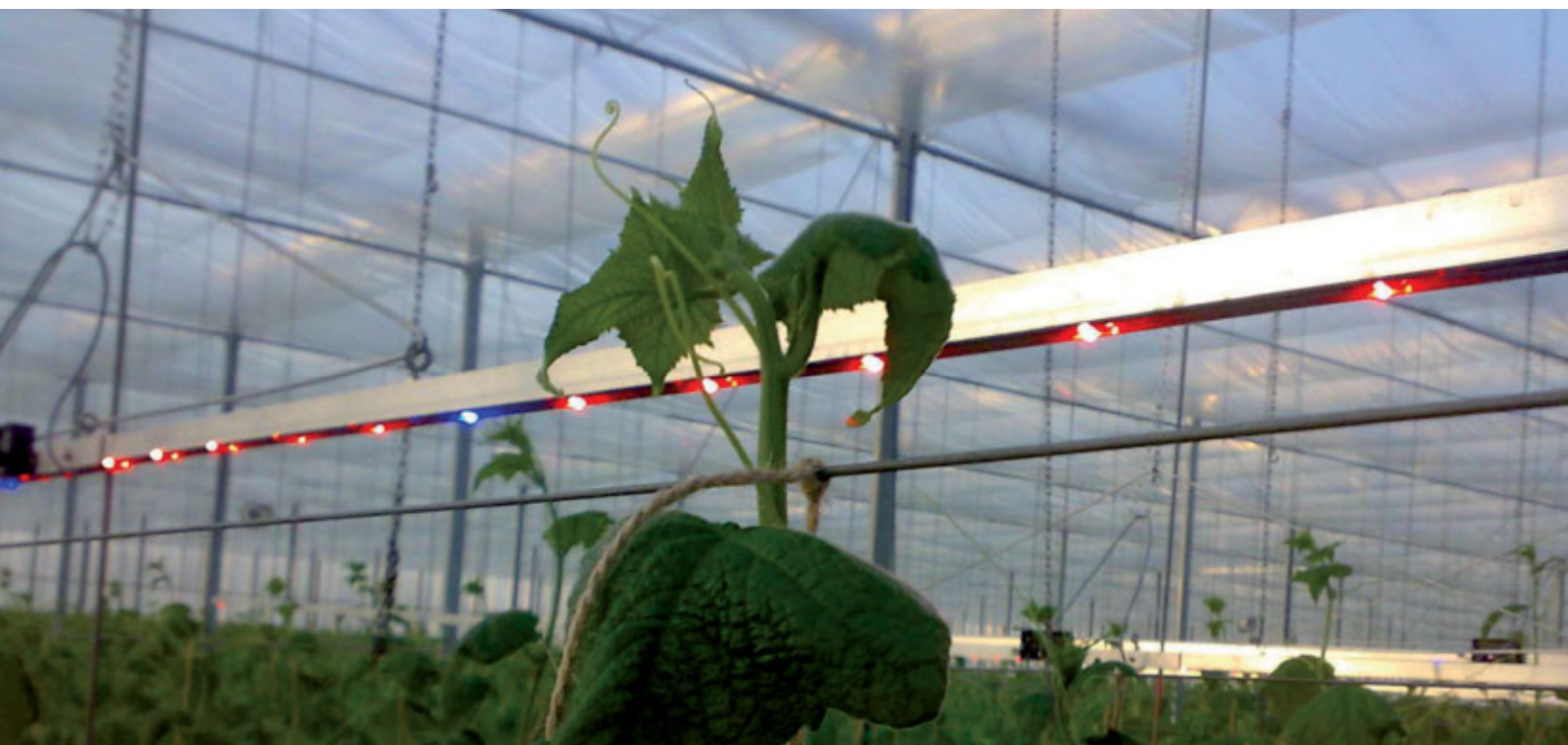


Effect van LEDs op komkommer in de praktijk

De Waddenkas

Fleur Sterk, Johan Steenhuizen & Tom Dueck





WAGENINGEN **UR**

For quality of life

Effect van LEDs op komkommer in de praktijk

De Waddenkas

Fleur Sterk, Johan Steenhuizen & Tom Dueck

© 2009 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



Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Droevendaalsesteeg 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
Samenvatting	1
1 Inleiding	3
2 Methodologie	5
2.1 Proefopzet	5
2.2 Gewasmetingen	6
2.3 Fotosynthese- en lichtonderscheppingmetingen	9
2.4 Energiemetingen	9
2.5 Lichthindermetingen	10
3 Resultaten	11
3.1 Gewasgroei	11
3.1.1 Aantal bladeren	11
3.1.2 Stengellengte	11
3.1.3 Stengeldiameter	12
3.1.4 Bladoppervlak	12
3.1.5 Bladtemperatuur	13
3.2 Fotosynthese en lichtonderschepping	15
3.2.1 Fotosynthese	15
3.2.2 Lichtonderschepping	15
3.3 Energiebalans	16
3.3.1 Lamp efficiëntie	16
3.3.2 Energie efficiëntie	16
3.4 Lichthinder	17
3.4.1 Horizontale reductie in lichtintensiteit	17
3.4.2 Spectrum	18
4 Conclusies	21
4.1 Gewasgroei	21
4.2 Fotosynthese en lichtonderschepping	21
4.3 Energiebalans	21
4.4 Lichthinder	21
5 Perspectief	23
6 Referenties	24
Bijlage I. Aanvullende informatie	2 pp.

Samenvatting

Binnen het Waddenkas project wordt gezocht naar duurzame en energiebesparende innovaties voor tuinders in de provincie Fryslân, en één daarvan is het gebruik van LED-belichting in de glastuinbouw. Omdat het gebruik van hoge druk natrium (SON-T) lampen gepaard gaat met hoge energiekosten zoekt men naar goedkopere oplossingen, en belichting met LED-technologie is één daarvan. Het glastuinbouwbedrijf A.C. Hartman BV in Sexbierum heeft verschillende kleuren combinaties van LED-belichting opgehangen in de praktijk en middels metingen van de groei en productie van komkommer, wordt de effectiviteit van LEDs als groeilicht getoetst. De resultaten in dit rapport zijn verkregen door metingen op het bedrijf, waaronder gewasmetingen uitgevoerd door 3 studenten van Van Hall Larenstein in Leeuwarden. E kwadraat advies uit Leeuwarden heeft het projectmanagement uitgevoerd.

Het gewas was een traditioneel teelt van komkommer, ras Venice, belicht met of SON-T belichting, of combinaties van rode, blauwe en/of witte LEDs. De lichtintensiteit van de LEDs, ongeacht de kleurcombinaties, bleek na metingen boven het gewas beduidend lager te zijn dan van de SON-T belichting. In de winter was het effect van de SON-T belichting op het gewas groter dan onder LEDs. De bladtemperatuur en de verticaal kasluchttemperatuur in het gewas was hoger bij SON-T, waardoor het gewas meer gaat verdampen t.b.v. gewascooling. Het aantal nieuwe bladeren, de stengellengte, bladtemperatuur en verticaal temperatuurverloop in het gewas waren lager onder de rood-blauwe LEDs dan de andere LED-behandelingen. In vergelijking met de LED-behandelingen, had komkommer onder de SON-T behandeling een grotere stengeldiameter, bladlengte, bladoppervlak, en bladtemperatuur in het gewas.

In vergelijking met het gewas onder LED-belichting, had het gewas onder SON-T een positief effect op de maximale fotosynthesesnelheid bij licht verzadiging in januari, een effect dat verdween in maart bij toenemende zonlicht. Er was geen verschil tussen de LED-behandelingen onderling in januari, maar de fotosynthesesnelheid bij hoge licht-intensiteiten in de LED-behandelingen verschilde in maart. In maart waren de bladeren in alle behandeling en ontwikkeld onder invloed van toenemende zonlicht, waardoor de overal fotosynthesecapaciteit hoger ligt.

Enkele metingen aan LEDs en SON-T m.b.t. lichthinder werden uitgevoerd, waarbij de berekende ooggevoeligheid van de mens voor verschillende lichtkleuren suggereert dat men meer hinder zou kunnen ondervinden van SON-T overdag, en dat deze verschillen waren veel kleiner 's nachts. Daardoor zou geconcludeerd kunnen worden dat LED-belichting niet meer lichthinder zou veroorzaken dan SON-T.

De efficiëntie en intensiteit van de LEDs is sterk gestegen, de stralingsrichting van de LEDs is aangepast waardoor het licht een meer diffuus karakter heeft gekregen, armatuur en koelingsystemen zijn verbeterd.

Momenteel worden LEDs als groeilicht, dus met een hoge intensiteit, uitgetest bij enkele tuinders en in het onderzoek om de gevolgen ervan te testen voor het kasklimaat, gewasfysiologie, en productie van de teelt. Men is vooral gericht op een aantal specifieke effecten van LED-belichting op het gewas, zoals planttemperatuur, plant ontwikkeling i.r.t. productie en water verbruik verder onderzoeken. Daarna moet men leren hoe om te gaan met deze, voor telers nieuwe gewasreacties op assimilatiebelichting. De verwachtingen zijn hoog gespannen.

