



Groeilicht met Zonlichtlampen



Wim van Ieperen¹, Sander Hogewoning^{1*}, Ester Meinen²

¹ Wageningen Universiteit, Leerstoelgroep Tuinbouwketen: Wim.vanleperen@wur.nl

² Wageningen UR, Glastuinbouw, Wageningen, the Netherlands

* huidig adres: Plant Lighting, Utrecht, the Netherlands

Juni 2012



© 2012 Wageningen, Wageningen Universiteit, Leerstoelgroep Tuinbouwketens

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 de leerstoelgroep tuinbouwketens aan Wageningen Universiteit.



Dit onderzoek is gefinancierd door het Technologie Programma van het Ministerie van Economische Zaken. Dit project is medegefinancierd is door het Productschap Tuinbouw, en het Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie in het kader van het programma Kas als Energiebron. Co-financiering door Lemnis Lighting B.V. en Plasma International GmbH.



Inhoud

Groeilicht met Zonlichtlampen	1
Samenvatting.....	4
Introductie	7
Fasering van het project	11
Project Resultaten en Discussie	13
Fase 1: Ontwikkeling van een zonlichtspectrum lamp	13
Bepaling referentie zonlichtspectrum	13
Ontwikkeling prototype lamp	14
Technische performance en duurttest van de zonlichtspectrum lamp	15
Conclusies	16
Fase 2: Kleine teeltunits met zonlichtbelichting en leds.....	17
Introductie	17
Resultaten.....	17
Conclusies	20
Fase 3: Pilot experiment bij-belichting bij opkweek tomaat	20
Introductie	20
Materiaal en methoden.....	20
Resultaten en Discussie.....	23
Conclusies	24
Metingen aan het zonlichtspectrum	25
Introductie	25
Materiaal en Methoden	25
Resultaten.....	25
Samenvattende Conclusies.....	28
Aanbevelingen	29
Literatuur.....	30



Samenvatting

Zonlicht is de natuurlijke drijvende kracht voor fotosynthese en daarmee voor alle plantaardige productie. Het is dus niet verwonderlijk dat het functioneren van planten optimaal is aangepast aan het spectrum van zonlicht. In Nederland is zonlicht tijdens grote delen van het jaar (herfst, winter, lente) slechts beperkt beschikbaar. Hierdoor is het zelfs in kassen voor veel soorten onmogelijk om zonder bij belichting met assimilatie lampen het hele jaar rond planten of plantaardige producten te produceren van voldoende kwaliteit. Voor deze bij belichting wordt voornamelijk gebruikt gemaakt van relatief energie-efficiënte SON-T lampen. De verwachting is dat deze assimilatie lamp in de toekomst zal worden vervangen door nog energie-efficiëntere lichtbronnen, zoals bijvoorbeeld leds. Het lichtspectrum (de kleurverdeling) van vrijwel alle assimilatie lampen wijkt sterk af van dat van zonlicht. Dit heeft slechts een beperkt effect op het bladfotosyntheseproses maar kan de ontwikkeling (b.v. bloei) en de morfologie (vorm) van planten sterk beïnvloeden. Ondanks het beperkte effect op het proces van de bladfotosynthese kan de fotosynthese van de hele plant wel sterk beïnvloedt worden. Dit is met name bij jonge planten het geval, waar van zonlicht afwijkende lichtspectra via vormveranderingen de lichtonderschepping sterk beïnvloeden. Omdat bij de productie van kwalitatief hoogwaardige planten controle over groei- en ontwikkelingsprocessen belangrijk is, is kennis over de invloed van het lichtspectrum in de kas op het functioneren van planten essentieel. Het lichtspectrum in kassen is complex omdat het vaak bestaat uit een deel zonlicht en een deel lamplicht, waarbij het relatieve aandeel van zonlicht en lamplicht continue verandert door natuurlijke variatie in zonlicht intensiteit en spectrum. Kennis over de effecten van dit combinatie lichtspectrum in kassen op planten is nu nog ontoereikend om belichting in kassen in de toekomst verder te kunnen optimaliseren. Dit onderzoek geeft daartoe een eerste aanzet.

De afgelopen jaren zijn in het fundamentele onderzoek veel plantenfysiologische mechanismen ontdekt over relaties tussen lichtspectrum als sturende factor van morfologie en ontwikkeling. Dit onderzoek is echter voor het overgrote deel uitgevoerd aan de modelplant *Arabidopsis*, en bovendien onder 100% kunstlicht (TL, SON-T en/of leds). In welke mate bewuste manipulatie van het lichtspectrum in kassen kan worden gebruikt om de productie van commercieel interessante plantensoorten te optimaliseren onder realistische lichtspectra is nog onbekend. Zeker is dat de resultaten van het fundamentele onderzoek door de veelal voor de praktijk onrealistische lichtspectra niet één op één kunnen worden vertaald naar de praktijk in kassen. Om de doorstroming van fundamentele resultaten naar toepassingen in de tuinbouwpraktijk te versnellen is daarom belichting met een zonlichtspectrum in klimaatkamers nodig, aangevuld met SON-T en/of leds. Hiermee kan onafhankelijk van andere klimaatfactoren, het effect van een kaslichtspectrum op vorm, ontwikkeling en productie van relevante kasgewassen worden onderzocht en een belangrijke stap naar versnelde toepassing in de praktijk worden



gemaakt. Lampen met een natuurgetrouw zonlichtspectrum in een voor planten relevant golflengte gebied zijn echter nog niet beschikbaar. Dit project had daarom als een zonlichtspectrum lamp te ontwikkelen voor onderzoeksdoeleinden, en deze toepasbaar te maken in klimaatkamer condities voor een pilot experiment met jonge tomatenplanten (in dit project) en voor een tweetal aanpalende praktijk gerelateerde onderzoeksprojecten (PT13814 “Compacte planten door geïntegreerde groeiregulatie” en PT13846 “Bloei-inductie bij Chrysant onder lange dag”).

In fase 1 van dit project is d.m.v. metingen onder Nederlandse lichtcondities (in september 2009) een referentie zonlichtspectrum vastgesteld. Deze spectrale verdeling wijkt nauwelijks af van een internationaal veel gebruikt standaard spectrum (ASTM). Op basis van het referentiezonlichtspectrum is een zonlichtspectrum lamp ontwikkeld en getest. De lamp produceert licht met een zonlichtspectrum dat vrijwel gelijk is aan natuurlijk zonlicht tussen de voor planten belangrijke golflengten 400 en 750 nm (en ook daarboven, gemeten tot 2500nm). Uit langdurige testen (in fase 2 en 3 van het project) bleek dat de bedrijfszekerheid van de lamp nog niet optimaal is. De lamp bleek echter wel bruikbaar in een onderzoeks-setting met intensieve technische ondersteuning.

In fase 2 is, met behulp van deze zonlichtspectrumlamp aangevuld met SON-T en diverse kleuren leds (rood, ver rood en blauw) tijdelijk een aantal lichtdichte sub-units in een klimaatkamer ingericht ten behoeve van twee gerelateerde praktijk gefinancierde onderzoeksprojecten. De resultaten van deze projecten (PT13814 en PT13814) zijn weergegeven in twee aparte verslagen.

