

Paprika: effecten van fotoperiode en lichtspectrum

Deelrapport VI in project “Fundamentele kennisontwikkeling LED-belichting voor praktische toepassing in de kas”



Augustus 2022

A. Boonman & S.W. Hogewoning

Paprika: effecten van fotoperiode en lichtspectrum

Deelrapport VI in project “Fundamentele kennisontwikkeling LED-belichting voor praktische toepassing in de kas”

Augustus 2022

A. Boonman & S.W. Hogewoning

Plant Lighting B.V.

Doordraai 1

3981 PE Bunnik

info@plantlighting.nl

www.plantlighting.nl

REFERAAT

A. Boonman & S.W. Hogewoning. 2022. Paprika: effecten van fotoperiode en lichtspectrum. Deelrapport VI in project "Fundamentele kennisontwikkeling LED-belichting voor praktische toepassing in de kas". Plant Lighting B.V. Bunnik. 45p.

Hoofdsponsors



Ministerie van Landbouw,
Natuur en Voedselkwaliteit



Projectpartner



Sponsors



© 2022 Plant Lighting B.V.

Dit rapport is tot stand gekomen in samenwerking met het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit en Glastuinbouw Nederland in het kader van het programma Kas als Energiebron, ter stimulering van energiebesparende maatregelen in de tuinbouw. Het onderzoek is mede mogelijk gemaakt door de bijdragen van hierboven vermelde sponsors. De resultaten mogen vrij gebruikt worden, mits de bronnen worden vermeld.

Plant Lighting B.V. is niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen als gevolg van gebruik van gegevens uit dit rapport.

Inhoudsopgave

SAMENVATTING	5
DANKWOORD	7
1 INLEIDING.....	8
1.1 Achtergrond.....	8
1.2 Doelstellingen.....	9
2 MATERIAAL EN METHODEN	10
2.1 Plantmateriaal, teeltgegevens en klimaat	10
2.2 Belichting.....	13
2.3 Model plantbelasting.....	16
2.4 Metingen.....	18
3 RESULTATEN.....	19
3.1 Strecking en morfologie.....	19
3.2 Verdamping en fotosynthese.....	23
3.3 Plantbelasting en opbrengst	26
4 DISCUSSIE.....	31
4.1 Strecking en morfologie.....	31
4.2 Verdamping, fotosynthese en opbrengst.....	33
4.3 Praktische implicaties en toekomstperspectief	35
5 REFERENTIES.....	37
6 APPENDIX	38

Samenvatting

Introductie

Jaarrond teelt van paprika onder belichting kent nog meerdere uitdagingen, zoals een matige stengelstrekking die de werkbaarheid bemoeilijkt. Er is een sterk verval van fotosynthesesnelheid en bladkwaliteit bij toenemende gewasdiepte onder de kop in het voorjaar. In de praktijk wordt jaarrond teelt nog nauwelijks toegepast, terwijl dit meerdere voordelen biedt zoals een betere marktpositie en arbeidsinvulling voor telers. Voor een energiezuinige teelt zal belicht moeten worden met LED. Een eerdere studie liet zien dat strekking bevorderd werd door een zonlichtspectrum met een groot aandeel verrood licht, en gaf een indicatie dat een kortere daglengte kan leiden tot een hogere fotosynthesesnelheid. Onderzoek naar de interactie tussen daglengte en lichtspectrum is nodig voor het bepalen van een betaalbare belichtingsstrategie waaronder een goede jaarrond teelt mogelijk wordt.

Proefopzet

Het ras Maverla werd geteeld aan de hogedraad in twee klimaatkamers bij Plant Lighting in Bunnik. Dit ras is gekozen vanwege de ervaring dat het onder belichting moeizaam strekt en bladchlorose ontwikkelt. Er is gestart met jonge planten met een open bloem in de splitsing. Er is 15 weken geteeld bij twee daglengtes (15 uur en 18 uur) en vier verschillende lichtspectra (zie Tabel). Met daglichtsimulatoren is de overgang van winter naar voorjaar gesimuleerd. De aanvullende belichting met vier spectra LED is stapsgewijs opgebouwd voor een goede balans ten opzichte van de toenemende plantbelasting. Bij 15 uur daglengte werd met 218 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ en bij 18 uur daglengte met 182 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR belicht, zodat de lichtsom gelijk was.

Code	Beschrijving
1 RWBFr PSS 0.75	Standaard LED met hoog verrood
2 RWBFr PSS 0.83	Standaard LED met medium verrood (als in kasproef 2019/2020)
3 RWB PSS 0.87	Standaard LED zonder toegevoegd verrood
4 WFr PSS 0.75	Basis witte LED met medium verrood

RWBFr; rood, wit, blauw, verrood. PSS; phytochrome photostationary state (zie tekst voor uitleg).

PSS is een maat voor de hoeveelheid actief fytochrom ten opzichte van totaal fytochrom. Een lage PSS waarde geeft aan dat er relatief veel verrood licht in het spectrum zit (Sager et al., 1988). Ter referentie werd hetzelfde spectrum getoetst als bij de praktijkproef bij het Delphy Improvement Centre, namelijk spectrum 2 RWBFr PSS 0.83. Een negatieve controle was spectrum 3 RWB PSS 0.87 zonder toegevoegd verrood waarbij de minste strekking werd verwacht. Behandeling 1 en 4 hadden respectievelijk een lage PSS van 0.75 met een basis van vooral rode LED's en 55% verrood (behandeling 1), of een basis van een hoger aandeel witte LED's waarbij maar 18% verrood nodig was om PSS 0.75 te realiseren (behandeling 4).

Resultaten

Het lichtspectrum had een sterk effect op de mate van strekking. In spectrum 4 op basis van witte LED's met PSS 0.75 was de gemiddelde lengte 5.1cm per internodium en was het gewas goed werkbaar. In spectrum 1 op basis van rode LED's met veel verrood (PSS 0.75) was de strekking zelfs overmatig (6.2 cm) en was het gewas zeer open. De andere twee spectra resulteerden in kortere internodia. De daglengte had geen effect op strekking.

De mate waarin gasuitwisseling plaats kan vinden tussen het blad en de omgeving wordt gemeten via de huidmondjesgeleidbaarheid, afgekort gs. Zowel het aantal, de dichtheid en vooral de opening van de huidmondjes bepaalt gs. Fotosynthese en huidmondjesgeleidbaarheid vertoonden een sterk verval tussen het blad bovenin het gewas en op slechts 5-7 oksels onder de kop, met name bij 18 uur belichting. Dat is wederom een indicatie dat fotosynthese en daarmee uiteindelijk productie deels beperkt wordt door onvoldoende opening van de huidmondjes. Echter, onder de kortere daglengte van 15 uur en bij het spectrum 4 WFr PSS 0.75 bleven fotosynthese en gs relatief hoger dan bij de andere behandelingen. Verdamping op het niveau van de hele plant was hoger onder 15 uur daglengte dan 18 uur daglengte en was ook het hoogst onder spectrum 4 op basis van witte LED's. In alle behandelingen trad enige mate van chlorose op, maar deze was het sterkst naarmate het aandeel verrood in het spectrum hoger was en bij de langere daglengte (18 uur).

Productie werd slechts op basis van 5 m² teeltoppervlak per behandeling en 9 weken oogsten bepaald. Deze data dienen daarom voorzichtig geïnterpreteerd te worden. Onder 15 uur belichting werd de hoogste gemiddelde productie behaald van 0.83 en 0.81 kg/m²/week, bij een lage PSS in behandeling 1 RWBFr PSS 0.75 en 4 WFr PSS 0.75, respectievelijk. Vruchten die nog niet rijp zijn bieden een voorzichtige voorspelling van toekomstige oogsten. In alle behandelingen was deze totale opbrengst hoger bij 15 uur daglengte dan bij 18 uur daglengte.

Conclusie

Concluderend presteerde het gewas beter onder een kortere daglengte van 15 uur dan een langere daglengte van 18 uur, en was het spectrum op basis van witte LED's met PSS 0.75 het beste in termen van huidmondjesgeleidbaarheid, fotosynthese-snelheid, verdamping en opbrengst. Een spectrum op basis van rode LED's met veel verrood en dezelfde PSS 0.75 leidde tot veel chlorose. In de praktijk is dit laatste spectrum ook niet wenselijk vanwege de hoge kosten in aanschaf en elektraverbruik voor het verrode licht in aanvulling op het PAR-spectrum.

Een kortere daglengte en de effecten van een spectrum op basis van een hoger aandeel witte LED's in een jaarrond teelt worden op grotere schaal getoetst in een kasproef in 2021-2022. De temperatuur in het experiment was redelijk hoog (24°C etmaal) en kan hebben bijgedragen aan snelle veroudering van het gewas en het optreden van chlorose. In een volgend experiment in dezelfde klimaatkamers wordt ook het effect van temperatuur getoetst.

Dankwoord

Dit onderzoek is een deelproject binnen het project “Fundamentele kennisontwikkeling LED-belichting voor praktische toepassing in de kas” ondersteund door het programma ‘Kas als Energiebron’, gefinancierd door het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit en Glastuinbouw Nederland, en mede gesponsord door Signify.

Plantise, Enza Zaden en Metazet Formflex leverden plantgoed en materialen voor de hier gerapporteerde proef, waarvoor dank. De leden van de BCO worden bedankt voor hun actieve bijdrage in de projectbesprekingen. Vele geïnteresseerde telers en projectpartners hebben de proef bezocht in Bunnik. Joke Vreugdenhil van Glastuinbouw Nederland wordt bedankt voor het coördineren van de BCO. Dank ook aan Ruud Kaarsemaker voor advies op het gebied van voedingsschema’s. Tevens willen we de onderzoekscoördinatoren Dennis Medema en Leo Oprel van het programma Kas als Energiebron bedanken voor hun steun bij de totstandkoming en de uitvoering van dit project.

Augustus 2022,

Sander Hogewoning

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Jaarrond productie van paprika onder belichting biedt kansen voor een betere marktpositie en arbeidsinvulling in de glastuinbouw, maar is nog niet gangbaar. Omdat het natuurlijk zonlicht in de winter op het laagste niveau ligt en een vruchtdragend gewas veel licht vraagt, is belichting noodzakelijk. Voor een toekomstbestendige jaarrond teelt zal moeten worden belicht met LED vanwege het efficiëntere elektraverbruik dan de traditionele SON-T belichting. Meer in het algemeen is de doelstelling dat de glastuinbouw op termijn geen fossiele brandstof meer verbruikt en bespaart op energie. Toepassing van LED-belichting voor een duurzame paprikateelt met voldoende opbrengst vergt verder onderzoek naar de gewasrespons op licht (spectrum, daglengte en intensiteit). Het standaard rood/blauw LED-spectrum dat tot nu toe veel is toegepast bij met name tomaat blijkt in praktijkproeven problemen op te leveren bij paprika.

In het kader van het programma Kas als Energiebron loopt sinds enige jaren praktijkonderzoek bij het Improvement Centre Delphy (zie o.a. Helmus-Schuddebeurs et al. 2020) en er is een studie uitgevoerd in een klimaatcel bij Plant Lighting (van den Boogaart et al., 2019). Door deze onderzoeken zijn flinke stappen vooruit gemaakt. Echter, het is nog altijd niet echt goed gelukt om een goede strekking van de internodiën te realiseren, althans bij het ras Maveria, dat in onbelichte teelten wel goed strekt (Helmus-Schuddebeurs et al. 2020). De internodiën zijn in de belichte teelt onnatuurlijk kort, waardoor het gewas in de praktijk moeilijk werkbaar is, en de bladkwaliteit vanaf enige oksels onder de kop is matig tot slecht (chlorotisch). Aan het begin van het voorjaar werd ook een lage huidmondjesgeleidbaarheid (gs) gemeten die beperkend is voor fotosynthese. Op grond van de toenemende lichtsom in het voorjaar zou een hogere productie worden verwacht dan werkelijk behaald wordt. Dit terwijl deze problemen niet optreden in dezelfde periode in de traditionele onbelichte teelt. Dat na enige jaren onderzoek de belichte paprikateelt nog niet perfect gaat is op zich niet verbazend: roos en tomaat worden al meer dan 20 jaar jaarrond belicht, en nog steeds wordt voor die gewassen belichtingsonderzoek gedaan.

In een onderzoek bij Plant Lighting resulteerde kunstmatig daglicht in een voldoende goede strekking van een vruchtdragend paprikagewas (van den Boogaart et al., 2019), terwijl verschillende combinaties van LED en hybride belichting tot korte internodiën leidden. Meer verrood licht leidde wel tot meer strekking. Een zonlichtspectrum is erg kostbaar om mee te belichten en daarom moeilijk haalbaar voor in de praktijk. De nu algemeen gebruikte, op rode 660 nm LED's gebaseerde armaturen, vragen aanvulling met veel verrood om enige strekking te realiseren. Dit maakt de LED-armaturen duur en inefficiënt qua elektraverbruik. De vraag is of dit de juiste weg is, of dat er ook andere oplossingen zijn. Het effect van lichtspectrum op internodiumstrekking correleert sterk met de PSS-waarde. PSS is een maat voor de hoeveelheid actief fytochroom ten opzichte van totaal fytochroom in de plant, wat gestuurd

wordt door de spectrale samenstelling van het licht (Sager et al., 1988). De verhouding tussen rood en verrood licht heeft een groot effect op die PSS-waarde. Een lage PSS-waarde geeft aan dat er relatief veel verrood licht in het spectrum zit. Eén manier om de PSS te verlagen via het lichtspectrum is het toevoegen van veel verrood aan een LED-spectrum gebaseerd op voornamelijk rood licht. Mogelijk is een basis van meer wit licht (minder rood licht) veel effectiever om de gewenste gewasrespons te realiseren. Dit kan worden gecombineerd met een iets kortere fotoperiode zodat fytochroom ook op natuurlijke wijze inactief wordt in de nacht (bijvoorbeeld 15 i.p.v. 18 uur). In de proef leek de fotosynthese efficiënter bij 16 uur belichting dan bij 18 uur belichting (van den Boogaart et al., 2019).

Het is belangrijk dat de interactie lichtspectrum-fotoperiode wordt onderzocht. Een langere daglengte zonder fysiologische problemen is het meest wenselijk, omdat dat een rendabele en klimaat-neutrale teelt eenvoudiger maakt. Er kan dan met een lagere intensiteit worden belicht om dezelfde lichtsom te halen als bij een kortere daglengte. Dat scheelt investeringen en vraagt een minder zware elektra-aansluiting. Tevens maakt een langere daglengte de warmtevraag gemakkelijker duurzaam in te vullen (immers een kortere nacht). Echter, als een kortere daglengte uiteindelijk effectiever blijkt om een gezond en productief gewas te kunnen telen, dan is dat ook belangrijk om te weten.

Genetische eigenschappen spelen ook een rol. De moeizame strekking werd gevonden bij het ras Maverá. In de proef bij het Improvement Centre Delphy 2020/2021 is Gina als hoofd ras genomen en dat ras vertoont meer strekking dan Maverá. De sterke afname in huidmondjesgeleidbaarheid iets dieper in het gewas in het voorjaar werd ook in Gina gemeten. In het experiment wat in dit rapport wordt beschreven is juist het ras Maverá gekozen vanwege de moeizame strekking en gevoeligheid voor chlorose in de belichte teelt. Zo kunnen de effecten van lichtspectrum en daglengte goed tot uitdrukking komen.

1.2 Doelstellingen

De volgende doelstellingen zijn geformuleerd:

- Voldoende strekking internodiën onder belichting
- Voorkomen van bladschade en verminderde fotosynthese
- Voldoende productie (volgen van 9 weken oogst)
- Bijdrage aan het ontwikkelen van een efficiënte en betaalbare belichtingsstrategie

Het effect van daglengte en lichtspectrum op bovenstaande gewaseigenschappen wordt onderzocht.

2 Materiaal en methoden

Dit experiment is uitgevoerd in twee klimaatkamers van 20m² netto teeltoppervlakte bij Plant Lighting te Bunnik (Fig. 2.1). Iedere klimaatkamer was opgedeeld in vier zones met een verschillend lichtspectrum. Klimaat werd per zone gemeten. In de twee klimaatkamers is een verschillende daglengte aangehouden van maximaal 15 uur of 18 uur. De lichtsom van de LED bijbelichting (exclusief kunstzonlicht) is gelijk gehouden tussen deze twee daglengte-behandelingen. Er is een achtergrond van kunstzonlicht aangehouden met een oplopende lichtsom waarin winter/ vroeg voorjaar werd nagebootst. Er is 9 weken lang geoogst. In de volgende hoofdstukken wordt materiaal en methode verder toegelicht.



Figuur 2.1. Overzicht van de klimaatcellen van Plant Lighting waar verschillende lichtspectra en daglengtes werden getest. Binnen een klimaatcel werden vier zones aangelegd met ieder een verschillend lichtspectrum. Er werd geteeld op een dubbele goot aan de hoge draad. In de linker klimaatcel werd een maximale daglengte van 15 uur aangehouden en in de rechter klimaatcel 18 uur.

2.1 Plantmateriaal, teeltgegevens en klimaat

Het ras Maveria van Enza Zaden is gebruikt vanwege de eerder in een belichte teelt geconstateerde moeizame strekking van de internodiën en bladschade in het voorjaar. Zaden werden geleverd door Enza Zaden BV. Het ras is een grove rode blokpaprika met een gemiddeld vruchtgewicht van 170-250 g in een traditionele teelt (Teeltrichtlijnen Enza Zaden). Jonge planten werden geleverd door Plantise B.V. Bij de plantenkweker werd er 16 uur per dag bijbelicht met 2750 lux SON-T ($\approx 36 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$). De zaaidatum was 12 oktober 2021 en de proef startte 7 december 2021 met acht weken oude planten die op de mat gingen. Planten

waren vrij van plagen, met volop gevormde bloemknoppen en enkele open bloemen (Fig. 2.2). De gehele teelt is het gewas vrij van plagen gebleven.

