

LED tussenbelichting in tomatenteelt

Praktijkonderzoek bij Dekker Glascultures



Augustus 2010

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

LED tussenbelichting in tomatenteelt

Praktijkonderzoek bij Dekker Glascultures

Augustus 2010

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

Plant Dynamics B.V.
Englaan 8
6703 EW Wageningen
www.plant-dynamics.nl
info@plant-dynamics.nl
06-21983129

REFERAAT

C.S. Pot, G. Trouwborst en A.H.C.M Schapendonk, 2010. LED tussenbelichting in tomatenteelt. Praktijkonderzoek bij Dekker Glascultures. Plant Dynamics B.V., Wageningen. 32p.

Dit onderzoek is uitgevoerd op verzoek van de tuinbouwsector en is gefinancierd door het Productschap Tuinbouw (PT) en het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (LNV) in het kader van het programma "Kas als energiebron" transitiepad "licht".

PT projectnummer: 13840

© 2010 Wageningen, Plant Dynamics B.V.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Plant Dynamics B.V. of opdrachtgever.

Plant Dynamics B.V. is niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen die kunnen ontstaan

Inhoudsopgave

INHOUDSOPGAVE	4
FINANCIERS EN SAMENWERKENDE PARTIJEN	5
SAMENVATTING	6
VOORWOORD	7
1 INLEIDING EN PROBLEEMSTELLING	8
2 OPZET EXPERIMENT	9
2.1 Experimentgegevens en behandelingen	9
2.2 Verloop stengeldichtheid	10
2.3 Uitgevoerde metingen	11
3 RESULTATEN EN DISCUSSIE	12
3.1 Karakterisering LED systemen en SON-T	12
3.2 Klimaatomstandigheden gedurende het experiment en algemeen teeltverloop	12
3.3 Gewasregistratie	15
3.4 Gewasfysiologische metingen	16
3.5 Bladrand	18
3.6 Oogstregistratie	19
3.7 Systeemrendement belichtingsystemen	21
4 ERVARINGEN VAN DE TELER	22
5 SCENARIOSTUDIES EXPLORER-MODEL	23
6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	25
7 REFERENTIES	27
8 BIJLAGEN	28

Financiers en samenwerkende partijen

Dit project is mogelijk gemaakt door de volgende financiers en samenwerkende partijen:



En is mede mogelijk gemaakt door een bijdrage uit het Europees Fonds voor Regionale Ontwikkeling in het kader van OP Zuid.

Samenvatting

In de hele maatschappij zijn toepassingen van LED-belichting in opmars, zo ook in de glastuinbouw. De verwachting is dat dit leidt tot energiebesparing in vergelijking met de tot dusver toegepaste lichttechnologieën. Om dit te onderzoeken hebben Philips, Plant Dynamics en Dekker glascultures een experiment opgezet om LED-belichting gedurende het belichtingsseizoen 09/10 in de praktijk te testen.

De proefopzet werd gefinancierd door Philips, Lights Interaction Agro en Van der Laan met ondersteuning van OP Zuid. Dekker Glascultures stelden hun kas en gewas beschikbaar en verzorgden de oogstregistraties en gewaswaarnemingen. Het experiment werd begeleid door Plant Dynamics, gefinancierd door PT en LNV, in het kader van het programma “Kas als energiebron”, transitiepad “licht”.

In dit experiment is een vergelijking gemaakt tussen twee hybride top- en tussenbelichtingsbehandelingen ten opzichte van twee controles (100% en 150% SON-T topbelichting). De 100% SON-T controle had hetzelfde niveau SON-T toplicht als de hybride behandelingen (en dus een lagere lichtsom) en bij de 150% SON-T controle was het lichtniveau zodanig verhoogd dat de lichtsom gelijk was met die van de hybride behandelingen. Gedurende het experiment werd de plantontwikkeling en de productie gevolgd, tevens werden er aanvullende gewasfysiologische metingen gedaan.

Ondanks het feit dat de LED tussenbelichting maar 12-14% van de gehele PARsom uitmaakte nam de totale lichtbenutting en productie van de hybride behandelingen toe met 7-8% ten opzichte van de 150% SON-T behandeling. Mechanistisch kon via het Optomaat Explorer model deze toename in productie verklaard worden door:

- de verhoogde lichtabsorptie van het gewas (verkleining van lichtverliezen)
- én door een verhoging van de fotosynthese-efficiëntie op bladniveau door de homogenere lichtverdeling.

Beide factoren zijn toe te wijzen aan de positie van het licht (tussenbelichting) en niet aan spectrale effecten van de belichting zelf.

Verschillen in lucht en planttemperatuur en zo ook in plantontwikkeling waren zeer beperkt tussen de behandelingen. Er werd een iets lagere stengeldichtheid aangehouden voor de 100% SON-T behandeling. Bij de LED tussenbelichtingsbehandelingen trad er minder bladrand op en tevens had de tussenbelichting een positief effect op de vermindering van de vervolgschade.

Doordat het rendement van de LED generatie 2009/2010 vergelijkbaar is met een nieuw conventioneel SON-T 600W/400V systeem, kan er een energiebesparing van minimaal 7% worden gerealiseerd.

Voorwoord

In de hele maatschappij zijn toepassingen van LED-belichting in opmars, zo ook in de glastuinbouw. De verwachting is dat dit leidt tot energiebesparing in vergelijking met de tot dusver toegepaste lichttechnologieën. In een aantal toepassingen in de tuinbouw is nu al een sterke energiebesparing mogelijk ten opzichte van traditionele belichting (bijv. meerlagenteelt met TL). Echter voor belichting in de kas zullen de eerste toepassingen van LED belichting niet een 1 op 1 vervanging van SON-T zijn. Voor tuinders zijn er simpel gezegd 3 dingen belangrijk bij belichting: Wat kost het, wat verbruikt het en wat levert het op in mijn gewas. Het energieverbruik kan door LED's te gebruiken minder zijn, de aanschaf is echter nog steeds een heel stuk hoger. Dat gat kan gedicht worden door op een goede manier gebruik te maken van de extra voordelen van LED's zoals lichtspectrum, vormfactor en gemis aan warmtestraling. Dit biedt veel mogelijkheden en kansen om extra waarde in de teelt te creëren (onder andere snellere en of hogere productie, betere kwaliteit, energiebesparing, ruimtebesparing etc.). Het vergt wel een andere manier van telen.

In het belichtingsseizoen van 2008/2009 zijn er positieve resultaten behaald bij Dekker glascultures te Wervershoof met hybride belichting (SON-T topbelichting in combinatie met tussenbelichting met LED). Intussen is er door Philips een nieuwe LED-module ontworpen die energie-efficiënter is en een verbeterde lichtverdeling geeft. Dit rapport betreft de beschrijving van het vervollexperiment in het belichtingsseizoen 2009/2010. In dit experiment is opnieuw standaard topbelichting vergeleken met een combinatie van top- en tussenbelichting en is er een vergelijking gemaakt tussen het oude en het nieuwe LED-systeem. De proefopzet is gefinancierd door Philips, Lights Interaction Agro, Van der Laan met ondersteuning van OP Zuid. Dekker Glascultures stelden hun kas en gewas beschikbaar en verzorgden de oogregistraties. Het experiment werd begeleid door Plant Dynamics, gefinancierd door PT en LNV in het kader van het programma "Kas als energiebron", transitiepad "licht".

We willen de volgende personen vooral bedanken voor hun betrokkenheid bij het experiment: Frank Dekker van Dekker glascultures, Esther van Echtelt, Christina Tanase en Udo van Slooten van Philips, Jeroen Wiggers van Van der Laan en Peter Hendrix van Lights Interaction Agro BV.

1 Inleiding en probleemstelling

Bijbelichting in de tuinbouw is een belangrijke kostenpost maar levert ook de mogelijkheid om jaarrond goede kwaliteit producten te leveren. Een belangrijke doelstelling van PT en LNV is om het absolute energieverbruik en het energieverbruik per kilo product terug te dringen. Dit levert de teler geld op in de portemonnee en het milieu wordt minder belast.

Met tussenbelichting kan er in theorie efficiënter worden belicht door:

- Reductie van lichtverliezen door beter lichtabsorptie door het gewas (minder lichtverliezen)
- Verbeterde fotosynthese-efficiëntie door een homogenere aanbieding van het licht in het gewas

Door tussenbelichting stijgt de energie-efficiëntie en kan de teler een keuze maken voor meer kilo product met een gelijkblijvend lichtniveau of voor eenzelfde productie met minder energie.

Philips, Lights Interaction, Van der Laan, Dekker Glascultures en Plant Dynamics hebben in het belichtingsseizoen 2008/2009 een praktijkexperiment gedaan met LED's als tussenbelichting in combinatie met SON-T als topbelichting. In dit belichtingsseizoen werd met LED tussenbelichting een 15% hogere opbrengst gerealiseerd ten opzichte van een standaard controle. De focus lag op de lichtbehandelingen en niet zozeer op de techniek. De ervaring die is opgedaan heeft geleid tot productontwikkeling op efficiency, materiaalgebruik en lichttechniek. Analyse met het rekenprogramma Optomaat Explorer gaf een verwachte opbrengstverhoging aan van 22% door optimalisatie van de source/sinkbalans van de plant (via stengeldichtheid en trosgrootte) (Pot en Schapendonk 2009). De doelstelling van onderhavig onderzoek was om met de verbeterde techniek (hogere efficiency en betere lichtverdeling) en het optimaliseren van de positionering van de LED's binnen het gewas dat berekende hoge niveau te realiseren.

De aanvullingen ten opzichte van de opzet voor 2008-2009 zijn:

Een geheel vernieuwde LED installatie voor tussenbelichting waarin de tekortkomingen van het seizoen 08/09 zijn opgelost. Dit zou moeten resulteren in een meer diffuse lichtverdeling en minder lichtinterceptie door de armaturen.

Toepassing van LED tussenbelichting naast de bestaande SON-T belichting zodat de totale lichtintensiteit verhoogd werd van 110 naar 170 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$.

Een intensieve analyse van de resultaten met Explorer toemaat.

Meer aandacht voor de warmtebalans en huidmondjesgedrag van het gewas.

Stengeldichtheid als belangrijke factor.

Het teeltmodel Optomaat Explorer is ingezet om inzicht te krijgen hoe de productiever verschillen tot stand komen en konden worden geoptimaliseerd t.o.v. seizoen 2008/2009 en om tot eventuele aanpassingen in teeltmaatregelen te komen. Omdat dit een praktijkproef betreft, moeten de aanpassingen uiteraard wel passen binnen de visie van de teler. De nadruk ligt op de invloed van het klimaat en lichtverdeling op de productie en daaraan gekoppeld een optimalisatie van de stengeldichtheid/plantbelasting per behandeling. Op deze manier ontstaat een gerichte toepassing van opgedane kennis, welke ook kan worden toegepast in andere teelten, zoals komkommer en paprika.

De doelstelling van het onderzoek was het behalen van 20% meerproductie door tussenbelichting ten opzichte van een controle met eenzelfde lighthoeveelheid door:

- Verhogen van de lichtbenutting door een gelijkmatigere lichtverdeling over het gewas;
- Optimalisatie source/sink (stengeldichtheid/plantbelasting) en aantal bladeren per plant;
- Minimaal lichtverlies (minder reflectie of transmissie van het groeilicht uit het gewas).

2 Opzet experiment

2.1 Experimentgegevens en behandelingen

Dit experiment is uitgevoerd met het ras Komeett. Komeet is een vrij grove trostomaat. De planten werden geënt op een Maxifort onderstam en er werd geteeld op houtvezelmatten. In Tabel 1 is de startsituatie weergegeven.