In fase 3 van dit project is een pilot klimaatkamer experiment uitgevoerd waarbij de groei van jonge tomatenplanten is vergeleken bij dezelfde dagelijkse licht som ($12.2 \text{ mol.m}^{-2}.\text{dag}^{-1}$) en belichtingsduur (17 uur), maar onder drie verschillende spectrale lichtbehandelingen die relevant zijn voor Nederlandse kassen in de winter: (1) 100% zonlichtspectrum (controle) (2) 50% zonlichtspectrum en 50% SON-T, en (3) 50% zonlichtspectrum en 50% RB-leds (verdeling 80% rood (640nm) en 20% blauw (450nm)). Uit de resultaten bleek dat gebruik van de zonlichtspectrumlamp morfologisch normale planten oplevert, qua vorm vergelijkbaar met planten onder natuurlijk zonlicht. Deze planten waren minder gedrongen dan gewoonlijk in klimaatkamers en vertoonden ook geen stress verschijnselen (bladvervormingen, epinastie en verkleuringen) die voor plantengroei in klimaatkamers onder kunstlicht vaak kenmerkend zijn. Deze lichte stress verschijnselen traden wel op bij de tomatenplanten die groeiden onder de combinaties van zonlicht met SON-T of RB-leds. De biomassa na 20 dagen groei was onder het zonlichtspectrum ca. 30% hoger dan onder zonlicht met bijbelichting met SON-T, en zelfs ca. 40% hoger dan onder zonlicht met bijbelichting met RB-leds. Aangezien de hogere biomassa onder 100% zonlicht samenging met minder gedrongen planten en een groter bladoppervlak per plant, lijkt een aanzienlijk deel van deze productieverhoging te komen door een betere lichtonderschepping. Via morfologische (vorm) veranderingen werd de productie dus positief beïnvloedt. Ook bleek de groei van dieven (ongewenste



zijscheuten) bij 100% zonlichtspectrum beduidend lager te zijn dan bij bijbelichting met SON-T of RB-leds, hetgeen in de praktijk naast een positief effect op de productie ook kan leiden tot een gereduceerde arbeidsbehoefte. Positieve effecten van zonlichtbelichting t.o.v. SON-T en RB-leds zijn ook gemeten in aanpalende projecten met Chrysant, Komkommer en Petunia.

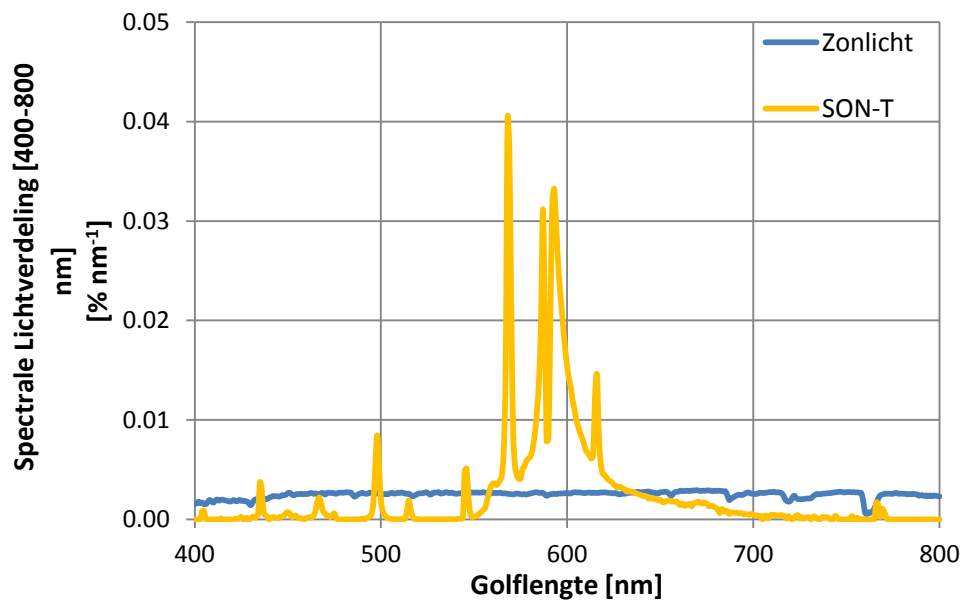
Gedurende de hele looptijd van dit project is gewerkt aan een meetsysteem om de spectrale lichtverdeling van natuurlijk zonlicht jaar-rond onder Nederlandse condities te meten. De aanwezige hardware (spectrofotometers) en software bleek na lang testen niet geschikt en ook niet aanpasbaar om dit geautomatiseerd uit te voeren. Ontwikkeling van nieuwe hard- en software was vanuit plannings- en financieel oogpunt niet mogelijk binnen de looptijd van dit project maar is inmiddels wel uitgevoerd buiten dit project. Resultaten hiervan zijn in dit verslag opgenomen en laten zien dat de fractie ver-rood licht in zonlicht gedurende de hele dag aanzienlijk was. Hierdoor is de PSS-waarde, een lichtspectrum afhankelijke maat voor het fytochroom evenwicht (actief/inactief) in de plant, altijd lager dan de PSS-waarde van veel assimilatie lampen (SON-T en leds). Het fytochroom-evenwicht is van belang omdat het wordt gezien als een belangrijke factor bij het sturen van morfologische- en ontwikkelingsprocessen in de plant. De dagelijkse en seizoen afhankelijk variatie in PSS-waarde van natuurlijk zonlicht bleek veel kleiner dan de variatie die veroorzaakt wordt door bij-belichting.

Uit dit onderzoek kan geconcludeerd worden dat er nog aanzienlijke ruimte is voor verbetering van het spectrum van assimilatie(groei)lampen bij de opkweek van jonge planten. Dit kan direct bijdragen aan een hogere energie efficiëntie van bijbelichting in kassen. De sterke effecten van het spectrum van assimilatielicht op vorm en ontwikkeling van planten, alsmede de toekomstige mogelijkheden om m.b.v. led belichting het zonlichtspectrum in een kas actief te beïnvloeden, kan tevens van grote waarde zijn bij het bereiken van bepaalde gewas-specifieke doelen (productie verhoging, compactheid, bloei-regulatie). Toepassing van een zonlichtspectrum lamp, zoals in dit project ontwikkeld, in klimaatkamer onderzoek, draagt in belangrijke mate bij aan het versnellen van de implementatie van fundamentele onderzoeksresultaten in praktische toepassingen in de glastuinbouw. De zonlichtlamp zelf is niet geschikt als assimilatielamp in de glastuinbouw door de relatief lage energie-efficiëntie, relatief ingewikkelde techniek en hoge kwetsbaarheid.

Introductie

Het spectrale(kleur)verdeling van assimilatie belichting wijkt sterk af van natuurlijk zonlicht en beïnvloedt daardoor productie en kwaliteit van kasgewassen.

