



Tomaten telen onder LED belichting in de praktijk

Vergelijking belichtingsystemen bij RedStar Trading

Elly Nederhoff, Patricia de Boer, Ad Schapendonk, Sander Pot & Tom Dueck





Tomaten telen onder LED belichting in de praktijk

Vergelijking belichtingsystemen bij RedStar Trading

Elly Nederhoff¹, Patricia de Boer¹, Ad Schapendonk², Sander Pot² & Tom Dueck¹

Met medewerking van:

Margreet Bruins¹, Johan Steenhuizen¹, Frank Kempkes¹, Athanasios Sapounas¹, Steven Driever¹,
Wouter Verkerke¹, Mary Warmenhoven¹, Hans Janssen¹, Jan Snel¹ & Leo Marcelis¹

¹ WUR glastuinbouw

² Plant Dynamics BV

© 2010 Wageningen, Wageningen UR Glastuinbouw

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 Wageningen UR Glastuinbouw

PT_nummer 13416



Ministerie van Landbouw, Natuur en
Voedselkwaliteit



Wageningen UR Glastuinbouw

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

Inhoudsopgave

pagina

Deel 1: Gewaswaarnemingen

Voorwoord	3
1 Samenvatting	5
2 Inleiding	7
3 Meetlocaties	9
4 Licht en belichting	11
5 Plant en stengeldichtheden	19
6 Gewasgroei	21
7 Productie	25
8 Energie en rendement	31
9 Discussie	33
10 Literatuur	37
Bijlage I. Plantwaarnemingen	39
Bijlage II. Belichtings Effectiviteit	41

Deel 2: Scenario analyses

1. Samenvatting	53
2. Vergelijking SONT en LED	55
3. Source	57
4. Scenario analyses	66
5. Literatuuronderzoek	77

Deel 1:

Gewaswaarnemingen

Voorwoord

In een praktijkproef met tomaat in het seizoen 2008/2009 is een vervolg gegeven aan onderzoek aan LED belichting vergeleken met SON-T belichting in de praktijk. Beoogd wordt het in kaart brengen van de effecten van LED licht op productie, gewasmorfologie, kasklimaat en rendement. Het onderzoek vond plaats bij RedStar Trading van de gebroeders van der Kaaij in Tinte, en werd uitgevoerd door WUR-glastuinbouw en Plant Dynamics BV. Het onderzoek werd gefinancierd door PT (nr. 13416) en LNV in het kader van programma 'Kas als Energiebron'. De LED lampen werden geleverd door Lemnis Lighting BV.

Wij bedanken Dirk van der Kaaij, Hugo Goos, Krijn v/d Berg en Willem van Dijk (RedStar Trading) voor de medewerking en leveren van klimaatdata en plantregistraties, Matthijs Beelen (LTO) en Jeroen van Velzen (Lemnis Lighting BV) voor vruchtbare discussies over LED onderzoek.

De auteurs
januari 2010

1 Samenvatting

Voorgeschiedenis

Bij de eerste introductie van LED voor de glastuinbouw in 2007 werd gedacht dat LEDs bijzonder efficiënt en effectief zouden zijn. Efficiënt houdt in energiezuinig, dus dat meer licht en minder warmte geproduceerd wordt per hoeveelheid elektriciteit. Effectief houdt in dat LEDs vanwege de lichtkleur een hogere fotosynthese zouden geven.

Vanwege de verwachte hogere effectiviteit van LED belichting heeft Redstar Trading bij de LEDs slechts de helft van de SONT belichtingscapaciteit geïnstalleerd: 92 micromol/m²/s LED terwijl het bij SONT 184 micromol/m²/s moest worden. Later werd bekend dat de intensiteit van SONT zelfs hoger was. De gedachte bij deze proefopzet was dus dat de LED installatie ongeveer hetzelfde resultaat zou geven als de hoge intensiteit SONT, en/of dat de LEDs aanzienlijke energiebesparing zou opleveren. Voor Redstar Trading zou dat betekenen dat meer stroom uit de WKK kon worden verkocht (de Visser, 2009).

In 2008 werd bekend dat LEDs ook veel warmte produceren en dus minder energie-efficiënt zijn dan gedacht (Dueck & Pot, 2008). In 2009 werd bekend dat het voordeel van de betere lichtkleur voor fotosynthese op gewasniveau slechts vrij gering is: ca 5-10% (Snel *et al.*, 2009). Dit onderzoek was opgezet in 2008 om uit te wijzen hoe LED belichting presteert in vergelijking met SONT belichting onder praktijkomstandigheden.

Proefopzet

Doelstelling van dit project is om bij tomaat onder praktijkomstandigheden de effecten op productie en rendement te analyseren van belichting met LED lampen versus belichting met SONT lampen. Belichting met LEDs met intensiteit 92 micromol/m²/s werd vergeleken met belichting met SONT lampen met een veronderstelde intensiteit van 207 micromol/m²/s. Een derde belichtingsbehandeling, namelijk SONT met intensiteit 45 micromol/m²/s, is later ook opgenomen in een aantal vergelijkingen. De behandelingen worden hier aangeduid als: SONT-207, LED-92 en SONT-45.

De drie teelten stonden in drie verschillende kassen (locaties Aelbrechtseweg, Ruigendijk en Westerlandseweg). Bij SONT-207 werd geplant op 13 november 2008, en bij LED-92 en SONT-45 werd door omstandigheden pas geplant op 5 december 2008. De drie gewassen ondervonden verschillend licht- en groeiomstandigheden in hun eerste fase, en verschillende belichtingsstrategie en klimaatregeling tijdens de teelt. Het belangrijkste was het verschil in belichtingsniveau. De verschillen gevonden door vergelijking van SONT-207 en LED-92, werden met name veroorzaakt door het grote verschil in lichtintensiteit, en mag niet worden toegeschreven aan het lichttype (LED of SONT).

Resultaten – Plant waarnemingen

Deel 1 van dit rapport bevat informatie over meetlocaties, belichtingsbehandelingen, stengeldichtheden, lichtmetingen, gemeten plantparameters, productie en energie. SONT-207 heeft steeds een voorsprong vanwege 3 weken vroegere plantdatum. Verder liggen de resultaten in volgorde van de hoeveelheid additioneel licht, dus bijna alle resultaten waren het hoogste of snelste bij SONT-207, gevolgd door LED-92 en het laagst of langzaamst bij SONT-45. Dit was het geval voor gewasgroei, bloei, zetting, vruchtgroei, ontwikkeling, kleuring, uitgroeiduur, productie en zetmeelgehalte. Vrijwel alle gevonden effecten zijn verklaarbaar zijn door het grote verschil in lichtniveau, en mogen niet worden toegeschreven aan het lichttype (LED of SONT). Ook de vele andere verschillen in omstandigheden (kas, plantdatum, stengeldichtheden, teeltcondities) en belichtingsregiem hebben invloed gehad op de productie. Dit bemoeilijkt de vergelijking. Daarom zijn modelberekeningen uitgevoerd om de effecten van LED-92 en SONT-207 te ontrafelen (zie deel 2).

Ontwikkelingssnelheid (snelheid van bloei en bladafsplitsing) was meestal hoger bij SON-T dan bij LED-92, althans tot week 10. Dit duidt op hogere temperatuur van het groeipunt bij SONT-207 dan bij LED-92. Of dit kwam door de belichting (m.n. lichtniveau) of door klimaatregeling is onduidelijk. Handmatige metingen aan gewastemperatuur konden geen verschil vaststellen. Dit is mogelijk een gevolg van koeling door verdamping, wat bleek uit grotere huidmondjes opening bij SONT-207 dan bij LED-92 (zie Deel 2). Het groeipunt verdampt niet, en kan een hogere temperatuur hebben gehad dan de bladeren, maar dit is niet gemeten.

Rendement. Rendement van LED belichting omvat productie en energieverbruik (elektra en gas). Het bleek niet mogelijk om in deze proef het energieverbruik nauwkeurig te kwantificeren en een zinvolle uitspraak te doen over het rendement van LED t.o.v. SON-T. LED-92 verbruikte weliswaar veel minder elektriciteit, maar had ook lagere productie. Er kan een subtiel verschil in energiebehoefte (verwarming) bestaan tussen LED en SON-T belichting, als gevolg van optimalisatie (afstemming van temperatuur op de behoefte van het gewas) en als gevolg van afluchten van overtollige warmte bij SON-T. Dit relatief subtiele verschil in energiebehoefte kan niet worden bepaald door vergelijking van LED-92 en SONT-207, vanwege de grote verschillen in lichtintensiteit. Ook speelt mee dat de drie locaties werkten met WKKs, die ook stroom leverden aan het lichtnet. Het belichtingsregiem werd mede bepaald door beschikbaarheid en prijs van stroom.

Belichtings Effectiviteit van LEDs zou berekend kunnen worden uit 'gram meerproductie per mol bijbelichting' van LED t.o.v. SON-T (zie Bijlage II). Dit vereist dat de belichtingsintensiteit en –duur ongeveer gelijk zijn, en dat de basisbelichting (natuurlijk licht) en basisproductie (als gevolg van natuurlijk licht) goed bekend zijn uit een behandeling 'Onbelicht'. Dit was niet het geval in deze proef. Ook hiervoor waren berekeningen met het simulatie-model van Plant Dynamics nodig (zie Deel 2).

Resultaten – Scenario analyses

Deel 2 geeft de resultaten van gemeten lichtonderschepping, huidmondjesgeleidbaarheid, fotosynthese en onderliggende parameters, en ook modelberekeningen uitgevoerd met het Optomaat Explorer model. De maximale fotosynthesesnelheid was het hoogst bij SONT-207, vooral in de winter. Lichtabsorptie door het blad bleek weinig verschillend. Huidmondjesgeleidbaarheid was iets hoger bij SONT-207 dan bij LED-92. De gevonden verschillen werden vooral toegeschreven aan lichtintensiteit en niet aan het type licht of lichtkleur. Volgens het model waren de effecten van warmtestraling in SON-T (en het ontbreken ervan in LED) gering.

Om de effecten van LED en SON-T belichting te kwantificeren en vergelijken zijn de gemeten teeltcondities en plantparameters ingevoerd in model Optomaat (door Plant Dynamics). Hierbij was het nodig om de groeiomstandigheden te 'synchroniseren' op een plantdatum. Bij synchronisatie op 5 december, is de berekende meerproductie per hoeveelheid extra licht ('gram per mol') ca 5% in het voordeel van LED. Echter bij synchronisatie op plantdatum 13 november, heeft LED juist een 10% lagere effectiviteit dan SON-T. Hieruit blijkt het belang van de teeltomstandigheden, en de moeilijkheid om een vergelijking te maken als de groeiomstandigheden verschillend waren. Het berekende voordeel van LED belichting in deze proef bij Redstar Trading varieert van -10% tot +5%. Dus LED produceerde hier maximaal 5% meer dan SON-T bij gelijk veronderstelde groeiomstandigheden.

2 Inleiding

Transitiepad energiebesparing

Licht is een transitiepad naar energiebesparing in de glastuinbouw. Belichting is nodig om in de winter in Nederland tomaten, rozen en andere gewassen te kunnen telen. De winter/voorjaar periode wordt steeds belangrijker voor telers, omdat in de zomer de prijzen steeds lager worden. Belichting in kassen wordt toegepast op zeker 2500 ha. In de groenten wordt vooral belicht bij tomaten en bij opkweek van jonge planten.

Tot 2007 werden vrijwel uitsluitend hoge druk natrium lampen (SON-T lampen) gebruikt voor belichting. Sinds 2008 wordt geëxperimenteerd met LED lampen. Diverse proeven in 2008/2009 moesten uitwijzen of LEDs een goed alternatief zijn voor SON-T lampen. Potentieel hebben LED lampen een aantal teeltkundige en energetische voordelen.

Momenteel zijn LED lampen nog niet efficiënter dan SON-T lampen (wb verhouding tussen lichtopbrengst en elektriciteitsverbruik), maar wereldwijd wordt hard gewerkt aan verbetering van die efficiëntie. Ook worden de teeltsystemen steeds efficiënter. Verder bieden LEDs het voordeel van gespreide input van warmte: de kleine modules verspreiden de warmte goed in de kas. Zelden hoeft warmte te worden afgelucht, zoals bij SON-T lampen vaak het geval is. Vervanging van SON-T door LEDs zal daarom in de toekomst energie besparen en de uitstoot van CO₂ reduceren, en helpen om op energie-efficiënte wijze de productie in de winter te verhogen.

Doelstelling van dit onderzoek

De doelstelling van dit onderzoek is een analyse te geven van de effecten van LED belichting versus SON-T belichting op een jaarrond teelt van tomaat in de praktijk. Het gaat vooral om het rendement van LED versus SON-T met betrekking tot productie, terwijl warmte effecten op fotosynthese en verdamping expliciet worden meegewogen. Vragen zijn:

- Is LED-belichting een energiezuiniger lichtbron dan SON-T?
- Wat is het effect van de belichtingsbron op de fotosynthese, temperatuurverdeling en verdamping?
- Welke teelt(technische) maatregelen kunnen worden ingezet om optimaal te telen?
- Wat zijn de indirecte (o.a. stuurlicht) effecten op fysiologische processen en opbrengst van het gewas?

Optimalisatie

'Optimalisatie' van de teeltomstandigheden houdt in dat het klimaat wordt aangepast aan wat het gewas nodig heeft onder de betreffende belichting. Dit omvat aanpassing van luchttemperatuur, luchtvochtigheid, CO₂, watergift, drain, EC, samenstelling van de voedingsoplossing, bladsnoei en alles wat verder nodig is om de plant in balans te houden. Omdat in proef in de praktijk lag en op heel grote oppervlaktes (minimaal 8.000 m²), werden uiteraard alle teeltomstandigheden door de telers (bedrijfsleiders) geoptimaliseerd.

Effectiviteit van LED licht

Ten tijde van de aanleg van de LED installatie was de veronderstelling dat LED-licht 2 - 4 keer zo effectief is als SON-T licht. Daarom heeft Redstar Trading toen gekozen voor een veel lager belichtingsniveau van LEDs dan van SON-T. Ervaring in de praktijk en onderzoek van Dueck & Pot in 2008 toonde aan dat de hoge verwachting t.a.v. LED licht niet waargemaakt werd. Deze proef kan daar antwoord op geven. Echter, vanwege verschil in belichtingsniveau, plantdatum en teeltomstandigheden, kan het resultaat (effect en rendement van LED t.o.v. van SON-T) alleen bepaald worden door simulatie. Dit is gedaan door Plant Dynamics. Zie daarvoor Deel 2 van dit rapport (Schapendonk *et al.* 2009). Deel 1 beschrijft de proefomstandigheden en analyseert de waarnemingen die gedaan zijn door de telers en onderzoekers.

3 Meetlocaties

Het project vond plaats op drie tomatenbedrijven van RedStar Trading (van der Kaaij) op Voorne-Putten. Ze lagen binnen enkele kilometers afstand van elkaar. Het derde bedrijf was eigenlijk niet opgenomen in de proef maar is toch meegenomen in een aantal vergelijkingen. Er waren veel verschillen tussen de bedrijven. Onderstaande tabel geeft een aantal details van de drie locaties.

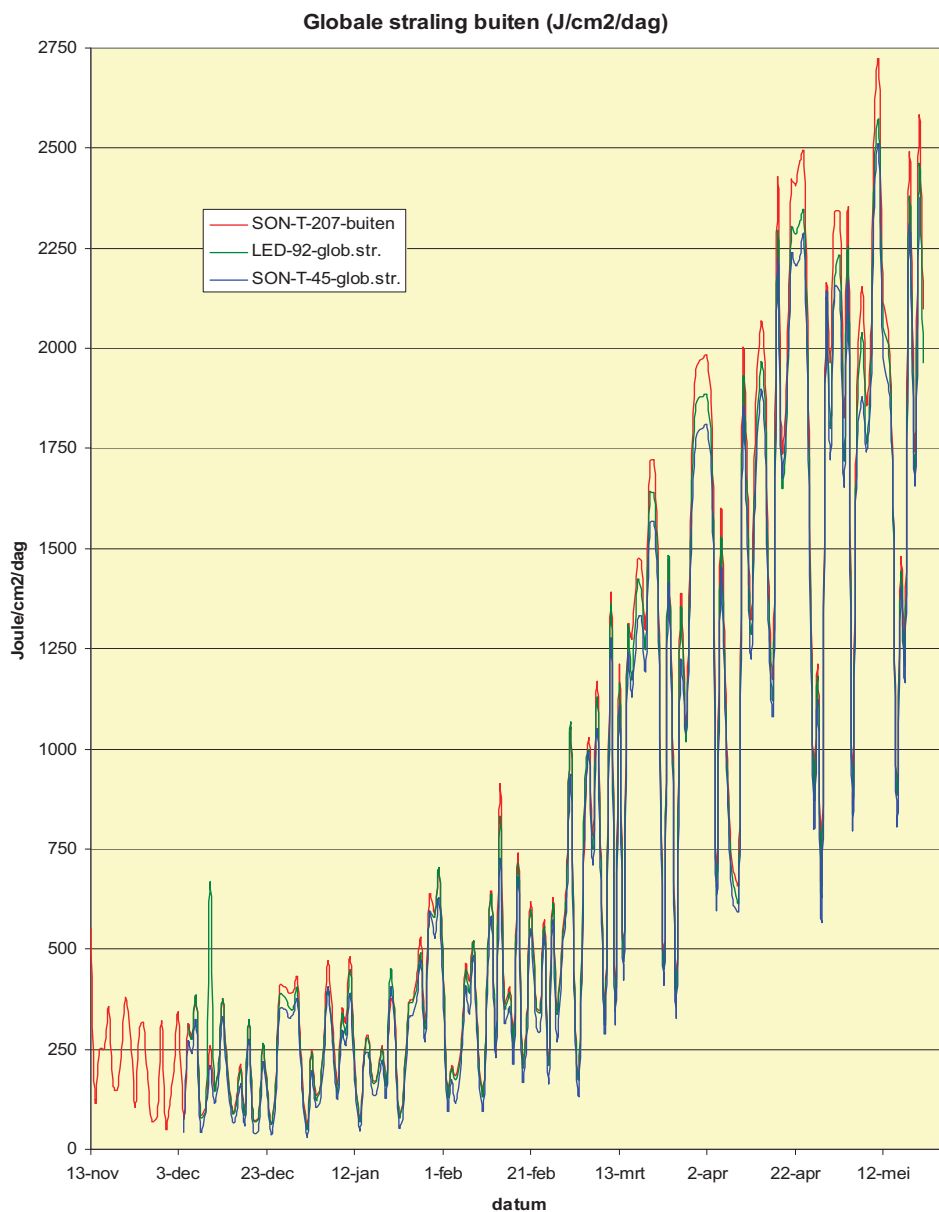
Tabel 1. Details en locatie van de 3 belichtingsbehandelingen. Behandeling 3 was in feite geen deel van de proef. Padnummer is het pad waar de productie is gemeten.

Behandeling	SONT-207	LED-92	SON-T -45
Locatie	Aelbrechtseweg 5, Brielle	Ruigendijk 2, Tinte	Westerlandseweg 18, Tinte
Belichting	SON-T	LED	SON-T
	ca 207 micromol/m ² /s	92 micromol/m ² /s	45 micromol/m ² /s
Schakelbaar	25, 50, 75, 100%	?	
Oppervlak belicht (m ²)	24.160 m ²	8.359 m ²	57.673 m ²
Stroomvoorziening	2 x WKK + inkoop		WKK
Pad #	368	207	213 & 413
Plantdatum	13 nov 08	4/5 dec 08	4/5 dec 08
Ras	Sunstream op Eldorado	Sunstream	Sunstream
Plantdichtheid begin (pl/m ²)	2,52 → 3,76	2,78	2,50
Kapbreedte x vakmaat	4,27 x 5 m	4 x 4,5 m	4 x 5 m
Transmissie diffuus licht	77,7%	77,3%	77,5%
Schermb	Lichthinderdoek	LS10	Lichthinderdoek
Licht transmissie	0,5 of 5% dir & dif	dir 88%, dif 81%	0,5 of 5% dir & dif
Licht reflectie	65%	?	65%
Energie besparing scherm	30%	43%	30%
Plant datum	13 nov 08	5 dec 08	5 dec 08
Belichtingsperiode*	14 nov – 9 apr (21 weken)	6 dec - 8 apr (18 weken)	4 dec - 10 apr (18 weken)
Natuurlijk licht som (mol/m ²) van 4 dec 08 tot 20 apr 09	1543*	1482	1388
Bijzonderheden	oude mat	meer geschermd overdag (licht scherm)	vast plastic scherm

4 Licht en belichting

Lichtniveau van natuurlijk licht uit globale straling

Globale straling werd gemeten door de sensor van de klimaatcomputer, uiteraard buiten, op iedere locatie. Zie resultaten in Figuur 1. Op de locatie met SONT-207 werd het meeste globale straling (buiten) gemeten, gevolgd door LED-92 en dan SONT-45. De verschillen zijn opmerkelijk, omdat de bedrijven binnen een paar kilometer afstand van elkaar liggen. Gezien de volgorde komt de gedachte op dat terugkaatsing van kunstlicht tegen de wolken meespeelde, maar dan zouden de verschillen groter zijn in de winter (met veel belichtingsuren) dan mei (toen belichting werd afgebouwd). Dit is niet zo. Daarom moeten de verschillen grotendeels veroorzaakt zijn door verschillen in de meters of in de omrekeningen in de klimaatcomputers. Het verdient aanbeveling om de stralingsmetingen te laten ijkten. Het verschil in globale straling komt tot uiting in de berekende lichtsommen van natuurlijk licht in de kas (zie verder).



Figuur 1. Globale straling buiten gemeten op de drie bedrijven.

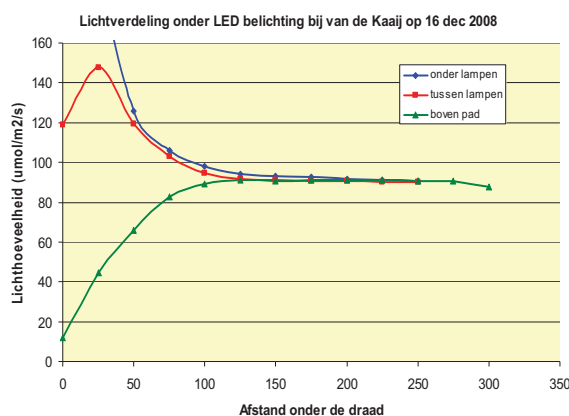
Lichtniveau van kunstlicht

LED

Op 16 december is de lichtverdeling gemeten boven het jonge gewas op Ruigendijk met LED belichting. Lichtmetingen zijn uitgevoerd met de lange lichtmeetstok (Sunscan van Delta-T devices, type SSI, 1 meter lang) en met een puntmeter (Sunshine type BF3 van Delta T devices). Details over hoogtes staan in Tabel 2 en meetresultaten in Figuur 2. Het resultaat was een constant lichtniveau van 92 micromol/m²/s op hoogtes tussen 150 en 250 cm afstand van de lampen, zowel boven de rijen als boven de paden.

Tabel 2. Afstanden tussen planten en lampen onder de LED-92 belichting.

Afstanden tussen punten		16 dec 08
lamp		
⇕		25
draad		
⇕		280
kop gewas		
⇕		94
steenwol blokje		
⇕		25
grond		
afstand van kop gewas tot lampen		305
afstand van grond tot draad		400
afstand van kop gewas tot draad		280



Figuur 2. Lichtintensiteit op verschillende hoogtes (afstand tot de draad) in LED-92 op 16 december 2008.



Foto 1. LED-92 op 16 dec 2008.

SON-T

De lichtintensiteit van de SON-T installatie op locatie Aelbrechtseweg kon niet gemeten worden om redenen die bekend zijn bij de betrokkenen. Op aanwijzing van de Directie van Redstar Trading is aangenomen dat de lichtintensiteit hier 207 micromol/m²/s was. Locatie Westerlandseweg was geen onderdeel van de proef. Hiervan was bekend dat de intensiteit van de SON-T belichting 45 micromol/m²/s was.

Lichtsommen van natuurlijk licht en kunstlicht

De hoeveelheid natuurlijk licht in iedere kas is berekend uit de globale straling (buiten gemeten) op iedere locatie (zie ook Figuur 1), vermenigvuldigd met de lichtdoorlatendheid van het kasdek (77% op alle bedrijven). De lichtdoorlatendheid is afkomstig van lichtrapporten aangeleverd door de kassenbouwer. Vervolgens is dit getal vermenigvuldigd met een omrekeningsfactor voor globale straling naar PAR (48%), en een omrekeningsfactor naar micromol voor natuurlijk licht ($1 \text{ W/m}^2 = 4.57 \text{ micromol/m}^2/\text{s}$). De natuurlijk lichtsom voor de periode 4 december tot 20 april omvat niet de eerste weken van behandeling SONT-207 (waar de plantdatum 3 weken eerder was, op 13 november, gemerkt met *). De lichtsom die eronder staat (gemerkt met **) bevatten wel die eerste weken.

De hoeveelheid kunstlicht in iedere kas is berekend uit de data geregistreerd door de telers. Het belichtingsregime was verschillend voor de verschillende bedrijven, zoals uiteengezet door de Directie van Redstart Trading in een document van 27 oktober 2008. Het tijdstip en de duur van belichting werd door de telers (bedrijfsleiders) bepaald, afhankelijk van de beschikbaarheid van stroom uit de WKK en de stroomprijs voor inkoop en verkoop. De prijs van stroom verandert per kwartier. De SON-T belichting op Aelbrechtseweg was schakelbaar op 25, 50, 75 en 100%. Uit de geregistreerde belichtingsuren zijn totalen berekend voor kunstlicht (extra licht) van SON-T en LED. De resultaten staan weergegeven in onderstaande tabel.

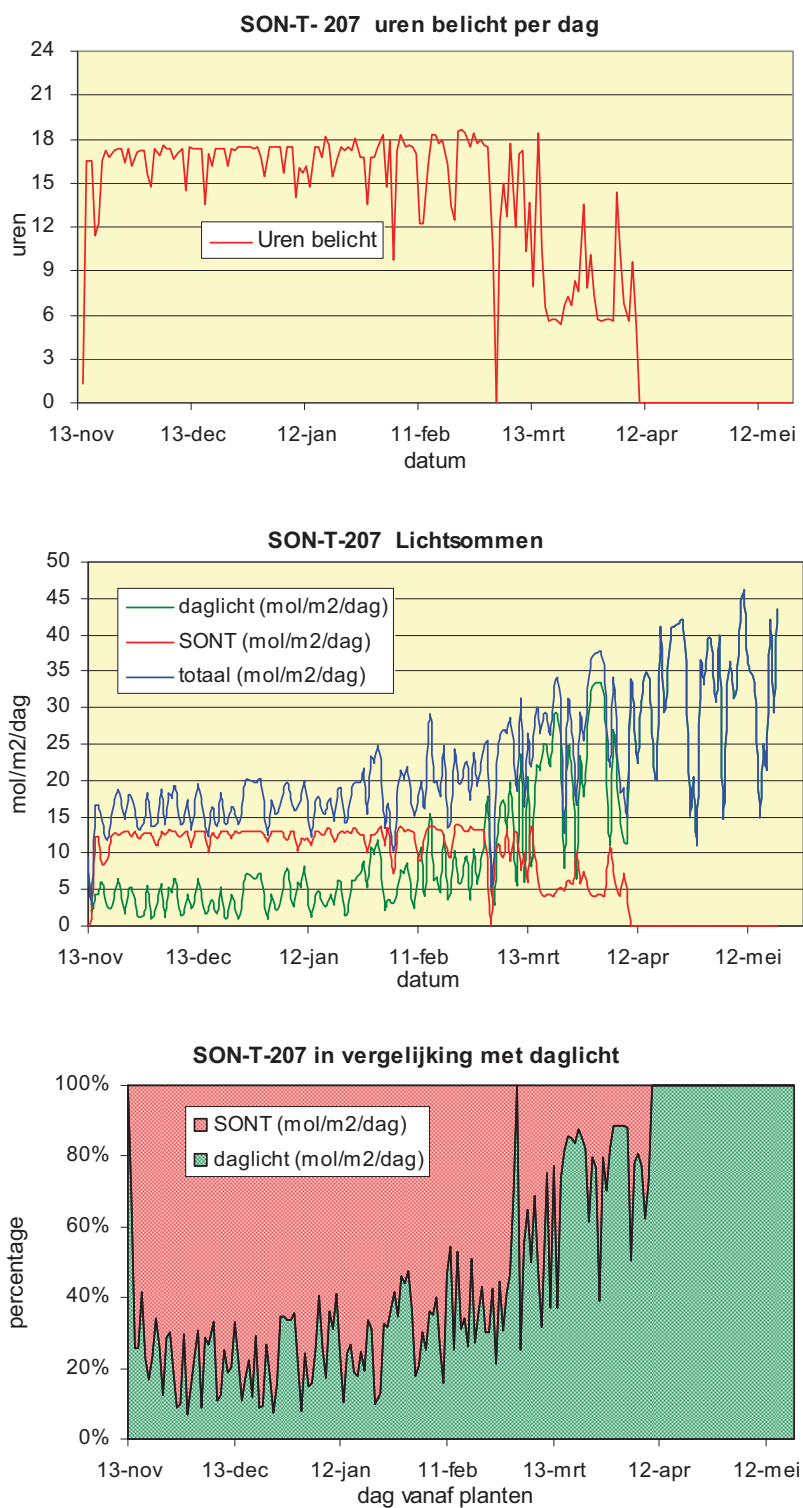
Tabel 3. Lichtsommen op de drie locaties voor natuurlijk licht en kunstlicht berekend zoals boven beschreven.

Behandeling	SONT-207	LED-92	SONT -45
Locatie	Aelbrechtseweg 5, Brielle	Ruigendijk 2, Tinte	Westerlandseweg 18, Tinte
Belichting	SONT	LED	SONT
	ca 207 micromol/m ² /s	92 micromol/m ² /s	45 micromol/m ² /s
Plant datum	13 nov 08	5 dec 08	5 dec 08
Belichtingsperiode	14 nov – 9 apr (21 weken)	6 dec - 8 apr (18 weken)	4 dec - 10 apr (18 weken)
Natuurlijk licht som (mol/m ²) van 4 dec 08 tot 20 apr 09	1543*	1482	1388
Licht van planten tot 20 april			
natuurlijk licht (mol/m ²)	1624**	1482	1388
kunstlicht (mol/m ²)	1599	553	360
totaal licht (mol/m ²)	3223	2035	1747
aandeel kunstlicht (%)	56.5	38.2	33.4
Licht van planten tot 20 mei			
natuurlijk licht (mol/m ²)	2601**	2415	2291
kunstlicht (mol/m ²)	1599	553	360
totaal licht (mol/m ²)	4200	2968	2650
aandeel kunstlicht (%)	47.5	31.3	27.4

* De eerste weken van 13 november tot 4 december zijn hier niet meegerekend, en wel in de regels eronder (**).

Lichtsommen bij behandeling SONT-207

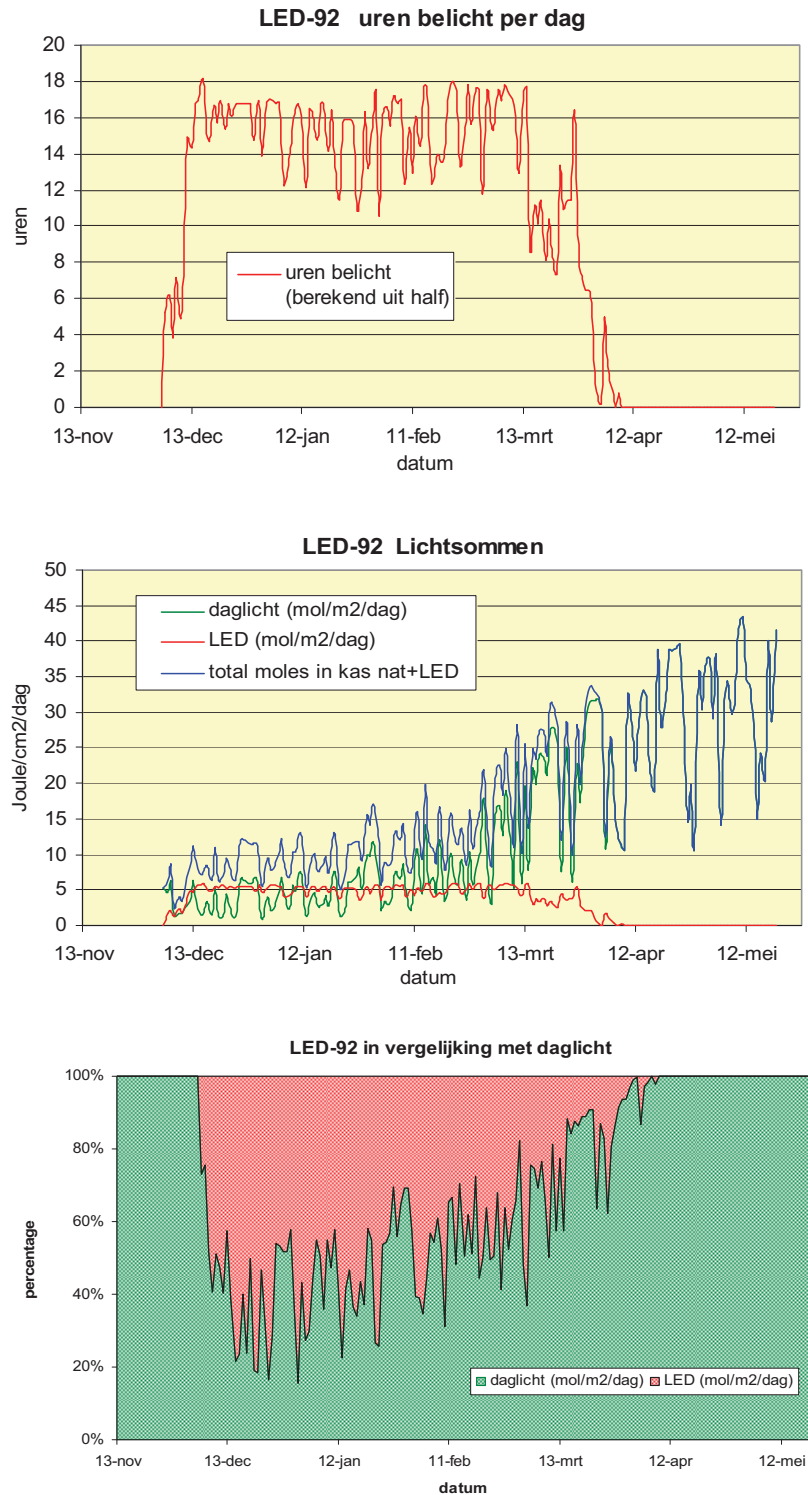
Onderstaande figuren geven de belichtingsduur en de sommen van natuurlijk licht en kunstlicht, en de verhouding tussen natuurlijk en kunstlicht. De berekeningswijze is hiervoor beschreven. De lichtsom van de SONT installatie is gebaseerd op de veronderstelde lichtintensiteit van 207 micromol/m²/s en geregistreerde belichtingsduur.



