totale elektriciteitsverbruik van de hybride en LED boven afdeling toenemen. In Figuur 30 is de cumulatieve elektrische energie input, dus inclusief de elektriciteit ten behoeve van de koudwaterproductie voor de gehele afdeling gegeven.



*Figuur 30. Cumulatieve elektrische input, voor de Hybride-boven en LED-behandelingen inclusief de elektriciteit ten behoeve van de koud waterproductie.*

Alle energiestromen zijn in Tabel 12 opgesomd. De overschotten aan warmte die de warmtepomp kan produceren, zijn vernietigd, en komen niet in het tabel voor. Doordat de warmtepomp teveel warmte produceert, kan er een verschil ontstaan tussen nog thermisch aan te vullen ten opzichte van totaal verwarming minus de warmte uit warmtepomp (Tabel 12). D.w.z. door de warmte te vernietigen (niet benutten) moet er extra warmte energie ingebracht worden. Met de huidige energieprijzen is een warmtepomp niet rendabel. Er is hier uitgegaan van een warmtepomp omdat er koude (koud water) nodig is om de LEDs (hybride en LED) te koelen. Een alternatief zou een koeltoren kunnen zijn. Een koeltoren is goedkoper in investering en het gebruik, maar dan wordt alle warmte vernietigd. Een ander optie zoals basinwater is op bedrijfsniveau niet realistisch.

In Hybride-boven behandeling is ca. 12000 kWh ingezet en in de LED-behandeling is ca. 22500 kWh koude ingezet voor de hele afdeling om de LEDs te kunnen koelen, wat respectievelijk ca. 3500 en 6400 kWh elektrische input heeft gevegd.

Dit betekent dus dat koeling zo'n 18% meer rendement op de LED-belichting moet opleveren. Berekend uit 6400 kWh elektrisch voor de warmtepomp, waar 36000 kWh elektrisch in de LED-belichting is gestopt. Bovendien moet daarvoor worden geïnvesteerd in een koelinstallatie (en warmtepomp).

<sup>1</sup> COP = het aantal kWh door de warmte pomp geproduceerd per kWh elektrisch input

Tabel 12. *Energiestromen per bron uitgesplitst naar elektrische en thermische input voor de gehele afdeling in de periode 18 november 2009 t/m 23 mei 2010.*

		SON-T	LED	Hybride-tussen	Hybride-boven
SON-T	kWh elektrisch	32067		16515	16484
LED	kWh elektrisch		35825	14224	17896
<b>Totaal belichting</b>		<b>32067</b>	<b>35825</b>	<b>30739</b>	<b>34380</b>
<b>groeibuis</b>		<b>2461</b>	<b>6293</b>	<b>117</b>	<b>3043</b>
<b>buisrail</b>		<b>18364</b>	<b>29192</b>	<b>16290</b>	<b>23352</b>
<b>Totaal verwarming</b>		<b>20824</b>	<b>35485</b>	<b>16407</b>	<b>26395</b>
koeling retour uit de kas = koude	kWh thermisch		22466		12115
Input koude productie WP	kWh elektrisch		6372		3493
Warmte uit WP	kWh thermisch		31861		17466
Totaal elektrisch in (belichting + WP)	kWh elektrisch	32067	42197	30739	37873
Nog thermisch aan te vullen <sup>1)</sup>	kWh thermisch	20824	6739	16407	10107

<sup>1)</sup> *Indien alle vrijkomende warmte uit de WP bij de koude productie, in de kas verwarming kan worden ingezet.*

### 3.4.3 Energie efficiëntie

Als er gekeken wordt hoeveel tomaten geproduceerd worden per eenheid in de kas gestoken energie moet de elektrische en thermische energie bij elkaar opgeteld worden. Warmtetechnisch mag een kWh elektrisch opgeteld worden bij een kWh thermisch, maar omdat dit economisch gezien niet mag, is de input aan elektrische en thermische energie omgezet in m<sup>3</sup> aardgasequivalenten. Vervolgens is het energieverbruik gedeeld door het aantal m<sup>2</sup> bruto kasoppervlak en het aantal aardgasequivalenten per geproduceerde kg tomaat berekend (Tabel 13).

Tabel 13. *Energie efficiëntie van de belichtingsystemen op basis van inkoop (uit een elektriciteitscentrale en aardgas) of op basis van energie uit een WKK.*

	Belichtingsstelsel			
	SON-T	LED	Hybride-tussen	Hybride-boven
Gebruikte elektrische energie (kWh)	33878	38292	32569	36467
Gebruikte thermische energie (kWh)	22072	37583	17609	28179
Totaal energie input (a.e. in m <sup>3</sup> )	12144	15164	11264	13575
Energie input (a.e. m <sup>2</sup> )	84,3	105,3	78,2	94,3
Productie (kg m <sup>2</sup> )*	25,85	24,53	24,27	25,17
Energie efficiëntie inkoop (m <sup>3</sup> a.e. kg <sup>-1</sup> )	3,26	4,29	3,22	3,75
Energie efficiëntie WKK (m <sup>3</sup> a.e. kg <sup>-1</sup> )	2,46	2,94	2,52	2,72

\* *productie t/m 21 juni 2010.*

De totale hoeveelheid energie in de behandelingen met LED-bovenbelichting is aanzienlijk hoger dan bij SON-T en Hybride-tussen. De oorzaak ervan is dat er ook veel energie werd gebruikt in het experiment om de LEDs te koelen. Dit betrof zowel elektra om de warmtepomp te laten draaien, als om de warmte te onttrekken uit het koelwater, warmte die vervolgens weer werd vernietigd.

Per m<sup>2</sup> werd door de Hybride-tussen het minste energie in de kas gestoken (78.2 m<sup>3</sup> a.e.), mede omdat de tussenbelichting ook warmte afgaf waardoor er minder gestookt hoefde te worden. Daarentegen was het kasklimaat bij de LED-behandeling vooral in de ochtend té koel waardoor er extra gestookt moest worden en dat resulteerde in het hoogste energieverbruik per m<sup>2</sup> (105.3 m<sup>3</sup> a.e.).

De efficiëntie van de belichtingssystemen ligt tussen de 3.2 en 4.3 m<sup>3</sup> a.e. per kg geproduceerde tomaat wanneer elektriciteit en aardgas apart worden ingekocht, en tussen de 2.4 en 2.9 m<sup>3</sup> a.e. per kg tomaat wanneer uitgegaan wordt van de productie van zowel warmte als elektriciteit door een WKK. De berekende efficiëntie van de 4 belichtingssystemen, zoals gebruikt in dit experiment, is grofweg in twee groepen te delen, te weten één met en één zonder LED-belichting van boven. SON-T en Hybride-tussen verschillen weinig in energie-efficiëntie, met Hybride-tussen iets voordeliger wanneer uitgegaan is van elektriciteit inkoop van de elektriciteitscentrale, en met SON-T iets efficiënter wanneer uitgegaan wordt van een WKK.

## 4 Conclusies experiment

### 1. Tijdens deze teelt is er geleerd hoe te telen onder verschillende belichtingssystemen.

Als gevolg van de verschillende belichtingssystemen zijn er een aantal verschillen in het kasklimaat geconstateerd, zoals verschillen in (plant)temperatuur en vochtigheid, waardoor de gewassen anders reageerden en bijgestuurd moesten worden. Het experiment is uitgevoerd tijdens een relatief koude winter, waarbij het gewas onder SON-T duidelijk voordeel bij had. Teeltmaatregelen om het gewas bij te sturen zijn gezocht in een hogere (LED-boven) of lagere etmaaltemperatuur (Hybride-tussenbelichting), het verschil in dag/nacht temperatuur groter (bij Hybride-tussenbelichting) of kleiner (Hybride-boven) te maken, en een gewijzigd schermgebruik (meer en langer bij LED).

Bij de Hybride-tussen behandeling zijn de LED-strengen relatief hoog gehangen om meer licht bij de kop van het gewas te krijgen, omdat de kop anders te dun of te zwak werd. De consequentie hiervan was een behoorlijk lichtverlies van 10-14  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  naar boven toe waardoor tevens de diepere lagen van het gewas minder profijt van het tussenlicht hadden.

In alle behandelingen werd regelmatig een blaadje weggenomen in de kop van het gewas wanneer het gewas té vegetatief dreigde te worden. Dit was soms afhankelijk van de behandeling.

### 2. De lichtverhouding en –positie bij Hybride-tussen in dit experiment was niet optimaal voor Sunstream.

De gebruikte lichtintensiteit was voldoende voor het ras Sunstream, wellicht iets lager dan de optimale lichtintensiteit. Mogelijk was de verhouding van de hoeveelheid tussenlicht ten opzichte van het bovenlicht niet optimaal voor Sunstream. In deze experiment met Sunstream was er bij de Hybride-tussen behandeling een verhouding van 1:1 boven- en tussenlicht gebruikt, terwijl de modelsimulaties van Schapendonk et al (2010) achteraf een optimale verhouding van 3:1 simuleerde. Een mogelijke reden dat Sunstream relatief meer boven- dan tussenlicht kan benutten is dat Sunstream een meer sink-gelimiteerd ras lijkt te zijn, i.i.t. het in andere onderzoeken gebruikte meer source-gelimiteerde ras Komeett. De vruchten van Sunstream kunnen niet ongelimiteerd blijven groeien, en ze worden ook op 11 (soms 12) vruchtjes gesnoeid, zodat het gewas haar assimilaten op andere manieren kwijt moet.

### 3. Het gewas onder alleen LEDs (bovenbelichting) kan eerder in het seizoen een hogere plantbelasting aan.

Vooraf bij de LED-behandeling ontwikkelde zich vaak een sterk gewas, met meer paars in de kop met soms zelfs het vormen van plantjes op de bladstengels. Het gewas onder LED had veelal duidelijk kracht over, dus werd een oplossing gezocht in een hogere groeisnelheid door een hogere kasttemperatuur aan te houden en meer te schermen. Daarnaast zijn in de winter gedurende een periode van 7 weken meer vruchtjes aangehouden om de plantbelasting te verhogen (zie sectie 2.1.2 en 3.1.3.1). Om de tragere trosontwikkeling bij de LED-boven deels te compenseren, had achteraf de plantdichtheid hoger mogen zijn of had bij deze behandeling eerder extra stengels aangehouden kunnen worden. In maart is er wel een extra stengel aangehouden in de LED en Hybride-tussen behandelingen. De hogere luchtvochtigheid die bij LED werd waargenomen (condens), zal vooral een gevolg zijn geweest van een verminderde ventilatie, vooral om de gewastemperatuur hoger te houden.

### 4. Onder SON-T belichting ontwikkelde zich een gewas met relatief zwakke bladeren.

Het gewas onder SON-T lijkt het meest 'op het randje' geteeld te zijn, waardoor het gewas het meest efficiënt met zijn assimilaten is omgegaan. Dit heeft geresulteerd in dunner blad dat sneller verouderde. Dit was mede oorzaak voor de lagere fotosynthese onderin het gewas tijdens de belichtingsperiode.

### 5. Het lichtverlies door de LED-profielen bij bovenbelichting t.o.v. dat bij SON-T was nog (te) groot.

De transmissiemetingen (Tabel 2) lieten de laagste lichttransmissie zien bij de LED-behandeling. De metingen werden uitgevoerd onder de armaturen, en dit suggereert dat er met een verandering van de omvang van de armaturen (licht) winst mee te behalen is. Er dient ook rekening gehouden te worden met de LED-transformator blokken, die ook lichtverlies veroorzaken.