Tabel 1. Startsituatie planten

Ras:	Komeett
Zaaidatum:	22-9-2009
Plantdatum:	18-11-2009
getopt geënt:	ja
aantal st/m ²	1.67
Onderstam:	Maxifort

Op grond van de resultaten met tussenbelichting bij Dekker Glascultures in het belichtingsseizoen 2008/2009 is er voor het belichtingsseizoen 2009/2010 gekozen voor vier behandelingen. De eerste twee zijn behandelingen met toplicht op twee niveaus (110 en 170 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) de derde behandeling was een kleine wijziging van de meest succesvolle behandeling van het seizoen 08/09. Het toplichtniveau bleef deze keer op 110 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ en er werd 60 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ LED toegevoegd. De vierde behandeling was een nieuw ontwikkeld LED-systeem door Philips (generatie 2009), waar tekortkomingen van het oude systeem (gewicht van de module, energie-efficiëntie en lichtverdeling) verbeterd zijn (Tabel 2). De LED modules gaven 87% rood en 13% blauw licht. Het geïnstalleerd vermogen van het nieuwe LED systeem is gehalveerd, met een iets lager gerealiseerd lichtniveau ten opzichte van het oude LED systeem.

Tabel 2. Behandelingen in het experiment

	SON-T ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)	LED ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)	Totaal ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)
SON-T 100%*	111.5 (81 W/m ²)	0	111.5 (81 W/m ²)
SON-T 150%*	173 (126 W/m ²)	0	173 (126 W/m ²)
SON-T 100% + verticale LEDs (oude systeem, generatie 2008)	111.5 (81 W/m ²)	62.5 (65 W/m ²)	174 (146 W/m ²)
SON-T 100% + horizontale LEDs (nieuwe systeem, generatie 2009)	111.5 (81 W/m ²)	52 (33 W/m ²)	163.5 (114 W/m ²)

*Meting 17 november 2009 en controle meting half januari 2010. Tot half januari was het lichtniveau bij de SON-T 150% 149 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ en is door indraaien van nieuwe lampen verhoogd naar de beoogde 173 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$.

De SON-T bovenbelichting werd gestart op 21 november, de LED-belichting werd gestart op 12 december toen de kop van het gewas ruim boven de LED-modules uitstak. Omdat Dekker Glascultures ook contractueel aan het net levert zijn de belichtingsuren niet alleen afhankelijk van de natuurlijke lichtinstraling maar ook van de prijs van de elektra. In principe werd er in het weekeinde 18 uur belicht (23:00 – 17:00 uur) en op werkdagen 9 uur belicht (23:00 – 8:00 uur). Het totaal aantal uren belicht was 1672 voor SON-T en voor de LED behandelingen 1488 uren.

Doordat de LED-belichting 20 dagen later werd gestart, kreeg de 150% SON-T behandeling een kleine voorsprong in lichtsom. Dit verschil werd gecompenseerd door het initieel lagere lichtniveau van de 150% SON-T ($149 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) pas half januari op te schroeven naar het beoogde niveau van $173 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (zie Tabel 2).

In Fig. 1 is de plattegrond van de behandelingen weergegeven: Iedere behandeling was uitgezet in drie dubbele rijen planten waarbinnen zich twee telpaden bevonden. In deze twee paden werden alle metingen (zie H3.3) gedaan. Tussen iedere behandeling waren twee dubbele plantrijen als buffer aanwezig. De tussenbelichting die twee kanten op belichtte, was in de V van de drie

		rij	
hoofdped	K a p 6	30	Buffer rij / stengeldichtheid standaard
		29	Controle1 / stengeldichtheid standaard
		28	Controle1 / stengeldichtheid standaard
		27	Controle1 / stengeldichtheid standaard
		26	Buffer rij / stengeldichtheid standaard
	K a p 5	25	Buffer rij / stengeldichtheid standaard
		24	TB1 / stengeldichtheid standaard
		23	TB1 / stengeldichtheid standaard
		22	TB1 / stengeldichtheid standaard
		21	Buffer rij / stengeldichtheid standaard
	K a p 4	20	Buffer rij / stengeldichtheid standaard
		19	TB2 / stengeldichtheid standaard
		18	TB2 / stengeldichtheid standaard
		17	TB2 / stengeldichtheid standaard
		16	Buffer rij / stengeldichtheid standaard
	K a p 3	15	Buffer rij / stengeldichtheid standaard
		14	Controle2 / stengeldichtheid standaard
		13	Controle2 / stengeldichtheid standaard
		12	Controle2 / stengeldichtheid standaard
		11	Buffer rij / stengeldichtheid standaard
		rij	

achtereenvolgende dubbele rijen aangebracht.

Fig. 1. Plattegrond van de vier behandelingen; controle1 = topbelichting met 100% SON-T; TB1 = tussenbelichting met LED verticaal; TB2 = tussenbelichting met LED horizontaal; controle2 = topbelichting met 150% SON-T.

2.2 Verloop stengeldichtheid

Gedurende de teelt zijn er praktijkconforme aanpassingen gedaan aan de stengeldichtheid. Het verloop wordt in Tabel 3 weergegeven.

Tabel 3. Verloop van de stengeldichtheid gedurende het experiment.

	100% SON-T	150% SON-T	LED-hor	LED-vert
	111.5	173	163.5	174
	$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$	$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$	$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$	$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$
week47 (start 18-11)	1.67	1.67	1.67	1.67
week 51	2.5	2.5	2.5	2.5
week 3	2.5	3.3	3.3	3.3
week 4	3.3	3.3	3.3	3.3
week 7	3.3	3.55	3.55	3.55

In week 7 stond het gewas er erg sterk op. Er waren twee opties om hier profijt uit te verkrijgen: 1) stengeldichtheid vervoegd verhogen of 2) de tros grootte aanpassen. Het verschil tussen beide maatregelen zit in snelheid van reactie. Vergroting van de trossen geeft een sneller resultaat (8 weken) terwijl het resultaat voor een extra stengel ongeveer pas na 11 weken bereikt wordt. Tevens heeft het verhogen van de stengeldichtheid een permanent karakter omdat tros grootte in geval van nood gemakkelijk weer naar beneden bijgesteld kan worden. In overleg met Dekker is besloten de 2 telpaden van de drie behandelingen met het hoge lichtniveau op te splitsen: in het eerste telpad is de tros grootte van 5 naar 6 gegaan. In het tweede telpad is de stengeldichtheid naar 3.8 gegaan. Gemiddeld kwam dit uit op 3.55 stengels per vierkante meter.

Vergeleken met het tussenbelichtingsexperiment bij Dekker in het seizoen 08/09 is er geen verschil in stengeldichtheid tussen de controle (150% SON-T) en de LED-behandelingen. De gehanteerde stengeldichtheden in dit experiment waren ongeveer gelijk met die voor de LED-tussenbelichting gedurende het seizoen 08/09, maar fors hoger dan de standaard controle in dat seizoen (Pot en Schapendonk, 2009). Dit verklaart mogelijk dat we toen grotere effecten vonden met de modelberekeningen: een iets hogere LAI in de tussenbelichting als gevolg van een stimulering van de bladoppervlakte groei heeft dan namelijk grote effecten.

Gewas- en kilogramregistratie zijn tot eind mei vervolgd.

2.3 Uitgevoerde metingen

In Tabel 4 zijn de uitgevoerde werkzaamheden gedurende de looptijd van het experiment weergegeven.

Tabel 4. Uitgevoerde metingen.

<p>Wekelijkse oogstregistratie (wegen van de totale oogst van de telpaden en circa acht dozen (1:6) per behandeling om gemiddeld vruchtgewicht te bepalen)</p> <p>Wekelijkse gewasregistratie van de vier behandelingen (kopdikte, plantbelasting, aantal bladeren en lengte blad)</p> <p>Lichtmetingen aan LED en SON-T</p> <p>Doormeten van veroudering LED-systemen</p> <p>Fotosynthese metingen op verschillende gewashoogtes met de Li-6400</p> <p>Geleidbaarheidsmetingen op verschillende gewashoogtes met de porometer</p> <p>Luchttemperatuur op verschillende gewashoogtes (Wysensis)</p> <p>Bladtemperatuur (infrarood thermometer)</p> <p>Vruchtuitgroeiduur en % Drogestof van vruchten en bladeren voor parametrisatie van het Explorer model</p>

3 Resultaten en discussie

3.1 Karakterisering LED systemen en SON-T

Over het algemeen liggen de verliezen van SON-T-licht buiten de verliezen aan de reflector om (10%) in de orde van 10-15%. Ongeveer 6% verdwijnt via gewasreflectie uit de kas (Goudriaan en van Laar, 1994) en 5-10% zijn verliezen door het gewas heen naar de bodem die afhankelijk zijn van het totale bladoppervlak (LAI) van het gewas (Monsi en Saeki, 2005). Gedurende het experiment zijn er lichtmetingen uitgevoerd (met gewas) om de opgetreden lichtverliezen van het oude en het nieuwe LED-systeem te kwantificeren. Verliezen van de LED-belichting naar kasdek en naar de grond bedroegen in totaal ongeveer 5%. Fig. 2 suggereert dat de totale lichthoeveelheid van de verticale LEDs veel hoger is, dit wordt echter veroorzaakt doordat de verticale LED-systemen 'high power' LED's en de horizontale LED-systemen 'low power' LED's bevatten. Licht dat zijwaarts uittreedt in het pad wordt weer door de daarop volgende plantrij geabsorbeerd.

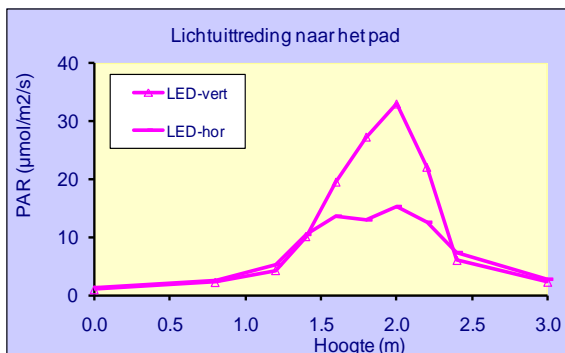


Fig. 2: lichtuittrekking van LED-belichting naar het pad bij de verschillende behandelingen. De metingen zijn uitgevoerd bij volgroeid gewas, waarbij een deel van het licht dus wordt geabsorbeerd door de gewasrij. Licht uittrekkend op gewashoogte 0.0 en 3.0 in Fig. 2B kunnen als verliesposten naar de grond en de lucht worden beschouwd (gemeten door Philips begin januari 2010).

De temperatuur van de LED-systemen werd ten hoogste 40°C.