Teeltgegevens zijn samengevat in Tabel 2.1. Er is geteeld op een dubbele goot op steunen op de vloer (Metazet Formflex) en een hoge draad met 2 stengels/plant en 6.7 stengels/m². Watergift was met een druppelsysteem zonder recirculatie. Iedere zone binnen de klimaatcel had een apart kraanvak en de drainage kon apart opgevangen worden. De zones zijn afgescheiden met reflecterend folie (MCPET). Voeding werd gedruppeld naar behoefte. Over de hele teelt was er een gemiddeld drainpercentage van 33%; zie Tabel 2.1 voor gemiddelde EC en pH in de drainage. Het voedingsschema was volgens advies van Groen Agro Control (zie Appendix Tabel A1-3). CO₂ werd gedoseerd op 800 ppm in de lichtperiode.

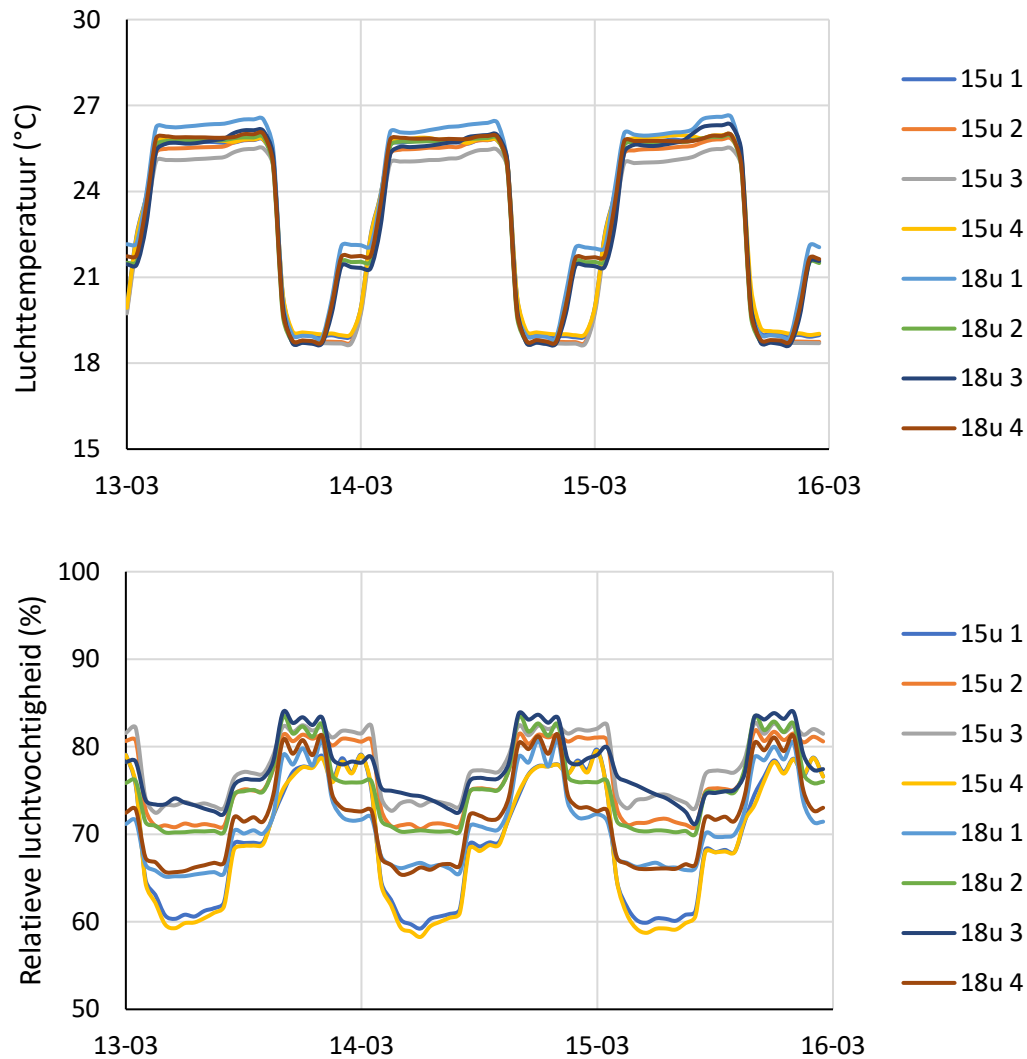


Figuur 2.2. Jonge *Mavera* planten van 8 weken oud bij de start van de proef.

Tabel 2.1. Teeltparameters proef.

Dichtheid	3.3 planten per m ² (2 stengels per plant = 6.7 stengels per m ²)
Substraat	Steenwol mat Grodan Vital 100 x 15 x 8 cm en blok 10 x 10 x 7 cm (l x b x h)
Watergift	Naar behoefte uitgevoerd door aantal keren per dag druppelen.
Voeding	EC = 4.8 mS/cm (vanaf teeltweek 10 3.4 mS/cm) en pH = 5.2
Temperatuur	24°C etmaaltemperatuur en vanaf 7 teeltweken 23°C
RV	70-75% relatieve luchtvochtigheid
CO₂	800 ppm tijdens lichtperiode

Doordat de klimaatcellen in vier zones verdeeld waren, is een klein verschil in klimaat ontstaan. Het verschil in temperatuur tussen de 8 behandelingen was gemiddeld 0.1°C tot 0.3°C (Appendix Tabel A4). Relatieve luchtvochtigheid verschilde 3-6% tussen de behandelingen (Appendix Tabel A5). Het patroon van klimaat over de dag is weergegeven in Fig. 2.3.



Figuur 2.3. Representatief patroon over de dag van temperatuur (bovenste paneel) en relatieve luchtvochtigheid (onderste paneel) bij de verschillende behandelingen.

De belangrijkste handelingen zijn weergegeven in Tabel 2.2. De proef duurde 105 dagen ofwel 15 weken, waarvan zoals eerder gezegd 9 weken oogst.

Tabel 2.2. Tijdslijn proef.

Datum	Dag	Handeling
07-12-2020	0	Planten gearriveerd en direct op de mat gezet
10-12-2020	3	Start bestuiving
18-01-2021	42	Eerste rijpe vrucht geoogst, gewas vanaf deze periode ook in 'balans'
22-03-2021	105	Einde proef, tevens meetmoment gewichten plantorganen

2.2 Belichting

Spectrum belichtingsbehandelingen

Vier LED-lichtbehandelingen zijn uitgevoerd bij zowel 15 uur als 18 uur maximale daglengte (Tabel 2.3). Dimbare multi-4DIM lampen (HortiLED, Hortilux, Monster, Nederland) zijn gebruikt met de kleuren rood, wit, blauw, verrood (RWBFr).

Tabel 2.3. Behandelingen bijbelichting.

Code	Beschrijving
1 RWBFr PSS 0.75	Standaard LED met hoog verrood
2 RWBFr PSS 0.83	Standaard LED met medium verrood (als in kasproef 2019/2020)
3 RWB PSS 0.87	Standaard LED zonder toegevoegd verrood
4 WFr PSS 0.75	Basis witte LED met medium verrood

RWBFr; rood, wit, blauw, verrood. PSS; phytochrome photostationary state (zie tekst voor uitleg).

De lichtintensiteit wordt besproken in het volgende Hoofdstuk (2.3). In alle behandelingen is een aandeel wit licht gebruikt omdat dit prettiger is voor het menselijk oog en het gewas beter is te beoordelen. De PSS waarde is een maat voor de verhouding van actief fytochroom en totaal fytochroom, de fotoreceptor in planten die onder andere gevoelig is voor verrood licht (Sager et al., 1988). Vol zonlicht resulteert in een PSS van 0.72 en puur R/B licht zonder verrood in een PSS van 0.88. Door het witte licht van behandeling 3 daalt de PSS enigszins naar PSS 0.87, ook al is er geen toegevoegd verrood licht.

Spectrum 2 is gekozen met als uitgangspunt de belichting in de kasproef in het Delphy Improvement Centre 2019/2020 (Tabel 2.3). Dit gaat om een spectrum op basis van R/B LED met een intermediaire toevoeging van verrood resulterend in een PSS van 0.83. Met meer verrood en dus een lagere PSS dan 0.83 vindt meer strekking plaats. Eerder is gevonden dat alleen onder een zonlicht spectrum met PSS 0.72 de strekking echt toenam (van den Boogaart et al., 2019). Met een basis van rode LED's moet dan veel verrood worden toegevoegd om die PSS van zonlicht te bereiken. Echter met een basis van witte LED's is er minder rood licht en wordt dezelfde PSS bereikt bij een veel lager aandeel verrood (Tabel 2.4).

De lichtverdeling per kleur in 100 nm-stappen is weergegeven in Tabel 2.4, waarbij PAR (400-700 nm) is gesteld op 100%. Verrood (Fr) licht (700-800 nm) komt daar bovenop. Het spectrum per behandeling is weergegeven in Figuur 2.3.

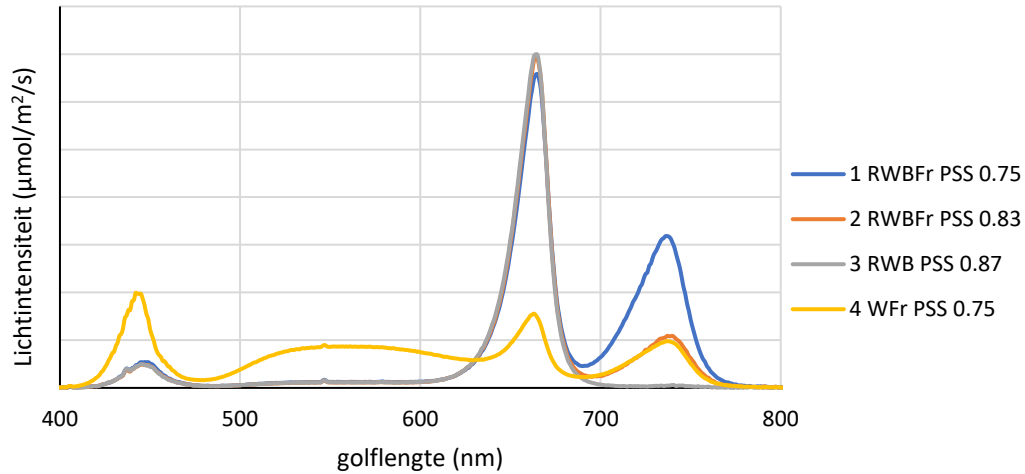
Tabel 2.4. Lichtverdeling per kleur van de behandelingen, waarbij PAR = 100%. Verrood (Fr) komt hier bovenop. Het berekende verbruik is ook vermeld.

Kleur	1 RWBFr PSS 0.75	2 RWBFr PSS 0.83	3 RWB PSS 0.87	4 WFr PSS 0.75
Blauw	7%	7%	7%	27%
Groen	5%	5%	5%	38%
Rood	88%	88%	88%	35%
Verrood	55%	20%	1%	18%
Verbruik (W/m²)	50	36	29	43

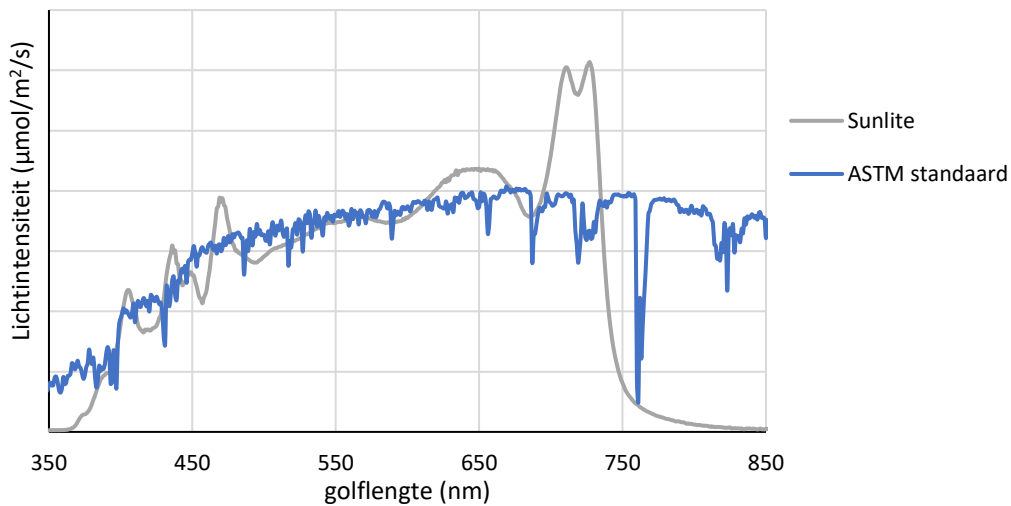
Om een lage PSS van 0.75 te bereiken met een basis van rood LED-licht is wel 55% extra verrood licht nodig. Dit spectrum heeft ook het hoogste berekende verbruik. Wanneer een basis van wit licht wordt gebruikt, is 18% verrood nodig om een PSS van 0.75 te bereiken. Dit laatste is efficiënter qua elektraverbruik aangezien verrood niet bijdraagt aan PAR. Het benodigde verrood komt dus bovenop het verbruik voor PAR belichting. Spectrum 3 wat voornamelijk bestaat uit efficiënte rode LED's heeft het laagste energieverbruik. In het kader van het overkoepelende project (zie subtitel voorpagina) zal ook een rapport worden opgeleverd waarin uitvoeriger wordt ingegaan op deze materie en op LED-technologie.

Achtergrond kunstzonlicht

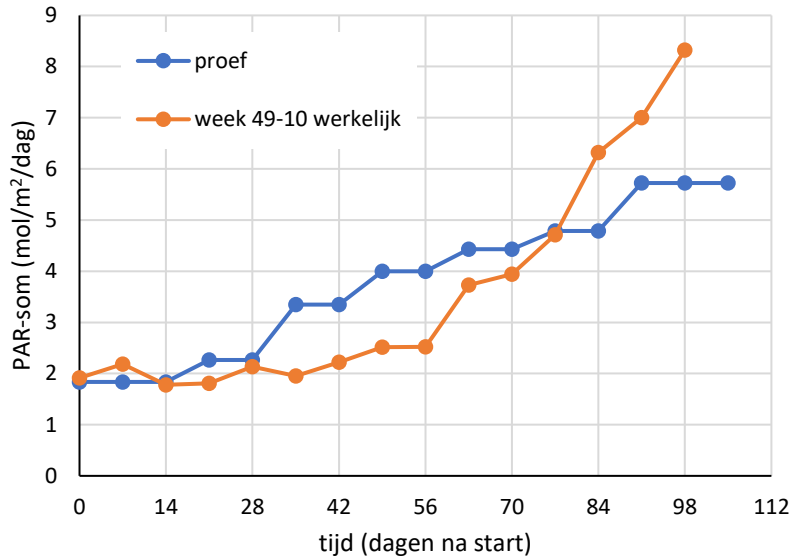
LED lampen zijn gebruikt met een spectrum die het zonlichtspectrum goed benaderen in het bereik 360-740 nm (Sunlite, SLHolland, Breda). Het spectrum is weergegeven in Figuur 2.4. Het verrode deel in het spectrum is dusdanig ingesteld dat er een PSS van 0.72 verkregen is. Doordat het verrood van deze Sunlite lampen boven de 730 al daalt, is er relatief meer verrood nodig van 700-730 nm om een gelijke PSS als in daglicht te bewerkstelligen. De belichtingsduur en intensiteit van het kunstzonlicht is zo afgestemd dat de situatie in de winter deels werd nagebootst. Vanaf week 49 is er in een kas een PAR-som van ongeveer 2 mol/m²/dag. In de proef is er sneller opgeschakeld naar een hogere PAR-som dan in werkelijkheid om de situatie van het voorjaar versneld na te bootsen (Fig. 2.5). Dat is gedaan omdat juist in het voorjaar problemen met lage huidmondjesgeleidbaarheid en fotosynthese werden geconstateerd.



Figuur 2.3. Lichtspectra van de LED bijbelichting. De blauwe, oranje en grijze lijn liggen op elkaar tussen 400 en 700 nm en verschillen in ver verrood (>700 nm).

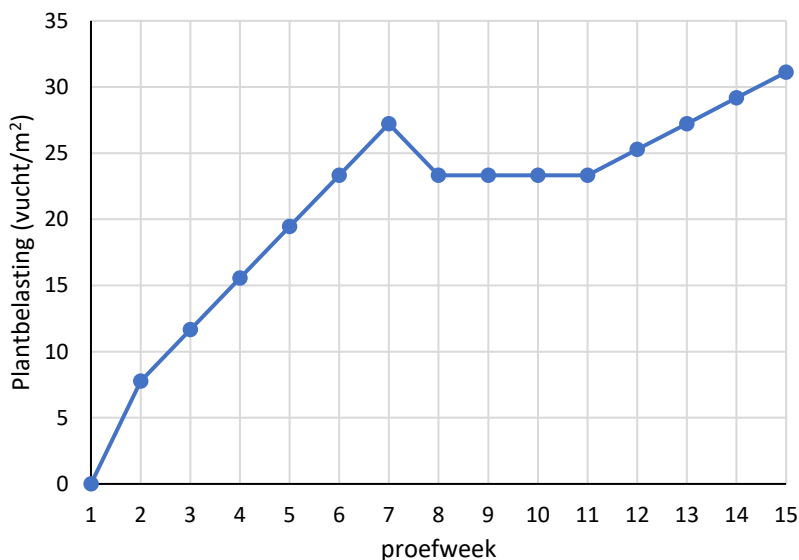


Figuur 2.4. Lichtspectra van achtergrond kunstzonlicht met Sunlite LED lamp (SLHolland, Breda) en de ASTM-standaard voor natuurlijk zonlicht ter referentie. Boven 750 nm absorberen bladeren nauwelijks licht.



