



LEDs: sturen en belichten bij paprika

Ad Schapendonk Sander Pot en Govert Trouwborst

Augustus 2010

Productschap  Tuinbouw




GasTerra



Ministerie van Landbouw, Natuur en
Voedselkwaliteit

LEDs: Sturen en Belichten bij Paprika Scenario analyse

LED en SON-T

Ad Schapendonk, Sander Pot en Govert Trouwborst

PT-rapport 13845

Plant-Dynamics BV, Englaan 8, 6703 EW Wageningen

E-mail: ad@plant-dynamics.nl

Plant-Dynamics BV

Wageningen, augustus 2010

REFERAAT

Ad Schapendonk, Sander Pot en Govert Trouwborst, 2010. *LEDs: Sturen en Belichten bij Paprika ; Scenario analyse LED en SON-T*. 33 blz.

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

Keywords: Belichting, LED, SON-T, simulatie, paprika, teeltoptimalisatie

Dit onderzoek werd gesubsidieerd door het Productschap Tuinbouw en het ministerie van LNV. We bedanken Wim en Stephan Dingemans voor de medewerking en de discussies gedurende de voortgang van het project.

© 2010 Plant-Dynamics BV en EcoCurves
Englaan 8, 6703 EW Wageningen, Nederland

e-mail: ad@plant-dynamics.nl

Voorplaat: “Tussenbelichting met LEDs bij VOF Dingemans-Vierpolders”

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

Inhoudsopgave

1	Samenvatting	5
2	Resultaten	9
2.1	Inleiding	9
2.1.1	Ervaringen in 2008-2009	9
2.1.2	Experiment 2010	10
2.2	Complexe interacties ontrafeld.	10
2.3	Proefopzet	12
2.3.1	Kengetallen teelt Derby	12
2.4	Microklimaat	14
2.5	CO ₂	14
2.6	Sturing met temperatuur	14
2.6.1	Strategie voor temperatuursturing	15
2.7	RV en sturing op VPD _{blad}	15
2.8	Sturing sink source met licht	16
3	Oogstresultaten	19
3.0.1	Oogstvergelijking 2008-2009 en 2009-2010	19
	Kenmerken teelt 2008-2009	20
	Wat was er anders in 2009-2010?	21
3.0.2	LED tussenbelichting	21
4	Vitaliteit (Npq)	22
5	Modelberekeningen	25
6	Bijlage proceswaarnemingen	29
6.1	V _c max en J _{max}	29
6.1.1	Lichtonderschepping	29
6.2	Huidmondjes geleidbaarheid	31
	Bibliografie	32

Samenvatting

Het voordeel van bijbelichting met LED's bij paprika is discutabel. Enerzijds is er op theoretische basis een meerproductie van 5-15% te verwachten in vergelijking met SON-T, anderzijds komt dat er in de praktijk niet uit. Bij VOF Dingemans-Vierpolders is in 2008-2009 gexperimenterd met LED's in paprika (Nederhof *et al.*, 2010). Uit dat onderzoek bleek dat toepassing van LED's bij paprika bemoeilijkt wordt door een ongebalanceerde aanmaak en benutting van assimilaten. De concrete vraag is dus: hoe kunnen we de assimilatie dusdanig sturen dat de plant optimaal profiteert van de extra belichting? De hier beschreven analyse gaat een stap verder dan een beschouwing van lichteffecten maar neemt het hele microklimaat mee in een speurtocht naar optimale condities. Kansen van sturing met licht worden gewogen tegen kansen van sturing met temperatuur en vocht.

Als onderbouwing van de experimenten bij VOF Dingemans-Vierpolders, zijn modelmatige evaluaties verricht met het Model Explorer Paprika. Het model berekent de interactie tussen planteigenschappen en microklimaat in de tijd, met realistische terugkoppelingen op de fysiologische en morfologische processen die de basis vormen van het productieproces. Deze studie is een theoretische analyse waarbij fysiologische verbanden werden gebruikt, die in een voorgaande studie waren bepaald (Nederhof *et al.*, 2010). De verkregen dataset beslaat twee teeltseizoenen (2008-2009 en 2009-2010) waardoor waardevolle vergelijkingen kunnen worden gemaakt (tabel 1.2).

Behandelingen:

- SON-T ($62 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}^{-1}$), rd-boven;
- rd-boven: LED-rood-5%blauw ($42 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}^{-1}$ bovenbelichting)
- rd-tussen; LED-rood-5%blauw ($42 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}^{-1}$ tussenbelichting)
- bl-boven; LED-blauw ($20 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}^{-1}$ bovenbelichting)
- bl-tussen; LED-blauw ($20 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}^{-1}$ tussenbelichting).

De belichting (SON-T en LED) was operationeel vanaf 28 november (5 dagen na planten) van 's morgens 8:00 tot 's middags 15:00 uur. In tabel 1.1 staan de effecten van de lichtbehandelingen, gemeten en doorerekend met de gemeten klimaatdata (zie paragraaf 2.2) op basis van de gemeten plantprocessen. De berekeningen werden gemaakt met het model Explorer Paprika over de periode vanaf planten op 23 november 2009 tot 23 april 2010. De start van de assimilatiebelichting was op 28 november (1 maand vroeger dan in 2009).

Als aanvulling op het sturen van bloei en vruchtzetting met lichtkleur, experimenteren Wim en Stephan Dingemans met temperatuur als generatieve sturing. De effecten zijn echter verschillend: temperatuur heeft minder effect op vroegheid en snelheid van bloei dan licht(kleur) maar een groter effect op de plantbelasting door verandering in de abortiekans van gezette vruchten en een verandering van de eindgrootte van de vrucht. Samengevat betekent het dat de resultaten van temperatuurverlaging op het aantal vruchten, dat in de kritische periode vanaf half januari, uitgroeit vergelijkbaar zijn met het effect van LED's maar dat de sturing met temperatuur meer mogelijkheden biedt voor correcties. In het geval van de vroegere bloei, geïnduceerd door LED's, is er een groter risico dat de plant langdurig meer vruchten draagt dan onderhouden kunnen worden vanwege te weinig licht in de periode van 40-50 dagen van de uitgroei. Met de temperatuurbehandeling is dat risico veel minder omdat er tussentijds makkelijker kan worden bijgestuurd op de gewenste snelheid van afrijping. Op die manier kon een 10% hogere opbrengst worden gerealiseerd dan het gemiddelde opbrengstniveau van gele paprika.

Een tweede probleem met de door LED's gerealiseerde vroeger bloei is dat gedurende langere tijd de vegetatieve groei geremd is vanwege de concurrentie. Zeker in de beginfase, en dat is de fase waarin belichting het meeste effect sorteert, veroorzaakt dat een contraproductief effect. Minder vegetatieve groei, lees minder blad, levert minder lichtonderschepping en als reactie daarop, in tweede instantie, een slechtere bloemvorming (haverbloempjes) en afwijkende vruchtontwikkeling. Deze situatie trad op in 2009 maar niet in 2010 omdat dmv temperatuur verlaging aan het eind van de dag de snelheid van bloei werd afgeremd en er nauwelijks een verschil was in vroegheid van bloei tussen SON-T en rd-boven. Het temperatuur effect overschaduwde in 2009-2010 het effect van de LED's, waardoor er in feite geen verschillen meer waren tussen de behandelingen. Wanneer de plant in balans is en de aanmaak van assimilaten ongeveer gelijke tred houdt met de vruchtgroei, hebben LED's (vooral blauwe LED's) een positief effect op de bladontwikkeling. Hierdoor kan (bij een juiste plantbalans) een inhaaleffect optreden in de mate van lichtonderschepping in de periode februari-maart. Indien de lichtonderschepping dan een beperkende factor is, bijvoorbeeld, bij hoge instraling, heeft dat voordelen. Dit effect is duidelijk waargenomen in de periode 2008-2009 maar niet in 2009-2010. In 2010 was het donkere weer in januari cruciaal voor de effecten van LED-belichting. Door de lage lichtintensiteit in januari kon de gestimuleerde generatieve ontwikkeling in december niet worden vertaald in een productieverhoging. Door te sturen op een temperatuurverlaging tot 17 °C aan het einde van de lichtperiode, kon worden voorkomen dat er teveel vruchten aborteerden. Op die manier kon de vroege zetting toch worden verzilverd. Blauwe LED's gaven in 2008-2009 meer bloemen maar er was een slechte zetting (40% van de stengels had 1 vrucht). In 2009-2010 was er geen effect op de vroegheid van bloei door blauwe LED's maar, als gevolg van de gerichte temperatuursturing, meer zetting (80% van de stengels had 1 vrucht).

Bovenbelichting met LED's biedt dus perspectieven wanneer heel goed wordt begrepen wat de stuureffecten zijn en wanneer we het gebruik van LED's in de context van het totale teeltplaatje weten te plaatsen. Tussenbelichting daarentegen is bij paprika geen haalbare optie. De Lichtverdeling wordt in belangrijke mate ongunstig beïnvloed door locale effecten van bladeren die dicht bij de armaturen hangen (figuur 2.1). Ook vanuit een logistiek oogpunt was de positie van de LED's hinderlijk bij het oogsten en andere gewashandelingen. Er trad veel schade op door verbrandingsverschijnselen van de bladeren.