## **6. De energie efficiëntie van de LED-boven belichtingsystemen bleef achter bij die van SON-T belichting.**

De energie efficiëntie van de LED's die boven het gewas hingen bleef in deze proef achter bij die van SON-T lampen, waardoor de energiedoelstelling, verhoging van de energie efficiëntie met 10% niet is gehaald. De efficiëntie van LED's gaat elk jaar nog sterk vooruit. In de proef met LED-bovenbelichting moest de lagere koptemperatuur en daarmee de tragere trosontwikkeling gecompenseerd worden door hogere etmaaltemperaturen aan te houden. Dit heeft extra energie gekost. Door de noodzakelijke koeling van de LED-armaturen (bij bovenbelichting) werd er ook warmte afgevoerd wat in de proef niet werd gebruikt, maar dit moest vooral in de winter wel worden gecompenseerd door extra warmte toe te voeren via de buis.

Met de lichtefficiëntie van de belichtingsystemen in dit experiment, heeft SON-T de meest kilo's tomaat per eenheid energie geproduceerd, op de voet gevolgd door de Hybride-tussen. Vanwege de koeling van boven LED's in combinatie met de extra warmtevraag, bleken de LED en Hybride-boven systemen het minst efficiënt.

Verder waren er nog een aantal waarnemingen waarbij geen eenduidige conclusies getrokken kunnen worden:

**Verticale luchttemperatuur:** De verticale temperatuurverschillen waren het geringst bij Hybride-boven en het grootst bij de Hybride-tussen in het voorjaar. Kennelijk heeft de convectie-warmte bij Hybride-tussen minder invloed op het gewastemperatuur dan vooraf werd verwacht.

**Verschillen in vruchtkwaliteit waren gering:** Over het algemeen was er weinig verschil tussen de behandelingen voor wat betreft de vruchtkwaliteit. Alleen de houdbaarheid van de LED-boven was beter dan die van de SON-T en Hybride-boven. De meeste gescheurde vruchtjes kwamen voor bij SON-T en de minste bij LED-boven.

**De trosontwikkeling is een goede indicator van de koptemperatuur:** De trosontwikkeling wordt bepaald door de koptemperatuur (meristeem) en geeft daarom indirect de koptemperatuur aan, maar voornamelijk is de koptemperatuur moeilijk rechtstreeks te meten.

### **Verschillen in plantbewegingen:**

Er traden verschillen in de mate van plantbewegingen tussen behandelingen op. Na het aangaan van de belichting begonnen bladeren sterk te bewegen. Ze bewogen meer in de middag dan in de ochtenduren. De meeste bewegingen zijn waargenomen in de Hybride-tussen, gevolgd door Hybride-boven en SON-T. De minste bladbewegingen waren er onder de LED's. Of deze bewegingen louter fototropisch zijn of een gevolg zijn van de lichtintensiteit, het lichtspectrum of interne waterstatus van de plant is onbekend en in dit experiment niet onderzocht.

**Dunne stengels bij Hybride-tussen:** De dunste stengels zijn gemeten in de teelt met de Hybride-tussen. Het voorkomen van dunne stengels wordt gezien als een gevolg van assimilatenkorte, mogelijk veroorzaakt door een hogere temperatuur bij de kop. Omdat de bovenste LED-streng net onder de kop hing, zou dat de hogere luchttemperatuur kunnen veroorzaken.

**Paarskleuring onder LEDs:** Of de paarskleuring (anthocyanen) van het gewas onder LED-belichting leidt tot minder lichtbenutting is niet duidelijk. Waarschijnlijk komt het door een ophoping van assimilaten in de bladeren en stengels.

**Verschillen in absorptie tussen LED's en SON-T:** Er lijkt iets meer licht geabsorbeerd te worden onder LED-belichting. Deze hogere absorptie komt echter niet tot uiting in een hogere productie bij LED's, maar wat het effect wel is, is onduidelijk.

## **Deel II Scenario Analyses**



## 5 Vergelijking SON-T en LED

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, nutriëntenvoorziening en stuurlicht zijn aanvullende factoren die de grenzen bepalen waarbinnen de processen optimaal kunnen verlopen (Figuur 31). Bij tomaat is een goed begrip van die samenhang van groot belang om een maximale opbrengst per eenheid ingebrachte energie te realiseren. Niet alleen het effect op de fotosynthese (assimilatie) is daarbij van belang maar ook effecten op assimilatenverdeling en morfologie van de plant.

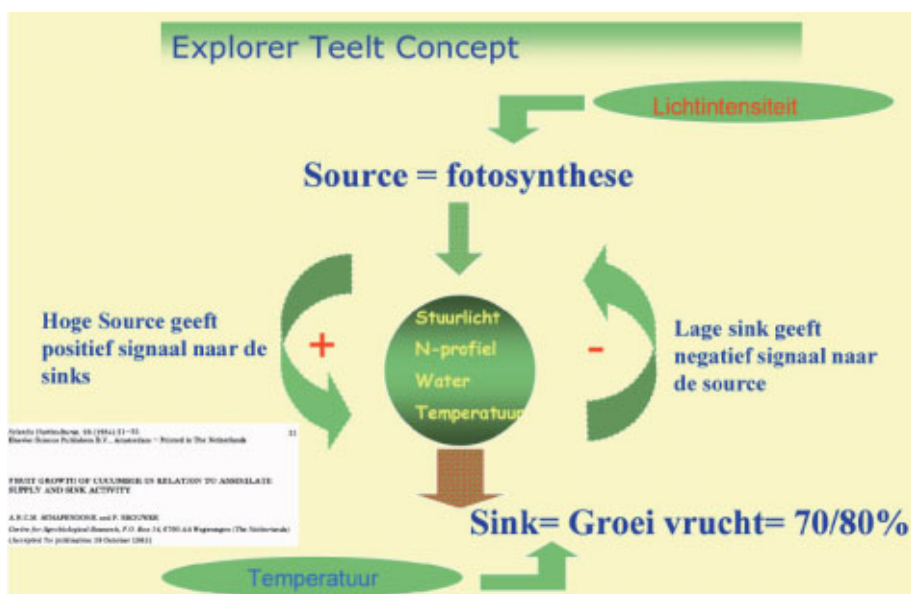
De proef, waarvoor onderstaande analyses werden verricht, is uitgevoerd in de klimaatkassen van WUR-glas in Bleiswijk met het ras Sunstream. Dit ras heeft relatief kleine vruchten en dat vraagt om een snelle trosafplitsing om de gewenste plantbalans te realiseren. Een snelle trosafplitsing is gekoppeld aan een snelle bladafplitsing en die wordt bepaald door de temperatuur aan de kop. Sunstream is een ras dat een grote kans loopt op een gebrek aan voldoende sinkactiviteit (temperatuur). Om die reden is het verwachte effect van een hogere source activiteit (bijvoorbeeld door de iets hogere bladfotosynthese onder LED of door tussenbelichting) kleiner dan bij source gelimiteerde rassen zoals Komeett. Uit eerder onderzoek blijkt tussenbelichting, onafhankelijk van de aard van die belichting, een toename in de source op te leveren van 10 - 15%. Tussenbelichting is dan ook effectiever bij Komeett dan bij Sunstream (Schapendonk *et al.*, 2010). Een optimale lichtverdeling in het gewas heeft twee aspecten om rekening mee te houden:

- Een zo hoog mogelijke lichtbenuttingsefficiëntie.
- Een optimale temperatuuropbouw in het gewas (Hoofdstuk 7).

### 5.1 Lichtbenuttingsefficiëntie

De lichtbenuttingsefficiëntie van een lichtbron wordt groter:

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



Figuur 31. Schema van de samenhang tussen assimilatenstromen.

Punt 1 wordt bereikt door voldoende bladeren aan te houden en een stengeldichtheid te kiezen waarbij de source-sink verhouding gelijk is aan 1 (Figuur 31). 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.

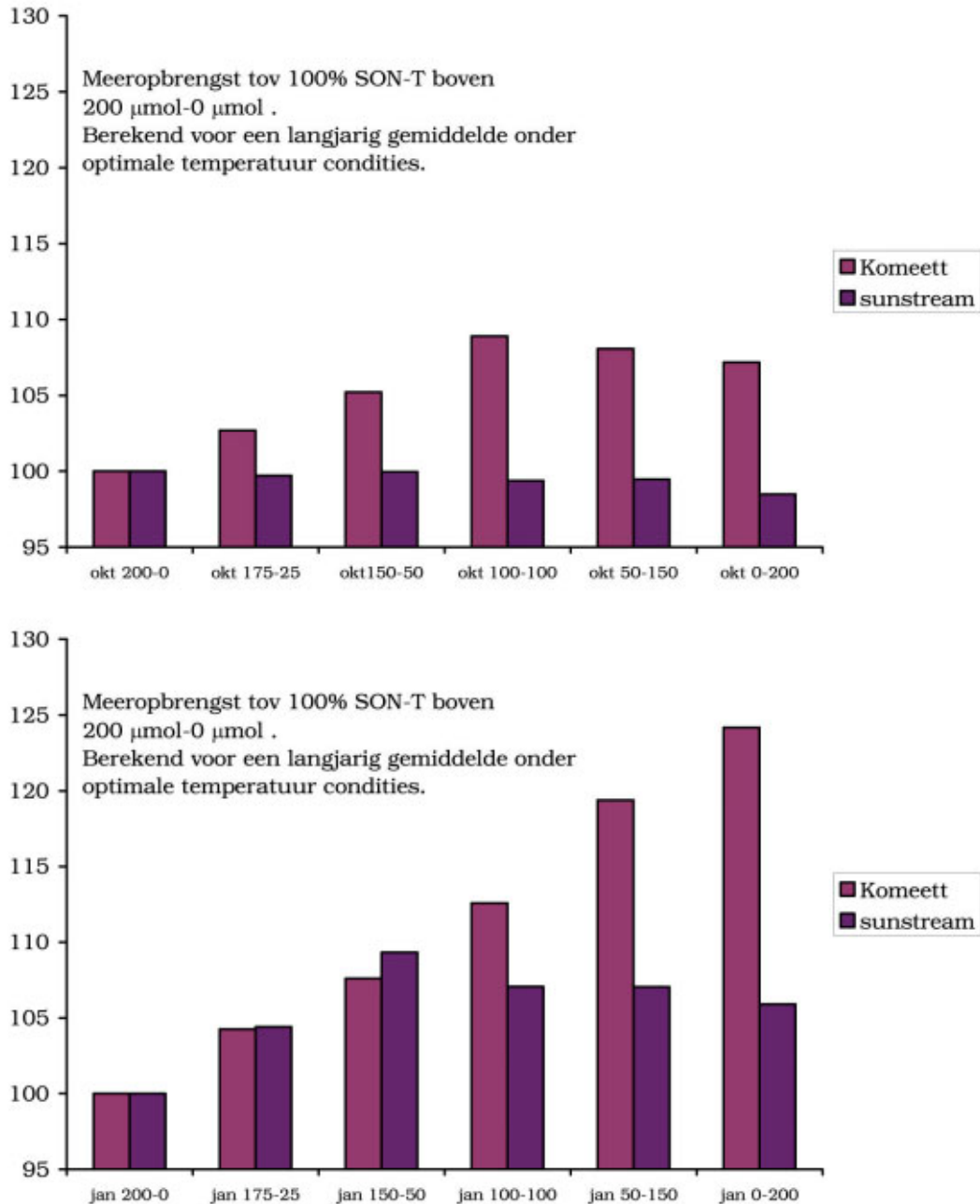
De optimale verdeling van het licht in een gewas is geen constante factor maar varieert per ras en is daarnaast afhankelijk van het seizoen (Schapendonk *et al.*, 2010). Samengevat zijn de meest relevante conclusies uit die studie:

- In de winter neemt de productie bij grote trostomaten (Komeett) vrijwel lineair toe met een hogere fractie tussenbelichting.
- 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 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 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 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.