Figuur 2.5. Opbouw van PAR-som van (kunst-)zonlicht in deze proef en werkelijk gemiddelde in een kas in de kalenderweken 49-10. Het kunstzonlicht is in deze proef aangeboden met de Sunlite LED lamp. Ter referentie wordt zonlicht weergegeven gemiddeld in Nederland tussen 2000 en 2015, met inachtneming van kastransmissie.

2.3 Model plantbelasting



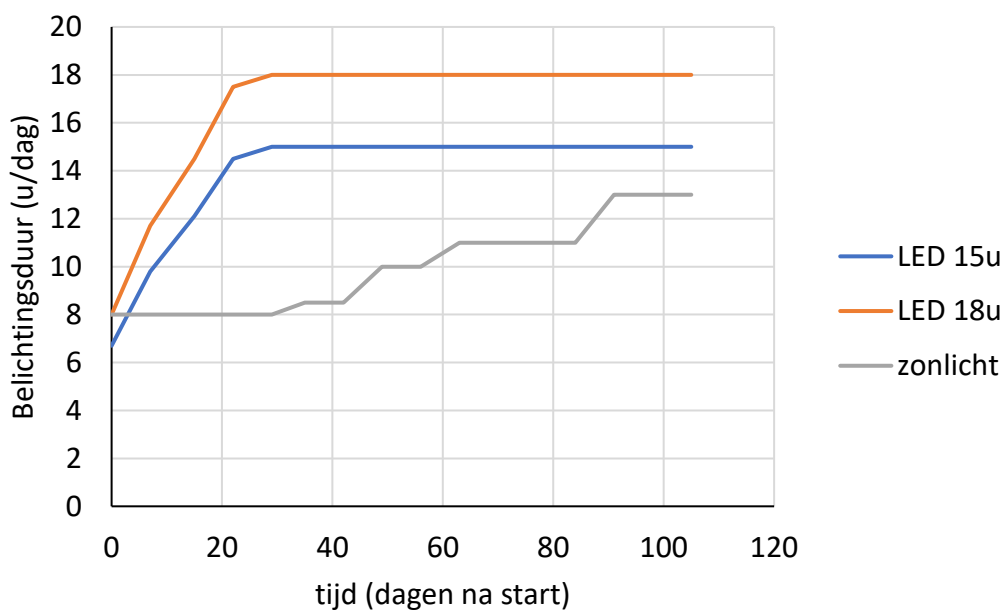
Figuur 2.6. Verwachte plantbelasting op basis van model.

Er is een model gebruikt om de verwachte lichtbehoefte te berekenen op basis van een geplande plantbelasting en diverse parameters als stengeldichtheid, rijpingsduur en assimilatenbehoefte per vrucht. Er waren 6.7 stengels/m² en er werd na de splitsing in iedere oksel een vrucht aangehouden. Als uitgangspunt in het model werd ervan uitgegaan dat steeds 0.5 vrucht per internodium per stengel werd gezet (om en om wel/niet zetting) bij 2 stengels per plant. Vanaf proefweek 12 werd 0.75 vrucht per internodium aangehouden. Er werd verwacht dat er 1.17 internodiën per week werden gevormd (één per zes dagen). De

berekende verwachte plantbelasting nam zo toe tot week 7 bij de start van de oogst (Fig. 2.6). Daarna bleef deze enige weken stabiel en nam weer verder toe. De piek in berekende plantbelasting in proefweek 7 is vanwege de 2 vruchten die aangehouden zijn per plant in internodium 1 na de splitsing (beide stengels een vrucht).

Op grond van de verwachte plantbelasting is een behoefte aan assimilaten berekend en vervolgens de lichtbehoefte. Met aftrek van de PAR-som van het kunstzonlicht werd zo berekend hoeveel uur moest worden bijbelicht met LED licht van bepaalde intensiteit (Fig. 2.7 en Appendix Tabel A6). De in Appendix Tabel A6 weergegeven weegfactor is vanwege de lagere lichtbenuttingsefficiëntie voor assimilatie aan het begin van de teelt, doordat de bladeren het licht nog niet goed onderscheppen. Naarmate de LAI (m^2 blad per m^2 grond) toeneemt, wordt het licht efficiënter benut. De PAR-som in beide klimaatcellen werd gelijk gehouden, dus de lichtintensiteit bij de kortere daglengte was hoger. De intensiteit bij 15 uur daglengte was initieel $218 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ en bij 18 uur daglengte $182 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. De duur en intensiteit van het kunstzonlicht was gelijk in alle acht behandelingen. In Appendix Tabel A6 is te zien dat er gedurende teeltweek 5-7 een hogere lichtbehoefte was op basis van de verwachte plantbelasting dan gerealiseerd kon worden, gegeven de intensiteit belichting en maximale daglengte van 15 en 18 uur. Vanaf 35 dagen na start (proefweek 6) is de lichtintensiteit van LED verhoogd naar $245 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ bij 15 uur daglengte en $210 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ bij 18 uur daglengte.

Belichtingsduur en intensiteit van zonlicht en LED licht gedurende het experiment is weergegeven in Appendix Tabel A7. LED belichting werd altijd een half uur voor het zonlicht uitgeschakeld. Met de toenemende duur van LED belichting werd het moment waarop het aan werd gezet steeds vervroegd, totdat de maximale periode van 15 of 18 uur werd bereikt.



Figuur 2.7 Opbouw in uren belichting van LED-licht (assimilatie-belichting) bij twee daglengtes en gesimuleerd zonlicht gedurende de proef. De belichtingsduur van kunstzonlicht was gelijk in beide daglengte-behandelingen/ klimaatcellen.

2.4 Metingen

De volgende metingen zijn uitgevoerd:

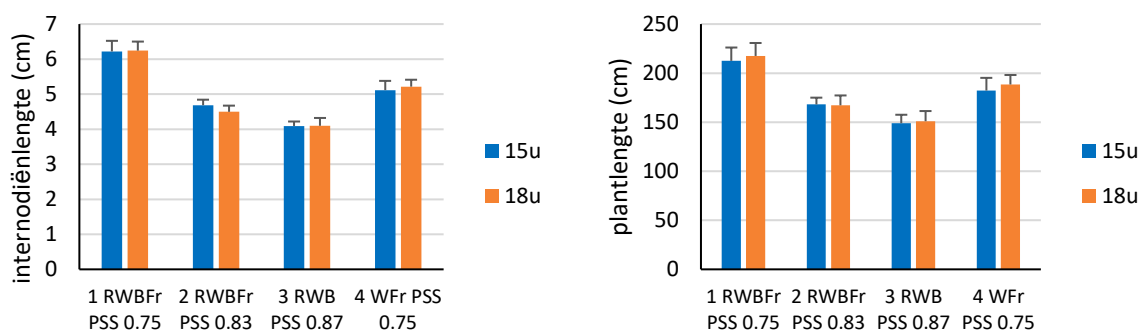
- Luchttemperatuur werd gedurende de teelt gemonitord: streven was om de etmaaltemperatuur zoveel mogelijk gelijk te houden tussen de verschillende behandelingen.
- Er zijn minimaal wekelijks vruchttellingen gedaan, en een teveel aan gezette vruchten werd gedund om te voldoen aan het teeltplan (zie Appendix Tabel A6).
- Oogst (aantal vruchten en vruchtgewicht) is bijgehouden. Bij de laatste oogst zijn behalve rijpe vruchten ook alle nog aanwezige vruchten geoogst in de categorieën volgroeid met kleur, volgroeid groen en onrijp.
- Verdamping op gewasniveau is regelmatig gemeten door het volume drainage af te trekken van de totale watergift per etmaal per behandeling. Al het water wat wordt gegeven verdwijnt door verdamping en een klein deel wordt opgenomen in het gewas, hetgeen hier verwaarloosd is, en de rest is drainage.
- Bladtemperatuur
- Plantlengte is meerdere malen gemeten met 6-12 herhalingen.
- Fotosynthese is gemeten in de periode van 59-75 dagen na start en nogmaals 99-102 dagen na start.
 - De metingen zijn uitgevoerd met de Li-6800 fotosynthesemeter (Li-Cor, USA), waarbij CO₂ was ingesteld op 800 ppm, lichtintensiteit 300 μmol/m²/s en de bladtemperatuur op 27.5°C.
 - Er is gemeten aan onbeschaduwde, volgroeide bladeren boven in het gewas, oksel 1-2 onder de kop, en lager in het gewas, oksel 5-7 onder de kop.
 - CO₂ opname (netto fotosynthesesnelheid), huidmondjesgeleidbaarheid en ΦPSII, dat is de efficiëntie van de lichtreactie van fotosysteem II, zijn op deze manier bepaald.
- Bij het beëindigen van de proef (dag 105) zijn bladeren geoogst waarvan oppervlak, versgewicht en drooggewicht is gemeten. Er zijn bladeren geplukt op een hoogte van 5-7 oksels onder de kop en op 10-12 oksels onder de kop. Bladeren zijn gefotografeerd om verschillen in bladkleur/ chlorose vast te leggen. Stengels zijn ook gefotografeerd. De lengte van de internodiën en het aantal is gemeten in de bovenste 50 cm van de stengel en in de rest van de stengel van boven af tot aan de splitsing. De stengeldiameter is bepaald op 50cm onder de kop tussen twee oksels in.
- Nutriëntenanalyses zijn uitgevoerd op blad, de voedingsoplossing en de drainage van iedere behandeling tussen dag 88-92 na start van de proef.

3 Resultaten

3.1 Strecking en morfologie

De grootste internodiënlengte en plantlengte werd behaald bij spectrum 1 RWBFr PSS 0.75 met het grootste aandeel verrood (Fig. 3.1 en Tabel 3.1 kolom "totaal"). Deze behandeling leidde tot langere internodiën dan spectrum 4 WFr PSS 0.75 op basis van witte LED's, ook al was PSS dus gelijk tussen deze twee behandelingen. De gemiddelde internodiënlengte was 6.2 cm in spectrum 1 en 5.1 cm in spectrum 4 bij 15 uur daglengte. Consistent met de verwachting was de lengte lager bij referentiespectrum 2 RWBFr PSS 0.83 en het laagst bij spectrum 3 RWB PSS 0.87 zonder verrood. Planten in spectrum 1 bij beide daglengtes waren zelfs te gerekt en het gewas was vrij open. Spectrum 4 presteerde het beste qua morfologie volgens bezoekende telers. Het gewas was goed werkbaar en de strekking van de internodiën was voldoende. Het is bekend dat PSS van grote invloed is op strekkingsgroei, met name bij jonge planten, maar zoals hier blijkt ook bij een vruchtdragend gewas. Geringere strekking onder spectrum 4 dan spectrum 1 bij dezelfde PSS is waarschijnlijk te verklaren uit het hogere percentage blauw licht in spectrum 4, wat strekking remt.

Daglengte (15 of 18 uur) had geen effect op de strekking van de internodiën.



Figuur 3.1. Gemiddelde internodiënlengte vanaf de splitsing en plantlengte bij einde experiment (dag 105). De daglengte was 15 uur (blauwe balken) of 18 uur (oranje balken). Data zijn gemiddelden en verticale balken geven de standaarddeviatie weer; $n = 12$, behalve spectrum 1: $n = 6-8$. Enkele stengels waarvan de kop was verwijderd (spectrum 1) zijn niet meegenomen in de analyse.

Internodiën in de bovenste 50 cm van de plant waren ca 1 cm korter dan het algehele gemiddelde. De internodiën in het deel van de stengel daaronder tot aan de splitsing waren juist circa 1 cm langer, zoals ook was te verwachten aangezien de jongere onbelaste plant sneller strekt. De behandelingseffecten zoals hierboven beschreven voor het geheel waren vergelijkbaar wat betreft deze stengelsegmenten (Tabel 3.1).

Tabel 3.1. Internodiënlengthe in twee stengelsegmenten boven de splitsing, aantal internodiën vanaf de splitsing en totale plantlengthe (gemiddelden \pm SD) bij einde experiment (dag 105). Data zijn gemiddelden en standaarddeviatie; $n = 12$, behalve spectrum 1: $n = 6-8$.

daglengthe	Spectrum	internodiënlengthe (cm)			# internodiën	lengthe (cm)
		top 50 cm	rest	totaal		
15 uur	1 RWBFr PSS 0.75	4.5 \pm 0.29	7.3 \pm 0.46	6.2 \pm 0.30	29.3 \pm 1.28	212.5 \pm 13.6
	2 RWBFr PSS 0.83	3.6 \pm 0.29	5.8 \pm 0.33	4.7 \pm 0.16	29.7 \pm 1.23	168.1 \pm 6.9
	3 RWB PSS 0.87	3.1 \pm 0.16	5.3 \pm 0.43	4.1 \pm 0.13	29.3 \pm 1.67	148.9 \pm 8.7
	4 WFr PSS 0.75	4.0 \pm 0.17	5.9 \pm 0.36	5.1 \pm 0.26	29.5 \pm 1.98	182.3 \pm 12.9
18 uur	1 RWBFr PSS 0.75	4.8 \pm 0.23	7.0 \pm 0.36	6.2 \pm 0.26	30.0 \pm 1.55	217.5 \pm 13.2
	2 RWBFr PSS 0.83	3.7 \pm 0.24	5.2 \pm 0.13	4.5 \pm 0.18	30.3 \pm 1.07	167.2 \pm 10.1
	3 RWB PSS 0.87	3.2 \pm 0.21	5.0 \pm 0.23	4.1 \pm 0.22	30.3 \pm 1.96	151.0 \pm 10.4
	4 WFr PSS 0.75	3.9 \pm 0.25	6.2 \pm 0.26	5.2 \pm 0.20	30.3 \pm 1.72	188.4 \pm 9.7

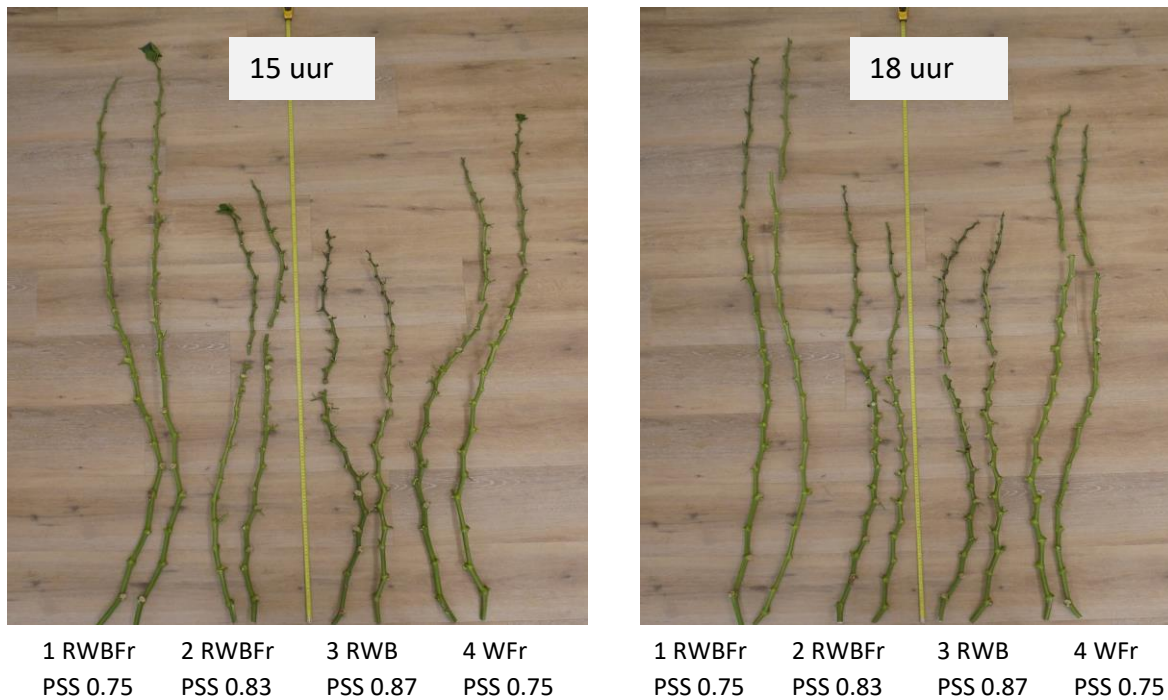
rest; stengel vanaf splitsing tot 50cm onder de kop.

Het totaal aantal internodiën was circa 30. Het aantal was gemiddeld 0.8 hoger bij 18 uur daglengthe dan bij 15 uur daglengthe. Er was dus een (zeer) klein verschil tussen daglengthes en er was geen verschil tussen behandelingen (Tabel 3.1). Verschillen in lengthe waren dus het gevolg van verschillen in strekking van de internodiën. Het aantal internodiën dat gedurende de 15 weken teelt afgesplitst is, is hoog. Bij start waren er ± 3 internodiën per stengel (zie Figuur 2.2), dus er zijn ± 26 internodiën bijgegroeid. Dat is 1.73 per week (1 per 4 dagen), beduidend meer dan de 1.17 per week (1 per 6 dagen) waarmee gerekend was (zie hoofdstuk 2.3). Dat heeft consequenties voor het te wensen zettingspatroon om in balans te blijven met de assimilatie gegeven het beschikbare licht.