Figuur 3. SONT-207 belichtingsdata: (a) uren per dag, (b) lichtsommen in mol/m²/dag, (c) percentages daglicht en kunstlicht.

Lichtsommen bij behandeling LED-92

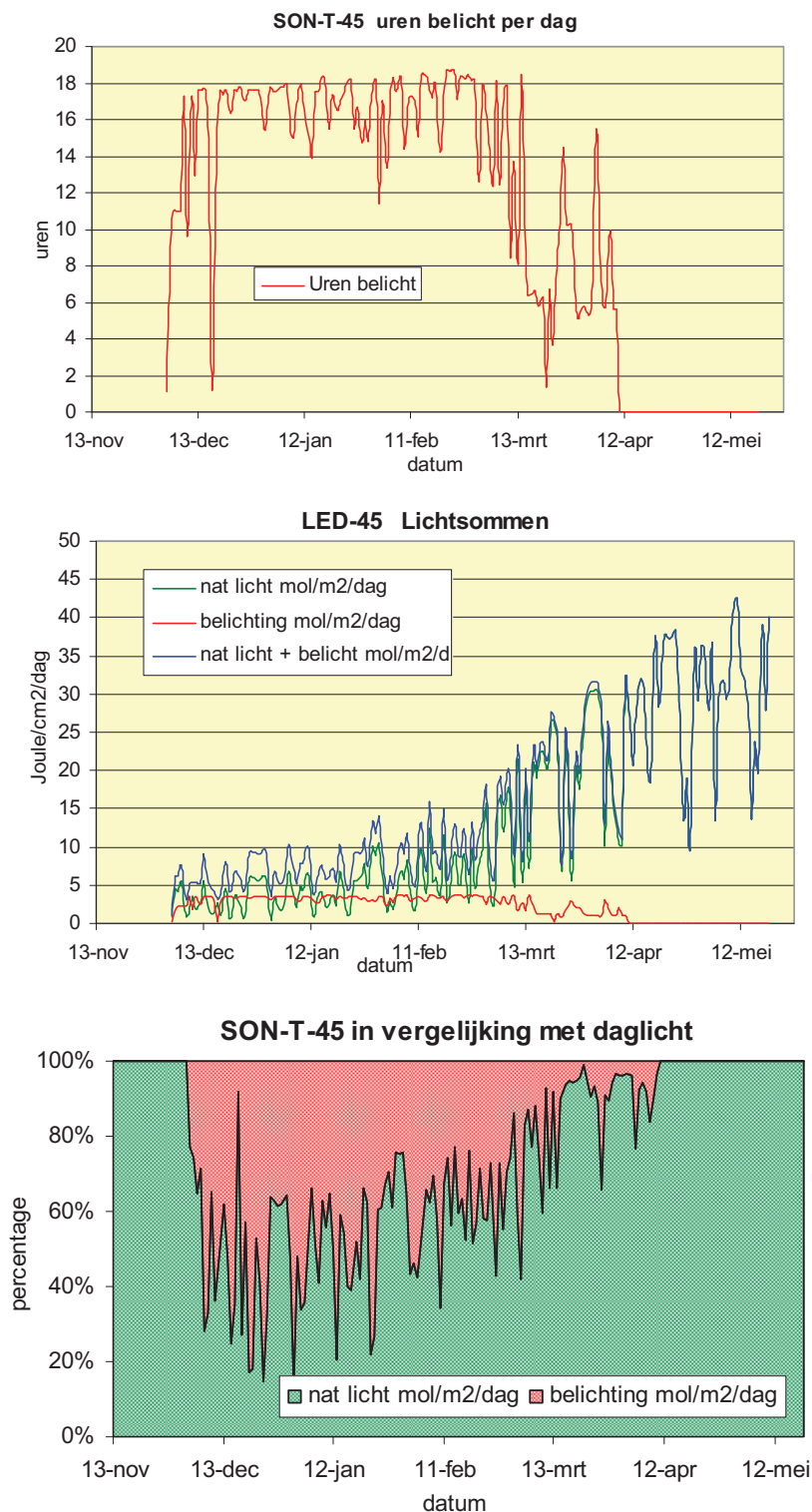
Onderstaande figuren geven de belichtingsduur en de sommen van natuurlijk licht en kunstlicht, en de verhouding tussen natuurlijk en kunstlicht. De berekeningswijze is eerder beschreven. De lichtsom van de LED installatie is gebaseerd op de gemeten lichtintensiteit van 92 micromol/m²/s en geregistreeerde belichtingsduur.



Figuur 4. LED-92 belichtingsdata: (a) uren per dag, (b) lichtsommen in mol/m²/dag, (c) percentages daglicht en kunstlicht.

Lichtsommen bij behandeling SONT-45

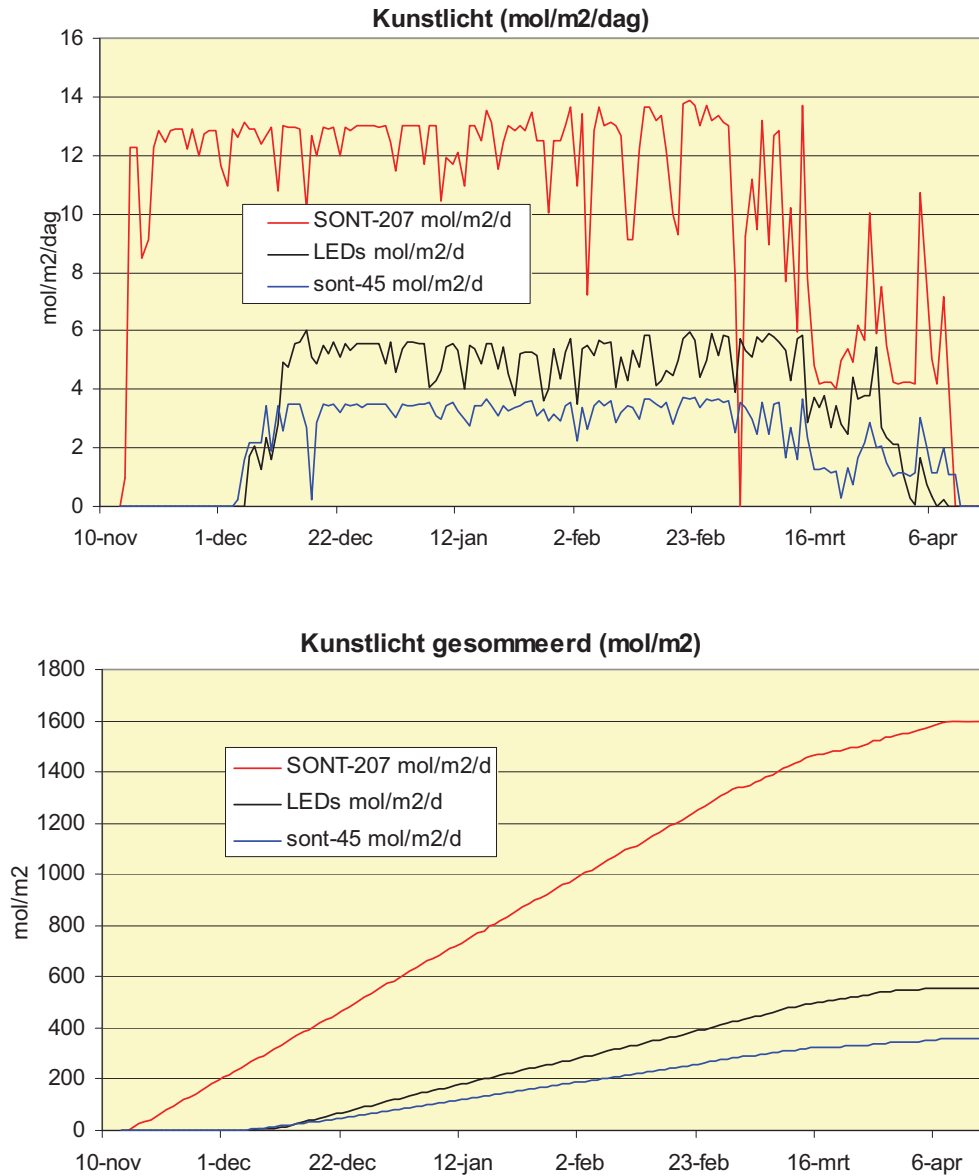
Onderstaande figuren geven de belichtingsduur en de sommen van natuurlijk licht en kunstlicht, en de verhouding tussen natuurlijk en kunstlicht. De berekeningswijze is eerder beschreven. De lichtsom van de SONT installatie is gebaseerd op bekende lichtintensiteit van 45 micromol/m²/s en geregistreeerde belichtingsduur.



Figuur 5. SONT-45 belichtingsdata: (a) uren per dag, (b) lichtsommen in mol/m²/m²/m²/dag, (c) percentages daglicht en kunstlicht.

Lichtsommen vergeleken

De lichtsommen van kunstlicht uit Figuur 3b, 4b en 5b zijn hieronder in één grafiek bij elkaar (Figuur 6a). Vervolgens zijn deze lichtsommen per dag gesommeerd tot een cumulatieve lichtsom in Figuur 6b.



Figuur 6. Berekende lichtsommen van kunstlicht in de behandelingen (a) per dag en (b) cumulatief.

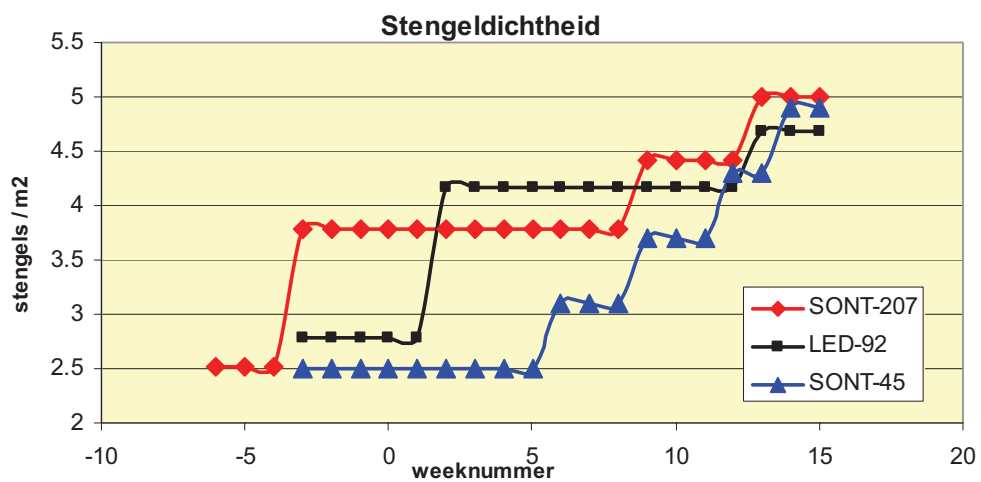
Opmerkelijk is het grote verschil tussen SONT-207 en LED-92, en het relatief kleine verschil tussen LED-92 en SONT-45. De lichtsommen zijn uiteraard de resultante van belichtingsduur en lichtintensiteit, waarbij lichtintensiteit voor SONT was opgegeven door Redstar Trading (207 en 45 micromol/m²/s) en voor LED was gemeten (92 micromol/m²/s).

5 Plant en stengeldichtheden

Plantdichtheid werd gekozen in afhankelijkheid van de lichtomstandigheden op het moment van planten. Stengeldichtheid werd tijdens de teelt aangepast door de teler aan de hand van gewasregistratie.

Tabel 4. Plant- en stengeldichtheden. Bij extra kop staat het weeknummer van eerste bloei en tussen haakjes het weeknummer van eerste vrucht aan de nieuwe zijstengel.

	Belichting	plant datum	plant- dichtheid aanvang	extra kop (1 ^e keer)	extra kop (2 ^e keer)	extra kop (3 ^e keer)	extra kop (4 ^e keer)
1	SONT-207	13 nov 08 week 46	2.52 1 ^e vr wk 47	wk 48 (49): 3,78	wk 8 (9): 4.41	wk 12 (13): 5.0	-
2	LED-92	4/5 dec 08 week 49	2.78 1 ^e vr wk 51	wk52 (2): 4,17	wk 11 (13) 4,69	-	-
3	SONT-45	4/5 dec 08 week49	2.50 1 ^e vr wk 51	wk4 (6): 3,1	wk 7 (9): 3,7	wk 12 (14): 4,3	wk 13 (14): 4,9



Figuur 7. Verloop van de stengeldichtheid uitgezet tegen weeknummer.

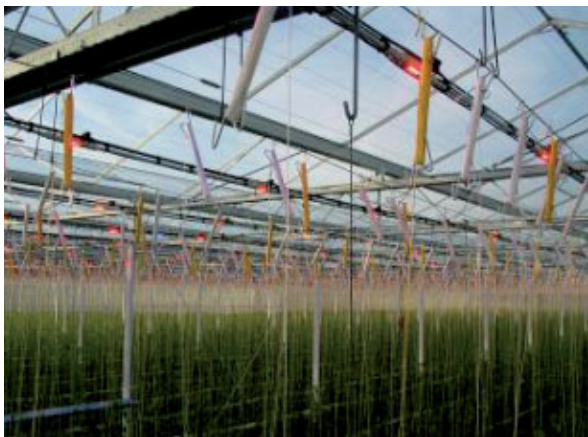


Foto 2. Gewas in LED-92 op 16 dec 2009.

6 Gewasgroei

De gegevens over gewasgroei en –ontwikkeling dienden ook als invoergegevens voor het simulatiemodel van Plant Dynamics.

Materiaal en methode

Bij aanvang van de proef en op vijf tijdstippen tijdens het seizoen (27 januari, 26 februari, 31 maart, 14 april en 1 mei) zijn waarnemingen gedaan aan gewasgroei. Per keer werden 10 volgroeide bladeren (op ca 50 cm onder kop) bemonsterd voor bepaling van versgewicht, drooggewicht, bladoppervlak en afgeleide plantparameters en aantal bladeren aan de plant. Resultaten staan in Tabel 5. Ook werden bepalingen gedaan aan vruchtuigroei, zetmeelgehalte en verloop drooggewicht van de vruchten.

Uitgangsmateriaal

Plantjes kwamen in de kas met een bloem in blad 7, en de tweede tros gemiddeld in oksel 11 (soms 12). Op 16 december zijn 3 planten geoogst en beoordeeld, gedroogd één dag bij 70 °C en één dag 105 °C. Data in Bijlage I.

Tabel 5. Bladparameters gemeten op verschillende tijdstippen. De cijfers zijn gemiddelde waarde van 10 jonge vrijwel uitgegroeide bladeren. VeGew = vers gewicht (gram); DrGew = droog gewicht (gram); DrSt% = droge stof gehalte (%); Opp 1 blad = gemiddeld oppervlak van één blad in de top van de plant (cm²); SLA = Specific Leaf Area (cm² bladoppervlak per gram drooggewicht); # blad = aantal bladeren; Opp/st = bladoppervlak per stengel (cm²); st/m² = stengeldichtheid; LAI = leaf area index (m²/m²).

SONT	207 micromol/m ² /s								
	VeGew	DrGew	DrSt%	Opp 1 blad	SLA	# Blad	Opp/st	st/m ²	LAI
16 dec						14	1608	3.78	0.6
29 jan	18.47	2.11	11.4	357	171	12.4	4785	3.78	1.8
26 feb	17.57	2.23	12.7	336	152	10.9	4598	3.78	1.7
31 mrt	15.59	2.21	14.2	238	110	11.7	4406	4.41	2.0
1 mei	17.61	2.27	12.9	275	123	16.4	6460	5.00	3.2
LED	92 micromol/m ² /s								
16 dec						14	1608	2.78	0.4
29 jan	20.86	2.06	9.9	475	231	8.8	4652	4.17	1.9
26 feb	20.25	2.00	9.9	411	210	9.5	4986	4.17	2.1
31 mrt	17.24	2.12	12.3	287	139	10.7	4537	4.17	2.0
1 mei	20.42	2.62	12.8	357	141	11.2	5877	4.70	2.8

Jonge bladeren onder LED-92 in vergelijking met die onder SONT-207 hebben:

- Versgewicht hoger
- Drooggewicht lager of gelijk (behalve 1 mei)
- Droge stof gehalte lager (behalve 1 mei)
- Oppervlak van blad in de top groter
- SLA altijd groter (meer oppervlak per gram gewicht)

- Aantal bladeren aan de plant lager (door meer bladplukken)
 - Bladoppervlak per stengel: wisselend (groter op 26 feb en 31 maart)
 - Aantal stengels/m² wisselend (zie Figuur 7)
 - LAI wisselend
 - Soms ietwat gekrulde bladeren
- * Verderop wordt beschreven dat de ontwikkelingssnelheid (bloei en bladafplitsing per week) hoger was. Dat komt niet tot uiting in aantal bladeren aan de plant omdat meer blad werd geplukt bij LED-92 om generatief te sturen.
- ** Het totale oppervlak per stengel verschilde niet veel door de combinatie van minder bladeren maar grotere bladeren. LAI hangt ook af van stengeldichtheid. Deze werd regelmatig aangepast (zie Tabel 4 en Figuur 7). Stengeldichtheid en LAI waren soms lager en soms hoger bij LED dan bij SON-T.

Bespreking van de resultaten

Bovenstaande verschillen in bladgroei zijn waarschijnlijk te verklaren door een aantal factoren:

- Bij minder licht is de assimilatieaanmaak geringer (SONT had 207 micromol/m²/s en LED slechts 92)
- Bij minder licht worden bladeren meer uitgestrekt om zoveel mogelijk licht te onderscheppen ('schaduwblad')
- De teeltomstandigheden waren heel verschillend (op drie bedrijven, en met 3 weken verschil in plantdatum)
- Verschil in huidmondjesopening
- Verschil in bladplukken

Drooggewicht van de bladeren was lager bij LED-92 dan bij SONT-207. Dit is een logisch gevolg van een lagere lichtintensiteit dus geringere aanmaak van droge stof bij LED in deze proef.

SLA (bladoppervlak per gram gewicht) was hoger bij LED-92 dan bij SONT-207. Dit verschil kan worden toegeschreven aan de lagere lichtintensiteit bij LED. Dit maakt dat de planten meer schaduwbladeren vormen, dus meer bladoppervlak creëren met de gegeven hoeveelheid droge stof.

Bladoppervlak per stengel, en per m² grondoppervlak, wordt mede bepaald door stengeldichtheid, die veranderde en verschilde tussen de twee behandelingen (zie Figuur 7). De stengeldichtheid werd steeds aangepast aan de hoeveelheid licht en op de stand van het gewas. Soms was de stengeldichtheid hoger in LED en soms hoger in SONT. Stengeldichtheid kan een effect hebben op SLA: bij hogere stengeldichtheid krijgen planten minder licht en gaan dan schaduwblad vormen. Stengeldichtheid heeft een direct effect op de LAI, want LAI = stengeldichtheid x bladoppervlak per plant. Om deze redenen mogen de gevonden verschillen in bladoppervlak (per stengel en ook per m²) niet worden toegeschreven aan het type belichting (LED of SON-T).

Het droge stof gehalte van de bladeren was hoger onder SONT dan onder LED, d.w.z. het watergehalte was lager bij SONT. Dit zou verklaard kunnen worden met een iets hogere huidmondjesopening bij SON-T (zie deel 2), wat leidt tot waterverlies. Ook kunnen er subtiele verschillen in teelt zijn geweest, doordat de twee gewassen op verschillende bedrijven stonden. Als er een verschil was in watergift (bv in startmoment) kan dit leiden tot verschil in watergehalte op het moment dat de bladeren bemonsterd werden. Hoger watergehalte verklaart dan het hogere versgewicht bij LED t.o.v. bij SON-T.

Het aantal bladeren aan de plant werd mede beïnvloed door bladplukken. Bij LED werd meer blad geplukt om het gewas meer generatief te maken. Een mogelijk verschil in bladafplitsingssnelheid (t.g.v. verschil in temperatuur van het groeipunt) werd onzichtbaar gemaakt door het bladplukken.

In deze proef op drie locaties die verschilden in lichtintensiteit, plantdatum, en teeltomstandigheden, is het niet mogelijk om de waargenomen verschillen toe te schrijven aan één van deze factoren. Nieuw onderzoek bij WUR in Bleiswijk in seizoen 2009/2010 is inmiddels opgezet om verschillende lichttypes te vergelijken bij gelijke lichtniveaus.

Zetmeelgehalte van bladeren

Zetmeelbepaling

- Voor zetmeelbepaling werden ca 15 bladeren per behandeling gemonsterd.
- Gekozen is voor blad dat in het licht hing, nabij de eerste tros waarvan nog niet alle vruchten gezet zijn. Dit blad krulde het meest, wat zou kunnen duiden op zetmeelophoping.
- Blad is geplukt ca 12:00 uur en direct ingevroren bij -20 °C. Het bewaard bij -70 °C en getransporteerd bij -18 °C. In maart is het bladmateriaal geanalyseerd door Tuinbouw Productie Ketens.
- De gevonden zetmeelgehalten zijn weergegeven in Tabel 6.

Tabel 6. Zetmeelgehalten in bladeren op 27 januari 2009.

Behandeling	Zetmeelgehalte (mg per gram droog gewicht)
SONT-207	171,4
LED-92	99,2

Bladcoupees

In aanvulling op de zetmeelbepaling in het laboratorium is getracht de zetmeel zichtbaar te maken door foto's van bladcoupees te maken via een microscoop. Dit is geen analytische methode, en zeker geen kwantitatieve methode, maar slechts bedoeld ter illustratie. Op 31 maart 2009 ca 9:30 uur werden bladeren bemonsterd. Hiervoor werd het eerste volgroeide blad gekozen. Bladcoupees werden gemaakt en gekleurd met een jodiumverbinding, en bekeken onder de microscoop.

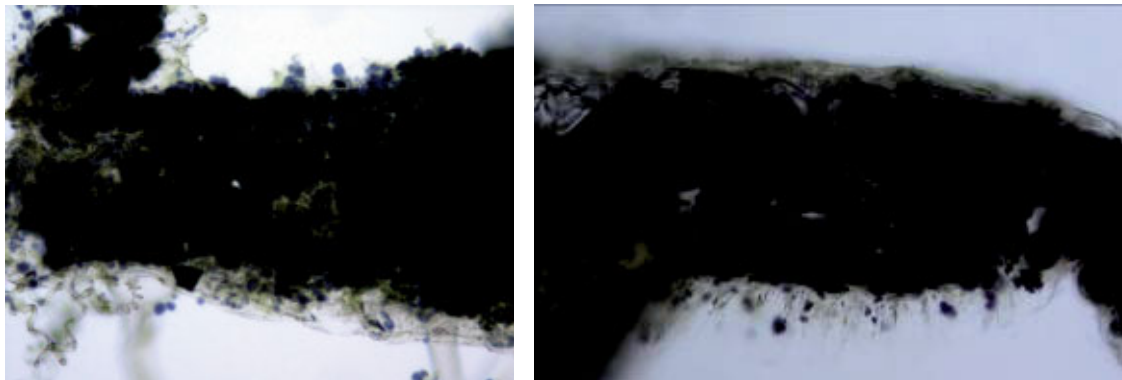


Foto 3. Bladcoupees met zetmeelkorrels (a) blad uit SONT-207. (b) blad uit LED-92.

Discussie en conclusie

Tabel 6 toont de resultaten van een enkelvoudige zetmeelanalyse. Al kan het niet getoetst worden, het gevonden verschil is zo groot dat het waarschijnlijk is dat er meer zetmeel in bladeren bij SONT-207 dan bij LED-92.

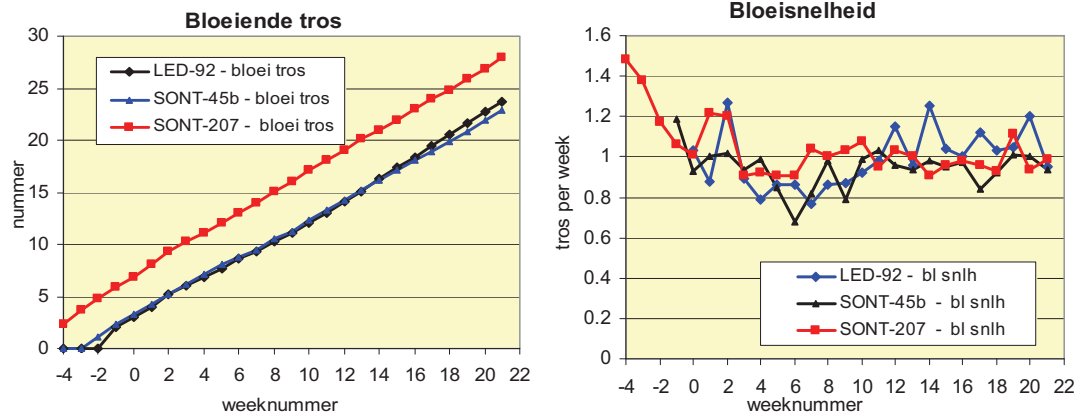
Voor een fysiologische verklaring moeten verschillende stappen beschouwd worden. Assimilatenophoping hangt af van de snelheid van aanmaak en afvoer uit de bladeren. Dit laatste hangt af van de vraag naar assimilaten, omzettingssnelheden, floemstroom (beschikbaarheid van vrij water), weerstanden in het transport traject en meer.

De aanmaak van assimilaten zal sneller zijn bij SONT vanwege de veel hogere lichtintensiteit. Assimilatenverwerking omvat diverse omzettingen (sucrose/glucose → zetmeel, en zetmeel → sucrose/glucose). Deze worden mogelijk beïnvloed door lichtkleur. In de literatuur is te vinden dat blauw licht de hydrolyse van zetmeel beïnvloedt (Taiz & Zeiger, 2006) en dat rood/blauw verhouding van LED licht effect heeft op suiker/ zetmeel verhouding in bladeren (Sanwo et al, 1995). De trekkracht, ofwel de vraag naar assimilaten hangt af van de temperaturen van de ontvangende organen (o.a. vruchten en groeipunt) t.o.v. de bladtemperatuur. Het is de moeite waard om dit onderwerp, met name de rol van lichtkleur in het suiker/zetmeel metabolisme, nader te onderzoeken.

7 Productie

Oorspronkelijk zouden twee belichtingsbehandeling worden vergeleken, maar later is ook behandeling 45 micro-mol/m²/s SONT belichting toegevoegd van locatie Westerlandseweg. Vanwege het grote teeltoppervlak (5,8 ha) werden hier twee plekken gemonitord door de telers, waarvan er hier een wordt getoond. De data waren verzameld op de volgende plaatsen: SONT-45b is Westerlandseweg pad 413; LED-92 is Ruigendijk pad 180; SONT-207 is Aelbrechtseweg pad 368.

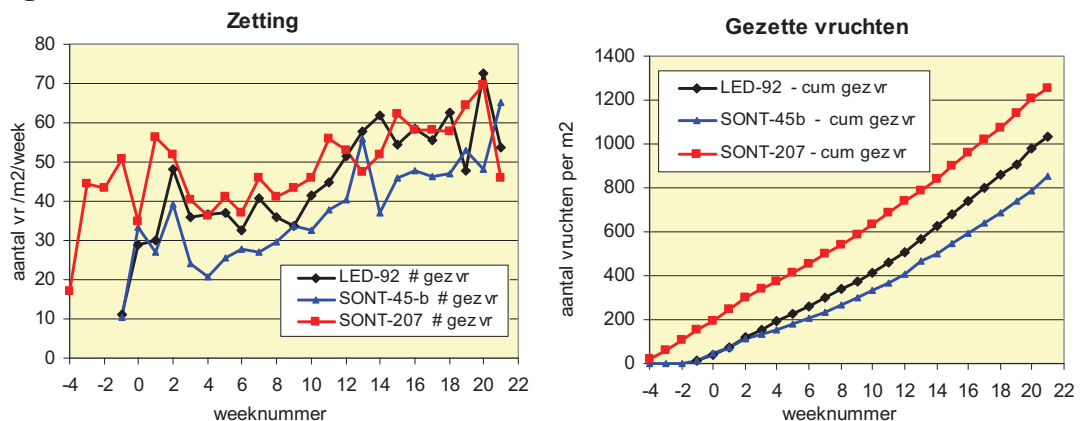
Bloei



Figuur 8. (a) nummer van de bloeiende tros en (b) bloeisnelheid

Planten onder SONT lopen 3 weken vóór vanwege 3 weken eerdere plantdatum. SONT-207 gaf hogere bloeisnelheid dan LED-92 tot week 11. Het verschil varieerde van 0 tot soms 0.2. Dit duidt op een hogere ontwikkelingssnelheid, mogelijk t.g.v. een wat hogere temperatuur van het groeipunt. Of dit komt door warmtestraling van de SONT lampen of door klimaatregeling (verwarming, schermen, luchtbeweging) is niet te zeggen. Bloei bij SONT-45 en LED-92 lopen door elkaar. Bloeisnelheid bij LED piekt na week 11 (zie Figuur 8b) toen belichting relatief minder belangrijk werd.

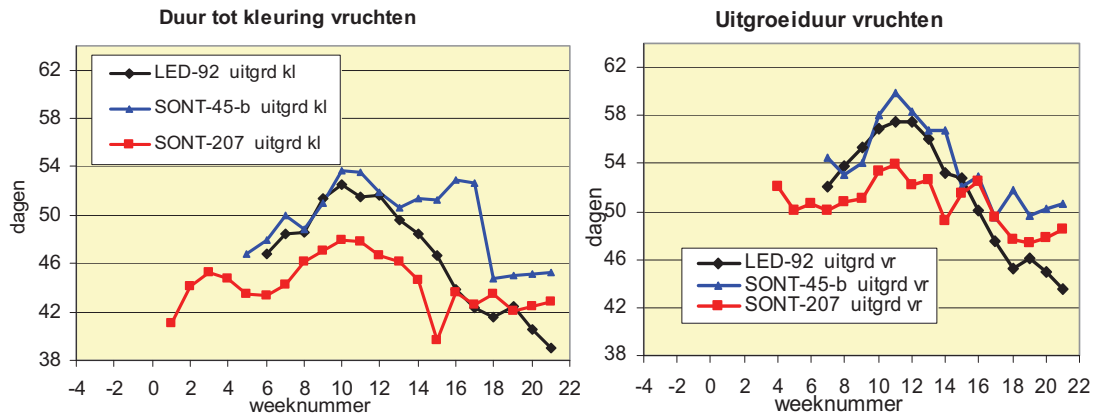
Zetting



Figuur 9. (a) Aantal gezette vruchten en (b) vruchtzetting snelheid.

Behalve 3. Weken voorsprong, had SONT-207 ook een hogere vruchtzettingssnelheid dan LED-92 tot week 12. Daarna gingen de LED-92 en SONT-207 lijnen door elkaar lopen. Zetting bij SONT-45 is het laagste, afgezien van enkele uitschieters.

Uitgroeiduur vruchten

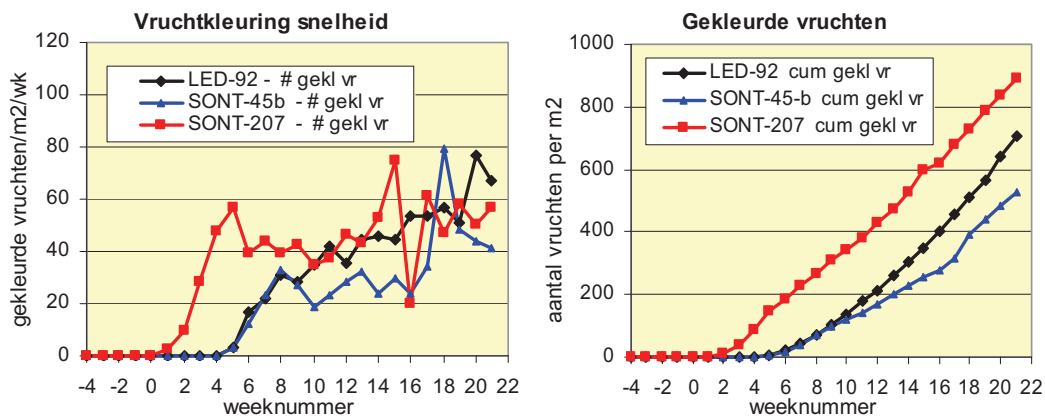


Figuur 10. (a) duur van zetting tot doorkleuring van de vruchten; (b) uitgroeiduur vruchten (zetting tot oogst).

Links is de periode van zetting tot kleuring en rechts is de periode van zetting tot oogst. Het verschil tussen de twee grafieken is een aantal dagen voor kleuring van de vruchten. De eigenlijke doorkleuring wordt grotendeels bepaald door teeltomstandigheden (temperatuur), en waarschijnlijk niet zo zeer door het type belichting.

Beide grafieken vertonen uiteraard hetzelfde patroon. Bij SONT-207 was de duur verreweg het kortste (tot ca week 14), dus de snelheid het grootste. Vruchtuitgroei duurde 2-4 dagen langer onder LED-92 dan onder SONT-207. SONT-45 was meestal het langzaamst. Na week 14 gingen de lijnen kruisen, toen de belichting niet meer werd gebruikt.