*Overzicht van 2 rood-blauwe LED-armaturen tussen het gewas.*

Er bestaat dus geen 'vaste beste verhouding' tussen bovenbelichting en tussenbelichting. Verder 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 daarbij is er ook nog een belangrijk effect van het ras. Bij het raseffect spelen de temperatureffecten een cruciale rol (Hoofdstuk 6). We willen dan ook benadrukken dat de in Figuur 32 weergegeven effecten van de meeropbrengsten alleen tot uiting komen bij de optimale temperatuurverdeling over het gewas.



*Figuur 32. Gesimuleerde opbrengstverandering (model Explorer Tomaat) 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 stengeldichtheid van 3. Maximale belichtingsduur 18 uur. De bijschriften op de X-as:  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  SON-T of LED.*

In het najaar (bovenste grafiek Figuur 32) zijn de positieve effecten van tussenbelichten veel geringer dan in de winter (onderste grafiek) 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.

In de winter (onderste grafiek Figuur 32) neemt de productie bij grote trostomaten vrijwel lineair toe met een hogere fractie tussenbelichting. 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.

## 5.2 Simulaties met Optomaat Explorer

We maakten gebruik van de geregistreerde klimaatdata, scherminstellingen, aan- en uit-schakelen van de assimilatie-lampen en CO<sub>2</sub>-concentraties met tijdstappen van 5 minuten. De berekeningen van assimilatenvraag van bladeren en vruchten vereisen een correcte berekening van de temperatuur van die plantendelen.

Optomaat Explorer berekent de temperatuurverdeling in het gewas op basis van instraling, warmtetransporten via convectieve overdracht en verdamping. Het model is verder uitgerust met een routine waarmee het mogelijk is om de uitgroei van nieuwe scheuten te simuleren.

Het effect van de ontkoppeling van NIR en PAR kan met het model effectief worden geëvalueerd. 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. Zeker in de belichte teelt is de temperatuurregeling het stuur waarmee richting wordt gegeven aan de balans tussen assimilaten-aanbod en assimilaten-gebruik. Met het Explorer model krijgt deze balans een extra dimensie omdat van beide 'armen' een onafhankelijke boekhouding wordt bijgehouden. Het is daarom mogelijk om de effecten van een onbalans zeer realistisch te berekenen. Het model berekent de doorlooptijd van bloem naar vrucht en de daarbij behorende verschuivingen van de positie van de vruchten in de tijd. Het gewas is opgedeeld in 10 bladlagen die op een realistische manier doorschuiven. De temperatuur-afhankelijke bladafplitsingssnelheid bepaalt de toename van de LAI (m<sup>2</sup> blad per m<sup>2</sup> grondoppervlak) en de snelheid van bloemaanleg.



## 6 Analyse van experimenten

De productiviteit van een gewas wordt in belangrijke mate bepaald door de assimilatiesnelheid en de efficiëntie van de benutting van reserves. Samen worden deze processen de source genoemd (= bron). Fotosynthese is veruit de belangrijkste component van die source processen.

### 6.1 Fotosynthese

Een hoge fotosynthese is de basis voor een efficiëntere teelt. Deelprocessen voor de fotosynthese zijn: CO<sub>2</sub>-binding, elektrontransport in bladgroenkorrels (hier verder aangeduid als de fotosynthese capaciteit), lichtonderschepping, huidmondjes opening en chlorofyl concentratie. De CO<sub>2</sub>-opname van bladeren werd gemeten door middel van gasanalyse met de LiCor-6400. De LiCor-6400 (zie foto hieronder), kan zodanig geprogrammeerd en gekalibreerd worden dat automatisch in ongeveer 40 minuten een licht response curve gemeten wordt in een reeks van oplopende lichtintensiteiten. Tijdens elke lichtstap worden de fotosynthese en de verdamping van het betreffende blad gemeten. Daarnaast wordt de openings toestand van de huidmondjes gemeten. Tijdens de metingen van de licht response curve werd de CO<sub>2</sub>-concentratie op 1000 ppm gehandhaafd.



*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, CO<sub>2</sub>-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 m<sup>2</sup> 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.*



Op vergelijkbare wijze kan een curve gemaakt worden van de fotosynthese bij oplopende CO<sub>2</sub> concentraties. Hiervoor zijn voorzieningen in de LiCor opgenomen die de gewenste CO<sub>2</sub> concentratie realiseren in de luchtstromen aan onder- en bovenzijde van het blad, dat is ingeklemd tussen beide badkamers. De lichtintensiteit (PAR) tijdens de CO<sub>2</sub> respons curve wordt constant gehouden en was in dit experiment 1200 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>. De lichtintensiteit van 1200 μmol m<sup>-2</sup> is erg hoog maar dat dient hetzelfde doel als de hoge CO<sub>2</sub> concentratie in de licht response meting. We willen er namelijk zeker van zijn dat de lichtintensiteit verzadigend is om situaties te kunnen vergelijken.

De meest voorkomende oorzaak voor een lage efficiëntie is een lage huidmondjesgeleidbaarheid (zie sectie 6.2 en Figuur 34). 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<sub>bl</sub>) hoog oplopen. Huidmondjes sluiten namelijk om uitdroging van het blad te voorkomen.

De belangrijkste processen in de fotosynthese zijn de snelheid van CO<sub>2</sub>-binding (V<sub>c</sub>- max) bij CO<sub>2</sub>-verzadiging en de fotosynthese capaciteit (J<sub>max</sub>) bij lichtverzadiging.

V<sub>c</sub>max wordt bepaald uit de CO<sub>2</sub> response curve en J<sub>max</sub> uit de fluorescentiemetingen. Er waren grote verschillen tussen de behandelingen (Tabel 14), die voor een deel kunnen worden teruggevoerd op verschillen in lichtintensiteit en de aanpassing daaraan.

De effecten op V<sub>c</sub>max en J<sub>max</sub> dragen wel bij aan de verschillen in productie maar in de winter is het effect betrekkelijk gering door de betrekkelijk lage lichtintensiteit. Een verdubbeling van J<sub>max</sub> geeft 15% verhoging van de fotosynthese en een verdubbeling van V<sub>c</sub>max geeft 5–6% verhoging. De effecten komen voornamelijk tot uiting bij hoge lichtintensiteiten in het voorjaar en in de zomer. De conclusie is dat J<sub>max</sub> en V<sub>c</sub>max bij SON-T in de winter hoger zijn dan onder LED's maar dat het effect in het voorjaar snel wordt ingelopen. Dit heeft weinig te maken met de lichtkleur maar alles met de lichtintensiteit.

Tabel 14. Waarden voor J<sub>max</sub> en V<sub>c</sub>max (μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) in de verschillende behandelingen voor eind januari en begin april.

	eind januari		begin april	
	J <sub>max</sub>	V <sub>c</sub> max	J <sub>max</sub>	V <sub>c</sub> max
LED SON-T Onbelicht	178	56	217	86
	237	121	237	118
			274	96

Verschillen in lichtabsorptie van bladeren ontstaan door veranderingen in bladdikte en verschillen in de concentratie van bepaalde pigmenten. De efficiëntie van lichtbenutting in het rode gebied is 15% hoger dan die van het gemiddelde daglicht (Referentie onderzoek Mc Cree door Jan Snel). Dit geldt echter voor monochromatisch licht en recent onderzoek laat zien dat met aanvullend daglicht het positief effect van rood licht wordt overschat (Hogewoning, 2010). Op gewasniveau is het voordeel toch al veel geringer omdat licht wat niet is geabsorbeerd een grote kans loopt om door de volgende bladlaag te worden opgevangen. Dit nivelleert het voordeel van de rode fotonen. In de scenario analyses is met deze constatering rekening gehouden bij de berekening van de opbrengsten (sectie 7.1).

In Figuur 33 zijn relatieve metingen van het totale absorptie spectrum van het bladgroen weergegeven. Deze zogenaamde SPAD-metingen geven een indruk van de absorptie eigenschappen van het blad voor het gehele spectrum van invallend licht maar de getallen zeggen nog weinig over specifieke gevoeligheden van de spectrale verdeling. Die specifieke gevoeligheid per golflengte is in dit project niet bepaald. Als de verschillen in SPAD-metingen zeer gering zijn is het erg onwaarschijnlijk dat er significante verschillen zijn in de specifieke absorptie

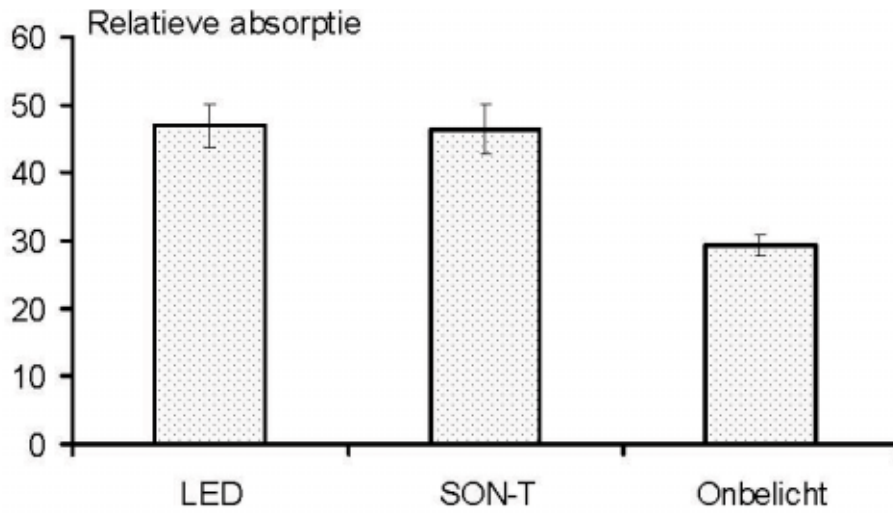
(Hogewoning, 2010). En dat is ook het geval want de verschillen tussen LED en SON-T zijn zowel in de winter als in het voorjaar erg gering.

## 6.2 Huidmondjes geleidbaarheid

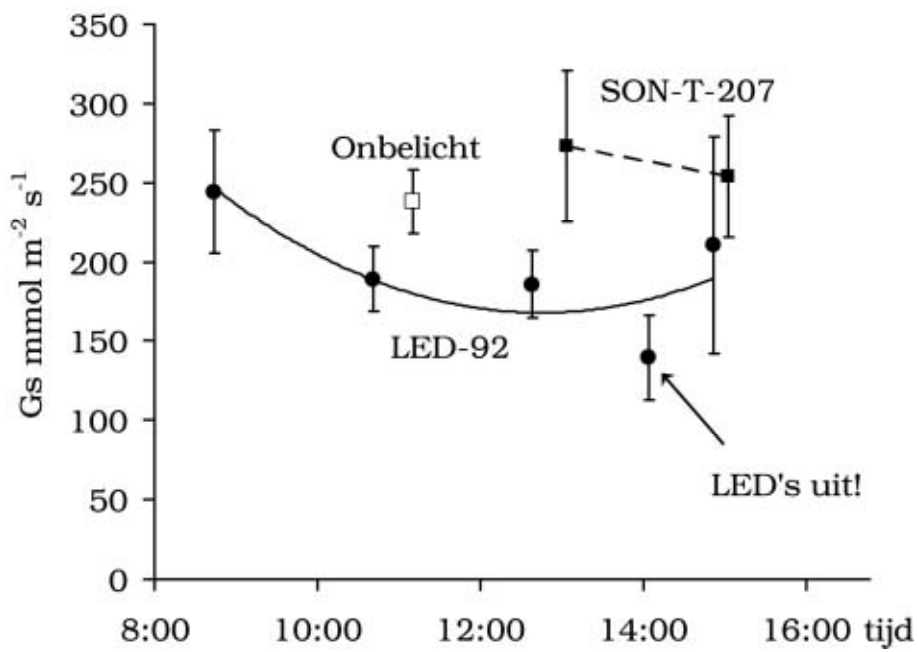
Voor de modelberekeningen werd gebruik gemaakt van de meetresultaten uit een eerder experiment met hetzelfde ras (Nederhof *et al.*, 2010).