1 Inleiding

In het kader van het verder tot ontwikkeling brengen van de economische kernzone Westergozone in Noord West Fryslân, is het project Waddenkas opgezet. Binnen het project wordt gezocht naar duurzame en energiebesparende innovaties voor tuinders in de provincie Fryslân. Het introduceren van LED-belichting in de glastuinbouw is daar onderdeel van. Momenteel gebruikt men uitsluitend hoge druk natrium (SON-T) lampen, die gepaard gaan met hoge energiekosten. Belichting m.b.v. LED-technologie staat momenteel sterk in de belangstelling. Er worden belangrijke voordelen verwacht, waaronder een veel lager energieverbruik en betere stuurbaarheid van de teelt. Gedreven door hoge verwachtingen van de effecten van lichtkleur op de groei en hoge lichtrendementen (tot 4.4 $\mu\text{mol}/\text{sec}/\text{Watt}$), zijn groepen ondernemers in de tuinbouw op experimentele basis gestart met verschillende combinaties van LEDs als groeilicht. Mogelijke voordelen van LEDs in de glastuinbouw zijn energiebesparing bij gelijke fotosynthese, een hoog lichtrendement en vermindering van de lichthinder.

Met metingen op praktijkschaal, gericht op de groei en productie van tuinbouwgewassen, wordt de effectiviteit van LEDs als groeilicht getoetst. Kunnen ze voldoende licht ($\mu\text{mol PAR}$) en kwaliteit (lichtkleur) leveren om kasgewassen zoals komkommer goed te laten groeien en produceren? Het gaat om groei en productie enerzijds, maar ook om het energetische rendement anderzijds. Mogelijke voordelen van LEDs, zoals de hoeveelheid energie verbruik per eenheid PAR licht dat door de lampen geproduceerd wordt en de mogelijkheid dat lichthinder wordt verminderd, worden onderzocht.

In dit rapport worden de resultaten van de metingen en waarnemingen bij A.C. Hartman BV in Sexbierum weergegeven. De resultaten moeten meer inzicht geven in bovengenoemde vragen. De metingen van de LED-belichtingsysteem en in het gewas onder LEDs worden vergeleken met een teelt die met SON-T lampen werden belicht. De resultaten en bevindingen in dit rapport worden besproken binnen het kader van de huidige ontwikkelingen rond LED-belichting in de tuinbouw.

2 Methodologie

Het effect van LED-belichting op gewasgroei energieverbruik en lichthinder is getoetst aan de hand van:

1. Gewasontwikkeling en –fysiologie (bladtemperatuur, bladontwikkeling).
2. Assimilatie mogelijkheden (bladfotosynthese, lichtonderschepping).
3. Energie output (productie).
4. Spectrale samenstelling van het licht en horizontale reductie in lichtintensiteit.

2.1 Proefopzet

De metingen zijn uitgevoerd bij een komkommerbedrijf van het glastuinbouwbedrijf A.C. Hartman BV in Sexbierum. De metingen zijn verricht aan een traditionele teelt komkommer van het ras Venice. Op het bedrijf werden verschillende behandelingen toegepast door belichting boven een aantal rijen van het gewas op te hangen.

Er waren twee proefvelden van 3000 m²; een met SONT en een met LEDs. Het proefveld met LEDs was onderverdeeld in drie vakken met elk een specifieke combinatie van rode, blauwe en/of witte LEDs (Figuur 2 en 3). De LEDs bevonden zich in waterdichte 13,5 meter lange ‘stangen’. Aan het begin van het experiment hingen de LED-stangen net boven de kop van het gewas, maar na verloop van tijd groeide het gewas over de LED-stangen heen (Figuur 1). De LED-verlichting was geleverd door het bedrijf FlowMagic.



Figuur 1. De planten groeien over de belichting heen.

In het noordoosten van de kas lag een loods die bij daglicht een slagschaduw veroorzaakte op beide proefvelden (Figuur I-1, appendix I).

Alle behandelingen waren van elkaar afgeschermd door middel van verticale plastic doeken tussen knoppen en goot. Deze doeken hadden een minimale invloed op het klimaat, aangezien de luchtuitwisseling niet gehinderd werd. Ter isolatie hing er de eerste weken (>20 januari) plastic folie tussen de lampen en het kasdek boven alle proefvelden/vakken.

De gewassenmerk 1 tot en met 5 zijn gemeten tussen 23 december 2008 en 15 januari 2009. In die periode was de stengel richting draad aan het groeien. Na 15 januari was het gewas getopt en begonnen de zijranken te ontwikkelen, waarna de metingen zijn gestopt.

1. Aantal bladeren

Het aantal bladeren is 5 maal geteld.

2. Stengellengte

Stengellengte is 5 maal gemeten. De stengellengte is gemeten tussen steenwol en groeipunt (Figuur 4).



Figuur 4. Het opmeten van de stengellengte.

3. Stengeldiameter

Stengeldiameter is 5 maal gemeten. Aanvankelijk is de stengeldiameter tussen het eerste en tweede blad gemeten. Bij een stengel lengte van 50 cm of meer is de stengeldiameter op 50 cm onder het groeipunt gemeten. De stengeldiameter is gemeten met een schuifmaat (Figuur 5).



Figuur 5. Het opmeten van de stengeldiameter.

4. Bladlengte

Bladlengte is 5 maal gemeten. Bladlengte is langs de hoofdnerf gemeten met behulp van een rolmaat (Figuur 6). Bladlengtes zelf worden niet gerapporteerd. Deze metingen zijn alleen verricht om bladoppervlaktes te kunnen berekenen.



Figuur 6. Het opmeten van de bladlengte.

5. Bladoppervlak

Bladoppervlak is berekend aan de hand van de gemeten bladlengtes met behulp van de volgende vergelijking

$$\text{Log } Y = a + b \log x$$

Y bladoppervlakte in cm^2

a constante, 2.37

b constante, -0.623

x bladlengte in cm

6. Bladtemperatuur

Bladtemperatuur is twee maal gemeten:

1^e Bladtemperatuurmeting:

Datum: Vrijdag 20 februari 2009

Tijdstip: 19.15

Weeromstandigheden: Bewolkt

Straling (9-16 uur): 92 W/m^2

2^{de} Bladtemperatuurmeting:

Datum: Vrijdag 20 maart 2009

Tijdstip: 10.30

Weeromstandigheden: Zonnig

Straling (9-16 uur): 599 W/m^2

2.3 Fotosynthese- en lichtonderscheppingmetingen

1. Fotosynthese

De bladfotosynthese is twee maal gemeten:

1. 19 tot en met 21 januari 2009
2. 30 maart tot en met 1 april 2009

De fotosynthesecapaciteit werd gemeten met een draagbare fotosynthesemeter (LCpro+, ADC, Hoddesdon, Verenigd Koninkrijk) met een bladkamer van 6.25 cm². Het zijn dus geen actuele fotosynthese metingen, want die zijn sterk afhankelijk van de heersende klimaatcondities en variabel gedurende de dag met name als het lichtniveau varieert. Door te meten onder vaste klimaatcondities (ongeveer 800 ppm CO₂, 25°C en 70-90% RH) in de bladkamer en toenemende lichtintensiteiten wordt de fotosynthese *capaciteit* gemeten; dat wil zeggen dat de hoeveelheid CO₂ die het blad opneemt (en vervolgens kan gebruiken om suikers te produceren) gemeten wordt onder deze specifieke condities. Dit maakt het mogelijk om alle metingen gedurende de dag en in de verschillende proefvelden/vakken onderling te vergelijken. De metingen vonden plaats aan een volgroeid blad vlak onder de draad (bovenkant gewas) (Figuur 7).



Figuur 7. Het meten van de bladfotosynthese.

2. Lichtonderschepping

Om lichtonderschepping door het gewas te analyseren is de lichtintensiteit langs de verticale as van het gewas gemeten. Metingen zijn uitgevoerd op een bewolkte dag (5 februari 2009) met behulp van een Sunscan Canopy analysis systeem van Delta-T Ltd., UK. De lichtstok heeft een lengte van 75 cm en werd dwars in de rij gestoken. Tussen de bovenkant van het gewas en de steenwolmat is op elke 25 cm gemeten. Elke meting is individueel geïjkt met een parallel verrichte referentiemeting van de lichtintensiteit boven het gewas.

De data zijn geanalyseerd met behulp van Genstat versie 11, Mixed Models voor herhaalde metingen.

2.4 Energiemetingen

Om de energiebalansen te kunnen vergelijken hadden wij de volgende gegevens nodig:

1. Lamp efficiëntie (μmol PAR/W)
2. Energie efficiëntie (kg vruchten/W)

1. Lamp efficiëntie

Flow-Magic heeft ons geen data kunnen verstrekken over lampefficiëntie. Om inzicht te krijgen in de energiebalansen hebben wij gebruik gemaakt van expert knowledge en data uit andere projecten.

2. Energie efficiëntie

Energie efficiëntie wordt onder andere berekend op basis van de energie-input in de lampen. Aangezien we geen informatie hebben gekregen op dat vlak kunnen we enkel de productie rapporteren. De productie wordt gerapporteerd in stuks per m². Vruchten zijn waarschijnlijk geoogst bij een gemiddeld gewicht van 450 gram.