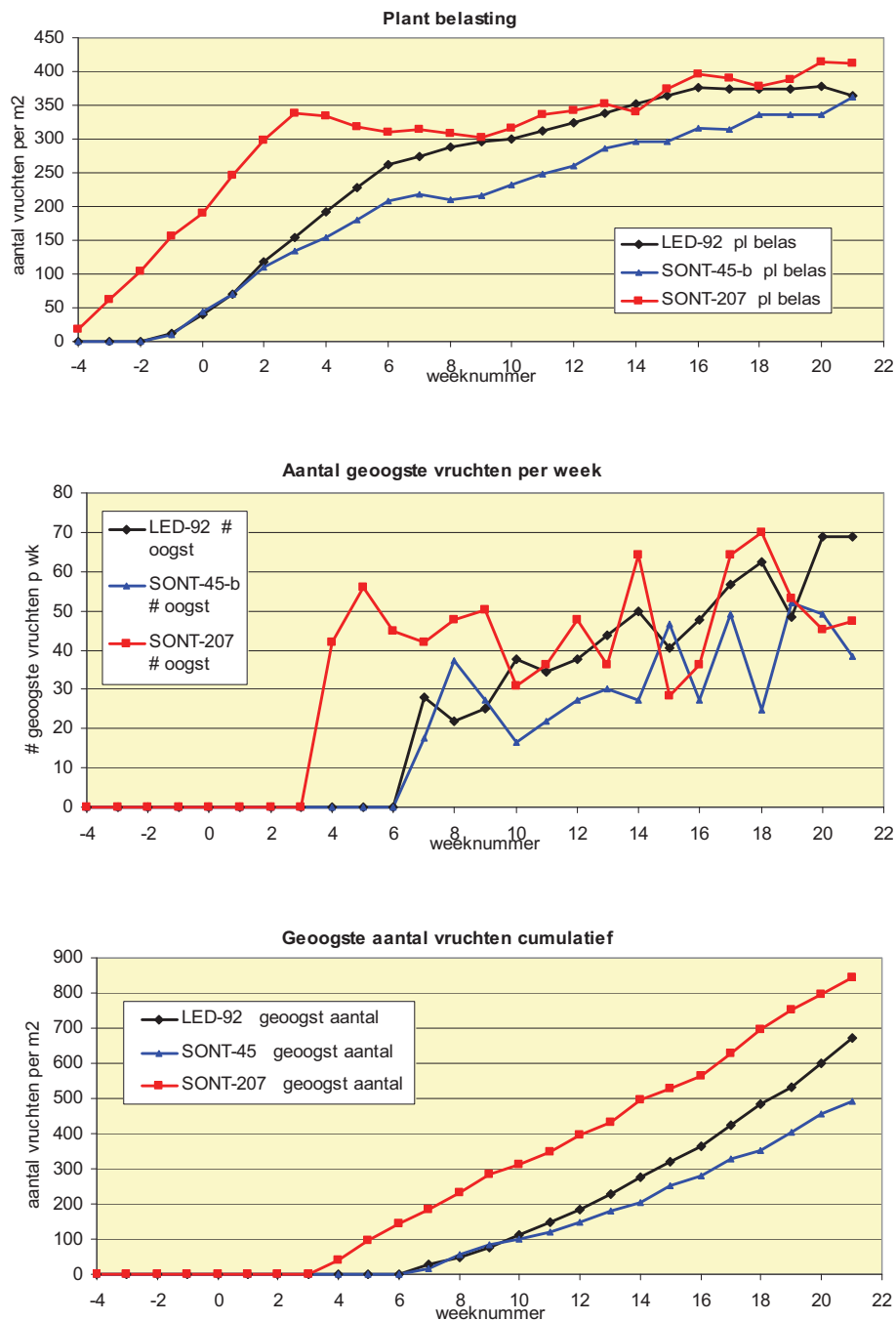
Vruchtkleuring



Figuur 11. (a) vruchtkleuring snelheid (vruchten/m²/week) en cumulatief aantal gekleurde vruchten per m².

Deze grafieken geven de aantallen gekleurde vruchten per week en de cumulatieve waarde hiervan. Tot week 9 was de snelheid van loskomen van gekleurde vruchten veel hoger bij SONT-207 dan bij de andere belichtingen. Na week 14 begonnen de lijnen van SONT-207 en LED-45 sterk te variëren; de belichting werd toen niet meer gebruikt.

Plantbelasting

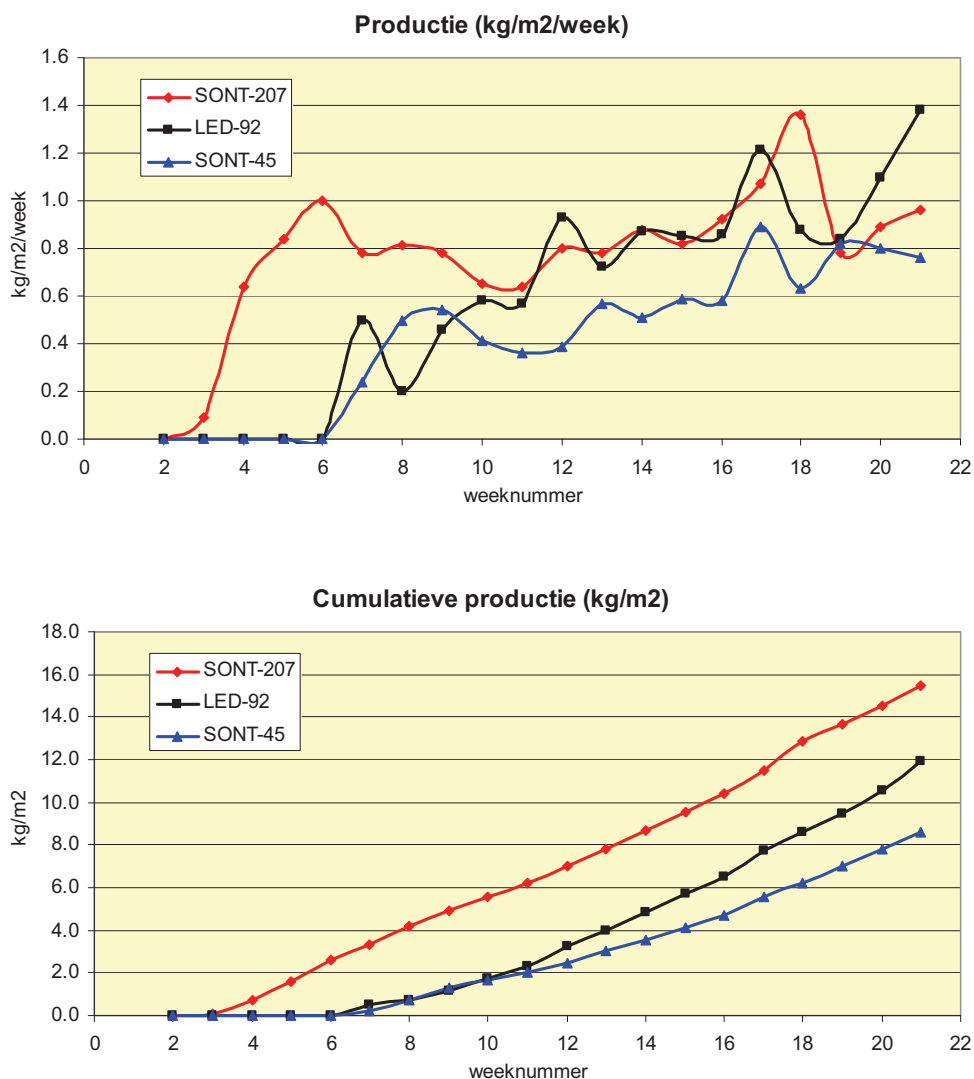


Figuur 12. (a) plantbelasting; (b) geoogst aantal vruchten per week en (c) geoogst aantal vruchten cumulatief.

Plantbelasting hangt aanvankelijk alleen af van zettingssnelheid en later ook van oogstsnelheid. In week 2-6 was de zetting bij SONT-207 slechts iets hoger dan bij LED-92; in week 10-12 werd het verschil groter (zie Figuur 9). Oogst begon mee te doen in week 4 bij SONT-207 en in week 7 bij de LED-92 en SONT-45. In week 5-9 was het aantal geoogste vruchten het hoogst bij SONT-207. Plantbelasting (als resultaat van zetting en oogst) kwam in week 9 ongeveer gelijk te liggen voor SONT-207 en LED-92. SONT-45 bleef achter bij de andere belichtingen. Na week 10 werd het aandeel van belichting steeds geringer, en na week 14 werd niet meer belicht.

Het resultaat wordt sterk bepaald door het lichtniveau en door de 3 weken eerdere plantdatum bij SONT-207. Productie wordt besproken in de Discussie (hoofdstuk 9) en geanalyseerd met een simulatiemodel (in deel 2).

Productie



Figuur 13. (a) productie $\text{kg/m}^2/\text{week}$; (b) cumulatieve productie (kg/m^2). Data zijn afkomstig uit bestand 'vergelijk_stroom_inkoop.xls'.

Figuur 13 toont de productiecijfers. Behalve 3 weken eerder t.g.v. 3 weken vroegere start, is de productie bij SONT-207 ook het hoogste (tot week 10), gevolgd door LED-92. In week 10 en 11 vertoont SONT-207 een tijdelijk terugslag en LED-92 een opleving (Figuur 13a). Productie bij SONT-45 blijft veel lager. De productie volgt de trend van de belichtingsintensiteit. Na week 10 werd de belichting minder en na week 14 was de belichting uit. In de periode na week 14 lopen de lijnen door elkaar. Productie is een gevolg van natuurlijke lichtomstandigheden, stengeldichtheid en voorgeschiedenis. Aangezien vele factoren anders waren tussen LED-92 en SONT-207, kan niet geconcludeerd worden of er een na-effect van de belichting was.

Bloei, zetting en productie

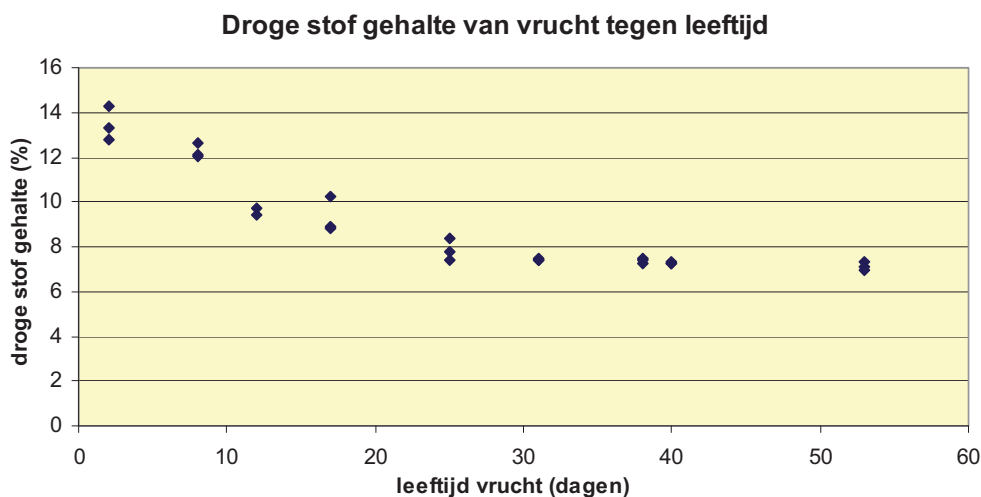
Gegevens over aantal vruchten per tros en gemiddeld vruchtgewicht werden verzameld uit de kwaliteitscontrole van de telers en dienden als invoergegevens voor het simulatiemodel van Plant Dynamics.

Tabel 7. Trosgewicht, aantal vruchten per tros en gemiddeld vruchtgewicht bepaald uit kwaliteitscontrole. StAfw is standaard afwijking.

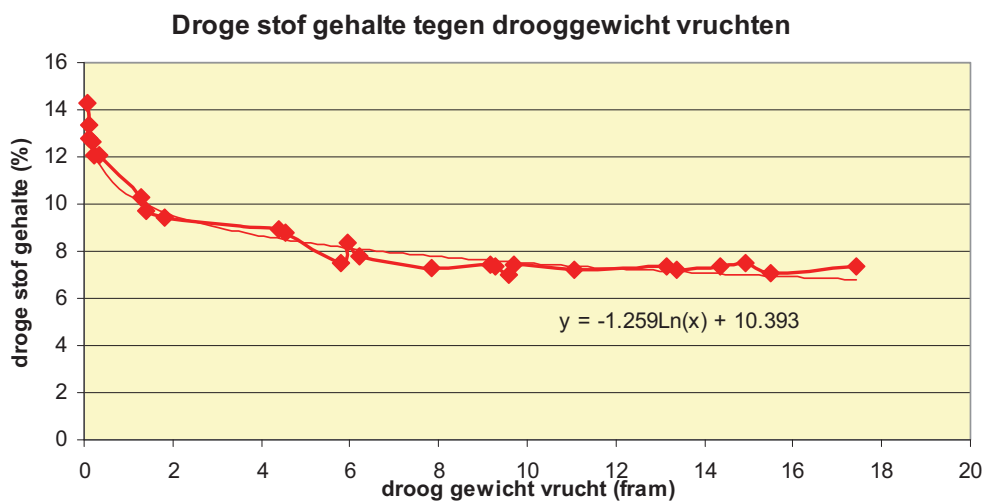
Behandeling	Datum	Week	Tros gewicht (gram)	St Afw	Aantal vruchten per tros	St Afw	Vrucht gewicht (gram)	St Afw
SONT-207	23-jan	4	221.1	37.2	10.1	1.6	21.8	2.0
	29-jan	5	203.1	46.4	10.7	2.0	18.9	2.5
	6-feb	6	205.8	37.2	10.1	1.3	20.3	1.8
	12-feb	7	208.3	*	10.7	*	19.5	*
	19-feb	8	210.8	24.6	11.3	1.6	18.8	1.7
	26-feb	9	186.0	32.6	10.4	1.6	18.0	2.0
	3-mrt	10	200.4	32.6	11.0	1.0	18.2	2.4
	11-mrt	11	192.0	14.2	10.7	1.0	18.0	1.4
	18-mrt	12	190.8	29.4	10.4	1.1	18.4	2.2
	23-mrt	13	194.0	34.6	10.4	1.2	18.6	2.2
	30-mrt	14	206.1	30.0	10.8	0.7	19.0	2.4
	7-apr	15	203.7	29.2	10.7	0.9	19.1	2.3
	14-apr	16	200.9	28.5	10.4	0.9	19.3	2.0
	gemiddeld			201.2	31.4	10.6	1.3	19.0
LED-92	10-feb	7	204.4	28.0	10.4	1.3	19.2	2.2
	16-feb	8	205.6	*	10.6	*	19.1	*
	23-feb	9	206.9	23.5	10.8	0.8	19.1	1.5
	2-mrt	10	201.6	*	10.8	*	18.7	*
	9-mrt	11	196.3	19.3	10.8	0.6	18.3	1.5
	16-mrt	12	186.9	23.9	10.5	1.2	17.8	1.7
	23-mrt	13	181.7	27.0	10.9	1.0	16.7	1.7
	30-mrt	14	186.6	14.9	11.0	0.6	17.0	1.3
	7-apr	15	182.6	35.8	10.2	1.5	17.9	1.9
gemiddeld			191.7	27.1	10.6	1.1	18.0	1.9
SONT-45	9-feb	7	172.8	*	10.4	*	16.6	*
	16-feb	8	172.8	*	10.4	*	16.6	*
	23-feb	9	172.8	18.1	10.4	1.0	16.6	1.0
	2-mrt	10	179.6	*	10.4	*	17.3	*
	9-mrt	11	186.3	29.4	10.3	1.4	18.1	1.0
	17-mrt	12	192.8	19.4	10.7	0.6	18.0	1.8
	27-mrt	13	190.5	20.3	10.8	0.8	17.7	1.3
	gemiddeld	9-13		185.6	21.8	10.6	1.0	17.6

Droge stof gehalte van ontwikkelende vruchten

Invoer data voor het simulatiemodel Optomaat Explorer over het verloop van het droge stof gehalte van vruchten tijdens de ontwikkeling werd bepaald aan planten in de kassen van WUR Glastuinbouw in Bleiswijk. Op 10 april zijn 27 trossen geoogst van planten van het ras 'Sunstream', toen 9 trossen aan de plant hadden. Van elke trosnummer zijn drie trossen geoogst van verschillende planten. De 27 trossen zijn geoogst van 27 verschillende planten. De trossen zijn na de oogst gewogen (versgewicht) en daarna in de stoof geplaatst en gedroogd bij 70 graden. Op 14 april is het drooggewicht bepaald. De leeftijd van de trossen was bekend. De oudste trossen waren nog net niet helemaal rijp bij de oogst (ongeveer 3 vruchten gekleurd). De grafieken vertonen het verloop van het droge stof gehalte.



Figuur 14. Droge stof gehalte van vruchten (%) tegen de leeftijd van de vrucht (vanaf zetting).



Figuur 15. Droge stof gehalte van vruchten (%) tegen het drooggewicht van de vrucht (in gram).

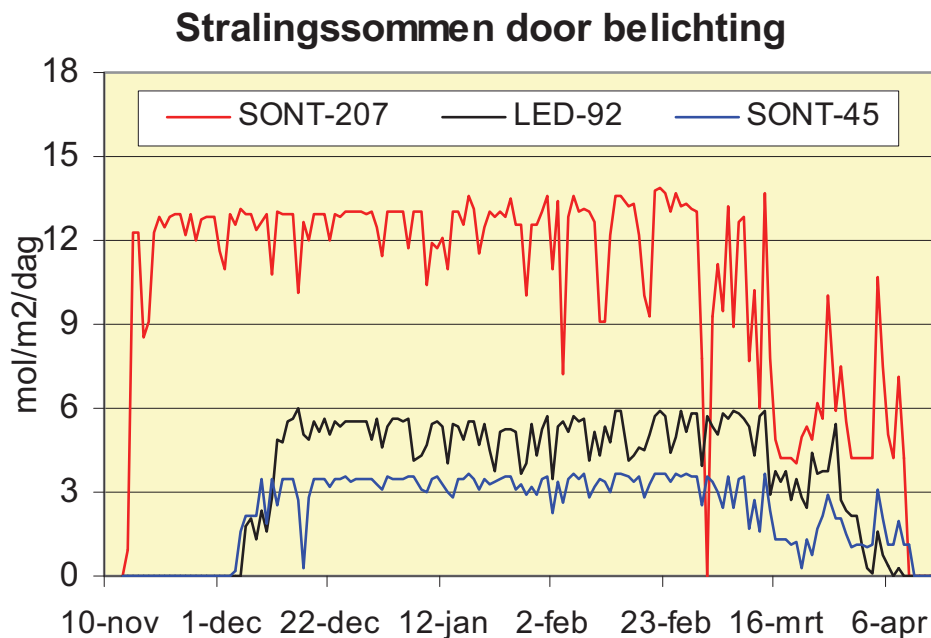
8 Energie en rendement

Dit project is opgezet in de veronderstelling dat de te vergelijken behandelingen eenzelfde plantdatum zouden hebben en voorzien zouden worden van een gelijke lichtintensiteit. Door een keus van Redstar Trading is dit niet het geval geweest. Wel kan er in kwalitatieve zin iets hierover gezegd worden.

Electriciteitsgebruik

De berekende lichtsom bij SONT-207 is meer dan dubbel de lichtsom van LED-92. Dit is een direct gevolg is van de lichtintensiteiten (207 micromol/m²/s bij SONT-T en 92 bij LED) en ook van kleine verschillen in de belichtingsduur.

Aangezien conversie van elektriciteit naar licht slechts weinig verschilt tussen SONT en LED, moet het elektriciteitsgebruik proportioneel zijn met de lichtsom (= lichtintensiteit x belichtingsduur). Uiteraard zal de trend wel goed zijn, d.w.z. dat het elektriciteitsgebruik het hoogst is bij SONT-207, gevolgd door LED-92 en het laagst is bij SONT-45. Maar het is niet zinvol om deze data te gebruiken voor nadere kwantificering van het rendement van LED lampen.



Figuur 16. Berekende lichtsommen van de belichtingsinstallaties in de drie behandelingen in mol/m²/per dag.

Gasverbruik

Een tweede, niet onbelangrijk bron van energieverbruik is de verwarming van de kas. Aanvankelijk dacht men dat er meer gas nodig zou zijn bij LED belichting dan bij SONT belichting, omdat de LEDs minder warmte afgeven. Echter, LED lampen geven ongeveer evenveel warmte af als SONT lampen, namelijk ongeveer 70% van de ingaande elektrische energie. Het verschil is dat bij SONT een groot deel van de warmte wordt afgeven als stralingsenergie, terwijl bij LED de warmte komt vrij aan de achterkant als convectiewarmte. Of dat warmte afgevoerd wordt of niet heeft wel invloed op de kastemperatuur.

In het geval bij Redstar Trading heeft men (kwalitatief) geconstateerd dat er meer warmte in de kas met LED-belichting ingezet moesten worden, omdat het nodig was voor een goede gewasgroei en -ontwikkeling. In deze

proef waren de belichtingsniveaus heel verschillend (207, 92 en 45 micromol/m²/s) en dus was er een groot verschil in warmtetoevoer vanuit de belichting en ook een groot verschil in verwarmingsbehoefte, al is dat niet kwantitatief vastgesteld.

Totaal energieverbruik

Het rendement hangt af van het totale energieverbruik (gas + elektra), en of elektriciteit wordt teruggeleverd aan het net. Ook is er verschil tussen de locaties wat betreft onder- of overcapaciteit van stroomproductie. Stroomproductie en de stroomprijs heeft invloed op de energie-inzet en ook op het belichtingsregiem. Zie ter illustratie een interview met Redstar Trading (de Visser, 2009).

Een energiebalans kan niet worden gemaakt in een proef waar de belichtingsniveaus en omstandigheden zo sterk verschillend zijn, zoals in deze proef. Dit vereist een proefopzet met LED en SON-T belichting bij gelijk lichtniveau (of gelijke energie-input). Daarom is het gasverbruik en energieverbruik hier niet geanalyseerd, en worden geen conclusies getrokken over het rendement van LED of SON-T.

9 Discussie

Gewastemperatuur en ontwikkelingssnelheid

Handmatige metingen aan gewastemperatuur konden geen verschil in gewastemperatuur vaststellen. Er zitten veel aspecten aan dit onderwerp, die hier achtereenvolgens worden besproken, nl. kasklimaatregeling, stralingswarmte, afstand van lamp tot gewas, verdamping, temperatuur van groeipunt, bloeisnelheid.

Klimaatregeling. Gewastemperatuur wordt beïnvloed door vele factoren van de klimaatregeling: stooktemperatuur, ventilatietemperatuur, scherm (type, gebruik), luchtbeweging, belichting, enz. Aangezien in deze proef de drie belichtingsbehandelingen op verschillende bedrijven lagen, waren alle groeiomstandigheden anders.

Warmtestraling. SON-T lampen produceren stralingswarmte (Near Infra Red), terwijl LEDs geen NIR produceren, alleen voelbare warmte aan de achterkant van de modules. Bij hoge intensiteit zoals bij SONT-207 is de hoeveelheid stralingswarmte aanzienlijk (in de orde van 20 W/m²).

Verdamping. Uit metingen van Plant Dynamics bleek dat de huidmondjes verder geopend waren bij SONT-207 dan bij LED-92 (zie Deel 2, paragraaf 2.5). Dit duidt op hogere verdamping. Verdamping koelt het blad, wat de bladtemperatuur nivelleert.

Afstand lamp tot gewas. Op het paprikabedrijf van Dingemans hingen de SON-T lampen veel hoger boven de planten dan de LEDs (SON-T een aantal meters boven de koppen, en LEDs slechts 1,5 m). In dat geval was het effect van SON-T en LEDs op gewastemperatuur (waarschijnlijk) vergelijkbaar. In deze proef hingen de SON-T lampen wel dichtbij, en kunnen een effect hebben gehad.

Groeipunttemperatuur. De temperatuur van het gewas wordt gemeten aan grote bladeren, die verdampen en daardoor zichzelf koelen. Het groeipunt verdampt weinig en kan daardoor een wat hogere temperatuur hebben dan verdampende bladeren. Het is mogelijk dat het groeipunt een verschillende temperatuur had bij SON-T en LEDs, maar dit is niet speciaal gemeten. Dit is aan te bevelen voor volgende proeven.

Bloeisnelheid. De temperatuur van het groeipunt is belangrijk omdat het de snelheid van ontwikkeling bepaalt (bloeien en bladafplitsing). De bloeisnelheid was ca 0.8 – 1.2 tros/week (zie Figuur 8b). Dit komt goed overeen met bloeisnelheid van 0.77 – 1.26 tros/week zoals gevonden door Heuvelink (1996). Uit Figuur 8b blijkt dat er soms geen verschil was, maar soms was SONT-207 ca 0.2 tros/week sneller dan LED-92. Een hogere bloeisnelheid duidt op een hogere temperatuur van het groeipunt. Uit de gegevens van Heuvelink is bekend dat het temperatuureffect 0.07 tros per week per graad is. Het gevonden verschil van 0.2 tros/week duidt op 2.8 °C hogere groeipunttemperatuur bij SONT-207 dan bij LED-92. De bladafplitsing moet ook sneller zijn geweest (want tomaat maakt altijd drie bladeren aan voor iedere tros). Planten bij SONT-207 moeten tot week 10 meestal 0.6 meer bladeren per week geproduceerd hebben, op een niveau van 2.4 – 4 bladeren per week (15-25% meer bladeren). Bij telling van het aantal bladeren kwam dit niet naar voren, doordat het aantal bladeren aan de plant werd geteld en dit was beïnvloed door bladplukken.

Samenvattend. Er is geen verschil in bladtemperatuur gevonden. Als er wel een verschil in groeipunttemperatuur is geweest, dan hoeft dit niet alleen te komen door verschil in NIR straling, maar kan ook komen door verschil in verwarming, schermen, verdamping, enz.

In toekomstige metingen van gewastemperatuur moet onderscheid gemaakt worden tussen temperatuur van het gewas (verdampende bladeren) en groeipunt (wat niet verdampt). Ook is van groot belang dat temperatuurmeting aan bladeren en groeipunt gepaard gaat met nauwkeurige meting van luchttemperatuur, luchtvochtigheid en luchtbewegingssnelheid heel dicht naast het te meten groeipunt.

Productie

Directe vergelijking van productie was onmogelijk vanwege verschillend lichtniveau (de lichtresponse is niet lineair), en vanwege 3 weken verschil in plantdatum en vele andere verschillen. Daarom is productie berekend door Plant Dynamics met het simulatiemodel Optomaat. Afhankelijk van synchronisatiedatum kwam het verschil in productie uit tussen -10 en +5% in het voordeel van LED t.o.v. SON-T (d.w.z. productie teruggerekend naar hetzelfde belichtingsniveau en gelijke omstandigheden). Zie deel 2.

In 2009 werd onderzoek gedaan door WUR (Snel et al, 2010, Paradiso et al, 2010) naar het spectrale effect van LED op bladfotosynthese. Bladfotosynthese bleek aanmerkelijk hoger bij LED dan bij SON-T, maar het effect op gewasfotosynthese zal waarschijnlijk kleiner zijn, namelijk in de orde van 5-10% is. In theorie kan dit omgezet worden in 5-10% hogere productie, indien de juiste teeltmaatregelen worden genomen. Dit komt qua ordegrootte overeen met de berekende productieverhoging die in deze proef is behaald bij LEDs, nl. maximaal 5%.

Belichtings Effectiviteit

Het is interessant om te kijken naar hoeveelheid productie per hoeveelheid licht. Na discussie is vastgesteld dat dit Belichtings Effectiviteit genoemd kan worden, en berekend kan worden als 'gram meerproductie per mol bijbelichting' van LED t.o.v. SON-T (zie Bijlage II). Dit kan alleen goed worden bepaald als de belichtingsintensiteiten en –duur ongeveer gelijk zijn, en als de basisbelichting (natuurlijk licht) en basisproductie (als gevolg van natuurlijk licht) goed bekend zijn uit een behandeling 'Onbelicht'. Dit was niet het geval in deze proef. Ook hiervoor waren berekeningen met het simulatiemodel van Plant Dynamics nodig (zie Deel 2).

Energie efficiëntie en rendement

De volgende vraag is of LED ook energie bespaart, ofwel elektriciteit of aardgas. Bij gelijke belichtingssommen zal er een klein verschil bestaan in elektriciteitsgebruik vanwege kleine verschillen in omzettingsefficiëntie tussen LED en SON-T. Op niveau van teeltsysteem kan een verschil in gasverbruik ontstaan vanwege aanpassing van de teelttemperatuur. Bovendien kan er een verschil in gasverbruik ontstaan vanwege de noodzaak om warmte af te luchten bij SON-T. Dit zijn relatief subtiele verschillen, die in deze proef werden overvleugeld door het grote verschil in lichtintensiteit. Daarom wordt er geen uitspraak gedaan over rendement.

Warmteoverschot

Belichting met SON-T veroorzaakt regelmatig warmteoverschot in de kas, zeker bij gesloten (lichthinder)scherm. Deze warmte wordt afgelucht, wat direct energieverlies betekent. Bij LED belichting speelt dit minder of helemaal niet (afhankelijk van de omstandigheden). Dit voordeel van LEDs wordt belangrijk wanneer 100% lichtafscherming verplicht wordt. Bij luchtgekoelde LED systemen komt de geproduceerde warmte direct in de kas, en wordt veel beter verspreid dan bij 1000 Watt SON-T lampen. Bij watergekoelde LEDs (zoals dit systeem van Lemnis) wordt de warmte afgevoerd en kan eventueel nuttig worden aangewend of opgeslagen of gerecycled via de retourbuis. LED belichting heeft dus een beter verdeelde of beter regelbare warmte-inzet, wat niet snel zal leiden tot afluchten van overtollige warmte. Op deze manier zal LED dus bijdragen aan betere energie-efficiëntie.

Conclusie

In dit onderzoek is via simulatieberekeningen gevonden dat in deze proef de productie maximaal 5% hoger kan zijn geweest bij LED belichting dan bij SON-T belichting, teruggerekend naar hetzelfde belichtingsniveau en gelijke omstandigheden, maar het kan ook gelijk of lager zijn geweest. Vanwege de vele verschillen en de niet-lineaire lichtresponse kon het effect op productie niet nauwkeuriger bepaald worden.

Het energieverbruik kon niet goed bepaald worden, maar aangezien de elektrische efficiency van LED en SON-T min of meer gelijk is, is het verwachte verschil ook gering (ordegrootte van procenten). Er zijn alleen subtiele verschillen als gevolg van andere warmtebehoefte en geen noodzaak om warmte af te luchten.

Het vereist een zeer goede proefopzet om een klein verschil in productie of energieverbruik aan te tonen en te kwantificeren. De proefopzet zoals die was in 2008/2009 bij Redstar Trading was hiervoor niet nauwkeurig genoeg, vooral omdat de lichtintensiteit zo verschillend was dat dit meer effect had dan het subtiele verschil tussen LED en SON-T. Bovendien waren er grote verschillen tussen de behandelingen (locaties, plantdatum, belichtingsniveau en -regiem, klimaatregeling en meer). De eindconclusie is dat belichting met LED ongeveer even goed of iets beter presteert als belichting met SON-T, indien de belichtingsniveaus gelijk zouden zijn.

10 Literatuur

- Dueck T & S. Pot, 2008.
Doen LEDs al wat ze beloven op praktijkschaal? Rapport 221, Wageningen UR, 2008.
- Heuvelink E, 1996.
Tomato growth and yield: quantitative analysis and synthesis. PhD thesis, Wageningen Universiteit.
- Nederhoff E, P. de Boer, A. Schapendonk, S. Pot & T. Dueck, 2009.
Stuur LEDs en energiebesparing bij paprika: onderzoek in de praktijk bij VOF Dingemans. WUR rapport 285.
Project 3242058800, gefinancierd door PT en LNV in het kader van programma 'Kas als Energiebron' (in druk).
- Paradiso R, E. Meinen, J.F.H. Snel, W. van Ieperen, S.W. Hogewoning & L.F.M. Marcelis, 2010.
Light use efficiency at different wavelengths in rose plants. Acta Horticulturae (in druk).
- Sanwo M.M., G.D. Goins, N.C. Yorio & C.S. Brown. 1997.
Changes in leaf carbohydrate metabolism in wheat plants grown under red and blue light. Plant Physiol. 114: 81.
- Schapendonk A.H.C.M., C.S. Pot, C. Rappoldt, & E.M. Nederhoff, 2009a.
Assimilatiebelichting Tomaat, scenario analyses LED en SON-T. Plant Dynamics BV, Wageningen. In WUR rapport 286 (dit rapport).
- Schapendonk A.H.C.M., C.S. Pot, C. Rappoldt & E.M. Nederhoff, 2009b.
Assimilatiebelichting Paprika, scenario analyses LED en SON-T. Plant Dynamics BV, Wageningen. Deel 2 van Nederhoff ea, 2009 (WUR rapport 285).
- Schapendonk A.H.C.M., 2009.
Literatuuronderzoek. Deel 3 van WUR rapport 286 (dit rapport).
- Snel e.a.
Fotosynthese-efficiency bij verschillende lichtkleuren. PT projectnr. 13100. (in voorbereiding)
- Taiz L. & Zeiger E.
Plant physiology, fourth edition. Chapter 18. Sinauer Associates Inc. 705 p.
- Visser P. de, 2009.
Telen onder LEDs krijgt zeker een vervolg. Groenten en Fruit, 63(24), p48-49.

Publicaties over dit project

- Nederhoff, E.M., J.F.H. Snel & A.H.C.M. Schapendonk, 2009.
Opnieuw leren telen met led : veel praktijkonderzoek naar nieuwe techniek belichting: belichting. Nieuwe oogst / Magazine tuinbouw 5 (7). - p. 6 - 7.
- Nederhoff, E.M., T.A. Dueck & J.F.H. Snel, 2009.
LED-licht lijkt perspectief te bieden. Gewasnieuws tomaat 12 (4). - p. 1.
- Nederhoff, E.M.; Dueck, T.A.; Snel, J.F.H., 2009.
Onderzoek aan LED bij tomaat en paprika in 2009. Gewasnieuws Paprika 12 (4). - p. 4.
- Visser P de, 2009.
Telen onder LEDs krijgt zeker een vervolg. Groenten en Fruit, 63(24), p48-49.
- Staalduinen, J. van, L.F.M. Marcelis, E.M. Nederhoff, 2009.
LED-belichting wordt beter, maar we weten (nog) niet alles. Onder Glas 6 (9).

Bijlage I.

Plantwaarnemingen

Tabel I-1. Plantwaarnemingen op 16 december 2008. Gemiddelde waarde per plant en standaard afwijking.

	Gemiddelde	Standaard afwijking
Lengte (cm)	85	2.00
Aantal bladeren	14	1.15
Bladoppervak (cm ²)	1608	160.35
Vers gewicht blad (g)	65.8	2.54
Droog gewicht blad (g)	6.2	0.15
Versgewicht stengel (g)	50.9	0.17
Droog gewicht stengel (g)	3.6	1.39
Droge stof gehalte (%)	6.2	0.21
Versgewicht tros (g)	0.51	0.25
Droog gewicht tros (g)	0.07	0.03
Bladoppervlak dief (cm ²)	35.4	7.70
Vers gewicht dief (g)	2.66	0.30
Droog gewicht dief (g)	0.26	0.03
Bladoppervlak totaal (cm ²)	1643	165.79
LAI	0.69	0.07
Versgewicht plant total (g)	119.8	2.50
Droog gewicht plant totaal (g)	10.1	0.21
Aantal bloeiende trossen	1	0.00
Aantal kleine trossen	1.7	0.58

Bijlage II.

Belichtings Effectiviteit

Inleiding

In 2007/2008 waren er heel hoge verwachtingen t.a.v. LED, omdat rood licht meer effectief zou zijn voor fotosynthese dan SON-T licht. Er werd gesproken over LED-factor, d.w.z. dat LED-licht X keer zo efficiënt is als SON-T. In deze proef praten we niet over factor, maar over Belichtings Effectiviteit (BE). Daarnaast kan Systeem Effectiviteit (SE) worden gebruikt voor vergelijking van systemen in veel opzichten verschillend zijn.