De stuurlicht effecten van de rood-blauwe LED's manifesteren zich in een generatiever gewas en een vroege bloei. Dezelfde effecten worden ook gerealiseerd met een temperatuurverlaging aan het eind van de dag. In hoeverre het praktisch mogelijk

Tabel 1.1. Gemeten en gesimuleerde opbrengsten en lichtbenutting in 4 behandelingen. Gram vers mol^{-1} is het geoogste versgewicht gedeeld door de totale PAR som aan de kop van het gewas

	Gemeten		Gesimuleerd	
	vrucht vers kg m^{-2}	% tov SON-T	vrucht vers kg m^{-2}	% tov SON-T
onbelicht	4.61	79	4.14	67
SON-T	5.80	100	6.23	100
RB	5.43	94	6.19	99
bl	4.58	79	5.15	83
	g vrucht vers mol^{-1}	% tov SON-T	g vrucht vers mol^{-1}	% tov SON-T
onbelicht	4.86	100	4.36	84
SON-T	4.87	100	5.22	100
RB	4.86	100	5.53	106
bl	4.45	91	5.00	96

is om gebruik te maken van deze interacties is nog een open vraag. Voor de blauwe LED's ligt de zaak wat gecompliceerder omdat er een wat ambivalent generatief effect is. Het ene jaar is er een vervroeging van bloei en minder zetting, het ander jaar geen effect op bloei en een goede zetting. Waarschijnlijk speelt de intensiteit van het daglicht, dat de condities moet scheppen voor een effectieve sturing met lichtkleur, hier een dominante rol in. Opvallend positieve resultaten van belichten met blauwe LED's in 2008-2009, die later het seizoen optraden, waren: 1 een toename van het bladoppervlak (sterke vegetatieve groei) en 2 een stimulering van de huidmondjesgeleidbaarheid en de fotosynthese capaciteit. Of de sturing in vegetatieve richting het resultaat is van blauw stuurlicht is twijfelachtig. Waarschijnlijk was het een resultaat van de geringe zetting eerder in het seizoen want bij een goede zetting in 2009-2010 trad dit effect niet meer op.

Tabel 1.2. Gemeten en gesimuleerde opbrengsten en lichtbenutting in 4 behandelingen in 2009 en 2010.

Gemeten	vrucht vers kg m ⁻²	% tov SON-T	vrucht kg m ⁻²	% tov SON-T
	2009		2010	
onbelicht	4.38	75	4.61	79
SON-T	5.83	100	5.80	100
RB	4.66	80	5.43	94
bl	4.33	74	4.58	79
Gesimuleerd	2009		2010	
onbelicht	5.36	78	4.14	67
SON-T	6.86	100	6.23	100
RB	5.86	85	6.19	99
bl	4.96	72	5.15	83

Resultaten

2.1 Inleiding

De toepassing van LED-technologie staat sterk in de belangstelling vanwege het verwachte toekomstige hogere energierendement, de lange levensduur, de verminderde warmtestraling en de mogelijkheid om de lichtbron in het gewas te brengen. Toepassing van LED's vraagt echter niet alleen aanpassing van de belichtingsstrategie maar ook om een nieuwe manier van telen vanwege de sturende werking die LED belichting met zich meebrengt ([Nederhof *et al.*, 2010](#)).

2.1.1 Ervaringen in 2008-2009

De praktijkproef in het seizoen 2008-2009 heeft een aantal interessante bevindingen opgeleverd. De rode LED's gaven in 2008-2009 een vervroeging van de bloei. De zetting was het beste onder SON-T en rode LED's, en het slechtst onder blauwe LED's en de onbelichte behandeling. Hieruit zou geconcludeerd kunnen worden dat er sprake was van een stuurlicht effect, maar de matige zetting en de relatief kleine vruchten onder de blauwe LED's werd grotendeels veroorzaakt door de lage lichtintensiteit (minder dan halve intensiteit van de rode LED's en de SON-T). Zoals bekend is de vroege zetting bij paprika sterk afhankelijk van licht. Onder SON-T was het probleem een relatief slechte bloemvorming, slechte zaadzetting en korte vruchten.

Een tweede duidelijk effect was dat lengtegroei en bladgroei onder SON-T en rode LED minder waren dan onder blauwe LED. In april/mei was het bladoppervlak onder blauwe LED zelfs 44% groter dan onder SON-T. De vegetatieve groei was erg sterk onder blauwe LED's. Ook dit kan niet helemaal een stuurlicht effect worden toegeschreven. Sterke groei is een gevolg van twee factoren. Ten eerste waren in het begin veel assimilaten beschikbaar voor groei van stengels en bladeren, doordat er relatief weinig assimilaten gevraagd werden voor vruchtgroei (vanwege de slechte zetting). Ten tweede is er ook altijd sprake van aanpassing aan het lichtniveau: bij weinig licht (zoals onder de blauwe LED's) worden bladeren dunner en dus groter, zodat ze meer licht opvangen. Niettemin was het opvallend dat de blauwe LED's zorgden voor een uitstekend gewas.

We constateerden verder dat langer belichten een dermate sterke generatief werking had dat het productie apparaat van de planten sterk achteruitging. Het leek een zomergewas met veel bloemknoppen. De internodiën waren relatief kort en het gewas stond niet 'blond' dwz met een lichte kleur van de nieuwe bladeren in de

kop. Ook de fotosynthese capaciteit was laag.

In de loop van de teelt traden er vooral bij de blauwe LED's verschuivingen op. Tot 31 januari was de fotosynthese in die behandeling het laagst maar daarna trad een opmerkelijk herstel op. In de blauwe behandeling zorgde een sterke toename van het bladoppervlak voor een toename van de lichtonderschepping en daardoor voor een herstel van de zeer lage source/sink balans. Hierdoor kan deze behandeling extra profiteren van de toename in de daglicht.

Normaal wordt de eerste bloem in de 4e oksel na de splitsing gezet. In dit geval is de eerste bloem al in de derde oksel gevormd door het lichte weer. De splitsing van de eerste zijscheut is in de oksel van blad 8.

2.1.2 Experiment 2010

Het experiment van 2008-2009 is in 2009-2010 herhaald. Daarvoor waren 4 redenen:

- De effecten van LED waren over het seizoen dermate wisselend dat meer ervaringen nodig was om harde conclusies te trekken over de vergelijking tussen LED- en SON-T belichting in relatie tot opbrengstcomponenten bij paprika.
- We wilden testen of de invloed van LED's op de sink-source balans gericht kon worden gebruikt om de productie te sturen.
- We wilden de mogelijkheid om met licht te sturen vergelijken met de ideeën over sturing van plantbelasting ontwikkeld door Wim en Stephan Dingemans.
- We wilden de mogelijkheden van tussenbelichting testen.

2.2 Complexe interacties ontrafeld.

Om te voorkomen dat voor elke aanpassing nieuw experimenteel onderzoek moet worden verricht is een aanpak op procesniveau noodzakelijk. Het opsplitsen van de productie in sleutelcomponenten is niet alleen noodzakelijk maar ook heel goed te combineren met een praktische aanpak op lokatie, mits er een goede selectie wordt gemaakt van de belangrijkste processen. In dit geval zijn dat: de fotosynthese, verdamping en huidmondjesgeleidbaarheid, bladafplitsing, zetting en uitgroei duur van de vruchten.

Centraal in de analyses staat de verhouding tussen assimilatenaanmaak en plantbelasting. Een te zware plantbelasting geeft bijvoorbeeld niet alleen een slechte zetting maar ook een sterk verminderde vegetatieve groei. Dit vertaalt zich later in een lage gewasfotosynthese door een slechte vegetatieve opbouw. Dit vertraagde effect op de plantbalans wordt in de berekeningen met Paprika Explorer meegewogen. Een mooi voorbeeld is de zeer sterke vegetatieve ontwikkeling onder blauwe LED's. Uit de Explorer verkenningen bleek dat het een reactie was op de relatief geringe plantbelasting eerder in het seizoen, versterkt door een (nog) hypothetisch specifieke stuurlicht effect van de blauwe LED's op de bladgrootte.

In het begin van de teelt 2009-2010 hadden LED's een stimulerende werking de aanmaak van assimilaten via een hogere lichtonderschepping (grotere bladeren) en op de plantbelasting door een vroeger bloei. Het positieve effect op bladgrootte was, om redenen van onderlinge concurrentie, echter van zeer korte duur. De

sterke generatieve belasting verzwakte de plant en daardoor ging de voorsprong verloren. Om de resultaten van een vroege zetting te verzilveren is het immers een voorwaarde dat er voldoende daglicht is in de kritische periode (midden januari tot eind februari). Het heeft immers geen zin om veel vruchten te laten zetten als er onvoldoende assimilaten zijn om de vruchten te laten uitgroeien. Er zijn 2 opties om effectief te sturen op zetting: 1 kennis van het toekomstige weer om de sturing van de zetting daar op af te stemmen en 2 een mogelijkheid om bij te sturen als het fout dreigt te gaan. We hebben gekozen voor optie 2 omdat optie 1 (nog) niet mogelijk is. Optie 2 houdt in dat voor het seizoen 2009-2010 met licht werd gestuurd op bloeisnelheid en met temperatuur werden de correcties uitgevoerd om de vruchten aan de plant te houden.

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. Temperatuur is daardoor een belangrijke sturende factor waarmee de teelt geoptimaliseerd kan worden. Zeker in de belichte teelt is temperatuurregeling het stuur waarmee een te snelle slijtage van het gewas kan worden voorkomen. Met het Explorer model krijgt temperatuur een extra dimensie omdat bij de berekeningen gelijktijdig rekening wordt gehouden zowel met het effect op assimilatie als met het effect op vruchtgroei.



Figuur 2.1. Overzicht van de rood-blauwe LED tussenlicht.