Zonlicht levert het grootste deel van de energie voor fotosynthese en groei (biomassa) van planten in kassen. Gedurende aanzienlijke periode van het jaar is de hoeveelheid beschikbaar zonlicht per etmaal te beperkt om op een economisch verantwoorde wijze planten te telen in Nederlandse kassen. Daarom wordt in de winter en tijdens perioden van de herfst en lente bijbelicht met assimilatie lampen. Het meest toegepaste type lamp is momenteel de hogedruk natrium (SON-T) lamp. Deze lamp is, in vergelijking met ander lamp typen, behoorlijk energie efficiënt en heeft de afgelopen jaren bewezen goed te voldoen als lichtbron voor plantaardige productie in kassen. Het lichtspectrum dat de SON-T lamp produceert wijkt sterk af van natuurlijk zonlicht (Figuur 1), maar een groot deel van het uitgezonden licht valt tussen het blauwe (400nm) en diep rode (700nm) golflengtegebied en draagt dus in belangrijke mate bij aan de fotosynthetisch actieve straling (PAR). Voor de fotosynthese en biomassaproductie is met name beschikbare hoeveelheid (intensiteit x duur) PAR van belang.



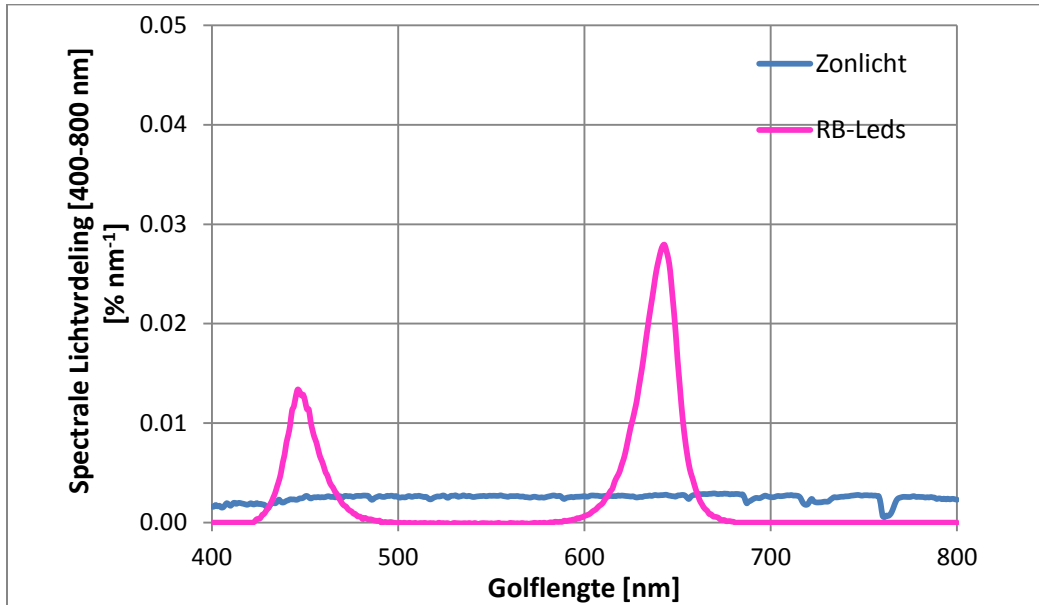
Figuur 1: Gemeten relatieve spectrale lichtverdeling van zonlicht en een SON-T lamp tussen 400 en 800 nm.



Licht beïnvloedt, naast het effect op biomassa productie via fotosynthese, ook ontwikkelingsprocessen (bv. bloei) en de vorm van een plant (via de morfogenese; bv. stengel/bladsteel strekking, zijscheutuitloop, blad expansie). Hierbij is niet zozeer de intensiteit van de fotosynthetisch actieve straling (PAR) van belang maar vooral het de spectrale samenstelling (de kleur) van het licht. Planten hebben speciale sensor-moleculen (lichtgevoelige moleculen, ook wel fotoreceptoren genoemd) die specifiek gevoelig zijn voor bepaalde lichtkleuren (golflengten). Belangrijke voorbeelden van deze fotoreceptoren zijn de fytochromen (vooral gevoelig voor rood- en ver- rood licht, maar in mindere mate ook voor andere kleuren), cryptochromen en fototropinen (vooral gevoelig voor UV-blauw). Deze fotoreceptoren stellen de plant in staat het lichtklimaat om de plant waar te nemen en daarop te reageren. De plant gebruikt het lichtklimaat in zijn directe omgeving om belangrijke processen, zoals bijvoorbeeld kieming, strekking en oriëntatie van stengel en bladeren en bloei, te regelen. Dit gebeurt op een bijzonder ingenieuze en complexe wijze waarbij vaak de interne biologische klok een belangrijke rol speelt. De werking van deze klok, die dagelijks wordt gelijkgezet o.a. met behulp van lichtkleur gevoelige fotoreceptoren, zorgt voor het tijdig reageren van allerlei fysiologische processen op dagelijks variërende omstandigheden. Met behulp van deze klok kan de plant bijvoorbeeld anticiperen op de licht periode door al in de laatste fase van de nacht fotosynthese-gerelateerde genen te activeren. Ook processen als stengel strekking en bloei-inductie worden door deze klok beïnvloedt. Door gebruik van assimilatielampen met een spectrum dat sterk afwijkt van zonlicht worden veel vorm en ontwikkelingsprocessen in de plant beïnvloedt, soms in positieve zin (compactere potplanten onder SON-T) soms in negatieve zin (lagere licht gebruiks efficiëntie bij de productie van jonge tomatenplanten onder SON-T (dit verslag)). Welk spectrum optimaal is hangt dus ook af van het doel dat wordt nagestreefd.

Momenteel vindt er veel toepassingsgericht tuinbouwonderzoek plaats naar de mogelijkheden van belichting met leds en led-belichting systemen in kassen. Deze led-systemen zijn gebaseerd op een groot aantal light-emitting diodes (leds) die, afhankelijk van het type, gekleurd licht uitzenden in een beperkt golflengte gebied (De Ruiter, 2004; Figuur 2). Leds zijn potentieel zeer energie-efficiënte lichtbronnen die geen noemenswaardige warmtestraling produceren. Dit maakt ze uitermate goed toepasbaar als lichtbron voor fotosynthese, tenminste wanneer de golflengte (kleur) valt binnen het PAR-gebied. De meeste individuele leds zenden licht uit in één golflengte gebied. Naast gekleurde leds zijn er ook witte leds op de markt. Deze leds produceren een van zonlicht afwijkend breedband lichtspectrum, kunnen en zijn minder energy efficiënt dan rode en blauwe leds. Door een lichtstelsel samen te stellen uit diverse verschillende typen leds kan het spectrum naar wens worden aangepast. In de toekomst kan zelfs worden gedacht aan onafhankelijke aansturing van verschillende typen leds binnen een belichtingssysteem, waardoor actieve sturing van het lichtspectrum over een dag mogelijk

wordt. Deze systemen maken het dan mogelijk om op een geavanceerde manier gelijktijdig met de verhoging van de bladfotosynthese ook ontwikkeling en vorm van planten naar wens te sturen.



Figuur 2: Gemeten relatieve spectrale lichtverdeling van zonlicht vergeleken met een willekeurig RB-led belichting systeem (RB-led: 70% rood (640nm) en 30% blauw (450 nm)).