De huidmondjes geleidbaarheid ( $g_s$ ) is een belangrijke grootte die bepaalt of er voldoende  $CO_2$  kan worden opgenomen in het blad. Een hoge geleidbaarheid betekent dat de fotosynthese niet beperkt wordt door gesloten huidmondjes. Een hoge geleidbaarheid betekent ook vaak een hoge verdamping. Hierdoor zijn verdamping en fotosynthese (bij gelijk dampdruk deficit) aan elkaar gekoppeld. In de SON-T behandeling was de geleidbaarheid hoger dan in de LED-behandeling (Figuur 34). Dit is een algemene observatie en mag niet verward worden met de hoge geleidbaarheden die worden waargenomen bij LED-tussenbelichting. Tussenbelichting geeft vaak een hogere geleidbaarheid van de bladeren lager in het gewas. Uitgedrukt op vierkante meter kas zal de verdamping van een gewas met tussenbelichting dus hoger zijn dan een gewas met topbelichting met dezelfde intensiteit. In alle behandelingen (inclusief de onbelichte behandeling (gemiddeld over 8 metingen tussen 10:30 u en 11:30 u in april) is de geleidbaarheid hoog genoeg om geen beperkende factor te zijn voor de  $CO_2$ -opname in de belichte teeltperiode. De verschillen zijn hier dus niet relevant.

Het is een nog niet bevestigd vermoeden dat de hogere geleidbaarheid onder SON-T vooral wordt veroorzaakt door de hogere koptemperatuur.



Figuur 33. Relatieve absorptie van bladeren eind januari. In de periode daarna worden de verschillen geleidelijk steeds kleiner en in april zijn ze niet meer significant.



Figuur 34. Verloop van de huidmondjesgeleidbaarheid ( $g_s$ ) over de dag in april.

## 7 Scenario analyses

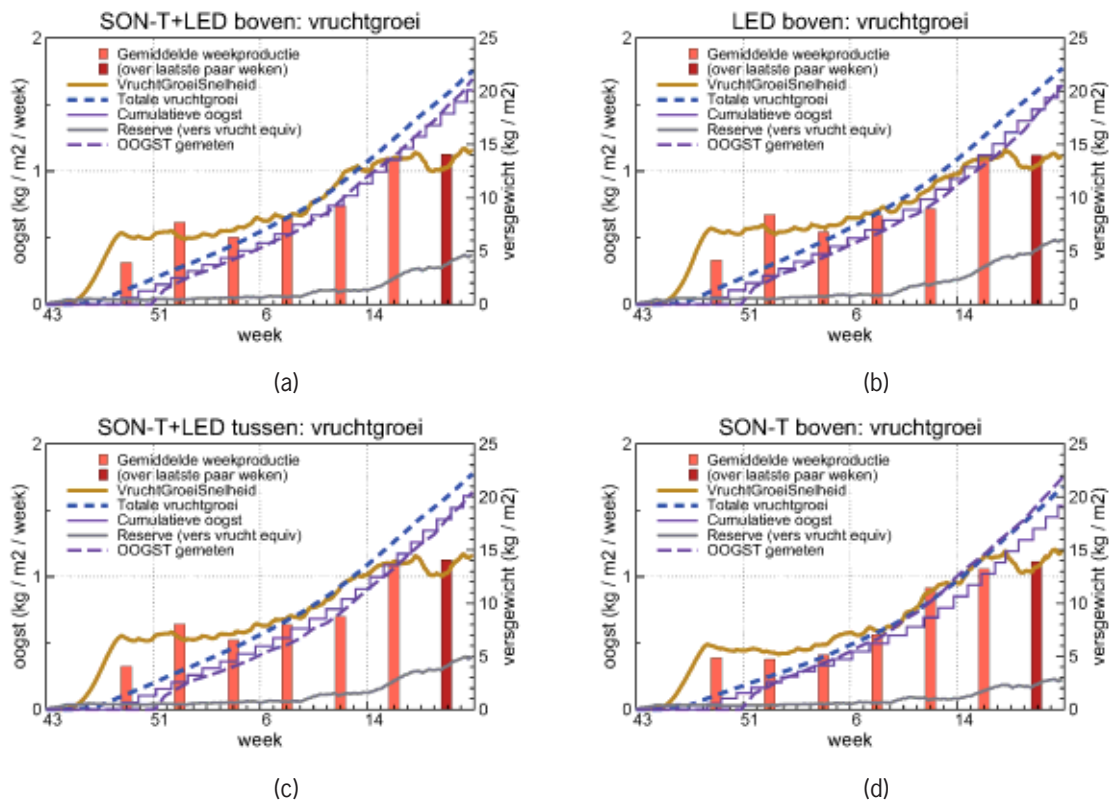
Het model berekent de productie op basis van het microklimaat en de effecten daarvan op morfologische en fysiologische processen. De berekeningen zijn dus niet gebaseerd op statistische interacties maar op mechanismen in de plant. Explorer modellen berekenen het kasklimaat en de effecten van variaties van teeltomstandigheden. In de huidige analyses is het kasklimaat niet berekend maar ingelezen uit de klimaatregistratie in de kascompartimenten.

### 7.1 Opbrengstcomponenten voor verschillende behandelingen

In de eerste stap is met Optomaat Explorer een test uitgevoerd waarin werd geanalyseerd of de berekende productie in de 4 behandelingen overeen kwam met de werkelijk gerealiseerde productie. In Figuur 35 is een samenvatting gegeven van de resultaten.

*Tabel 15. Productie efficiency gesimuleerd en gemeten voor de verschillende behandelingen. Oogst (in kg m<sup>-2</sup>) is de tomaten oogst tot 1 juni 2010, gemeten of gesimuleerd. De kolommen 'Eff-PARin' en Eff-PARabs (in g suiker m<sup>-2</sup>) geven de efficiëntie van de fotosynthese voor het hele gewas, uitgedrukt in de hoeveelheid suikers per mol licht aan de top van het gewas of de hoeveelheid licht die geabsorbeerd is.*

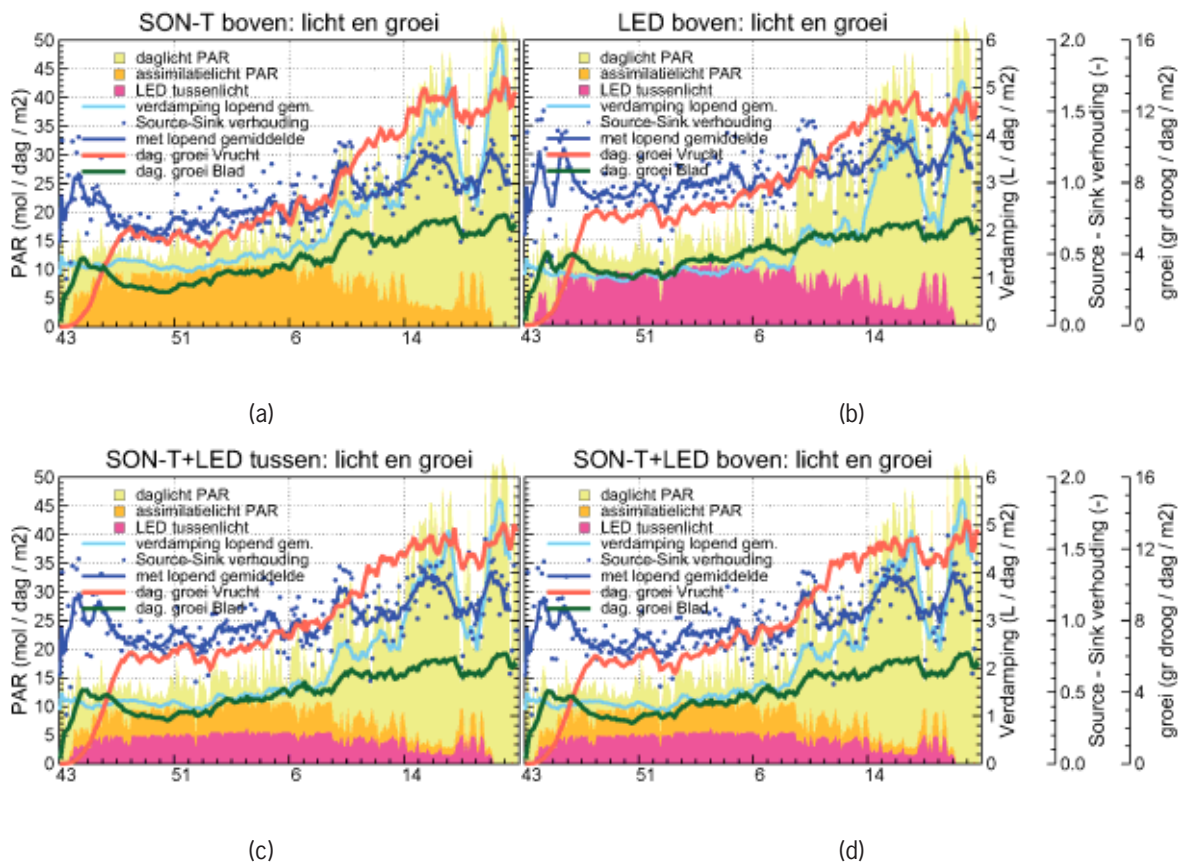
	Oogst gemeten (kgm <sup>-2</sup> )	tov SONT (%)	Oogst gesimuleerd (kgm <sup>-2</sup> )	tov SONT (%)
SON-T boven	22,02	100,0	19,28	100,0
LED boven	20,79	94,4	20,46	106,1
50-50 LED tussen	20,66	93,8	20,09	104,2
50-50 LED boven	21,36	97,0	20,08	104,1
	Assimilatie g suiker m <sup>-2</sup>	Eff-PARin g suiker mol <sup>-1</sup>	Eff-PARabs g suiker mol <sup>-1</sup>	Oogst eff g vrucht mol <sup>-1</sup>
SON-T boven	5753,4	1,20	1,72	5,77
LED boven	6171,6	1,29	1,58	5,25
50-50 LED tussen	6133,3	1,28	1,67	5,47
50-50 LED boven	6022,4	1,26	1,64	5,47



Figuur 35. De gemeten cumulatieve vruchtproductie (paarse stippellijn in  $\text{kgm}^{-2}$ ) en de gesimuleerde geoogste productie (paarse trapsgewijze lijn, ook op de rechter y-as). De grijze lijn (ook in  $\text{kgm}^{-2}$ ) is de ophoping van reserves. De beige lijn is de totale plantbelasting (in  $\text{kgm}^{-2}$  per week op de linker y-as). De rode histogram staven geven de gemiddelde weekproductie van twee weken voor tot twee weken ná iedere staaf, in  $\text{kgm}^{-2}$  per week. De donkerrode staaf geeft de gemiddelde weekproductie over de laatste weken van een nog lopende termijn.