Definitie

Vergelijking van LED en SON-T belichting kan als volgt gedaan worden:

$$\text{Belichtings Effectiviteit} = BE = \text{effectiviteit van LED} / \text{effectiviteit van SON-T}$$

BE kan betrekking hebben op de efficiëntie van alleen de lampen, bv

1. Hoeveelheid fotonen in relatie tot elektriciteitsgebruik

Maar BE moet betrekking hebben op plantprocessen, bv fotosynthese of productie, bv.

2. Fotosynthese in relatie tot hoeveelheid fotonen
3. Fotosynthese in relatie tot elektriciteitgebruik
4. Productie in relatie tot hoeveelheid fotonen
5. Productie in relatie tot elektriciteitgebruik

Gram per mol

De meest relevant benadering is productie in relatie tot hoeveelheid fotonen die het gewas heeft ontvangen (4). Dus productie (kg/m²) gedeeld door licht (mol/m²). Dit resulteert in 'gram per mol'. Dit kan alleen goed worden uitgewerkt als méérproductie versus extra hoeveelheid licht die ontvangen is, bij gelijke intensiteit van LED en SON-T. Het mag niet berekend worden over het totaal van ontvangen licht. De productie is dan voor slechts een deel afkomstig van belichting, en BE is dus 'verdund' (te laag).

Ook werkt de berekening niet als de lichtniveaus van LED en SON-T ongelijk zijn. Veel groeiprocessen hebben een niet-lineaire response, maar een kromlijng verband. Dit is de wet van de afnemende meeropbrengst: het lichteffect neemt af naarmate het lichtniveau hoger is ('verzadigingseffect'). Dus het effect van méér licht is groter bij laag lichtniveau dan bij hoog lichtniveau. Een vergelijking van effectiviteit van lampen valt dan gunstiger uit voor de behandeling met de laagste lichtintensiteit. Daarom is het van belang dat de lichtniveaus gelijk zijn. De non-lineariteit speelt dan geen rol, en BE wordt nauwkeuriger bepaald. Dus BE moet worden berekend uit data bepaald bij ongeveer gelijke lichtniveaus:

$$\text{Belichtings Effectiviteit} = \frac{\text{gram meerproductie per mol extra LED licht}}{\text{gram meerproductie per mol extra SON-T licht}} = \frac{\text{gram per mol bij LED}}{\text{gram per mol bij SON-T}}$$

'Basisproductie'

Om 'meerproductie' te weten moet de 'basisproductie' bekend zijn. Dit is de productie in ONBELICHT. Ook de hoeveelheid basis licht (natuurlijk licht) en de hoeveelheid bijbelichting moet bekend zijn. Dit is alleen het geval wanneer een proef gedaan is met behandelingen 'onbelicht', SON-T en LED. De onbelichte behandeling geeft de basisproductie, zodat de meerproductie door LED en SON-T kan worden bepaald. Bij ontbreken van exacte

informatie over basis- en meerproductie (of over basislicht en extra licht), is het mogelijk om gebruik te maken van gewasgroeimodellen waarin de effecten van LED en SON-T op procesniveau bekend zijn. Hiermee kunnen verschillen in belichting, klimaat en/of teeltmaatregelen 'weggerekend' worden, en meerproductie geschat. Dit kan dan gebruikt worden om te komen tot een zo goed mogelijke schatting van de BE.

Periode

Ook van belang is de periode waarover BE wordt berekend. Belichting gebeurt vooral in de donkerste maanden tot april of mei. De productie is in het begin gering, en in de zomer heel hoog, wanneer de belichting allang gestopt is. Het is niet wenselijk om een willekeurige korte periode te beschouwen of om een bepaalde periode weg te laten (bv de aanvangsperiode wanneer wel wordt belicht maar niet geoogst). De periode moet zo gekozen worden dat de vergelijking eerlijk en zinvol is. Op zijn minst moet de beschouwde periode worden vermeld, en het verdient aanbeveling om een weging te maken over de hele duur van de bijbelichting.

Aanpassingen en optimaliseren

Door bijbelichting verandert niet alleen het licht. Soms zijn bewust veranderingen aangebracht, bv hogere plant- of stengeldichtheid of hogere plantbelasting, of extra warmte is toegediend. Dit optimaliseren van teeltomstandigheden wordt gedaan om optimaal gebruik te maken van de belichting. Optimalisatie kan leiden tot tamelijk verschillende teeltomstandigheden, zodat vergelijking moeilijker wordt. Een goed simulatiemodel kan een verschil in teeltomstandigheden 'wegrekenen' om toch een schatting van BE te kunnen maken.

Systeem Effectiviteit (SE)

Het is van belang dat de omstandigheden zoveel mogelijk gelijk zijn, zodat de vergelijk het meest nauwkeurig is. Het gaat om plantdatum, ras, source/sink verhouding (plant- of stengel-dichtheid, plantbelasting), belichtingsniveau, -periode, -duur, klimaat, teeltwijze, warmtetoediening of afvoer, input water & voeding.

Naarmate meer omstandigheden verschillend waren, wordt niet alleen het belichtingseffect maar effecten van de teeltsystemen vergeleken, en kan systeem effectiviteit genoemd worden.

$$\text{Systeem Effectiviteit} = SE = \frac{\text{meerproductie per hoeveelheid input van teeltsysteem LED}}{\text{meerproductie per hoeveelheid input van teeltsysteem SON-T}}$$

Hierbij zou het moeten gaan om de totale in- en output. Totale input kan omvatten energie totaal (elektriciteit, gas), en eventueel ook water, kunstmest, en zelfs arbeid. De totale output kan zijn productie, en ook stroom. Dit wordt een bedrijfseconomische analyse, en de enige bruikbare eenheid is Euro.

Conclusie

Wanneer een 'factor' wordt geclaimd voor effectiviteit van LED belichting, hoort daarbij vermeld te worden hoe die is berekend: over welke periode; of er een referentie was; in hoeverre de lichtniveaus en teeltomstandigheden gelijk waren; op welk wijze eventuele modelberekeningen zijn gedaan; en in welke eenheden de in- en output is berekend. Als alleen het effect van het licht op de productie wordt vergeleken (gram per mol) kunnen we spreken van Belichtingseffectiviteit (BE). Dit werkt alleen als de lichtniveaus ongeveer gelijk waren, en als zowel basislicht als basis productie bekend zijn uit een onbelichte behandeling. Dit lukt alleen in goed opgezette proeven.

In het andere uiterste zijn alle omstandigheden anders. Dan is er sprake van Systeem Effectiviteit (SE) van het ene teeltsysteem t.o.v. het andere, en kan alleen een vergelijking gemaakt worden op basis van in- en output (bv in Euro's).

Deel 2:

Scenario analyses



Assimilatiebelichting Tomaat

Scenario analyses LED en SON-t

Een studie door A.H.C.M. Schapendonk, C.S. Pot, C. Rappoldt en E. Nederhof

Juli 2009



Assimilatiebelichting tomaat

Scenario analyse LED en SON-T

Ad Schapendonk¹, Sander Pot¹, Kees Rappoldt² en Elly Nederhof³

¹Plant-Dynamics BV, Englaan 8, 6703 EW Wageningen

²EcoCurves, Kamperfoelieweg 17, 9753 ER Haren

³Wageningen UR Glastuinbouw, Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk

E-mail: ad@plant-dynamics.nl

Plant-Dynamics BV

Wageningen, 2009

REFERAAT

A.H.C.M. Schapendonk, C.S. Pot, C. Rappoldt en E. Nederhof, 2009. *Assimilatiebelichting tomaat ; Scenario analyse LED en SON-T*. Plant-Dynamics en EcoCurves, Wageningen. 58 blz. ; 96 ref.

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

Keywords: Belichting, LED, SON-T, simulatie, tomaat

Dit rapport is gemaakt in opdracht van het Productschap Tuinbouw en het ministerie van LNV in samenwerking met WUR glastuinbouw. We danken Willem van Dijk, Hugo Goos en Dirk van der Kaaij voor alle medewerking die we hebben gekregen bij de uitvoering van dit project.

© 2009 Plant-Dynamics en EcoCurves
Englaan 8, 6703 EW Wageningen, Nederland
Kamperfoelieweg 17, 9753 ER Haren (gn), Nederland

e-mail: ad@plant-dynamics.nl

Voorplaat: "Fotosynthesemeting bij tomaat. Locatie van der Kaaij"

2009 Wageningen, Plant Dynamics BV en EcoCurves. Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Plant Dynamics BV en EcoCurves.

[Assimilatiebelichting tomaat]

Inhoudsopgave

Index figuren	5
Index tabellen	6
1 Samenvatting	7
2 Vergelijking son-t en LED	9
2.1 Simulaties met Optomaat Explorer	9
3 Source	11
3.1 Fotosynthese	11
3.1.1 Experimenten	11
3.2 Licht	13
3.3 CO ₂	14
3.4 V _c max en J _{max}	16
3.4.1 Lichtonderschepping	17
3.5 Huidmondjes geleidbaarheid	18
3.6 Sink	18
4 Scenario analyses	20
4.1 Inleiding	20
4.2 LED en son-t micromol = micromol	21
4.3 Vergelijking teelten op verschillende plantdata	24
4.4 Timing van eerste scheut	27
4.5 Temperatuureffecten	28
4.6 CO ₂	30
4.7 Conclusies	30
5 Literatuuronderzoek	31
5.1 Inleiding	31
5.2 Terminologie van het quantum rendement	32
5.2.1 Quantum rendement van geabsorbeerd licht; Q _{Ea}	32
5.2.2 Quantum rendement van invallend licht op bladniveau; Q _{Eb}	33
5.2.3 Quantum rendement van invallend licht op gewasniveau; Q _{Eg}	33
5.2.4 Quantum rendement van de CO ₂ assimilatie: Q _{fot}	34
5.2.5 Quantum rendement van de groei: Q _{groei}	34
5.3 Lichtbehoefte voor assimilatie	34
5.4 Fotosynthese en licht efficiëntie	35
5.4.1 Indeling van het zichtbare spectrum	37
Daglicht	37
5.4.2 De bovengrens van het actieve spectrum	37
5.4.3 De ondergrens van het actieve spectrum	39
5.4.4 Conclusie	41

5.5	Belangrijkste pigmenten	41
5.5.1	Fytochroom	41
5.5.2	Cryptochroom	43
5.6	Stuurlicht in het blauwe, rode en groene spectrum	44
5.6.1	Blauw	44
	Minimale hoeveelheid blauw in de kas	46
	Conclusie	47
5.6.2	Groen	47
5.6.3	Rood	48
	Conclusie	49
5.7	Ontkoppeling tussen IR en PAR-licht	49
5.8	Gepulseerd licht	50
5.9	Ziekten en plagen	50
5.10	Energetisch rendement van licht	51
5.10.1	Lampniveau	51
5.10.2	Systeemniveau	52

Bibliografie
53

Lijst van figuren

2.1	Foto van de rood-blauwe LED behandeling	10
3.1	Foto van de LiCor-6400 meetapparatuur	12
3.2	Correlatie tussen de fotosynthese en het elektronentransport	13
3.3	Fotosynthese als functie van de lichtintensiteit	15
3.4	Relatie tussen CO ₂ concentratie en fotosynthese	16
3.5	SPAD metingen. Een relatieve maat voor het chlorofyl gehalte	18
3.6	Verloop van de huidmondjesgeleidbaarheid (gs) over de dag in april. LED-92; violet, onbelicht; grijs; son-t-207; geel getrokken lijn	19
4.1	De gemeten cumulatieve vruchtproductie en de gesimuleerde geoogste productie	22
4.2	Verhouding tussen assimilaten-aanbod en assimilaten-benutting	25
4.3	Assimilatenverdeling als fractie van het totale aanbod	26
5.1	Absorptiespectrum van een blad	35
5.2	Spectrale verdeling van het zonlicht	38

Lijst van tabellen

1.1	Productie efficiency gesimuleerd met plantdatum 13 november voor de drie behandelingen	7
1.2	Productie efficiency gesimuleerd met plantdatum 5 december voor de drie behandelingen	8
3.1	Jmax en Vcmax tijdens eind januari en begin april	17
4.1	Analyse van de productie in de LED-92 behandeling	23
4.2	Productie efficiency gesimuleerd met plantdatum 13 november voor de drie behandelingen	24
4.3	Productie efficiency gesimuleerd met plantdatum 5 december voor de drie behandelingen	27
4.4	Het effect van een <i>extra</i> verhoging van het aantal stengels bij de eerste gelegenheid dat een extra scheut werd aangehouden	27
4.5	Scenario berekeningen aan het effect van de NIR component in de belichting	28
4.6	Scenario berekeningen aan het effect van een temperatuurverhoging boven of onderin het gewas	29
5.1	Voorbeeld van belichtingsrendementen met son-t in een praktijkkas.	52

HOOFDSTUK 1

Samenvatting

De proeven zijn uitgevoerd op de bedrijven van Redstar Trading (Van De Kaaij) in Voorne-Putten. De effecten van belichting met LED's ($92 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, plantdatum 4 december) werd vergeleken met die van son-t lampen ($207 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, plantdatum 13 november) en son-t ($45 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, plantdatum 4 december). De behandelingen worden verder aangeduid als: son-t-207, LED-92 en son-t-45.

Met behulp van Explorer Tomaat werden de experimentele resultaten en het gemeten kasklimaat gekoppeld om de productiever verschillen gefundeerd door te rekenen. In tabel 1.1 zijn de 3 teelten modelmatig gesynchroniseerd. Dat wil zeggen dat de simulatie voor alle teelten start op 13 november. In vergelijking met son-t-207 presteren zowel de LED-92 als son-t-45 slechter.

Tabel 1.1. Gesynchroniseerde simulaties met plantdatum 13 november. De kolom "Drogestof" (in g mol^{-1}) is de totale droge stof productie in gram van het hele gewas gedeeld door de totale belichtingssom in mol PAR. Dit is de groei efficiëntie. Oogst (in kg m^{-2}) is de tomaten oogst tot week 15 in 2009. De kolom "Vrucht Prod Eff" (in g mol^{-1}) is de tomaten oogst uitgedrukt als een vergewicht per mol PAR. Dat is dus de vruchtproductie efficiëntie. De laatste kolom, de efficiëntie ratio, is de relatieve vruchtproductie efficiëntie ten opzichte van die voor son-t-207.

	Drogestof (g mol^{-1})	Oogst (kg m^{-2})	Vrucht Prod. eff. (g mol^{-1})	Efficiëntie ratio (%)
son-t-207	0.73	10.18	4.28	100
LED-92	0.65	6.56	3.85	90
son-t-45	0.69	4.79	3.35	78

De vruchtproductie efficiëntie in de LED-92 behandeling is 10% lager dan in son-t-207 maar 12% hoger dan in son-t-45. Dit verschil kan niet worden toegeschreven aan de lichtkleur, maar wordt geheel veroorzaakt door de verschillen in lichtintensiteit. Bij een vroege planting geeft een hogere lichtintensiteit relatief grotere meeropbrengsten vanwege een drempel effect, waaronder helemaal geen productie mogelijk is. Hieruit blijkt hoe belangrijk de lichtintensiteit zelf is wanneer we 2 soorten belichting vergelijken.

De conclusie wordt anders bij een eerdere start van de teelt. In tabel 1.2 zijn alle teelten gesynchroniseerd op een andere startdatum, namelijk 5 december, de

Tabel 1.2. Gesynchroniseerde simulaties met plantdatum 5 december. De kolom "Drogestof" (in g mol^{-1}) is de totale droge stof productie in gram van het hele gewas gedeeld door de totale belichtingsom in mol PAR. Dit is de groei efficiëntie. Oogst (in kg m^{-2}) is de tomaten oogst tot week 16 in 2009. De kolom "Vrucht Prod Eff" (in g mol^{-1}) is de tomaten oogst uitgedrukt als een versgewicht per mol PAR. Dat is dus de vruchtproductie efficiëntie. De laatste kolom, de efficiëntie ratio, is de relatieve vruchtproductie efficiëntie ten opzichte van die voor son-t-207.

	Drogestof (g mol^{-1})	Oogst (kg m^{-2})	Vrucht Prod. Eff. (g mol^{-1})	Efficiëntie ratio (%)
son-t-207	0.74	9.35	4.04	100
LED-92	0.69	6.98	4.25	105
son-t-45	0.70	3.95	2.89	72

eigenlijke startdatum van de LED-92 en de son-t-45 behandelingen. Dat betekent dat het aanhouden van scheuten en bladaantallen, voor die behandelingen, beter is afgestemd op de klimaatsituatie dan in tabel 1.1. Dat blijkt ook uit de resultaten. LED-92 is 5% hoger dan de son-t-207 en 33% hoger dan de son-t-45.

Van het effect van een hogere LED quantum efficiëntie voor de fotosynthese op *bladniveau* (+ 15%) blijft betrekkelijk weinig over op *gewasniveau*. Op basis van de huidige analyse leveren LED's als bovenbelichting een potentiële toename van de productie van ongeveer 5% per mol PAR. Uit de analyses blijkt verder dat een teelt die slecht is afgestemd op LED's tot verliezen van 10% of meer kan leiden. Wanneer we LED's niet alleen zien als een afzonderlijk gegeven maar beschouwen als onderdeel van een nieuw te formuleren teelt management zijn er meer perspectieven, met name waar warmtebelasting in de kas een belangrijke rol speelt. We zien daarnaast mogelijkheden voor een specifieke stimulering van nieuwe sinks of het tegengaan van veroudering met belichting die *in* het gewas is gepositioneerd. Cruciaal daarbij is het uitblijven van bladvervorming c.q. beschadigingen door de lokale belichting in het gewas met LED's. Dit is geen eenvoudige opgave.

De effecten van het ontbreken van NIR op de bladtemperatuur zijn gering door compensatie van de hoge verdamping onder son-t. Mogelijke directe effecten van de belichting op de temperatuur van het groeipunt zijn niet uitgesloten maar in dit onderzoek niet meegenomen.

Vergelijking son-t en LED

De proef, waarvoor onderstaande analyses werden verricht, zijn uitgevoerd op de bedrijven van Redstar Trading (Van De Kaaij) in Voorne-Putten. De effecten van belichting met LEDs ($92 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, plantdatum 4 december) werd vergeleken met die van son-t lampen ($207 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, plantdatum 13 november) en son-t ($45 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, plantdatum 4 december). De behandelingen worden verder aangeduid als: son-t-207, LED-92 en son-t-45.

Locaties met behandelingen:

- Aelbrechtseweg, teelt tomaten onder son-t in een afdeling van 57.000 m^2 . De belichtingsintensiteit was $207 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, (son-t-207).
- Ruigendijk, behandeling son-t-207. Er werd een proefvak van 8.000 m^2 van LED lampen met intensiteit $92 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, (LED-92).
- Westerlandseweg, een vak van son-t lampen met intensiteit $45 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, (son-t-45).

We maakten gebruik van de geregistreerde klimaatdata, scherminstellingen, aan- en uit-schakelen van de assimilatielampen en CO_2 concentraties met tijdstappen van 5 minuten. De berekeningen van assimilatenvraag van bladeren en vruchten vereisen een correcte berekening van de temperatuur van die plantdelen. Optomaat Explorer berekent de temperatuurverdeling in het gewas op basis van instraling, warmtetransporten via convectieve overdracht en verdamping. Het model is verder uitgerust met een routine waarmee het mogelijk is om de uitgroei van nieuwe scheuten op een operationele manier invulling te geven.

Centraal in de scenario analyses stond de vraag: Is LED belichting efficiënter dan son-t? Niet alleen het effect op de fotosynthese is daarbij van belang maar ook effecten op assimilatenverdeling en morfologie van de plant. Een te zware plantbelasting geeft bijvoorbeeld een remming van de vegetatieve groei. Dit vertaalt zich in een zwakke kop en een slechte zetting.

2.1 Simulaties met Optomaat Explorer

Als onderbouwing van de experimenten zijn modelmatige evaluaties verricht met een mechanistisch simulatie model. Het model is mechanistisch omdat het de interactie tussen planteigenschappen, en microklimaat in de tijd kan simuleren met realistische terugkoppelingen. Het model bestaat uit twee hoofdrubrieken met de onderliggende



Figuur 2.1. Overzicht van de rood-blauwe LED behandeling op 21 januari

deelprocessen. De hoofdruibrieken zijn fotosynthese (en gerelateerde verdamping) (source) en groeiprocessen van verschillende plantendelen zoals bladeren, vruchten (sink). Het verloop van de balans tussen source en sink wordt in Optomaat Explorer meegewogen.

Omdat de drie teelten op verschillende locaties stonden met 2 verschillende plantdata, is een vergelijking alleen mogelijk met een theoretisch model.

Het effect van de ont koppeling van NIR en PAR kan met het model effectief worden geëvalueerd. De efficiëntie van belichting voor de fotosynthese zal toenemen bij hogere temperatuur tot een bepaald optimum. Daarnaast heeft de temperatuur een positief effect op de uitgroeisnelheid van bladeren (betere lichtonderschepping) en de snelheid van vruchtgroei. Zeker in de belichte teelt is de temperatuurregeling het stuur waarmee richting wordt gegeven aan de balans tussen assimilaten-aanbod en assimilaten-gebruik. Met het Explorer model krijgt deze balans een extra dimensie omdat van beide armen een onafhankelijke boekhouding wordt bijgehouden. Het is daarom mogelijk om de effecten van een onbalans zeer realistisch te berekenen. Het model berekent de doorlooptijd van bloem naar vrucht en de daarbij behorende verschuivingen van de positie van de vruchten in de tijd. Het gewas is opgedeeld in 10 bladlagen die op een realistische manier doorschuiven. De temperatuur-afhankelijke bladafsplittingsnelheid bepaalt de toenamesnelheid van de LAI (m^2 blad/ m^2 grondoppervlak) en de snelheid van bloemaanleg.

HOOFDSTUK 3

Source

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

3.1 Fotosynthese

Een hoge fotosynthese is de basis voor een efficiëntere teelt. Deelprocessen voor de fotosynthese zijn: CO₂ binding, elektronentransport in bladgroenkorrels (hier verder aangeduid als de **fotosynthese capaciteit** of ETR), lichtonderschepping, huidmondjes opening en chlorofyl aanmaak. Voor een optimale productie dient de assimilatenbron (source) in balans te zijn met processen die de assimilaten verbruiken, de sink processen (paragraaf 3.6). Sink processen hebben te maken met de benutting van suikers, zoals de vorming van nieuwe scheuten, bladeren, bloemen en de uitgroei van vruchten. Sink en source processen zijn als twee armen van een balans die in evenwicht moeten zijn om een optimale productie te realiseren.

3.1.1 Experimenten

De CO₂-opname van bladeren kan direct gemeten worden met behulp van gasanalyse. De LiCor-6400 (figuur 3.1), kan zodanig geprogrammeerd en gekalibreerd worden dat automatisch in ongeveer 40 minuten een licht response curve gemeten wordt in een reeks van oplopende lichtintensiteiten. Tijdens elke lichtstap worden de fotosynthese en de verdamping van het betreffende blad gemeten. Daarnaast wordt de openings toestand van de huidmondjes gemeten. Tijdens de metingen van de licht response curve werd de CO₂ concentratie op 1000 ppm gehandhaafd.

Op vergelijkbare wijze kan een curve gemaakt worden van de fotosynthese bij oplopende CO₂ concentraties. Hiervoor zijn voorzieningen in de LiCor opgenomen die de gewenste CO₂ concentratie realiseren in de luchtstromen aan onder- en bovenzijde van het blad, dat is ingeklemd tussen beide badkamers. De lichtintensiteit (PAR) tijdens de CO₂ respons curve wordt constant gehouden en was in dit experiment 1200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. De lichtintensiteit van 1200 $\mu\text{mol m}^{-2}$ is erg hoog maar dat dient hetzelfde doel als de hoge CO₂ concentratie in de licht response meting. We willen er namelijk zeker van zijn dat de lichtintensiteit verzadigend is om situaties te kunnen vergelijken. Overigens levert een dergelijk korte lichtstress bij tomaat geen langdurige stress op. Bij potplanten of ander planten die bij lage lichtintensiteiten

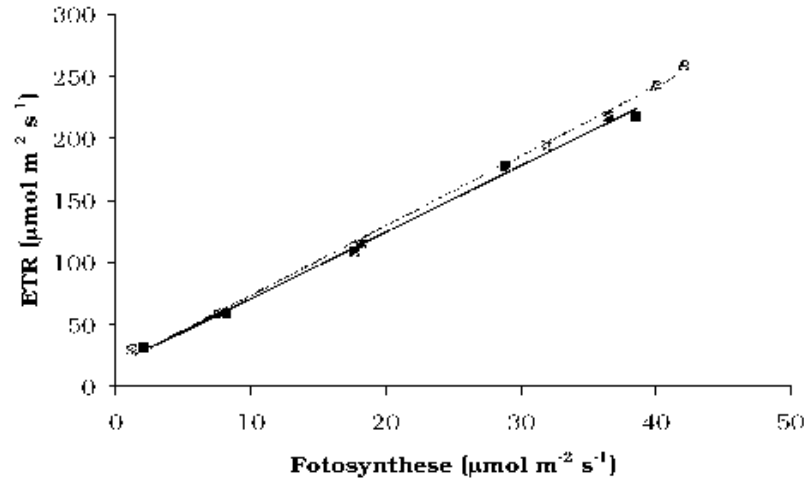
groeien, moeten lagere lichtintensiteiten tijdens het meten van de CO₂ response curves worden gehanteerd.



Figuur 3.1. 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, CO₂ concentratie, temperatuur en de relatieve luchtvochtigheid door een computerprogramma ingesteld en gevarieerd. Hierdoor kan de reactie van de assimilatie op deze veranderingen bepaald worden. Een fotosynthese van $10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ op bladoppervlakte basis, komt overeen met een groei van 1 gram drogestof per m² blad per uur. Stel dat we een dergelijke fotosynthese gedurende 10 uur kunnen handhaven dan is er voldoende energie vastgelegd om 10 g drogestof te assimileren per vierkante meter blad.

Behalve directe metingen van de CO₂ opname, zijn er spectroscopische technieken die de CO₂-opname indirect meten als het electronentransport, een maat voor de vastlegging van lichtenergie (ETR). ETR is evenredig met de fotosynthese als er geen beperking is van de CO₂ opname via de huidmondjes. In dat geval is er een lineair verband tussen ETR en de fotosynthese. De hellingshoek van de lijn in figuur 3.2 geeft het gemiddeld aantal elektronen dat door Fotosysteem 2 in de chloroplast wordt getransporteerd om voldoende energie vast te leggen voor de reductie van 1

molecuul CO_2 . In dit geval is dat ongeveer 6. Dat is een lage waarde en het betekent dat de fotosynthese, gemiddeld genomen, efficiënt verloopt. Verhoudingsgetallen bij kasgewassen variëren meestal tussen 5 en 10. ETR is dus een maat voor haalbare fotosynthese op basis van de energie vastlegging in de bladeren op dat moment.



Figuur 3.2. Correlatie tussen de fotosynthese (X-as) en het elektrontransport (Y-as) voor de verschillende LED behandelingen begin april. Er is geen verschil tussen de behandelingen. Dit betekent dat de assimilatie efficiëntie per eenheid licht voor alle behandelingen ongeveer gelijk is. LED-92; violet, onbelicht; grijs; son-t-207; geel getrokken lijn, son-t-45; geel stippellijn

De meest voorkomende oorzaak voor een lage efficiëntie is een lage huidmondjesgeleidbaarheid (zie sectie 3.5 en figuur 3.6). Dan daalt de CO_2 concentratie in het blad, waardoor de fotorespiratie toeneemt en de netto fotosynthese daalt. Dit treedt meestal op in situaties met hoge straling waarbij de bladtemperatuur en het dampdruk deficit van het blad (VPD_l) hoog oplopen. Huidmondjes sluiten namelijk om uitdroging van het blad te voorkomen. Als de situatie in de kas optimaal is, bij relatief lage lichtintensiteiten, zal de relatie tussen ETR en de fotosynthese een keurige rechte lijn zijn. In figuur 3.2 is te zien dat dit inderdaad het geval is in alle behandelingen. Bovendien zijn er ook tussen de behandelingen geen verschillen. De assimilatie kan dus direct worden bepaald uit de fluorescentie data.

3.2 Licht

In figuur 3.3 is voor alle behandelingen het verband tussen de lichtintensiteit en de netto fotosynthese weergegeven. De metingen zijn eind januari (figuur 3.3a) en begin april (figuur 3.3b) verricht. Dit zijn 2 momentopnames waarbij verwacht mag worden dat bijbelichting het grootste effect heeft (januari) en een moment waarop de invloed van het natuurlijke daglicht al weer sterk is toegenomen. son-t: start meting 12:00 uur (pad 365 vak 4).

De metingen werden verricht aan topbladeren en zijbladeren van het 1e volgroeid samengestelde blad, net boven pas gezette bloentros. De metingen onderin het gewas zijn verricht aan het 4e blad van onderen (tussen tros 5 en 6).

De fotosynthese in de onbelichte teelt was over de hele linie lager dan in alle andere lichtbehandelingen. In de loop van de teelt traden er verschuivingen op. De fotosynthese van de topbladeren nam in het voorjaar voor de LED-92 en son-t-207 toe. Dat is een normale aanpassing die optreedt als de gemiddelde lichtintensiteit over de dag gaat toenemen. Voor de son-t-207 behandeling zijn alleen in het voorjaar waarnemingen verricht en het blijkt dat de aanpassing aan een toename van het natuurlijke daglicht achterblijft bij de LED-92 en son-t-45 behandelingen. Er is een inhaaleffect van de LED-92 behandeling in het voorjaar tov de son-t-207 behandeling. Waarschijnlijk heeft dit niets met de LED's te maken maar wordt het veroorzaakt doordat de assimilatiebelichting een geringere rol gaat spelen in verhouding tot het natuurlijke daglicht. Deze waarneming is gedeeltelijk anders dan bij paprika. Daar bleef de fotosynthese van de onbelichte teelt en de langedag LED behandeling duidelijk achter bij de korte-dag LED-behandeling en de son-t. Uit de analyse blijkt bij paprika naast de positieve aanpassing aan hogere lichtintensiteiten, vooral de terugkoppeling van de plantbelasting een belangrijke rol te hebben gespeeld.

3.3 CO₂

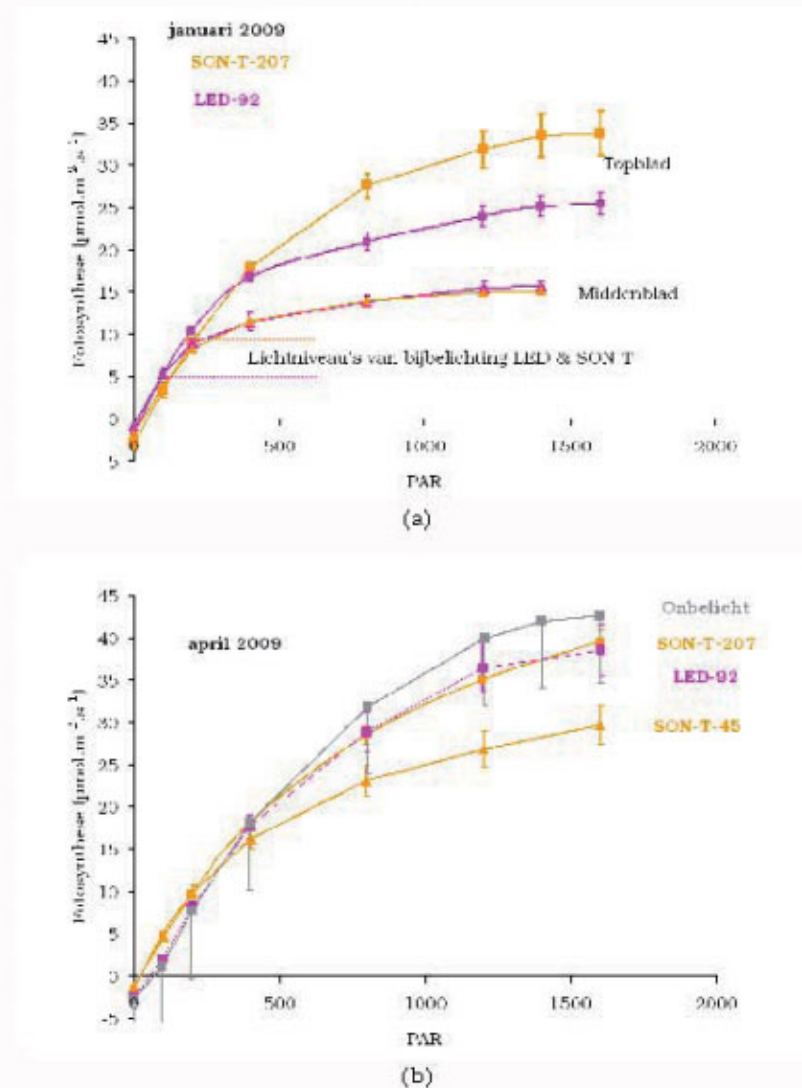
Door de CO₂ concentratie in het meetcuvet te variëren werd het effect van de CO₂ concentratie op de fotosynthesesnelheid bepaald. In het meetcuvet werd de concentratie stapsgewijs opgevoerd: 200 – 400 – 600 – 800 – 1200 – 1600 ppm CO₂ (bij 1200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PAR).

De fotosynthese is bij alle behandelingen verzadigd bij 900 ppm. De metingen werden verricht aan bladeren met een relatief hoge huidmondjesgeleidbaarheid (g_s). Als g_s echter laag is, neemt de CO₂ concentratie in het blad af en dan zal de gewenste instelling van de CO₂ concentratie in de kas hoger worden omdat er een hogere gradiënt nodig is om dezelfde interne concentratie te realiseren als bij een hogere g_s .