Tabel 2.1. *LED behandelingen.*

rd-boven LED-rood-blauw (met dag mee). rd-tussen: LED-rood-blauw (op 25 cm onder de kop). bl-boven LED-blauw (met dag mee). bl-tussen LED-blauw (op 25 cm onder de kop).

nr	Benaming	Behandeling	$\mu\text{mol PAR}$
1	Onbelicht		
2	SON-T	8:00 tot 15:00	62
3	rd-boven	8:00 tot 15:00	42
4	rd-tussen	8:00 tot 15:00	42
5	bl-boven	8:00 tot 15:00	20
6	bl-tussen	8:00 tot 15:00	20

2.3 Proefopzet

De proef met LED belichting in paprika maakte deel uit van de normale productiekas bij VOF Dingemans-Vierpolders (tabel 2.1). De proef was opgezet met het idee dat LED ook als stuurlicht kan werken, dwz dat de bepaalde kleur van het LED-licht een bepaald effect kan veroorzaken. De lichtintensiteit hoeft dan niet zo hoog te zijn. Dit zou kunnen leiden tot een energie-efficiënte manier van telen. In deze proef lagen vier proefvelden van 120 m^2 ($15 \times 8\text{ m}$) met LED's: twee velden met rode en twee met blauwe LED's (twee van ieder, om verschillende belichtingsduur te testen). Ter vergelijking was er een vak van 560 m^2 met SON-T belichting en een groot vak 'Onbelicht'. De rekken met LED lampen werden steeds verhangen zodat ze steeds ongeveer 50 cm boven het gewas hingen. De tussenbelichting bevond zich op 25 cm onder de kop en werd geïnstalleerd zodra de stengel (vanaf splitsing) 50 cm was. De intensiteit van de rode LED's was $42\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Dit kwam ongeveer overeen met de lichtintensiteit onder de SON-T lampen ter hoogte van de kop van de planten. Overigens bevatten deze rode LED lampen ook 5% blauw licht omdat dit onmisbaar is voor goede plantengroei. De blauwe LED's hadden een veel lagere intensiteit: ca $20\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Het ras was Derby, zaaidatum 13 oktober 2009, plantdatum 23 november, belichting vanaf 25 november, plantdichtheid 2,5 per m^2 , en stengeldichtheid 7,2 per m^2 .

2.3.1 Kengetallen teelt Derby

- Aantal stengels per meter: 7,2.
- Afstand tussen rijen: 114 cm.
- Afstand tussen planten: 37 cm.
- Aantal stengels per plant: 3.
- Aantal bladeren bij start proef: 7. Na blad 5 worden er per plant 3 stengels aangehouden.
- Aantal vruchten per oksel: 1.
- Eerste vrucht? 4 e oksel na splitsing. De daaropvolgende oksel werd in alle behandelingen leeggemaakt.



Figuur 2.2. *Plantivity op locatie*

Plantivity (ETR en Npq) en infrarood registratie voor de bladtemperatuurmeting

- Uitgroeiduur vruchten: winter-voorjaar: 63-70 dagen; zomer; 42-50 dagen.
- Gewicht van vrucht (vers). Eerste zetting 220 gram tweede zetting 190 gram in de zomer 180 gram.
- Bladeren per week: 1.
- Maximum vruchtgewicht: 200g.
- Drogestofgehalte vruchten 7,5 procent in de winter en 9 procent in de zomer.
- Bladgrootte: 6,5* 10 cm.
- Temperatuur: 21 °C dag nacht na planten tot inwortelen.
- tot zetting (4 weken): 24.5 °C dag 20 nacht. Na zetting 19 °C (in 2010 17 °C voornacht).
- als de vruchten uitgroeien 20,5 - 21,5 °C.
- belichting is op 25 november gestart.

Kasklimaatgegevens werden gemeten met een Growwatch opstelling die in plot van de rd-bovenbelichting was geplaatst. Geregistreerde 5 minuten waarden zijn: bladtemperatuur, PAR (2 metingen per behandeling), luchttemperatuur, CO₂ concentratie, RV, vochtgehalte mat en fotosynthesecapaciteit met plantivity meting.

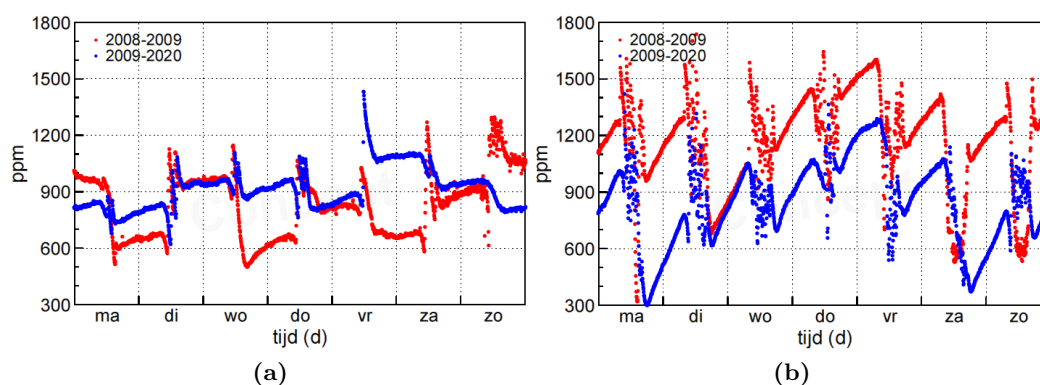
Metingen van fotosynthese- en absorptie karakteristieken van de bladeren uit het seizoen 2008-2009 werden gebruikt om de procesvergelijkingen, waaruit het Explorer model is opgebouwd, te parameteriseren. De fotosynthese capaciteit (ETR) en Npq signalen (een maat voor de vitaliteit) werden continu geregistreerd de rd-boven behandeling met Plantivity metingen (figuur 4.1 en 4.3).

2.4 Microklimaat

Om de verschillen tussen het seizoen 2008-2009 en 2009-2010 beter te doorgronden is in figuren 2.3, 2.4, 2.7 en 2.6 een analyse van de CO₂, temperatuur, licht en RV data te zien voor beide proefperiodes.

2.5 CO₂

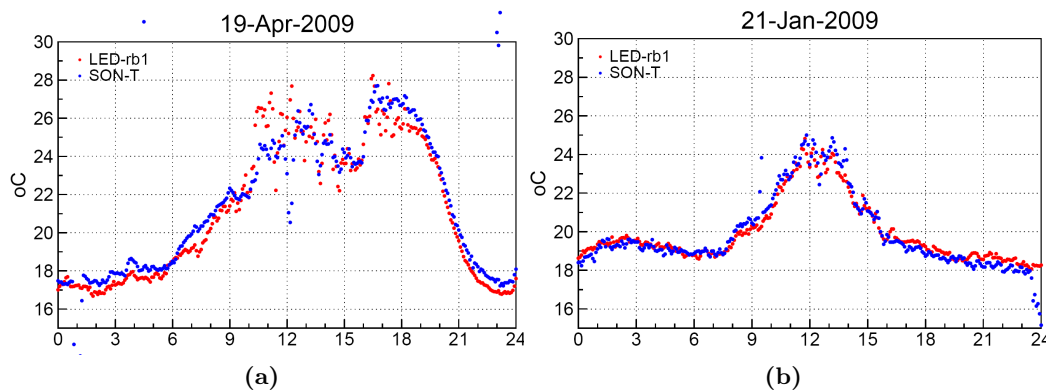
De CO₂ concentratie is constant en hoog gedurende de teelt. In figuur 2.3 is het verloop van de CO₂ concentratie op een aantal karakteristieke dagen weergegeven. De CO₂ concentratie varieerde over de gehele meetperiode tussen 600 en 1500 ppm. De gemiddelde CO₂ concentratie was over de hele periode 891 ppm in 2008-2009 en 751 ppm in 2009-2010. De gemeten 5 minuten waarden zijn in het model gebruikt. Het verschil tussen de jaren werd veroorzaakt door een betere dosering in het seizoen 2009-2010, waarbij concentraties boven 900 ppm werden vermeden. Ondanks de lagere dosering werd in de cruciale fase (tweede helft van januari met betrekkelijk lage lichtintensiteiten) 900 ppm gerealiseerd. Dit was een belangrijke ondersteuning voor de uitgroei en zetting in die periode.



Figuur 2.3. CO₂ concentratie in 2008-2009 en 2009-2010 voor a) 19-25 januari en b) 16-22 maart

2.6 Sturing met temperatuur

De effecten van SON-T infraroodstraling zijn kleiner dan algemeen wordt verwacht. Het verloop van de temperatuurverloop van de kaslucht en het temperatuurverloop van topbladeren lag in 2008-2009 voor de SON-T en LED behandelingen erg dicht bij elkaar (figuur 2.4). De gemiddelde luchttemperatuur was 20.05 °C en de gemiddelde bladtemperatuur was 19.8 °C en 20.09 °C, respectievelijk voor LED en SON-T. De verschillen zijn dus erg gering. Gedurende de belichtingperiodes was de bladtemperatuur in de SON-T behandeling slechts 0.4 graden hoger dan in de LED behandeling. Dit kleine verschil wordt voor een deel veroorzaakt door de compensatie vanwege de hogere verdamping in de SON-T behandeling waardoor de bladtemperatuur minder stijgt dan op basis van het hogere aandeel NIR verwacht wordt.



Figuur 2.4. Bladtemperatuur rd-boven en SON-T behandeling bij een hoge instraling (a) en lage instraling (b).

De bladtemperatuur is in 2009-2010 niet boven 28°C geweest. Gecombineerd met een lage VPD_{blad} en hoge CO_2 concentratie leverde dit een ideaal teeltklimaat op. Gemiddeld was de temperatuur in 2009-2010 19.8°C .