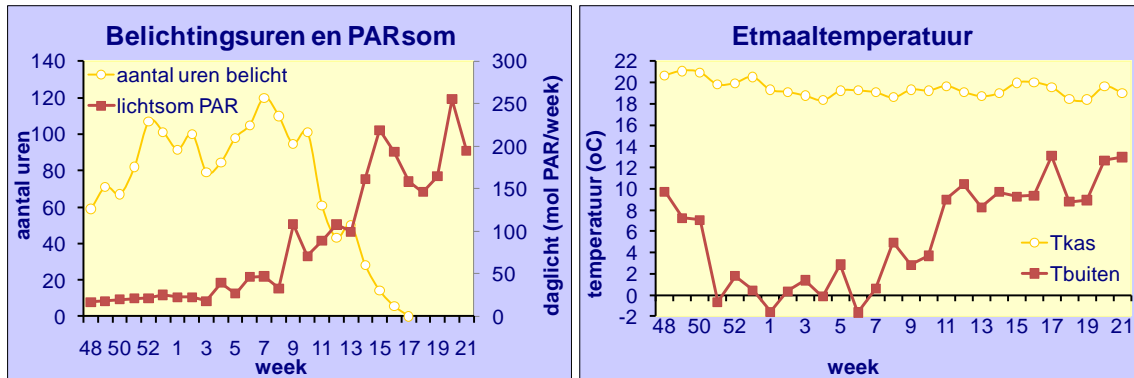
3.2 Klimaatomstandigheden gedurende het experiment en algemeen teeltverloop

De teelt is goed verlopen. Er had niet veel scherper geteeld kunnen worden (paragraaf 5). Rond half februari werd bladrand een probleem. Als de bladrand goed indroogt dan blijft de schade beperkt tot verlies in bladoppervlak en wegvangen van licht door het verdroogde blad. Echter als het niet goed indroogt maar gaat verslijmen dan kan dit een invalspoort voor botrytis betekenen. Dit is ook gebeurd. In paragraaf 4.5 wordt het effect van bladrand binnen de verschillende behandelingen besproken. Blad krul is een ander veel voorkomend verschijnsel dat negatieve effecten heeft op de lichtonderschepping. In het belichtingsseizoen 08/09 werd juist bij de LED belichtingsbehandelingen iets meer bladkrul gesignaleerd (Pot en Schapendonk, 2009). In de hier besproken proef is er geen bladkrul opgetreden. De reden van het wel/niet optreden van bladkrul is onbekend.

Tussen week 48 en week 10 is er veel belicht (Fig. 3). Doordat na week 10 het natuurlijke daglicht fors is gaan toenemen is het aantal belichtingsuren afgebouwd en in week 16 werd er gestopt. Doordat er altijd nog een na-ijleffect van de belichting in de productie gevonden kan worden, is tot week 21 de

productie vervolgd. De gemiddelde etmaaltemperatuur van de kaslucht lag in deze periode tussen de 18.5 en 20.5 °C (Fig. 3).

Fig. 3. Verloop van belichting en temperatuur gedurende het experiment.



Gedurende de periode van half februari tot half maart werd de luchttemperatuur op verschillende hoogtes in het gewas gemeten. Verschillen in luchttemperatuur waren gering tussen de verschillende behandelingen. Ter illustratie is in Fig. 4 de temperatuurverdeling op 19 februari weergegeven. In deze grafieken is de PAR-lijn alleen maar indicatief om te zien of de SON-T lampen aan of uit staan. In de bovenste grafiek is ook de RV weergegeven, deze versilde niet tussen beide topbelichtingniveaus.

Er is op drie hoogten gemeten:

- top gewas (→ 180 cm boven de goot)
- Midden in gewas (midden verticale led module, hoogte horizontale led module) (→ 105 cm boven de goot)
- Vruchthoogte (→ goothoogte)

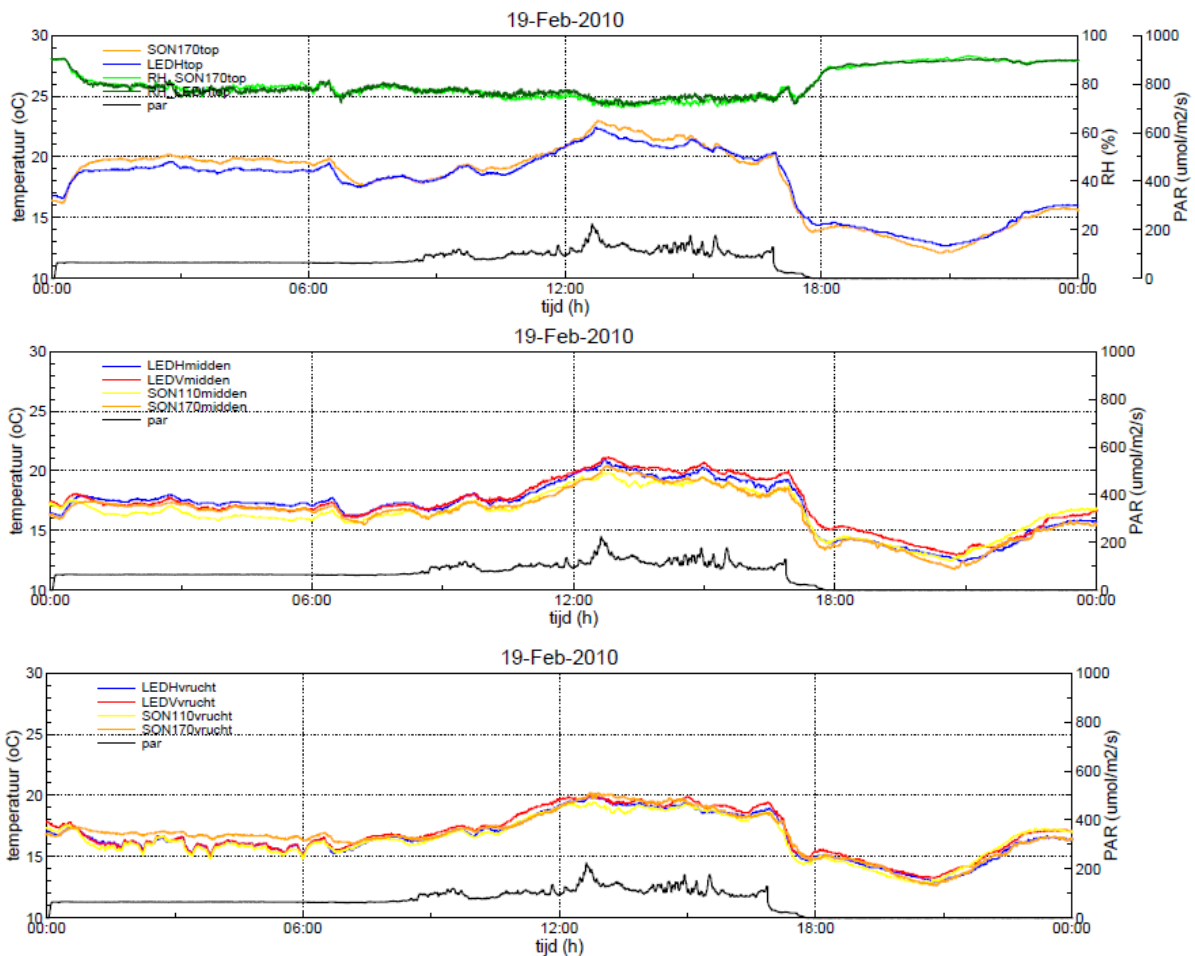


Fig. 4. Luchttemperatuur bij de vier behandelingen op verschillende hoogtes (top midden en laag) in het gewas.

In Tabel 5 is een momentopname weergegeven tussen 1:00 en 5:00 uur om het effect van de belichting weer te geven zonder dat het daglicht daar een rol in speelt. De luchttemperatuur rond de topbladeren van de 150% SON-T behandeling was 0.8 graden hoger dan 100% SON-T in combinatie met LED. De verschillen vielen echter weg als er over een hele periode wordt gemiddeld (Tabel 5).

Tabel 5. Luchttemperaturen gemeten in de plots met pt100 sensoren (Wysensis)

	<i>Momentopname zonder daglicht met belichting aan (19 februari)</i>			<i>Gemiddelde temperatuur in de periode van 16 februari t/m 3 maart 2010</i>		
	Top	midden	onder	top	midden	onder
100% SON-T		16.3	15.9		17.0	16.8
150% SON-T	19.8	17.0	16.8	17.4	16.8	16.9
LED-vert		17.1	16.1		17.6	17.1
LED-hor	19.0	17.5	16.1	17.5	17.5	16.8

3.3 Gewasregistratie

De plantbelasting (aantal vruchten/m² aan de plant) nam tot week 7 voor alle behandelingen sterk toe, daarna is de plantbelasting stabiel op een hoog niveau (Fig. 5). Dit patroon wordt enerzijds veroorzaakt doordat de plant in het begin nog klein is, maar anderzijds doordat de plantbelasting per m² wordt uitgedrukt. Een hogere stengeldichtheid leidt automatisch tot een hogere plantbelasting. Op die manier kan de sink van de plant worden gemanipuleerd. Oorspronkelijk was de bedoeling om in de LED behandelingen een hogere plantbelasting (sink) aan te houden dan in de controles (Pot en Schapendonk, 2009) om optimaal te profiteren van het hogere assimilatenaanbod als gevolg van de tussenbelichting. Dit is echter niet gerealiseerd doordat in week 7 de 150% SON-T behandeling ook sterk stond en Dekker ook met deze behandeling zo optimaal mogelijk wilde telen. Hierdoor stonden uiteindelijk de beide controle behandelingen iets generatiever dan de beide LED-behandelingen (zie paragraaf 5; Ervaringen van de teler).

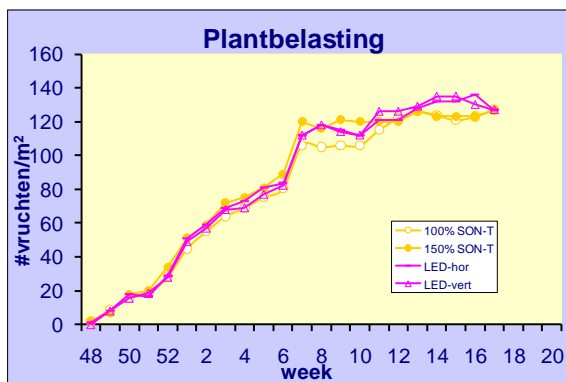


Fig. 5. Plantbelasting per week.

In Fig. 6 zijn een aantal gewasparameters weergegeven. Verschillen in kopdikte en lengtegroei tussen de behandelingen zijn gering. Het aantal bladeren is gedurende week 8-14 wat lager geweest voor de 150% SON-T behandeling doordat er bladrand was opgetreden. In vergelijking met het belichtingsseizoen 08/09 zaten er gedurende dit experiment 15 bladeren aan de plant tegen 12 in het seizoen 08/09 (Pot en Schapendonk, 2009). De bladgrootte verschilde niet tussen de behandelingen.

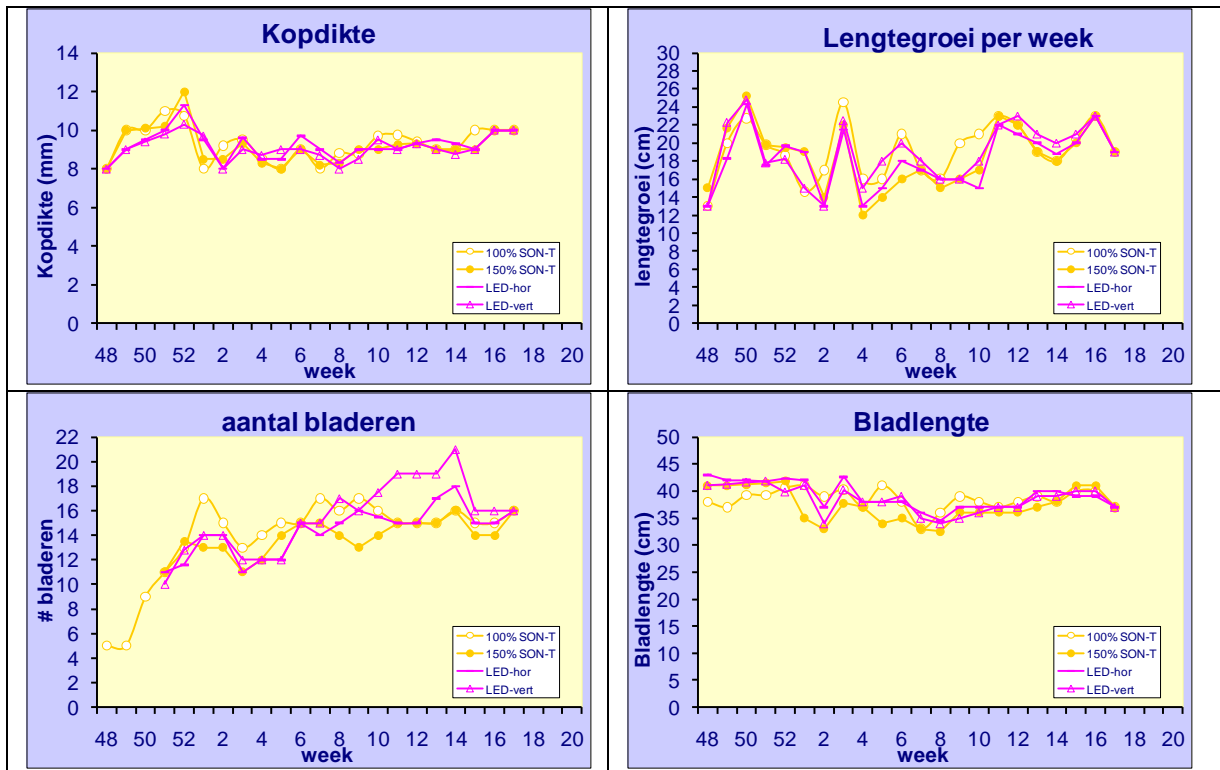


Fig. 6. Gewasparameters: kopdikte, lengtegroei, aantal bladeren en bladlengte per week