CO₂ speelt zeker in de gesloten kas een sleutelrol. Een verdubbeling van de CO₂ concentratie geeft een productieverhoging van 20 tot 40%. Het CO₂-effect wordt in het algemeen versterkt door de lichtintensiteit. Dit betekent dat het effect van assimilatiebelichting wordt versterkt door een optimale CO₂ dosering. Een toename van de CO₂ concentratie leidt tot een verhoging van de fotosynthese. Dit effect is goed onderzocht en gekwantificeerd, althans voor de korte termijn. Er zijn aanwijzingen dat op de langere termijn adaptatie aan een verhoogde CO₂ concentratie optreedt met als consequentie een nivellering van het effect. Vragen daarbij zijn:

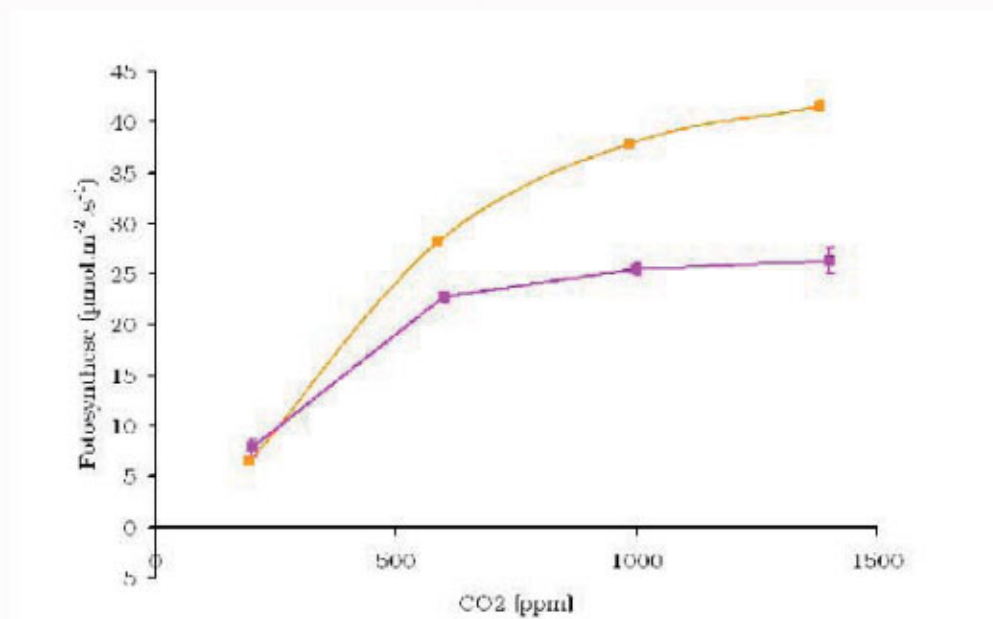
- Onder welke omstandigheden treedt adaptatie op?
- Is adaptatie aan hoog CO₂ gewas- of ras gebonden?
- Is er sprake van een overschot aan assimilaten, c.q. eindproductremming?
- Is er sprake van een interactie met verouderingsprocessen?

Een verdubbeling van de CO₂ concentratie leidt in de aanloopfase direct na planten tot een toename van de relatieve groeisnelheid met 15–20%. Een negatieve terugkoppeling van een hogere CO₂ concentratie is de vorming van dikkere bladeren,



Figuur 3.3. Fotosynthese als functie van de lichtintensiteit in verschillende behandelingen, gemeten op 21 januari (a) en 2 tot 4 april (b). De lichtintensiteit werd gevarieerd en de CO₂ concentratie werd constant gehouden op 1000 ppm. LED-92; violet, onbelicht; grijs; son-t-207; geel getrokken lijn, son-t-45; geel stippelij.

waardoor in de jonge fase van het gewas, een deel van het CO₂-effect teniet gedaan werd. Er is in dat geval namelijk meer koolstof nodig om eenzelfde bladoppervlak te maken. De verdeling van de assimilaten over stengel, blad, wortel en vruchten wordt niet beïnvloed door de CO₂ concentratie. In een gesloten gewas, tijdens de lineaire groeifase, kan een verdubbeling van de CO₂ concentratie de productie met 30% verhogen, wat gelijk is aan de stijging van de fotosynthese. Het relatief geringer



Figuur 3.4. Relatie tussen CO₂ concentratie en fotosynthese in de son-t-207 en LED-92 behandelingen gemeten op 22 januari.

effect in de exponentile fase wordt veroorzaakt door de negatieve terugkoppeling van de hogere CO₂ concentratie op het specifieke bladgewicht.

In het verleden heeft toediening van CO₂ in de tuinbouwpraktijk geleid tot gewasreacties die duidelijk wijzen in de richting van adaptatieverschijnselen aan de heersende hoge CO₂ concentraties, mogelijk in interactie met hoge instraling en verschuiving in de mineralenhuishouding. Temperatuur en RV spelen een belangrijke rol om deze adaptatie te doorbreken. We hebben in het seizoen 2008/2009 bij hoge straling en langdurig hoog CO₂, kort blad en soms ook gekruld blad zien ontstaan maar minder dan in vorig seizoen. Naar verwachting blijft de stimulering van de groei door CO₂ bij tomaat constant over het seizoen.

3.4 V_{max} en J_{max}

De belangrijkste processen in de fotosynthese zijn de snelheid van CO₂ binding (V_{max}) en de fotosynthese capaciteit (J_{max} = maximum ETR). J_{max} is in feite een maat voor de maximaal haalbare fotosynthese capaciteit. V_{max} wordt bepaald uit de CO₂ response curve en J_{max} uit de fluorescentiemetingen. Er waren grote verschillen tussen de behandelingen (tabel 3.1), die voor een deel kunnen worden teruggevoerd op verschillen in lichtintensiteit en de aanpassing daaraan.

De effecten op V_{max} en J_{max} dragen wel bij aan de verschillen in productie maar in de winter is het effect betrekkelijk gering. Een verdubbeling van J_{max} geeft 15% verhoging van de fotosynthese en een verdubbeling van V_{max} geeft 5-6% verhoging. De effecten komen voornamelijk tot uiting bij hoge lichtintensiteiten in

het voorjaar en in de zomer. Bij tomaat zien we in april, (uitgezonderd de lage waarden voor de son-t-45), geen effecten van de voorbehandeling. Dat betekent dat we voor deze kenmerken ook geen na-effect mogen verwachten. Opvallend zijn de hogere waarden in april voor de onbelichte teelt in vergelijking met son-t-45. Vermoedelijk heeft dit te maken met de leeftijd van het gewas. De son-t-45 heeft een slechte conditie vanwege de vroege planting terwijl de onbelichte teelt meer met het natuurlijke daglicht is meegegroeid. In tegenstelling tot tomaat zagen we bij paprika zagen wel een na-effect van de lichtbehandelingen in de winter.

De conclusie is dat Jmax en Vcmax bij son-t in de winter hoger zijn dan onder LED's maar dat het effect in het voorjaar snel wordt ingelopen. Dit heeft weinig te maken met de lichtkleur maar alles met de lichtintensiteit.

Tabel 3.1. Waarden voor Jmax en Vcmax ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) in de verschillende behandelingen voor eind januari en begin april.

	eind januari		begin april	
	Jmax	Vcmax	Jmax	Vcmax
LED-92	178	56	217	86
son-t-207	237	121	237	118
son-t-45	205	82	166	84
Onbelicht			274	96

3.4.1 Lichtonderschepping

De Fotonflux van het daglicht, LED-belichting en son-t werden in 3 fracties van het zichtbare spectrum (400–700 nm) verdeeld: 400–500 (blauw), 500–600 (groen) en 600–700 (rood). Op basis van de specifieke absorptie van de bladeren (gemeten), kan het effect van de belichtingsstrategie worden berekend.

De verschillen in absorptie ontstaan door veranderingen in blad dikte en verschillen in de concentratie van bepaalde pigmenten. Op basis van metingen door (wageningen-UR) bleek dat de efficiëntie de lichtbenutting in het rode gebied 15% hoger is dan die van het gemiddelde daglicht. Op gewasniveau is dit voordeel geringer omdat door strooiing van licht in het gewas. In de scenario analyses is met deze constatering rekening gehouden bij de berekening van de opbrengsten (paragraaf 4.2).

In figuur 3.5 zijn relatieve metingen van het totale absorptie spectrum van het bladgroen weergegeven. Deze zogenaamde SPAD-metingen geven een indruk van de absorptie eigenschappen van het blad voor het gehele spectrum van invallend licht maar de getallen zeggen nog weinig over specifieke gevoeligheden van de spectrale verdeling. Die specifieke gevoeligheid per golflengte is in dit project niet bepaald. Als de verschillen in SPAD-metingen zeer gering zijn is het erg onwaarschijnlijk dat er significante verschillen zijn in de specifieke absorptie. De verschillen tussen LED-92 en son-t-207 zijn zowel in de winter als in het voorjaar erg gering. De meting bij de son-t-45 behandeling wijkt in het voorjaar ook nauwelijks af van beide andere behandelingen. Opvallend is de toename van de absorptie door het onbelichte blad in het voorjaar, vergeleken met de winter. Dit effect kan worden toegeschreven aan een toename van de blad dikte.

3.5 Huidmondjes geleidbaarheid

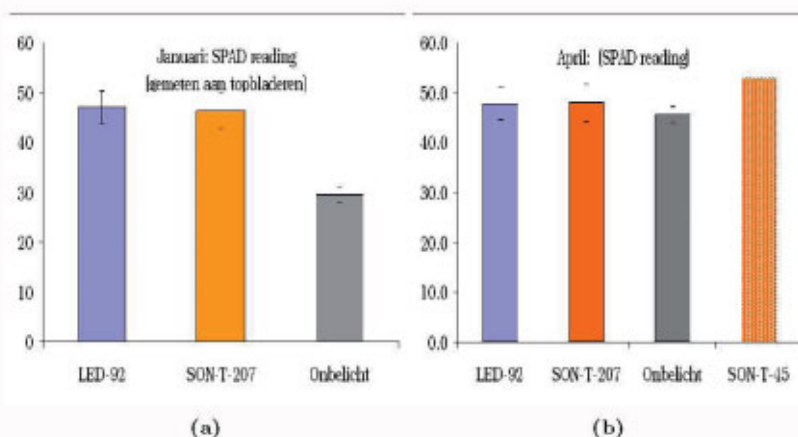
De huidmondjes geleidbaarheid (g_s) is een belangrijke grootte die bepaalt of er voldoende CO_2 kan worden opgenomen in het blad. Een hoge geleidbaarheid betekent dat de fotosynthese niet beperkt wordt door gesloten huidmondjes. De opname van CO_2 in het blad is dus niet gehinderd (voor uitleg zie paragraaf 3.1.1). Een hoge geleidbaarheid betekent ook vaak een hoge verdamping. Hierdoor zijn verdamping en fotosynthese (bij gelijk dampdruk deficit) aan elkaar gekoppeld. In de son-t-207 behandeling was de geleidbaarheid hoger dan in de LED-92 behandeling (figuur 3.6).

In alle behandelingen (inclusief de onbelichte behandeling (gemiddeld over 8 metingen tussen 10:30 u en 11:30 u) in april) is de geleidbaarheid hoog genoeg om geen beperkende factor te zijn voor de CO_2 opname in de belichte teeltperiode. De verschillen zijn hier dus niet relevant.

3.6 Sink

De belangrijkste sinks zijn vruchten bladeren en nieuwe scheuten.

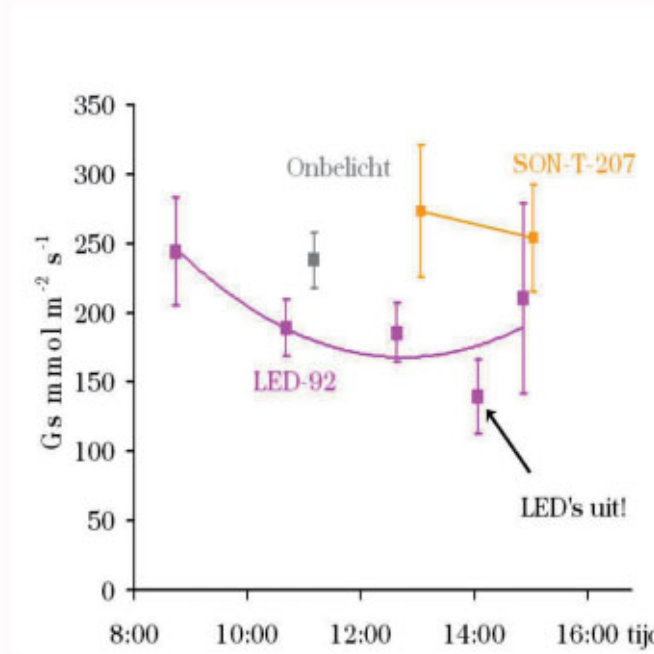
Het optimum voor het aantal bladeren per scheut en het aantal scheuten wordt bepaald door de gewenste lichtonderschepping en de kosten voor het onderhoud van de hoeveelheid bladmassa. Daarnaast zijn er nog indirecte effecten zoals een mogelijk hogere sinkfunctie van de vruchten, wanneer deze direct belicht worden. Voor een deel wordt dit bepaald door de effecten van de straling op de vruchttemperatuur en voor een deel door onbekende hormonale effecten. Deze hormonale effecten zijn in de simulatie niet meegewogen omdat er onvoldoende kennis is om dat effect te kwantificeren. Het is echter een breed gedragen inzicht dat licht een direct effect heeft op de zetting en uitgroei van vruchten bij tomaat en komkommer (Schapendonk



Figuur 3.5. SPAD metingen. Een relatieve maat voor het chlorofyl gehalte. Metingen werden verricht in januari (a) en in april (b).

& Brouwer, 1984) en dat dit effect mogelijk door hormonen zoals cytokinine en auxine wordt bepaald.

Zowel bladpluk als de timing van het aanhouden van nieuwe scheuten zijn belangrijke management beslissingen. Behalve de netto effecten op opbrengst heeft het schuiven met de datum van scheutuitloop ook grote consequenties voor de grofheid van de vruchten.



Figuur 3.6. Verloop van de huidmondjesgeleidbaarheid (g_s) over de dag in april. LED-92; violet, onbelicht; grijs; son-t-207; geel getrokken lijn

HOOFDSTUK 4

Scenario analyses

Het model berekent de productie op basis van het microklimaat en de effecten daarvan op morfologische en fysiologische processen. De berekeningen zijn dus niet gebaseerd op statistische interacties maar op mechanismen in de plant. Explorer modellen zijn operationeel in te zetten voor het berekenen van variaties van teeltomstandigheden, mits de sleutelparameters van deelprocessen in experimenten worden bepaald. De combinatie van theorie en experiment leidt tot inzichten en conclusies die verder gaan dan experimenten op zich.

4.1 Inleiding

De doelstelling van het project was niet eenvoudig: 'geef voor de tomatenteelt een schatting van de eventuele meerwaarde van LED ten opzichte van son-t, onder praktijkomstandigheden'. De taakstelling werd nog bemoeilijkt omdat de experimenten met LED en son-t belichting in verschillende kassen werden verricht en er bovendien voor de teelten andere plantdata werden gehanteerd. Waarom werd dan toch gekozen voor deze opzet?

1. Omdat er dringend behoefte was om op praktijkniveau snel een goede schatting te krijgen en omdat de infrastructuur eind 2008 op het bedrijf van van der Kaaij aanwezig was.
2. Omdat er de overtuiging was dat de verschillen in plantdatum en kas op een betrouwbare manier gecompenseerd kunnen worden met een geteste rekenmethode.
3. Omdat een dergelijke geteste rekenmethode beschikbaar is.
4. Omdat er de overtuiging was dat het aantonen van relatieve verschillen, onder complexe bedrijfsomstandigheden, nauwkeuriger en betrouwbaarder kan gebeuren met een theoretische benadering dan op een experimentele wijze.
5. Omdat we meer inzicht wilden hebben in het relatief belang van de verschillende deelprocessen zodat de resultaten kunnen worden geëxtrapoleerd naar andere omstandigheden. Daarom hoeven en er niet voor elke wijziging in belichtingsystemen nieuwe experimenten te worden verricht.
6. Omdat een experiment met gelijke start onder vergelijkbare omstandigheden uiteindelijk toch zou leiden tot grote verschillen in klimaat en teeltmanagement. Verschillen in belichting en stralingswarmte van de LED en son-t armaturen

vragen nu eenmaal om verschillende teeltmaatregelen. Model analyse zou ook dan nodig zijn.

7. Omdat de verwachte verschillen in producties in absolute zin te klein zijn om op praktijkschaal in een experiment zonder herhalingen significant aan te kunnen tonen.

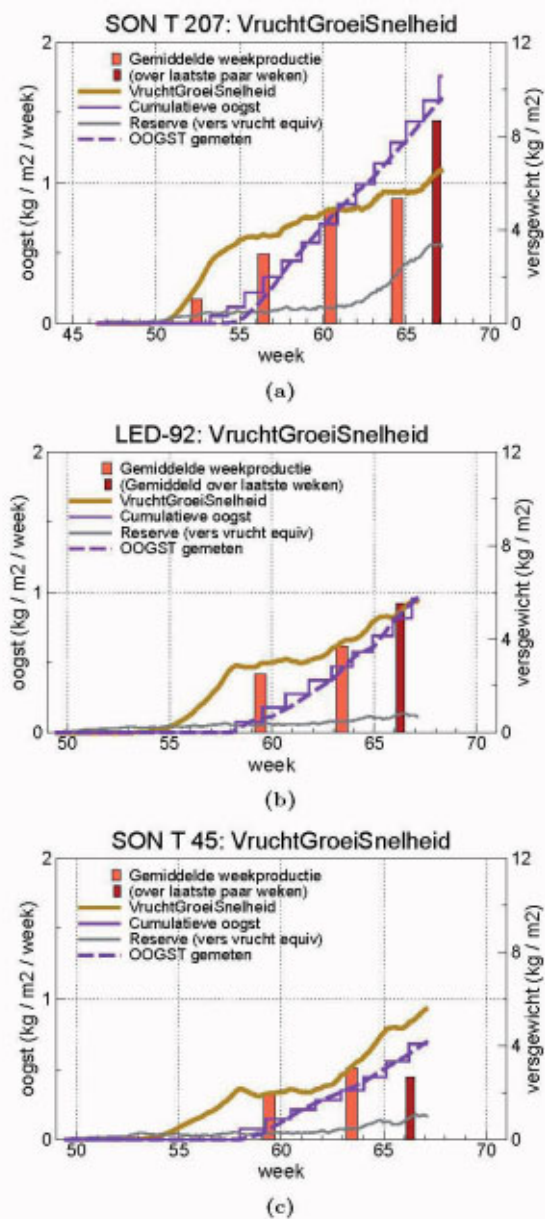
De vergelijkingen die met simulatiemodellen gemaakt worden zijn als het ware virtuele experimenten. Omdat een simulatiemodel altijd een vereenvoudiging is van de werkelijkheid heeft het zijn beperkingen, vooral als het om het voorspellen van absolute verschillen gaat. Een goed geparparameteriseerd simulatiemodel, is echter een uitstekend gereedschap om relatieve effecten op te sporen en daar gaat het meestal om, ook in dit project. 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 een jaar verschillende strategieën voor belichting, temperatuur en gewas management te vergelijken.

Enkele voorbeelden zijn weergegeven in paragraaf 4.4. De gekozen opzet 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.

4.2 LED en son-t micromol = micromol

In de eerste stap is met Optomaat Explorer een test uitgevoerd waarin werd geanalyseerd of de berekende productie in de 3 teelten (LED-92, son-t-207 en son-t-45) overeen kwam met de werkelijk gerealiseerde productie. In figuur 4.1 op bladzijde 22 is een samenvatting gegeven van de resultaten. Door de onderlinge samenhang van assimilatenvraag en assimilatenaanbod op elk moment te berekenen ontstaat een beeld van de (on)balans in de plant. Vervolgens kan aan de hand van de parallel gemeten klimaatregistratie worden nagespeurd wat de samenhang is tussen de plantresponse en de verschillende klimaatfactoren. Het draait namelijk niet alleen om het type belichting maar om de samenhang tussen belichting en andere teeltomstandigheden en de effecten daarvan op de sturing van deelprocessen.

De voorspelde oogsten komen uitstekend overeen met de voorspellingen (figuur 4.1). Dat betekent dat de relaties tussen het microklimaat en de effecten daarvan op de deelprocessen correct zijn beschreven. Het betekent ook dat er geen grote positieve effecten zijn van LED tov de son-t. Het model voor de LED-92 behandeling geeft slechts een geringe onderschatting van de productie. Deze kleine afwijking is niet goed te zien in figuur 4.1 maar de getallen zijn terug te vinden in (tabel 4.1). Om de reden van de onderschatting door het model nader te bestuderen is een simulatie uitgevoerd van de LED-92 behandeling met een hogere quantum efficiëntie van het LED licht. Er zijn aanwijzingen uit de metingen van Wageningen-UR dat de quantum efficiëntie van de fotosynthese in het rode deel van het spectrum 15% hoger is dan in de rest van het spectrum, ook al is er geen verschil in de



Figuur 4.1. De gemeten cumulatieve vruchtproductie (paarse stippellijn in kg m^{-2}) en de gesimuleerde geoogste productie (paarse trapsgewijze lijn, ook op de rechter y-as). De grijze lijn (ook in kg m^{-2}) is de ophoping van reserves. De beige lijn is de totale plantbelasting (in kg m^{-2} per week op de linker y-as). De rode histogram staven geven de gemiddelde weekproductie van twee weken vóór tot twee weken na iedere staaf, in kg m^{-2} per week. De donkerrode staaf geeft de gemiddelde weekproductie over de laatste weken van een nog lopende termijn. LED-92 en son-t-45 zijn geplant in week 49, son-t-207 in week 46. De nummering van de x-as loopt over de jaargrens heen. Week 67 in de grafiek is dus $67 - 52 = \text{week } 15$ in 2009.

Tabel 4.1. Vergelijking van de LED-92 behandeling (gesimuleerd en gemeten) met twee gesimuleerde teelten, onbelicht en LED-92 met een verhoogde quantum efficiëntie. De kolom “licht \Rightarrow droge stof“ (g mol^{-1}) is de totale droge stof productie (in gram) van het hele gewas gedeeld door de totale belichtingssom (mol PAR). Kolommen “oogst“ geven een vers vruchtgewicht (vanaf begin van de teelt) in kg m^{-2} . Alle cijfers hebben betrekking op de teelt tot week 16.

	PAR (mol)	Gesimuleerd		Gemeten
		licht \Rightarrow droge stof g mol^{-1}	oogst (kg m^{-2})	oogst (kg m^{-2})
Onbelicht	1199	0.10	0.51	-
LED-92	1753	0.54	5.51	5.80
LED-92 (hogere efficiëntie)	1753	0.66	6.39	-

specifieke absorptie tussen de behandelingen. Wanneer de hogere efficiëntie wordt toegepast, leidt dat inderdaad tot een verhoging van de opbrengst ten opzichte van de standaard efficiëntie. De werkelijk gemeten opbrengst ligt tussen de niet verhoogde en de verhoogde waarde voor de quantum efficiëntie in. Dit betekent dat de waarde van een hogere efficiëntie niet voor 100% doorwerkt in de uiteindelijke productie.

Het perspectief voor productieverhoging door rood-blauwe LED applicatie als bovenbelichting is dus ongeveer 5%.

Ter vergelijking is in tabel 4.1 ook het resultaat gegeven voor een onbelichte teelt. Een onbelichte teelt zou nauwelijks productie hebben geleverd.

In feite bestaat er een drempel voor de dagelijkse lichtsom waar beneden geen groei mogelijk is vanwege onderhoudsprocessen die evenveel kosten als er aan assimilaten wordt geleverd. Wanneer we geen rekening zouden houden met dit drempel effect zou de conclusie zijn dat de LED-92 behandeling met een drogestof efficiëntie van 0.54 (tabel 4.1), 5 keer zo efficiënt is als daglicht met een drogestof efficiëntie van 0.10. Deze conclusie is niet correct en wordt veroorzaakt door het genoemde drempel effect. Dit illustreert de valkuil wanneer geen rekening wordt gehouden met niet-lineaire verbanden en drempels.

Een analyse van de balans tussen assimilaten aanbod en assimilaten behoefte is weergegeven in figuur 4.2 op bladzijde 25. De sinkregulatie van de vruchten is voor tomaat erg belangrijk. De vruchten krijgen in het model potentiële groeimogelijkheden toegewezen, die afhankelijk zijn van het ras, de temperatuur en het ontwikkelingsstadium van de tros. De assimilaten worden vervolgens verdeeld naar rato van de berekende sink per tros. Er worden dus 2 variabelen berekend: (1) de potentiële sink-afhankelijke vruchtgroei en (2) de gerealiseerde vruchtgroei. Op die manier is het mogelijk om op elk moment te bepalen of het gewas sink- dan wel source-gelimiteerd is.

In figuur 4.2 wordt de source-sink verhouding aangegeven met een blauwe punt voor iedere dag en met een blauwe lijn als voortschrijdend weekgemiddelde. Die lijn geeft inzicht in de verhouding tussen assimilaten-aanbod en assimilaten-benutting. Een waarde groter dan 1 (op de meest rechtse as) betekent dat er meer assimilaten worden aangemaakt dan er nodig zijn voor de groei van de verschillende sinks en een waarde kleiner dan 1 betekent dat er een tekort is. Een optimale situatie is een

balans tussen 1.3 en 0.7.

Afgezien van een korte periode van assimilatenoverschot in week 48 zien we in de balans van de son-t-207 een vrijwel ideaal patroon (de blauwe lijn in figuur 4.2a). son-t-45 heeft een slechte start en vanaf begin januari tot half maart (week 62) is er een kritisch tekort aan assimilaten ($\text{source-sink} < 0.7$). Voor de LED-92 behandeling is de situatie iets gunstiger. Ook hier is in dezelfde periode een tekort aan assimilaten maar de overgang is in januari minder stijl. Er wordt op dat moment ook weinig blad gevormd en het gewas staat te generatief. Na week 62 (=week 10 in 2009) in maart zien we de balans omslaan. Bij een verhouding boven 1,0 zouden extra stengels kunnen worden aangehouden om de sink te versterken (paragraaf 4.4).

De fracties van de aangemaakte assimilaten die aan wortel (grijs), stengel (lichtgroen), blad (groen) en vrucht (rood) worden toebedeeld zijn weergegeven in figuur 4.3 op bladzijde 26. De histogrammen geven het gesimuleerde gemiddelde trosgewicht. De groene stippellijn geeft het aantal stengels per m^2 weer. De voor- spelde trosgrootte komt goed overeen met de waarnemingen. In zowel de LED-92 als son-t-45 zien we rond week 62 (=week 10 2009) het laagste trosgewicht. De LED-92 behandeling is over de hele linie iets grover dan de son-t-45 behandeling.

4.3 Vergelijking teelten op verschillende plantdata

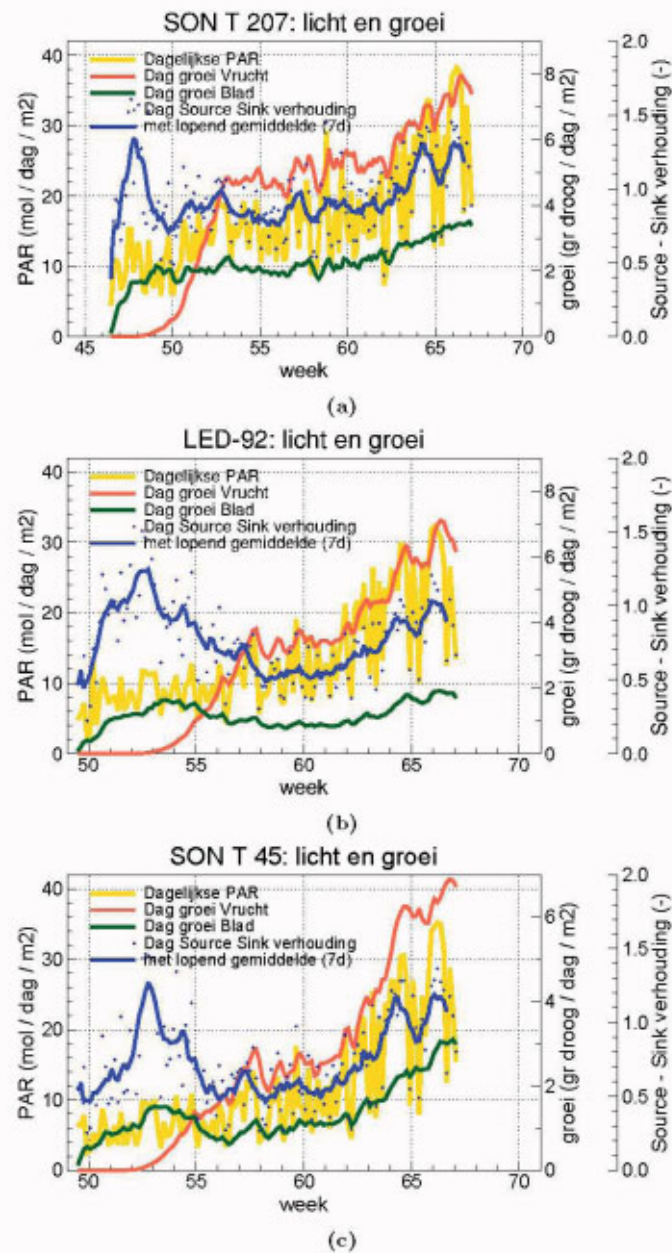
In tabel 4.2 zijn de 3 teelten modelmatig gesynchroniseerd. Dat wil zeggen dat de simulatie start op 13 november voor alle 3 teelten. In vergelijking met son-t-207 presteren zowel de LED-92 als son-t-45 slechter. De conclusie uit paragraaf 4.2 waarin de LED-92 5% beter zou moeten presteren gaat in eerste instantie dus niet op. Er is eerder sprake van een verlaging dan van een verhoging van de groei efficiëntie.

De vruchtproductie efficiëntie in de LED-92 behandeling is 10% lager dan in son-t-207 maar 12% hoger dan in son-t-45. Dit verschil kan niet worden toegeschreven aan de lichtkleur, maar wordt geheel veroorzaakt door de verschillen in lichtintensiteit. Bij een vroege planting geeft een hogere lichtintensiteit relatief grotere meeropbrengsten vanwege het eerder beschreven drempel-effect. Hieruit blijkt weer hoe belangrijk de lichtintensiteit zelf is wanneer we 2 soorten belichting vergelijken.

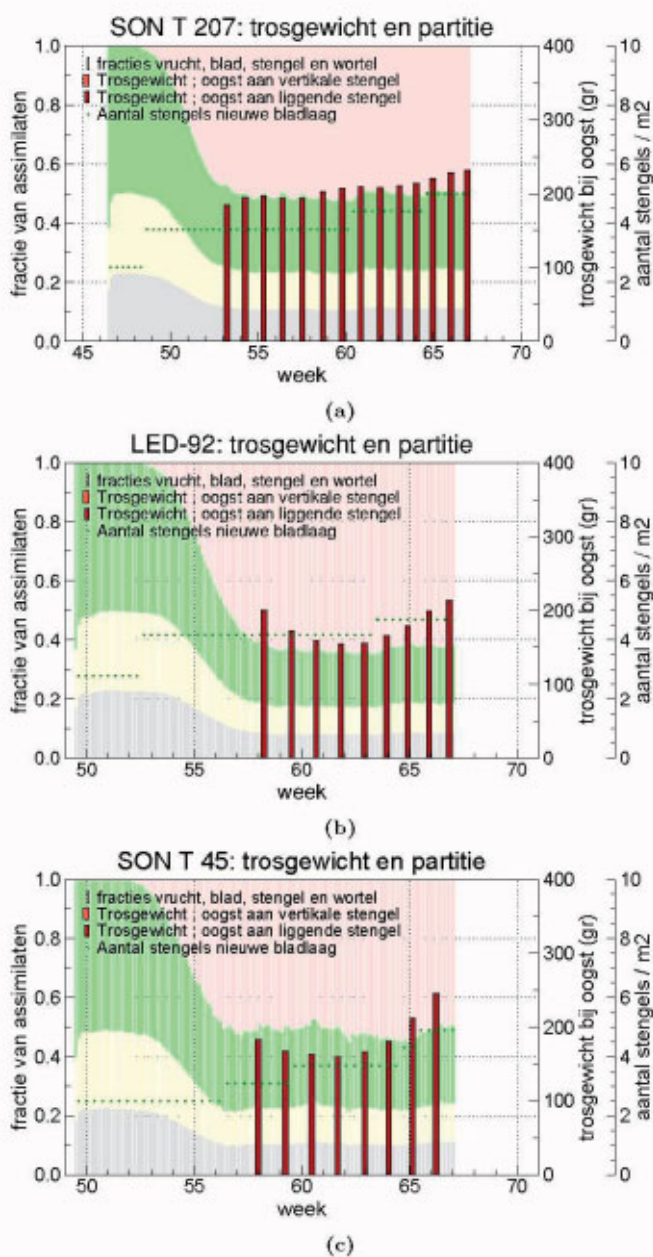
In tabel 4.3 is de teelt gesynchroniseerd met startdatum 5 december, de eigenlijke startdatum van de LED en de son-t-45 behandelingen. Dat betekent dat het

Tabel 4.2. Gesynchroniseerde simulaties met plantdatum 13 november. De kolom “Drogestof” (in g mol^{-1}) is de totale droge stof productie in gram van het hele gewas gedeeld door de totale belichtingssom in mol PAR. Dit is de groei efficiëntie. Oogst (in kg m^{-2}) is de tomaten oogst tot week 15 in 2009. De kolom “Vrucht Prod Eff” (in g mol^{-1}) is de tomaten oogst uitgedrukt als een versgewicht per mol PAR. Dat is dus de vruchtproductie efficiëntie. De laatste kolom, de efficiency ratio, is de relatieve vruchtproductie efficiëntie ten opzichte van die voor son-t-207.

	Drogestof (g mol^{-1})	Oogst (kg m^{-2})	Vrucht Prod. Eff. (g mol^{-1})	Efficiëntie ratio (%)
son-t-207	0.73	10.18	4.28	100
LED-92	0.65	6.56	3.85	90
son-t-45	0.69	4.79	3.35	78



Figuur 4.2. De blauwe stippen geven inzicht in de verhouding tussen assimilaten-aanbod en assimilaten-benutting en de blauwe lijn is het voortschrijdend gemiddelde. Een waarde groter dan 1 (op de meest rechtse as) betekent dat er meer assimilaten worden aangemaakt dan er nodig zijn voor de groei van de verschillende sinks en een waarde kleiner dan 1 betekent dat er een tekort is. Een goede operationele situatie is een balans tussen 1.3 en 0.7. De nummering van de x-as loopt over de jaargrens heen. Week 67 in de grafiek is dus $67 - 52 =$ week 15 in 2009.



Figuur 4.3. Assimilatenverdeling als fractie van het totale aanbod voor de 3 behandelingen. De figuur geeft de fractie van assimilaten die aan wortel (grijs), stengel (lichtgroen), blad (groen) en vrucht (rood) worden toebedeeld. De histogrammen geven het gesimuleerde trosgewicht bij oogst. De nummering van de x-as loopt over de jaargrens heen. Week 67 in de grafiek is dus 67–52=week 15 in 2009.