Enkele karakteristieke voorbeelden van het verloop van de bladtemperatuur op een donkere en een erg zonnige dag in 2008-2009 zijn weergegeven in figuur 2.4.

2.6.1 Strategie voor temperatuursturing

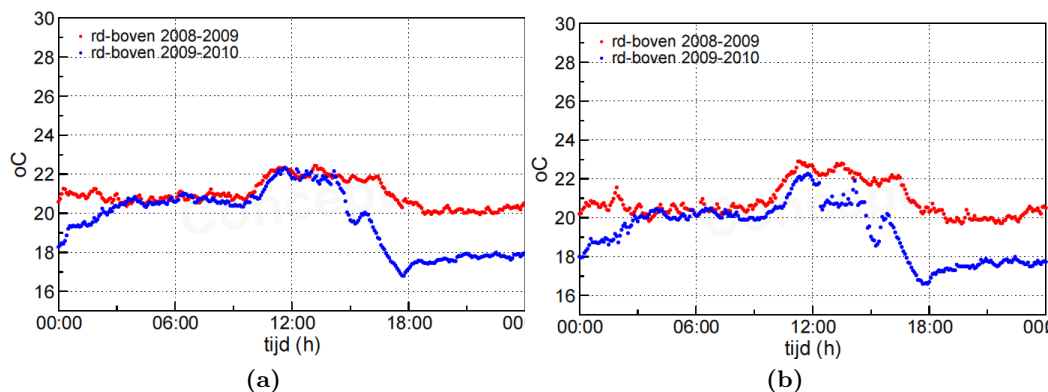
Periode 25-11 tot 25-12 (vanaf planten), T-etmaal = 22°C (vegetatieve groei). Extra temperatuur bij LED via verwarmingsslang. Dit gaf een verhoging van T-etmaal van 0,5 tot 1°C om de afname van de vegetatieve ontwikkeling onder LED, die in 2008-2009 was waargenomen te voorkomen. Het doel was een verhoging van T-etmaal van 0,5 tot 1°C , precies zoveel als het verschil dat in 2008-2009 was waargenomen (figuur 2.4).

Als alternatief voor een snellere bloei door LED belichting werd in 2010 in de periode 16-12 tot 15-01 geëxperimenteerd met een voornachtverlaging van de temperatuur vanaf midden december. Daarmee werd de door een hogere temperatuur gestimuleerde vegetatieve groei omgezet in generatieve groei. De temperatuurverlaging begon om 16:00 u en pas na middernacht werd er weer langzaam opgestookt naar 22°C (figuur 2.5).

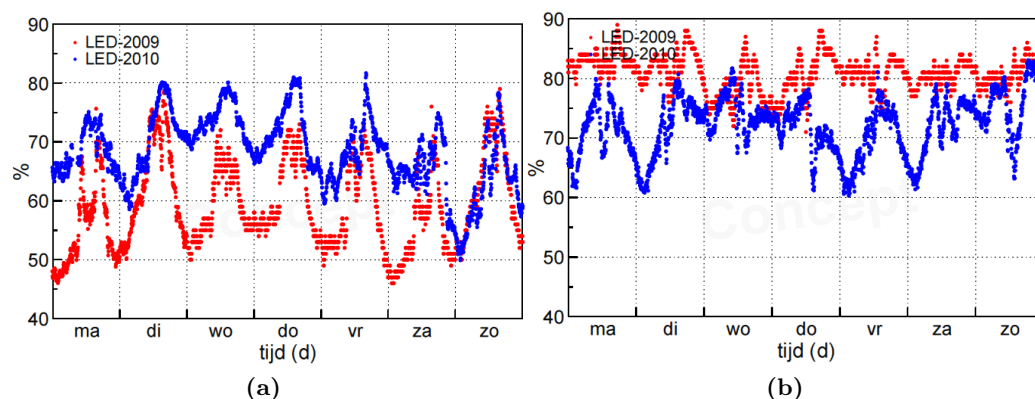
Vanaf 15 januari werd een hogere temperatuur gerealiseerd ($20/21^{\circ}\text{C}$) om de snelheid van uitgroei weer in balans te brengen met de toename van de hoeveelheid licht.

2.7 RV en sturing op VPD_{blad}

De gemiddelde RV varieerde tussen 76,9% in 2008-2009 en 74,6% in 2009-2010. In de lichtperiodes varieerde de RV tussen 75 en 90%. Ook op heldere dagen bleef de RV ruim boven 75%. De RV is bij paprika van belang om het dampdruk deficit van het blad (VPD_{blad}) onder controle te houden. Sturing op VPD_{blad} is een methode om bij hoge CO_2 concentraties en oplopende bladtemperatuur een hoge geleidbaarheid van de huidmondjes te handhaven. Bij paprika is dat vooral in de middag en aan het



Figuur 2.5. Dagelijkse verlopen van de bladtemperatuur op een specifieke dag (16 december) in beide teeltseizoenen; blauw 2009-2010 en rood 2008-2009. (a) luchttemperatuur (b) bladtemperatuur.



Figuur 2.6. Dagverloop van RV in 2008-2009 en 2009-2010 in de week van 8 december tot 14 december (a) en 16 februari tot 22 februari.

eind van de dag van groot belang. Bij een temperatuurverlaging is voorzichtigheid geboden omdat natslaan van de bladeren bij een lage VPD_{blad} niet mag optreden. In de fase van vegetatieve opbouw heeft een lage VPD_{blad} een positief effect op de bladontwikkeling. Het is in de opbouwphase van het teeltseizoen 2009-2010 gelukt om een veel lagere VPD_{blad} (= hogere RV) te realiseren dan in 2008-2009 (figuur 2.6a). Dit heeft een positief effect op de vegetatieve opbouw, vooral als er aan de ander kant met temperatuur generatief wordt gestuurd. In de periode van productie in 2010 werd besloten om een lagere RV te handhaven dan het jaar daarvoor (figuur 2.6b). Enerzijds om ziektedruk te verminderen en anderzijds omdat een RV tussen 70% en 80% hoog genoeg bleek te zijn om een optimale geleidbaarheid van de huidmondjes over de dag te realiseren. de hele periode van de teelt waren er slechte enkele uren waarop de Npq-metingen wezen op een stress situatie (figuur 4.1).

2.8 Sturing sink source met licht

Ondanks de 4 weken eerdere start met assimilatiebelichting was de lichtsom aan de top van het gewas in 2009-2010 14% lager dan in 2008-2009 (tabel 2.2).

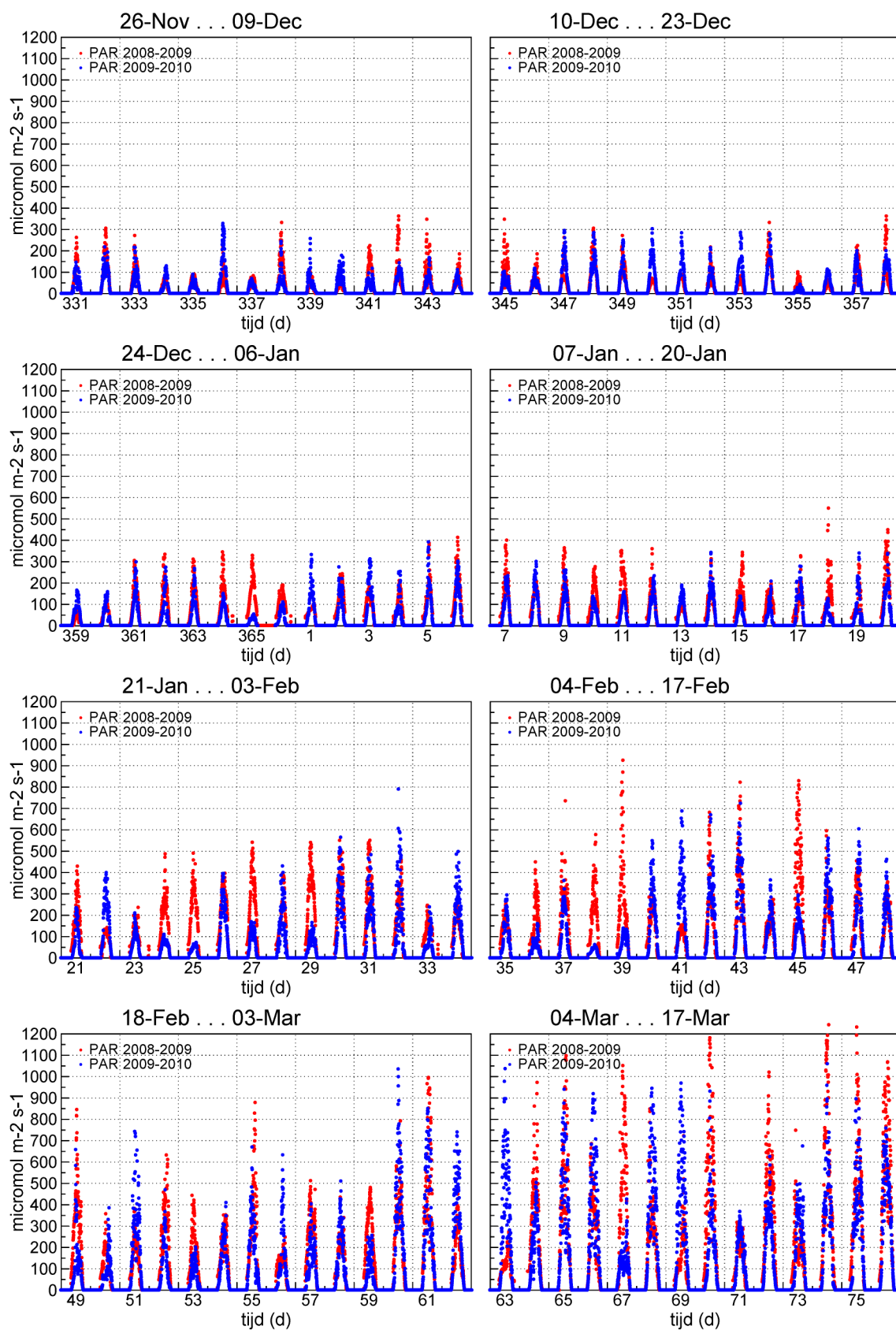
Tabel 2.2. *Lichtsommen.*

Lichtsommen gemeten aan de top van het gewas in Mol PAR van 28 november tot 20 april