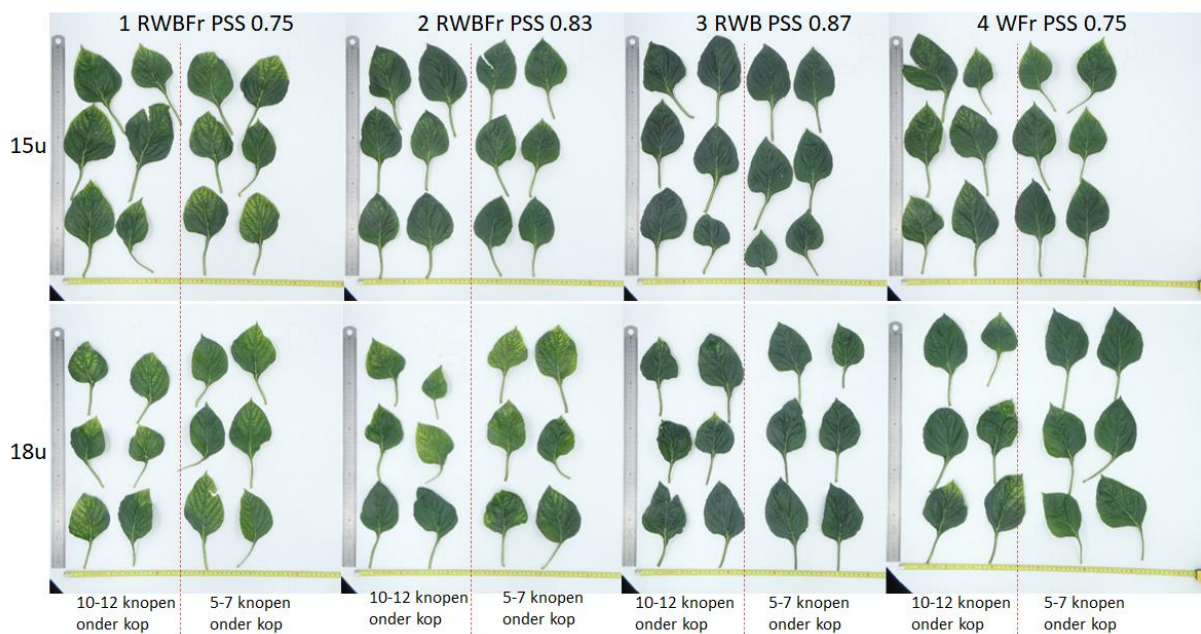
Het spectrum zonder verrood, 3 RWB PSS 0.87, viel op door de erg korte internodiën en de rode verkleuring van de stengels door vorming van anthocyaan (Fig. 3.2). Met name de onderste internodiën in 1 RWBFr PSS 0.75 waren extreem gestrekt.

Overzichtsfoto's van het gewas aan het einde van het experiment zijn te zien in Fig. 3.3 (volgende pagina). Het gewas in behandeling 1 RWBFr PSS 0.75 bij 18 uur daglengthe was zeer open en kaal en vertoonde veel chlorose. Het gewas onder spectrum 3 RWB PSS 0.87 bleef juist gedrongen en de bladeren waren opvallend donkergroen. Onder spectrum 4 WFr PSS 0.75 bleef het gewas er redelijk goed uitzien, vooral bij 15 uur daglengthe.

Over het algemeen was er meer chlorose bij meer verrood in het spectrum en bij de langere daglengthe (Fig. 3.4). Vooral in behandeling 1 RWBFr PSS 0.75 was chlorose te zien bij 18 uur daglengthe. In de behandelingen 2 RWBFr PSS 0.83 en 4 WFr PSS 0.75 was ook chlorose te zien, met name bij 18 uur daglengthe. In het spectrum zonder verrood 3 RWB PSS 0.87 waren bladeren donkergroen en was er minder chlorose dan in andere behandelingen, bij beide daglengthes.



Figuur 3.2. Foto's van twee representatieve stengels (vanaf de splitsing) per behandeling aan het einde van het experiment (dag 105). De daglengte was 15 uur (foto links) of 18 uur (foto rechts).



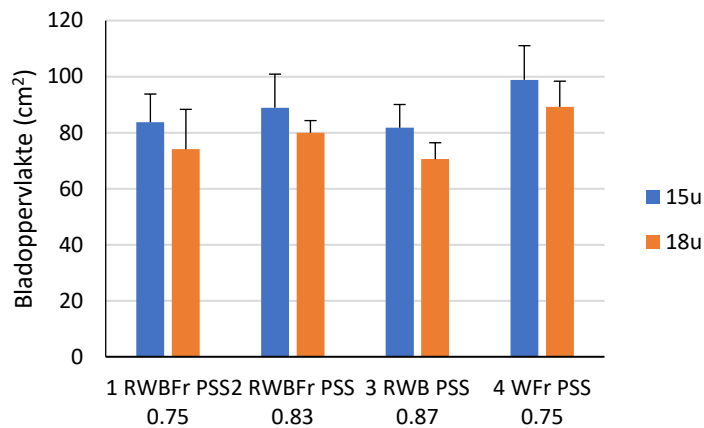
Figuur 3.4. Foto's van representatieve bladeren op twee hoogtes in het gewas aan het einde van het experiment (dag 105). In iedere foto zijn de zes bladeren links van 10-12 knopen onder de kop van het gewas en de zes bladeren rechts van 5-7 knopen onder de kop van het gewas.

De sterke chlorose van het blad is een teken van veroudering. Met 8 weken opkweek en 15 weken teelt was het gewas 23 weken oud. Een commerciële onbelichte teelt duurt ± 45 weken. Het optreden van chlorose ook op een positie van maar 5-7 oksels onder de kop op deze leeftijd is dus een veel snellere veroudering dan in de traditionele teelt optreedt.



Figuur 3.3. Overzicht van het gewas aan het einde van het experiment (dag 105). Bij 15 uur daglengte is het blad minder chlorotisch dan bij 18 uur daglengte.

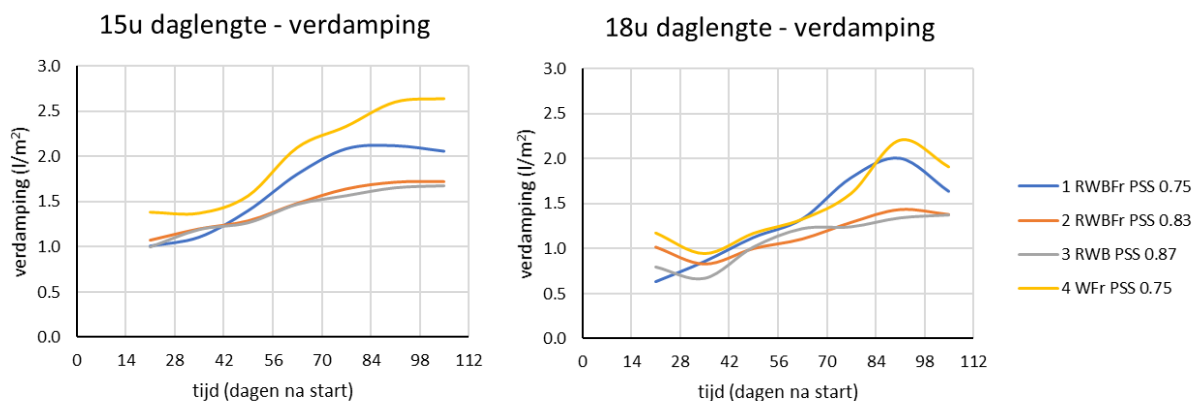
Bladeren hadden een iets groter oppervlak bij het spectrum 4 WFr PSS 0.75 dan andere behandelingen. Ook was er een groter oppervlak van het blad onder 15 uur belichting dan onder 18 uur bij alle behandelingen (Fig. 3.5). De verschillen in bladoppervlakte tussen de twee uitersten zijn fors (40%). Vers- en drooggewichten lieten een vergelijkbaar patroon zien, en (dus) het bladgewicht per oppervlakte blad (LMA) verschilde nauwelijks tussen de behandelingen; zie bladparameters in detail in Appendix Fig. A1. Het percentage drooggewicht van het blad was met $\pm 12\%$ in geen van de behandelingen opvallend hoog.



Figuur 3.5. Gemiddelde oppervlakte per blad. Data zijn gemiddelden en verticale balken geven de standaarddeviatie weer; $n = 12$. Bladeren zijn bemonsterd op twee gewashoogtes: 5-7 oksels onder de kop en 10-12 oksels onder de kop. Voor data per gewashoogte zie Appendix Fig. A1.

3.2 Verdamping en fotosynthese

De verdamping op basis van gift en drainage verschilde duidelijk tussen behandelingen (Fig. 3.6). Er was een hogere verdamping bij 15 uur dan bij 18 uur daglengte. Spectrum 4 WFr PSS 0.75 bij 15u daglengte resulteerde in de hoogste verdamping, tot meer dan 2.5 l/m²/dag in de laatste weken van het experiment.



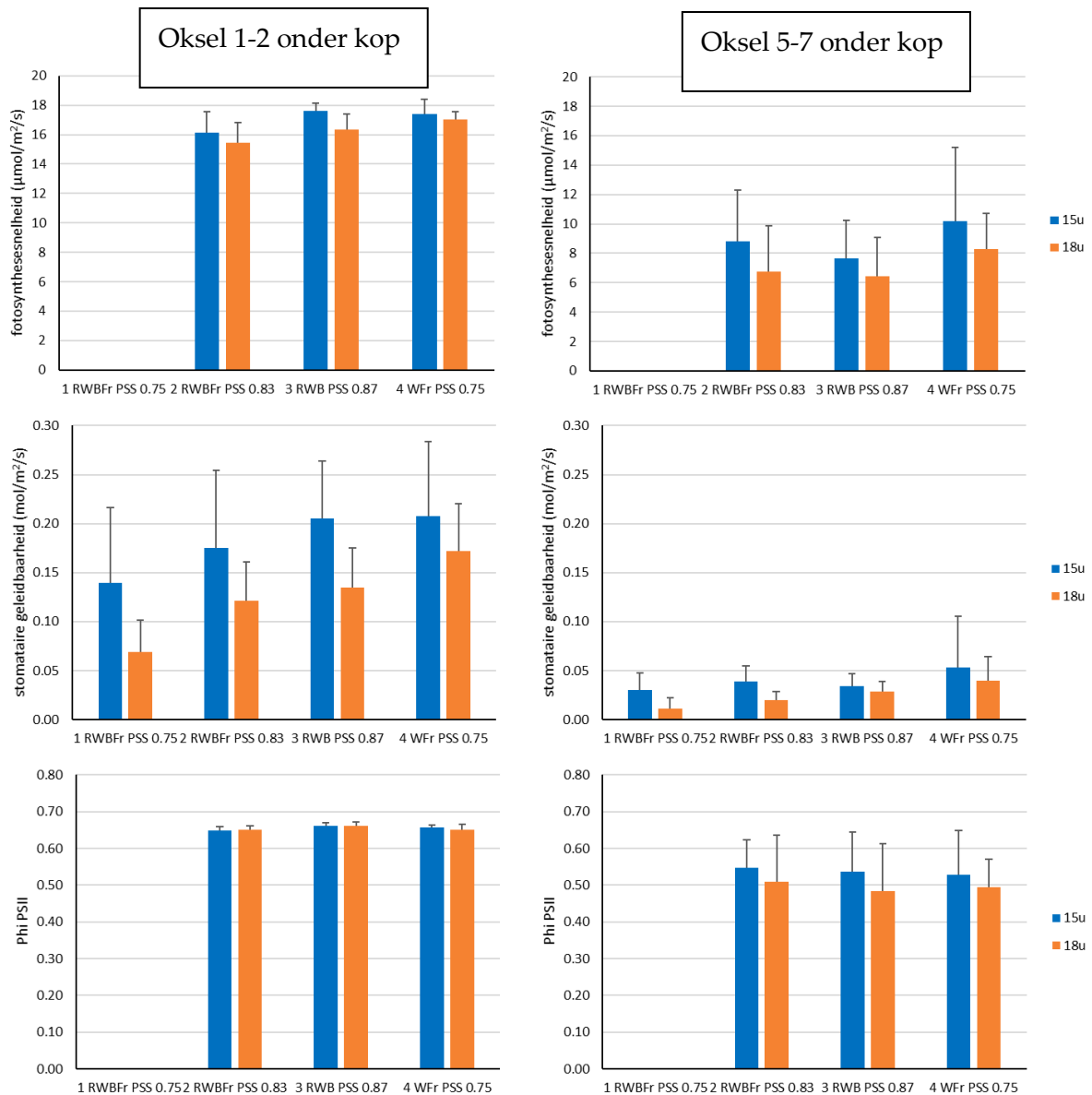
Figuur 3.6. Verdamping op basis van watergift en drainage per etmaal in l/m²/d. Data zijn gemiddeld over een periode van 2 weken waarin steeds 3 metingen plaatsvonden.

De huidmondjesgeleidbaarheid (g_s) is een belangrijke factor om de verschillen in verdamping te kunnen verklaren. Onder 15 uur was de g_s opvallend hoger dan onder 18 uur in de kop van het gewas (Fig. 3.7). Niet veel dieper in het gewas (slechts 5-7 oksels onder de kop) was g_s over het algemeen een stuk lager. De fotosynthese-snelheid was navenant lager. Eerder is ook waargenomen dat g_s sterk was verminderd bij paprika onder belichting in de winter en ook nog aan het begin van het voorjaar in maart (zie Inleiding). G_s was het hoogst bij spectrum 4 en 15 uur daglengte, de behandeling met de hoogste verdamping. Metingen toonden ook een groter verschil in temperatuur aan tussen blad en lucht bij spectrum 4 dan bij de andere spectra (Appendix Fig. A4). Dit effect leek sterker bij 15 uur daglengte dan bij 18 uur daglengte. De lagere bladtemperatuur is het gevolg van de hogere verdampingssnelheid, wat een koelend effect op het blad heeft. Bij een sterke verlaging van g_s wordt zowel minder waterdamp als CO_2 uitgewisseld tussen blad en omgeving en kan de interne CO_2 -concentratie beperkend worden voor fotosynthese. Een vuistregel is dat $g_s < 0.1 \text{ mol/m}^2/\text{s}$ beperkend wordt bij een lichtintensiteit van ca $200 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$.

Echter, g_s kwam niet in alle gevallen overeen met verdamping in l/m^2 . Zo werd de laagste g_s gemeten bij spectrum 1. Gewasverdamping is echter nooit alleen te relateren aan g_s , hierin moeten bladoppervlak, openheid van het gewas, en netto energietoevoer naar het gewas ook betrokken worden (zie uitleg energiebalans en verdamping in Trouwborst et al 2019 en 2022). Een dicht gedrongen gewas zoals onder spectrum 3 RWB PSS 0.87 zal minder luchtbeweging toelaten dan een zeer open gewas zoals onder spectrum 1 RWBFr PSS 0.75, wat ook tot verschillen in verdamping kan leiden. Laatstgenoemde behandeling was ook rijker in stralingsenergie dan de andere behandelingen door het hoge aandeel verrood (55%) bovenop het PAR (Tabel 2.4).

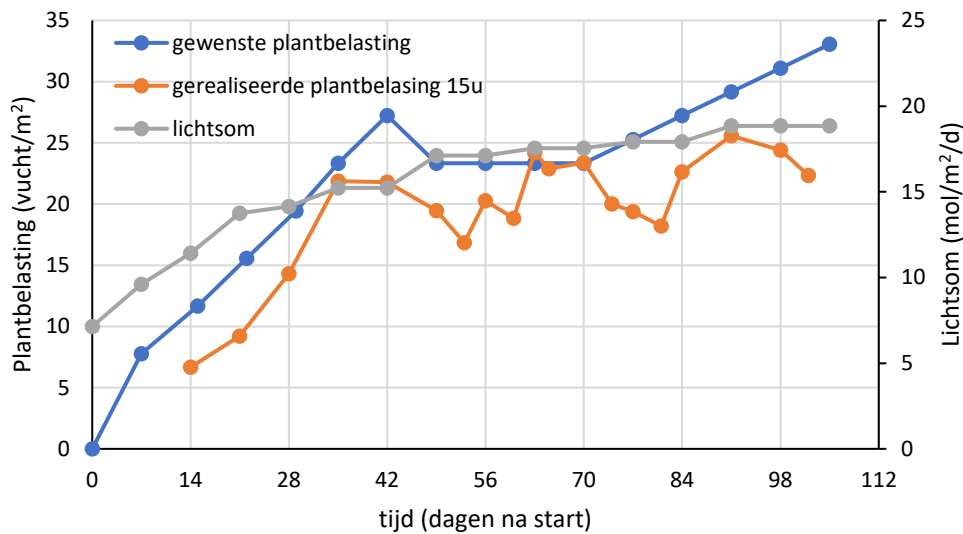
Fotosynthesesnelheid verschilde weinig tussen behandelingen in de kop van het gewas, maar was wel iets hoger bij 15 uur dan bij 18 uur daglengte. Wat dieper in het gewas werden de hoogste waarden bereikt in behandeling 4 WFr PSS 0.75 bij 15 uur daglengte (Fig. 3.7). Niet alleen was de gemiddelde fotosynthesesnelheid iets hoger dan in andere behandelingen, maar zoals te zien aan de hoogte van de standaarddeviatie hadden enkele bladeren hoge waarden ($\sim 15 \mu\text{mol } CO_2/m^2/s$) die in de buurt kwamen van die in de kop van het gewas. Ondanks de betere verdamping bij kortere daglengte en behandeling 4 WFr PSS 0.75, blijft het opvallend dat bij bladeren ter hoogte van slechts 5-7 oksels onder de kop in alle behandelingen sprake is van een zeer lage g_s die de fotosynthese beperkt.

Bij bladeren 1-2 oksels onder de kop was er geen effect van behandeling op Φ_{PSII} , de efficiëntie van de lichtreactie van fotosysteem II. Bij bladeren 5-7 oksels onder de kop was er een kleine verlaging van Φ_{PSII} bij 18 uur daglengte t.o.v. 15 uur daglengte. De waarden van Φ_{PSII} rond 0.5 waren niet beperkend voor fotosynthese, terwijl de forse verlaging van g_s wel beperkend was voor fotosynthese, vooral op de hoogte van 5-7 oksels onder de kop (en ongetwijfeld ook dieper in het gewas).