Assimilatiebelichting in kassen wordt meestal toegepast als bij-belichting. Dat wil zeggen dat de belichting, die meestal in de donkere perioden van het jaar wordt toegepast, wordt gegeven terwijl, gedurende hetzelfde etmaal, ook zonlicht op de planten valt. Bij-belichting met lampen valt dus niet altijd samen met zonlicht, maar wel vaak. Planten in kassen onder bij-belichting ervaren echter altijd zonlicht gedurende een deel van de dag. Het lichtspectrum dat planten overdag ervaren wordt dus altijd medebepaald door het spectrum van natuurlijk zonlicht. Tijdens de nachtperiode wordt de spectrale lichtverdeling volledig bepaald door de gebruikte assimilatielampen. De hoeveelheid zonlicht, en daarmee de impact die het heeft op het totale lichtspectrum en de verdeling over een etmaal is naast de tijd van het jaar (maand, seizoen) ook afhankelijk van het weer en het tijdstip van de dag.

Bij-belichting met leds maar ook met SON-T heeft naast een positief effect op de bladfotosynthese ook invloed op de vorm en ontwikkeling van planten. Kennis over de spectrale effecten van de combinatie van bijbelichting én zonlicht op het functioneren van planten ontbreekt nog grotendeels en is nog zeker niet toereikend om bij-belichting in kassen op efficiënte wijze verder te kunnen optimaliseren. De afgelopen jaren is in het fundamentele onderzoek veel bekend geworden over fysiologische mechanismen achter



de effecten van lichtkleur op morfologie en ontwikkeling van planten. Dit onderzoek is echter voor het overgrote deel uitgevoerd aan de modelplant *Arabidopsis* en bovendien vrijwel alleen uitgevoerd onder 100% kunstlicht (TL, SON-T, leds en combinaties daarvan). In welke mate deze fysiologische mechanismen ook kunnen worden gebruikt voor verdere teeltoptimalisatie van kasgewassen, waarbij ook zonlicht een belangrijke rol speelt, is daardoor veelal onbekend. Spectraal georiënteerd belichtingsonderzoek in kassen uitvoeren is voor fundamenteel onderzoek geen optie omdat de controleerbaarheid van de overige klimaatfactoren in kassen veel te beperkt is en er daardoor grote interpretatie problemen ontstaan: veel van de betrokken fysiologische processen worden ook beïnvloedt door o.a. temperatuur variaties. Ook voor praktijkgericht onderzoek speelt dit een rol. Voor goed inzicht in de effecten van het lichtspectrum op het functioneren van een kas gewas is onderzoek in een zo stabiel mogelijke omgeving noodzakelijk. Om de doorstroming van fundamentele onderzoeksresultaten naar toepassingen in de tuinbouwpraktijk te versnellen is het daarom van belang belichting met een zonlichtspectrum in klimaatkamers te realiseren, desgewenst aangevuld met SON-T en/of leds.

Doelstelling(en) en afbakening:

Doel van dit project was het mogelijk maken van lichtonderzoek in klimaatkamers onder zonlichtspectrum belichting, bijgemengd met SON-T en/of led-belichting. Dit doel werd gerealiseerd middels de volgende stappen.

1. Ontwikkeling van een zonlichtspectrum lamp. Deze lamp dient, zo mogelijk, te functioneren zonder gebruik van additionele stralingsbronnen en filters.
2. Opbouwen van een faciliteit met 3-4 klimaatkasten (teeltoppervlak ca. 1 m²) met kunstmatige zonlichtbelichting voor toepassing in andere praktijkgerichte onderzoeksprojecten (PT-compacte planten; PT-Chrysanth).
3. Opschalen naar een klimaatkamer schaal voor een verkennend onderzoek naar mogelijke effecten van zonlichtspectrum lampen in de teelt van jonge tomatenplanten. Tegelijkertijd een duurtest zonlichtbelichtingssysteem.
4. Testen van prototype LED systeem voor bijbelichting bij de opkweek van jonge tomaat (pilot experiment).
5. In kaart brengen van variaties in het buitenlichtspectrum over 4 seizoenen



Fasering van het project

Het onderzoek is uitgevoerd in een drietal fases:

Fase 1: De ontwikkeling van een zonlichtspectrumlamp. Deze fase werd onderverdeeld in een drietal stappen.

1. Het vaststellen van een referentie zonlichtspectrum ten behoeve van de ontwikkeling van een zonlichtspectrumlamp aan de hand van handmatige spectrale metingen van het zonlichtspectrum buiten Nederlandse kassen.
2. Het ontwikkelen en testen van een zonlichtspectrum lamp op basis van het vastgestelde referentie zonlichtspectrum, bestaande uit één lichtbron zonder filters en additionele straling emitters.
3. Het duurtesten van deze lampen. Dit gebeurde hoofdzakelijk door het langdurig toepassen (> 12 maanden) van de ontwikkelde lampen in lopende experimenten, zoals die zijn uitgevoerd in fase 3 en in de aanpalende projecten die zijn uitgevoerd in de klimaatkamer faciliteit. (Duurtest, onder minimaal 90% van het maximale vermogen, 12-16 uur belichting per dag, gedurende ca. 12 maanden)

Fase 2: Het inrichten een klimaatkamer met minimaal 4, via dit project gefinancierde lichtdichte teeltunits, voorzien van zonlichtlampen en additionele led-belichting (teeltoppervlak per unit ca. 80x80cm).

Dit project is met name opgezet om twee andere praktijkgerichte onderzoeksprojecten, waarin belichting met een achtergrond zonlichtspectrum belichting noodzakelijk was, te kunnen uitvoeren (PT13814 “Compacte planten door geïntegreerde groeiregulatie” en PT13846 “Bloei-inductie bij Chrysant onder lange dag”). Middels dit project werden de kosten van de ontwikkeling van de zonlichtspectrumlamp en de daarbij behorende investeringskosten apart gefinancierd. De resultaten van deze projecten zijn in aparte eindverslagen opgenomen.

Fase 3: Het realiseren van zonlichtspectrum belichting op klimaatkamerschaal, en het uitvoeren van een pilot-experiment met een jonge tomatenplanten om de effecten van bij-belichting met SON-T en leds te kunnen vergelijken met groei onder alleen zonlichtspectrum licht, waarbij het spectrum van de bij-belichting (zonlicht + SON-T of leds) vergelijkbaar was met dat in Nederlandse kassen in de winter.

Tevens was het de bedoeling om tijdens de hele looptijd van het project middels een geautomatiseerd systeem spectrale metingen te doen aan het zonlichtspectrum buiten de kas. Dit om een indruk te krijgen van de normale spectrale variaties van natuurlijk



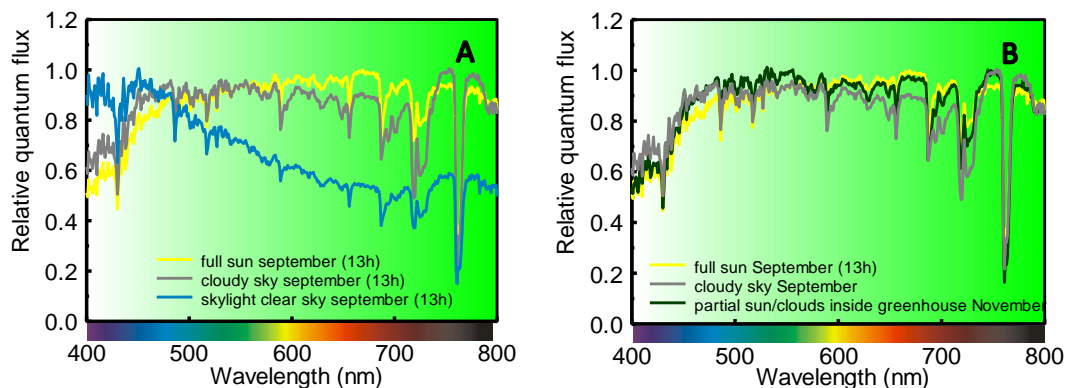
zonlicht onder Nederlandse condities. Dit bleek echter, tegen de verwachting in, onmogelijk met bestaande hard- en software. Daarom werd hiervoor deels tijdens fase 3 en deels buiten dit project om een meetsysteem ontwikkeld om tijdens verschillende seizoenen, met een tijdsinterval van één meting per 10 minuten, spectrale metingen te doen aan het zonlichtspectrum buiten de kas. Dit om een indruk te krijgen van de normale spectrale variaties van natuurlijk zonlicht onder Nederlandse condities.