	Mol PAR		
	2008-2009	2009-2010	% jaar2/jaar1
Onbelicht	1235	1063	86
SON-T	1469	1297	88
rd-boven	1369	1222	89
bl-boven	1311	1139	87

Het verloop van de dagelijkse hoeveelheden PAR aan de top van het gewas is in figuur 2.7 weergegeven. In januari 2010 was het slechts op 2 dagen lichter dan in 2009 en op 16 dagen aanzienlijk donkerder. Ook februari was in 2010 donkerder dan 2009. De lichtdoses in de onbelichte teelt van 2008-2009 was hoger dan die van de belichte teelt in 2009-2010.

Het is duidelijk dat de relatieve bijdrage van de assimilatiebelichting afneemt in de loop van het voorjaar. In april zijn de bijdragen van het assimilatielicht en zeker de verschillen tussen de behandelingen niet langer significant.



Figuur 2.7. PAR aan de top van het gewas ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) gedurende de periode met bijbelichting

Oogstresultaten

Ongetwijfeld is de sturing van de balans tussen assimilaten aanmaak en assimilatenbenutting de sleutel tot teeltoptimalisatie. Zowel de lichtintensiteit als de lichtkleur hebben invloed op deze balans. Meer licht geeft meer zetting. Rood licht stimuleert vroegheid van bloei en ook die van de zetting mits de intensiteit van het totale licht hoog genoeg is. De zetting van het aantal vruchten per m² per week vertoont een duidelijk verband met de lichtintensiteit. Dat verklaart waarom in het seizoen 2008-2009 rode LED's wel tot een vroeger zetting leidde maar in 2009-2010 met donkere januari en februari maanden niet. Een vroege start van de teelt heeft tot gevolg dat er in de donkerste periode van het jaar een relatief hoge vraag naar assimilaten is. Dit kan tot verstoring van de vegetatieve leiden, waardoor een positief effect in januari kan omslaan in een verminderde zetting later in het seizoen.

De balans is moeilijk te sturen omdat er allerlei vertragingen in het systeem zijn ingebouwd waardoor de effecten van een bepaalde maatregel pas na enkele weken zichtbaar worden en omdat er verschillende terugkoppelingen actief zijn. Een voorbeeld is de situatie waar een lagere temperatuur in eerste instantie tot een verlaging van de totale vruchtgroei leidt maar in tweede instantie tot een toename omdat de vruchten langer aan de plant blijven hangen. De consequenties en de ingewikkelde samenhang zijn voor niemand makkelijk te voorspellen. Ervaring en gewaskennis blijven bij de inschatting van korte en lange termijn effecten van cruciaal belang. Daarnaast kan een simulatiemodel, juist bij dit soort ingewikkelde interacties, een helpende hand bieden.

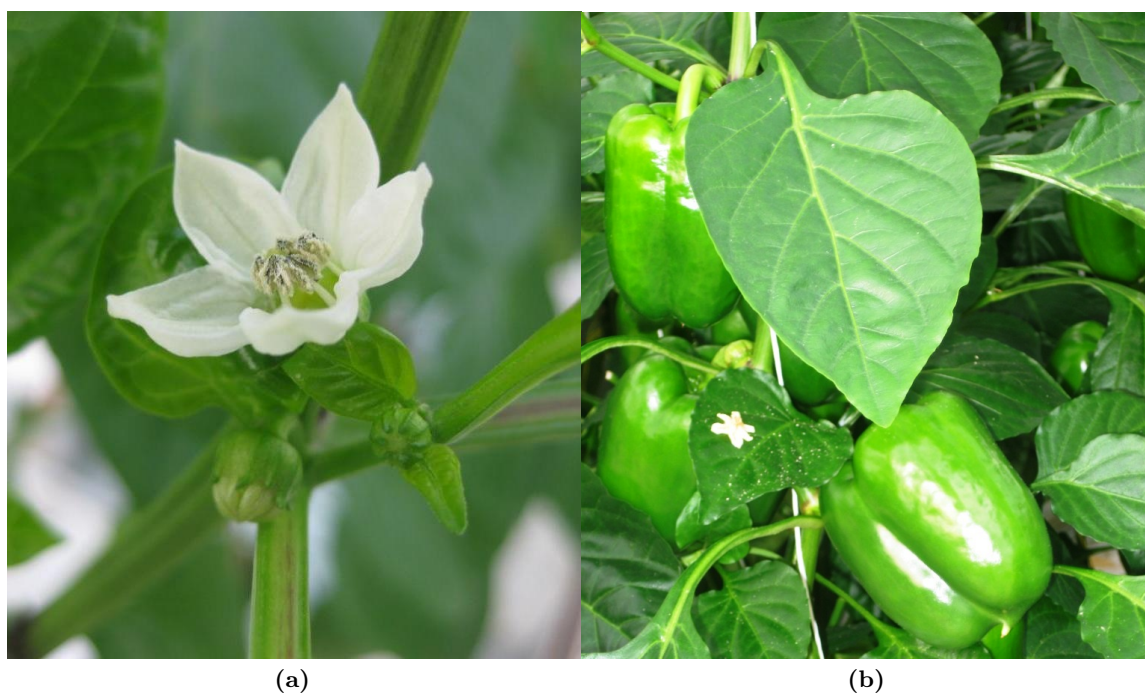
3.0.1 Oogstvergelijking 2008-2009 en 2009-2010

Het is opmerkelijk dat de opbrengsten in 2009-2010 (gemiddeld over de 4 behandelingen) bij de gerealiseerde lagere lichtdoses op eenzelfde niveau lagen als in het jaar daarvoor (tabel 3.1). Redenen daarvoor zijn de succesvolle temperatuursturing en de consequente gelijkmatige VPD_{blad} . De meeropbrengst als gevolg van de assimilatie belichting was in 2010 21%, tegen 25% in 2009. De toegevoegde waarde van LED belichting ten opzichte van SON-T was zowel in 2009 als in 2010 nihil.

De opbrengstverschillen tussen de behandelingen per $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ PAR zijn verwaarloosbaar. De verschillen zijn in 2009-2010 evenals in 2008-2009 insignificant (tabel 5.1).

Tabel 3.1. Gemeten opbrengsten voor 4 behandelingen in 2009 en 2010.

Gemeten	vrucht vers kg m ⁻²	% tov SON-T	vrucht vers kg m ⁻²	% tov SON-T
	2009		2010	
onbelicht	4.38	75	4.61	79
SON-T	5.83	100	5.80	100
RB	4.66	80	5.43	94
bl	4.33	74	4.58	79

**Figuur 3.1.** Ondanks relatief lage lichtintensiteiten veel goede bloemen en goede vruchtzetting in 2010.

Kenmerken teelt 2008-2009

Normaal wordt de eerste bloem in de 4e oksel na de splitsing gezet. Door het lichte weer in 2008 werd de eerste bloem al in de derde oksel gevormd. De splitsing is in de oksel van blad 8. In de SON-T is het probleem de slechte bloem en slechte zaadzetting en de vruchten waren kort.

De blaadjes in de kop en de knoppen van de rd-boven behandeling zijn aan de kleine kant en het gewas staat te donker. Deze symptomen duiden op een assimilaten overschot, maar dat kon niet overtuigend worden aangetoond.

De onbelichte teelt en de blauwe LED behandelingen hadden een slechte zetting. Blauwe LED's gaven meer bloemen maar minder zetting (40% van de stengels met 1 vrucht). Een opvallend positief effect van de blauwe LED's behandeling en in mindere mate ook de rood-blauwe tussen behandeling, later in het seizoen, werd

veroorzaakt door twee onafhankelijke effecten op de berekende gewasfotosynthese: 1 een toename van het bladoppervlak en lichtonderschepping en 2 een stimulering van de huidmondjesgeleidbaarheid en de fotosynthese capaciteit.

Blauw licht gaf in het algemeen een omgekeerd effect dan wat verwacht mag worden. De planten reageerden op blauw licht met het maken van zonnebladeren en het aanleggen van langere internodiën. Het bladoppervlak nam, vooral aan het eind van de winter sterk toe onder de blauwe LED's, ondanks de lage intensiteit van de assimilatiebelichting. Voor een deel is dit een effect dat zijn oorsprong heeft in de relatief lage plantbelasting waardoor er meer assimilaten in de vegetatieve groei werden geïnvesteerd.

Planten onder langedag licht waren veel te generatief. Het leek een zomergewas met veel bloemknoppen. De internodiën zijn relatief kort. De bladeren waren relatief klein. Het gewas is niet "blond", de bladeren hebben niet de gewenste lichte kleur. LED-rd-boven (korte dag) voldoet beter aan de gewenste kleurstelling van de jonge bladeren. In de langedag behandeling was op de plantbelasting op 22 januari te hoog door de stimulering van de zetting. Er hingen op dat moment 3-4 vruchten per plant.