3.4 Gewasfysiologische metingen

Ter ondersteuning van de berekeningen met het Explorer-model zijn fotosynthesemetingen in het gewas gedaan met de Licor-6400. De LiCor-6400 kan zodanig geprogrammeerd en gekalibreerd worden dat automatisch in ongeveer 40 minuten een reeks van oplopende lichtintensiteiten op een ingeklemd blad wordt gedoseerd. Na elke stap wordt de actuele fotosynthese van het betreffende blad gemeten. De CO₂ concentratie werd constant gehouden op 1000 ppm. Deze metingen zijn uitgevoerd aan bladeren welke zijn ontwikkeld bij de verschillende behandelingen. Op 13 januari werd een fotosynthesecapaciteit (= maximale fotosynthese bij lichtverzadiging) gemeten die vrij normaal is voor die tijd van het jaar, maar relatief laag vergeleken met wat bij een zomers gewas als normaal kan worden beschouwd. Er was geen verschil in fotosynthesecapaciteit (Fig. 7A) en de helling (Fig. 7B) tussen de topbladeren met 100% SON-T toplicht (111 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) en 150% SON-T toplicht (173 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$).

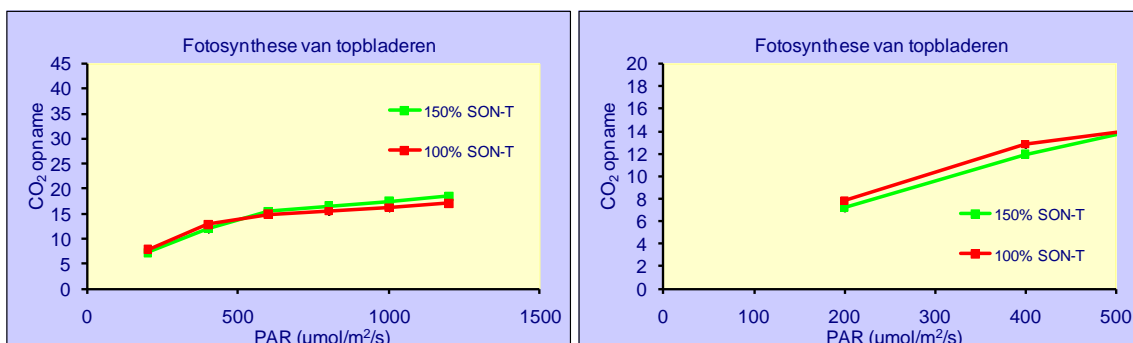


Fig. 7. Fotosynthese-lichtresponse curve van topbladeren (meting op 13 januari 2010). Om de vergelijking met een latere meting te kunnen maken is de verticale as hetzelfde geschaald als in Fig. 8.

Op 25 maart zijn lichtresponse curves van top en middenbladeren bepaald. De week hieraan vooraf gaande was het helder weer met een hoge lichtintensiteit. De topbladeren waren relatief klein en dik, bladeren die bij een zomergewas horen (aanpassing aan hoge lichtniveaus). Inderdaad bereiken ook de bijbehorende fotosynthese-capaciteiten het niveau dat onder zomerse condities gemeten wordt waarbij er geen verschil gemeten werd tussen de beide niveaus tussenbelichting (Fig. 8A). Ook de fotosynthese-capaciteit van de bladeren halverwege het gewas was hoog (Fig. 8B). De fotosynthese bij de lagere lichtniveaus (Fig. 8C) ligt hoger bij de 150%-behandeling terwijl de helling hetzelfde is. Dit heeft te maken met een tijdseffect tussen beide metingen en geeft geen werkelijk verschil aan. De 100% SON-T behandeling is namelijk later op de dag gemeten en dan is (doordat het een heldere dag was) de onderhoudsademhaling van een blad veel groter. De fotosynthese-capaciteit van de middenbladeren bij tussenbelichting was iets hoger dan bij de beide controle behandelingen, maar dit was niet significant (Fig. 8B). Hierbij moet worden opgemerkt dat het eerder opgetreden effect van bladranden in de SON-T behandelingen nog na-ijlde (zie volgende paragraaf). De beide controle behandelingen hadden forse schade van bladrand, doordat veel bladeren gingen verslijmen zijn deze bladeren ter preventie weggesneden. Dit leverde een vrij open gewas op. Hoe opener een gewas hoe meer licht er doordringt in het gewas, hoe hoger de fotosynthese-capaciteit van bladeren dieper in het gewas. De keerzijde van de medaille is dat de lichtverliezen dan fors hoger zijn wat een ongewenste situatie is. Bij de LED-behandelingen was het gewas minder open en kunnen we concluderen dat de hogere fotosynthese-capaciteit van de middenbladeren het gevolg is van de tussenbelichting. Dit is in overeenstemming met de conclusies van het experiment dat bij Dekker in 08/09 is uitgevoerd, (Pot en Schapendonk, 2009) en de fotosynthesemetingen in een komkommernewas met tussenbelichting (Trouwborst et. al. 2010).

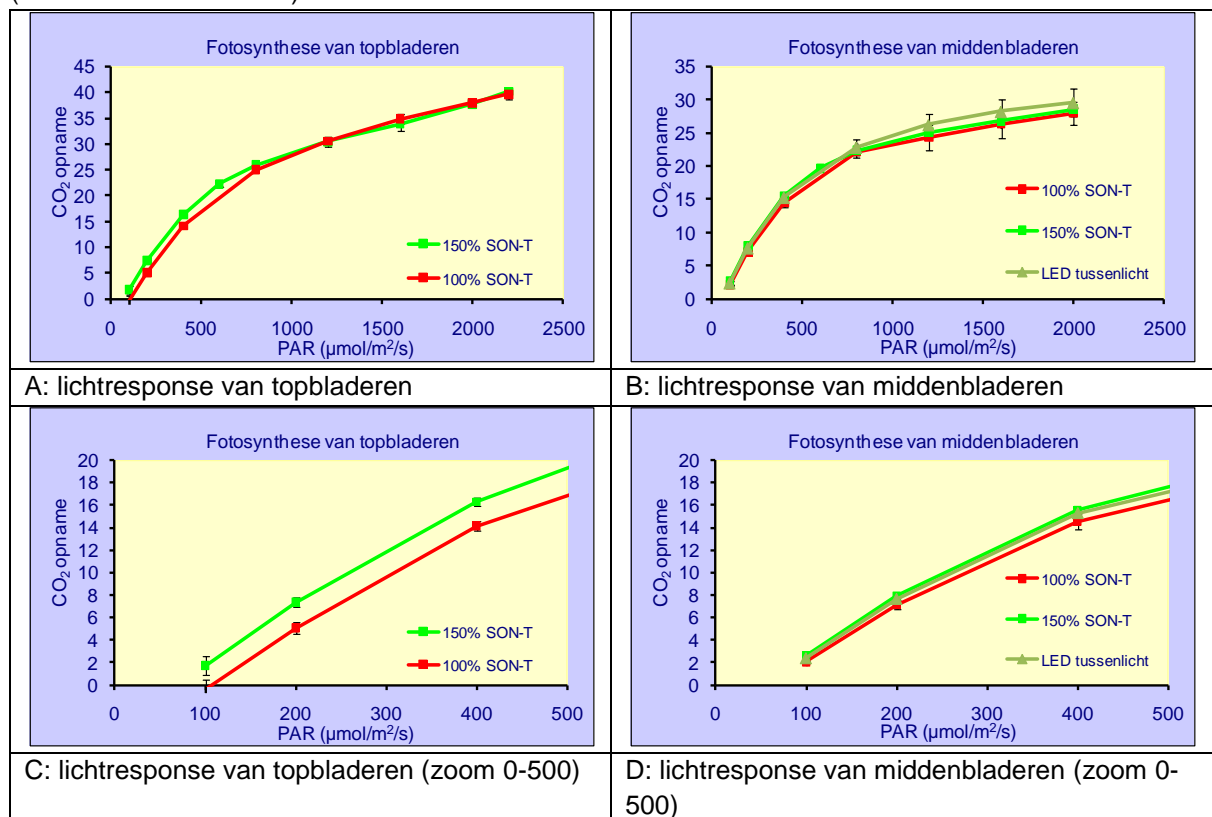


Fig. 8. Fotosynthese-lichtresponse curve van bladeren aan de top en midden in het gewas (meting op 25 maart 2010)

Tijdens alle meetdagen van Plant Dynamics zijn er metingen gedaan met de porometer om de huidmondjesgeleidbaarheid te meten. Het gewas was altijd goed actief en er werden geen significante verschillen in huidmondjesopening tussen de behandelingen gemeten.

3.5 Bladrand

Begin februari was er bladrand opgetreden. In de belichte teelt is dit een bekend probleem, welke waarschijnlijk wordt veroorzaakt door te grote temperatuurschommelingen. De symptomen zijn het indrogen van de bladranden, wat naast directe bladschade problemen kan geven bij verslijming van de bladeren met verhoogde kans op botrytis. Op 25 maart was bladrand zelf nauwelijks meer te zien. Maar doordat er verslijming was opgetreden, werden uiteindelijk bladeren weggesneden. In Fig. 9 is te zien dat vooral de 100% en de 150% SON-T schade hadden opgelopen, waarbij de geïnfecteerde bladeren zijn weggesneden. Bij de LED behandelingen was minder bladrand. De vervolgschade was ook minder, waarschijnlijk door een betere indroging van de bladranden.



Fig. 9. Effecten van bladrand op de verschillende behandelingen (Foto's: Esther van Echtelt, Philips).

3.6 Oogstregistratie

De cumulatieve producties zijn weergegeven in Fig. 6. De beste vergelijking is die tussen de 150% SON-T en de verticale LED behandeling omdat de lichtintensiteit bij deze twee behandelingen gelijk was. Zoals in Tabel 2 aangegeven, was de lichtintensiteit van de horizontale LED's +SON-T 6% lager dan bij de 150% SON-T en de verticale LED behandeling. Om deze reden wordt ook de lichtbenutting (productie per eenheid licht) van alle behandelingen weergegeven (Tabel 6).