Tijdens de metingen op 19-21 januari viel het op dat er beduidend grotere komkommers aan de planten onder Son-T belichting dan aan de planten onder LED-belichting hingen.

2.5 Lichthindermetingen

Er zijn twee soorten lichtmetingen uitgevoerd:

1. Horizontale reductie in lichtintensiteit
2. Lichtspectrum

Horizontale reductie in lichtintensiteit

De horizontale reductie in lichtintensiteit is langs een rechte lijn gemeten. Om te voorkomen dat daglicht de metingen zou beïnvloeden, zijn de metingen 's nachts verricht. Tijdens de metingen stonden alleen de lampen/LEDs aan. Metingen zijn uitgevoerd met: 1) een luxmeter van BBC Goerz Metrawatt; 2) een LiCor PAR meter ; en 3) een LI-200SA pyranometer sensor. De lichtintensiteit is, beginnend onder de lampen, over een afstand van 5 meter gemeten met tussenafstanden van een meter. De meting zijn uitgevoerd in het midden van een meetpad op 20 cm onder de draad, oftewel 20 cm onder de LED-stangen en ca. 200 cm onder de SON-T lampen.

Lichtspectrum

De spectra van individuele SON-T lampen LEDs is 's nachts gemeten. Wij rapporteren de spectra voor een SON-T lamp en een rode, witte en blauwe LED. Metingen zijn uitgevoerd met behulp van een LICOR 1800. Tijdens de metingen werd de lamp/LED afgeschermd van andere lampen in hetzelfde proefveld/vak /LEDs. De verlichting van de andere naastgelegen proefvakken werd daarbij tijdelijk uitgeschakeld. Ooggevoeligheid voor de gemeten spectra is met behulp van twee tabellen (Schubert, 2007), gebaseerd op de CIE 1978 formule en de CIE 1951 formule, uitgerekend.

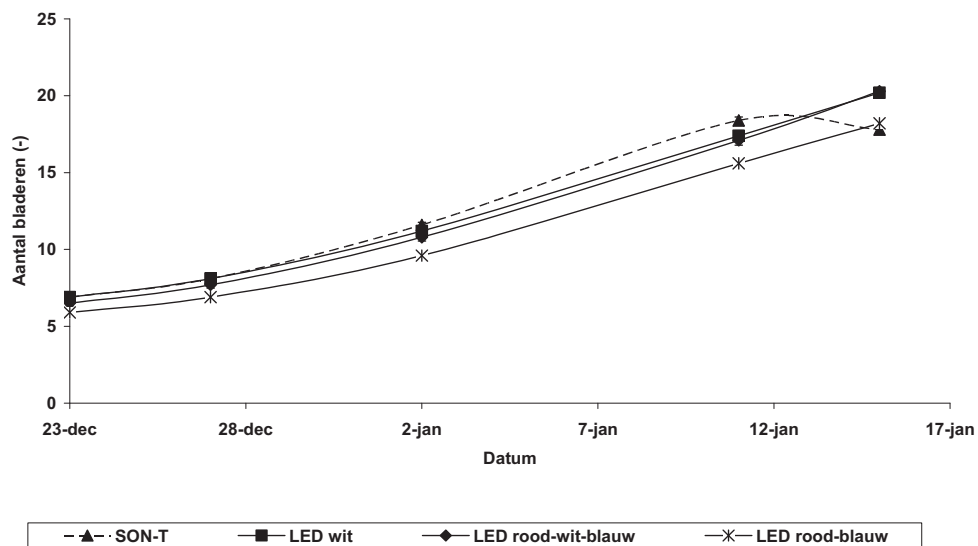
3 Resultaten

3.1 Gewasgroei

3.1.1 Aantal bladeren

Er is een verschil waargenomen in bladaantal tussen de verschillende LEDcombinaties en tussen SON-T en de rood-blauwe LEDcombinatie (Figuur 8). Planten die werden belicht met de rood-blauwe LEDcombinatie hadden gemiddeld 1 tot 2 bladeren minder per plant.

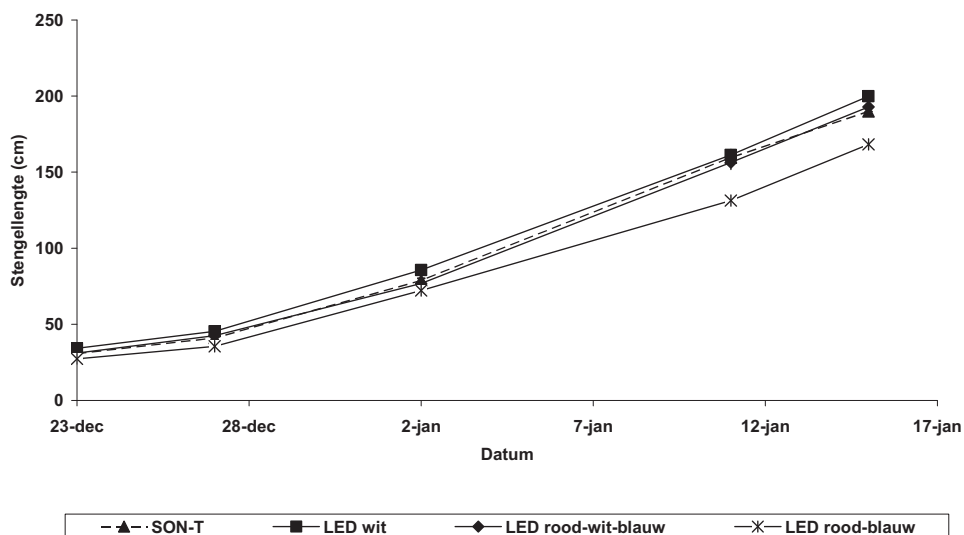
Opvallend is een afname in gemiddeld aantal bladeren bij de planten die zijn belicht met SON-T in de laatste week voordat het gewas aan de draad kwam. Deze bladafname is mogelijk het gevolg van het eerder toppen van de planten onder SON-T belichting, omdat deze planten iets sneller groeiden.



Figuur 8. Gemiddeld aantal bladeren per plant voor de verschillende lichtbehandelingen. Verticale lijnen geven de standard error aan.

3.1.2 Stengellengte

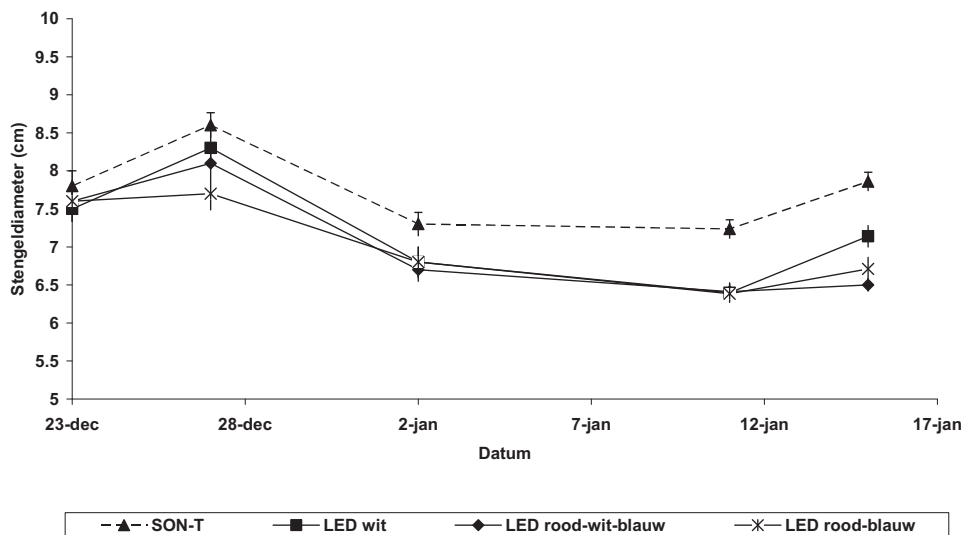
Er is een verschil waargenomen in stengellengte bij planten die werden belicht met de rood-blauwe LEDcombinatie (Figuur 9). De planten hadden een toenemende groeiachterstand op de planten die werden belicht met enkel witte LEDs of de rood-wit-blauwe LEDcombinatie. Er is geen verschil waargenomen in stengellengte tussen SON-T en LED-belichting.



Figuur 9. Gemiddelde stengellengte voor de verschillende lichtbehandelingen. Verticale lijnen geven de standard error aan.

3.1.3 Stengeldiameter

De planten belicht met SON-T hebben gemiddeld een dikkere stengel dan de planten die worden belicht met LEDs en dat verschil wordt groter met de tijd (Figuur 10). Voor wat betreft planten onder LEDs, onder witte LEDs hadden die een langere stengel medio januari dan de planten die werden belicht met de rood-wit-blauwe of de rood-blauwe LEDcombinatie.