Tabel 4.3. Gesynchroniseerde simulaties met plantdatum 5 december. De kolom “Drogestof” (in g mol^{-1}) is de totale droge stof productie in gram van het hele gewas gedeeld door de totale belichtingssom in mol PAR. Dit is de groei efficiëntie. Oogst (in kg m^{-2}) is de tomaten oogst tot week 16 in 2009. De kolom “Vrucht Prod Eff” (in g mol^{-1}) is de tomaten oogst uitgedrukt als een versgewicht per mol PAR. Dat is dus de vruchtproductie efficiëntie. De laatste kolom, de efficiency ratio, is de relatieve vruchtproductie efficiëntie ten opzichte van die voor son-t-207.

	Drogestof (g mol^{-1})	Oogst (kg m^{-2})	Vrucht Prod. Eff. (g mol^{-1})	Efficiëntie ratio (%)
son-t-207	0.74	9.35	4.04	100
LED-92	0.69	6.98	4.25	105
son-t-45	0.70	3.95	2.89	72

aanhouden van scheuten en bladaantallen, voor die behandelingen, beter is afgestemd op de klimaatsituatie dan in tabel 4.2. Dat blijkt ook uit de resultaten. LED-92 is 5% hoger dan de son-t-207 en 33% hoger dan de son-t-45. De son-t behandeling is echter in het nadeel omdat de teeltmaatregelen voor die behandeling juist niet zijn afgestemd op de actuele situatie voor die teelt.

In de volgende scenario analyses zijn we uitgegaan van plantdatum 13 november omdat dan de donkerste periode van het jaar wordt bestudeerd waar we de belangrijkste toepassing voor assimilatiebelichting mogen verwachten.

4.4 Timing van eerste scheut

Een bijzonder krachtig onderdeel van de Optomaat Explorer is de mogelijkheid om blauwdrukken voor toekomstig teeltmanagement te testen en om de resultaten van reeds afgeronde teelten te evalueren. Uiteraard is het ook mogelijk om op het “toekomstig microklimaat”varianten los te laten en die in interactie met het teeltmanagement door te rekenen. In tabel 4.4 is het effect van een snelle extra uitloop van extra scheuten ($0,5 \text{ m}^{-2}$) gesimuleerd. Dit wijzigt weinig aan de efficiency ratio in de verschillende behandelingen maar in alle behandelingen is er sprake van een significante toename in de productie. De relatieve effecten zijn 9%, 7% en 6% voor de son-t-207, de LED-92 en de son-t-45.

Tabel 4.4. Analyse van het effect van een *extra* verhoging van het aantal stengels met 0.5 stengel /m2 bij de eerste gelegenheid dat een extra scheut werd aangehouden. Vergelijk met tabel 4.2 op bladzijde 24. De betekenis van de kolommen is gelijk aan die in tabel 4.2.

	Drogestof (g mol^{-1})	Oogst (kg m^{-2})	Vrucht vers prod. eff. (g mol^{-1})	Efficiency ratio (%)
son-t-207	0.80	11.10	4.66	100
LED-92	0.69	7.04	4.13	89
son-t-45	0.73	5.09	3.56	76

De effecten zijn uiteraard het grootst bij de hoge lichtintensiteit vanwege het effect dat het aanhouden van meer scheuten heeft op de initiële verlaging van de source/sink balans. Later draait dat effect om vanwege de hogere lichtonderschepping. We kunnen de voorzichtige conclusie trekken dat de lichtonderschepping in zijn geheel naar een hoger plan kan worden getild. Overigens nam de gemiddelde vruchtgrootte in Januari met 8–12% af door de maatregel. Het is mogelijk dat deze afname in het vruchtgewicht, commercieel gezien, niet opweegt tegen de hogere producties. Dat hangt af van de prijsvorming.

4.5 Temperatuureffecten

Voor zover we nu kunnen overzien hebben bladafsplittingsnelheid en snelheid van vruchttuitgroei ongeveer dezelfde temperatuurbehoefte. Beiden worden in gelijke mate beïnvloed door temperatuur maar dat gebeurt wel op 2 verschillende plaatsen; onderin en aan de top. Een relatief lage temperatuur onder in het gewas vertraagt de vruchttuitgroei (hogere plantbelasting). Het wordt echter pas echt een probleem als dat gepaard gaat met een relatief hoge kooptemperatuur waardoor de bladafsplitting (=trosvorming) nog eens voor extra sinks zorgt en de plantbelasting verder doet toenemen. Bovendien ontstaan er dan teveel vruchten die met elkaar concurreren waardoor de trosgewichten lager worden.

Tabel 4.5. Effect van het toevoegen van NIR straling in de LED-92 behandeling (bovenste tabel) of het weghalen van NIR in beide son-t behandelingen (onderste tabel). Gesynchroniseerde simulaties met plantdatum 13 november (vergelijk met tabel 4.2 op bladzijde 24). De betekenis van de kolommen is weer gelijk aan die in tabel 4.2.

	extra NIR bij LED-92			
	Drogestof (g mol ⁻¹)	Oogst (kg m ⁻²)	Vrucht Prod Eff (g mol ⁻¹)	Efficiency ratio (%)
son-t-207	0.73	10.18	4.28	100
LED-92	0.65	6.53	3.83	89
son-t-45	0.69	4.79	3.35	78

	zonder NIR bij beide son-t			
	Drogestof (g mol ⁻¹)	Oogst (kg m ⁻²)	Vrucht Prod Eff (g mol ⁻¹)	Efficiency ratio (%)
son-t-207	0.73	10.22	4.30	100
LED-92	0.65	6.56	3.85	90
son-t-45	0.69	4.81	3.37	78

Een dergelijke situatie doet zich voor bij hoge straling. In dat geval zal de instroom van gekoelde lucht onderin het gewas toenemen. Hierdoor ontstaat het risico voor een lage vruchttemperatuur maar er zal door de hoge straling ook een toename zijn in het temperatuurverschil tussen de kaslucht en de bladtemperatuur bovenin. Verschillen van 3 graden zijn daarbij heel normaal. Dit verschil wordt niet veroorzaakt door een slechte verdamping van het gewas want de geleidbaarheid van de huidmondjes

Tabel 4.6. Effect van een temperatuurverhoging van 2°C aan de top van het gewas (bovenste tabel) of onderin het gewas (onderste tabel). Gesynchroniseerde simulaties met plantdatum 13 november (vergelijk met tabel 4.2 op bladzijde 24). De betekenis van de kolommen is weer gelijk aan die in tabel 4.2.

	temperatuur verhoging van +2°C aan de top			
	Drogestof (g mol ⁻¹)	Oogst (kg m ⁻²)	Vrucht vers prod. eff. (g mol ⁻¹)	Efficiency ratio (%)
son-t-207	0.74	10.16	4.27	100
LED-92	0.63	6.34	3.72	87
son-t-45	0.68	4.67	3.27	76

	temperatuur verhoging van +2°C onderin			
	Drogestof (g mol ⁻¹)	Oogst (kg m ⁻²)	Vrucht vers prod. eff. (g mol ⁻¹)	Efficiency ratio (%)
son-t-207	0.80	11.10	4.66	100
LED-92	0.69	7.04	4.13	89
son-t-45	0.73	5.09	3.56	76

was hoog: tussen 200 en 340 mmol m⁻² s⁻¹,¹

Het temperatuurverschil ΔT tussen blad en kaslucht wordt dus minder veroorzaakt door een gebrekkige verdamping dan door de geringe convectieve afvoer van warme lucht. Extra aanvoer van gekoelde lucht van onderaf om de bovenkant van het gewas verder te koelen is niet gewenst vanwege de stress die dat onderin veroorzaakt. In tabel 4.5 zijn enkele scenarios doorgerekend.

Om deze analyses correct te interpreteren is het belangrijk te weten dat er in alle behandelingen met de gemeten luchttemperatuur is gewerkt. Het berekende effect heeft dus alleen betrekking op de gesimuleerde opwarming van het blad. In werkelijkheid zal ook de luchttemperatuur beïnvloed worden maar dat is hier buiten beschouwing gelaten. Door de betrekkelijk lage lichtintensiteit, de onveranderde luchttemperatuur, en het gelijk opgaan van source en sink beïnvloeding is het effect verwaarloosbaar. NIR effecten dragen voor de planttemperatuur veel minder bij dan tot nu toe werd aangenomen. Een zeer groot deel van de energie wordt via de verdamping omgezet in latente warmte. In tabel 4.6 zijn enkele scenarios doorgerekend voor het opwarmen van de luchttemperatuur bij kop of bij de vruchten met 2°C bovenop het actuele NIR effect.

Een hogere luchttemperatuur van de kop heeft een iets lagere productie tot gevolg. De verschillen tussen de behandelingen worden marginaal groter naarmate de lichtintensiteit lager is.

Een hogere luchttemperatuur onderin het gewas heeft in alle behandelingen een positief effect. De interacties zijn complex, maar in eerste instantie zien we een verhoging van de sink activiteit en later een verlaging.

¹De geleidbaarheid van de huidmondjes varieert tussen een minimum van 0 mmol m⁻² s⁻¹ en een maximum van 400 mmol m⁻² s⁻¹.

4.6 CO₂

De berekeningen lieten zien dat het effect van CO₂ sterker wordt bij hogere temperaturen. In tegenstelling tot het vaak gehoorde argument dat het CO₂ effect aan het begin van de teelt slechts gering is zien we juist dan grote effecten. In het begin van het groeiseizoen zijn lichtintensiteit en bladoppervlak weliswaar relatief laag maar de gerealiseerde groeistimulering werkt volgens het principe van "rente op rente" vanwege het exponentiële karakter van de groeicurve. In een dergelijke situatie is het CO₂ effect ondanks de lage lichtintensiteit toch aanzienlijk. Later in het seizoen wordt de groei lineair bij volledige lichtonderschepping en wordt het effect van de fotosynthese op de groei geringer. De stimulering van de fotosynthese zelf is echter wel groter door de hogere lichtintensiteit (en hogere temperatuur).

Uit de analyses bleek dat de opbrengst maximaal 3% hoger zou uitpakken voor alle behandelingen als gedurende de lichtperiode een minimum setpoint van 800 ppm zou zijn gerealiseerd. De extra dosering tot 800 ppm (bovenop de al verrichte dosering) levert in de simulaties niet veel op omdat het streefniveau in de actuele situatie vrijwel altijd gehaald werd. Dat gold zowel voor de berekeningen die startten op 5 december als de berekeningen die startten op 13 november.

4.7 Conclusies

Het effect van de aangetoonde hogere quantum efficiëntie van de fotosynthese op bladniveau (+ 15%) is betrekkelijk gering op gewasniveau. Op basis van de huidige analyse leveren LED's als bovenbelichting een potentiële toename van de productie van ongeveer 5%. Uit de analyses blijkt verder dat een teelt die slecht is afgestemd op LED's tot verliezen van 10% of meer kan leiden. Wanneer we LED's niet alleen zien als een afzonderlijk gegeven maar beschouwen als onderdeel van een nieuw te formuleren teelt management zijn er meer perspectieven, met name waar warmtebelasting in de kas een belangrijke rol speelt. We zien daarnaast mogelijkheden voor een specifieke stimulering van nieuwe sinks of het tegengaan van veroudering met tussenbelichting.

De effecten van het ontbreken van NIR op de bladtemperatuur zijn bijzonder gering. LED's zorgen er wel voor dat de totale warmte afgifte van lamp + armatuur van de kas beter te regelen is.

Literatuuronderzoek

5.1 Inleiding

Dit hoofdstuk geeft een breed inzicht in zaken die bij belichting in de tuinbouw een rol spelen. De toepasbaarheid van LED's staat daarbij voorop, al dan niet in combinatie met traditionele son-t belichting.

De studie is bedoeld als een opzet voor een verdere uitwerking in onderzoeksprojecten. LED technologie heeft bij gebruikers van assimilatiebelichting in de tuinbouw tot hooggespannen verwachtingen geleid. De ontwikkeling van nieuwe Light Emitting Diode's (LED's) met een hoge lichtopbrengst biedt perspectieven voor de toepassing in de tuinbouw. Voor de **fotosynthese** is vooral het lichtniveau in het fotosynthetisch actieve deel van het spectrum (PAR gebied, ca 400–700 nm) bepalend met hierin een spectrale verdeling volgens de gevoeligheidscurve van het gewas (Monteith, 1973). Voor de **gewasontwikkeling** zijn vooral spectrale criteria belangrijk zoals bijvoorbeeld de verhouding rood-verrood en de hoeveelheid blauw licht (Monteith, 1973). De voordelen van LED's in vergelijking met de huidige son-t belichting zijn:

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

Uiteraard zijn er als keerzijde van de medaille ook nadelen:

- De hoge aanschafprijs.
- De koelbehoefte en het lage vermogen, zodat hoge lichtniveaus moeilijk zijn te realiseren. De operationele kosten van licht- en koelsystemen zijn 5–10 maal hoger dan voor son-t belichting. De ontwikkeling van nieuwe High Flux LED's gaat echter razendsnel en het is te verwachten dat binnen enkele jaren de prijs zodanig gedaald is dat de aanschaf binnen bereik komt. Het is daarom nu van belang om de benodigde ervaring op te doen.

De snelle ontwikkeling van de genoemde technologie en de complexiteit van de effecten op plantengroei, geven vaak aanleiding tot spraakverwarring en niet gevalideerde claims over opbrengstverhoging. Het hoge rendement van LED's voor verlichting geldt helaas (nog) niet voor het rendement van LED's als assimilatiebelichting bij planten, tenminste niet zonder daarbij de beperkende randvoorwaarden te benoemen. Een tweede misvatting is het vermeende ontbreken van warmteverliezen in LED applicaties. Dit misverstand wordt veroorzaakt door de geometrie van de warmteverliezen: als voelbare warmtestraling in de uittredende straling bij son-t en als locale warmte aan de achterkant van het armatuur bij LED's.

5.2 Terminologie van het quantum rendement

PAR is in feite een maat voor stralingsenergie per oppervlakte eenheid (W m^{-2}) maar is in de loop der tijd steeds meer gebruikt als term voor fotosynthetische foton flux dichtheid, met de correcte aanduiding PPF. Omdat het gebruik van PAR fotosynthetische foton flux dichtheid (PPFD) helemaal is geaccepteerd en men vertrouwd is met dat begrip, is het niet verstandig de correcte term PPF te introduceren.

De discussie over de definitie van het golflengte gebied dat als PAR gekarakteriseerd kan worden dateert uit de jaren 50. Rabinowitch suggereerde als eerste om PAR te definieren. Hij beschouwde alle straling beneden 700 nm als fotosynthetisch actief (Rabinowitch, 1951). Het was de Wageningse onderzoeker Gaastra die in 1959 die aantoonde dat de stelling van Rabinowitch moest worden herzien (Gaastra, 1959). Hij postuleerde dat de quantum efficiëntie van de fotosynthese onafhankelijk is van de golflengte in het gebied tussen 400 en 700 nm. Hiermee was de toon gezet en in feite werd in de loop van de tijd stilzwijgend aangenomen dat de quantum efficiëntie tussen 400 en 700 nm constant was maar dat daarbuiten in het geheel geen fotosynthese plaats kon vinden (Gaastra, 1968). We weten nu dat dit niet het geval is (Blankenship & Hartman, 1998). Naast de fotosyntheseprocessen van rode algen in het verrode deel van het spectrum (Haxo & Blinks, 1950; Sivalingam *et al.*, 1976; Strain, 1951), is ook bij veel gewassen aangetoond dat er fotosynthese plaats vindt boven 700 nm en zeker ook beneden 400 nm (McCree, 1972a).

5.2.1 Quantum rendement van geabsorbeerd licht; QEa

In 1948 werd door Gabrielsen (1948) het niet-lineaire verband aangetoond tussen het chlorofylgehalte in bladeren en de fotosynthetische quantum efficiëntie. Om een goede meting van de quantum efficiëntie te realiseren, dient een meting van een absorptiespectrum daarom te gebeuren aan een blad dat omgeven is door een 100% witte bol die verstrooid licht terugkaatst. Om het quantum rendement bij een bepaalde golflengte te meten is daarnaast instrumentarium nodig om het blad heel selectief bij 1 bepaalde golflengte aan te stralen.

Pas na opkomst van interferentiefilters en monochromatoren werd het in de vijftiger en zestiger jaren mogelijk om zowel absorptiespectra te bepalen als de spectrale quantum efficiëntie aan intacte bladeren van hogere planten (Moss & Loomis, 1952) te meten. Een moeizaam onderzoek dat vooral later in de het begin van de zeventiger jaren heeft plaatsgevonden omdat pas in die tijd goede infrarood gasanalysatoren ruim voor handen waren om nauwkeurig de CO₂ opname te registreren ter bepaling van de spectrale quantum efficiëntie. Bjorkman (1968) en McCree (1973) waren na Gaastra (1968) en Rabinowitch (1951) de meest toonaangevende pioniers op dat gebied.

Het quantum rendement van geabsorbeerd licht (QEa) is het aantal geabsorbeerde licht kwanten dat nodig is om Fotosysteem 2 in de bladgroenkorrels te oxideren. De benodigde energie voor dit proces is fysisch bepaald en is ongeveer gelijk aan de energie inhoud van een rode licht kwant. Kortere golflengten (lopend van oranje, groen naar blauw) hebben een hogere energie inhoud maar het overschot gaat in het fotosyntheseproses volledig verloren. Van welke lichtbron de lichtquanta afkomstig zijn is per definitie irrelevant (Cathey & Campbell, 1979). Alle licht quanta, die door chlorofyl geabsorbeerd worden, hebben daarom dezelfde effectiviteit op quantum basis maar een afnemende effectiviteit van rood naar blauw op energiebasis. Het quantum rendement is meetbaar als de snelheid van zuurstofontwikkeling of als het elektrontransport door Fotosysteem II, bepaald met fluorescentiemetingen. QEa heeft een theoretisch maximum van 0,8. QEa is onafhankelijk van de golflengte. Lichtquanta die door andere pigmenten dan chlorofyl worden geabsorbeerd dragen ook bij aan de fotosynthese doordat de geabsorbeerde energie wordt overgedragen aan chlorofyl. Uitzondering zijn bepaalde flavonolen, meestal anthocyaan, die wel licht absorberen maar geen energie overdragen naar chlorofyl (Berry, 1975). Deze stoffen verlagen QEa. Anthocyaan absorbeert in het blauwe deel van het spectrum als bescherming tegen teveel hoogenergetisch blauw licht (Wheldale, 1916). Bekend is de paarsverkleuring van bladeren bij lage temperatuur, bijvoorbeeld bij tomaat. Een ander bekend voorbeeld zijn de rode jonge bladeren bij roos. De roodverkleuring wordt veroorzaakt door de selectieve absorptie van blauw licht door anthocyaan in de bovenste cellaag van het blad. Door de filtering gaat blauw licht voor de fotosynthese verloren waardoor die jonge bladeren een lage fotosynthese hebben.

5.2.2 Quantum rendement van invallend licht op bladniveau; QEb

Het quantum rendement van invallend licht (QEb) is het quantum rendement van geabsorbeerd licht (zie hierboven), vermenigvuldigd met de specifieke absorptie van de golflengte van het ingestraalde licht. Het absorptiespectrum heeft maxima in het rode en blauwe gebied en is het laagst in het groene gebied (Boichenko, 1998). Op bladoppervlakte basis (bij relatief lage lichtintensiteit) is QEb van blauwe en rode lichtquanta 5-20% hoger dan die van groene licht quanta. De verschillen zijn het grootst bij lichtgekleurde bladeren. In 1968 toonde Bjorkman (1968) voor drie plantensoorten aan dat de spectrale quantum rendement in het gebied tussen 450 en 540 nm 0,062 bedroeg en tussen 540 en 670 nm 0,074.

5.2.3 Quantum rendement van invallend licht op gewasniveau; QEG

Het quantum rendement van invallend licht (QEG) is het quantum rendement van geabsorbeerd licht (zie hierboven), vermenigvuldigd met de specifieke absorptie van de golflengte van het ingestraalde licht. Het absorptiespectrum heeft maxima in het rode en blauwe gebied en is het laagst in het groene gebied. Op bladoppervlakte

basis (bij relatief lage lichtintensiteit) is Q_{Eb} van blauwe en rode lichtquanta 5–20% hoger dan die van groene licht quanta. De verschillen zijn het grootst bij lichtgekleurde bladeren.

5.2.4 Quantum rendement van de CO_2 assimilatie: Q_{fot}

$Q_{fot} = Q_{Eg}/8$. Het getal 8 is het minimale aantal effectieve quanta dat nodig is om 1 molecuul CO_2 te binden. In de praktijk is het aantal benodigde effectieve quanta dat benodigd is een factor 1,2 tot 2 hoger. De factor is afhankelijk van het fotosynthesemechanisme (C3, C4 of CAM), is hoger onder stress condities en lager onder optimale condities. Voor zover nu bekend is er echter geen effect van de golflengte van het invallend licht op het dit verhoudingsgetal. Typische Q_{fot} waarden zijn 0,06 voor C3 planten, 0,05 voor C4 planten en 0,02 voor CAM planten.

5.2.5 Quantum rendement van de groei: Q_{groei}

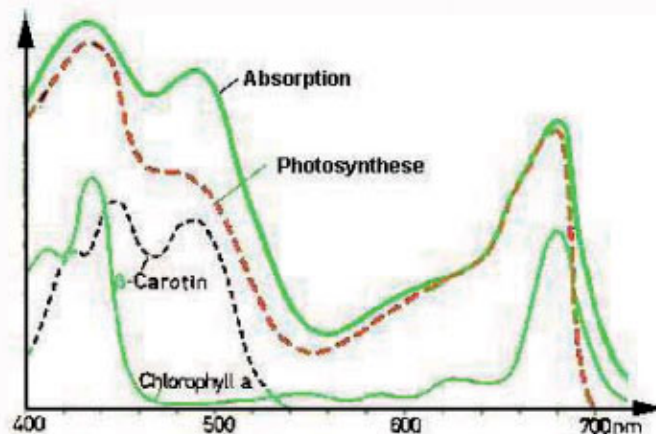
In het quantum rendement van de groei (Q_{groei}), is Q_{fot} verdisconteerd met daarnaast alle factoren die te maken hebben met lange-termijn factoren die het uiteindelijke resultaat op de totale toename van drogestof van gewassen bepalen.

Ter illustratie: stel 2 verschillende lichtbronnen hebben dezelfde Q_{fot} maar lichtbron A stimuleert de vorming van dunnere bladeren. Onder wintercondities zal de lichtonderschepping van de plant met de dunne bladeren sneller toenemen bij een gelijkblijvend quantum rendement. Het quantum rendement van de groei neemt daardoor toe. In de zomer zullen dunne bladeren eerder licht verzadigd zijn dan dikke bladeren. Daardoor zou het quantum rendement van de groei juist weer lager zijn. We komen hier op het terrein waar quantum rendement en stuurlichteffecten elkaar naderen.

5.3 Lichtbehoefte voor assimilatie

Bij de meeste groenten en sierteeltgewassen neemt de assimilatie lineair toe tot $250 \mu\text{mol PAR}$. In de zomer is dat hoger maar in feite is bijbelichting dan niet relevant. 1% lichttoename over een jaar leidt tot een opbrengstverhoging in de range van 0,6–1,2%. Bij lage lichtomstandigheden is procentuele toename echter groter dan bij hoge lichtintensiteiten. De afname van de licht-benuttings efficiëntie is er de oorzaak van dat de licht-response curve de vorm heeft van een verzadigingsfunctie. Bij lage lichtintensiteiten is het licht rendement daardoor 5–10 maal hoger dan bij hoge lichtintensiteiten. Optimaliseren van de lichtintensiteit is complex maar uitermate belangrijk om een zo hoog mogelijk rendement te kunnen behalen.

Het licht wordt optimaal benut zolang de fotosynthese lineair afhankelijk is van de lichtintensiteit. Dit is aangegeven met de groene lijn. Wanneer de fotosynthese gaat afbuigen wordt het rendement van het licht kleiner. Onder in het gewas is dat bij $100 \mu\text{mol PFD}$ en meer naar boven is dat bij $200\text{--}250 \mu\text{mol PAR}$. Waarschijnlijk is het optimale niveau bij volgroeide bladeren aan de top nog iets hoger dan we hier gemeten hebben. Het niveau waarop de afbuiging plaats vindt is overigens ook afhankelijk van temperatuur en CO_2 . Misschien ten overvloede dient te worden opgemerkt dat een afname van het lichtrendement niet betekent dat meer licht niet zou resulteren in meer fotosynthese. Dat blijft natuurlijk het geval, alleen geldt de wet van de verminderde meeropbrengst in dat geval in toenemende mate.



Figuur 5.1. Absorptiespectrum van een blad (groene lijn en de relatieve fotosynthese (rode gestreepte lijn)

Als vuistregel kan gesteld worden dat $1 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ overeenkomt met de productie van 1-2 gram drogestof per m^{-2} per uur.

5.4 Fotosynthese en licht efficiëntie

De discussie over de definitie van het golflengte gebied dat als PAR gekarakteriseerd kan worden dateert uit de jaren 50. Hij beschouwde alle straling beneden 700 nm als fotosynthetisch actief. Het was de Wageningse onderzoeker Gaastra (1959) die aantoonde dat de stelling van (Rabinowitch, 1951) moest worden herzien. Hij postuleerde dat de quantum efficiëntie van de fotosynthese onafhankelijk was van de golflengte in het gebied tussen 400 en 700 nm. Hiermee was de toon gezet en in feite werd in de loop van de tijd stikwijgend aangenomen dat de quantum efficiëntie tussen 400 en 700 nm constant was maar dat daarbuiten in het geheel geen fotosynthese plaats kon vinden. We weten dat dit niet het geval is. Naast de fotosyntheseprocessen van rode algen in het verrode deel van het spectrum (Haxo & Blinks, 1960; Sivalingam *et al.*, 1976), is ook bij veel gewassen aangetoond dat er fotosynthese plaats vindt **boven 700 nm** en zeker ook **beneden 400 nm** (McCree, 1972). Het klassiek geworden werk van McCree (1972a) gaf een gedetailleerde uitwerking van de geschetste problematiek. McCree mat de spectrale quantum efficiëntie bij alle golflengten tussen 350 en 750 nm, later uitgebreid tot 300 nm (McCree & Keener, 1974) aan een groot aantal verschillende soorten bij een vooraf vastgestelde fotosynthese activiteit. Dit was een ingenieuze vondst om foute interpretaties te voorkomen, veroorzaakt door verschillen in de vorm van de fotosynthese-licht response curves. De vorm van de fotosynthese response curves is namelijk zeer variabel en soortspecifiek. Het ene blad is bij $100 \mu\text{mol PAR}$ verzadigd en een willekeurig ander blad bij $2000 \mu\text{mol}$. De klassiek geworden actiespectra laten duidelijke brede maxima zien rond 440 en 620 nm met een schouder bij 670 nm.

De aandacht die de belangrijkste fotosynthesepigmenten van hogere planten namelijk chlorofyl a en chlorofyl b, hebben ontvangen heeft vaak tot misvattingen omtrent de absorptie karakteristiek van bladeren in hogere planten geleid. Ten onrechte wordt

het absorptiespectrum (een belangrijk onderdeel van het fotosynthese actiespectrum) omschreven als een curve met twee duidelijke pieken. Deze stelling heeft post gevat in 1937 toen Hoover het absorptiespectrum van tarwebladeren publiceerde (Hoover, 1937). De bladeren die Hoover gebruikte waren echter lichtgroen. De lage absorptie in het groene deel van het spectrum en de relatief hoge quantum efficiëntie in het blauwe deel van het spectrum, veroorzaakten de karakteristieke dubbele piek van het actiespectrum dat ten onrechte vaak als illustratie wordt gebruikt (figuur 5.1). In werkelijkheid is het actiespectrum veel vlakker en wordt het gekenmerkt door brede maxima rond 440 en 620 nm met een schouder bij 670 nm. Een fraaie illustratie van 'niet fotosynthetische absorptie' door de epidermis heeft is te vinden in het werk van Inada (1976, 1977, 1978). In een vergelijking tussen bomen en kruiden is de quantum efficiëntie van de boombladeren in het blauwe deel van het spectrum veel lager is dan in de bladeren van kruidachtige planten. McCree (1971) meldt dat in sommige soorten de blauwe piek slechts de helft is van de rode piek. Het zal duidelijk zijn dat deze observaties consequenties kunnen hebben voor het patroon van de quantum efficiëntie van kasgewassen. Allereerst omdat de epidermis van kasgewassen afwijkt van planten die buiten groeien door de afwezigheid van UV licht. UV-licht induceert de aanmaak van flavonolen in de epidermis (Bornman & Teramura, 1993; Bornman & Vogelmann, 1991). Het is daarom te verwachten dat kasgewassen een hogere blauwe efficiëntie zullen hebben dan veldgewassen (Day *et al.*, 1992). De tweede consequentie, die vreemd genoeg weinig onder de aandacht is gebracht in het tuinbouwonderzoek, is de mogelijke significante bijdrage van het spectrale gebied tussen 320 en 400 nm. Dit gebied wordt bij de metingen van PAR weggefilterd door de lichtmeter en daardoor niet meegewogen. Het verdient aanbeveling om hier nader onderzoek aan te verrichten. Voorzichtige schattingen duiden op een bijdrage van 3–8% voor het gebied tussen 320 en 400 nm.

In september 1951 deed de Commissie voor Plantenbestraling van de Nederlandse Stichting voor Verlichtingskunde een aantal aanbevelingen voor de specificatie van de straling van lichtbronnen, die bij de plantenbestraling met kunstlicht. De aanbevelingen werden gedaan naar het voorbeeld van de fotometrie (Bouma, 1937. P.J. Philips techn. T 2 1-7). Een citaat : "Ten aanzien van de indeling van het spectrum in vakken doet de Commissie het volgende voorstel:

- 1e vak: alle straling met een golflengte groter dan 1000 nm Van deze straling is geen specifieke werking op planten bekend. Men mag daarom aannemen, dat deze straling, voor zover door de plant geabsorbeerd, zonder tussenkomst van specifieke biochemische processen in warmte wordt omgezet.
- 2e vak: de straling tussen 1000 nm en 720 nm In dit gebied ligt de straling, die een specifiek strekkende werking op vele planten heeft. Hoewel het spectrale werkingsgebied voor deze strekkende werking niet zal samenvallen met de grenzen van dit spectrale vak, mag toch voorlopig worden aangenomen, dat de in dit spectrale vak vallende stralingsstroom een redelijke maat oplevert voor de strekkende werking van de betreffende straling.
- 3e vak: de straling tussen 700 nm en 610 nm. Dit is ongeveer het spectrale gebied van de sterkste chlorofylabsorptie en de sterkste fotosynthetische activiteit in het rood en in vele gevallen van de sterkste daglengte werking.
- 4e vak: de straling tussen 610 nm en 510 nm Dit is ongeveer het spectrale gebied van de geringere fotosynthetische activiteit in het groen en van geringe formatieve werking.
- 5e vak: de straling tussen 510 nm en 400 nm. Dit is ongeveer het spectrale gebied van sterke chlorofylabsorptie en absorptie van gele pigmenten. Het

is een gebied van sterke fotosynthetische activiteit in het blauw-violet en tevens van sterke formatieve werkingen. Volledigheidshalve kan hieraan een door Coblenz (CIE 1939) voorgestelde indeling voor de ultra-violette straling worden toegevoegd, al heeft dit voor de plantenbestraling geringere betekenis.

- 6e vak: de straling tussen 400 nm en 315 nm (ultraviolet A).
- 7e vak: de straling tussen 315 nm en 280 nm (ultraviolet B).
- 8e vak: de straling met golflengte kleiner dan 280 nm (ultraviolet C).

Deze indeling is feitelijk nog steeds een accurate indeling die een vrij nauwkeurig indeling geeft, rekening houdend met de onderlinge verdeling van de absorptie karakteristieken van de verschillende pigmenten.

5.4.1 Indeling van het zichtbare spectrum

Een gelijke verdeling van het spectrum in blauw (400–500 nm), groen (500–600 nm) en rood (600–700 nm) heeft een groot aantal communicatieve voordelen. De indeling is voor iedereen makkelijk te onthouden en zal snel als begrip worden geaccepteerd. Dit lijkt triviaal maar gezien de enorme complexiteit van de assimilatiebelichting en interactie met planten, kan het geen kwaad om hier een eenvoudige indeling te maken. Deze indeling wordt overigens in de literatuur ook vaak gehanteerd (Sager *et al.*, 1982).

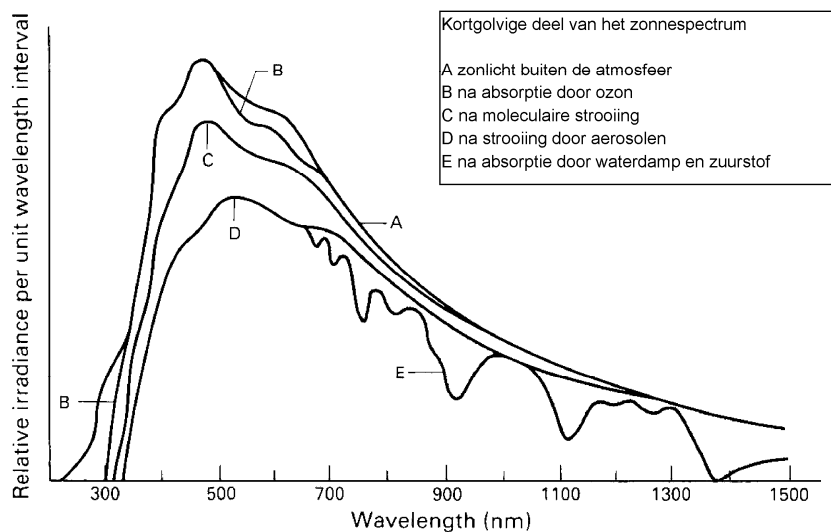
Een belangrijke consequentie van het werk met kunstmatige belichting is niet alleen de spectrale quantum efficiëntie van de plant maar ook de spectrale quantum efficiëntie van de lichtmeter die gebruikt wordt om de PAR te meten. Naarmate het emissiespectrum van lampen een grotere discontinuïteit vertoont en de banden smaller zijn, kan een kleine fout in de filterkeuze in de lichtmeter tot grote afwijkingen in de geschatte waarde leiden (Kubin, 1971; McCree, 1973; Norman *et al.*, 1969; Rvachev *et al.*, 1963). In PAR meters wordt een pakket filters gebruikt om kunstmatig te corrigeren voor de energiever verschillen van de lichtquanta bij verschillende golflengtes. Dit leidt onvermijdelijk tot afwijkingen. Als het spectrum van de lamp breed is, middelen die afwijkingen uit. Als het spectrum smal is, zoals bij LED's kunnen er grote meetfouten worden gemaakt.