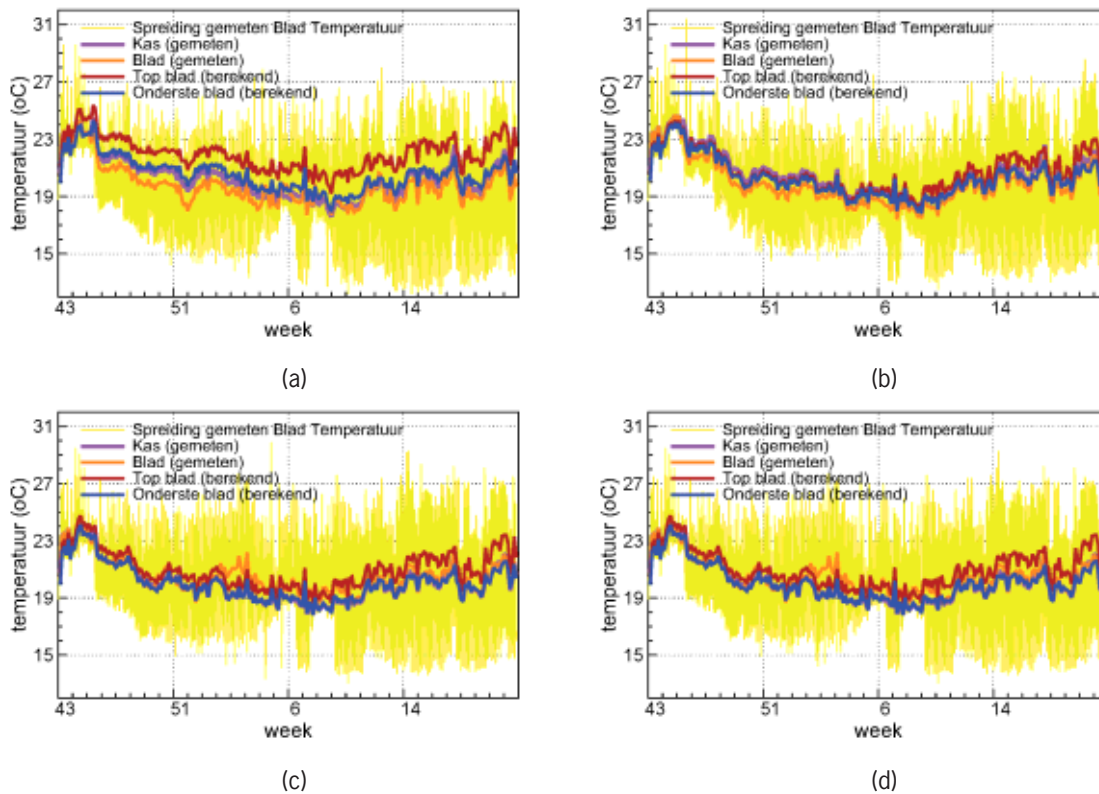
Het gemiddelde niveau van alle voorspelde oogsten komt goed overeen met de gemiddelde gemeten opbrengst (Figuur 35). Tussen de behandelingen zien we echter een contrast in de trends (Tabel 15). In de gemeten data is de opbrengst in alle LED-behandelingen systematisch lager dan in de SON-T en er is zelfs sprake van een groter negatief effect bij tussenbelichting. Dit in tegenstelling tot de resultaten in een soortgelijke proef bij Komeett (Pot *et al.*, 2010). In de gesimuleerde data is er echter een kleine toename van de productie in de LED-behandelingen. De reden voor deze discrepantie is waarschijnlijk gelegen in een lagere lichtonderschepping van het LED-licht dan wat er is aangenomen. Gedurende de experimenten zijn er aanpassingen verricht en die zijn niet allemaal meegenomen in de berekeningen. Bovendien is een exacte vaststelling van de lichtabsorptie van installaties, die dicht op een gewasrij zijn opgesteld, niet met voldoende betrouwbaarheid te doen. Een andere verklaring is er niet want uit analyses waarbij het microklimaat van de behandelingen kruiselings werd gewisseld, bleek dat de effecten maar voor een klein gedeelte konden worden toegeschreven aan de verschillen in temperatuur en RV (Tabel 17).

Door de onderlinge samenhang van assimilatenvraag en assimilatenaanbod op elk moment te berekenen ontstaat een beeld van de (on)balans in de plant. Vervolgens kan aan de hand van de parallel gemeten klimaatregistratie worden nagespeurd wat de samenhang is tussen de plantresponse en de verschillende klimaatfactoren. Het draait namelijk niet alleen om het type belichting maar ook om de samenhang tussen belichting en andere teeltomstandigheden en de effecten daarvan op de sturing van deelprocessen. Een analyse van de balans tussen assimilaten aanbod en assimilaten behoefte is weergegeven in Figuur 36.



*Figuur 36. De blauwe stippen geven inzicht in de verhouding tussen assimilaten-aanbod en assimilaten-benutting en de blauwe lijn is het voortschrijdend gemiddelde. Een waarde groter dan 1 (op de meest rechtse as) betekent dat er meer assimilaten worden aangemaakt dan er nodig zijn voor de groei van de verschillende sinks en een waarde kleiner dan 1 betekent dat er een tekort is. Een goede operationele situatie is een balans tussen 1.3 en 0.7. De gekleurde vlakken geven de dagelijkse lichthoeveelheden in mol per dag: daglicht beige, SON-T geel en LED roze. De verdamping is in grijs-blauw weergegeven (liter/dag).*

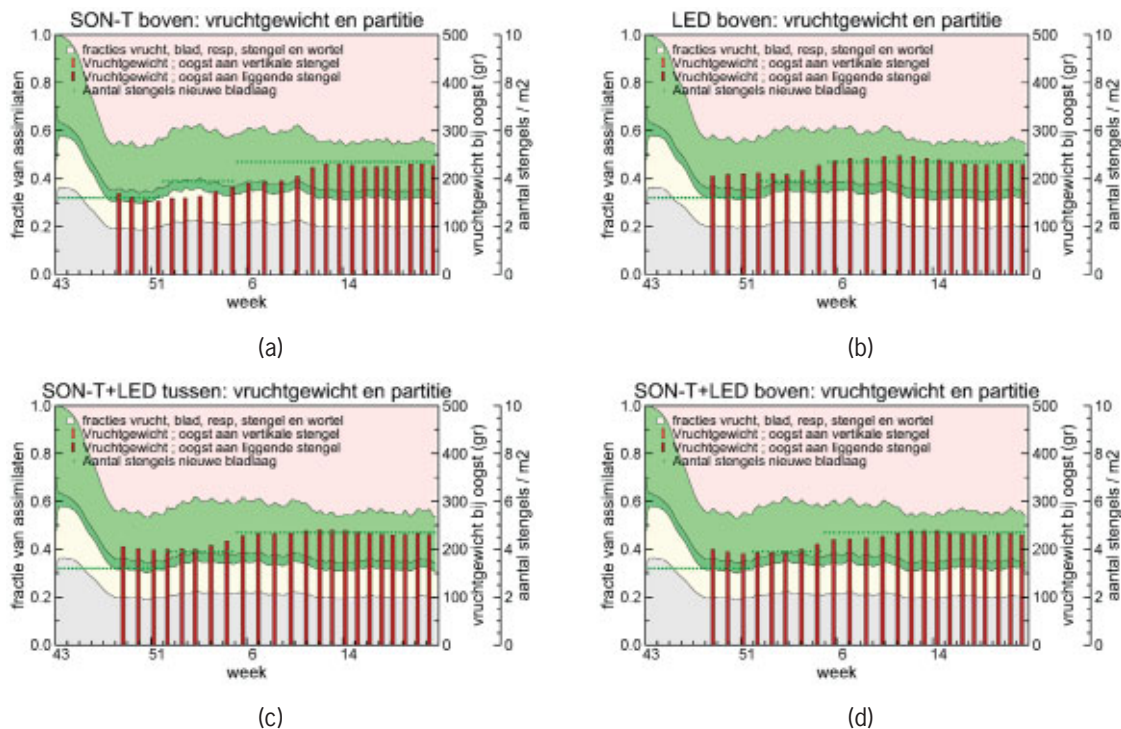
De sinkregulatie van de vruchten is voor tomaat erg belangrijk. De vruchten krijgen in het model potentiële groeimogelijkheden toegewezen, die afhankelijk zijn van het ras, de temperatuur en het ontwikkelingsstadium van de tros. De assimilaten worden vervolgens verdeeld naar rato van de berekende sink per tros. Er worden dus 2 variabelen berekend: (1) de potentiële sink-afhankelijke vruchtgroei en (2) de gerealiseerde vruchtgroei. Op die manier is het mogelijk om op elk moment te bepalen of het gewas sink- dan wel source-gelimiteerd is. Opvallend is de relatief lage vruchtgroei (rode lijn in Figuur 36) in de laatste weken van 2010, vooral in vergelijking met de LED-bovenbehandeling. Dit is het gevolg van een positief effect van een lagere temperatuur van de kop op de vruchtzetting in de LED-behandeling. In Figuur 36 wordt verder de source-sink verhouding aangegeven met blauwe punten voor iedere dag en met een blauwe lijn als voortschrijdend weekgemiddelde. De blauwe lijn geeft inzicht in de verhouding tussen assimilaten-aanbod en assimilatenbenutting. Een waarde groter dan 1 (op de meest rechtse as) betekent dat er meer assimilaten worden aangemaakt dan er nodig zijn voor de groei van de verschillende sinks en een waarde kleiner dan 1 betekent dat er een tekort is. Een optimale situatie is een balans tussen 1.3 en 0.7. In alle behandelingen is er sprake van een vrijwel ideale balans.



Figuur 37. SON-T boven (a) LED boven (b), 50-50 LED tussen (c) 50-50 LED boven (d). Analyse van gemeten en gesimuleerde temperatuurverdeling in het gewas. De gele lijnen geven de dagelijkse spreiding van de berekende bladtemperatuur van de bovenste bladeren. De paarse lijn is de gemeten kasttemperatuur en de lichtbruine lijn representeert de waarde van de infrarood bladthermometer, die meet op een positie van 50-100 cm onder de kop. De gesimuleerde temperatuur van de kop van de plant is met een donkerbruine lijn en de temperatuur van de onderste bladlagen met een blauwgekleurde lijn aangegeven.

De gemiddelde dagelijkse temperaturen, zowel gemeten als gesimuleerd zijn opgenomen in Figuur 37. De berekende temperaturen komen bijzonder goed overeen met de gemeten waarden behalve de berekende temperatuur van het topblad (bruine lijn) in de SON-T behandeling (Figuur 37a). Die is ongeveer 1-2 graden hoger dan de gemeten bladtemperatuur. De temperatuurmetingen in de SON-T behandeling werden echter vrij diep in het gewas verricht en dat verklaart de lagere temperatuur omdat de SON-T vooral de kop van de plant opwarmt. Ook de lagere bladlagen worden in de SON-T behandeling meer opgewarmd door de relatief lage extinctie van NIR maar dit effect werd gecompenseerd door meer buisverwarming in de LED-behandelingen. Afgezien van deze waarneming is er een buitengewoon grote gelijkenis tussen de verschillende behandelingen. Het is dan ook niet verwonderlijk dat de gesimuleerde oogsten bij een beurtelingse uitwisseling met alle afzonderlijke klimaatdata steeds ongeveer dezelfde opbrengsten sorteren (Tabel 17).





Figuur 38. Assimilatenverdeling als fractie van het totale aanbod voor de 3 behandelingen. De figuur geeft de fractie van assimilaten die aan wortel (grijs), stengel (lichtgroen), blad (groen) en vrucht (rood) worden toebedeeld. De histogrammen geven het gesimuleerde trossgewicht bij oogst.