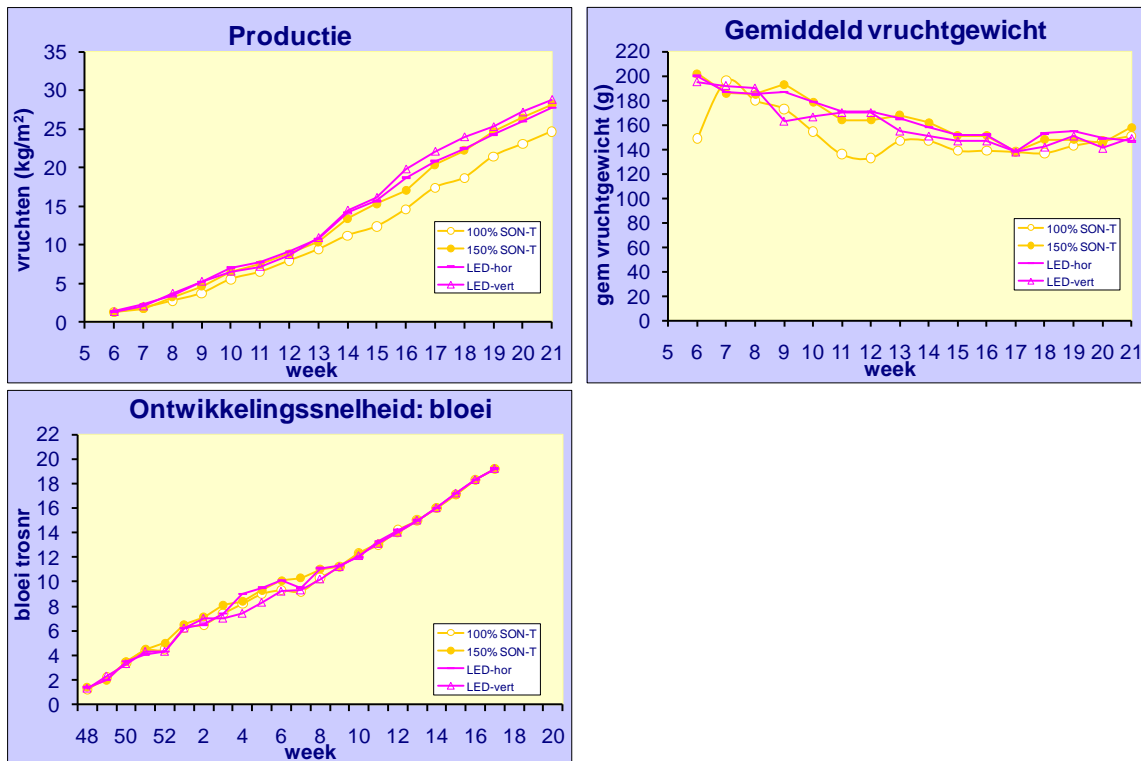


Fig. 10. Cumulatieve oogst, gemiddeld vruchtgewicht gedurende het experiment en de ontwikkelingssnelheid van de plant.

In week 18 (twee weken nadat de belichting was gestopt) was de cumulatieve productie voor de verticale LED behandeling 8% hoger dan de 150% SON-T behandeling (Fig. 10 en tabel 6) en de cumulatieve lichtbenutting ruim 7% hoger dan beide SON-T behandelingen. De ontwikkelingssnelheid van de planten was gelijk en de verschillen in gemiddeld vruchtgewicht tussen de behandelingen waren gering. De productieverhoging is dus veroorzaakt door een groter aantal vruchten. Dit komt gedeeltelijk overeen met resultaten bij Dekker in het belichtingsseizoen 08/09. Hier werd een productiestijging van 15% gerealiseerd door een groter aantal vruchten per vierkante meter door een hogere stengeldichtheid terwijl het gemiddelde vruchtgewicht lager was dan een standaard controle. De productiestijging ten opzichte van een controle met eenzelfde stengeldichtheid als de tussenbelichtingsbehandelingen was vergelijkbaar met de stijging in dit experiment (Pot en Schapendonk, 2009).

In absolute zin heeft de 100% SON-T controle in dit experiment 2.5 kg meer geproduceerd dan de hoogste LED-behandeling in het belichtingsseizoen 08/09. Dit heeft onder andere te maken met ras en klimaatsverschillen, maar heeft ook te maken met de hogere stengeldichtheid en de hogere LAI (meer bladeren per plant en meer stengels).

De hoogste lichtbenutting (gram geoogste tomaat per mol PAR) werd behaald bij de horizontale en de verticale LED behandelingen (Tabel 6). Gemiddeld was de lichtbenutting respectievelijk 6.8% en 8.4%

hoger dan voor de 150% SON-T behandeling. De lichtbenutting van de 100% SON-T behandeling lag over deze weken op ongeveer hetzelfde niveau als de 150% SON-T behandeling. De totale PAR lichtsom was van de drie hoog lichtbehandelingen 13-16% hoger dan de 100% SON-T behandeling. Voor die behandelingen was het % daglicht gedurende de hele periode 62% en 72% voor de 100% SON-T behandeling. Het aandeel LED-tussenbelichting lag tussen de 12-14%.

Tabel 6. Gerealiseerde productie en lichtbenutting tot en met week 18.

	100% SON-T	150% SON-T	LED-hor	LED-vert
	111.5	173	163.5	174
	$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$	$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$	$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$	$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$
Productie (kg/m²)	18.65	22.21	22.45	23.96
Absolute toename t.o.v. 100% SON-T (kg/m²)	0	3.56	3.80	5.31
Procentuele verdeling PAR				
Daglicht	72%	62%	63%	62%
SON-T	28%	38%	25%	24%
LEDlicht	0%	0%	12%	14%
% toename in lichtsom t.o.v. 100% SON-T	0%	15.5%	13.1%	15.8%
Cumulatieve lichtbenutting (gram/mol PAR)	7.03	6.96	7.43	7.55
% toename in lichtbenutting t.o.v. 150% SON-T	0.9%	0.0%	6.8%	8.4%

Een veel gemaakte valkuil in efficiëntieberekeningen is het op grond van tabel 6 concluderen dat LED-licht 25% efficiënter is (met 1/3 aandeel LED licht van het assimilatielicht 8% meer opbrengst) of zelfs 65% efficiënter is (met 1/8 aandeel LED licht ten opzichte van de totale lichtsom 8% meer opbrengst) dan SON-T licht of daglicht. In feite bestaat er een drempel voor de maandelijkse lichtsom waar beneden geen tomatenproductie mogelijk is vanwege onderhoudsprocessen die evenveel kosten als er aan assimilaten wordt geleverd en vanwege het feit dat er een minimale hoeveelheid licht nodig is om een tros te laten ontwikkelen. Wanneer dit drempel effect genegeerd wordt, worden verkeerde conclusies (zoals bovenstaande) getrokken over de efficiëntie van extra licht.

Schapendonk et al. (2010) maken dit drempel effect met het volgende voorbeeld duidelijk: Als met 150 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ assimilatiebelichting twee keer zoveel geoogst wordt als met 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, wil dat niet zeggen dat de fotonen van de laatste 50 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ tweemaal zo efficiënt zijn als de fotonen van de eerste 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Op het eerste gezicht lijkt dat namelijk de meest logische conclusie: met 50% extra licht de productie van bij 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ erbij. De schijnbaar hogere efficiëntie wordt echter veroorzaakt doordat de eerste 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ maar gedeeltelijk heeft bijgedragen aan de productie vanwege de drempeling. Hoe hoger de drempel des te groter de toename in de efficiëntie van het extra licht zal lijken te zijn.

De hier beschreven vergissing wordt nog steeds veel gemaakt en leidt tot grote verwarring in de discussie over belichtingsefficiënties van lampen en armaturen, vooral ook omdat er rasverschillen zijn in de hoogte van de drempeling. Vandaar het belang van een goede theoretische onderbouwing van de hoogte van de drempel waaronder geen productie plaats vindt en die rasset specifiek is (Schapendonk et al., 2010).

3.7 Systeemrendement belichtingsystemen

Bij Dekker Glascultures wordt er een conventioneel SON-T 600W/400V belichtingssysteem gebruikt. Doordat het systeem al enkele jaren in gebruik is, bedraagt de energieconversie van elektriciteit naar PAR-licht momenteel 1.38 $\mu\text{mol}/\text{W}$ (Tabel 6). Dit rendement is nog hoger dan het verticale LED-systeem uit 2008, maar fors lager vergeleken met het horizontale LED-systeem uit 2009 dat een systeemrendement heeft van 1.6 $\mu\text{mol}/\text{W}$ (Tabel 7). Dit betekent dat de elektriciteitskosten (running costs) van het horizontale LED-systeem lager is dan van het conventionele SON-T systeem. Hierbij moeten twee kanttekeningen worden gemaakt: De eerste kanttekening is dat conventionele SON-T systemen een lager systeemrendement hebben dan de nieuwere systemen met elektronische voorschakelapparatuur. Nieuwe SON-T systemen met elektronische voorschakelapparatuur hebben gemiddeld een energieconversie van 1.8 $\mu\text{mol}/\text{W}$. De tweede kanttekening is dat het systeemrendement voor LED-belichting nog sterk stijgend is. Zo is de energieconversie voor de LED-systemen van de generatie 2010 al even hoog als SON-T systemen met elektronische voorschakelapparatuur. Op applicatieniveau zijn er voor de LED-systemen toegepast als tussenbelichting bijna geen verliezen terwijl er voor SON-T systemen er met een minimaal verlies van 9% (aan de reflector) gerekend moet worden.

Tabel 7. Rendement belichtingsystemen.

	<i>PPF</i> <i>$\mu\text{mol}/\text{s}$</i>	<i>W</i> <i>(systeem)</i>	<i>W/m²</i> <i>(geïnstalleerd)</i>	<i>PAR</i> <i>$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$</i>	<i>Rendemen</i> <i>t</i> <i>$\mu\text{mol}/\text{W}$</i>
conventioneel SON-T 600W/400V	1150	670	80.8	138.8	1.72
nieuwwaarde systeem (reflector rendement 0.91)	1046.5	670	80.8	126.3	1.56
gerealiseerd lichtniveau			80.8	111.5*	1.38
LED-vert (systeem 2008)	10	10	65.0	62.5	0.96
LED-hor (systeem 2009)	62.5	40	33.3	53.3	1.6

*verschil t.o.v. nieuwwaarde komt door veroudering van de lampen, vervuiling van de reflector en lichtverliezen in de kas door poten, buizen, kabels etc. Verlies in rendement van het LED-vert (systeem 2008) was 0% (meting Philips eind 2009).

Vergeleken met de 100% SON-T behandeling heeft tussenbelichting met LED-hor 3.8 kg meer geproduceerd. Deze extra productie is gerealiseerd met een extra energie input van $1488\text{h} \cdot 33.3/1000 = 50 \text{ kWh}$.

4 Ervaringen van de teler

1. Wat is je algemene gevoel over de proef?

Positief, duidelijke meerproductie in de vroege kilo's.

Juist plantgesteldheid was in LED veel beter t.o.v. traditioneel 100% SON-T & 150% SON-T (vooral bij laatste gevoeligheid bladrand en botrytis).

2. Welke behandeling vind je visueel beter, LED-vert / LED-hor / 150% SON-T / welke zou je kiezen om mee verder te gaan?

Doorgaan met 150% SON-T is geen optie door de verhoogde ziektedruk. Er was weinig zichtbaar verschil tussen beide LED-behandelingen. LED-vert stond er gewastechnisch iets beter bij.

Waarschijnlijk had dit te maken met betere lichtverdeling (groter deel van de plant). LED-hor was ook goed, maar waarschijnlijk was het licht in het gewas toch te plaatselijk en deze behandeling had ook iets minder licht.

3. In week 11 en 12 duikt de productie van de verticale LED-behandeling onder die van de 150% SON-T, kun je daar nog een reden voor noemen?