Project Resultaten en Discussie

Fase 1: Ontwikkeling van een zonlichtspectrum lamp

Bepaling referentie zonlichtspectrum

Allereerst werd een referentie zonlicht spectrum bepaald waaraan de lamp diende te gaan voldoen. Hiervoor werden op een zonnige en bewolkte dag in september 2009 spectrale metingen uitgevoerd op het dak van een hoog gebouw (Radix) op de campus van Wageningen Universiteit (Figuur 3A). De gemeten relatieve spectra tussen 400nm en 800nm bleken weinig te verschillen tussen bewolkte (grijs) en onbewolkte (geel) dagen. Deze metingen werden uitgevoerd met een cosinus gecorrigeerde diffuser op de meettip, die horizontaal was gepositioneerd (standaard positie). De blauwe lijn in figuur 3A laat het relatieve spectrum zien wanneer de meettip van de fiber van de zon werd afgekeerd (niet horizontaal dus) en er geen direct zonlicht op de meettip viel. Dit licht is veel ‘blauer’ van kleur en heeft een zogenaamd ‘skylight’ spectrum. De sterke ‘drops’ in alle lijnen bij bepaalde specifieke golflengten komen doordat bepaalde gassen in de atmosfeer (w.o. water en CO₂) bij die golflengten sterk licht absorberen.



Figuur 3: (A) *Representatieve spectra buiten de kas rond het middaguur in september op een zwaar bewolkte dag (grijze lijn), een onbewolkte dag in de volle zon (gele lijn) en op dezelfde onbewolkte dag met al het directe zonlicht afgeschermd (blauwe lijn).* (B) *de gele en grijze lijn als in figuur A. De groene lijn geeft het gemeten lichtspectrum in de kas weer.*

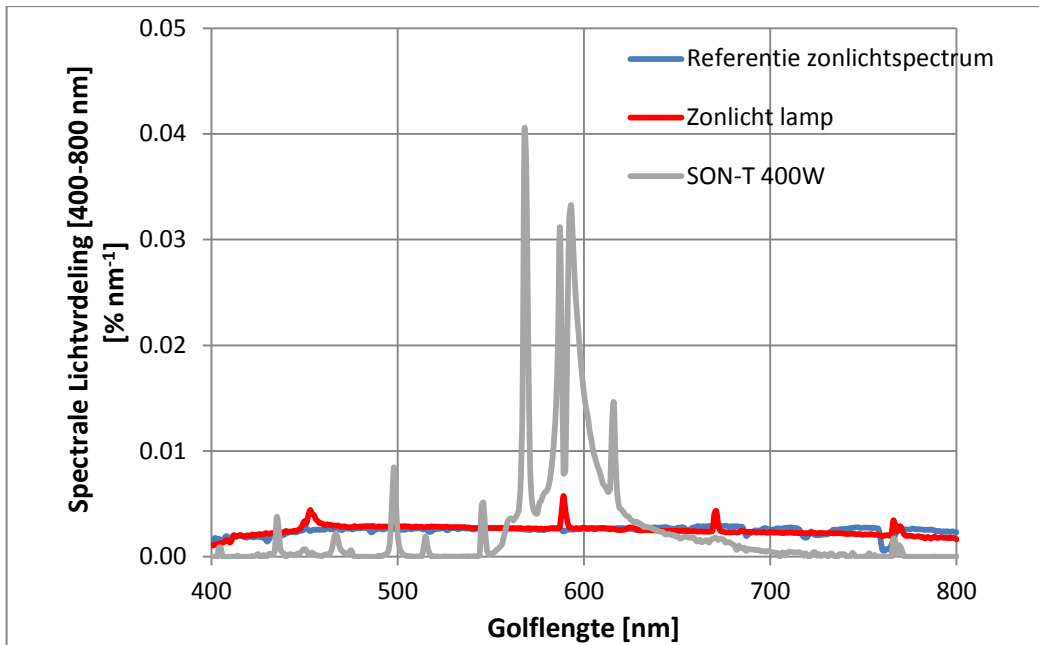
Vervolgens werd een extra meting uitgevoerd in een onbelichte kas van WUR (Unifarm). Uit deze meting, die werd uitgevoerd tijdens een deels bewolkte lucht, blijkt dat het zonlichtspectrum tussen 400nm en 800nm binnen en buiten de kas niet veel van elkaar verschilt (figuur 3B). Het natuurlijk spectrum rond het middaguur in de volle zon verschilt weinig met het spectrum onder een zwaar wolkendek. Het spectrum van een onbewolkte hemel zonder direct zonlicht (‘skylight’) wijkt wel behoorlijk af. Planten



ervaren op een onbewolkte dag voornamelijk het spectrum van direct zonlicht. Alleen bij een lage zonnehoek (enkele minuten voor zonsondergang en na zonsopgang) kunnen bladeren die afgeschermd zijn van direct zonlicht door andere bladeren het skylight spectrum opvangen. De lichtintensiteit die bladeren ontvangen op de momenten dat ze aan puur skylight blootgesteld worden is vele malen lager dan de intensiteit in vol direct zonlicht, aangezien dit alleen aan het begin en einde van de lichtperiode plaats kan vinden. In figuur 3B is duidelijk te zien dat het kasspectrum in de meest relevante spectrale regio voor plant-groei en ontwikkeling (400-740nm) niet noemenswaardig anders is dan de buiten gemeten spectra. Het bijkomend voordeel hiervan is dat met één kunstmatig zonlicht-systeem een plantontwikkeling is te realiseren dat redelijk representatief is voor zowel buitenteelten als kasteelten. Overigens zal voor golflengten korter dan 350nm (UV) het spectrum in een kas wel verschillen van het buiten-spectrum, omdat UV niet volledig wordt doorgelaten door de meeste glassoorten gebruikt in kassen. Dit is echter niet gemeten vanwege de beperkte gevoeligheid van de fotospectrometer in dit golflengtegebied. Omdat het technisch niet goed mogelijk is om rekening te houden met de invloed van het skylight spectrum op bladeren, is er gekozen voor het meest dominante spectrum als referentie spectrum voor het ontwikkelen van de zonlicht lamp (cloudlight en full sunlight, figuur 3A).