Daglicht

Als we het emissiespectrum bekijken zien we grote verschillen in het PAR gebied tussen 400 en 700 nm voor een aantal veel voorkomende stralingscondities (figuur 5.1). Direct zonlicht heeft veel rood en de emissie neemt af naar het blauw. Diffuus daglicht bevat meer blauw dan direct zonlicht. Met andere woorden het spectrum van daglicht is moeilijk onder een noemer te vangen. Over het algemeen wordt aangenomen dat licht met een spectrum vergelijkbaar met zonlicht een normale plantontwikkeling garandeert. Gemiddeld bevat zonlicht, uitgedrukt als percentage van alle fotonen tussen 400 en 800 nm, ca. 21% blauw (400–500nm), 26% groen (500–600nm), 27% rood (600–700 nm) en 26% ver-rood licht (Maas, 1989b).

5.4.2 De bovengrens van het actieve spectrum

Het golflengtegebied waar fotosynthese actief heeft geen vaste bovengrens. Nauw aan het chlorofyl in hogere planten verwante pigmenten zoals het bacteriechlorofyl



Figuur 5.2. Spectrale verdeling van het zonlicht (exclusief het infrarood en warmtestraling) na filtering door de atmosfeer

a en b absorberen in de gebieden van respectievelijk 800-950 en 1000-1150 nm. Er is een theorie dat dit type chlorofyl evolutionair het oudste is en dat het is ontstaan in hete bronnen in de oceaan, waar de bacterie de infraroodstraling als energiebron benutten. Fotosynthese zou zelfs een toevallig bijproduct zijn van een thermisch detectiesysteem in een organisme dat van origine op zoektocht was naar hitte bronnen in het water (Nature, 1995 vol 373 pag 479. E.G. Nisbet, J. R. Cann and C.L. van Dover). Het is aangetoond dat er bij hogere planten geen pigmenten zijn die boven 730 nm absorberen en die voor de fotosynthese van belang zijn (Boichenko, 1998). Stuurlicht effecten boven 700 nm worden toegelicht in paragraaf 5.5.1. Van 700 tot 730 nm is er echter nog wel fotosynthese activiteit, hoewel gering of indirect. Met name pigmenten geassocieerd met fotosysteem 1 absorberen in dat deel van het spectrum. Licht onder een bladerdek is gekenmerkt door een lage Rood-Verrood verhouding omdat er relatief weinig Verrood en veel Rood geabsorbeerd wordt in de bladeren (Gabrielsen, 1948). Ter compensatie hebben schaduwplanten die vaak onder andere vegetatie groeit (bijna alle potplanten), minder fotosysteem 1 en meer fotosysteem 2 zodat de balans weer hersteld wordt (Evstigneev, 1974; Fukshansky, 1993; Gausman *et al.*, 1973). Fotosynthesemetingen worden vaak uitgevoerd onder lichtcondities die niet identiek zijn aan de spectrale verdeling onder een bladerdek. Daarnaast wordt bij metingen van de quantum yield van schaduwplanten vaak gebruik gemaakt van een lichtbron die licht met een hoge rood-verrood geeft en wordt er dus geen rekening gehouden met dit fenomeen. Dit kan tot een verkeerde interpretatie van de meetgegevens leiden.

Een onderzoeksgroep in Duitsland is er echter recent met een speciale techniek in geslaagd een heel gedetailleerd beeld te krijgen van het Fotosysteem I eiwitcomplex. De precieze plaats van elk pigment molecuul in het eiwitcomplex kon worden bepaald. Ze ontdekten "rode" chlorofylmoleculen, of laag-energie chlorofyl genoemd. De vraag is natuurlijk waarom deze rode chlorofylmoleculen zich in Fotosysteem 1 bevinden.

De meest waarschijnlijke verklaring is dat de hoeveelheid licht van de kleur die "gewone" pigmenten in de antenne absorberen beperkt is, omdat dit al door andere bladeren geabsorbeerd is (Koller, 2000). Het licht is daarom relatief rijk aan het rodere licht dat door de rode chlorofylmoleculen kan worden geabsorbeerd. Berekeningen hebben aangetoond dat onder schaduwrijke omstandigheden, een paar procent rode chlorofyl moleculen in de antenne's van het reactiecentrum, verantwoordelijk kan zijn voor 40 procent van de totale hoeveelheid geabsorbeerd licht! Zeker voor potplanten zijn er voldoende goede redenen om licht tot 720 nm tot PAR te rekenen. Vooral in schaduwbladeren kan het donkerrode licht zoals hierboven aangegeven een aanzienlijk deel van het fotosynthetisch rendement bepalen.

5.4.3 De ondergrens van het actieve spectrum

Bij kortere golflengtes dan het blauw komen we in het UV-gebied. Deze hoogenergetische straling draagt helaas niet bij aan de fotosynthese maar heeft er wel indirect effect op.

UV-B heeft met name een effect op de synthese van flavonolen in de bladeren die de het fotosynthese apparaat beschermen tegen de hoogenergetische UV straling. Bijbelichting van gewassen met UV-B en UV-A straling biedt perspectieven om de synthese van bladpigmenten te stimuleren en de planten stress-toleranter te maken. Andere beschreven effecten zijn verandering van de samenstelling van de cuticula en de remming van de strekkingsgroei van stengels en bladeren. Het effect van UV-B straling op hogere planten is zeer goed beschreven in Bornman & Teramura (1993); Jenkins *et al.* (1995); Day (2001). Onder invloed van UV B en UV a maken planten stoffen aan in de epidermis die een specifieke absorptie hebben in het UV en daardoor de plant beschermen (Day, 1993, 2001; Day *et al.*, 1994). De bekendste stoffen zijn flavonolen en fenolen. Een speurtocht naar de plaats waar de stoffen worden gedeponeed laat echter zien dat deze stoffen ook worden opgeslagen in andere aan licht gexposeerde delen (Karabourniotis & Bornman, 1999; Karabourniotis *et al.*, 1999; Ntefidou & Manetas, 1996).

De aanmaak van flavonolen en fenolen onder invloed van UV B kan belangrijke consequenties hebben voor de gewenste kasverlichting. De geringe UV B in kassen heeft tot gevolg dat deze stoffen in veel mindere mate worden aangelegd. Dat zou kunnen betekenen dat kasplanten een hogere quantum efficiëntie in dat deel van het spectrum zullen hebben omdat minder licht in het blauwe deel van het spectrum wordt uitgefilterd. UV B brengt een veelheid van reacties in de plant teweeg. Aan de ander kant induceert UV B de aanmaak van secundaire metabolieten die op hun beurt weer talrijke fysiologische functies hebben. Lage intensiteit UV stimuleert in het algemeen de aanmaak van flavonolen.

Ongeveer 7% van de zonnestraling (globale straling) kan tot het UV gerekend worden. De absorptie beneden 400 nm wordt zoals boven aangegeven in 3 gebieden verdeeld:

1. UV A van 400 tot 315 nm,
2. UV B van 315 tot 280 nm,
3. UV C beneden 280 nm.

Hoe kleiner de golflengte van de straling is des te groter is de energieinhoud per foton (Owens, 1994). UV straling bevat hierdoor per foton meer energie dan blauw licht (400–500 nm) en blauw licht weer meer dan rood licht (600–700 nm). Binnen

het gebied van UV-straling bevat UV-C de meeste energie per foton. UV-C en UV-B worden door de ozonlaag in de atmosfeer grotendeels tegengehouden (figuur 5.1). Zonder deze beschermende werking van de ozonlaag zou er geen plantengroei mogelijk zijn. UV-C is zeer schadelijk voor plant en dier. Door de hoge energieinhoud leidt treedt over het algemeen irreversibele beschadiging op van de moleculen die deze straling absorberen, zoals bijvoorbeeld DNA. Bij zeer geringe hoeveelheden UV-C vertonen planten verbrandingsverschijnselen en sterven af. Voor een gezonde plantengroei is het dus belangrijk te voorkomen dat planten worden blootgesteld aan UV-C straling. Hoewel de meeste gasontladingslampen ook UV-straling produceren wordt uitstraling hiervan voorkomen door de omhulling van de lamp te maken van glas dat geen UV-C en ook het meeste UV-B niet doorlaat.

UV C wordt voornamelijk geabsorbeerd door DNA en eiwitten met fatale consequenties. UV-B en UV-A zijn niet noodzakelijk voor een normale plantontwikkeling. UV-B en in mindere mate UV-A kunnen echter wel de aanmaak van bepaalde secundaire plantenstoffen en pigmenten stimuleren (Day *et al.*, 1996; Jenkins *et al.*, 1995). Flavonolen en anthocyanen zijn stoffen waarvan bekend is dat ze meer voorkomen in planten die zijn blootgesteld aan UV-B en UV-A dan aan licht zonder UV-straling. Hoewel niet nodig voor een normale plantontwikkeling kunnen UV-B of UV-A wel een belangrijke functie vervullen bij het afharden van in kassen geteelde perkplanten. In de praktijk wordt hiervoor in toenemende mate gebruik gemaakt van zogenaamde cabriolet kassen. De mogelijkheid om het dak van deze kassen te openen en de planten aan direct zonlicht bloot te stellen zorgt voor de aanmaak van UV absorberende stoffen waardoor de planten al zijn aangepast aan buitenlichtcondities, op het moment dat ze de kas verlaten. Ook aanvulling van het lichtspectrum in de kas of klimaatkamer met UV-A en UV-B straling vanuit speciale lampen biedt mogelijkheden planten met een hoger gehalte van de gezondheidsbevorderende flavonolen te produceren. Bij siergewassen kan UV-A/B gebruikt worden om een intensere blad- of bloemkleur te verkrijgen (Helsper *et al.*, 2003). UV-A/B is niet belangrijk voor de productie van glasgroentegewassen. Hoewel het aannemelijk is dat ook in deze gewassen de bladeren en vruchten door directe blootstelling aan UV-A en UV-B meer inhoudsstoffen aanmaken, zal dit met name bij die gewassen waarbij de meeste vruchten in het gewas hangen nauwelijks een bijdrage leveren aan de vruchtkwaliteit. Immers, ook al laat het kasdek UV-straling door of bevat het emissiespectrum van de assimilatielampen enige UV-straling dan nog zal dit de meeste vruchten in het gewas nooit bereiken. Er lijkt ook een directe koppeling te zijn tussen fotosynthese en UV-A. Mantha *et al.* (2001) hebben bij een drietal gewassen gemeten dat de fotosynthesesnelheid toenam als bij een achtergrond van $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PAR een hoeveelheid UV-A werd gegeven die overeen kwam met die in zonlicht. Toevoeging van ca. $0,31 \text{ W/m/nm}$ UV-A (320–400 nm) leidde tot een toename in fotosynthetische zuurstofproductie van 7,8 tot 9,8%. De auteurs geven twee verklaringen voor deze toename: 1. UV-geïnduceerde fluorescentie en gebruik van dit blauw-groene fluorescentie licht voor de fotosynthese; 2. een toename van de huidmondjes opening en stimulatie fotosynthese door grotere beschikbaarheid CO_2 . Ook McCree (1972b) vond een stimulerend effect van UV-A op de fotosynthese van een groot aantal planten. Sivalingam *et al.* (1976) nam hetzelfde effect waar bij algen.

Uit oogpunt van efficiëntie is het echter de vraag of een bovengenoemde toenames van de fotosynthesesnelheid door UV-A straling niet goedkoper kunnen worden gerealiseerd door verhoging van het aantal fotonen tussen 400 en 700 nm.

5.4.4 Conclusie

Het blauwe gebied kan beter gedefinieerd worden van 400–510 nm, omdat de absorptie van β -caroteen als onderdeel van het blauw absorberende pigmentcomplex bij 500 nm nog aanzienlijk is. Het is m.i. beter om de carotenen en hun efficiëntie bij het blauwe deel van het spectrum te betrekken.

Het gebied tussen 510 en 610 nm heeft een quantum efficiëntie die met name bepaald wordt door de gewas architectuur en de blad dikte. Bij hoge straling en een gesloten gewas is dit deel van het spectrum minstens even effectief als beide andere delen. Het derde gebied tussen 610 en 720 nm wordt gekenmerkt door een hoge absorptie van chlorofyl, een drastische verschuiving van absorptie door fotosysteem 2 naar fotosysteem 1 en een morfogenetisch gevoelig fytochroom evenwicht.

UV-straling speelt een relatief onbelangrijke rol bij de groei en ontwikkeling van planten. Bij voldoende blauw licht is een normale plantontwikkeling mogelijk in afwezigheid van UV. Met name de grens tussen effecten van blauw licht en UV-A straling zijn niet scherp, hoogstwaarschijnlijk vanwege het feit dat planten beschikken over fotoreceptoren met een absorptiespectra in zowel het UV-A als blauw. UV-B kan zorgen voor een extra aanmaak van secundaire plantenstoffen als flavonolen en anthocyanen, hetgeen een positieve bijdrage kan leveren aan de voedingseigenschappen of sierwaarde van een gewas. UV-B straling kan echter wel leiden tot een toename van schimmelziekten door het stimulerende effect op sporenvorming en -kieming.

5.5 Belangrijkste pigmenten

In deze paragraaf worden enkele belangrijke pigmenten die naast de energieverzamelaars (chlorofyl en carotenen) een sleutelrol spelen in de fysiologie van de plant als energie: cryptochroom (van der Schalie & Green, 2005; Wheeler *et al.*, 1991; Green, 2004; Suetsugu & Wada, 2003) en fytochroom (Casal & Smith, 1989; Mancinelli, 1994).

Fytochroom is vooral belangrijk bij laag licht om de concurrentie met andere soorten te kunnen overleven en cryptochroom schakelt vooral in bij hoog licht. De fytochroom effecten zijn voor de assimilatenverdeling het belangrijkste. Daarnaast is de lichtsterkte zelf belangrijk voor de wijze waarop assimilaten verdeeld worden (Karnachuk & I F, 1997). Veel licht geeft dikke bladeren, relatief veel allocatie naar de wortels en (afhankelijk van de temperatuur) meer stengelgroei. Toch zijn er een aantal effecten in de literatuur te vinden waarvan niet direct duidelijk is of fytochroom dan wel cryptochroom hier intermediair zijn. Een toename van verrood licht geeft de plant het signaal dat de concurrentiekracht afneemt door beschaduwing van omringende planten en het signaal dat afgegeven wordt is een toename van assimilatenstroom naar de stengel zodat deze sneller kan strekken (Ballar, 1999). Blauw licht geeft in het algemeen een omgekeerd effect (Casal & Smith, 1989; Parks *et al.*, 2001). De plant reageert op blauw licht met het maken van zonnebladeren (Morgan & Smith, 1981) en het aanleggen van kortere internodiën (Dougher & Bugbee, 2001a).

5.5.1 Fytochroom

De rood/verrood verhouding (R/VR) van licht speelt een zeer belangrijke rol bij de ontwikkeling van planten. De R/VR wordt waargenomen via het de fotoreceptor

fytochroom. Fytochroom is een bichromatische fotoreceptor met absorptiemaxima in het rode en het verrode deel van het spectrum. Rood licht wordt voornamelijk geabsorbeerd door de Pr vorm van fytochroom en verrood licht door de Pfr vorm. Als gevolg van de absorptie van rood licht wordt Pr omgezet in Pfr en omgekeerd wordt Pfr door absorptie van verrood licht weer omgezet in Pr. De uiteindelijk verhouding tussen de Pr en Pfr vorm van fytochroom is bepalend voor veel ontwikkelingsprocessen in de plant (McLaren & Smith, 1978), zoals kieming van zaden, bloemknopontwikkeling (Rajapakse & Kelly, 1992), stengelstrekking en veroudering (Ritter *et al.*, 1981; Schuerger *et al.*, 1997).

De beste definitie voor verrood licht is gebaseerd op het absorptiespectrum van de verrood absorberende vorm van fytochroom (Pfr). Het absorptiemaximum van Pfr ligt rond de 703 nm. De absorptie neemt in het verrode vrij sterk af maar loopt door tot 800 nm. In de literatuur wordt onderscheid gemaakt tussen een zogenaamde nauwe rood/verrood verhouding van het licht (655–665 nm / 725–735 nm) en de brede rood/verrood verhouding (600–700 nm / 700–800 nm) (McLaren & Smith, 1978; Morgan & Smith, 1981; Mohr, 1986). In het eerste geval wordt alleen een 10 nm band rondom het absorptiemaximum van Pfr in beschouwing genomen, in het tweede geval wordt vrijwel alle verrode straling gemeten die door fytochroom kan worden geabsorbeerd. Onder kunstlichtomstandigheden is het goed te weten hoe het emissiespectrum van de lamp er precies uit ziet (Maas, 1989b). Is het een continu spectrum of is het een spectrum met een beperkt aantal emissielijnen. In het laatste geval maakt het veel uit of de emissiepiek samenvalt met de absorptiepiek van Pfr of er ruim naast valt. Het effect van een hoeveelheid verrode straling op het fytochroomevenwicht wordt meer overschat naarmate meer van deze straling een golflengte heeft die sterk afwijkt van het absorptiemaximum. Omgekeerd zou, wanneer alleen de straling in het golflengtegebied van 725–735 nm wordt gemeten en de lamp alleen verrode straling afgeeft met een golflengte groter dan 735 nm, ten onrechte de conclusie worden getrokken dat de lamp niet leidt tot een verlaging van het fytochroom evenwicht ($Pr/(Pr+Pfr)$). Vanwege het risico verrode straling die wel bepalend is voor het fytochroomevenwicht niet mee te wegen, is het onder kunstlichtcondities beter te kiezen om alle verrode straling in het golflengtegebied 700–800 nm te meten. Gezien de vrijwel te verwaarlozen invloed van de bijdrage van verrood licht met een golflengte van 780–800 nm op het fytochroomevenwicht is dit een verantwoorde keuze. De beste definitie voor verrood licht is echter de bepaling berekening van het fytochroomevenwicht op basis van het totale spectrum van de lichtbron van 300 tot 800 nm en het absorptiespectrum van beiden vormen van het fytochroom (Mancinelli, 1994).

Omdat de absorptiespectra van beide vormen van fytochroom elkaar deels overlappen komt fytochroom nooit voor 100% in n van beide vormen voor. Van de totale hoeveelheid fytochroom (P_{totaal}) varieert het percentage tussen de 20% en maximaal 80% (Smith, 1994).

Voor de strekkingsgroei is voor een zeer groot aantal plantensoorten aangetoond dat er een duidelijke lineair verband bestaat tussen het aandeel fytochroom in de Pfr vorm en de mate van strekking. Hoe hoger de R/VR en des te hoger de Pfr/ P_{totaal} des te minder stengelstrekking. In de natuur wordt een afname van de R/VR waargenomen in licht dat door bladeren wordt doorgelaten en wordt gereflecteerd. Planten kunnen aan de hand deze verandering in R/VR bepalen in hoeverre ze door andere planten worden overschaduwd of dreigen te worden overschaduwd door hun buurplanten (Smith, 1995; Ballar *et al.*, 1987). De mate van strekkingsgroei op een afname in Pfr/ P_{totaal} verschilt sterk van plantensoort tot plantensoort. Planten die van nature als ondergroei in bossen voorkomen vertonen nauwelijks een verandering in stengelstrekking bij een afname van Pfr/ P_{totaal} , terwijl planten uit kruidachtige

vegetaties juist een zeer sterke strekkingsreactie vertonen. De ecologische verklaring hiervoor is duidelijk. Planten uit de ondergroei van een bos zijn aangepast aan het groeien in een omgeving met een lage R/VR en 'weten' dat zij nooit boven de met hen om licht concurrerende bomen kunnen uitgroeien ook al zouden zij al hun energie in stengelgroei steken. Planten in een kruidachtige vegetatie zijn echter wel in staat om door tijdelijk meer energie in stengelgroei in plaats van bladgroei te steken de concurrentieslag om licht te winnen van hun buurplanten. Eenmaal weer in het volle licht neemt bij deze planten de stengelgroei weer af en ontwikkelt de plant weer meer blad om zonlicht voor fotosynthese te onderscheppen.

Uit diverse experimenten is gebleken dat de door een afname in Pfr/Ptotaal geïnduceerde strekkingsgroei mede wordt bepaald door de hoeveelheid fotosynthetisch actieve straling. Stengelstrekking in *Rumex obtusifolius* werd alleen gestimuleerd door een afname in R/VR als de planten in voldoende hoge lichtintensiteit waren opgekweekt (McLaren & Smith, 1978). Lichtintensiteit speelt altijd een dominante rol (Monsi *et al.*, 1973; Morgan & Smith, 1981; Smith *et al.*, 1989). In *Chenopodium album* was de stengelstrekking bij afname van R/VR minder bij planten opgekweekt in een lagere lichtintensiteit (Morgan & Smith, 1981). Ritter *et al.* (1981) namen bij *Chenopodium rubrum* waar dat de toename van stengelstrekking door het aanbrengen van neutrale schaduw (verlaging fotosynthetisch actieve straling bij gelijkblijvende R/VR) werd bepaald door de hoeveelheid blauw licht. Bovengenoemde waarnemingen ondersteunen de door Mohr (1986, 1987) opgestelde theorie van samenwerking van blauwlicht receptor en fytochroom in de fotomorfogenese van planten en de door Smith (1986) gepostuleerde rol van de blauwlicht receptor als lichtintensiteitsmeter. De beschreven proeven suggereren dat de mate van fotomorfogenetische groeirespons wordt bepaald door de hoeveelheid assimilaten die voor deze groeirespons beschikbaar is.

Bij gebruik van assimilatiebelichting is een zekere hoeveelheid verrood gewenst voor een normale plantontwikkeling. Net als voor blauw licht zal onder kas omstandigheden gedurende de lichtperiode voldoende verrood uit het zonlicht de kas binnenkomen. Onder omstandigheden met uitsluitend kunstlicht kunnen de planten echter te gedrongen blijven. Dit is echter afhankelijk van de plantensoort. Rozen zijn uitstekend te telen onder uitsluitend hogedruk natriumlampen, maar tomaten vertonen een abnormale gedrongen groei.

5.5.2 Cryptochroom

Voor tuinbouwgewassen geteeld in een kas zullen de fotomorfogenetische ontwikkeling afhangen van de oorspronkelijke herkomst van een plant, de hoeveelheid zonlicht ten opzichte van de hoeveelheid bijbelichting, het spectrum van de lampen gebruikt voor bijbelichting en het aantal uren bijbelichting per dag.

De meest gebruikte lamp voor assimilatiebelichting, de hogedruk natriumlamp straalt slechts ongeveer 6% van het totale licht uit als blauw licht. Bij de een gangbare niveau van assimilatiebelichting van $30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ betekent dit dat de plant $1,8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ blauw licht vanuit de assimilatielampen krijgt. Dit is minder dan de $15\text{--}30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ die in een aantal experimenten als minimumwaarde voor normale plantontwikkeling is waargenomen. Dit hoeft geen probleem te zijn indien nog minimaal 13 tot $28 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ blauw licht uit zonlicht de kas binnendringt. Zonlicht bevat ongeveer 20% blauw licht. Dit betekent dat 65 tot $140 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ zonlicht in combinatie van hogedruk natrium lampen voldoende moet zijn te voorzien in de blauwlichtbehoefte van de planten. Uitgezonderd zeer sombere winterse dagen zullen deze zonlichtniveaus over het algemeen wel worden bereikt in de kas.

Echter, met name gedurende de winterperiode zullen de planten, uitgaande bij een totale belichtingsduur van 16 tot 20 uur, 8 tot 12 uur uitsluitend in het licht van assimilatielampen groeien. Er is geen literatuur gevonden van experimenten waarin is onderzocht in hoeverre het ontbreken van voldoende blauw licht gedurende enkele uren belichting per dag de ontwikkeling van planten beïnvloedt. Omdat met name strekkingsgroei van planten vrijwel direct reageert op een verandering in lichtkwaliteit (Hughes & Wagner, 1987; Casal & Smith, 1989) zullen de planten onder deze omstandigheden naar verwachting meer strekkingsgroei gaan vertonen naarmate zij langer in afwezigheid van zonlicht worden bijbelicht. Dit zal met name een probleem kunnen zijn bij potplanten waarbij een compacte plantvorm een belangrijk kwaliteitskenmerk is en in veel mindere mate voor snijbloemen en glasgroentegewassen.

Naast de hoeveelheid blauw licht speelt ook de R/VR van de bijbelichting een rol bij de groei van kasgewassen. Het meest bekend is de fotoperiodische belichting met gloeilampen voor de sturing van de bloei van kortedagplanten als chrysant en aster. Hiervoor is verrood licht noodzakelijk en zijn lampen met een hoge R/VR ongeschikt.

5.6 Stuurlicht in het blauwe, rode en groene spectrum

Licht heeft niet alleen effect op de quantumefficiëntie voor de fotosynthese en groei van de plant, maar daarnaast heeft de lichtkwaliteit effect op veranderingen in bladmorfologie en bladstand. Lichtkwaliteiten die de stengelstrekking beperken ten gunste van de bladgroei vergroten het totale lichtonderscheppende bladoppervlak en kunnen hierdoor een groot effect hebben op de groei. Het vaststellen van actiespectra, niet alleen voor de energiehuishouding maar ook voor morfologische processen, is essentieel. De verlichting moet een optimaal spectrum hebben, zowel voor de fotosynthese, d.w.z. een spectrum dat goed aansluit bij een of meerdere pieken van het fotosynthetisch actie spectrum als voor de morfogenese. Lage druk natriumlampen die monochromatisch licht uitzenden van 589 nm en zeer efficiënt zijn in de omzetting van elektriciteit in fotosynthetisch actieve straling, zijn bijvoorbeeld ongeschikt als enige lichtbron voor plantengroei omdat gebrek aan blauw licht (golflengtegebied 400 tot 500 nm) bij de meeste plantensoorten leidt tot een overmatige strekkingsgroei en soms ook tot chlorose. Normale groei en ontwikkeling van planten onder uitsluitend kunstlicht is mogelijk, indien de spectrale verdeling van de gebruikte lampen of combinaties van lampen uitgebalanceerd is, d.w.z. met betrekking tot de relatieve hoeveelheden blauw, rood en verrood licht redelijk overeenkomen met die van daglicht. Lamp combinaties die ten opzicht van het daglicht verrijkt zijn in het rode of blauwe deel van het spectrum resulteren in verschillen in drogestofverdeling tussen blad en stengel en beïnvloeden de zijscheut vorming. De effecten variëren echter sterk per plantensoort.

5.6.1 Blauw

De fysiologie van het licht in het blauwe gebied wordt voor een belangrijk deel bepaald door de eventuele aanwezigheid van anthocyaan. Deze pigmenten absorberen in sterke mate in het golflengtegebied. Voor een uitstekend review zie Harborne (2001). Voor een uitstekend review zie: Contributions of Jeffrey Harborne and co-workers to the study of anthocyanins door Gillian A. Cooper-Driver (Harborne, 2001).

De rol van anthocyaan in vegetatief plantmateriaal is veelzijdig. In tegenstelling tot anthocyanen in bloemen bevinden anthocyanen in vegetatieve organen zich in de vacuoles en niet in de epidermis.

Veel siergewassen en planten van een tropische origine hebben een rood-paarse kleur, veelal aan de onderkant van het blad. Ook potplanten die in de natuurlijke habitat als vegetatie onder bomen groeien hebben een rode kleur die veroorzaakt wordt door anthocyanen (Clark & Lister, 1975a,b). Anthocyanen aan de onderkant hebben een positief effect op de fotosynthese onder de heersende extreme lage-licht omstandigheden door hun beschermende werking tegen fotoinhibitie. Het fungeert als een antioxidant om de vorming van vrije radicalen tegen te gaan bij een overreductie van het fotosynthese apparaat (Helsper *et al.*, 2003). Anthocyanen absorberen licht in hetzelfde golflengtebereik als chlorofyl b 520/530 nm. Wanneer anthocyaan in het bovenste deel van het blad aanwezig is neemt de quantum efficiëntie in het golflengtegebied tussen 500 en 540 nm sterk af. Voor schaduwplanten, waaronder een grote meerderheid van de geteelde potplanten betekent dat een selectief voordeel voor lampen die relatief veel blauw en veel rood in het spectrum bezitten.

Veel blauw licht onderdrukt de stengelstrekking. Door een relatieve toename in de hoeveelheid blauw licht t.o.v. de andere golflengtes in het 400–700 nm golflengtegebied en het wegfilteren van de ver-rode straling, kunnen kortere planten worden geteeld. De ontdekking dat planten een bepaalde hoeveelheid blauw licht nodig hebben om zich normaal te ontwikkelen komt voort uit proeven waarin planten onder uitsluitend kunstlicht met een ten opzicht van zonlicht beperkt spectrum werden opgekweekt. Planten opgekweekt onder het monochromatische (589 nm) oranje licht van lage druk natriumlampen vertonen overmatige strekkingsgroei, lichter groene en dunnere bladeren. Hoeveel blauw nodig is voor normale ontwikkeling van een plant is slechts door weinig mensen en voor een paar plantensoorten onderzocht. De blauw licht behoefte varieert sterk per plantensoort. Sommige planten kunnen zonder morfogenetische problemen gekweekt met weinig blauw licht zoals dat van hoge druk natrium lampen, terwijl andere soorten meer blauw licht vereisen en beter groeien in licht van metaalhalide lampen of een combinatie van metaalhalide en hoge druk natrium lampen.

Tarwe planten opgekweekt onder monochromatisch licht van rode LED's met 10% aanvullend blauw licht van blauwe TL-buizen ontwikkelden zich vergelijkbaar met planten in wit licht. Sla planten ontwikkelden zich normaal bij licht van rode LED's wanneer 6% van de totale hoeveelheid fotosynthetisch actieve straling afkomstig was van blauwe TL buizen. Voor in kassen geteelde gewassen is de hoeveelheid blauw licht afkomstig van het binnentredende zonlicht over het algemeen voldoende. Voor een aantal plantensoorten opgekweekt onder uitsluitend kunstlicht is vastgesteld wat de minimale hoeveelheid blauw licht is om een normale plantontwikkeling te krijgen. Afhankelijk van de soort plant bedraagt de minimale hoeveelheid blauw licht 6% van de totale hoeveelheid fotosynthetisch actieve straling of moet van het licht tenminste $15\text{--}30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ blauw licht (400–500 nm) zijn. Vanwege het grote effect van blauw licht op de strekkingsgroei en bladkleur is het bij de teelt van siergewassen belangrijker voldoende blauw licht te geven dan bij de teelt van glasgroenten.

Bij roos vermindert blauw licht de strekkingsgroei en geeft dikkere donker groenere bladeren. Ook het wegfilteren van blauw licht uit het spectrum van witte TL buizen leidde tot een sterke toename van de strekkingsgroei roos (Maas *et al.*, 1995). Proeven in kassen waarbij bepaalde delen van het zonlichtspectrum met gekleurde folies of vloeistof filters werden tegengehouden hebben laten zien dat planten compacter groeien naarmate het aandeel blauw licht toeneemt en de hoeveelheid

verrood licht afneemt.

Een hoge dosering van rood licht stimuleert de uitloop van knoppen. Dit effect wordt tegengegaan door VR. Zoals eerder al opgemerkt is de hoeveelheid rood licht in son-t voldoende hoog en heeft aanvullende belichting met bijvoorbeeld rode LED's weinig zin.

Minimale hoeveelheid blauw in de kas

De ontdekking dat planten een bepaalde hoeveelheid blauw licht nodig hebben om zich normaal te ontwikkelen komt voort uit proeven waarin planten onder uitsluitend kunstlicht met een ten opzicht van zonlicht beperkt spectrum werden opgekweekt. Planten opgekweekt onder het monochromatische (589 nm) oranje licht van lagedruk natriumlampen vertonen overmatige strekkingsgroei, lichter groenere en dunnere bladeren. Toevoeging van blauw licht vermindert de strekkingsgroei en geeft dickere donker groenere bladeren. Ook het wegfilteren van blauw licht uit het spectrum van witte TL buizen leidde tot een sterke toename van de strekkingsgroei bij stamslabonen (Maas & Bakx, 1995), roos (Maas *et al.*, 1995) en fuchsia (Maas & Van Hattum, 1998).

Proeven in kassen waarbij bepaalde delen van het zonlichtspectrum met gekleurde folies of vloeistoffilters werden tegengehouden hebben laten zien dat planten compacter groeien naarmate het aandeel blauw licht toeneemt en de hoeveelheid verrood licht afneemt (Maas & Bakx, 1995; Oyaert *et al.*, 1999; Rajapakse & Kelly, 1992; Mortensen & Strmme, 1987). Hoeveel blauw nodig is voor normale ontwikkeling van een plant is slechts door weinig mensen en voor een paar plantensoorten onderzocht. Over het algemeen wordt aangenomen dat licht met een spectrum vergelijkbaar met zonlicht een normale plantontwikkeling garandeert. Zonlicht bevat, uitgedrukt als percentage van alle fotonen tussen 400 en 800 nm, ca. 21% blauw (400–500nm), 26% groen (500–600 nm), 27% rood (600–700 nm) en 26% verrood licht (Maas, 1989a; Maas & Bakx, 1995). De blauwlichtbehoefte varieert echter sterk per plantensoort. Hierdoor kunnen sommige planten zonder morfogenetische problemen gekweekt worden in licht met weinig blauw licht zoals dat van hogedruk natrium lampen, terwijl andere soorten meer blauwlicht vereisen en beter groeien in licht van metaalhalide lampen of een combinatie van metaalhalide en hoge druk natrium lampen. Cathey & Campbell (1979) vonden nauwelijks enig verschil in groei en ontwikkeling van een negental plantensoorten in licht van lage- of hogedruk natriumlampen. Zij gebruikten deze lampen echter als aanvulling op het natuurlijke daglicht in de kas gedurende de winterperiode dat waarschijnlijk voldoende blauw licht bevatte voor een normale ontwikkeling van de planten.

Onder uitsluitend kunstlicht is gebleken dat ook bij een veel lager aandeel blauw een normale plantontwikkeling mogelijk is. Paprika heeft bij $4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ blauw licht op een totaal van $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ fotosynthetisch actieve straling (=1,6% blauw) een ontwikkeling die vrijwel overeenkwam met die van planten opgekweekt onder metaalhalidelampen. Tarweplanten opgekweekt onder monochromatisch licht van rode LED's met 10% aanvullend blauw licht van blauwe TL-buizen ontwikkelden zich vergelijkbaar met planten in wit licht (Goins *et al.*, 1997). Slaplanten ontwikkelden zich normaal bij licht van rode LED's wanneer 6% van de totale hoeveelheid fotosynthetisch actieve straling afkomstig was van blauwe TL buizen.