Het gewas onder 150% SON-T heeft het heel moeilijk gehad en is daardoor veel generatiever gaan staan ten opzichte van de andere behandelingen. Toch was het gewas wel in staat de vruchten in redelijke kwaliteit 'te brengen'. Waarschijnlijk moet het gewas later wel inleveren. Eigenlijk kun je stellen dat het gewas niet te mooi moet (vegetatief) staan. Generatief is prima, zolang de plant maar niet uit balans gaat en de vruchten er goed afkomen.

4. Wat vond je van het verloop van de stengeldichtheid gedurende de proef?

Na week 7 is geen verhoging in stengeldichtheid meer doorgevoerd. Frank is tevreden over hoe de stengeldichtheid in de proef is gehanteerd (is redelijk optimaal geweest). Achteraf had het moment van verhogen stengeldichtheid steeds 2 weken eerder gekund en mogelijk nog iets verder doorgevoerd kunnen worden, maar dat weet je nooit van te voren.

N.B.: trossnoei begon op 4 vruchten en bij de behandelingen 150% SON-T en LED een deel op 5 en 6 vruchten. 6 vruchten aan een tros is maar heel kort geweest. Dit was geen succes vanwege te lange tijd voor de doorrijping van laatste vrucht.

5 Scenariostudies Explorer-model

Het Explorer-model is ingezet om een duiding te geven van de fysiologische oorzaken en mogelijkheden waarom er een meerproductie met tussenbelichting gerealiseerd kon worden. Met dit model wordt met de onderliggende processen zoals bladfotosynthese, temperatuur, vraag en aanbod van assimilaten (sink-source verhouding) gerekend. Het Explorer-model geeft een goede benadering van de werkelijk gerealiseerde productie (Zie Bijlage met samenvattingen per behandeling). In het model zijn de lichtverliezen van de LED-systemen van 5% verdisconteerd (Fig. 2).

Voor beide tussenbelichtingsbehandelingen is de afwijking tussen de gerealiseerde productie en de berekende productie minimaal (<1%). De berekende productie van de 150% SON-T behandeling wordt 2% onderschat. Vermoedelijk heeft dit te maken met het feit dat dit gewas er generatievler bij stond terwijl dit niet verdisconteerd is in het Explorer-model. Dit is zeker het geval bij de 100% SON-T behandeling die over een aantal weken een stuk lagere source-sink ratio had dan de andere behandelingen (zie Bijlage). Deze impact komt minder tot uiting in de gerealiseerde productie t.o.v. de berekening in het model, waardoor de berekende productie een onderschatting geeft van 7%.

Als alle factoren hetzelfde zijn tussen de behandelingen (zoals trosgrootte, stengeldichtheid, plantbelasting etc.) dan is er bij een ratio 1:2 voor tussenbelichting ten opzichte van topbelichting een toename van ongeveer 7-8% te verwachten. Deze meerproductie kan mechanistisch worden verklaard door de positie van het licht dat tot uiting komt in drie factoren. Ten eerste, verkleining van lichtverliezen van LED-tussenbelichting ten opzichte van SON-T topbelichting. Ten tweede verbetert tussenbelichting de lichtverdeling in het gewas wat de fotosynthese-efficiëntie op bladniveau verhoogd. Ten derde is er een hogere absorptie t.o.v. daglicht (met daaraan gekoppeld een hoger quantum rendement op bladniveau. Op plantniveau is van dit voordeel nauwelijks iets zichtbaar vanwege het feit dat licht wat niet geabsorbeerd wordt in de bovenste bladeren, wel geabsorbeerd wordt in de daaronder gelegen bladeren. Bovenstaande komt overeen met de proef met tussenbelichting in komkommer waarbij ook een ratio van 1:2 in tussenbelichting en topbelichting was aangebracht (Trouwborst et al. 2010 nog niet gepubliceerd).

Zoals in de eerste paragraaf aangegeven, zijn de lichtverliezen van 5% van de LED-systemen verdisconteerd in het model. Als er geen lichtverliezen van de LED-belichting waren opgetreden dan had dit de productie in de eerste weken (met veel belichtingsuren en weinig daglicht) met ongeveer 2.5% kunnen verhogen, later daalt dit percentage naar 1.3% in week 18. Het percentage toename ten opzichte van de 150% SON-T behandeling zou dan kunnen stijgen tot boven de 9%. Lichtverliezen kunnen geminimaliseerd worden door boven en onder de LED-modules genoeg bladeren te laten hangen.

Modelstudie op grond van de resultaten in het belichtingsseizoen 08/09 liet een potentiële productieverhoging door tussenbelichting met 20% zien ten opzichte van de standaard controle (Pot en Schapendonk, 2009). Buiten het feit om dat er met een ander ras is geteeld (cv. Dirk) en de winter 09/10 gepaard ging met extreem lage buitentemperaturen kan het verschil tussen beide proeven verklaard worden door:

- In het 08/09-experiment had de standaard controle een lagere stengeldichtheid dan de tussenbelichtings-behandelingen (Pot en Schapendonk, 2009).
- Er veel blad werd geplukt in het belichtingsseizoen 08/09. Gemiddeld hingen er vaak maar 12 bladeren in tegenstelling tot de ongeveer 15 bladeren in het huidige experiment. Gecombineerd met de lagere stengeldichtheid van de standaard controle was de LAI laag. Verhoging van de stengeldichtheid bij tussenbelichting gaf een hogere LAI, wat een forse verbetering in lichtonderschepping gaf (van zowel daglicht en toplicht) en zo in de productie. In het huidige

experiment was de LAI een stuk hoger (beter) met geen tot gering verschil tussen de controle en de behandelingen met tussenbelichting.

6 Conclusies en aanbevelingen

1. Tussenbelichting met een gelijke lichtsom als de controle had een positief effect op de totale productie en totale lichtbenutting van 7-8%. Het aandeel LED-belichting op de totale PARsom lag op 12-14%.
Via het Optomaat Explorer-model kan deze meerproductie mechanistisch verklaard worden door:
 - a. de verhoogde lichtabsorptie van het gewas (verkleining lichtverliezen)
 - b. én door een verhoging van de fotosynthese-efficiëntie op bladniveau door de homogenere lichtverdeling
2. Beide factoren zijn toe te wijzen aan de positie van het licht (tussenbelichting) en niet aan spectrale effecten.
3. Over het algemeen is er geteeld op het scherp van de snede. Gezien het feit dat er relatief veel schade was door bladrand en daarop volgende botrytisinfecties bij de beide controle behandelingen hebben deze behandelingen mogelijk iets té zwaar gestaan.
4. Bij tussenbelichting was er minder bladrand en minder vervolgschade (botrytis) aanwezig.
5. De doelstelling om een productieverhoging van 20% te realiseren is niet gehaald. Deze doelstelling was gebaseerd op grond van de resultaten in het belichtingsseizoen 08/09. Het verschil tussen beide proeven kan verklaard worden door de grote verschillen in LAI. In het huidige experiment was de LAI een stuk hoger (optimaler) met geen tot gering verschil tussen de controle en de behandelingen met tussenbelichting. Deze situatie geeft een realistischer beeld van de te verwachten productieverhoging met 1:2 tussenbelichting/topbelichting, welke uitkomt op 7-8%.
6. Het horizontale LED-systeem (systeem 2009) heeft een vergelijkbaar systeemrendement als een nieuw conventioneel SON-T 600W 400V systeem. Doordat het systeem bij Dekker Glascultures al enkele jaren oud was, was de energie-efficiëntie van de horizontale LED-behandeling het hoogst.

Blijvende aandachtspunten en discussie voor tussenbelichting met LED's bij tomaat:

1. Een minimale dosis blauw licht is nodig. In het belichtingsexperiment Bij Dekker in 2008/2009 werden er minder positieve resultaten met 100% rood licht behaald (Pot en Schapendonk, 2009). Bij 100% rood licht zonder daglicht overleven de planten het niet (WU-TPK, niet gepubliceerd). In een experiment met komkommer zonder daglicht is aangetoond dat er een minimale hoeveelheid blauw licht (of van daglicht of van de lampen) nodig is om schade aan het fotosynthese-apparaat te voorkomen (Hogewoning et al. 2010).
2. Positionering van de LED modules moet zo geoptimaliseerd worden om lichtuittrekking naar de bodem en naar het kasdek te minimaliseren. Berekeningen met het Explorer-model geven aan dat hier een productiewinst van tussen de 1.5% en 2.5% te behalen is.
3. Met tussenbelichting moet zoveel mogelijk afstand van de bladeren gehouden worden om een homogenere lichtverdeling te creëren, idealiter komt de lichtintensiteit die op de bladeren valt nergens boven de $100 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ uit. Nu trad er nog steeds plaatselijk bladverbranding op. Het verlies aan bladoppervlak is weliswaar minimaal maar de lichtverliezen worden hierdoor wel groter.
4. De koptemperatuur van de plant blijft een punt van aandacht bij LED-belichting (Trouwborst et al. 2010; WUR, 2010). Door te belichten met SON-T boven het gewas en LED tussen het gewas (hybride belichting) wordt dit probleem voorlopig ondervangen. Huidig onderzoek heeft aangetoond dat de ontwikkelingssnelheid van de planten met tussenbelichting niet lager was dan bij 150% SON-T. Dit opent perspectieven om de topbelichting tot het minimum te reduceren ten gunste van een toename in tussenbelichting.
5. Uit de resultaten komt naar voren dat de productiever verschillen tussen de behandelingen afhankelijk zijn van periode. In week 11/12 is het vruchtgewicht bij 100% SONT lager dan de rest en in week 13/14 zakt de productie van SONT 100% weg. Het ontstane verschil blijft daarna gehandhaafd.

Het effect op productie van de LED's tov 150% SONT doet zich voor (fig 10) vanaf week 15. Na week 18 ebben de verschillen geleidelijk weer weg. Vanaf week 9 gaat de PAR som stijgen door het buitenlicht. De belichtingsduur is vanaf week 10 afgebouwd.

Binnen de begeleidingscommissie riep dit de vraag op wanneer het beste de belichting kan worden afgebouwd, en of de extra belichting niet in week 12 volledig stopgezet hadden kunnen worden (minder kosten en het effect lijkt nihil).

Een antwoord hierop is niet eenvoudig te geven en achteraf oordelen is vaak gemakkelijk. Een spiegeling op dit punt is echter wel leerzaam voor het begrip hoe de teelt uiteindelijk is verlopen en levert leerpunten op voor volgend seizoen. Wat bij tomaat niet moet worden vergeten is dat tussen trossaanleg en oogst 8 weken zitten. In het begin kunnen dus effecten zitten die 8 weken later pas gemeten worden in productie (met eventuele beïnvloeding onderweg). Bovendien stuurt de teler op plantbalans en op grond van deze plantbalans stuurde Dekker met zijn belichting (en natuurlijk ook met temperatuur). Als de plant vol trossen hangt en je dan te weinig licht geeft, is de kans op abortie groot, dat risico wil Dekker niet nemen. De berekende source-sink balans via Explorer laat in ieder geval zien dat de planten scherp werden geteeld (balans lager dan 1; zie figuren Explorer pag. 29 t/m 32). Wat waarschijnlijk invloed heeft gehad is het optreden van bladrand dat zoals in het verslag aangegeven waarschijnlijk wel ten voordele van beide LED-behandelingen heeft gewerkt.

De suggestie om de extra belichting vanaf week 12 te stoppen was niet te realiseren omdat Dekker alleen aan of uit kon schakelen en niet in stappen kon schakelen. De suggestie is trouwens wel interessant, een teler met bijvoorbeeld 150 μmol belichting zou eigenlijk per stap van 50 μmol moeten kunnen sturen en zo dus stap voor stap de belichting terug schakelen als het natuurlijk daglicht toeneemt. Het mooist zou zijn als die sturing via plantresponse zou kunnen gebeuren. Ad Schapendonk laat zien (rapport "Optimale Hybride belichting tomaat; PT14092) dat je al snel energie kunt besparen door bij een bepaalde buitenstraling de lampen uit te zetten: 25% besparing in kWh met 9% productieverlies. Maar dit hangt wel af van het ras (source of sink gelimiteerd gewas).