Ontwikkeling prototype lamp

Om snel te komen tot een bruikbare zonlichtspectrum lamp is gekozen voor het doorontwikkelen van de fosfor-plasma lamp die eerder werd gebruikt in de pilot experimenten naar de effecten van het zonlichtspectrum op de groei van planten (Hogewoning et al., 2010). Een fosfor-plasma lamp is een breedband lichtbron, die licht geproduceert via excitatie van een fosfor-plasma door microgolven (magnetron straling). De spectrale samenstelling van het uitgezonden licht kan worden veranderd door de chemicalen samenstelling van het plasma te veranderen. Op basis van het aangeleverde referentiespectrum voor zonlicht is door Plasma International samen met een Zwitsers bedrijf in opdracht een chemicalien samenstelling ontwikkeld die na excitatie het beoogde zonlichtreferentie spectrum goed imiteerde. Verschillende versies (samenstellingen) zijn door Wageningen Universiteit doorgemeten met een fotospectrometer en de versie die het zonlichtreferentiespectrum het best benaderde werd geselecteerd (figuur 4).



Figuur 4: *Relatieve licht spectrum van de plasma zonlichtspectrum lamp (rode lijn) vergeleken met het gekozen referentiespectrum voor zonlicht (blauwe lijn). Ter vergelijking is het relatieve spectrum van een SON-T lamp in deze figuur opgenomen.*

De ontwikkelde zonlichtspectrum lamp blijkt het spectrum van natuurlijk zonlicht zeer goed na te bootsen. Op enkele pieken na (bij 450, 580, 670 en 760 nm) die het gevolg zijn van de gebruikte chemicaliën, vrij smal zijn en daardoor relatief nauwelijks bijdragen aan de totale intensiteit, volgt de zonlichtspectrum lamp het zonlichtspectrum nauwkeurig. Het verschil met het spectrum van SON-T (Figuur 2) en RB-Leds (Figuur 3) is enorm. Met name de aanwezigheid van een normale hoeveelheid licht in het ver-rode golflengte gebied (700-740nm) is van groot belang. Dit ontbreekt vrijwel geheel in SON-T en wordt in de meeste led-belichtingssystemen niet of niet voldoende geproduceerd. Bij gedetailleerde metingen boven de 740nm bleek deze plasmalamp het zonlicht spectrum ook daar (tot 2500nm) goed te benaderen (resultaten niet getoond). In het UV produceerde deze plasmalamp minder straling dan het standaard ASTM zonlicht spectrum (resultaten niet getoond). Echter, effecten van UV zijn voor dit project nauwelijks van belang omdat natuurlijke UV-straling in kassen altijd laag is door de beperkte transmissie van UV door het kasdek.

Technische performance en duurtest van de zonlichtspectrum lamp

Na ruim twee jaar experimenteren met de zonlichtspectrum lamp bleek het geproduceerde spectrum vrijwel onveranderd. De bedrijfszekerheid van de prototype lampen is echter vrij laag wat samenhangt met de gecompliceerde technologie. Dit probleem werd ondanks de inspanningen van de leverancier niet opgelost tijdens de looptijd van dit



project. Met name de levensduur van de magnetrons was relatief kort: al na een drie-tal weken experimenteren (16-20 uur belichting per etmaal op 95% vermogen) begonnen de eerste magnetrons uit te vallen. Dit was waarschijnlijk het gevolg van de grote hitteontwikkeling in de armaturen en het beperkte vermogen van de interne ventilator om dit af te voeren. Extra extern aangebrachte fan's verlengde de levensduur van de magnetrons enigszins, maar uitval bleef gedurende het hele project plaatsvinden. Nieuwe verbeterde armaturen zouden dit probleem volgens de leverancier moeten oplossen. Daarnaast vertoonden enkele lampen onregelmatig problemen met opstarten. Updates van de opstartsoftware, veelvuldige technische aanpassingen door de leverancier en nieuwe voedingen hebben deze problemen wel verminderd maar niet opgelost. De energie efficiëntie van de lampen is niet onderzocht (geen doelstelling in dit project).

Conclusies

Samenvattend kan worden geconcludeerd dat het is gelukt om een zonlichtspectrum lamp te ontwikkelen met een emissie spectrum vergelijkbaar met zonlicht tussen 400nm en 740nm. Deze lamp is een unieke tool voor het doen van plantkundig onderzoek waarbij een zonlichtspectrum vereist is. Technisch zijn de zonlichtlampen niet uitontwikkeld. De kwetsbaarheid en korte levensduur van onderdelen van de lampen maakt langdurige toepassing van de lampen in experimenten lastig. Het aanhouden van voldoende reserve exemplaren en enige expertise m.b.t. het vervangen van onderdelen tijdens experimenten is daarom een vereiste.

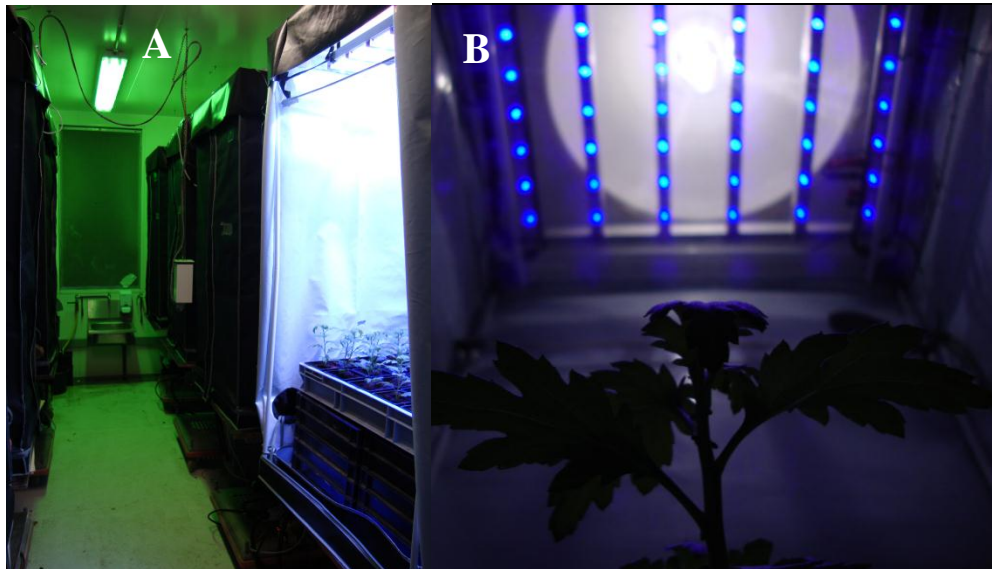
Fase 2: Kleine teeltunits met zonlichtbelichting en leds

Introductie

Fase 2 van het zonlichtproject bestond uit het inrichten een klimaatkamer met 4 lichtdichte teeltunits geplaatst in één klimaatkamer, voorzien van zonlichtlampen en additionele led-belichting. Deze klimaatkamer faciliteit werd in het voorjaar 2010 gerealiseerd en vervolgens gebruikt in de projecten “Compacte planten door geïntegreerde groeiregulatie” (PT13814) en “Bloei-inductie bij Chrysant onder lange dag”) “ (PT13846). Van deze projecten zijn aparte verslagen beschikbaar.