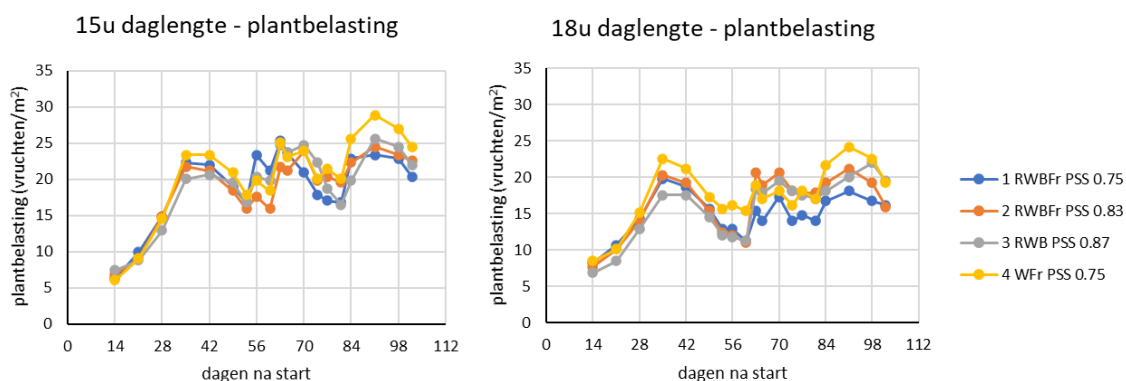
Figuur 3.7. Fotosynthese-parameters op twee hoogtes in het gewas op teeltdag 59-65 (oksel 1-2 onder kop) en teeltdag 73-75 (oksel 5-7 onder kop). De daglengte was 15 uur (blauwe balken) of 18 uur (oranje balken). Data voor spectrum 1 zijn weggelaten omdat de metingen onder een rood/blauw spectrum zijn gedaan terwijl de planten zijn ontwikkeld onder een spectrum met een hoog aandeel verrood. Door acclimatie van het fotosynthese-apparaat aan dit spectrum geven fotosynthesemetingen onder een rood/blauw spectrum een vertekend beeld. Fotosynthese is gemeten bij $300 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ en 800 ppm CO_2 . Data zijn gemiddelden en verticale balken geven de standaarddeviatie weer; $n = 10$.

3.3 Plantbelasting en opbrengst



Figuur 3.8. Geplande plantbelasting, gemiddelde gerealiseerde plantbelasting bij 15 uur daglengte, en totale gerealiseerde lichtsom gedurende het experiment.

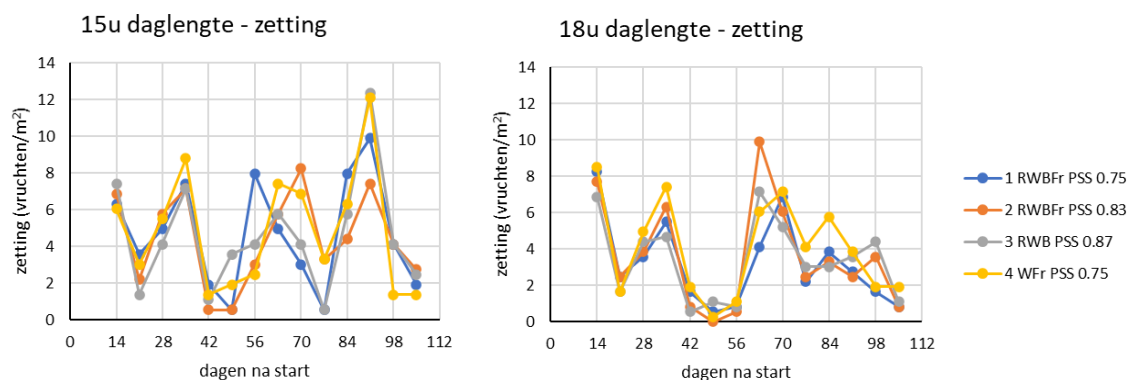
De gemiddelde plantbelasting (aantal vruchten per m²) was op meerdere momenten wat lager dan de maximale plantbelasting op basis van de modelberekening (Fig. 3.8). In het figuur is de gemiddelde plantbelasting over de vier behandelingen bij 15 uur daglengte weergegeven. De behaalde plantbelasting was bij 18 uur daglengte over het algemeen lager dan bij 15 uur bij alle vier de lichtspectra (Fig. 3.9). Planten in spectrum 4 WFr PSS 0.75 realiseerden een relatief hoge plantbelasting, bij zowel 15 als 18 uur daglengte, met name in de laatste weken van het experiment. De plantbelasting in spectrum 4 lag hoger dan bij het referentiespectrum 2 RWBFr PSS 0.83. In de eerste weken was de zetting iets lager onder spectrum 3 RWB PSS 0.87 bij beide daglengtes, mogelijk als gevolg van de afwezigheid van verrood licht. Bij 18 uur daglengte bleef de plantbelasting consistent achter in spectrum 1 RWBFr PSS 0.75 vanaf ongeveer 60 dagen na start. Dit was de behandeling die de meeste chlorose liet zien.



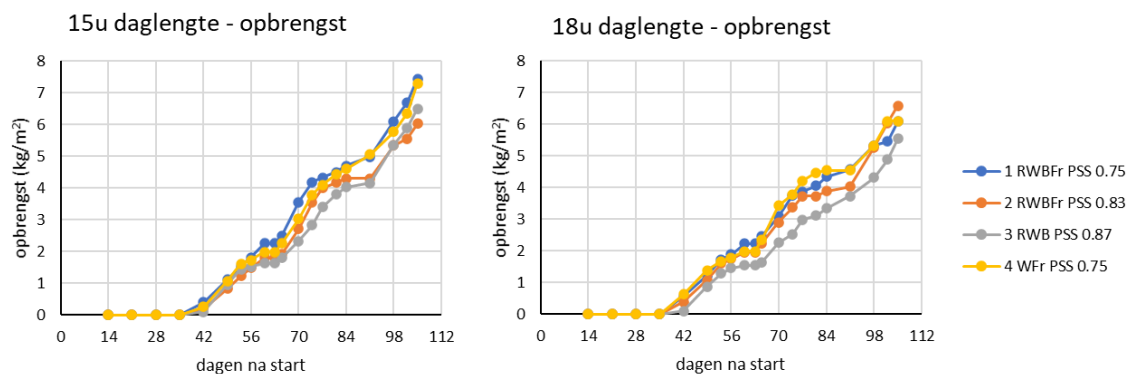
Figuur 3.9. Plantbelasting per behandeling bij 15 uur daglengte (links) en 18 uur daglengte (rechts) bij de vier spectra LED-belichting.

Op 91 dagen na start van het experiment was de hoogste plantbelasting ~ 30 vruchten/m² bij spectrum 4 WFr PSS 0.75 bij 15 uur daglengte en de laagste plantbelasting was ~ 18 vruchten/m² bij spectrum 1 RWBFr PSS 0.75 bij 18 uur daglengte (Fig. 3.9).

De lagere plantbelasting dan gepland hield verband met een flink teruglopende vruchtzetting meerdere malen tijdens het experiment (Fig. 3.10). Het is bekend dat paprika onregelmatig vruchten zet, waarbij een golf van zetting gevolgd wordt door een periode met minder zetting. Verder viel het verschil in plantbelasting tussen de twee daglengtes te verklaren door een duidelijk hogere zetting in alle behandelingen bij 15 uur dan bij 18 uur daglengte met name rond 56 en 84-91 dagen na start. Bij 18 uur werden niet meer dan 4 vruchten/m² gezet op dag 91 terwijl bij 15 uur toen tot wel 12 vruchten/m² werden gezet. Vooral later in het experiment onder een steeds toenemende lichtsom leek de langere daglengte van 18 uur dus nadelig, ook al viel ook onder 15 uur daglengte de zetting nog te verbeteren.



Figuur 3.10. Zetting per behandeling bij 15 uur daglengte (links) en 18 uur daglengte (rechts). Bij hoge zettingspieken is een deel van de vruchten na zetting gedund.



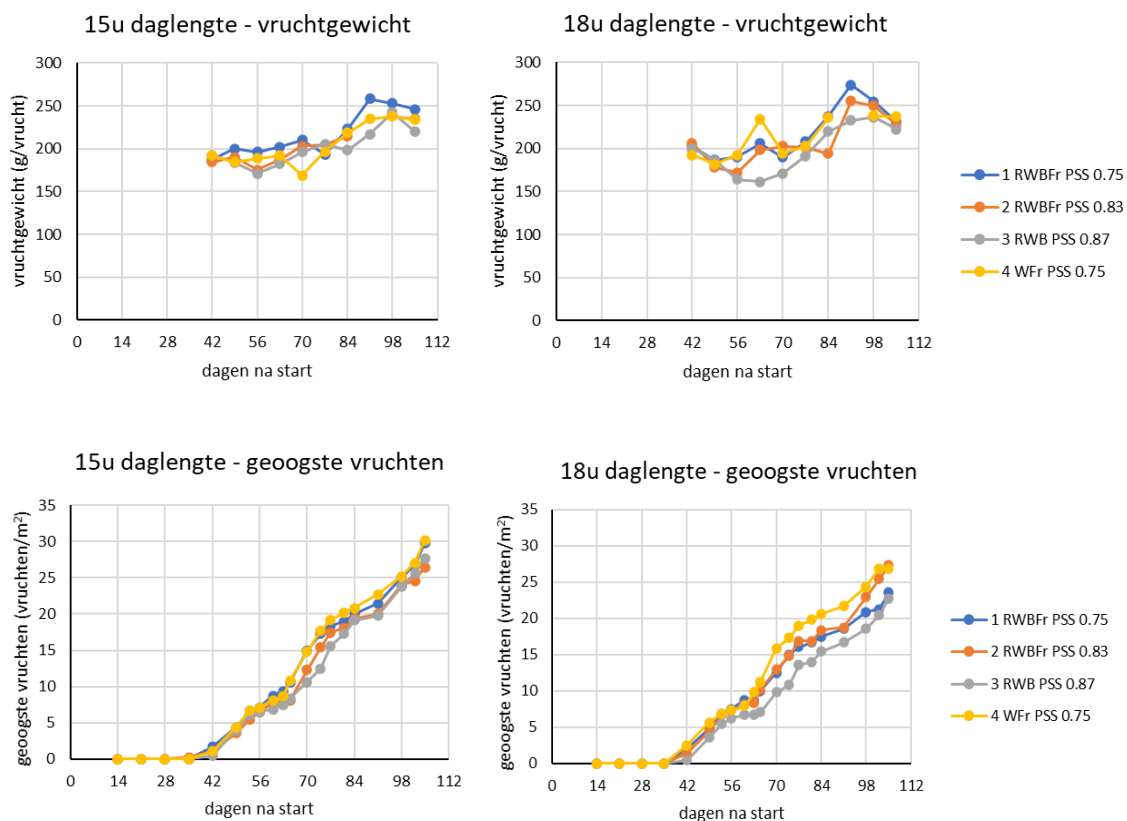
Figuur 3.11. Cumulatieve opbrengst van rood geogste vruchten in kg/m² bij 15 uur daglengte (links) en 18 uur daglengte (rechts) bij de vier spectra LED-belichting.

De cumulatieve opbrengst van rode vruchten was onder 15 uur daglengte hoger dan onder 18 uur daglengte (Fig. 3.11). De opbrengst bleef wat achter onder behandeling 3 RWB PSS 0.87 bij beide daglengtes, maar sterker bij 18 uur daglengte. Dat duidt op een positief effect van verrood licht op de opbrengst van rode vruchten, wat ontbrak in dit spectrum, maar aanwezig was in alle andere spectra. Zowel spectrum 1 als 4 onder 15 uur daglengte behaalden een hogere opbrengst dan spectrum 3 en 2. De gemiddelde opbrengst per week was het hoogst bij

spectrum 1 en 4 met PSS 0.75 bij 15 uur met 0.83 kg/m² en 0.81 kg/m² respectievelijk (Tabel 3.2). In drie van de vier spectra was de gemiddelde opbrengst lager onder 18 uur dan 15 uur daglengte, met uitzondering van spectrum 2 RWBFr PSS 0.83.

Tabel 3.2. Gemiddelde opbrengst van rode vruchten per behandeling over de hele duur van het experiment.

Behandeling	Gemiddelde opbrengst (kg/m ² /week)	
	15 uur	18 uur
1 RWBFr PSS 0.75	0.83	0.68
2 RWBFr PSS 0.83	0.67	0.73
3 RWB PSS 0.87	0.72	0.62
4 WFr PSS 0.75	0.81	0.69

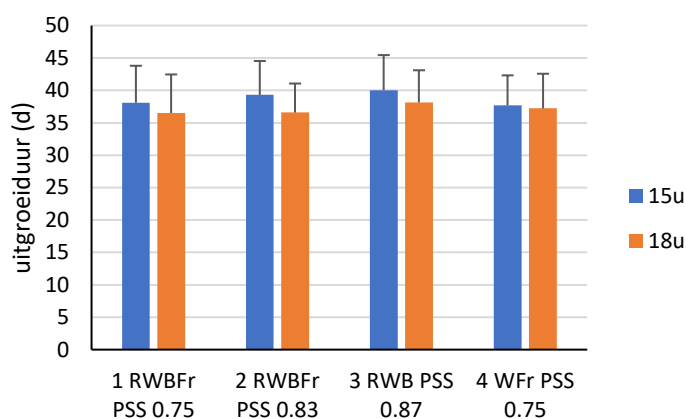


Figuur 3.12. Gemiddeld vruchtgewicht per behandeling (boven) en aantal rood geoogste vruchten (onder) bij 15 uur daglengte (links) en 18 uur daglengte (rechts) bij de vier spectra LED-belichting.

Vruchtgewichten lagen in het begin van de oogstperiode rond de 200 g en stegen naar ongeveer 240 g rond 90 dagen na start van het experiment (Fig. 3.12). De vruchtgewichten waren soms wat lager onder spectrum 3 RWB PSS 0.87, bij 18 uur daglengte. Het aantal geoogste vruchten was in die behandeling ook het laagst. Over het algemeen waren vruchten van goede kwaliteit (Fig. 3.13). Er was een relatief hoog vruchtgewicht bij 15 uur daglengte en spectrum 1 RWBFr PSS 0.75 vanaf 84 dagen na start, wat mede de relatief hoge opbrengst van rode vruchten verklaarde.



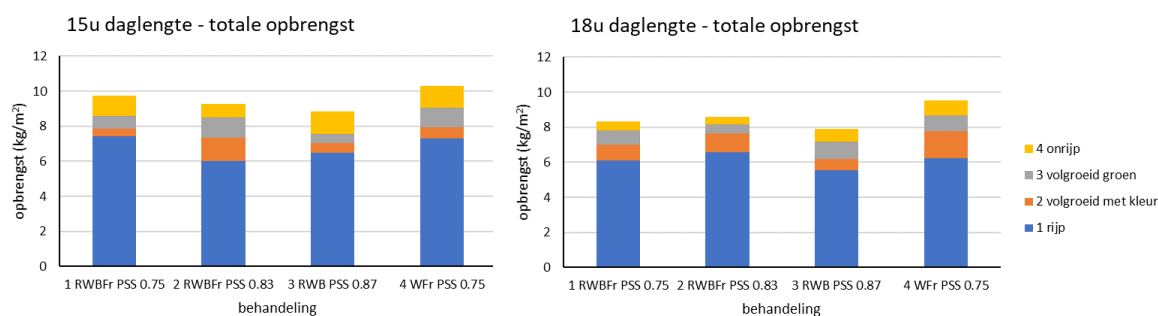
Figuur 3.13. Impressie van geogoste vruchten. De meeste vruchten waren van goede kwaliteit.



Figuur 3.14. Uitgroeiduur van vruchten per behandeling bij 15 uur daglengte (blauwe balken) en 18 uur daglengte (oranje balken). Data zijn gemiddelden met standaarddeviatie; $n = 330-365$.

De gemiddelde uitgroeiduur van de vruchten varieerde tussen gemiddeld 36 en 40 dagen en neigde gemiddeld 1 tot 2 dagen sneller te zijn bij 18 uur daglengte (Fig. 3.14). De gemiddelde uitgroeiduur was het traagst bij behandeling 3 RWB PSS 0.87. De variatie tussen vruchten was echter aanzienlijk.

Omdat de proef na 15 weken teelt is beëindigd, zijn de vruchten die in de laatste 5 tot 6 weken gezet zijn niet rijp geogst. Vruchten die nog niet rijp zijn bieden een voorzichtige voorspelling van toekomstige oogsten. Onder spectrum 4 WFr PSS 0.75 bij 15 uur daglengte werd het grootste gewicht geogst wanneer ook onrijpe vruchten en volgroeide maar niet oogstrijpe vruchten werden meegeteld (Fig. 3.15 en Tabel 3.3). In alle behandelingen was deze totale opbrengst hoger bij 15 uur daglengte dan bij 18 uur daglengte. Te zien is dat onder 15 uur daglengte de totale opbrengst bij spectrum 4 10.3 kg/m² was terwijl die bij spectrum 1 9.7 kg/m² was. Bij een daglengte van 18 uur werden de verschillen tussen deze twee spectra nog wat groter (Tabel 3.3).



Figuur 3.15. Totale opbrengst aan het eind van het experiment inclusief onrijpe vruchten bij 15 uur daglengte (links) en 18 uur daglengte (rechts) bij de vier spectra LED-belichting.

Tabel 3.3. Opbrengst over de hele duur van het experiment van alle rode vruchten en totale opbrengst inclusief onrijpe vruchten.

Behandeling	Opbrengst (kg/m ²)			
	15 uur		18 uur	
	rood	totaal	rood	totaal
1 RWBFr PSS 0.75	7.5	9.7	6.1	8.3
2 RWBFr PSS 0.83	6.0	9.3	6.6	8.6
3 RWB PSS 0.87	6.5	8.9	5.5	7.9
4 WFr PSS 0.75	7.3	10.3	6.2	9.4

Nutriëntengehaltes

De concentratie van nutriënten in het blad verschilde maximaal circa 30% tussen de twee daglengtes (Appendix Tabel A8). Een uitzondering was molybdeen wat bij een daglengte van 18 uur een 2.4 maal zo hoge concentratie had als bij een daglengte van 15 uur. Opname van molybdeen wordt beperkt door hoge concentraties sulfaat (SO₄²⁻) in het wortelmedium (Sims et al., 1979). In de drainage was de concentratie SO₄²⁻ hoger bij 15 uur daglengte (Appendix Tabel A9) en over alle behandelingen was er een negatieve correlatie tussen de concentratie SO₄²⁻ in de drainage en molybdeen in het blad (Appendix Fig. A3).