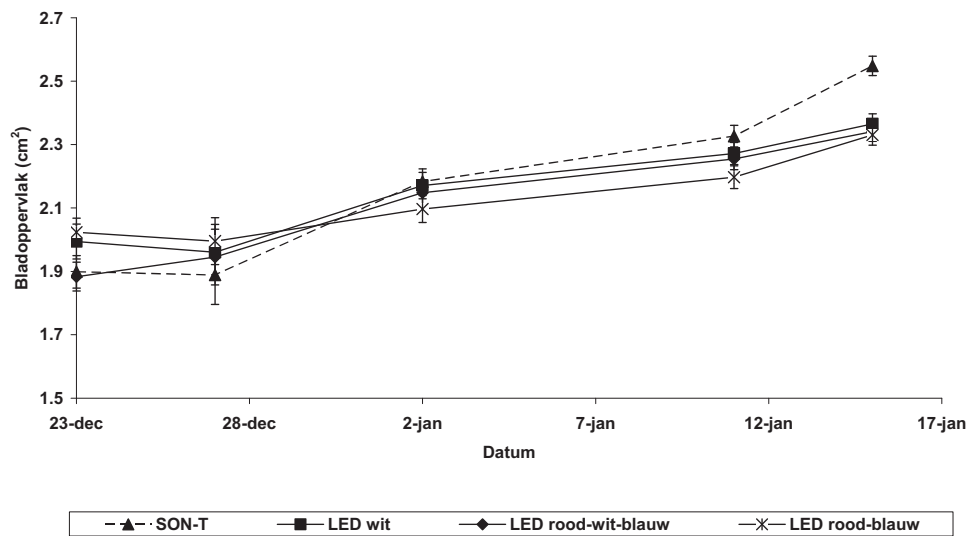


Figuur 10. Gemiddelde stengeldiameter voor de verschillende lichtbehandelingen. Verticale lijnen geven de standard error aan.

3.1.4 Bladoppervlak

De bladoppervlak van planten onder SON-T belichting hadden gemiddeld een groter bladoppervlak dan de bladeren id werden met LEDs belicht (Figuur 11). Er is geen verschil waargenomen in bladoppervlak tussen de verschillende

LEDcombinaties. Het blad onder SON-T belichting is waarschijnlijk groter geworden tijdens de ontwikkeling omdat die onder een hogere lichtintensiteit zijn ontwikkeld.



Figuur 11. Gemiddeld bladoppervlak per blad voor de verschillende lichtbehandelingen. Verticale lijnen geven de standard error aan.

3.1.5 Bladtemperatuur

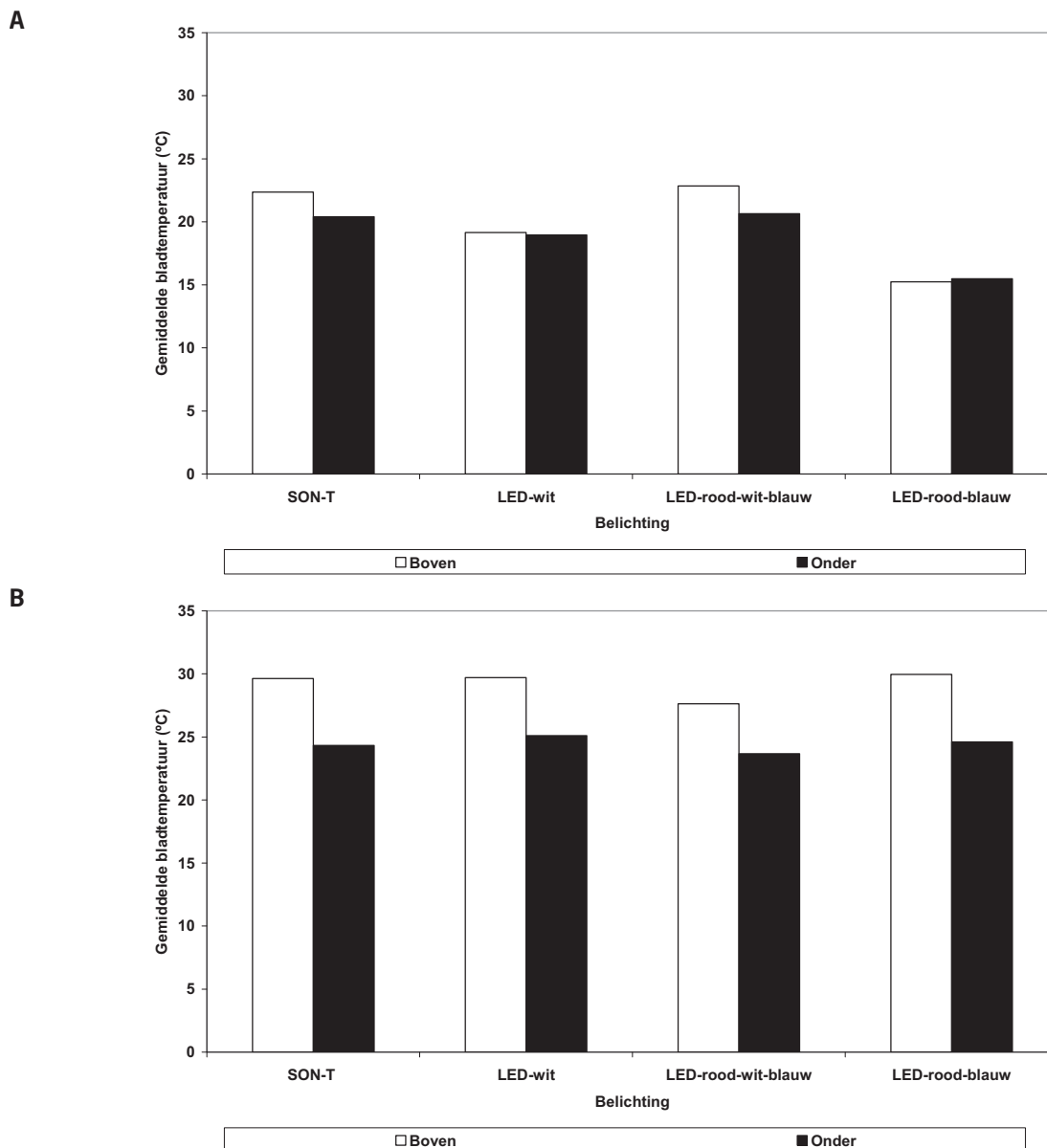
Op 20 februari is er een verschil waargenomen in bladtemperatuur tussen de verschillende LEDcombinaties (Figuur 12A). Planten die werden belicht met de rood-wit-blauwe LEDcombinatie hadden gemiddeld een hogere bladtemperatuur dan de planten die werden belicht met enkel witte LEDs of de rood-blauwe LEDcombinatie. De bladtemperatuur was mogelijk hoger onder rood-wit-blauwe LED-verlichting, omdat deze combinatie relatief veel blauwe en witte LEDs bevat. Blauw en wit licht hebben een lagere golflengte dan rood licht en volgens de Planck-Einstein vergelijking heeft een foton met een lagere golflengte een hogere energie. Die energie wordt bij absorptie door de plant onder andere omgezet in warmte.

Op 20 februari is er ook een verschil waargenomen in verticaal bladtemperatuurverloop tussen de verschillende LEDcombinaties. Planten die werden belicht met de rood-wit-blauwe LEDcombinatie hadden een verticaal temperatuurverloop, in tegenstelling tot de planten die werden belicht met enkel witte LEDs of de rood-blauwe LEDcombinatie. Waarschijnlijk was bij de witte LEDs en de rood-blauwe LEDcombinatie de luchtcirculatie voldoende om de temperatuurverschillen op te heffen.

Op 20 februari is er geen verschil waargenomen in bladtemperatuur tussen SON-T en rood-wit-blauwe-LED-belichting, maar er is wel een verschil waargenomen in bladtemperatuur tussen SON-T, witte- en rood-blauwe-LED-belichting. Bladtemperatuur houdt verband met de chemische en fysische reactiesnelheden in het blad. De verhoging in bladtemperatuur die wordt veroorzaakt door SON-T en rood-wit-blauwe-LED-belichting leidt tot een snellere onderhouds- en groeiademhaling.

Op 20 maart is er geen verschil waargenomen in bladtemperatuur of verticaal bladtemperatuurverloop tussen de verschillende LEDcombinaties en tussen SON-T en LEDs (Figuur 12B). Blijkbaar heeft de toenemende hoeveelheid natuurlijk licht het belichtingseffect op de bladtemperatuur opgeheven.

Kantekening bij deze resultaten is het verschil in meettijdspit en de weercondities tijdens de metingen op 20 februari en 20 maart. Deze verschillen kunnen effect hebben op bladtemperatuur metingen.



Figuur 12. Gemiddelde bladtemperatuur boven en onder in het gewas voor de verschillende lichtbehandelingen. (A) metingen op 20 februari, (B) metingen op 20 maart.