Resultaten

Vier zonlichtspectrumlampen werden geplaatst op lichtdichte teelt-units (oppervlak 80x80cm), die vervolgens werden geplaatst in een klimaatkamer van WUR. Naast de zonlichtspectrum belichting bevatten deze teelt-units ook led-belichting. Voor additionele SON-T belichting waren de sub-units niet geschikt (te klein). Experimenten met SON-T bij-belichting werden uitgevoerd in een grotere opstelling (zie fase 3)



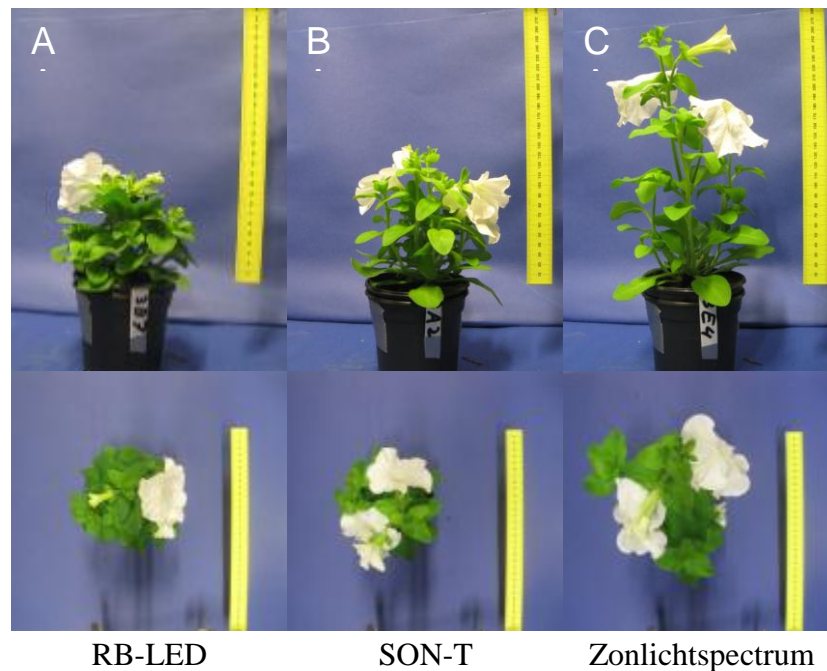
Figuur 5: De klimaatkamer faciliteit voor experimenten met zonlichtspectrum belichting (A) Overzicht van acht gelijke ‘licht-dichte’ teeltunits in 1 klimaatkamer. Bij aanvang vier, en later alle acht van deze units waren voorzien van B) een aparte plasmalamp met zonlichtspectrum bol en een array met leds (rood/blauw/ver-rood).

Iedere teeltunit had een onafhankelijk regeling voor de belichting (Figuur 5). De zonlichtspectrumlamp was handmatig instelbaar van ca. 50 tot 120 $\mu\text{mol PAR}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Verdubbeling van deze intensiteit bleek ook mogelijk door de bijgeleverde reflector te voorzien van een reflecterende laag aluminium tape. Onder de zonlichtspectrumlamp



bevond zich een aluminium frame met een combinatie van rode en blauwe leds (Red 640 nm, LXX2-PD12-S00 and Royal-Blue 450nm, LXX2-PR14-R00, Philips, Eindhoven), soms aangevuld met ver-rode leds (733 nm, Philips, Greenpower LED modules HF, Philips Eindhoven). De verschillende typen leds waren onafhankelijk aan te sturen met behulp van voedingen en timers. In alle teeltunits bevond zich onder de laagst geplaatste lichtbron een warmtestraling werende folie (dielectric multilayer film; Sonneveld et al. 2008) om de warmtestraling van de lichtbronnen zoveel mogelijk buiten het teeltcompartiment te houden. De boven het folie geproduceerde warmte (straling > 900 nm) werd afgevoerd d.m.v. actieve ventilatie. De waarden voor de overige klimaatfactoren in de sub-units (T, RV en CO₂) werden bepaald door het ingestelde klimaat in de klimaatkamer en wisselde per experiment. Iedere teeltunit was voorzien van een actief ventilatiesysteem om het klimaat in de subunit gelijk te houden aan de klimaatkamer. Afhankelijk van het type gewas en plantgrootte konden 5 tot 30 planten per teeltunit worden ingezet.

Deze klimaatkamer faciliteit is gebruikt voor het uitvoeren van de projecten “Compacte planten door geïntegreerde groeiregulatie” (PT13814) en “Bloei-inductie bij Chrysant onder lange dag”) “ (PT13846). In het eerste project werd de mogelijkheid onderzocht om m.b.v. led-belichting in een kassituatie (met zonlicht aanwezig) de compactheid van potplanten en perkplanten te bevorderen. Het project werd uitgevoerd aan de modelplanten petunia en chrysant. Het al dan niet aanwezig zijn van een volledig zonlichtspectrum bleek grote invloed te hebben op vorm, resulterende lichtonderschepping en productie (Figuur 6). Compactheid kon bijvoorbeeld worden bevorderd door de fractie rood in het omgevingslicht van de planten te laten stijgen (Figuur 7). Uitgebreide resultaten zijn opgenomen in een apart verslag van het project. In het tweede project werd onderzocht of het mogelijk is om met spectrale sturing chrysant ook onder een lange dag in bloei te krijgen onder een normaal kaslichtspectrum (met zonlicht). In een eerder uitgevoerd onderzoek aan Wageningen Universiteit in een klimaatkamer met RB-leds, maar zonder zonlicht, bleek dit goed mogelijk door een groot deel van de nacht door te belichten met blauwe leds. Uit dit onderzoek bleek dat dat met overdag zonlicht in plaats van RB-leds niet mogelijk was. In een parallel in een kas uitgevoerd experiment werd een zelfde resultaat gevonden. Uitgebreide resultaten van dit onderzoek zijn terug te vinden in het apart verslag van dat project.



Figuur 6: Zij- en bovenaanzicht van *Petunia* planten geteeld onder 16 uur $100 \mu\text{mol PAR}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 80% rode 20% blauwe leds, SON-T en kunstmatig zonlicht.



Figuur 7: *Petunia* opgekweekt in de WUR klimaatkamer faciliteit met zonlichtspectrum belichting onder toenemende bij-belichting met rode leds. Alle planten groeiden onder $100 \mu\text{mol PAR}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 16 uur licht. Van links naar rechts 100% zonlicht, 70% zonlicht (30% rood), 50% zonlicht (50% rood).



Conclusies

Uit deze voorbeelden kan worden geconcludeerd dat het goed mogelijk is om planten te kweken onder de protoypen zonlichtspectrum lampen, en dat deze planten er vergelijkbaar met kasplanten uitzien.

De groei (biomassa toename) was bij alle gewassen die tot nu toe zijn getest onder enkel zonlichtspectrum altijd hoger dan wanneer ze werden geteeld onder SON-T of RB-leds (bij verder gelijke lichtintensiteit en belichtingsduur).