7 Referenties

Goudriaan J, Van Laar HH. 1994. *Modelling potential crop growth processes: textbook with exercises*. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands

Hogewoning SW, Trouwborst G, Maljaars H, Poorter H, van Ieperen W, Harbinson J. 2010. Blue light dose-responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light. *J. Exp. Bot.* 61, 3107-3117.

Monsi M, Saeki T. 2005. On the factor light in plant communities and its importance for matter production. *Annals Of Botany* 95, 549-567.

Pot CS, en Schapendonk AHCM. 2009. Combinatie belichting bij tomaat met LED tussen en SON-T boven het gewas. Plant Dynamics, Wageningen. (*Vertrouwelijk*)

Trouwborst G, Hogewoning SW, Pot CS, Schapendonk AHCM, Rappoldt C, van Ieperen W. 2010. The effect of interlighting on cucumber fruit yield – analysis and simulation (*nog niet gepubliceerd*)

Trouwborst G, Oosterkamp J, Hogewoning SW, Harbinson J, van Ieperen W. 2010. The responses of light interception, photosynthesis and fruit yield of cucumber to LED-lighting within the canopy. *Physiologia Plantarum* 138, 289-300.

Schapendonk AHCM, Pot CS, Trouwborst G, Rappoldt C. 2010. Optimale hybride belichting bij tomaat: perspectieven voor het nieuwe telen. Plant Dynamics en Ecocurves, Wageningen. 39p.

8 Bijlagen

De volgende 4 pagina's bevatten de overzichten van de teelt zoals is berekend met het Explorer-model.

Verklaring figuren:

1 vruchtgroei

De figuur 'vruchtgroei' geeft de gemiddelde weekproductie in de maand voorafgaand aan de rode histogram staaf, de totale cumulatieve vruchtproductie (blauwe stippellijn) en de geogoste productie (paarse lijn). De grijze lijn is de ophoping van reserves. In de figuur 'vruchtgewicht en partitie' staat weergegeven hoe de assimilaten worden verdeeld over de fracties vrucht, blad, ademhaling, stengel en wortel.

2 bladeren

Alleen de effecten op de bladdikte (SLA) en de LAI zijn hier van belang. Pas rond week 10 wordt een LAI van 3 bereikt (bij SON-T 110 pas in week 16). Verbetering van de lichtonderschepping voor week 10 verdient aandacht.

3 licht en groei

De blauwe stippen geven inzicht in de verhouding tussen assimilaten-aanbod en 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 betekend dat er een tekort is.

Een goede operationele situatie is een balans tussen 1.3 en 0.7. Bij scherp telen zal deze waarde rond de 0.7 bedragen. In de eerste maanden van 2010 is er een structureel tekort zowel in de SONT als in de LED. De 100% SON-T ligt dan erg laag.

4 parameters ontwikkeling

Deze set geeft de geschatte temperatuurafhankelijkheid van bladafplitsing (groen), aantal uitgroeierende trossen (bruin), maximum trosgewicht (rood; in de figuur vruchtgewicht genoemd) en de uitgroeiduur van een tros in dagen. Deze parameters zijn puur door het ras bepaald en dus niet anders voor SONT en LED behandeling.

5 vruchtgewicht en partitie

De figuur geeft de fractie van assimilaten die aan wortel (grijs), stengel (wit), ademhaling (donkergroen), blad (lichtgroen) en vrucht (rood) worden toebedeeld. De histogrammen geven het gesimuleerde gemiddelde trosgewicht (in de figuur vruchtgewicht genoemd). De groene stippellijn geeft het aantal stengels per m² weer.

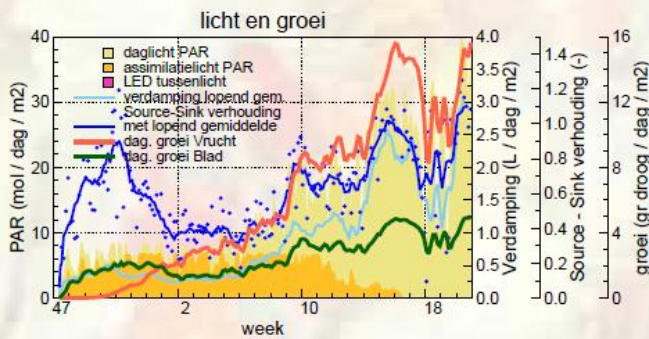
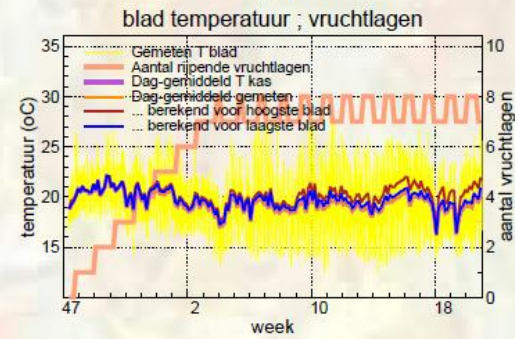
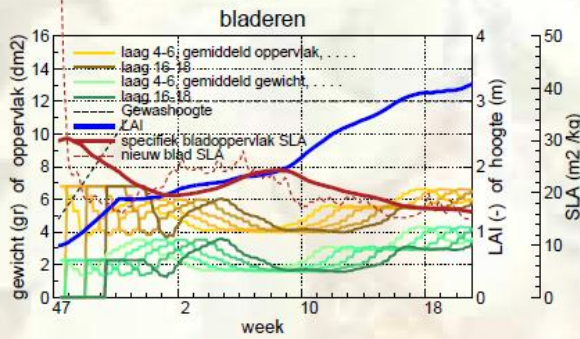
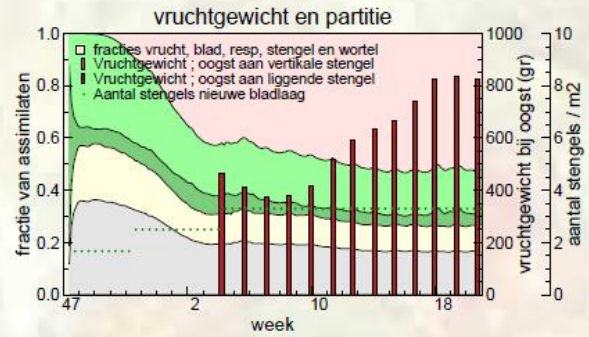
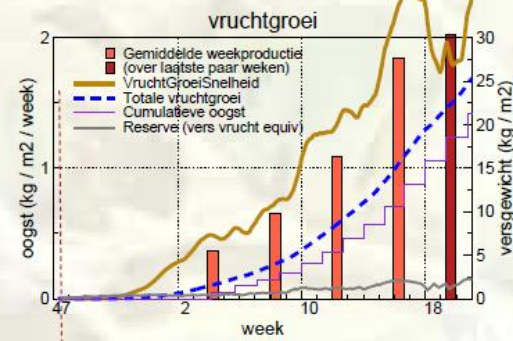
6 bladtemperatuur; vruchtlagen

In deze figuur is het verloop van de berekende bladtemperatuur aan de top en aan de basis weergegeven. Binnen OpTomaat Explorer zijn uitgebreide berekeningen van de totale warmtebalans over vooraf te bepalen periodes mogelijk. Dit is een zeer benopte weergave.

Optomaat Teelt 2.02 voor DekkerGlascultures

SON-T 110

2 juni 2010, 13:42

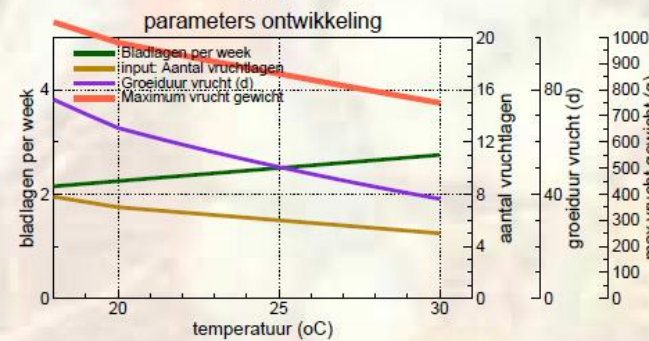


licht

Waarde	Omschrijving met eenheid
111.5	PAR lampen (uMol/m ² /s)

planten

Waarde	Omschrijving met eenheid
8.0	aantal bladlagen bij aanplanten
20.0	aantal blad posities verticale stengel
25.0	aantal blad posities voor trossen
17.0	aantal bladlagen (daaronder pluk)
1.67	initieel aantal stengels per m ²
680.0	oppervlak van volwassen blad (cm ²)
10.0	nummer eerste blad met tros
3.0	afstand tussen trossen (bladlagen)
2.5	max aantal nieuwe bladeren per week

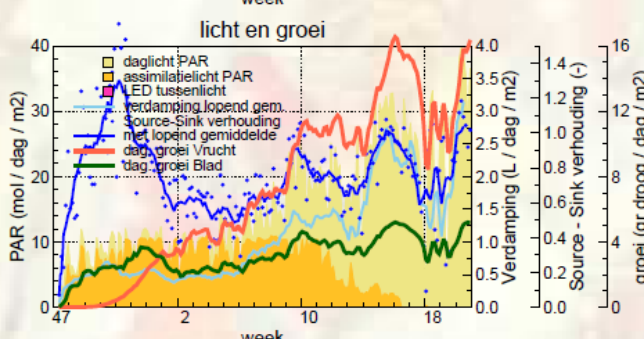
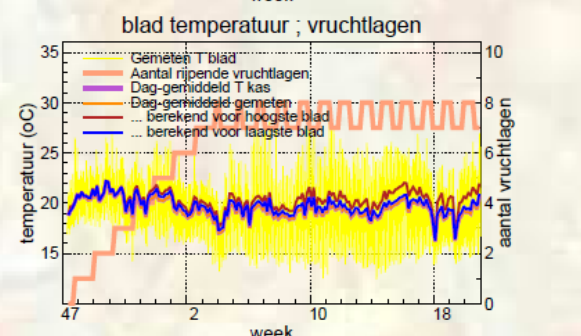
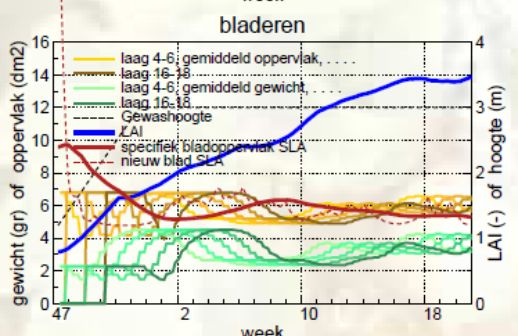
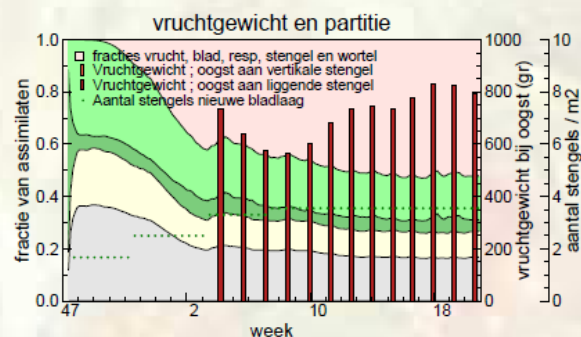
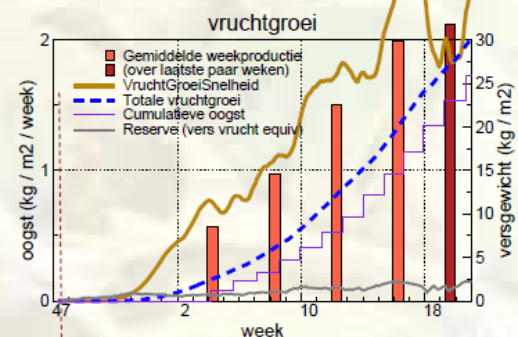


Calculated with FST Plus 3.14
File: control_rep_001_Overzicht.eps, page 1
© 2008-2010 Plant-Dynamics & EcoCurves.