1^e Bladtemperatuurmeting:

Datum: Vrijdag 20 februari 2009
 Tijdstip: 19.15
 Weeromstandigheden: Bewolkt
 Straling (9-16 uur): 92 W/m²

2^{de} Bladtemperatuurmeting:

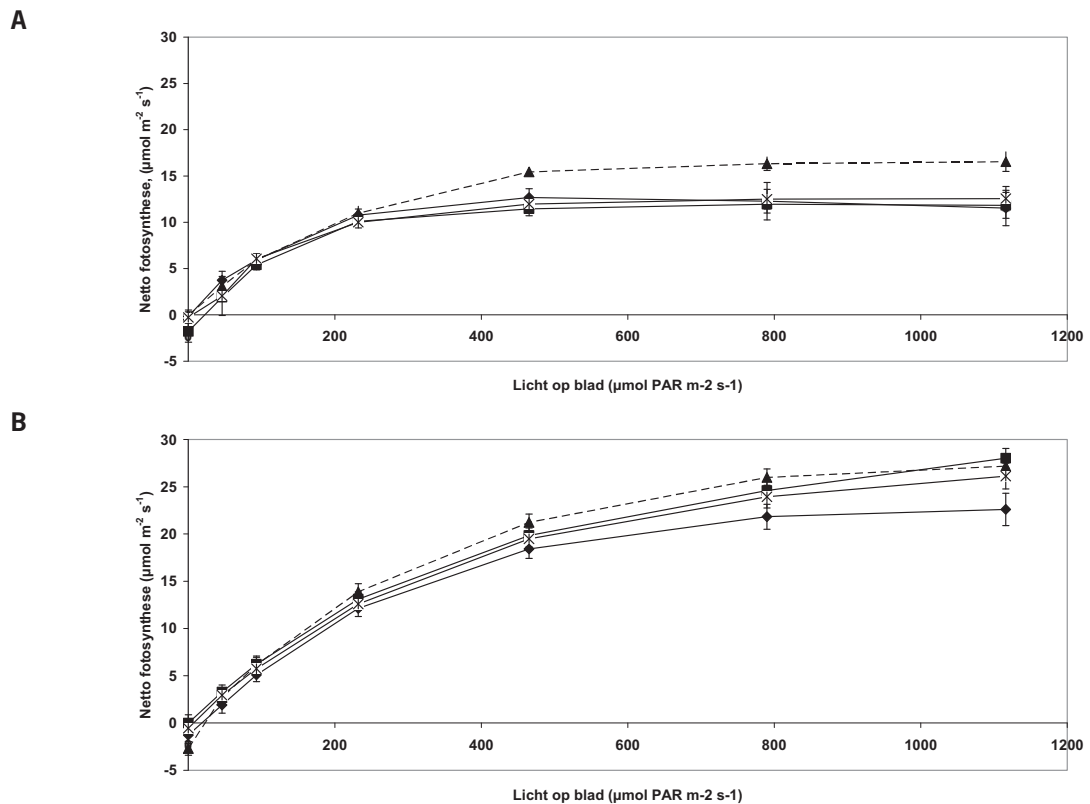
Datum: Vrijdag 20 maart 2009
 Tijdstip: 10.30
 Weeromstandigheden: Zonnig
 Straling (9-16 uur): 599 W/m²

3.2 Fotosynthese en lichtonderschepping

3.2.1 Fotosynthese

Eind januari was de fotosynthese-capaciteit bij lichtintensiteiten boven de $400 \mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$ hoger bij planten die met SON-T werden belicht. (Figuur 13A) Eind maart was dat verschil weer opgeheven (Figuur 13B). Waarschijnlijk is het verschil in netto fotosynthese-capaciteit tussen SON-T en LEDs met de tijd verdwenen door de toename in natuurlijke lichtintensiteit; in januari was het effect van de lampen veel groter, omdat er minder natuurlijk zonlicht was en omdat het zonlicht deels werd tegengehouden door het plastic folie dat tussen het kasdek en de lampen hing om condensvorming te voorkomen. Het verschil in netto fotosynthese tussen SON-T en LEDs eind januari komt overeen met het verschil in stomataire geleidbaarheid (Figuur I-2, appendix I), die laat zien dat de huidmondjes open waren.

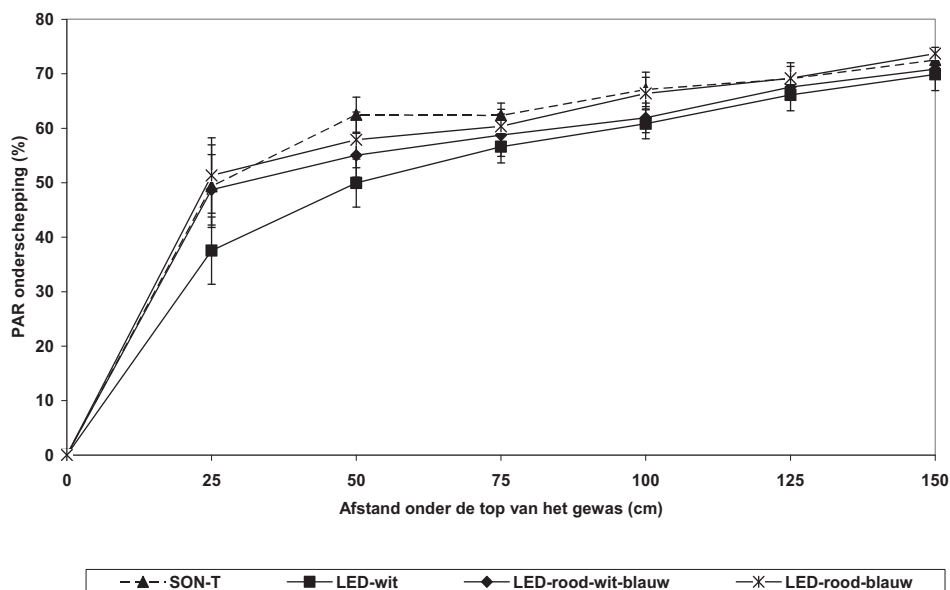
Eind januari was er geen verschil geconstateerd tussen de LED-combinaties onderling. Eind maart was de fotosynthesesnelheid bij lichtintensiteiten boven de $1000 \mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$ lager bij planten die met de rood-wit-blauwe LED-combinatie werden belicht.



Figuur 13. Gemiddelde bladfotosynthese-capaciteit bij toenemende lichtintensiteit voor de verschillende lichtbehandelingen. Verticale lijnen geven de standard error aan. Netto fotosynthese werd gemeten aan volgroeid blad vlak onder de draad. (A) Metingen eind januari, (B) metingen eind maart.

3.2.2 Lichtonderschepping

Er is weinig verschil waargenomen in lichtonderschepping tussen de verschillende het gewas onder de LED-combinaties en de SON-T (Figuur 14). Analyse van de data heeft aangetoond dat er geen (significant) verschil was in lichtonderschepping per meetpunt tussen de verschillende lichtbehandelingen, al lijkt de lichtonderschepping van planten onder witte LEDs hoger te zijn in de bovenste deel van het gewas.



Figuur 14. Gemiddelde PAR lichtonderschepping langs de verticale as van het gewas, van boven naar beneden, voor de verschillende lichtbehandelingen. Verticale lijnen geven de standard error aan.

3.3 Energiebalans

3.3.1 Lamp efficiëntie

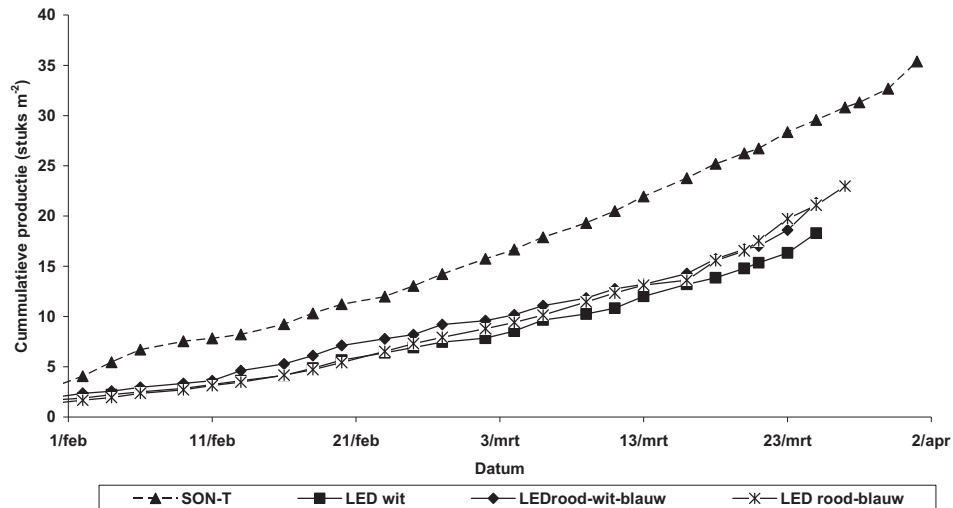
De lamp efficiëntie kon niet berekend worden, omdat de benodigde data niet beschikbaar werden gesteld door de lampenleverancier.

3.3.2 Energie efficiëntie

De energie efficiëntie werd niet bepaald; wel werd de productie in de tijd gerelateerd aan de lichtbron. Productie wordt weergegeven in aantal vruchten. Naar verwachting lag het gemiddelde vruchtgewicht tussen de 400 en 450 gram. Vruchten die niet voldeden aan A-kwaliteit eisen zijn niet meegenomen in de tellingen.

De productie was hoger onder SON-T dan onder LED-belichting (Figuur 15). Dit verschil is waarschijnlijk direct gerelateerd aan het verschil in lichtintensiteit.