Wat is de consequentie wanneer we de kooptemperatuur verkeerd meten of berekenen? Voor zover we nu kunnen overzien hebben bladafsplittingsnelheid en snelheid van vruchtuitgroei ongeveer dezelfde temperatuurbehoefte. Beiden worden in gelijke mate beïnvloed door temperatuur maar dat gebeurt wel op 2 verschillende plaatsen; onderin en aan de top. Een relatief lage temperatuur onder in het gewas vertraagt de vruchtuitgroei (hogere plantbelasting). Het wordt echter pas echt een probleem als dat gepaard gaat met een relatief hoge kooptemperatuur waardoor de bladafsplitting (=trosvorming) nog eens voor extra sinks zorgt en de plantbelasting verder doet toenemen. Bovendien ontstaan er dan teveel vruchten die met elkaar concurreren waardoor het trossgewicht lager worden. Een dergelijke situatie doet zich voor bij hoge straling. Verschillen van 3 graden zijn daarbij heel normaal. Dit verschil wordt niet veroorzaakt door een slechte verdamping van het gewas want de geleidbaarheid van de huidmondjes was hoog: tussen 200 en 340  $\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ .<sup>2</sup>

Voor deze teelt gold op basis van gevoeligheidsanalyses dat een hogere luchttemperatuur van de kop een iets lagere productie oplevert. De verschillen tussen de behandelingen worden marginaal groter naarmate de lichtintensiteit lager is.

Een hogere luchttemperatuur onderin het gewas heeft (voor sunstream) een positief effect. De interacties zijn complex, maar in eerste instantie zien we een verhoging van de sink activiteit, wat positief is, en later een verlaging als gevolg van de versnelde afrijping in de eerste periode.

De hogere inschatting van de kooptemperatuur in de SON-T behandeling kan een reden zijn van de lager gesimuleerde opbrengsten.

<sup>2</sup> De geleidbaarheid van de huidmondjes varieert tussen een minimum van 0  $\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  en een maximum van 400  $\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ .



De fracties van de aangemaakte assimilaten die aan wortel (grijs), stengel (lichtgroen), blad (groen) en vrucht (rood) worden toebedeeld zijn weergegeven in Figuur 38. De histogrammen geven het gesimuleerde gemiddelde trossgewicht. De groene stippellijn geeft het aantal stengels per m<sup>2</sup> weer. De voorspelde trossgrootte komt goed overeen met de waarnemingen. In zowel de LED als SON-T zien we rond week 6 het laagste trossgewicht. De LED-behandeling heeft over de hele linie iets zwaardere trossen dan de SON-T behandeling.

In Tabel 16 is de productie zoals die in maart was voorspeld op basis van berekeningen met de weergegevens van 2009 vergeleken met de berekeningen met de actuele weergegevens. In maart was uiteraard nog niet bekend wat voor weer we zouden mogen verwachten. Daarom zijn de voorspellingen voor de daaropvolgende 2 maanden verricht met de klimaatgegevens van 2010 en de kasklimaatinstellingen berekend met Explorer kasklimaat. De afwijkingen variëren tussen 1% en 6%. Hoewel het uiterst speculatief is om deze kleine afwijkingen te verklaren zijn er 2 belangrijke redenen te noemen: 1 de hogere lichtintensiteiten in 2010 waardoor er bij bovenbelichting een hogere productie werd gerealiseerd en 2 de overschatting van de lichtabsorptie bij de tussenbelichting. Bij het tussenbelichten ging meer licht verloren dan aanvankelijk was gepland en hiervoor is in de latere simulaties gecompenseerd.

Tabel 16. *Effect van minder bladpluk op de productie in de verschillende behandelingen.*

	Eindoogst voorspeld in maart klimaat 2009 (kgm <sup>-2</sup> )	Gesimuleerd klimaat 2010 (kgm <sup>-2</sup> )	Vershil (%)
SON-T boven	18.61	19.28	104
LED boven	19.81	20.02	101
50-50 LED tussen	20.92	19.92	95
50-50 LED boven	20.88	19.65	94

## 7.2 Kruistesten met klimaatgegevens

Een bijzonder krachtig onderdeel van de Optomaat Explorer is de mogelijkheid om simulaties te verrichten waarbij invoergegevens worden uitgewisseld tussen behandelingen. Bijvoorbeeld een LED-behandeling doorrekenen met een SON-T klimaat. Deze exercitie is weergegeven in Tabel 17 waarbij elke set kasklimaatdata is toegepast op alle behandelingen. Dat geeft 16 combinaties. Op die manier kan worden getoetst in welke mate de belichtingsinstallatie, dan wel het daarbij behorende microklimaat bij heeft gedragen aan de verschillen. In dit experiment waren beiden van geringe betekenis. De meest ongunstige combinatie was een LED tussen klimaat met een SON-T bovenbelichting. De gunstigste combinatie was een LED boven klimaat met een LED tussen behandeling. De verschillen zijn in dit geval te gering om er een betrouwbare analyse te wijden.

Tabel 17. Productie van de vier behandelingen, telkens berekend met alle vier de kasklimaat data van iedere individuele behandeling (in  $\text{kg m}^{-2}$ ) tot 1 juni 2010. Het percentage heeft betrekking op de oogst in de SON-T behandeling, gesimuleerd met het klimaat van de SON-T behandeling.

Klimaat	Behandeling	Oogst gesimuleerd ( $\text{kgm}^{-2}$ )	% tov SON T (%)
SON-T	SON-T boven	19.28	100
SON-T	LED boven	20.02	104
SON-T	50-50 LED tussen	19.92	103
SON-T	50-50 LED boven	19.65	102
LED boven	SON-T boven	19.10	99
LED boven	LED boven	20.46	106
LED boven	50-50 LED tussen	20.61	107
LED boven	50-50 LED boven	20.33	105
50-50 LED tussen	SON-T boven	18.86	98
50-50 LED tussen	LED boven	20.19	105
50-50 LED tussen	50-50 LED tussen	20.09	104
50-50 LED tussen	50-50 LED boven	20.08	104
50-50 LED boven	SON-T boven	19.47	101
50-50 LED boven	LED boven	19.97	104
50-50 LED boven	50-50 LED tussen	19.85	103
50-50 LED boven	50-50 LED boven	20.08	104

Om deze analyses correct te interpreteren is het belangrijk te weten dat er in alle behandelingen met de gemeten luchttemperatuur (op 1 enkele positie) is gewerkt. Het berekende effect heeft dus alleen betrekking op de gesimuleerde opwarming van de bladeren ten opzichte van die gemeten waarde. In werkelijkheid zal ook de luchttemperatuur beïnvloed worden maar dat is hier buiten beschouwing gelaten. Door de betrekkelijk lage lichtintensiteit zijn de effecten waarschijnlijk ook klein maar het verdient aanbeveling om voor dit soort experimenten in meer detail metingen te verrichten.

NIR effecten dragen voor de planttemperatuur veel minder bij dan tot nu toe werd aangenomen. Een zeer groot deel van de energie wordt via de verdamping omgezet in latente warmte.

### 7.3 Effect bladaantal

In Tabel 18 is een berekening uitgevoerd om het effect van extra bladeren op de opbrengst te laten zien. Wanneer 2 extra bladeren worden aangehouden is bij bovenbelichting een winst van 3-5% te realiseren en bij tussenbelichting 8%.

Tabel 18. Effect van minder bladpluk op de productie in de verschillende behandelingen.

	Oogst ( $\text{kgm}^{-2}$ )	Oogst met extra blad ( $\text{kgm}^{-2}$ )	Toename (%)
SON-T boven	19.28	20.34	105
LED boven	20.02	20.58	103
50-50 LED tussen	19.92	21.53	108
50-50 LED boven	19.65	20.17	103



## 8 Conclusies scenario analyses

De studie onderschrijft de resultaten in eerdere studies (Nederhoff *et al.*, 2010; Schapendonk *et al.*, 2010; Pot *et al.*, 2010).

- LED belichting resulteert in zowel metingen als berekeningen bij het ras Sunstream in een lagere opbrengst tov SON-T.
- De negatieve effecten zijn waarschijnlijk veroorzaakt door relatief hoge lichtverliezen in de LED-behandeling door lichtverstrooiing buiten het gewas en het feit dat Sunstream een ras is dat sink-gelimiteerd is. Een source-gelimiteerd ras als Komeett profiteert meer van tussenbelichting dan een sink-gelimiteerd ras (Figuur 32). Wanneer de lichtverliezen geminimaliseerd zouden worden, en er sprake zou zijn van een source gelimiteerd ras, dan wordt een 8-15% hogere productie berekend voor de LED tussenbelichting (Proef Dekker).
- Effecten van de temperatuurverdeling in het gewas heeft op de productie in deze proef volgens de berekeningen slechts een kleine bijdrage geleverd. Uit de berekeningen blijkt dat de wat lagere kooptemperatuur in de LED-behandeling minder dan 30% van het opbrengstverschil verklaart.
- Wanneer LED's goed zijn ingepast in de teelt zijn vergelijkbare opbrengsten te realiseren als met SON-T. De meerwaarde van LED's voor de tomatenteelt komt pas tot uiting als de lichtbenutting efficiëntie die van SON-T overtreft. Dat is nog niet het geval.

Wanneer we LED's niet alleen zien als een afzonderlijk gegeven maar beschouwen als onderdeel van een nieuw te formuleren teelt management zijn er perspectieven om de warmtebelasting in de kas te verminderen. We zien daarnaast mogelijkheden voor een specifieke stimulering van nieuwe sinks of het tegengaan van veroudering met belichting die in het gewas is gepositioneerd.



## 9 Referenties

Hogewoning, S., 2010.

On the photosynthetic and developmental responses of leaves to the spectral composition of light. Thesis p. 218.

Nederhoff, E., P. de Boer, A. Schapendonk, S. Pot & T. Dueck, 2010.

Tomaten telen onder LED-belichting in de praktijk. Rapport 286, Wageningen UR Glastuinbouw, 104 blz.

Pot, S., G. Trouwborst & A. Schapendonk, 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.

Schapendonk, A., S. Pot, G. Trouwborst & K. Rappoldt, 2010.

Hybride belichting bij tomaat; perspectieven voor het nieuwe telen. Verslagen Productschap Tuinbouw en Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit. In kader van Kas als Energiebron PT13416, 39.