Wat opviel was dat behalve bij de twee behandelingen met PSS 0.75 bij 15 uur daglengte, fosfaat nagenoeg niet meer detecteerbaar was in de drainage (Appendix Tabel A9).

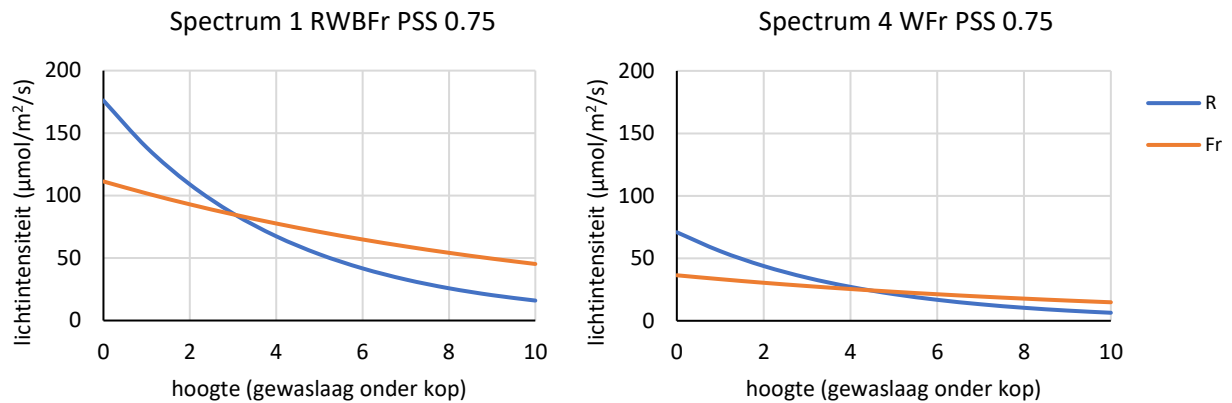
4 Discussie

4.1 Strecking en morfologie

Dit experiment heeft zeer duidelijk aangetoond dat een verschil van 15 of 18 uur daglengte geen invloed heeft op stengelstrekking. Lichtspectrum bleek in dit experiment zoals verwacht van grote invloed op strekking. Het bleek wel degelijk mogelijk om voldoende strekking van internodiën te realiseren bij het onder belichting als moeizaam strekkend bekendstaande ras Maverá. Behandeling 4 WFr PSS 0.75 op basis van witte LED's leidde tot een goede strekking van 5.1 cm per internodium en het gewas werd als goed werkbaar beoordeeld. Bij behandeling 3 RWB PSS 0.87 waren de internodiën 1 cm korter en dat maakt indraaien lastig. Er was niet echt sprake van verdrukking of misvorming van vruchten.

Er was zelfs overmatige strekking in de behandeling 1 RWBFr PSS 0.75. In deze behandeling was het aandeel verrood het hoogst (55%). Verrood licht wordt door planten waargenomen als signaal dat er buurplanten nabij zijn. Dat leidt tot meer strekking van stengel en bladstelen en apicale dominantie, waardoor de plant overschaduwning van buurplanten kan tegengaan (Taiz et al., 2018). Omdat verrood licht veel meer wordt doorgelaten door een bladerdek dan andere golflengtes in het PAR-gebied, is er ook dieper in het gewas nog veel verrood licht aanwezig in behandeling 1 RWBFr PSS 0.75. In behandeling 4 WFr PSS 0.75 waar het aandeel verrood 18% was, zal er minder verrood licht dieper in het gewas komen. Ter illustratie nemen we een denkbeeldig gewas verdeeld in tien lagen met de aanname dat rood licht uitdooft van boven naar beneden volgens de extinctie extinctie-coëfficiënt $k = 0.8$ en verrood met $k = 0.3$. Enkele lagen onder de kop van het gewas is er al aanzienlijk meer verrood licht dan rood licht (Fig. 4.1). Dit kan deels de grotere strekking in behandeling 1 verklaren. Daarnaast was er een lager aandeel blauw licht in behandeling 1 (8%) dan behandeling 4 (27%) en van blauw licht is bekend dat het de strekking remt (Snowden et al., 2016).

Kusuma en Bugbee (2021) suggereren dat het percentage verrood t.o.v. de totale foton flux (PFD 400-750 nm) een uitstekend voorspeller is van plantmorfologie (o.a strekking). Dit is een andere benadering dan de PSS-benadering. Uit dit onderzoek blijkt dat beide benaderingen hun beperkingen hebben. Van behandeling 1 RWBFr PSS 0.75 en 4 WFr PSS 0.75 is de berekende PSS hetzelfde, maar behandeling 1 met een hoger percentage verrood leidde inderdaad tot langere internodiën (6.2 vs. 5.1 cm). Dat spreekt voor de suggestie van Kusuma en Bugbee (2021). Echter, behandeling WFr PSS 0.75 gaf weer beduidend langere internodiën (5.1 cm) dan behandeling 2 RWBFr PSS 0.83 (4.6 cm), terwijl het percentage verrood hoger was bij behandeling 2. Dat spreekt dan weer tegen de suggestie van Snowden et al (2016) en voor de PSS-benadering. Dat geeft aan dat simpele rekenregels om complexe biologische processen te voorspellen wel nuttig zijn, maar altijd hun beperkingen hebben.



Figuur 4.1. Theoretische uitdoving van rood (R) en verrood (Fr) licht van de kop van een gewas (hoogte 0) tot de bodem (onder gewaslaag 10) voor spectrum 1 (links) en spectrum 4 (rechts). Rood licht wordt meer geabsorbeerd door het blad dan verrood licht. Berekening op basis van extinctie-coëfficiënt $k = 0.8$ (R) of $k = 0.3$ (Fr) volgens het model van Monsi & Saeki (1953). In absolute zin is er volgens voorspelling bijvoorbeeld $>50 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ Fr in spectrum 1 op hoogte 8 gewaslagen onder de kop, terwijl er slechts $18 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ Fr is op die hoogte in spectrum 4

Een eerdere studie in een klimaatcel bij Plant Lighting aan het ras Maveria (van den Boogaart et al., 2019) concludeerde dat alleen een zonlichtspectrum (PSS 0.72) voldoende strekking opleverde (5.9 cm per internodium). Dat was meer dan SON-T + LED met toevoeging van verrood oplopend van 0 tot 40% (4.2-4.8 cm per internodium). Noch een zonlichtspectrum, noch een hoog aandeel verrood licht van 40% of meer is wenselijk in de praktijk vanwege de hoge kosten in aanschaf en elektraverbruik. Deze studie laat zien dat een basis van witte LED's mogelijk een goed alternatief biedt waarbij voldoende strekking werd behaald. Het is de vraag of PSS 0.75 nodig is of dat volstaan kan worden met een wat hogere PSS. Stengelstrekking hoeft ook niet meer te zijn dan noodzakelijk voor een goede werkbaarheid. Het effect van lichtspectrum zal ook een volledig seizoen getest moeten worden.

Het hogere aandeel verrood in spectrum 1 dieper in het gewas (Fig. 4.1) verklaart mogelijk ook de hogere mate van chlorose op 10-12 oksels onder de kop. Verrood licht dat op de onderste bladeren valt in een dicht bladerdek speelt een rol bij de versnelde veroudering daarvan, zoals een studie met zonnebloem heeft aangetoond (Rousseaux et al., 1996). Er werden ~26 internodiën gevormd in 15 weken, dus 1.73 per week (1 per 4 dagen), wat sneller is dan de 1.17 per week (1 per 6 dagen) waar in het model voor het teeltplan rekening mee werd gehouden. In die zin zou je kunnen stellen dat het gewas fysiologisch gezien ouder was na 15 weken dan te verwachten gezien de relatief korte teeltduur. De vrij hoge etmaaltemperatuur van 24°C kan mogelijk de ontwikkeling hebben versneld. Deze temperatuur was eerder gekozen in de eerdere praktijkproef bij het Delphy Improvement Centre van 2019-2020 om strekking verder te bevorderen bij Maveria, en is overgenomen in dit experiment om condities vergelijkbaar te houden. Bij een lagere temperatuur is een langzamere ontwikkelingssnelheid te verwachten en mogelijk een betere bladkwaliteit. Verder is de lichtsom of DLI in de winter onder belichting niet hoog en is het de vraag of de

plant baat heeft bij hoge etmaaltemperaturen. Een lagere temperatuur kan ook zorgen voor een gunstiger ratio van temperatuur/DLI in deze omstandigheden. Een hoge temperatuur zorgt voor een hoge onderhoudsademhaling. Bovendien is bij een geplande vruchtzetting van 0.5 vrucht per stengel per week in de winterperiode (Appendix Tabel A6) een ontwikkeling van 1.73 internodia per week inefficiënt. Immers, op minder dan 1 op de 3 internodia hoeft dan maar een vrucht te zetten, terwijl de plant wel droge stof investeert in stengel en blad voor de andere twee internodia. Minder internodia zou dan investering in oogstbare delen (harvest-index) verhogen. Dit is het onderwerp van een volgend experiment in klimaatcellen bij Plant Lighting met start in voorjaar 2022.

De oppervlakte per blad was het hoogst in behandeling 4 WFr PSS 0.75 en het was in alle behandelingen hoger onder 15 uur daglengte dan 18 uur. Omdat het aantal internodiën en daarmee bladeren nagenoeg gelijk was tussen behandelingen, was het totale bladoppervlak waarschijnlijk ook het hoogst in behandeling 4 en verhoogd onder 15 uur daglengte (mits de bemonsterde bladeren representatief waren voor het gewas). Dit droeg mogelijk dus ook bij aan de hogere verdamping op gewasniveau in die conditie (Hoofdstuk 3.2).

Conclusies over het effect van lichtspectrum op strekking en morfologie zijn samengevat in Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Conclusie morfologie en strekking.

Lichtspectrum	Beschrijving
1 RWBFr PSS 0.75	Extreem gestrekt, zeer open gewas en veel chlorose.
2 RWBFr PSS 0.83	Redelijke strekking maar bij 18 uur ook veel chlorose.
3 RWB PSS 0.87	Meest gedrongen, met donkergroen blad en minste chlorose. Rode verkleuring stengels.
4 WFr PSS 0.75	Goede strekking, groter blad en minder chlorose dan spectrum 1.

4.2 Verdamping, fotosynthese en opbrengst

Er is eerder geconstateerd bij jaarrond paprikateelt dat bladchlorose optreedt op vrij kleine afstand onder de kop van het gewas aan het begin van het voorjaar, wat zich vervolgens niet meer herstelt (Helmus-Schuddebeurs et al. 2020). Huidmondjes openen onvoldoende en beperkten de fotosynthese. In deze proef trad dat fenomeen ook duidelijk op: bladeren op slechts 5-7 oksels onder de kop hadden een forse verlaging van huidmondjesgeleidbaarheid in alle behandelingen. Spectrum en daglengte hadden hier wel enige invloed op. Bij 15 uur daglengte was de huidmondjesgeleidbaarheid van bladeren in alle behandelingen beduidend hoger in de kop van het gewas en iets hoger 5-7 oksels onder de kop. Bij 15 uur daglengte en behandeling 4 WFr PSS 0.75 waren er bladeren die nog een redelijke geleidbaarheid behaalden 5-7 oksels onder de kop, en waarvan ook de fotosynthesesnelheid relatief hoog bleef. Ook de verdamping van het gehele gewas was hoger bij die behandelingen (zie hieronder).

Het fenomeen doet denken aan de signalering van omgevingscondities van volwassen blad naar jong blad. Lokale beschaduwning van volwassen bladeren van *Arabidopsis thaliana* leidde bijvoorbeeld tot een verlaging van het aantal huidmondjes in jong blad, wat niet beschaduwd werd (Lake et al., 2001). Wanneer volwassen bladeren van *Chenopodium album* lokaal beschaduwd werden, bleken de jonge onbeschaduwde bladeren dunner te zijn met maar één laag palissade-parenchym, wat typisch is voor schaduwbladeren (Yano and Terashima, 2001). Mogelijk speelt een soortgelijke signalering van bestaand naar nieuw blad een rol bij het snelle verval in huidmondjesgeleidbaarheid en fotosynthese in het voorjaar. Bij een jaarrond teelt geplant in september/oktober is er in het voorjaar een groter deel van het bladerdek gevormd onder lagere lichtsommen dan bij een traditionele onbelichte teelt geplant in december. Wellicht heeft dat een invloed op eigenschappen van het jonge blad dat gevormd wordt/is terwijl de lichtsommen weer toenemen in het voorjaar.

Er was een negatief effect van lange daglengte op fotosynthese-parameters en totale opbrengst. Ook was er meer chlorose onder 18 uur daglengte dan 15 uur. Gegevens over opbrengst uit dit experiment dienen voorzichtig geïnterpreteerd te worden vanwege het kleine teeltoppervlak en de korte teeltduur. De opbrengst inclusief vruchten die nog niet oogstrijp was gemiddeld 12% hoger onder 15 uur daglengte dan 18 uur over alle behandelingen.

Van verschillende soorten, waaronder paprika, is bekend dat lange daglengte of continu licht kan leiden tot bladschade, waarschijnlijk door een verstoring van de interne biologische klok. Op momenten dat het donker zou moeten zijn volgens die interne klok, ontvangt de plant nog licht en worden processen zoals fotosynthese verstoord (Velez-Ramirez et al., 2011). Bij tomaat ligt de grens waarbij schade optreedt boven/bij de 18 uur belichting. Voor paprika werd in een kasstudie juist geconcludeerd dat de optimale lichtperiode 20 uur is. Echter, in die studie waren er aanzienlijke lichtsommen van zonlicht (al 6 mol/m²/dag in december en 8 mol/m²/d in januari) waarbij nog belicht werd. De planten lieten in die studie bij een daglengte van 24 uur (continu licht) enige bladkrulling zien maar geen chlorose en de opbrengst was minder in vergelijking met 20 uur daglengte (Demers et al., 1998). Echter, in dit experiment was de bijdrage van LED-licht veel groter dan van (kunst-)zonlicht en presteerden planten klaarblijkelijk wat minder onder 18 uur daglengte dan 15 uur daglengte. In hoeverre het fenomeen van schade door lange daglengte of continu licht een rol speelde is niet helder. De verhouding LED/zonlicht in het spectrum kan hier mogelijk van invloed op zijn.

De hogere verdamping onder 15 uur licht en met name onder het spectrum gebaseerd op witte LED's was opvallend. Zoals besproken speelde de hogere huidmondjes-geleidbaarheid een rol. In die behandeling 4 WFr PSS 0.75 was het aandeel blauw licht het hoogst en daarvan is bekend dat het de opening van huidmondjes stimuleert (Taiz et al., 2018). Trouwborst et al. (2022) hebben bij paprika 'Mavera' een fors hogere huidmondjes-geleidbaarheid en hogere CO₂-opname gemeten bij 30% blauw licht t.o.v. 5% blauw. Ook was het gemiddeld bladoppervlak onder spectrum 4 WFr PSS 0.75 hoger en het aantal bladeren min of meer gelijk, waarmee er op gewasniveau een groter verdampend oppervlak was. Andere factoren

die een (naar verwachting bescheiden) rol kunnen hebben gespeeld in totale verdamping zijn de openheid van het gewas en de kleine verschillen in luchttemperatuur en waterdampdruk tussen zones (Appendix Tabel A4). Een dicht gedrongen gewas zoals onder spectrum 3 RWB PSS 0.87 zal minder luchtbeweging toelaten dan een zeer open gewas zoals onder spectrum 1 RWBFr PSS 0.75, wat ook tot verschillen in verdamping kan leiden.

Conclusies uit dit hoofdstuk zijn samengevat in Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Conclusie verdamping, fotosynthese en opbrengst.

Daglengthe	Beschrijving
15 uur	Hogere verdamping, huidmondjesgeleidbaarheid, fotosynthesesnelheid en totale productie inclusief onrijpe vruchten.
18 uur	Lagere waarden van verdamping, huidmondjes-geleidbaarheid, fotosynthesesnelheid en totale productie incl. onrijpe vruchten. Meeste bladchlorose.

Lichtspectrum	Beschrijving
1 RWBFr PSS 0.75	Eén na hoogste verdamping. Laagste huidmondjes-geleidbaarheid. Meeste bladchlorose.
2 RWBFr PSS 0.83	Lagere verdamping. Lagere productie dan spectrum 4.
3 RWB PSS 0.87	Lagere verdamping. Laagste totale productie inclusief onrijpe vruchten.
4 WFr PSS 0.75	Hoogste verdamping en huidmondjesgeleidbaarheid. Huidmondjesgeleidbaarheid en fotosynthese bleef het hoogst 5-7 oksels onder de kop, hoogste totale productie inclusief onrijpe vruchten.

4.3 Praktische implicaties en toekomstperspectief

Belichting met een zo lang mogelijke daglengthe met een lagere lichtintensiteit is praktisch gezien gunstiger dan een kortere daglengthe en een hogere intensiteit. Dit omdat er een lager geïnstalleerd vermogen nodig is aan elektracapaciteit en belichting voor eenzelfde lichtsom. Tevens maakt een langere daglengthe de warmtevraag gemakkelijker duurzaam in te vullen, want juist in de onbelichte nachtelijke uren is een fossielvrije invulling van de warmtevraag een uitdaging. Echter, deze studie wijst erop dat paprika onder een daglengthe van 18 uur minder presteerde dan onder 15 uur daglengthe bij eenzelfde lichtsom. De hogere verdamping, betere bladkwaliteit (mindere chlorose) en 12% hogere opbrengst (incl. onrijpe vruchten) bij 15 uur ten opzichte van 18 uur daglengthe is interessant. Gezien de kleine teeltoppervlakte per behandeling en korte teeltduur (15 weken) moet voorzichtig omgegaan worden met uitspraken over verschillen in productie. Het effect van daglengthe zou op een groter oppervlak in een volledig jaarronde teelt getoetst moeten worden.