De gemeten meerproductie ten opzichte van onbelichte planten is bij SON-T positief en lijkt bij LEDs negatief te zijn (Figuur I-3, appendix I). Dit betekent echter niet dat LEDs een negatief effect hebben op productie. De LEDs behandelingen stonden deels in de schaduw van de bedrijfshal, die kennelijk zoveel zonlicht onttrok aan het gewas dat er een verschil t.o.v. de onbelichte teelt is opgetreden.



Figuur 15. Productie (tellingen) van kwaliteit A vruchten voor de verschillende LED-behandelingen en SON-T (cv. Venice).

3.4 Lichthinder

3.4.1 Horizontale reductie in lichtintensiteit

Er is een groot verschil waargenomen in het horizontale reductie in lichtintensiteit tussen de LEDcombinaties en de SON-T lampen (Tabel 2). Omdat de intensiteit van de LEDs t.o.v. SON-T een factor 100 verschilt, is het horizontaal verloop van de lichtintensiteit is bij de LEDcombinaties niet relevant voor lichthinder vragen (Tabel 1).

Het verschil in horizontale reductie in lichtintensiteit tussen SON-T en LEDs levert ons wel interessante informatie op over het verschil in lichtperceptie tussen planten en mensen (Tabel 2). Op 4 meter afstand van de lampen is het verschil tussen het bruikbare licht voor de planten (PAR) en het zichtbare licht voor mensen (LUX) veel groter bij de LED-combinaties dan bij SON-T. Dit verschil lijkt niet afhankelijk te zijn van lichtintensiteit en is dus relevant voor lichthinder.

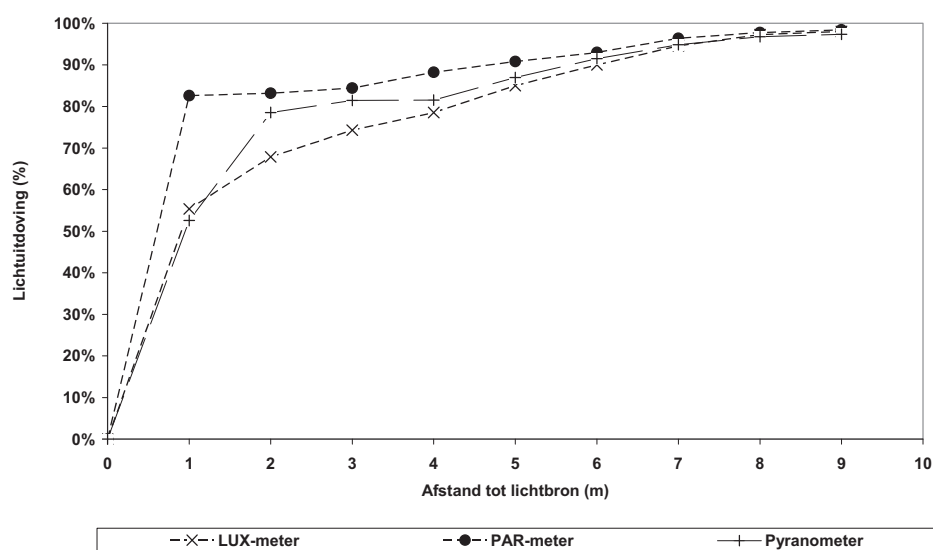
In Figuur 16 is de horizontale reductie in lichtintensiteit voor enkel SON-T is weergegeven in drie curven: 1) LUX in lux, de ooggevoeligheid van de mens (380-770 nm); 2) PAR in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, de fotosynthesegevoeligheid van de plant (400-700 nm); 3) globale straling in Watts/m²/s volgens de pyranometer c.q. solarimeter (400-1100 nm). Uit deze figuur blijkt dat LUX-metingen, voor menselijke ooggevoeligheid, niet geschikt zijn om uitspraken te doen over PAR-uitdoving en dat PAR-metingen, voor chlorofyl gevoeligheid, niet geschikt zijn om uitspraken te doen over LUX-uitdoving.

Tabel 1. Lichtintensiteiten van de LED-combinaties ten opzichte van SON-T. Lichtintensiteiten, gemeten op 0 meter van de lampen, zijn genormaliseerd ten opzicht van SON-T.

Lichtbron	LUX	$\mu\text{mol PAR/m}^2/\text{s}$	$\text{W/m}^2/\mu\text{A}$
SON-T	1400	34	12
SON-T	100.0%	100.0%	100.0%
LED-wit	0.7%	0.5%	0.3%
LED-rood-wit-blauw	0.5%	0.3%	0.2%
LED-rood-blauw	0.6%	1.1%	0.6%

Tabel 2. Lichtintensiteit op 4 meter van de lamp t.o.v. metingen op 0 meter (onder de lampen).

Lichtbron	LUX	$\mu\text{mol PAR/m}^2/\text{s}$	$\text{W/m}^2/\mu\text{A}$
SON-T	15%	9%	13%
LED-wit	50%	20%	20%
LED-rood-wit-blauw	57%	30%	29%
LED-rood-blauw	33%	9%	9%

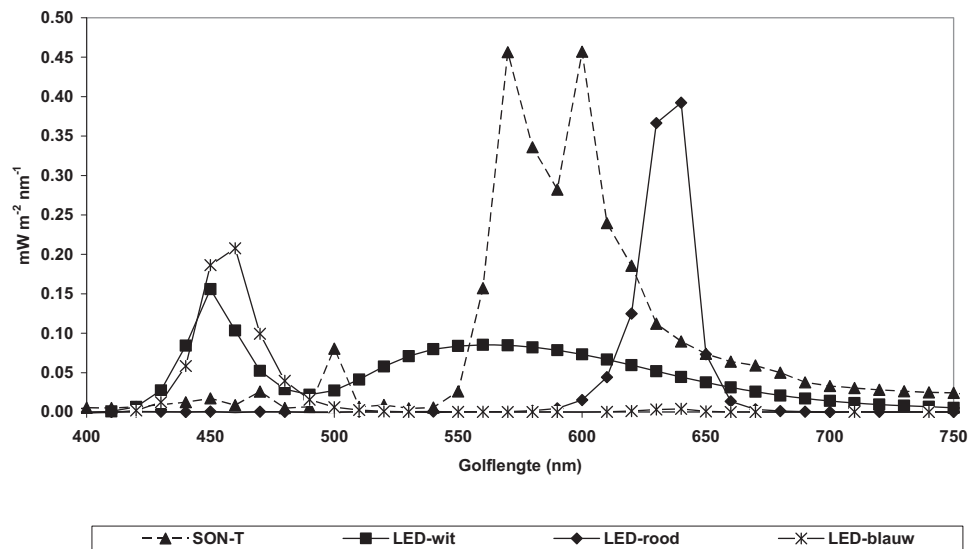


Figuur 16. Horizontale reductie in lichtintensiteit (%) voor SON-T gemeten met een LUX-, PAR- en Pyranometer op oplopende afstand van de lichtbron.

3.4.2 Spectrum

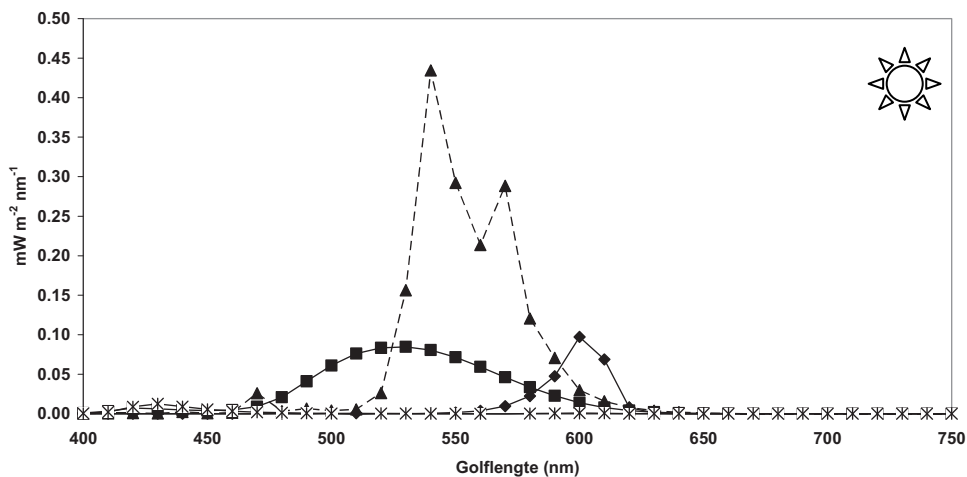
De spectra van de LEDs vallen volledig binnen de PAR range, dus tussen 400 en 700 nm (Figuur 17). PAR licht is het licht dat een gezond blad kan benutten voor fotosynthese. De straling van SON-T lampen met golflengtes boven de 700 nm bestaat uit 'near infrared radiation' (NIR) wat zorgt voor opwarming van het gewas. NIR is voor de tuinder energie-inefficiënt, maar het veroorzaakt geen lichthinder, omdat het menselijk oog alleen licht tussen de 380 en 770 nm kan waarnemen. Het voor de mens zichtbare licht van zowel SON-T- als LED-belichting kan dus volledig geabsorbeerd worden door een gezond blad.