SON-T 170

2 juni 2010, 13:42

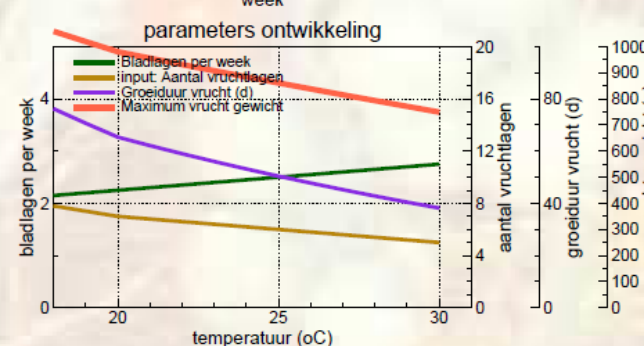


licht

Waarde	Omschrijving met eenheid
173.0	PAR lampen (uMol/m2/s)

planten

Waarde	Omschrijving met eenheid
8.0	aantal bladlagen bij aanplanten
20.0	aantal blad posities verticale stengel
25.0	aantal blad posities voor trossen
17.0	aantal bladlagen (daaronder pluk)
1.67	initieel aantal stengels per m2
680.0	oppervlak van volwassen blad (cm2)
10.0	nummer eerste blad met tros
3.0	afstand tussen trossen (bladlagen)
2.5	max aantal nieuwe bladeren per week

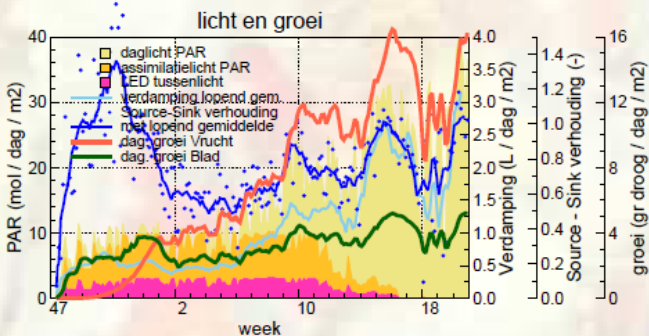
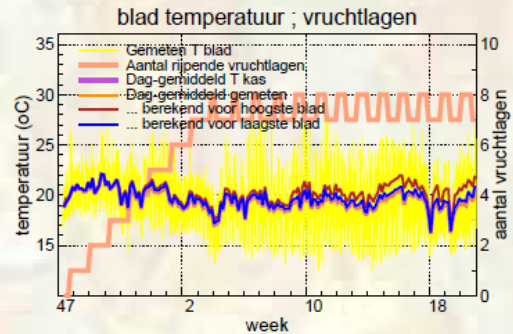
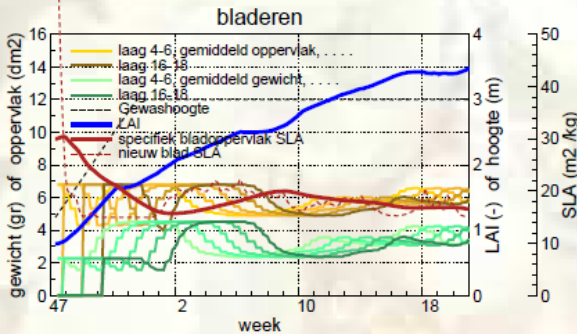
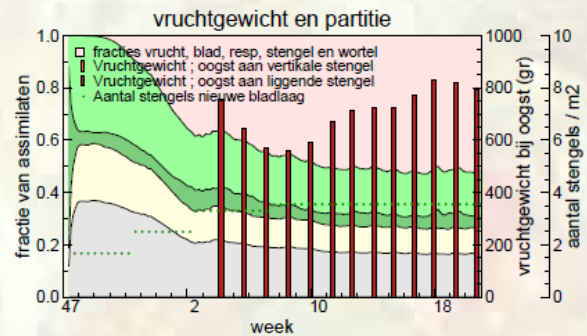
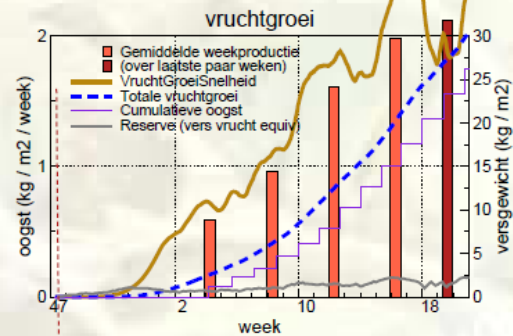


Calculated with FST Plus 3.14
File: control_rep_001_Overzicht.eps, page 2
© 2008-2010 Plant-Dynamics & EcoCurves.



LEDhorizontaal

2 juni 2010, 13:42

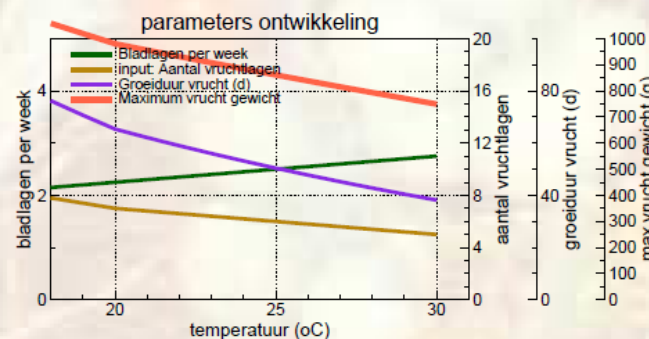


licht

Waarde	Omschrijving met eenheid
111.5	PAR lampen (uMol/m ² /s)

planten

Waarde	Omschrijving met eenheid
8.0	aantal bladlagen bij aanplanten
20.0	aantal blad posities verticale stengel
25.0	aantal blad posities voor trossen
17.0	aantal bladlagen (daaronder pluk)
1.67	initieel aantal stengels per m ²
680.0	oppervlak van volwassen blad (cm ²)
10.0	nummer eerste blad met tros
3.0	afstand tussen trossen (bladlagen)
2.5	max aantal nieuwe bladeren per week



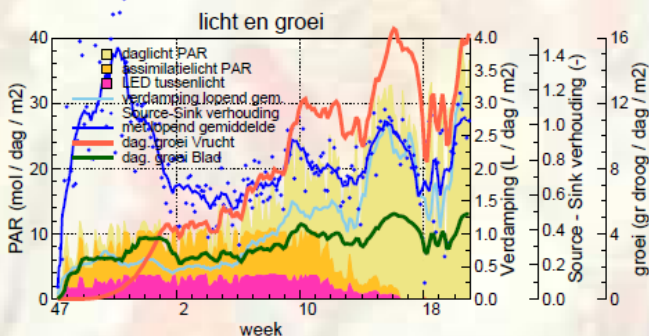
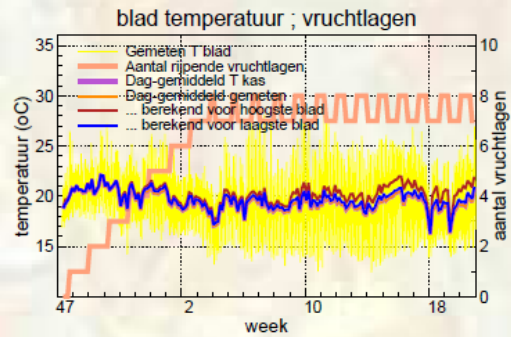
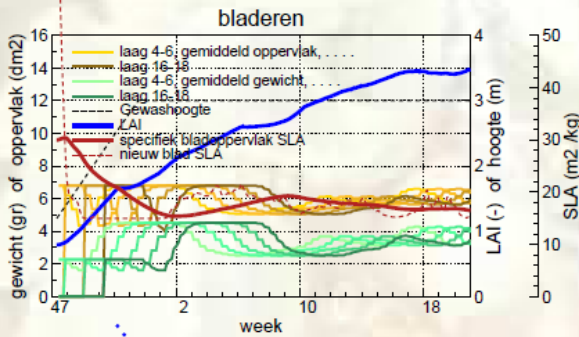
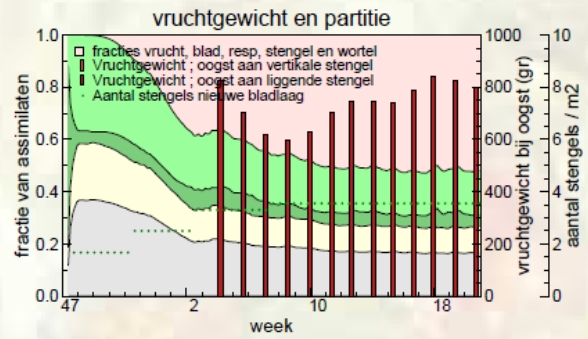
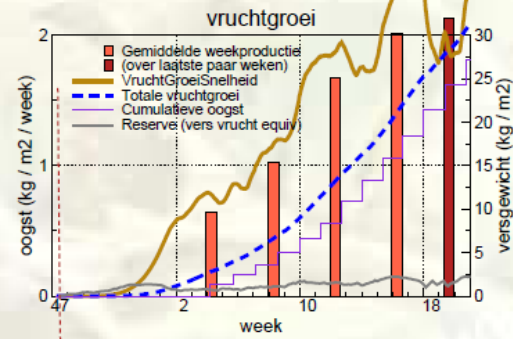
Calculated with FST Plus 3.14
File: control_rep_001_Overzicht.eps, page 3
© 2008-2010 Plant-Dynamics & EcoCurves.



Optomaat Teelt 2.02 voor DekkerGlascultures

LEDverticaal

2 juni 2010, 13:42

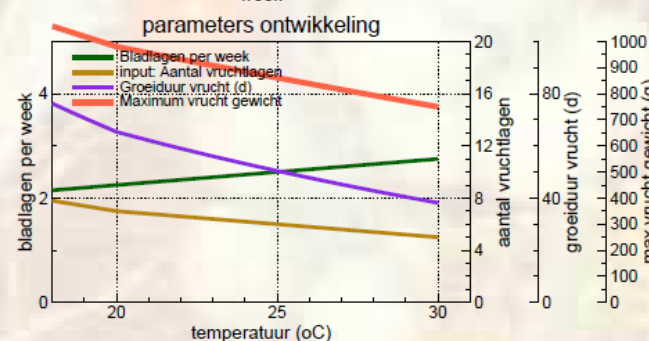


licht

Waarde	Omschrijving met eenheid
111.5	PAR lampen (uMol/m2/s)

planten

Waarde	Omschrijving met eenheid
8.0	aantal bladlagen bij aanplanten
20.0	aantal blad posities verticale stengel
25.0	aantal blad posities voor trossen
17.0	aantal bladlagen (daaronder pluk)
1.67	initieel aantal stengels per m2
680.0	oppervlak van volwassen blad (cm2)
10.0	nummer eerste blad met tros
3.0	afstand tussen trossen (bladlagen)
2.5	max aantal nieuwe bladeren per week



Calculated with FST Plus 3.14
File: control_rep_001_Overzicht.eps, page 4
© 2008-2010 Plant-Dynamics & EcoCurves.