Wat was er anders in 2009-2010?

Er waren 3 kenmerkende verschillen in 2009-2010 ten opzichte van 2008-2009:

- vervroeging assimilatiebelichting met 1 maand.
- generatieve sturing met temperatuur.
- donkerder weer.

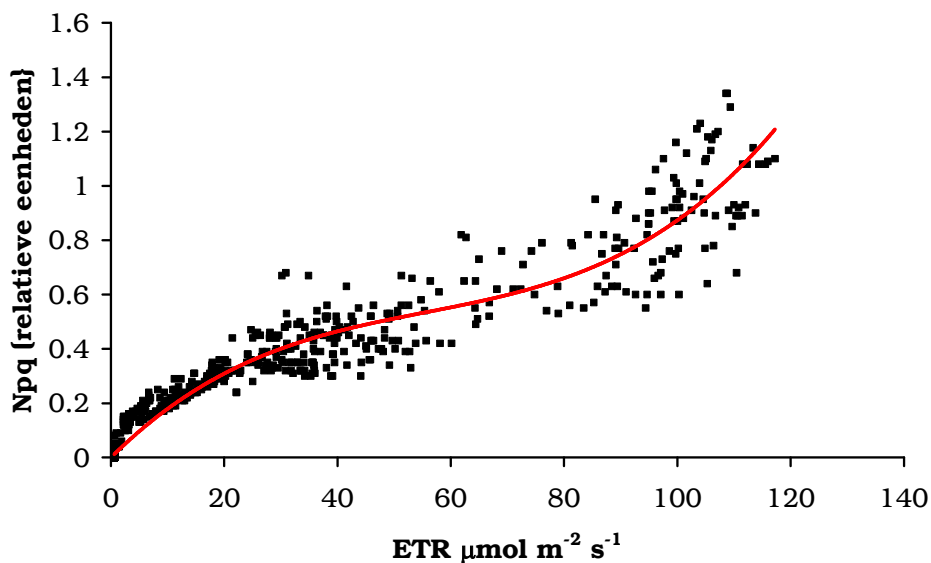
De vervroeging van de assimilatiebelichting had tot gevolg dat er een snelle bloei en een vroege zetting was. De vele vruchten konden echter alleen uitgroeien door met temperatuur te sturen. De lage intensiteit van het natuurlijke daglicht liet een snellere zetting van vruchten niet toe. Door de vijfde oksel leeg te halen werd de concurrentie beperkt. Effecten van LED werden overschaduwd door effectieve temperatuursturing (paragraaf 2.6.1).

3.0.2 LED tussenbelichting

De experimenten met LED tussenbelichting werden afgebroken omdat het niet lukte om een goede lichtverdeling te realiseren. De Bladeren dichtbij de armaturen werden lichtverzadigd terwijl de bladeren iets verder ervandaan geen licht ontvingen (figuur 2.1). De lichtverzadigde bladeren benutten het licht met een lage efficiëntie. Bovendien trad er bladverbranding op. De tussenbelichting was ook vanuit teelttechnisch oogpunt een onhandig. Het gewas wordt beschadigd door beweging van de armaturen en het optakelen om de groei van de kop bij te houden. De armaturen waren ook een obstakel bij oogstwerkzaamheden en het indraaien van groeiende scheuten. Het was al snel duidelijk dat tussenbelichting geen optie is bij de huidige teeltpraktijk. De behandelingen met tussenbelichting werden om die reden afgebroken.

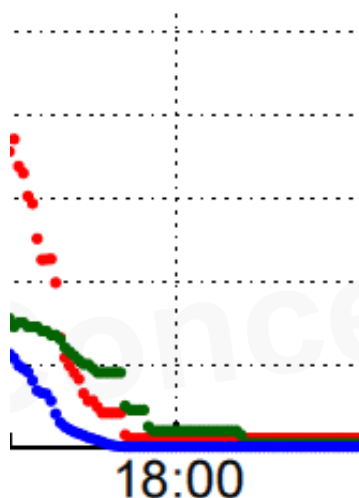
Vitaliteit (Npq)

Hoe weten we dat condities tijdens de teelt steeds optimale waren? Uit de fluorescentiemetingen met de plantivity (figuur 4.4) kan een interessante parameter, die informatie geeft over de vitaliteit van de planten, worden berekend. Deze fluorescentie parameter (Npq) kan worden gezien als het toerental van de fotosynthese motor. Als dit toerental te hoog oploopt bij een lage fotosynthese, is er sprake van stress.

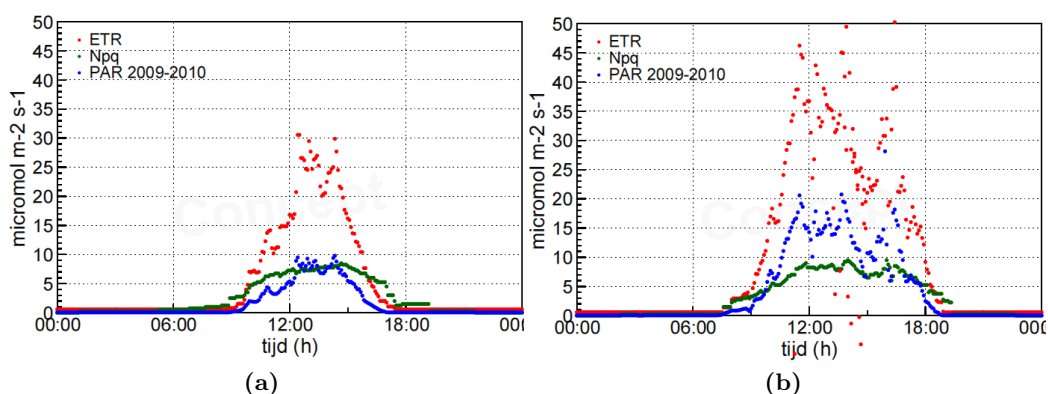


Figuur 4.1. Verband tussen fotosynthese capaciteit (ETR) ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en Npq voor alle metingen tijdens het seizoen 2009-2010.

Een toename van het toerental (Npq), bij hogere lichtintensiteiten, leidt tot meer stress maar ook tot meer productie. Zolang beiden in evenwicht zijn is de situatie optimaal. De gemeten waarden tijdens de teelt 2009-2010, variërend tussen 0 en 1,5 bij een ETR tussen 0 en $120 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, duiden op een actief gewas, met een hoge vitaliteit. In de middag was er als gevolg van de temperatuurdaling een lichte toename van de Npq (figuur 4.2). In 2008-2009 trad er wel stress op met name bij de langedag LED behandeling en de onbelichte teelt.



Figuur 4.2. Detail opname van het verloop van ETR, PAR en Npq. We zien een relatief constante Npq aan het eind van de dag terwijl de lichtintensiteit (blauwe lijn) en PAR (rode lijn) naar nul gaan. Dit is het gevolg van de temperatuurdaling aan het eind van de dag, waardoor enige stress ontstaat.



Figuur 4.3. ETR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en Npq op 7 januari (a) en 14 maart (b) 2010

Met de Plantivity werd de fotosynthese capaciteit in de rd-boven behandeling continu geregistreerd. In Figuur 4.3 is het fotosyntheseverloop op twee karakteristieke dagen weergegeven. De verhouding tussen de hoogte van de rode punten en de blauwe punten is de lichtbenuttingsefficiëntie. We zien dat die verhouding op een relatief donkere dag (figuur 4.3a), groter is dan de verhouding op een lichte dag (figuur 4.3b). Dat is een logisch gevolg van het feit dat licht minder efficiënt wordt benut bij een toename van de lichtintensiteit. Bij een hogere fotosynthese mag in principe het toerental (Npq = groene punten) ook toenemen zonder dat er een toename van stress optreedt. In dit geval was die toename er niet en dat duidt erop dat de plant de hoeveelheid licht, onder de heersende gunstige omstandigheden, makkelijk kan verwerken. Na bestudering van alle Npq en ETR data (data hier niet getoond) kon als conclusie gesteld worden dat er zicht in de hele teelt geen stresssituaties van betekenis heeft voorgedaan.



Figuur 4.4. Meetopstelling voor registratie van ETR en Npq (onderste sensor) en bladtemperatuur (bovenste sensor)

Modelberekeningen

Een goed geparameteriseerd simulatiemodel, is met name een uitstekend gereedschap om *relatieve* oorzaak het relatieve belang van allerlei processen voor de uiteindelijke opbrengst en de interacties met omgevingsfactoren op te sporen. De berekeningen met de modellen zijn een soort “virtuele experimenten”. Virtuele experimenten hebben drie grote voordelen: ze zijn goedkoop, ze zijn snel en het is mogelijk om combinaties van teelteigenschappen en planteigenschappen te maken die experimenteel nooit te realiseren zouden zijn vanwege de kosten en de benodigde tijd.

Het is bijvoorbeeld mogelijk om in enkele minuten voor een bepaald jaar verschillende strategieën voor belichting, temperatuur en gewas management met elkaar te vergelijken. Zo’n aanpak is misschien niet voor 100% betrouwbaar maar wel voor 80% en dat is een lonende exercitie gezien de snelheid en de lage kosten die aan virtuele experimenten zijn verbonden. Bovendien zijn reële praktijk experimenten met een betrouwbaarheid die hoger is dan 80% ook dun gezaaid. Het succes van een simulatiemodel hangt af van de mate van samenhang tussen de beschreven processen, opties voor het operationeel hanteren van teeltmaatregelen (aanhouden van scheuten, verwijderen van bloemen etc.) en de eigenschap om met zo min mogelijk parameters een zo hoog mogelijke betrouwbaarheid te realiseren.