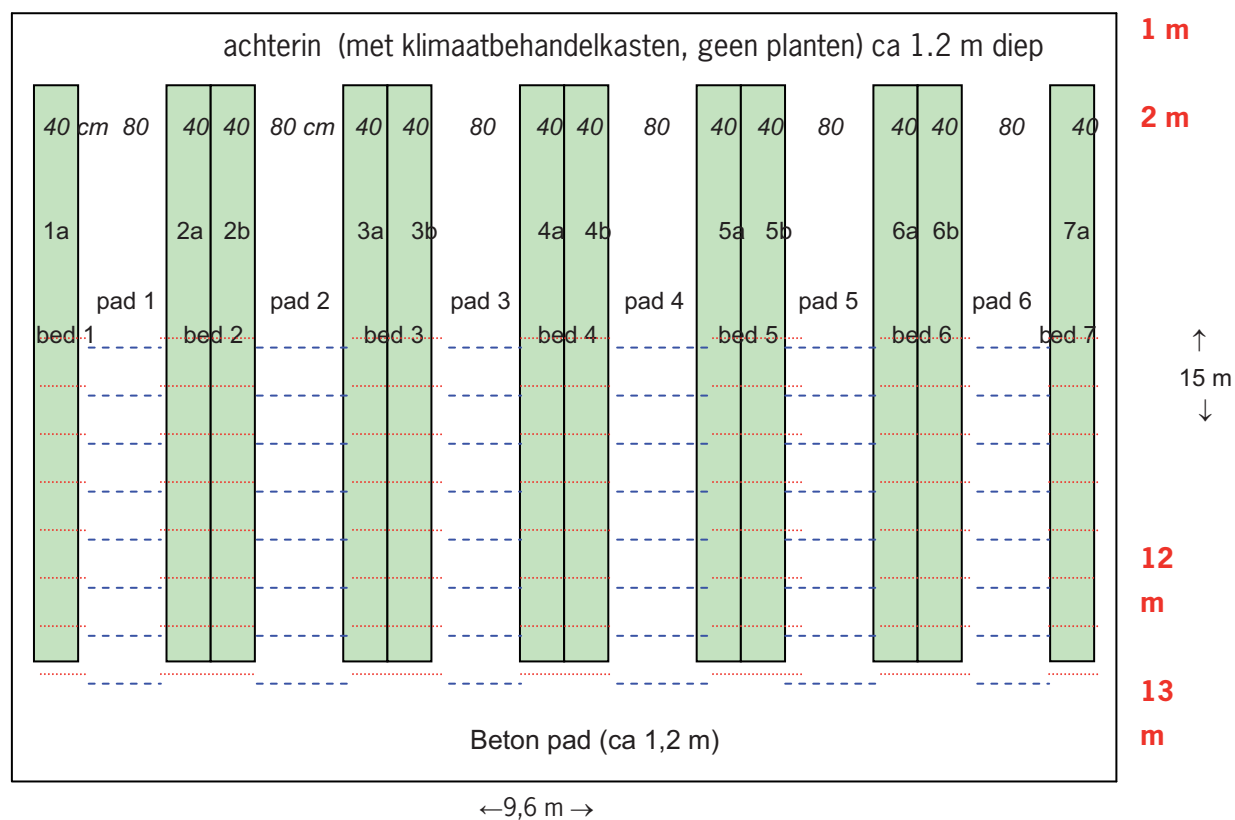
Trouwborst, G., J. Oosterkamp, S.W. Hogewoning, J. Harbinson & W. van Ieperen, 2010.

The responses of light interception, photosynthesis and fruit yield of cucumber to LED-lighting within the canopy. *Physiol. Plant.* 138, 289-300.



## Bijlage I.

### Schema van kas en belichting



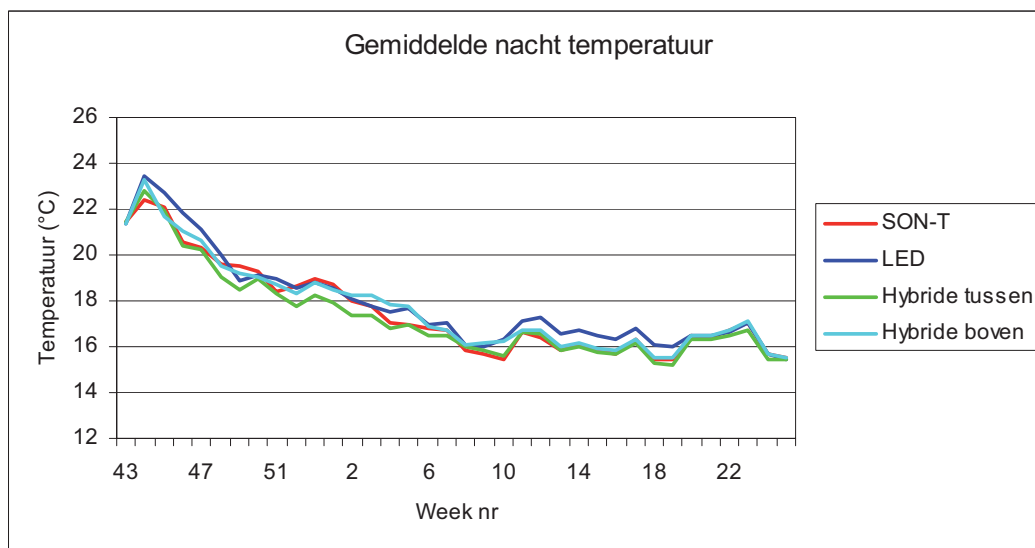
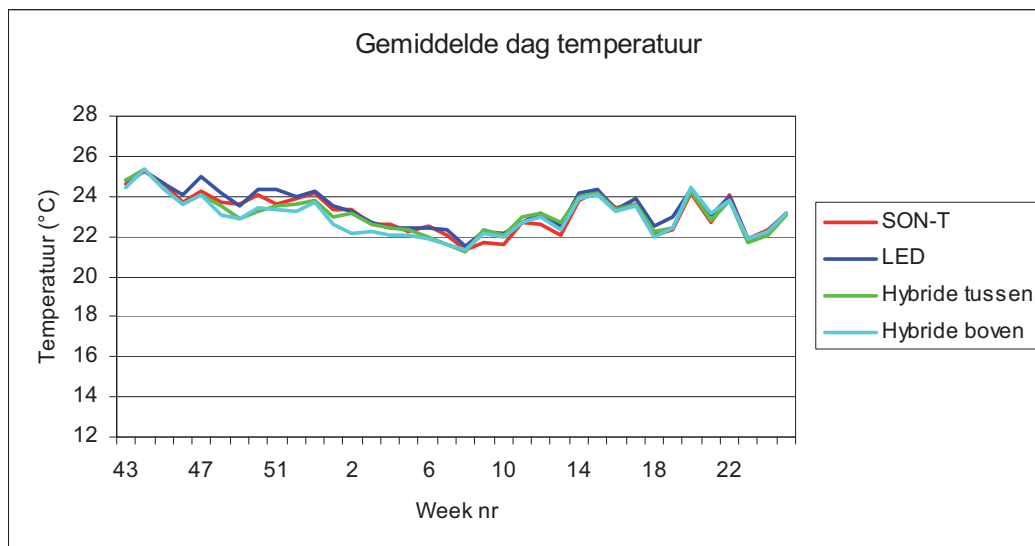
Meetplaatsen in de proefkassen (bovenaanzicht, niet op schaal. Groene vlakken zijn gewasrijen. Rode en blauwe stippellijnen zijn plaatsen voor lichtmeting met de LiCor line sensor, op onderlinge afstand van 1 m. De meetplaatsen zijn alleen ingetekend voor de helft van de kas, maar de hele kas is gemeten. Rechts in rode cijfers staat de afstand in meters vanaf de achtergevel. Op 13.5 m is op de rand van het gewas en betonpad, en op 1 m is buiten het gewas.





## Bijlage II.

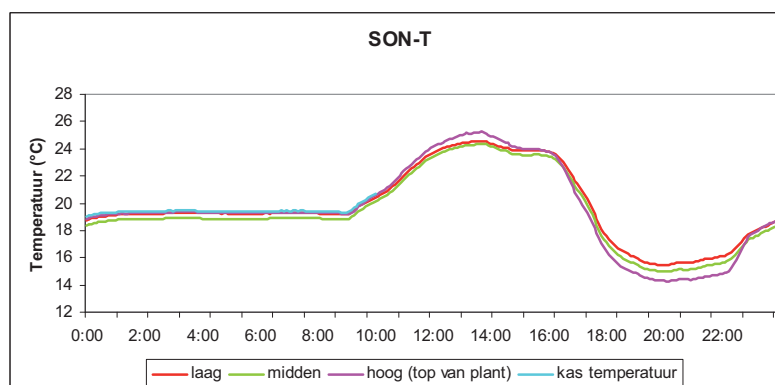
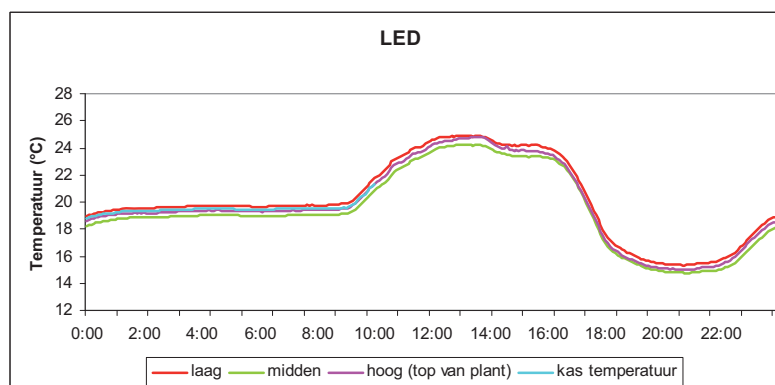
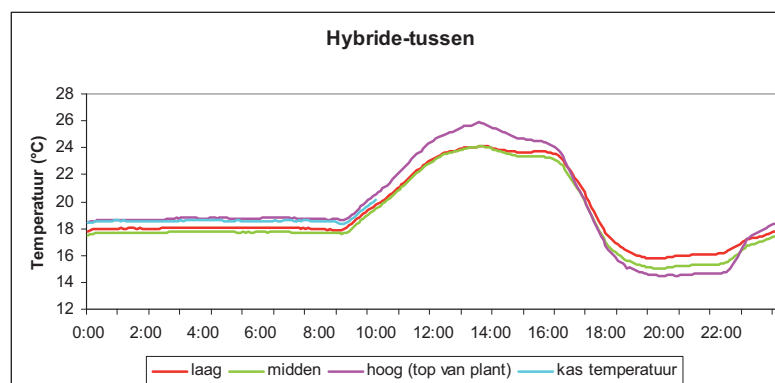
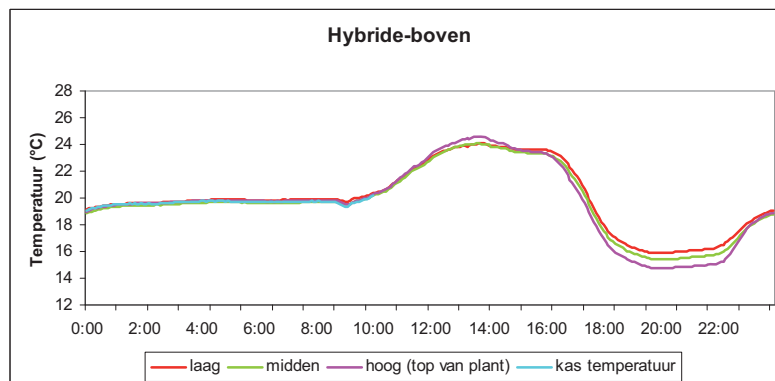
### Dag- en nachttemperatuur