Het spectrum 4 WFr PSS 0.75 op basis van witte LED's met enig verrood gaf een mooie gewasstand, de meeste verdamping en huidmondjesgeleidbaarheid, fotosynthese-snelheid en totale productie. Dit is te verkiezen boven het spectrum met dezelfde PSS op basis van rode LED's met veel verrood. Dat leidde tot veel chlorose en overmatige strekking. Dat zou in de

praktijk ook sneller leiden tot het bereiken van de hoge draad waarmee de verdere productie van vruchten is afgelopen. Het ligt niet voor de hand verder te toetsen met het spectrum 1 RWBFr PSS 0.75. Ook het spectrum 3 RWB PSS 0.87, wat in feite een negatieve controle was, valt af vanwege de lage strekking en productie.

Witte LED's hebben een grote opmars gemaakt door allerlei toepassingen in verlichting (gebouwen, voertuigen) en de efficiëntie ervan neemt toe door verdere innovatie. Desalniettemin zijn rode LED's (660 nm) energetisch beduidend efficiënter dan witte LED's. Indien een lichtspectrum dat tot lage PSS leidt vereist is om voldoende gewasstrekking te realiseren, kan een combinatie van witte en verrode LED's energetisch gunstiger zijn dan een combinatie van rode en verrode LED's. Dit omdat in combinatie met wit veel minder verrood benodigd is om de PSS te doen dalen tot de gewenste waarde. Een alternatief is niet de gangbare rode LED's van 660 nm te gebruiken, maar een lagere rode golflengte (tussen 600 en 660 nm) die fytochroom minder sterk activeert. Dan zou er minder verrood licht nodig zijn om dezelfde PSS te bereiken. Zoals eerder werd gesuggereerd is een PSS van 0.75 zoals in de meest succesvolle behandeling 4 WFr PSS 0.75 misschien ook niet nodig, maar is een waarde tussen 0.75 en 0.83 al voldoende. Ook dat zou het benodigde aandeel verrood licht verder verminderen. Zeker bij een gemakkelijker strekkend ras dan 'Mavera' ligt dit voor de hand.

De etmaaltemperatuur in dit experiment was redelijk hoog (23-24°C) en heeft mogelijk geleid tot een onnodig snelle afsplitsing van internodiën en versnelde fysiologische veroudering. Over het algemeen worden fysiologische stress-symptomen erger bij hogere temperatuur (en hogere lichtintensiteit). Mogelijk blijft chlorose beperkt en produceert het gewas meer (hogere harvest-index) bij een lagere temperatuur. Een volgend experiment dat Plant Lighting in 2022 uitvoert bij twee verschillende temperaturen zou dat moeten uitwijzen.

5 Referenties

- van den Boogaart SAJ, Hogewoning SW, Trouwborst G, Krause A** (2019) Hoe wordt jaarrond productie in paprika rendabel? Vooronderzoek naar het effect van lichtspectrum.
- Demers DA, Gosselin A, Wien CH** (1998) Effects of supplemental light duration on greenhouse sweet pepper plants and fruit yields. *J Am Soc Hortic Sci* **123**: 202–207
- Lake JA, Quick WP, Beerling DJ, Woodward FI** (2001) Signals from mature to new leaves. *Nature* **411**: 154
- Monsi M, Saeki T** (1953) Über den Lichtfaktor in den Pflanzen-Gesellschaften und seiner Bedeutung für die Stoffproduktion. *Japanese J Bot* **14**: 22–52
- Rousseaux MC, Hall AJ, Sánchez RA** (1996) Far-red enrichment and photosynthetically active radiation level influence leaf senescence in field-grown sunflower. *Physiol Plant* **96**: 217–224
- Sager JC, Smith WO, Edwards JL, Cyr KL** (1988) Photosynthetic efficiency and phytochrome photoequilibria determination using spectral data. *Trans ASAE* **31**: 1882–1889
- Sims JL, Leggett JE, Pal UR** (1979) Molybdenum and sulfur interaction effects on growth, yield, and selected chemical constituents of burley tobacco. *Agron J* **71**: 75–78
- Snowden MC, Cope KR, Bugbee B** (2016) Sensitivity of seven diverse species to blue and green light: Interactions with photon flux. *PLoS One* **11**: e0163121
- Taiz L, Zeiger E, Moller IM, Murphy A** (2018) *Plant Physiology and Development*.
- Velez-Ramirez AI, Van Ieperen W, Vreugdenhil D, Millenaar FF** (2011) Plants under continuous light. *Trends Plant Sci* **16**: 310–318
- Yano S, Terashima I** (2001) Separate localization of light signal perception for sun or shade type chloroplast and palisade tissue differentiation in *Chenopodium album*. *Plant Cell Physiol* **42**: 1303–1310

6 Appendix

Tabel A1. Samenstelling Voldruppelschema (0-15 dagen na start)

Monster: No analysis
 Datum: 2-12-2020
 Gewas: Paprika, vrije drain IKC (PAI)
 Paprika PL t.a.v.
 Bunnik

klant nr: 6391 Monster nr. -1

Element	pH	EC	mM										µM								
			NH ₄	K	Na	Ca	Mg	Si	NO ₃	Cl	SO ₄	HCO ₃	H ₂ PO ₄	Fe	Mn	Zn	B	Cu	Mo		
Analyse	6.2	3.0																			
Analyse (EC(c))																					
Streefwaarden			0.6	5.6		9.4	3.3			18.9		3.3		1.3		16.7	5.0	7.8	88.9	0.8	
Standaardschema	2.1		0.5	6.5		5.0	1.5			15.5		1.8		1.3		15.0	10.0	5.0	30.0	0.8	0.5
Aanpassingen Analyse																					
Extra			-0.5	-0.6		1.5	1.6			3.0				1.0		37.5	5.0	5.1	45.0	2.3	0.5
Druppelwater	4.5		10.1		11.1	5.3			32.8		3.4		2.3		52.5	15.0	10.1	75.0	3.0	1.0	
Leiding/bronwater 0 % van:																					
Oppervlaktewater 100 % van:					0.6	1.0	0.4		0.5	0.5	0.2	2.3									
Recirculatiewater 0 % van:																					
Injectie concentraties			0.0	10.1		10.1	4.9	0.0	32.3	0.0	3.2	1.8	2.3		52.5	15.0	3.0	75.0	3.0	1.0	

Tabel A2. Startschema (16-30 dagen na start)

Monster: Manual
 Datum: 2-12-2020
 Gewas: Paprika, vrije drain IKC (PAI)
 Paprika PL t.a.v.
 Bunnik

klant nr: 6391 Monster nr. -2

Element	pH	EC	mM										µM								
			NH ₄	K	Na	Ca	Mg	Si	NO ₃	Cl	SO ₄	HCO ₃	H ₂ PO ₄	Fe	Mn	Zn	B	Cu	Mo		
Analyse	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Analyse (EC(c))		3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Streefwaarden	6.2	3.0	0.6	5.6		9.4	3.3			18.9		3.3		1.3		16.7	5.0	7.8	88.9	0.8	
Standaardschema	2.1		0.5	6.5		5.0	1.5			15.5		1.8		1.3		15.0	10.0	5.0	30.0	0.8	0.5
Aanpassingen Analyse																					
Extra			0.3	1.0		-0.5	0.2			3.0		-0.5		1.0		7.5	5.0	2.5	15.0	0.4	0.5
Druppelwater	4.5		0.8	15.7		9.9	3.2		32.8		3.1		2.3		52.5	15.0	10.1	75.0	3.0	1.0	
Leiding/bronwater 0 % van:																					
Oppervlaktewater 100 % van:					0.6	1.0	0.4		0.5	0.5	0.2	2.3									
Recirculatiewater 0 % van:																					
Injectie concentraties			0.8	15.7		8.9	2.8	0.0	32.3	0.0	2.9	1.8	2.3		52.5	15.0	3.0	75.0	3.0	1.0	

Tabel A3. Vruchtbelastingschema (31 dagen na start-einde)

Monster: No analysis
 Datum: 4-1-2021
 Gewas: Paprika, vrije drain IKC (PAI)
 Paprika PL t.a.v.
 Bunnik

klant nr: 6391 Monster nr. -3

Element	pH	EC	mM										µM								
			NH ₄	K	Na	Ca	Mg	Si	NO ₃	Cl	SO ₄	HCO ₃	H ₂ PO ₄	Fe	Mn	Zn	B	Cu	Mo		
Analyse																					
Analyse (EC(c))	6.2	3.0																			
Streefwaarden			0.6	5.6		9.4	3.3			18.9		3.3		1.3		16.7	5.0	7.8	88.9	0.8	
Standaardschema	2.1		0.5	6.5		5.0	1.5			15.5		1.8		1.3		15.0	10.0	5.0	30.0	0.8	0.5
Aanpassingen Analyse																					
Extra			0.3	2.0		-1.0	0.2			4.0		-1.0		0.3		7.5	5.0	2.5	70.0	3.5	0.5
Druppelwater	4.5		0.8	17.9		8.4	3.6		38.2		1.5		1.5		22.5	15.0	7.5	100.0	4.3	1.0	
Leiding/bronwater 0 % van:																					
Oppervlaktewater 100 % van:					0.6	1.0	0.4		0.5	0.5	0.2	2.3									
Recirculatiewater 0 % van:																					
Injectie concentraties			0.8	17.9		7.4	3.2	0.0	37.7	0.0	1.3	1.8	1.5		22.5	15.0	4.3	100.0	4.3	1.0	

Tabel A4. Gemiddelde gerealiseerde temperatuur (°C) per week per behandeling.

week	15 uur RWB PSS 0.87	15 uur RWBFr PSS 0.83	15 uur RWBFr PSS 0.75	15 uur WFr PSS 0.75	18 uur RWB PSS 0.87	18 uur RWBFr PSS 0.83	18 uur RWBFr PSS 0.75	18 uur WFr PSS 0.75
1	23.3	23.3	23.6	23.7	23.5	23.5	23.8	23.7
2	24.0	24.0	24.4	24.4	24.2	24.3	24.7	24.5
3	24.3	24.4	24.9	24.9	24.3	24.4	24.9	24.6
4	23.9	24.0	24.5	24.5	23.8	23.9	24.5	24.2
5	23.6	23.7	24.2	24.2	23.6	23.7	24.2	24.0
6	23.5	23.6	24.2	24.2	23.5	23.6	24.1	23.9
7	23.1	23.1	23.5	23.5	23.0	23.1	23.6	23.5
8	22.6	22.7	22.9	22.8	22.4	22.5	22.9	22.8
9	22.6	22.7	22.8	22.7	22.5	22.5	22.8	22.7
10	22.5	22.7	22.6	22.6	22.6	22.8	22.7	22.6
11	22.9	23.0	23.0	22.9	23.0	23.2	23.1	22.9
12	22.8	22.9	22.9	22.9	22.9	23.0	22.9	22.9
13	22.8	22.9	22.9	23.0	22.9	22.9	22.9	22.8
14	22.7	22.9	23.1	23.2	23.3	23.2	23.6	23.3
15	22.9	23.2	23.2	23.3	23.1	23.1	23.4	23.1
gemiddeld	23.2	23.3	23.5	23.5	23.3	23.3	23.6	23.4

Tabel A5. Gemiddelde gerealiseerde relatieve luchtvochtigheid (%) per week per behandeling.

week	15 uur RWB PSS 0.87	15 uur RWBFr PSS 0.83	15 uur RWBFr PSS 0.75	15 uur WFr PSS 0.75	18 uur RWB PSS 0.87	18 uur RWBFr PSS 0.83	18 uur RWBFr PSS 0.75	18 uur WFr PSS 0.75
1	72.1	73.7	70.8	68.4	73.6	75.6	73.5	71.7
2	77.2	77.7	73.9	72.5	77.0	77.8	74.8	74.1
3	77.8	77.8	72.8	71.7	77.4	77.6	73.7	73.5
4	76.9	76.5	71.0	70.4	77.1	77.1	73.0	72.9
5	76.8	76.3	70.7	70.2	76.8	76.6	72.7	72.7
6	78.2	77.4	71.3	71.2	77.3	77.2	73.3	73.5
7	78.3	77.7	72.3	72.2	77.7	77.4	72.9	73.5
8	78.2	77.5	72.3	72.5	78.0	77.6	73.7	74.3
9	78.4	77.6	72.2	72.4	78.4	78.0	74.5	75.1
10	78.4	77.3	72.3	72.3	77.8	77.4	74.4	75.0
11	78.0	76.8	71.5	71.6	77.0	76.7	73.5	74.2
12	78.0	76.7	71.5	71.3	77.1	76.8	73.6	73.8
13	77.1	76.2	70.6	70.1	77.1	76.7	73.3	73.8
14	77.8	76.0	69.4	69.1	77.0	75.3	71.2	72.1
15	76.7	74.8	70.3	69.3	76.0	75.1	71.3	72.4
gemiddeld	77.3	76.7	71.5	71.0	77.0	76.9	73.3	73.5

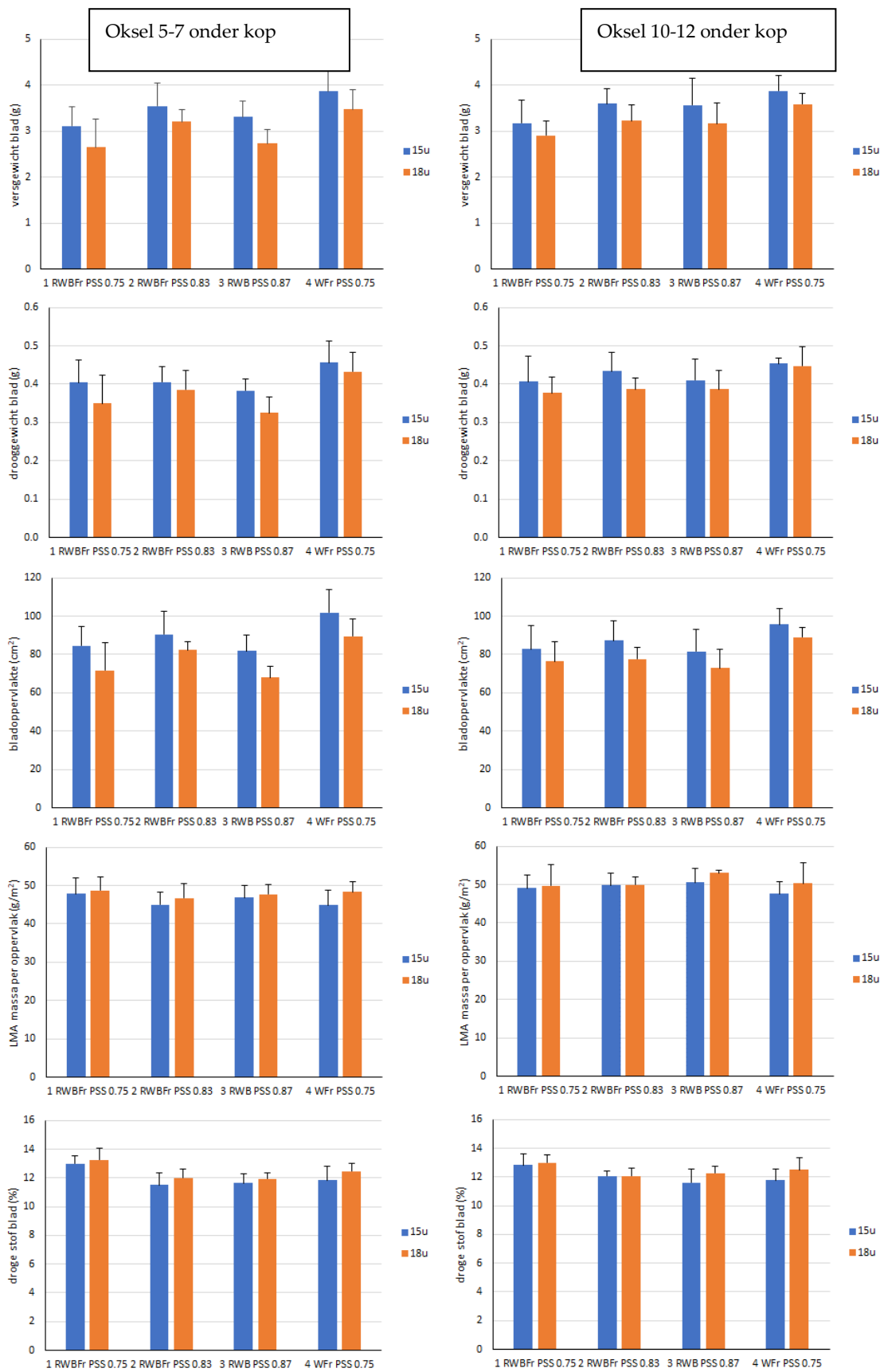
Tabel A6. Berekening benodigde duur LED bijbelichting op basis van model plantbelasting.