Tabel 5.1. Gesimuleerde opbrengsten in 4 behandelingen in 2009 en 2010.

Gemeten	vrucht vers kg m ⁻²	% tov SON-T	vrucht kg m ⁻²	% tov SON-T
Gesimuleerd	2008-2009		2009-2010	
onbelicht	5.36	78	4.14	67
SON-T	6.86	100	6.23	100
RB	5.86	85	6.19	99
bl	4.96	72	5.15	83

Het model Paprika Explorer berekent de groei en productie van paprika op basis van de effecten die het microklimaat en het teeltmanagement hebben op assimilatie en plantbalans. De berekeningen analyseren het samenspel tussen de onderliggende

belangrijke processen. De Explorer modellen zijn zodanig geconstrueerd dat er slechts 7 plant- cq ras-afhankelijke parameters hoeven te worden bepaald. De belangrijkste zijn gerelateerd aan fotosynthese, blad en plantmorfologie en de sink functie van de vruchten. De experimentele bepalingen die daarvoor nodig zijn, werden in het seizoen 2008-2009 bepaald (Nederhof *et al.*, 2010) en voor zover van belang voor deze studie in bijlage 6 opgenomen.

Tabel 5.2. Gemeten en gesimuleerde opbrengsten en lichtbenutting in 4 behandelingen. Gram vers mol^{-1} is het geoogste versgewicht gedeeld door de totale PAR som aan de kop van het gewas

	Gemeten		Gesimuleerd	
	vrucht vers kg m^{-2}	% tov SON-T	vrucht vers kg m^{-2}	% tov SON-T
onbelicht	4.61	79	4.14	67
SON-T	5.80	100	6.23	100
RB	5.43	94	6.19	99
bl	4.58	79	5.15	83
	g vrucht vers mol^{-1}	% tov SON-T	g vrucht vers mol^{-1}	% tov SON-T
onbelicht	4.86	100	4.36	84
SON-T	4.87	100	5.22	100
RB	4.86	100	5.53	106
bl	4.45	91	5.00	96

De belangrijkste conclusies van deze studie zijn weergegeven in tabel 5.2. LED belichting heeft geen meerwaarde boven SON-T zolang de efficiëntie en de gebruikskosten niet beter uitpakken dan die voor SON-T. Deze conclusie kan na 2 jaar studie onweerlegbaar worden getrokken (tabel 5.1). De LED geïnduceerde generatieve sturing, die in 2008-2009, werd waargenomen was in 2009-2010 niet aantoonbaar. Weliswaar was er een vroege bloei en een goede zetting onder LED, zowel in rd-boven als bl-boven, maar die was niet beter dan onder SON-T. Alle behandelingen werden door de generatieve actie van de temperatuurverlaging overschaduwd. De vroege productie kon op door de temperatuursturing ook bij de lagere lichtintensiteiten worden gehandhaafd.

Een optie die nog steeds enig perspectief biedt is sturing met blauwe LED's gecombineerd met temperatuur. De zetting met de blauwe LED's was in 2009-2010 uitstekend ondanks de lage lichtintensiteit en de vroege bloei. 80% van de stengels droeg eind januari vruchten tegenover slechts 40% in 2008-2009. De sterke effecten op de vegetatieve groei onder blauw bieden aanknopingspunten om gericht te sturen. Dan moeten er wel meer kennis worden vergaard over stuurlicht en de timing van sturing. Het blauw licht effect werd waargenomen (Nederhof *et al.*, 2010) in 2009 maar niet in 2010.

De gesimuleerde opbrengsten geven een overschatting van de feitelijk gerealiseerde opbrengsten (tabel 5.2). Dit wordt voornamelijk veroorzaakt doordat een deel van de positieve effecten, die aan de LED's wordt toegeschreven op basis van procesmetingen, in realiteit niet volledig wordt geëffectueerd. De gemeten 15% hogere lichtbenutting in het rode deel van het lichtspectrum, lijkt bijvoorbeeld niet te worden gehaald. Daarnaast is het model zelf nog niet helemaal in staat om voor

de eerste kritische maanden van de productie, waarbij een kleine afwijking van de vroegheid al grote gevolgen heeft voor de productielijnen, alle effecten volledig te verdisconteren.

De lagere voorspelde productie in 2009-2010 voor de onbelichte teelt wordt veroorzaakt door een veronderstelde vertraging van de bladontwikkeling aan het begin van de teelt (lagere temperatuur). Deze vertraging werd echter niet waargenomen. Ook het temperatuureffect op de fotosynthese werkt bij paprika minder sterk dan aangenomen in het model. Aanvullende studies naar momentane en adaptieve effecten van temperatuur op de fotosynthese zijn daarvoor vereist. Ook een selectief effect van temperatuurverschillen over de dag zijn nog niet in het model opgenomen omdat er te weinig experimentele gegevens zijn.

Een analyse van die balans is weergegeven in figuur 5.1. De sinkregulatie van de vruchten is voor paprika erg belangrijk. De vruchten krijgen in het model een ontwikkelingsafhankelijke potentiële groeisnelheid toegewezen. De assimilaten worden vervolgens verdeeld naar rato van de berekende sinks. Er worden dus 2 variabelen berekend: 1 de potentiële sink-afhankelijke vruchtgroei en 2 de gerealiseerde vruchtgroei. Op die manier kun je dus zien of het gewas sink- dan wel source-gelimiteerd is.

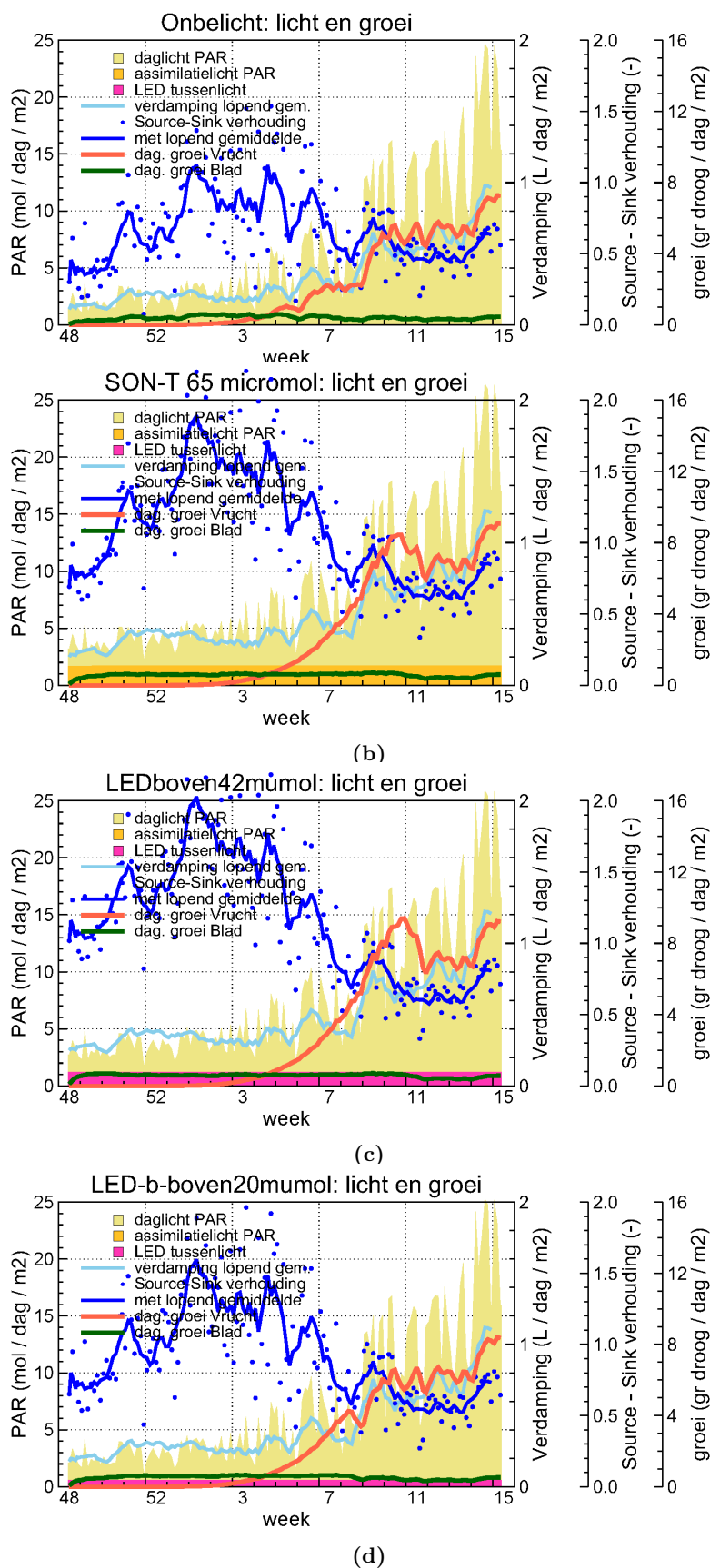
De blauwe stippen geven inzicht in de verhouding tussen assimilaten-aanbod en assimilaten-benutting en de blauwe lijn is het voortschrijdend weekgemiddelde. Een waarde groter dan 1 (op de meest rechtse as) betekent dat er meer assimilaten worden aangemaakt dan er nodig zijn voor de groei van de verschillende 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 rose. De verdamping is in grijs-blauw weergegeven (liter dag⁻¹).