## Bijlage III.

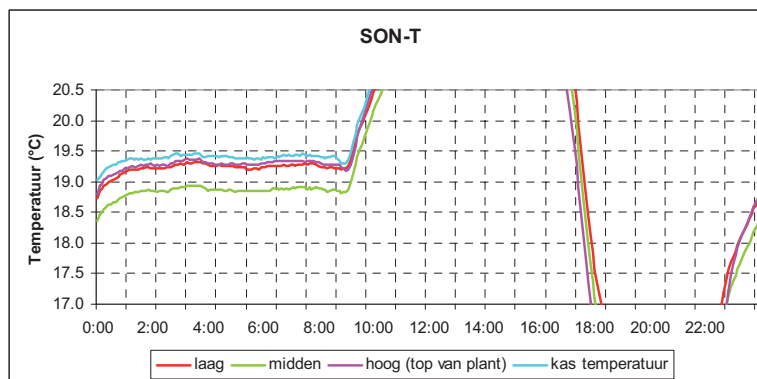
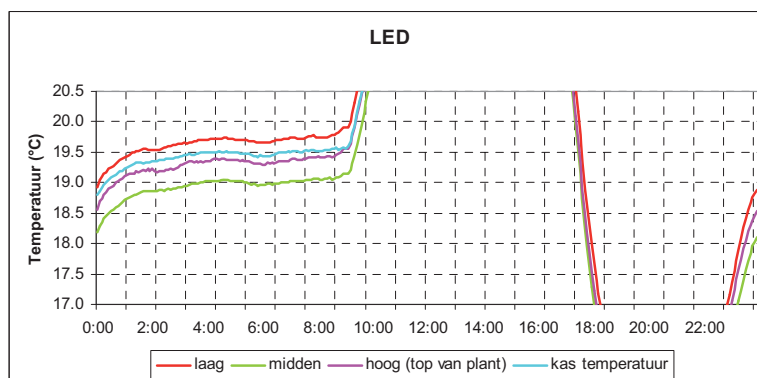
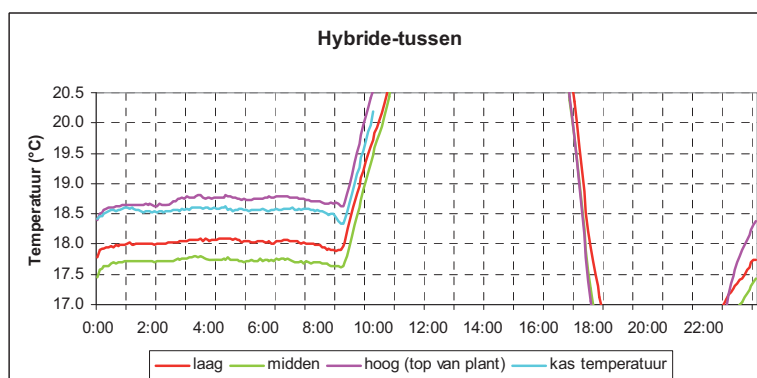
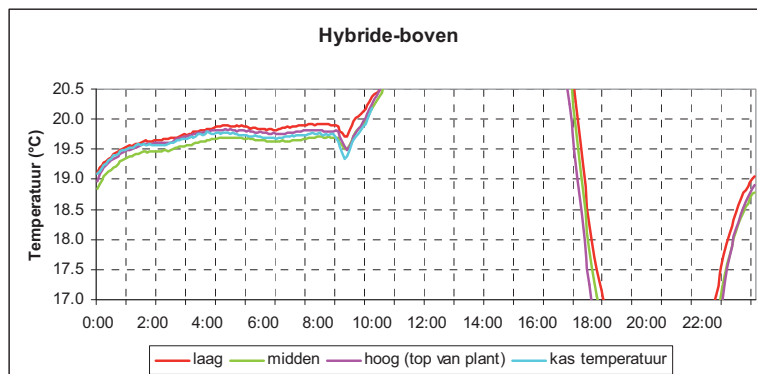
# Verticale kasluchttemperatuur I





## Bijlage IV.

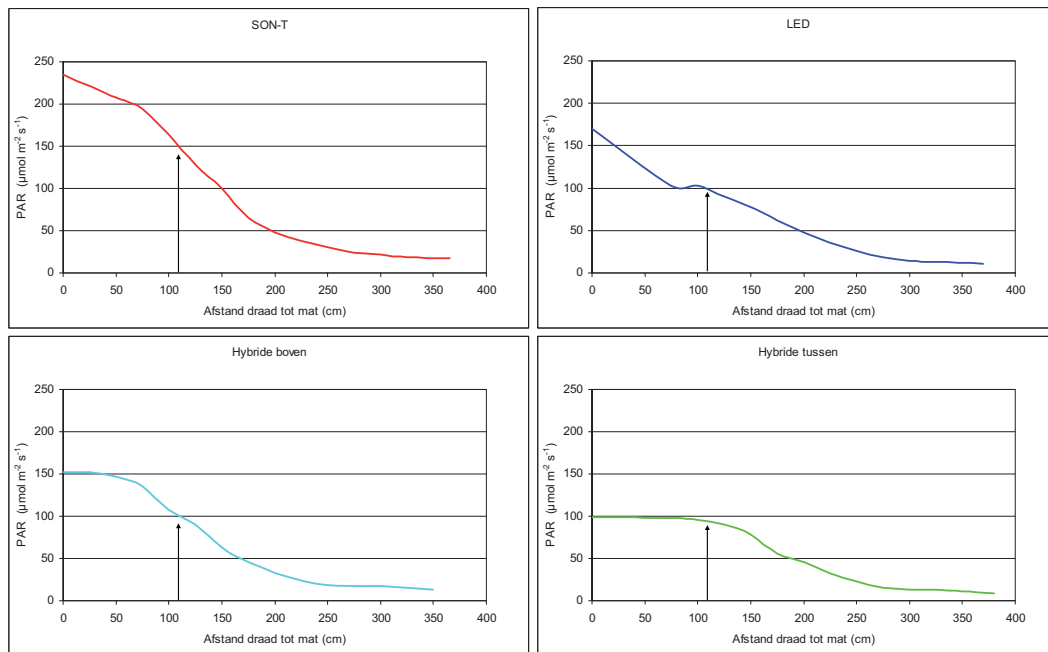
### Verticale kasluchttemperatuur II





## Bijlage V.

### Lichtonderschepping door het gewas

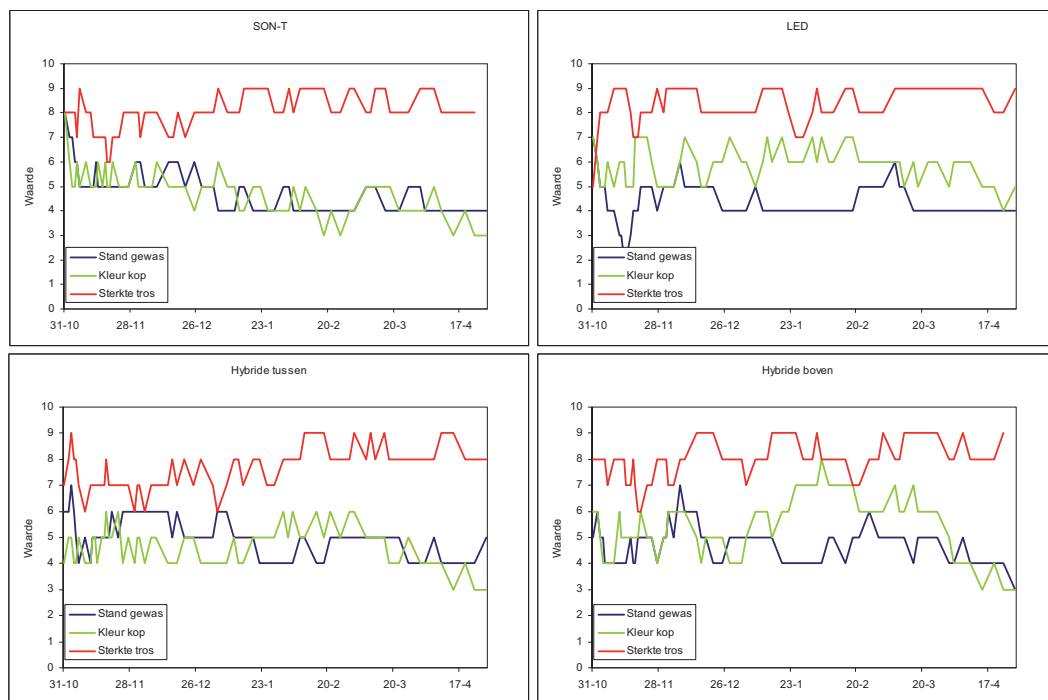






# Bijlage VI.

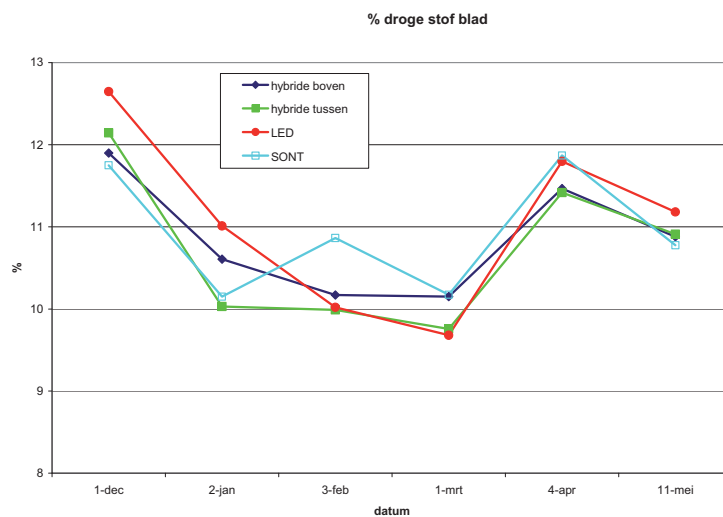
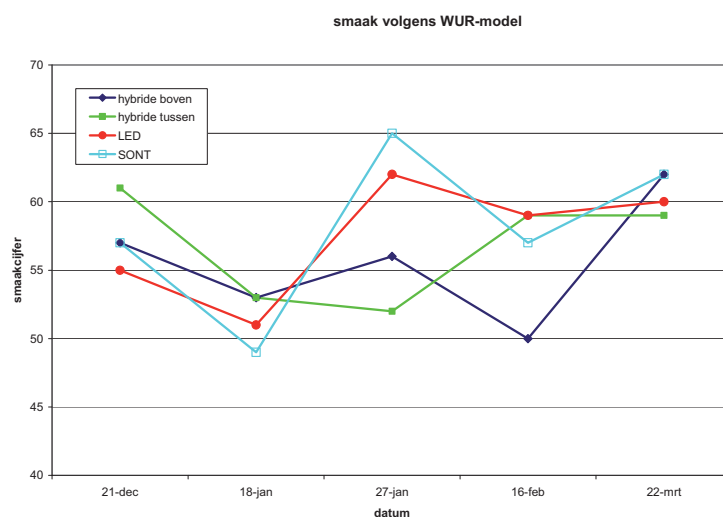
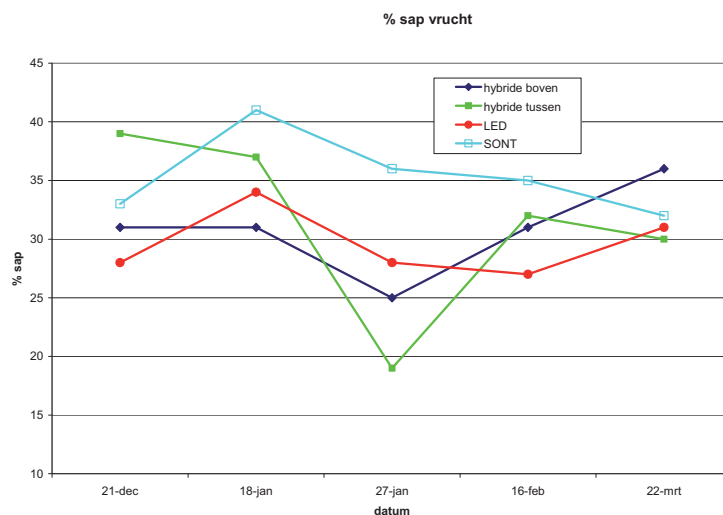
## Plantwaarnemingen per behandeling





# Bijlage VII.

## Vruchtkwaliteit parameters







Productschap



Tuinbouw



Ministerie van Economische Zaken  
Landbouw en innovatie



Projectnummer: 3242080509 | PT nummer: 13841