Lichthinder is een subjectief begrip: men kan licht waarnemen, en men kan er last van hebben. Onze resultaten gaan enkel over waarneming, c.q. ooggevoeligheid, niet over last. De International Commission on Illumination (CIE) heeft een aantal referentie formules opgesteld waarmee de relatieve ooggevoeligheid van de mens voor kleuren wordt beschreven. Wij hebben twee tabellen gehanteerd, die op deze formules gebaseerd zijn; een tabel voor de relatieve ooggevoeligheid bij hoge lichtintensiteiten c.q. fotopisch zicht en een tabel voor de ooggevoeligheid bij lage lichtintensiteiten c.q. scotopisch zicht (Schubert, 2007). Door de relatieve ooggevoeligheden te vermenigvuldigen met de door ons gemeten spectra, hebben wij een beeld gekregen van de ooggevoeligheid voor SON-T, rode-, witte- en blauwe LED-verlichting overdag en 's nachts. Overdag is de mens het meest gevoelig voor SON-T licht en in mindere mate voor wit- en rood LED-licht (Figuur 18A). De ooggevoeligheid voor blauw LED-licht is bij hoge lichtintensiteiten minimaal. 's Nachts is de mens het meest gevoelig voor wit LED en in mindere mate voor SON-T en blauw LED-licht (Figuur 18B). De ooggevoeligheid voor rood LED-licht is bij lage lichtintensiteiten minimaal.

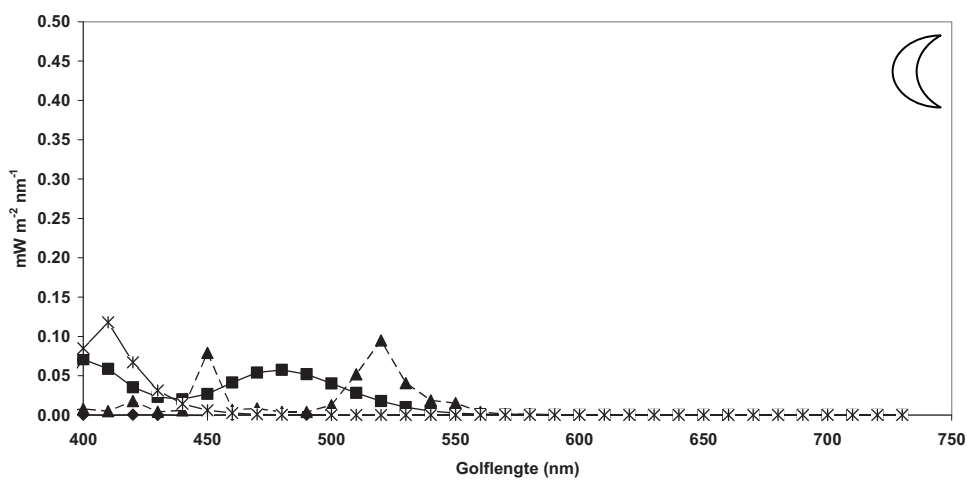


Figuur 17. Lichtintensiteit ($mW m^{-2} nm^{-1}$) bij oplopende golflengtes voor de verschillende lampen/LEDs.

A



B



Figuur 18. Lichtintensiteit ($\text{mW m}^{-2} \text{nm}^{-1}$) bij oplopende golflengtes voor de verschillende lampen/LEDs. (A) Berekende ooggevoeligheid voor SON-T, wit-, rood- en blauw LED-licht bij hoge lichtintensiteit; fotopisch zicht (gebaseerd op de door ons gemeten spectra en de CIE formule uit 1978), (B) Berekende ooggevoeligheid voor SON-T, wit-, rood- en blauw LED-licht bij lage lichtintensiteit; scotopisch zicht (gebaseerd op de door ons gemeten spectra en de CIE formule uit 1951)

4 Conclusies

De onderstaande conclusies, getrokken uit metingen en observaties in de praktijk, moeten gezien worden in het kader van een aantal randvoorwaarden en beperkingen die opgelegd zijn bij de opzet van het project. Het betreft een vooraf vastgelegde praktijksituatie, waarin de proefvelden (behandelingen) onderdeel zijn van een grotere kasteelt en in zekere mate ook afhankelijk daarvan zijn. De proefvelden bevatten een aantal proeftechnische onvolkomenheden, waarvan de grootste is de plaatsing in de kas t.o.v. de bedrijfshal wat een invloed van de hoeveelheid zonlicht op het gewas betekent. Hierdoor krijgen de proefvakken met LEDs minder zonlicht dan de onbelichte en met SON-T belichte delen van de kas.

4.1 Gewasgroei

Tussen de verschillende LED-behandelingen werd een verschil in bladaantal, stengellengte, bladtemperatuur waargenomen aan het begin van het seizoen en vertikaal temperatuurverloop in het gewas aan het begin van het seizoen. Er was geen correlatie tussen de verschillende metingen; het gewas reactie was niet gelijk bij alle LED-behandelingen.

De bladtemperatuur en vertikaal temperatuurverloop in het gewas was lager bij de LED-behandelingen dan bij SON-T. De parameters bladaantal, stengellengte, bladtemperatuur en vertikaal temperatuurverloop in het gewas waren lager onder de rood-blauwe LED-behandeling dan de andere behandelingen.

Tussen de SON-T en LED-behandelingen was er een verschil in bladaantal, stengeldiameter, bladoppervlakte, bladtemperatuur aan het begin van het seizoen en verticale temperatuurverloop in het gewas aan het begin van het seizoen. In vergelijking met de gemiddelde LED-behandeling had de SON-T behandeling een positief effect op: stengeldiameter, bladlengte, bladoppervlak, bladtemperatuur en vertikaal temperatuurverloop in het gewas.

4.2 Fotosynthese en lichtonderschepping

Tussen de verschillende LED-behandelingen was er een verschil in netto fotosynthesesnelheid boven de 1000 $\mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$. De rood-wit-blauwe LED-behandeling had eind maart een negatief effect op de maximale fotosynthesesnelheid bij lichtverzadiging. Tussen de SON-T en LED-behandelingen was er een verschil in netto fotosynthesesnelheid boven de 400 $\mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

In vergelijking met de gemiddelde LED-behandeling had de SON-T behandeling een positief effect op de maximale fotosynthesesnelheid bij licht verzadiging eind januari. Er was geen verschil in de lichtonderschepping tussen de behandelingen.

4.3 Energiebalans

Tussen de verschillende LED-behandelingen en tussen de SON-T behandeling en de gemiddelde LED-behandeling was er een verschil in cumulatieve meerproductie. Dit verschil kan veroorzaakt zijn door de slagschaduw van de bedrijfshal en de lichtconstructies.

4.4 Lichthinder

Er was een verschil in de horizontale reductie in lichtintensiteit tussen de verschillende LED-behandelingen en tussen de SON-T behandeling, wat in principe tot lichthinder kan leiden. Op 4 meter afstand tot de lampen is het verschil

tussen het zichtbare licht voor de planten (PAR) en het voor mensen (LUX) veel groter bij de LED-combinaties dan bij SON-T.

Tussen de verschillende soorten lichtmeting die in de SON-T behandeling zijn uitgevoerd, was er een verschil in het verloop van de horizontale reductie in lichtintensiteit. Men dient een lichtmeting te kiezen die bij de onderzoeksvraag past; lux voor mensen en PAR voor planten. De menselijke ooggevoeligheid is bij daglicht minimaal voor blauwe LEDs en in het donker minimaal voor rode LEDs.

Om lichthinder in de praktijk te verminderen heeft men een aantal mogelijkheden: men kan de hoeveelheid strooilicht verminderen en men kan ervoor zorgen dat het strooilicht minder irriteert.

Lichthinder buiten de kas kan men onder andere verminderen door te schermen. Het vergt veel kennis om het optimale schermregime te bepalen. Men moet rekening houden met de vocht- en temperatuurhuishouding in de kas. SON-T verlichting heeft een laag rendement en produceert daardoor veel warmte. Met SON-T verlichting moet het schermregime afgestemd worden op het lichtregime. LEDs hebben in deze een groot voordeel. LEDs produceren hun warmte voornamelijk aan de bovenkant van de armatuur en deze warmte vrij gemakkelijk gekoeld worden afgevoerd. Dit koelen van LEDs levert in de kas twee voordelen op: ten eerste veroorzaken de gekoelde LEDs geen temperatuurstijging onder het scherm en ten tweede kunnen de LEDs veel dicht op of zelfs in het gewas hangen waardoor de lichtweerkaatsing naar boven toe minder is.

Lichthinder in de kas kan men onder andere verminderen door zo min mogelijk lichtstraling buiten het gewas te veroorzaken. Ook hier bieden LEDs een voordeel doordat ze heel erg dicht op of in het gewas kunnen hangen. Licht zal daardoor voornamelijk binnen het gewas blijven.

Lichthinder binnen en buiten de kas kan men ook verminderen door specifieke kleuren te gebruiken. LEDs bieden het voordeel dat ze monochromatisch licht produceren, waardoor de tuinder zijn/haar licht gericht kan uitkiezen. Als men lichthinder binnen en buiten de kas wil verminderen door specifieke kleuren te gebruiken, dient men rekening te houden met de variabele kleurgevoeligheid van mensen, planten en dieren binnen en buiten de kas. De relatie tussen lichtkleur, lichtintensiteit en irritatie is echter bijzonder complex.