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. Over de gehele linie zien we in de onbelichte teelt (figuur 5.1a) een tekort aan assimilaten (met een verhouding van source/sink kleiner dan 1) en bij de belichte teelten ontstaat er een tekort rond week 5 in 2010. Dit is in goede overeenstemming met de observaties dat rond die week een kritische situatie kan ontstaan. De kritische situatie ontstaat door de exponentiële toename van de plantbelasting tussen week 4 en week 11 (rode lijnen) in figuur 5.1. Daarna ontstaat er een evenwicht doordat er evenveel geoogst wordt als er bijgroeit.

De sterke bladgroei en de daarmee geassocieerde hoge lichtinterceptie in de bl-bovenbehandeling zorgden er in 2009-2010 voor dat de source-sink verhouding in die behandeling beter is dan in de onbelichte teelt (figuur 5.1d). De waarnemingen zijn geheel in overeenstemming met de eerder verrichte simulaties voor het seizoen 2008-2009.

Er is een opvallend verschil tussen de plantbalans in 2008-2009 en die van 2009-2010. In 2010 was het assimilatenoverschot in de aanloopfase groter, ondanks de lagere lichtintensiteit. Dit wordt veroorzaakt door de temperatuurmaatregelen, bedoeld om abortie te voorkomen het verkrijgen van grotere vruchten. De overgang van een assimilatenoverschot naar een tekort tussen week 5 en week 11 was in 2010 echter ook dramatischer dan in 2009. Door de vijfde oksel leeg te halen kon een problematische terugval in de plantbalans worden voorkomen.

Pas na week 14 (half april) zien we een herstel. Dit herstel was ook later dan vorig jaar.



Figuur 5.1. Licht en groei voor 4 behandelingen. Verdere uitleg in de tekst

Bijlage proceswaarnemingen

De context van de experimenten is gefocust op een kwantitatief begrip van de wijze waarop omgevingsfactoren invloed uitoefenen op de meest belangrijke productie-bepalende processen. Met dit kwantitatieve begrip kunnen we snel anticiperen op nieuwe situaties, zowel door nieuwe technische mogelijkheden als nieuwe rassen.

Om dit te illustreren zijn een aantal processen en hun lichtafhankelijke interacties hieronder beschreven. De CO₂-opname van bladeren kan direct gemeten worden met behulp van gasanalyse.

6.1 V_cmax en J_{max}

De belangrijkste processen in de fotosynthese zijn de snelheid van CO₂ binding (V_cmax) en de fotosynthese capaciteit (J_{max} = maximum ETR). V_cmax werd bepaald uit de CO₂ response curve en J_{max} uit de fluorescentiemetingen.

Een speciaal ontwikkeld apparaat om fotosynthese aan intacte bladeren te meten, de LiCor-6400, kan zodanig geprogrammeerd en gekalibreerd worden dat automatisch in ongeveer 40 minuten een licht response curve gemeten wordt, door een reeks van oplopende lichtintensiteiten op het ingeklemde blad te geven (figuur 6.1).

De hoge efficiëntie wordt voornamelijk veroorzaakt door de hoge huidmondjes geleidbaarheid (zie sectie 6.2). In dat geval is er altijd voldoende CO₂ in het blad. In het geval van een lage huidmondjesgeleidbaarheid (G_s) daalt de CO₂ concentratie in het blad, waardoor de fotorespiratie toeneemt en de efficiëntie daalt (Gaastra, 1959). Als de situatie in de kas optimaal is zal de relatie tussen ETR en de fotosynthese een keurige rechte lijn zijn. Er waren kleine verschillen tussen de behandelingen (tabel 6.1), die voor een deel kunnen worden teruggevoerd op verschillen in absorptie van het licht (paragraaf 6.1.1), die door de meting met de LiCor ten onrechte worden toegeschreven aan reële verschillen in J_{max}. rd-boven belichting heeft een 10% hogere maximale efficiëntie (J_{max}). Dit effect komt voornamelijk tot uiting bij hoge lichtintensiteiten in het voorjaar en in de zomer. Voor wintercondities is J_{max} van minder belang. Uit gevoeligheidsanalyses over het groeiseizoen levert de hogere J_{max} slechts 1%–2% hogere productie op.

6.1.1 Lichtonderschepping

De fotonen flux van daglicht, LED-belichting en SON-T wordt in 3 fracties verdeeld: 400–500 (blauw), 500–600 (groen) en 600–700 (rood). Op basis van de gemeten



Figuur 6.1. 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_2 concentratie, temperatuur en de relatieve luchtvochtigheid door een computerprogramma ingesteld en gevarieerd. Hierdoor kan de reactie van de assimilatie op deze veranderingen bepaald worden

Tabel 6.1. Waarden voor J_{max} en V_{max} ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) in de verschillende behandelingen.

	J_{max}	V_{max}
Onbelicht	161	75
SON-T	174	80
rd-boven	196	82
rd-tussen	171	71
bl-boven	171	73
bl-tussen	147	71

specifieke absorptie van de bladeren, kan het effect van de belichtingsstrategie op de totale lichtabsorptie van het gewas worden doorberekend. De verschillen in absorptie ontstaan door veranderingen in bladdikte en de aanmaak van verschillende pigmenten.

De absorptie is het hoogst (84%) voor de rood blauwe LED's gevolgd door SON-T (80%) blauwe LED's (78%) en onbelicht (76%). Een lange belichting (zowel rd-tussen als bl-tussen) stimuleren de chlorofyl aanmaak.

Tabel 6.2. Huidmondjes geleidbaarheid ($\text{mmol mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) gemiddeld voor 2 ochtenden en 2 middagen met tussen haken de standaardafwijking.

	$\text{Gs mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	
	Gemiddeld	Avond
Onbelicht	180, (14)	49.9,(10.8)
SON-T	217, (7)	69.5,(10.5)
rd-boven	187, (5.4)	40.6, (9.3)
rd-tussen	117, (19.2)	28.3, (7.6)
bl-boven	140, (12.1)	57.9 (7.3)
bl-tussen	157, (9.8)	57.9 (7.3)

6.2 Huidmondjes geleidbaarheid

De huidmondjes geleidbaarheid is een belangrijke grootte die bepaalt of er voldoende CO_2 kan worden opgenomen in het blad. Een hoge geleidbaarheid betekent dat de huidmondjes ver open staan en dat de fotosynthese niet beperkt wordt door de opname van CO_2 in het blad. Een hoge geleidbaarheid betekent ook vaak een hoge verdamping. Hierdoor zijn verdamping en fotosynthese (bij gelijk dampdruk deficit) aan elkaar gekoppeld. Over de dag is een duidelijk patroon te herkennen met een geleidelijke sluiting in de loop van de middag. In de ochtend is een geleidelijk toename van de geleidbaarheid. Voor details zie [Nederhof *et al.* \(2010\)](#). Het patroon van de geleidbaarheid over de dag was voor alle behandelingen gelijk maar de onbelichte teelt had duidelijk meer moeite om in de ochtend op gang te komen. Dit duidt erop dat assimilatiebelichting een positief heeft op de geleidbaarheid. Deze metingen werden verricht in januari en maart. Later in het seizoen was vooral het daglicht bepalend voor de opening. De geleidbaarheid is het hoogst bij SON-T, zowel gemiddeld als aan het eind van de dag.

Een langedag belichting liet in 2009 ook hier een duidelijk negatief effect zien. De geleidbaarheid was aanzienlijk lager dan in de andere behandelingen. De lage geleidbaarheid in de langedag LED behandeling en de hoge Npq wijzen in de richting van een onbalans in de assimilatenvoorziening en een probleem met het verwerken van assimilaten in het blad. Dit wil overigens niet zeggen dat er dan een assimilatenophoping optreedt. Bij analyse van bladeren op zetmeel werden voor die hypothese geen aanwijzingen gevonden. Op basis van de Npq data kan worden gespeculeerd dat langedag een remmende werking heeft op de fotosynthese waardoor ophoping van assimilaten niet optreedt.

Een lange dag werkt bij paprika sterk vegetatief en veroorzaakt degeneratie van bloemen. Mogelijk kan een verlaging van de voornacht deze vegetatieve impuls tegengaan waardoor toch langer belicht kan worden. Opmerkelijk is dat 24 uur belichten vooral in de zomer lijkt te werken. Waarschijnlijk is lichtintensiteit dan voldoende om zowel voor de vruchten als voor de vegetatieve impuls assimilaten aan te kunnen maken, waardoor een langdurig positief effect op de plantbalans blijft gehandhaafd. Producties tot 3 kg per week zijn dan mogelijk. Dit aspect wordt onderzocht bij Jack Alblas in Honselersdijk.

Vroeg in de ochtend staan de huidmondjes bij de belichte planten iets verder open t.o.v. Onbelicht. Dit effect is echter gering. Daglicht heeft verreweg het grootste effect op de toename van de geleidbaarheid. Er was geen specifiek effect voor rd-boven, bl-boven of SON-T. Het effect is het sterkst bij de onbelichte planten.

Een dagverlenging heeft zowel aan het eind, als aan het begin van de natuurlijke dag enige zin. Opvallend was dat dagverlenging met blauwe LED's het meeste effect sorteerde ([Nederhof *et al.*, 2010](#)).

Referenties

- Gaastra, P., 1959. Photosynthesis of crop plants as influenced by light, carbon dioxide, temperature and stomatal diffusion resistance. Meded. Landbouwhogeschool Wageningen 59, 1–68.
- Nederhof, E., de Boer, P., Schapendonk, A., Pot, S., Dueck, T., 2010. Stuur led's en energiebesparing bij paprika. Verslagen Productschap Tuinbouw en Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit. In kader van Kas als Energiebron PT13417, 106.