Week	Vrucht/ inter- nodium	Zetting/ m ² /week	Plant- belasting vrucht/m ²	DLI nodig (mol/m ² /d)	Weeg- factor	DLI nodig (mol/m ² /d)	DLI zonlicht	DLI LED nodig	Uren LED bijbelichting nodig	
									15 uur max	18 uur max
1	0	0.0	0.0	4.5	0.64	7.1	1.8	5.2	6.7	8.0
2	1	7.8	7.8	6.1	0.64	9.5	1.8	7.7	9.8	11.7
3	0.5	3.9	11.7	9.5	0.73	13.1	1.8	10.8	13.8	16.5
4	0.5	3.9	15.6	11.2	0.78	14.3	2.3	12.0	15.3	18.3
5	0.5	3.9	19.4	12.9	0.83	15.4	2.3	12.1	15.4	18.4
6	0.5	3.9	23.3	14.5	0.87	16.7	3.3	13.3	15.1	17.6
7	0.5	3.9	27.2	16.2	0.91	17.8	3.3	13.8	15.6	18.2
8	0.5	3.9	23.3	14.5	0.92	15.8	4.0	11.8	13.4	15.6
9	0.5	3.9	23.3	14.5	0.94	15.4	4.0	11.0	12.5	14.5
10	0.5	3.9	23.3	14.5	0.96	15.2	4.4	10.8	12.2	14.2
11	0.5	3.9	23.3	14.5	0.98	14.9	4.4	10.1	11.4	13.3
12	0.75	5.8	25.3	15.4	1.00	15.3	4.8	10.6	12.0	14.0
13	0.75	5.8	27.2	16.2	1.00	16.2	4.8	10.5	11.9	13.9
14	0.75	5.8	29.2	17.0	1.00	17.0	5.7	11.3	12.8	14.9
15	0.75	5.8	31.1	17.9	1.00	17.9	5.7	12.2	13.8	16.1

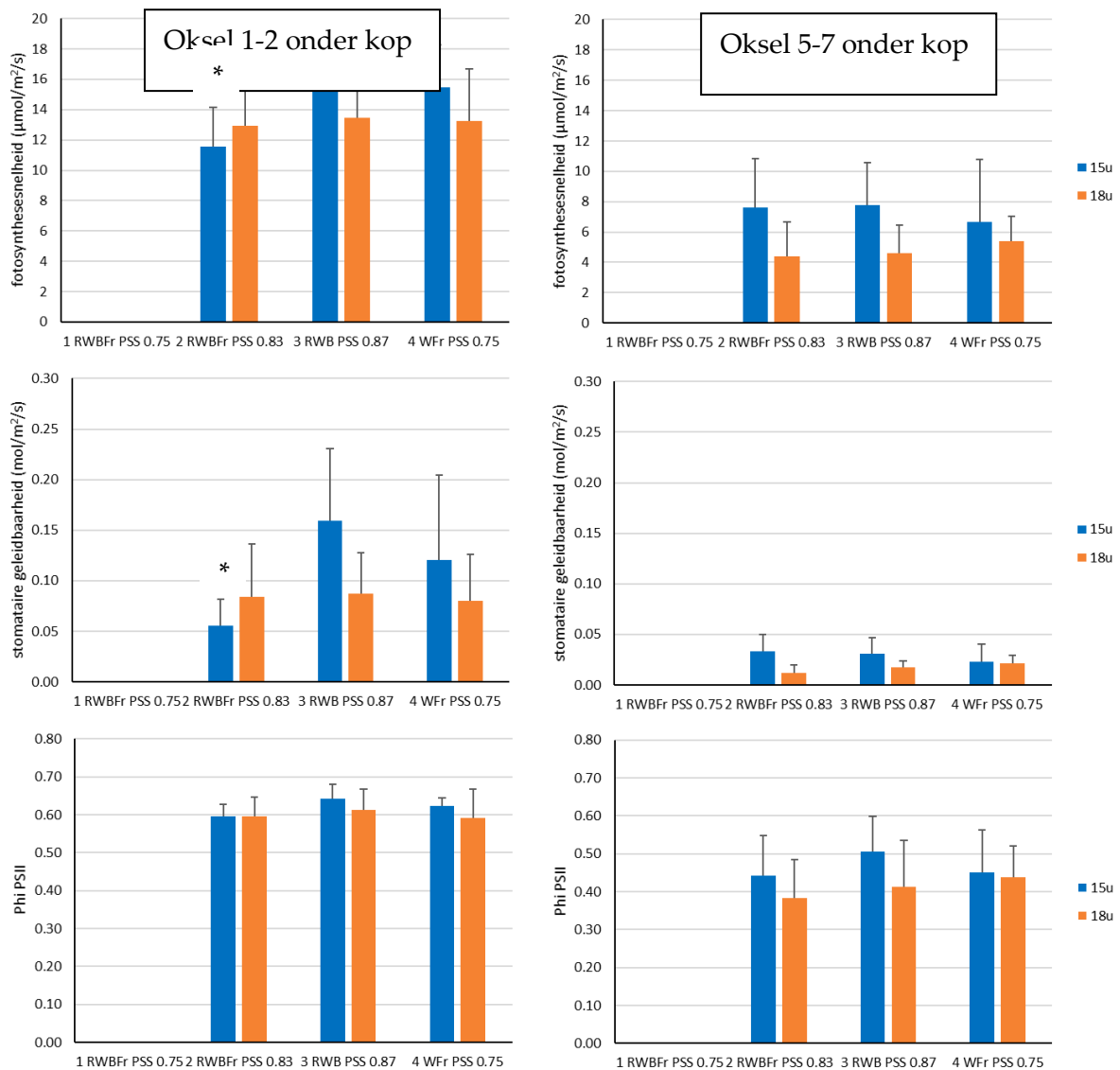
DLI, daily light integral (mol/m²/dag) = PAR-som. Vanaf proefweek 5 is de maximale belichtingsduur (15 of 18 uur) gegeven en de hele proef zo gebeven. De lichtintensiteit was 218 en 182 $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ bij 15 uur max en 18 uur max respectievelijk, en vanaf de zesde teeltweek 245 en 210 $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$.

Tabel A7. Belichtingstijden en intensiteit van zonlicht en LED bijbelichting.

week	zonlicht				LED					
	aan	uit	intensiteit $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$	waarvan uren bij 30 $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$	max 15 uur			max 18 uur		
					aan	uit	intensiteit $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$	aan	uit	intensiteit $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$
1	09:00	17:00	75	2	03:18	10:00	218	02:00	10:00	182
2	09:00	17:00	75	2	02:00	11:48	218	23:00	10:42	182
3	09:00	17:00	75	2	02:00	14:00	218	23:00	13:30	182
4	09:00	17:00	95	2	02:00	16:30	218	23:00	16:30	182
5	09:00	17:00	95	2	01:30	16:30	218	22:30	16:30	182
6	08:30	17:00	120	1	01:30	16:30	245	22:30	16:30	210
7	08:30	17:00	120	1	01:30	16:30	245	22:30	16:30	210
8	07:00	17:00	120	1	01:30	16:30	245	22:30	16:30	210
9	07:00	17:00	120	1	01:30	16:30	245	22:30	16:30	210
10	06:00	17:00	120	1	01:30	16:30	245	22:30	16:30	210
11	06:00	17:00	120	1	01:30	16:30	245	22:30	16:30	210
12	06:00	17:00	130	1	01:30	16:30	245	22:30	16:30	210
13	06:00	17:00	130	1	01:30	16:30	245	22:30	16:30	210
14	04:00	17:00	130	1	01:30	16:30	245	22:30	16:30	210
15	04:00	17:00	130	1	01:30	16:30	245	22:30	16:30	210
16	04:00	17:00	130	1	01:30	16:30	245	22:30	16:30	210



Figuur A1. Bladeigenschappen op twee hoogtes bemonsterd aan het einde van het experiment (105 dagen na start).

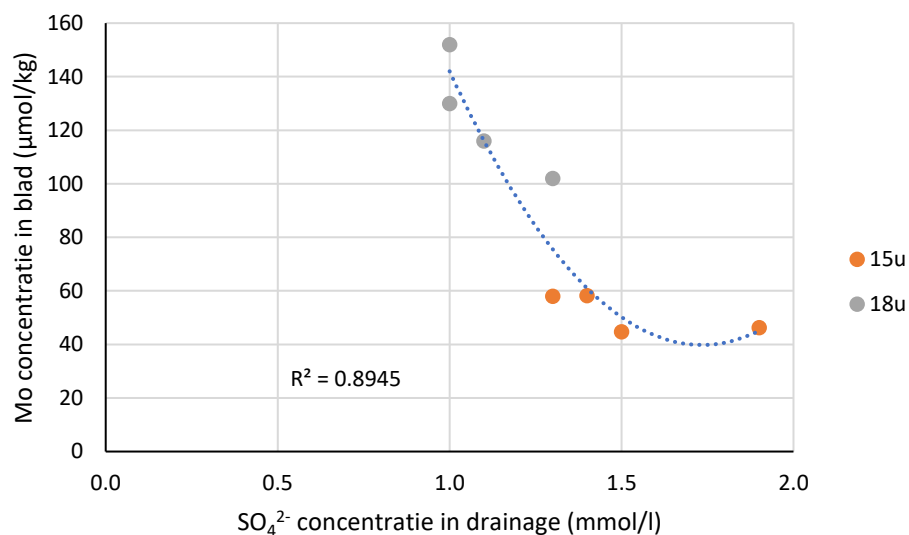


Figuur A2. Fotosynthese-parameters op twee hoogtes in het gewas op dag 99-102.

* Fotosynthese-snelheid en stomataire geleidbaarheid waren in behandeling 2 RWBFr PSS 0.83 hoger bij 18 uur daglengte dan bij 15 uur daglengte, in tegenstelling tot de andere behandelingen en eerdere metingen (Fig. 3.7). Mogelijk werd dit veroorzaakt doordat planten in deze behandeling bij 15 uur daglengte als laatste op de dag zijn gemeten (tot 12.20u) en huidmondjes steeds verder sluiten over de dag. Bij 18 uur daglengte werd deze behandeling eerder gemeten op de dag tot (09.30u).

Tabel A8. Nutriëntengehaltes in blad.

daglengte	spectrum	K	Ca	Mg	N _{totaal}	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻	mmol/kg ds				μmol/kg ds			
								Fe	Mn	Zn	B	Mo	Cu		
15 uur	1 RWBFr PSS 0.75	1707	644	238	3059	172	142	2.1	3.4	1.4	2.9	45	131		
	2 RWBFr PSS 0.83	1729	849	317	3041	175	104	2.6	2.9	1.3	3.3	58	134		
	3 RWB PSS 0.87	1671	908	411	3360	186	90	2.7	3.6	1.2	3.8	58	137		
	4 WFr PSS 0.75	1519	685	293	3310	168	120	2.0	3.7	1.4	3.6	46	123		
18 uur	1 RWBFr PSS 0.75	1444	841	275	3233	207	139	2.2	2.9	1.5	4.0	116	163		
	2 RWBFr PSS 0.83	1426	869	311	3406	244	113	2.9	2.8	1.4	3.7	152	144		
	3 RWB PSS 0.87	1412	947	420	3743	247	141	2.9	2.7	1.5	4.4	130	183		
	4 WFr PSS 0.75	1343	814	367	3324	235	129	2.3	3.5	1.7	5.7	102	191		

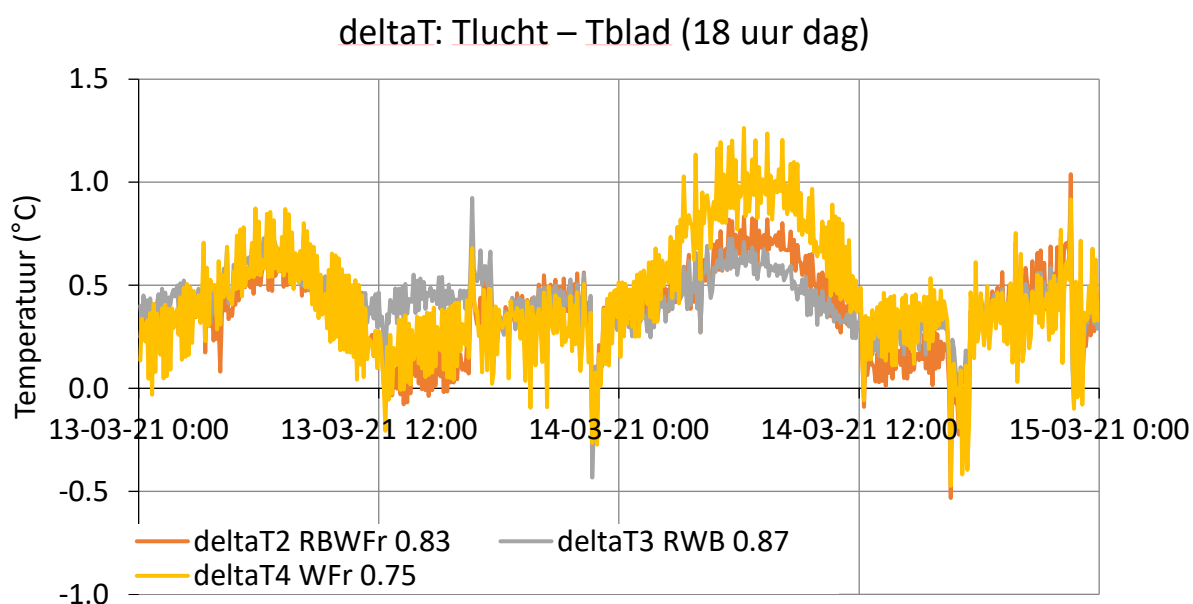
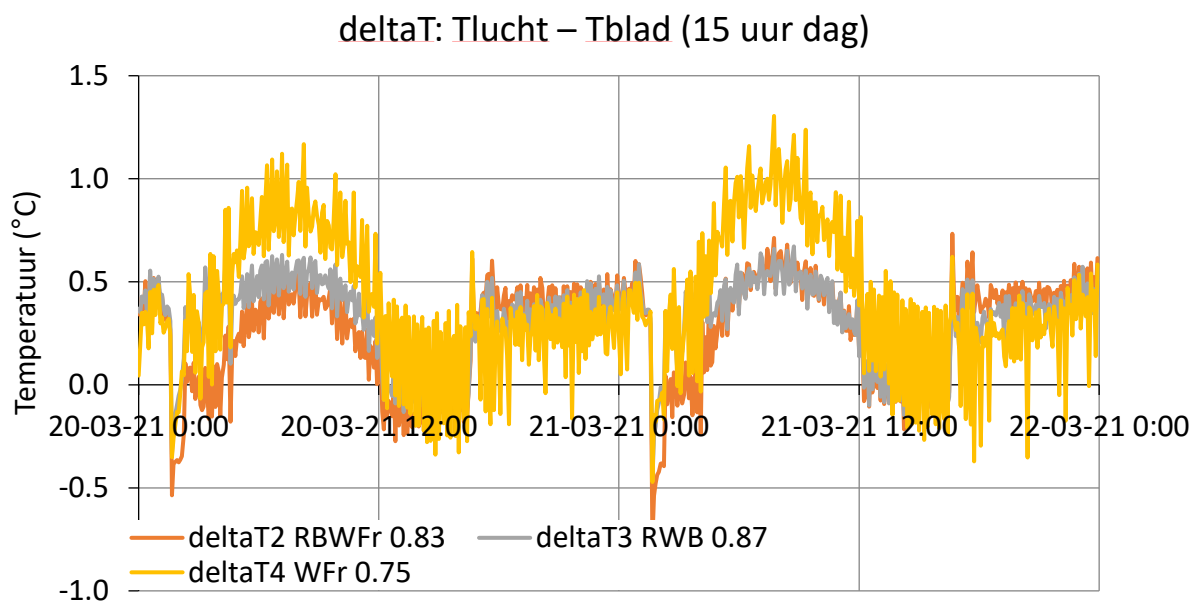


Figuur A3. Molybdeen (Mo)- concentratie in het blad als functie van sulfaat (SO₄²⁻)- concentratie in drainage. Fit van alle datapunten is weergegeven.

Tabel A9. Nutriëntgehaltenes in drainage per behandeling en voedingsoplossing (onderste regel).

daglengte	spectrum	HCO ₃ ⁻	K	Ca	Mg	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻	Fe	Mn	Zn	B	Mo	Cu	
		mmol/l							µmol/l						
15 uur	1 RWBFr PSS 0.75	0.7	19.0	11.6	4.9	46.6	1.5	0.44	9.8	0.50	1.0	138	0.63	4.6	
	2 RWBFr PSS 0.83	1.5	17.3	13.3	5.4	49.6	1.3	0.00	9.7	0.00	2.8	165	1.30	5.3	
	3 RWB PSS 0.87	1.2	16.9	12.6	5.1	47.3	1.4	0.09	9.3	0.10	1.4	153	1.10	4.8	
	4 WFr PSS 0.75	0.6	22.6	13.8	5.8	54.6	1.9	0.47	11.6	0.30	1.3	161	1.10	6.0	
18 uur	1 RWBFr PSS 0.75	1.5	17.5	12.1	5.0	45.1	1.1	0.00	13.0	0.00	3.0	147	1.00	4.9	
	2 RWBFr PSS 0.83	1.5	15.1	11.4	4.7	40.7	1.0	0.00	11.1	0.20	2.7	140	0.88	4.2	
	3 RWB PSS 0.87	1.8	13.8	10.8	4.4	38.9	1.0	0.05	10.2	0.20	2.9	135	0.95	3.9	
	4 WFr PSS 0.75	1.6	18.9	13.5	5.6	50.9	1.3	0.00	11.3	0.00	2.3	161	1.20	4.9	
voeding		0.3	13.5	6.8	2.8	27.9	1.2	1.2	15.6	11.8	5.7	79	0.54	3.2	

Detectielimiet van PO₄³⁻ (fosfaat) was 0.05 mmol/l en van Mn (mangaan) 0.1 µmol/l. Waardes onder detectielimiet zijn weergegeven als 0.



Figuur A4. Incidentele meting van temperatuur van blad en lucht bij 15 uur daglengte (bovenste paneel) en 18 uur daglengte (onderste paneel). Infrarood sensoren zijn gericht op een blad in de kop van het gewas in behandeling 2, 3 en 4 en het verschil tussen lucht- en blad-temperatuur is weergegeven over twee etmalen. De lichtperiode liep van 02.00-17.00u of 23.00-17.00u bij 15 of 18 uur daglengte, respectievelijk. Metingen in behandeling 1 waren niet mogelijk vanwege de te grote lengte van het gewas.