5 **Perspectief**

In 2007 heeft een 'LED-hype' plaats gevonden in Nederland. De commercialisering voor LED-belichting heeft sindsdien een vlucht genomen en prikkelde de ondernemers geest bij veel belichtende tuinders. Men wilde graag LED-belichting zien in de praktijk en (laten) testen boven zijn gewas. Een gevolg hiervan was een snelle start van een heterogene groep van 'praktijkproeven' waarin vaak maar enkele honderden m² met LEDs werden belicht, te midden in een grote kas van 1 ha of groter met SON-T belichting. Deze praktijkproeven werden té snel opgezet, zonder onderlinge afstemming en uitgangspunten. De hoge verwachtingen konden in die situatie helemaal niet worden waargemaakt. Belichtingsystemen verschillen in intensiteit of belichtingsduur, en zijn medebepalend voor het kasklimaat en te nemen teeltmaatregelen voor het gewas. Deze verschillen in kasklimaat en lichtintensiteit onder de toenmalige LED-systemen en de omringende SON-T belichting waren zo groot dat het kleine oppervlak aan gewas belicht met LEDs geconfronteerd werd met het kasklimaat dat bepaald werd door de SON-T dat erboven hing. Kortom, het gewas moest groeien in een kasklimaat dat niet hoorde bij de belichting. De LEDs met een lagere lichtintensiteit konden alleen fungeren als stuurlicht, in tegenstelling tot wat men voor ogen hadden: een grote invloed op de groei en ontwikkeling die bij groeilicht hoort. Inmiddels heeft de technologie in LED-belichting veel progressie gemaakt. De efficiëntie en intensiteit van de LEDs is sterk gestegen, de stralingsrichting van de LEDs is aangepast waardoor het licht een meer diffuus karakter heeft gekregen, armatuur en koelingsystemen zijn verbeterd. En deze technische ontwikkelingen gaan door.

De bevindingen opgedaan bij het glastuinbouwbedrijf A.C. Hartman BV in Sexbierum moeten dan ook gezien worden in dit perspectief. De LEDs die daar zijn geïnstalleerd hadden een veel lagere intensiteit dan de huidige generatie van LEDs. Dat betekent dat de verwachtingen van deze LEDs voor de groei en productie niet erg hoog mogen zijn.

Momenteel worden LEDs als groeilicht, dus met een hoge intensiteit, uitgetest bij enkele tuinders en in het onderzoek om de gevolgen ervan voor het kasklimaat, de teelt en de te nemen teeltmaatregelen. Momenteel wordt een experiment voorbereid waarin het effect van een gelijke intensiteit aan assimilatiebelichting uitgangspunt is. De belichtingsystemen bestaan uit 100% SON-T, 100% LED-belichting, 50% SON-T en 50% LEDs, allemaal als bovenbelichting, en ook een behandeling met 50% SON-T en 50% LEDs, waarbij de LEDs als tussenbelichting. Men wil hierin specifieke effecten op het gewas, zoals planttemperatuur, plant ontwikkeling i.r.t. productie en water verbruik verder onderzoeken. Daarin zullen grote vorderingen worden gemaakt, maar men zal er nog niet zijn. Voordat men weet hoe men telen onder LED-belichting moet om tot een optimaal gewas te komen, zal er nog meerdere experimenten zowel in het onderzoek als in de praktijk moeten plaatsvinden. De verwachtingen zijn hoog gespannen.

6 Referenties

Schubert E.F. 2007.

Light-emitting diodes. Cambridge: Cambridge Univ. Press.

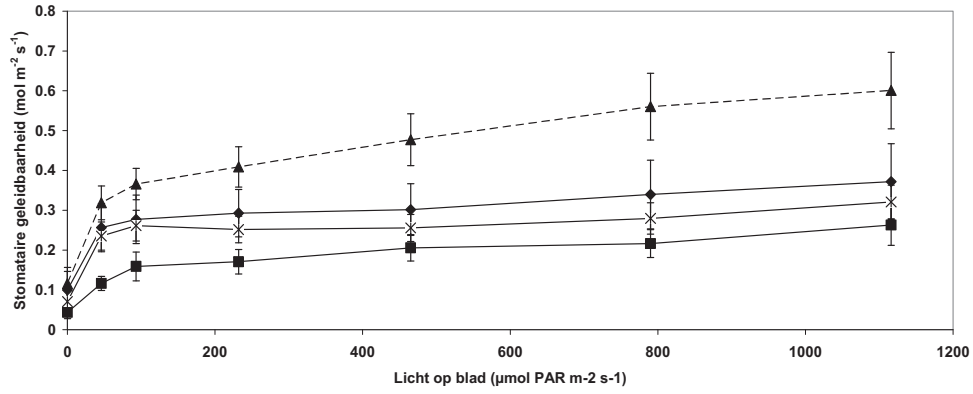
Bijlage I.

Aanvullende informatie

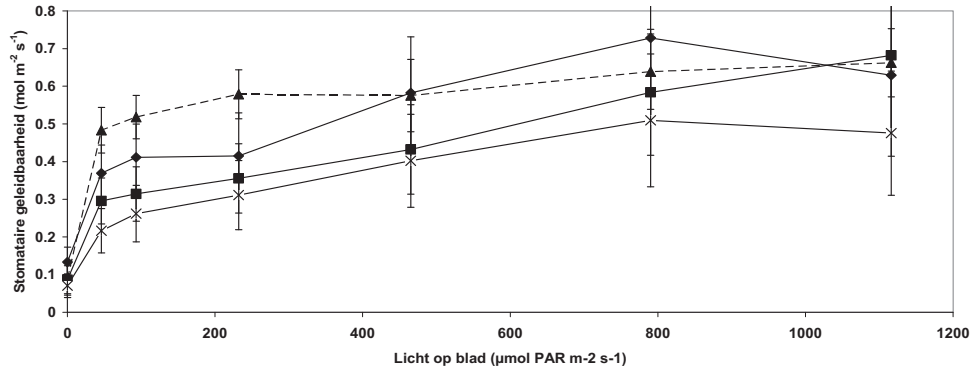


Figuur I-1. Boveraanzicht van de kassen van firma Hartman in Sexbierum. De gekleurde vlakken geven de locatie van de verschillende behandelingen aan. De oppervlaktes van de vlakken zijn niet op schaal. Het grijze vlak links van de weg beslaat het onbelichte proefveld, het rose vlak beslaat het LED-proefveld en het gele vlak beslaat het SON-T proefveld. Rechts van het LEDproefveld en onder het SON-T proefveld, is de bedrijfshal.

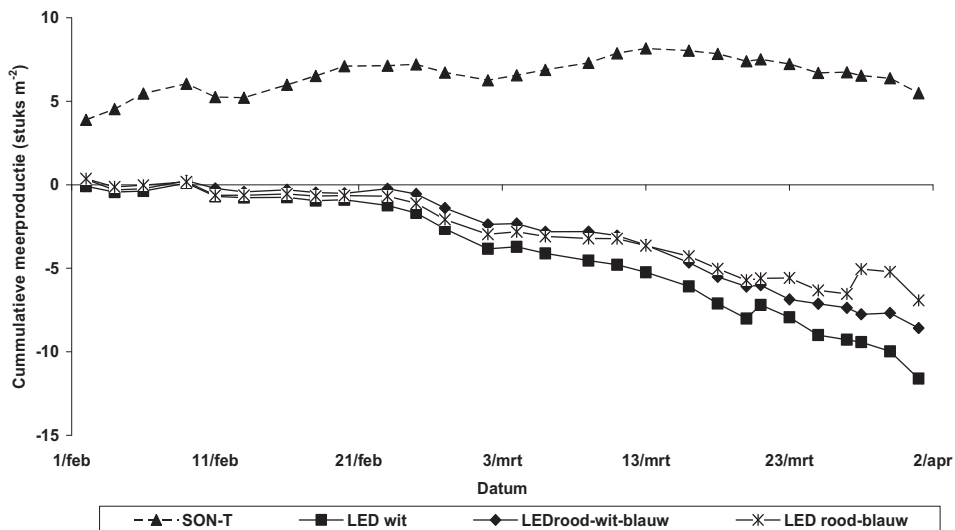
A



B



Figuur I-2. Gemiddelde stomataire geleidbaarheid bij toenemende lichtintensiteit voor de verschillende lichtbehandelingen. X-as: lichtintensiteit in $\mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$, Y-as: stomataire geleidbaarheid in $\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ met standaard error bars. Stomatataire geleidbaarheid, gemeten aan volgroeid blad vlak onder de draad. (A) Eind januari, (B) eind maart.



Figuur I-3. Cumulatieve meerproductie ten opzichte van een onbelicht gewas ten gevolge van de verschillende lichtbehandelingen (cv. Venice). Belangrijk: laat de dubbele lijn boven deze regels staan! Dit is nl. een 'section break' die nodig is om de paginanummering te laten beginnen na de inhoudsopgave.