Hoewel in bovengenoemde onderzoeken de auteurs de ontwikkeling van de planten relateren aan het percentage blauw licht zijn er aanwijzingen dat niet in alle gevallen het percentage blauw bepalend is voor de plantontwikkeling. (Dougher & Bugbee, 2001a,b) vergeleken de groei en ontwikkeling van sojabonen, tarwe en sla in licht

met verschillende hoeveelheden blauw onder hogedruk natriumlampen (<0,1, 2 en 6%) en metaalhalide lampen (6, 112 en 26%) in combinatie met gele filters bij twee lichtniveaus (200 en 500 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ fotosynthetisch actieve straling). Zij vonden dat het effect van blauw licht op drooggewicht, stengellengte, bladoppervlakte, specifiek bladoppervlak en vertakking per plantensoort kan verschillen. Met betrekking tot de genoemde parameter had blauw licht geen effect op de groei en ontwikkeling van tarwe, reageerde sla zeer sterk op het percentage blauw licht tussen 0 en 6% en werd de stengelstrekking in sojaboon geremd door een toename in blauw licht tussen 0 en 6% zonder dat dit van invloed was op het drooggewicht van de planten. Stengelstrekking in sojabonen werd bepaald door het percentage blauw licht, terwijl dit in sla werd bepaald door de totale hoeveelheid blauw.

Wheeler *et al.* (1991) vonden echter dat de stengelstrekking van sojabonen geteeld in licht van hogedruk natriumlampen afnam met de hoeveelheid blauw licht tussen 23 en 30 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, waarbij het maximum effect werd bereikt bij 30 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ en onafhankelijk was van de totale hoeveelheid fotosynthetisch actieve straling. Hoenecke *et al.* (1992) onderzochten de rol van blauw licht bij de ontwikkeling van slaplanten. Hun onderzoek toont eveneens dat de strekkingsgroei van slaplanten wordt bepaald door de hoeveelheid blauw licht en niet door het percentage blauwe fotonen in de hoeveelheid fotosynthetisch actieve straling. Voor een normale ontwikkeling van slaplanten dienen de planten bij een daglengte van 12 uur dagelijks 15 tot 30 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ blauw licht te ontvangen.

Conclusie

De minimale hoeveelheid blauw licht die nodig is voor het verkrijgen van een normale plantontwikkeling verschilt per plantensoort. Voor in kassen geteelde gewassen is de hoeveelheid blauw licht afkomstig van het binnentredende zonlicht over het algemeen voldoende. Voor een aantal plantensoorten opgekweekt onder uitsluitend kunstlicht is vastgesteld wat de minimale hoeveelheid blauw licht is om een normale plantontwikkeling te krijgen. Afhankelijk van de soort plant bedraagt de minimale hoeveelheid blauw licht 6% van de totale hoeveelheid fotosynthetisch actieve straling of moet van het licht tenminste 15–30 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ blauw licht (400–500 nm) zijn. Vanwege het grote effect van blauw licht op de strekkingsgroei en bladkleur is het bij de teelt van siergewassen belangrijker voldoende blauw licht te geven dan bij de teelt van glasgroenten gewassen.

5.6.2 Groen

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

Groen licht drijft fotosynthese in diepere blad en gewaslagen. Sun *et al.* (1998) toonden aan dat monochromatisch groen en rood licht eenzelfde rendement hadden.

Er waren echter verschillen in de plaats waar de fotosynthese werd gerealiseerd. In het sponsparenchym was de fotosynthese onder groene belichting veel hoger dan onder rood- en blauwbelichting. Dit illustreert het complexe karakter van de quantum efficiëntie. De verdeling van licht wordt weliswaar bepaald door chlorofyl maar de quantum efficiëntie wordt puur gerealiseerd door de verdeling van de fotosynthesepigmenten en het Rubisco. (Nishio, 2000) toonde aan dat de fotosynthese in een blad niet het hoogst is op de plaats waar het meeste licht valt (de bovenste palisadelaag) maar dieper in het blad in de middelste regionen van het palisadeparenchym waar de verhouding tussen licht fotosynthese pigmenten en Rubisco, optimaal is. Een optimale verdeling van het Rubisco in relatie tot de lichtverdeling is een belangrijk item bij de optimalisatie van de stikstofverdeling over de plant (Evans, 1995; Evans *et al.*, 1993). Met blauw licht vindt de fotosynthese voornamelijk plaats in het palisadeparenchym (Mokronosov *et al.*, 1973; Outlaw *et al.*, 1976; Starzecki, 1962) maar met groen licht veel dieper in het blad. Rood licht heeft een middenpositie. In termen van lichtbenutting kunnen we concluderen dat bij hoge lichtintensiteiten groen licht een hoger rendement heeft dan rood en blauw licht om twee redenen:

1. een betere spreiding en minder verzadiging
2. minder afscherming door andere pigmenten in competitie met licht.

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

5.6.3 Rood

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

Bij chrysant is de snelheid van knopinductie bepaald door de aangehouden daglengte en door de R/VR verhouding in het licht. Ook de efficiëntie van de nachtonderbreking die vaak wordt gehanteerd is afhankelijk van de lichtkwaliteit. Een onderbreking met rood licht is het meest efficiënt. De onderbreking met rood licht kan eventueel weer ongedaan worden gemaakt met VR. Kortom er zijn diverse mogelijkheden om de bloei en plantvorm van chrysant te sturen met LED's in verschillende kleurcombinaties. Verschillende bronnen melden bijvoorbeeld een spectaculair remmend effect van blauw licht op de strekking van de internodiën bij chrysant. Overigens geldt hetzelfde voor een verhoging van de R/RV ratio. Omdat het eenvoudiger is om de R/VR verhouding in het licht te verhogen dan het aandeel blauw, zou een onderzoeksdoel kunnen zijn om de relatieve effecten van beide maatregelen met elkaar te vergelijken. Het is overigens niet uitgesloten dat er interacties zijn tussen beide stuurlicht scenario's (hoog R/RV en veel blauw licht).

Het is de verwachting dat een toename van blauw licht een donkerder blad geeft. In chrysanten opgekweekt onder licht met relatief weinig blauw werd in bladeren en

stengels een afname van de concentraties aan oplosbare suikers (sucrose, glucose en fructose) en zetmeel geconstateerd wat nadelig is met betrekking tot de houdbaarheid. Gezien de lange houdbaarheid van chrysanten is dit echter voor de teelt minder relevant.

Komkommer is gevoelig voor een hoge dosis verrood licht (VR) vooral aan het eind van de lichtperiode. VR heeft een sterk stimulerende werking op de lengte van de internodiën en dat wordt in de praktijk als een negatief effect gezien. De strekking wordt juist tegengegaan door een hoge dosis rood licht (R). Son-t heeft een hoge R/VR verhouding en daardoor is er geen extra rood licht nodig.

Blauw licht heeft een positief effect op de opening van de huidmondjes in de bladeren waardoor CO₂ makkelijker kan worden opgenomen. De hoeveelheid chlorofyl en carotenoïden en de verhouding van deze pigmenten in een blad is afhankelijk van de lichtkwaliteit waarin het blad zich heeft ontwikkeld. Er is meer chlorofyl en carotenoïden in bladeren aanwezig die zijn opgekweekt in rood licht dan in bladeren opgekweekt in blauw licht. Teelt in geel en groen licht leidde tot bleekgroene bladeren.

Toevoeging van blauw licht vermindert de strekkingsgroei bij roos en geeft dikkere donker groenere bladeren. Ook het wegfilteren van blauw licht uit het spectrum van witte TL buizen leidde tot een sterke toename van de strekkingsgroei roos (Maas *et al.*, 1995). Proeven in kassen waarbij bepaalde delen van het zonlichtspectrum met gekleurde folies of vloeistoffilters werden tegengehouden hebben laten zien dat planten compacter groeien naarmate het aandeel blauw licht toeneemt en de hoeveelheid verrood licht afneemt.

Een hoge dosering van rood licht stimuleert de uitloop van knoppen. Dit effect wordt tegengegaan door VR.

Conclusie

De meest eenvoudige indeling van het spectrum in de hier boven beschreven paragraaf heeft zoals gezegd een groot aantal voordelen. Vanuit een fysiologisch standpunt verdient het echter aanbeveling om hierop een kleine aanpassing te maken.

Het blauwe gebied kan beter gedefinieerd worden van 400–510 nm, omdat de absorptie van bèta caroteen als onderdeel van het blauw absorberende pigment complex bij 500 nm nog aanzienlijk is. Het is m.i. beter om de carotenen (Owens, 1994) en hun efficiëntie bij het blauwe deel van het spectrum te betrekken.

Vervolgens is er het gebied tussen 510 en 610 nm met weinig morfogenetische werking van het licht, veel interactie met de eventueel aanwezige anthocyanen en een quantum efficiëntie die met name bepaald wordt door de bladdikte (Het derde gebied tussen 610 en 720 wordt gekenmerkt door een hoge absorptie van chlorofyl, een drastische verschuiving van absorptie door fotosysteem 2 naar fotosysteem 1 en een morfogenetisch gevoelig fytochroom evenwicht).

5.7 Ontkoppeling tussen IR en PAR-licht

Vrijwel alle kortgolvlige straling (zowel PAR als NIR) komt uiteindelijk, na absorptie door het blad, vrij als warmte. Omdat son-t en daglicht naast PAR ook veel NIR bevatten, zal de warmtebalans anders uitpakken dan die van LED's, waar geen NIR in het emissiespectrum aanwezig is. Of dit positief dan wel negatieve

consequenties heeft, is uiteraard helemaal afhankelijk van het type teelt en het seizoen. In meerlagen teelten is de afwezigheid van NIR positief omdat de lichtbron dichtbij de planten geplaatst kan worden. Ook groenten gewassen die baat hebben bij een relatief lage koeltemperatuur kunnen baat hebben bij een lage NIR belasting. Omgekeerd kan juist een hoge NIR straling positief zijn wanneer het gewas te generatief is. Een algemene regel is daarom in de meeste gevallen niet te geven.

5.8 Gepulseerd licht

In de fotosynthese wordt lichtenergie door bladgroen ingevangen, en vervolgens omgezet in chemische energie, uiteindelijk resulterend in de binding van water aan CO_2 , waaruit suikers of koolhydraten ontstaan. Het eerste deel van het proces wordt gevormd door de lichtreacties. Deze lichtreacties in de bladgroenkorrels verlopen heel snel, in de orde van 10–9 seconde. De daarop volgende biochemische reacties hebben veel meer tijd nodig, één tiende tot één honderdste seconde.

Al in de dertiger jaren ontdekte men dat na zo'n korte lichtpuls rustig even gewacht kon worden totdat de plant ook klaar was met zijn chemische reacties, alvorens een nieuwe puls te geven. Dit soort onderzoek, uitgevoerd met algencultures, leidde tot een schatting van het aantal benodigde licht quanta om één molecuul CO_2 te binden, Q_{fot} . De vraag die uit dat onderzoek naar voren kwam was: is het mogelijk om slechts zeer korte tijden te belichten, en dan met zulke tussenpozen dat daarin de chemische reacties kunnen verlopen, zonder verliezen in de fotosynthesesnelheid. Je zou bijvoorbeeld kunnen denken aan 20 pulsen met een lengte van 1 milliseconde, per seconde.

Dat betekent dat je eigenlijk maar 20 milliseconden licht zou hoeven te geven, in plaats van 1 hele seconde (1000 milliseconden), dat is 500 keer minder. Bijvoorbeeld, hoe lang mag het duren voordat de volgende flits komt, want voor 1 CO_2 zijn theoretisch 4 opeenvolgende quanta nodig. Als een tweede of derde te laat komen, gaat de energie van de eerste ook weer verloren. In een studie van (Jones & Kok, 1966) ook uitgevoerd met algen, is een aantal experimenten over flitslicht en de effecten ervan op de fotosynthese beschreven.

De conclusie van het onderzoek was dat je per hoeveelheid licht quanta inderdaad een hogere fotosynthese kunt krijgen. De randvoorwaarden zijn echter extreem lastig te realiseren:

1. De flitsen moeten zeer kort zijn (2 msec of minder)
2. De donkertijd tussen de flitsen dient maximaal 10 msec te bedragen.
3. Het vermogen (licht) per flits dient zeer hoog te zijn. Dat maakt het natuurlijk wel heel moeilijk voor toepassingen in de tuinbouwpraktijk.

5.9 Ziekten en plagen

In diverse kasgewassen is waargenomen dat het optreden en de verspreiding van een aantal ziekten en plagen in kasgewassen in belangrijke mate wordt beïnvloed door de spectrale verdeling van het licht. Hierdoor kunnen veranderingen in het lichtspectrum, bedoeld om de ontwikkeling van de plant in een bepaalde richting te sturen, het ongewenste neveneffect hebben dat zij de planten gevoeliger maken voor een bepaalde plaag of ziekte. Omgekeerd kunnen lichtkwaliteiten die een bepaalde

ziekte of plaag onderdrukken juist weer tot een ongewenste ontwikkeling van de planten leiden. Een aantal effecten van lichtkwaliteit op het optreden van zowel gebreksziekten als aantastingen door schimmels, virussen, aaltjes en, witte vlieg zijn hieronder samengevat.

Een tekort of volledig ontbreken van blauw licht en UV-A straling leidde bij de teelt van katoen tot het ontstaan van chlorose-verschijnselen in de bladeren door een verminderde fotochemische reductie van Fe³⁺ ionen tot Fe²⁺ ionen die nodig zijn bij de synthese van chlorofyl .

De sporulatie van veel fytopathogene schimmelsoorten wordt gestimuleerd door UV-B. In *Alternaria Chichorii* kon het stimulerende effect van UV-B op de sporenkieming ongedaan gemaakt worden door blauw licht (Vakalounakis & Christias, 1981). Dit effect van beide lichtkleuren is reversibel en wordt net als de rood/verrood reversibele stimulatie van de kieming van slazaden bepaald door de laatst gegeven lichtkwaliteit. Panagopoulos *et al.* (1992) namen waar dat UV-B het negatieve effect van *Cercospora leaf spot disease* op de opbrengst van suikerbieten versterkte. Bij komkommer werd besmetting met *Colletotrichum lagenarium* of *Cladosporium cucumerinum* bevorderd door UV-B voorafgaand aan de besmetting. UV-B straling gegeven na de besmetting veranderde de ontwikkeling van de ziekte niet (Orth *et al.*, 1990). Het gebruik van UV-absorberende folies leidde in diverse studies in vergelijking met niet UV absorberende folies tot forse vermindering van het aantal gevormde sporen of kieming van de sporen (Orth *et al.*, 1990).

Ook de ontwikkeling van plaagdieren zoals bijvoorbeeld aaltjes en witte vlieg kan worden beïnvloed door de kwaliteit van het licht. Zo werden wortels van tomatenplanten, geteeld in grond afgedekt met een rood licht reflecterend materiaal, sterker aangetast door nematoden dan planten in dezelfde bodem afgedekt met een wit reflecterend materiaal. Ook de aantasting van kerststerren door witte vlieg wordt beïnvloed door de lichtreflecterende eigenschappen van de bodembedekking. Meer larven en volwassen witte vliegen werden waargenomen op planten gekweekt in met rood of zwart folie bedekte grond dan op planten geteeld op een witte ondergrond. Een veranderde chemische samenstelling van de planten geteeld in de verschillende lichtkwaliteit wordt verondersteld een rol te spelen bij de ontwikkeling van deze plaagdieren.

5.10 Energetisch rendement van licht

5.10.1 Lampniveau

Het energetisch rendement is de verhouding tussen de energie die een lichtbron in gaat en de emissie (mol PAR). Voor commercieel verkrijgbare LED's varieert de energie efficiëntie tussen 1,15 $\mu\text{mol/s/watt}$ voor blauwe LED's en 1,8 $\mu\text{mol/s/watt}$ voor rode LED's. Son-t heeft op lamp niveau een efficiëntie van 1,9 $\mu\text{mol/s/watt}$. Het is duidelijk dat LED's, gemiddeld over het spectrum, (nog) inefficiënter zijn dan son-t. Omdat energieverliezen geheel als warmte vrijkomen betekent dit tevens dat LED's meer warmte produceren dan son-t. Voor de ontwikkeling van rode LED's kan gesteld worden dat de huidige prototypen zodanig zijn verbeterd dat de efficiëntie van son-t wordt geëvenaard of zelfs al wordt overtroffen.

5.10.2 Systeemniveau

Op systeemniveau is het rendement lager dan op lampniveau vanwege de verliezen in armatuur, drivers en bekabeling.

Tabel 5.1. Voorbeeld van belichtingsrendementen met son-t in een praktijkkas.

son-t	600 W philips greenpower	
Geïnstalleerd totaal	680	W
Lampdichtheid	0.13	lamp/m ²
Geïnstalleerd lamp	78	watt/m ²
Efficiëntie	1.9	μmol/s/watt
Lichtopbrengst	150	μmol/s/m ²
85% armatuur	130	μmol/s/m ²
Uursom (bruto)	0.47	mol/uur/m ²
PAR-licht	1.5	Kwh/Mol

De verwachting is dat de efficiëntie van (rode) LED's nog zal toenemen en mogelijk binnen afzienbare tijd (2-5 jaar) de GreenPower zal kunnen evenaren. Met name bij een slim gebruik (optisch, tussenbelichting, koeling etc) kan de toepassing van LED dan tot tot een belichtingssysteem leiden dat efficiënter is dan de op het moment gangbare systemen.

Referenties

- Ballar, C. L., 1999. Keeping up with the neighbours: phytochrome sensing and other signalling mechanisms. *Trends in Plant Science* 4, 201 – 201.
- Ballar, C. L., Snchez, R. A., Scopel, A. L., Casal, J. J., Ghera, C. M., 1987. Early detection of neighbour plants by phytochrome perception of spectral changes in reflected sunlight. *Plant Cell and Environment* 10, 551–557.
- Berry, J. A., 1975. Adaptation of photosynthetic processes to stress. *Science* 188, 644–650.
- Bjorkman, O., 1968. Further studies on differentiation of photosynthetic properties in sun and shade ecotypes of *solidago virgaurea*. *Physiol Plant* 21 21, *Physiol Plant* 21: 84–99.
- Blankenship, R. E., Hartman, H., 1998. The origin and evolution of oxygenic photosynthesis. *Trends in Biochemical Sciences* 23, 94–97.
- Boichenko, V., 1998. Action spectra and functional antenna sizes of photosystems i and ii in relation to the thylakoid membrane organization and pigment composition. *Photosynthesis Research* 58, 163–174.
- Bornman, F., J, Vogelmann, T. C., 1991. Effects of uv-b radiation on leaf optical properties measured with fibre optics. *J Exp Bot* 42, 547–554.
- Bornman, J. F., Teramura, A. H., 1993. Effects of ultraviolet-b radiation on terrestrial plants. In: LO, B., J, M., NultschW (Eds.) *Environmental UV-B Photobiology*, pp. 427–471. Plenum Press, New York, NY.
- Casal, J. J., Smith, H., 1989. Effects of blue light pretreatment on internode extension growth in mustard seedlings after the transition to darkness: analysis of the interaction with phytochrome. *J Exp Bot* 40, 893–899.
- Cathey, H. M., Campbell, L. E., 1979. Relative efficiency of high- and low-pressure sodium and incandescent filament lamps used to supplement natural winter light in greenhouses. *J Amer Soc Hort Sci* 104, 812–825.
- Clark, J. B., Lister, G. R., 1975a. Photosynthetic action spectra of trees. *Plant Physiology* 55, 401–406.
- Clark, J. B., Lister, G. R., 1975b. Photosynthetic action spectra of trees i comparative photosynthetic action spectra of one deciduous and four coniferous tree species as related to photorespiration and pigment complements. *Plant Physiol* 55, 401–406.
- Day, T. A., 1993. Relating uv-b radiation screening effectiveness of foliage to absorbing compound concentration and anatomical characteristics in a diverse group of plants. *Oecologia* 95, 542–550.

- Day, T. A., 2001. Ultraviolet radiation and plant ecosystems. pp. 80–117. Springer-Verlag, New York, NY.
- Day, T. A., Howells, B. W., Rice, W. J., 1994. Ultraviolet absorption and epidermal transmittance spectra in foliage. *Physiol Plant* 92, 207–218.
- Day, T. A., Howells, B. W., Ruhland, C. T., 1996. Changes in growth and pigment concentrations with leaf age in pea under modulated uv-b radiation field treatments. *Plant Cell Environ* 19, 101–108.
- Day, T. A., Vogelmann, T. C., DeLucia, E. H., 1992. Are some plant lifeforms more effective than others in screening out ultraviolet-b radiation. *Oecologia* 92, 513–519.
- Dougher, T. A. O., Bugbee, B., 2001a. Differences in the response of wheat, soybean and lettuce to reduced blue radiation. *Photochemistry and Photobiology* 73, 199–207.
- Dougher, T. A. O., Bugbee, B., 2001b. Evidence for yellow light suppression of lettuce growth. *Photochemistry and Photobiology* 73, 208–212.
- Evans, J., 1987. The dependence of quantum yield on wavelength and growth irradiance. *Aust J Plant Physiol* 14, 69–79.
- Evans, J. R., 1995. Carbon fixation profiles do reflect light absorption profiles in leaves. *Australian Journal of Plant Physiology* 22, 865–873.
- Evans, J. R., Jakobsen, I., Gren, E., 1993. Photosynthetic light-response curves. 2 gradients of light absorption and photosynthetic capacity. *Planta* 189, 191–200.
- Evstigneev, V. B., 1974. On some problems of evolution of the photosynthetic pigment apparatus. *The Origin of Life and Evolutionary Biochemistry* pp. 97–106.
- Fukshansky, L., 1993. Absorption spectra of leaves corrected for scattering and distributional error: A radiative transfer and absorption statistics treatment. *Photochem Photobiol* 57, 538–555.
- Gaastra, P., 1959. Photosynthesis of crop plants as influenced by light carbon dioxide temperature and stomatal diffusion resistance. *Meded Landbouwhogeschool Wageningen* 59, 1–68.
- Gaastra, P., 1968. Radiation measurements for investigations of photosynthesis under natural conditions. In: FE, E. (Ed.) *Functioning of terrestrial ecosystems at the primary production level*, pp. 467–478. Paris.
- Gabrielsen, E., 1948. Influence of light of different wavelengths on photosynthesis in foliage leaves. *Physiologia Plantarum* 1, 113–123.
- Gausman, H. W., Allen, W. A., Wiegand, C. L., Escobar, D. E., Rodriguez, R. R., 1973. The leaf mesophylls of twenty crops, their light spectra, and optical and geometrical parameters. *Richardson AJ*, Washington DC.
- Goins, G. D., Yorio, N. C., Sanwo, M. M., Brown, C. S., 1997. Photomorphogenesis, photosynthesis, and seed yield of wheat plants grown under red light-emitting diodes (leds) with and without supplemental blue lighting. *J Exp Bot* 48, 1407–1413.
- Green, C. B., 2004. Cryptochromes: Tailored for distinct functions. *Current Biology* 14, R847 – R849.

- Harborne, J., 2001. Study of anthocyanins. *Phytochemistry* 56, 229–236.
- Haxo, F. T., Blinks, L. R., 1950. Photosynthetic action spectra of marine algae. *Journal of General Physiology* 33, 389–422.
- Helsper, J. P. F. G., de Vos, R. C. H., Maas, F. M., Jonker, H. H., van den Broeck, H. C., Jordi, W., Pot, C. S., Keizer, L. C. P., Schapendonk, A. H. C. M., 2003. Response of selected antioxidants and pigments in tissues of *rosa hybrida* and *fuchsia hybrida* to supplemental uv-a exposure. *Physiologia Plantarum* 117, 171–178.
- Hoenecke, M. E., Bula, R. J., Tibbits, T. W., 1992. Importance of blue photon levels for lettuce seedlings grown under red-light-emitting diodes. *HortScience* 27, 427–430.
- Hoover, W. H., 1937.) the dependence of carbon dioxide assimilation in a higher plant on wavelength of radiation. *Smithsonian Misc Coli* 95, 1–13.
- Hughes, J. E., Wagner, E., 1987. Photomorphogenesis in *chenopodium album* effects of supplementary far-red light on the kinetics of stem extension. *Planta* 172, 131–138.
- Inada, K., 1976. Action spectra for photosynthesis in higher plants. *Plant and Cell Physiology* 17, 355–365.
- Inada, K., 1977. Effects of leaf color and the light quality applied to leaf-developing period on the photosynthetic response spectra in crop plants. *Proc Crop Sci Soc Japan* 46, 37–44.
- Inada, K., 1978. Photosynthetic enhancement spectra in higher plants. *Plant Cell Physiol* 19, 1007–1017.
- Jenkins, G. I., Christie, J. M., Fuglevand, G., Long, J. C., Jackson, J. A., 1995. Plant responses to uv and blue light: biochemical and genetic approaches. *Plant Science* 112, 117 – 138.
- Jones, L. W., Kok, B., 1966. Photoinhibition of chloroplast reactions i kinetics and action spectra. *Plant Physiology* 41.
- Karabourniotis, G., Bornman, J. F., 1999. Penetration of uv-a, uv b and blue light through the leaf trichome layers of two xeromorphic plants, olive and oak, measured by optical fibremicroprobes. *Physiol Plant* 105, 655–661.
- Karabourniotis, G., F, B. J., V, L., 1999. Different leaf surface characteristics of three grape cultivars affect leaf optical properties as measured with fibre optics possible implication in stress tolerance. *Aust J Plant Physiol* 26, 47–53.
- Karnachuk, R. A., I F, G., 1997. Effect of light spectral composition on the hormonal balance, growth, and photosynthesis in plant seedlings. *Russian Journal of Plant Physiology* 45, 805–813.
- Koller, D., 2000. Plants in search of sunlight. volume 33 of *Advances in Botanical Research*, pp. 35 – 131. Academic Press.
- Kubin, S., 1971. Measurement of radiant energy. In: Sestak, J., Z Catsky, Jarvis, P. G. (Eds.) *Plant photosynthetic production: manual of methods*, pp. 702–763. W Junk, The Hague.

- Maas, F., 1989a. Plantengroei in kunstlicht. literatuuroverzicht ten behoeve van verlichting nieuwe klimaatkamers cabo. Cabo verslag 127, 1-23.
- Maas, F. M., 1989b. Plantengroei in kunstlicht literatuuroverzicht ten behoeve van verlichting nieuwe klimaatkamers. CABO Cabo verslag nr 127, 22.
- Maas, F. M., Bakx, E. J., 1995. Effects of light on growth and flowering of *rosa hybrida mercedes*. *J Amer Soc Hort Sci* 20, 571-576.
- Maas, F. M., Bakx, E. J., Morris, D. A., 1995. Photocontrol of stem elongation and dry weight partitioning in *phaseolus vulgaris* l by the blue-light content of photosynthetic photon flux. *J Plant Physiol* 146, 665-671.
- Maas, F. M., Van Hattum, J., 1998. Thermomorphogenic and photomorphogenic control of stem elongation in *fuchsia* is not mediated by changes in responsiveness to gibberellins. *J Plant Growth Regulation* 17, 39-45.
- Mancinelli, A. L., 1994. The physiology of phytochrome action. In: Kendrick, R. E., Kronenberg, G. (Eds.) *Photomorphogenesis in plants*, pp. 211-269. 2nd edition.
- Mantha, S. V., Johnson, G. A., Day, T. A., 2001. Evidence from action and fluorescence spectra that uv-induced violet-blue-green fluorescence enhances leaf photosynthesis. *Photochemistry and photobiology* 73, 249-256.
- McCree, K. J., 1971. Significance of enhancement for calculations based on the action spectrum for photosynthesis. *Plant Physiology* 49, 704-706.
- McCree, K. J., 1972a. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agric Meteorol* 9, 191-216.
- McCree, K. J., 1972b. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agric Meteorol* 10, 443-453.
- McCree, K. J., 1973. A rational approach to light measurement in plant ecology. *Curr Adv Plant Sci* 3, 39-43.
- McCree, K. J., Keener, M. E., 1974. Effect of atmospheric turbidity on the photosynthetic rates of leaves. *Agric Meteorol* 13, 349-357.
- McLaren, J. S., Smith, H., 1978. Phytochrome control of the growth and development of *rumex obtusifolius* under simulated canopy light environments. *Plant Cell and Environment* 1, 61-67.
- Mohr, H., 1986. Coaction between pigment systems. In: Kendrick, R., Kronenberg, G. (Eds.) *Photomorphogenesis in plants*, pp. 547-564. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht.
- Mohr, H., 1987. Regulation from without: darkness and light. *Annals of Botany* 60, 139-155.
- Mokronosov, A. T., Bagautdinova, R. I., Bubnova, E. A., Kobeleva, I. V., 1973. Photosynthetic metabolism in palisade and spongy tissues of the leaf. *Soviet Plant Physiology* 20, 1013-1018.
- Monsi, M., Uchijima, Z., Oikawa, T., 1973. Structure of foliage canopies and photosynthesis. *Ann Rev Ecology Syst* 4, 301-327.
- Monteith, J. L., 1973. *Principles of environmental physics*. Edward Arnold, London.

- Morgan, D. C., Smith, H., 1981. Control of development in *chenopodium album* l by shadelight: The effect of light quantity (total fluence rate) and light quality (red:far-red ratio). *The New Phytologist* 88, 239–248.
- Mortensen, L. M., Strmme, E., 1987. Effects of light quality on some greenhouse crops. *Scientia Horticulturae* 33, 27–36.
- Moss, D. N., Loomis, W. E., 1952. Absorption spectra of leaves i the visible spectrum. *Plant Physiology* 27, 370–391.
- Nishio, J., 2000. Why are higher plants green? evolution of the higher plant photosynthetic pigment complement. *Plant, Cell and Environment* 23, 539–548.
- Norman, J. M., Tanner, C. B., Thurtell, G. W., 1969. Photosynthetic light sensor for measurements in plant canopies. *Agron J* 61, 840–843.
- Ntefidou, M., Manetas, Y., 1996. Optical properties of hairs during the early stages of leaf development in *platanus orientalis*. *AustJ Plant Physiol* 23, 535–538.
- Orth, A. B., Teramura, A. H., Sisler, H. D., 1990. Effects of ultraviolet-b radiation on fungal disease development in *cucumis sativus*. *Am J Bot* 77, 1188–1192.
- Outlaw, W. H., JrSchmuck, C. L., Tolbert, N. E., 1976. Photosynthetic carbon metabolism in the palisade parenchyma and spongy parenchyma of *vicia faba* l. *Plant Physiology* 58, 186–189.
- Owens, T. G., 1994. Excitation energy transfer between chlorophylls and carotenoids. *Photoinhibition of Photosynthesis: from Molecular Mechanisms to the Field* (eds NR Baker and JR Bowyer) pp. 95–109,.
- Oyaert, E., Volckaert, E., Debergh, P., 1999. Growth of chrysanthemum under coloured plastic films with different light qualities and quantities. *Sci Hort* 79, 195–205.
- Panagopoulos, I., Bornman, J. F., Bjrn, L. O., 1992. Response of sugar beet plants to ultraviolet-b (280-3320 nm) radiation and cercospora leaf spot disease. *Physiol Plantarum* 84, 140–145.
- Parks, B. M., Folta, K. M., Spalding, E. P., 2001. Photocontrol of stem growth. *Current Opinion in Plant Biology* 4, 436 – 440.
- Rabideau, G. S., French, C., Holt, A. S., 1946. The absorption and reflection spectra of leaves chloroplast suspension and chloroplast fragments as measured in an ulbricht sphere. *American Journal of Botany* 33.
- Rabinowitch, E. E., 1951. *Photosynthesis and related processes*. Vol 2 Part I, Spectroscopy and fluorescence of photosynthetic pigments: Kinetics of photosynthesis pp. 837–844.
- Rajapakse, N. C., Kelly, J., 1992. Regulation of chrysanthemum growth by spectral filters. *J Amer Soc Hort Sci* 117, 481–485.
- Ritter, A., Wagner, E., Holmes, M. G., 1981. Light quantity and quality interactions in the control of elongation growth in light-grown *chenopodium rubrum* l seedlings. *Planta* 153, 556–560.
- Rvachev, V. P., Berdnikov, V. F., Vaschchenko, V. I., 1963. Physical basis of measurements of the energy of photosynthetically active radiation by selective detectors. *Fiziol Rast* 10, 598–602.

- Sager, J. C., Edwards, J. L., Klein, W. H., 1982. Light energy utilization efficiency for photosynthesis. *Transactions of the ASAE* 25, 1737–1746.
- Schapendonk, A. H. C. M., Brouwer, P., 1984. Fruit growth of cucumber in relation to assimilate supply and sink activity. *Scientia Horticulturae* pp. 21–33.
- Schuerger, A. C., Brown, C. S., Stryjewski, E. C., 1997. Anatomical features of pepper plants (*capsicum annum* l) grown under red light-emitting diodes supplemented with blue or far-red light. *Ann Bot* 79, 273–282.
- Sivalingam, P. M., Ikawa, T., Nisizawa, K., 1976. Physiological roles of a substance 334 in algae. *Bot Mar* pp. 9–21.
- Smith, H., 1986. The perception of light quality. In: Kendrick, R., Kronenberg, G. (Eds.) *Photomorphogenesis in plants*, pp. 187–217. Martinus Nijhoff/Dr W Junk Publishers, Dordrecht/Martinus Nijhoff/Dr W Junk Publishers, Dordrecht.
- Smith, H., 1994. Sensing the light environment: the functions of the phytochrome family. In: Kendrick, R., Kronenberg, G. (Eds.) *Photomorphogenesis in plants*, pp. 377–416. Martinus Nijhoff/Dr W Junk Publishers, Dordrecht/Martinus Nijhoff/Dr W Junk Publishers, Dordrecht.
- Smith, H., 1995. Physiological and ecological function within the phytochrome family. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol* 46, 289–315.
- Smith, W. K., Knapp, A. K., Reiners, W. A., 1989. Penumbral effects on light penetration in plant communities. *Ecology* 70, 1603–1609.
- Starzecki, W., 1962. The roles of the palisade and spongy parenchyma of leaves in photosynthesis. *Acta Society Botanische Polonaise* 31, 419–436.
- Strain, H. H., 1951. The pigments of algae. *Manual of Phycology: an Introduction to the Algae and Their Biology* pp. 243–262.
- Suetsugu, N., Wada, M., 2003. Cryptogam blue-light photoreceptors. *Current Opinion in Plant Biology* 6, 91 – 96.
- Sun, J., Nishio, J. N., Vogelmann, T. C., 1998. Green light drives CO₂ fixation deep within leaves. *Plant and Cell Physiology* 39, 1020–1026.
- Vakalounakis, D. J., Christias, C., 1981. Sporulation in *alternaria cichorii* is controlled by a blue and near ultraviolet reversible photoreaction. *Can J Bot* 59, 626–628.
- van der Schalie, E., Green, C. B., 2005. Cryptochromes. *Current Biology* 15, R785 – R785.
- Wheeler, R. M., Mackowiak, C. L., Sager, J. C., 1991. Soybean stem growth under high-pressure sodium with supplemental blue lighting. *Agronomy Journal* 83, 903–906.
- Wheldale, M., 1916. *The Anthocyanin Pigments of Plants*. Cambridge University Press, London.