Fase 3: Pilot experiment bij-belichting bij opkweek tomaat

Introductie

In het najaar van 2010 is een klimaatkamer van WUR omgebouwd voor belichting met zonlichtspectrum lampen in combinatie met assimilatie(groeilicht)lampen. In deze klimaatkamer werd vervolgens een experiment uitgevoerd, waarin bij-belichting met een relatief nieuw led-belichting systeem werd vergeleken met bij-belichting met SON-T. Daarnaast werd ook bekeken of de bij-belichting met deze lampen een beter of slechter resultaat gaf dan belichting met alleen een zonlichtspectrum.

Materiaal en methoden

Plant materiaal en teeltcondities tijdens het pilot experiment

Tomaat (*Lycopersicon esculentum* cv. Red Sky) werd gezaaid op 11 augustus 2010 in een kas van Wageningen Universiteit. Vijftien dagen na opkomst werden de zaailing overgezet in potten (met potgrond, één plant per pot) en overgezet naar een klimaatkamer. De klimaatkamer was verdeeld in drie gelijke compartimenten met, behalve het lightspectrum dezelfde groeiomstandigheden (22/20 °C dag/nacht temperatuur; 200 $\mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$; 17 uur licht, 75% RV). In ieder compartiment werden 12 planten geplaatst op een in hoogte verstelbare tafel om de lichtintensiteit aan de top van de planten gelijk te houden tijdens de groei. In ieder compartiment werden alle planten regelmatig van plaats gewisseld om een zo homogeen mogelijke blootstelling aan lichtintensiteit te waarborgen ($200 \pm 12 \mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

Lichtbehandelingen

De bedoeling van de lichtbehandelingen was het simuleren van een realistisch lightspectrum zoals dat kan optreden in Nederlandse kassen in de winter, bij verder volledige controle over het klimaat (dus in een klimaatkamer). Natuurlijk zonlicht werd gesimuleerd met de nieuw ontwikkelde zonlichtspectrum lampen, gebaseerd op magnetron fosfor-plasma lamp van Plasma International GmbH (Offenbach am Main, Germany). Bij-belichting werd gerealiseerd m.b.v SON-T of RB-leds (20% blue (450nm),



80% red (660 nm). Het watergekoelde led-systeem werd geleverd door Lemnis Lighting BV (Barneveld, Nederland). Er werden 3 behandelingen gerealiseerd:

- 1) 200 $\mu\text{mol zonlicht m}^{-2} \text{ s}^{-1}$;
- 2) 100 $\mu\text{mol zonlicht m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ + 100 $\mu\text{mol SON-T m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- 3) 100 $\mu\text{mol zonlicht m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ + 100 $\mu\text{mol RB-leds m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Er werden geen speciale voorziening getroffen om eventuele verschillen in warmtestraling tussen de behandelingen te compenseren, aangezien nauwkeurige bladtemperatuur metingen met miniatuur thermokoppels, gefixeerd tegen de onderkant van de bladeren, geen verschillen lieten zien in bladtemperatuur tussen de 3 lichtbehandelingen over 24 uur lange metingcycli.



Zonlicht

Zonlicht + SON-T

Zonlicht + RB-Leds

Figuur 8: *Opstelling voor de opkweek van jonge tomaten planten in een klimaatcel onder zonlichtspectrum belichting. Links: 100% zonlichtspectrum belichting, midden 50% zonlichtspectrum en 50% SON-T belichting, rechts 50% zonlichtspectrum en 50% RB-leds belichting (80% rood, 20% blauw).*

Lichtmetingen en berekeningen

Lichtintensiteit werd gemeten een quantum sensor (LI-190, LiCOR Inc). Lichtspectra werd gemeten met verschillende typen spectrofotometers (USB2000+; USB4000 en Jaz, Ocean Optics Inc) voorzien van een cosinus gecorrigeerde teflon diffuser.

Destructieve plant metingen

De planten van het pilot het pilot experiment werden 21 dagen na aanvang van de belichting in de klimaatkamer geogst, net voor het moment dat ze elkaar begonnen te beschaduen. De volgende metingen werden destructief gedaan: Plant hoogte, aantal bladeren en trossen per plant, stengel doorsnee diameter, blad drooggewicht per oppervlak (LMA) van volgroeide bladeren totaal drooggewicht van de hele bovengrondse



plant en van de dieven afzonderlijk. Alle metingen werden gedaan aan 8 random gekozen planten per behandeling.

Berekeningen en statistiek

Behandelingsverschillen tussen de belichtingsbehandelingen werden getoetst op statistische significantie d.m.v. gepaarde tweezijdige t-toetsen. P-waarden < 0.05 werden beschouwd als statistisch significant.



Resultaten en Discussie

Ondanks de gelijke lichtintensiteit, belichtingsduur, dag- en nacht temperatuur en RV werden toch opmerkelijk verschillen gevonden tussen de planten die werden opgekweekt onder volledig zonlichtspectrum belichting en die werden opgekweekt met bij-belichting met SON-T of RB-leds (Tabel 1). Een bijzonder opmerkelijk groot verschil werd gevonden in biomassa bij de oogst: na 21 dagen belichtingsbehandeling waren de planten die alleen zonlichtspectrum licht ontvingen ca. 32 procent zwaarder (drooggewicht basis) dan planten waarvan het licht voor 50% bestond uit SON-T licht. Het verschil met leds was nog groter (ca. 44 procent zwaarder). Hieruit blijkt dat beide van zonlicht afwijkende spectra (van zonlicht met SON-T en met leds) een fors negatief effect hadden op de productie van jonge tomatenplanten. Dit wijst erop dat er nog veel ruimte is voor verbetering van de licht gebruiksefficiëntie is van zowel de huidige bij-belichting bij het opkweken van jonge tomatenplanten (met SON-T) als ook de toekomstige (met leds). Visueel zagen de planten onder 100% zonlicht er beter uit, hetgeen vooral tot uiting kwam in een groenere kleur en een minder gekrulde (epinastische) bladstand. Planten onder menglicht (zonlicht + SON-T of leds) waren enigszins paars gekleurd, waarschijnlijk als gevolg van anthocyaan vorming, een algemene stress respons. Ook de meer epinastische bladstand bij de 'bijbelichting' behandelingen met SON-T en leds kan worden opgevat als een sterkere stress respons.

Tabel 1. Gegevens van destructieve metingen aan jonge tomaten (cv. Red Sky) opgegroeid gedurende 21 dagen in een klimaatkamer onder gelijke lichtintensiteit en duur maar verschillende lichtspectra. Zonlicht: $200 \mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$ van zonlichtspectrum lampen; SON-T: $100 \mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$ van een zonlichtspectrum lamp en $100 \mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bij-belichting met SON-T; RB-leds: $100 \mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$ zonlichtspectrum en $100 \mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bij-belichting met RB-leds (80% rood en 20% blauw). Verschillende letters duiden een statistisch verschil aan ($P < 0.05$; $N=8$; ns= not significant).

	Zonlicht + SON-T	Zonlicht + RB-leds	Zonlicht
Planthoogte (cm)	35.5 ^b	29.4 ^c	39.7 ^a
Stengel diameter (mm ²)	9.2 ^{ns}	9.5 ^{ns}	9.5 ^{ns}
Aantal bladeren	11.6 ^{ns}	11.3 ^{ns}	11.6 ^{ns}
Aantal trossen	2.6 ^{ns}	2.9 ^{ns}	2.8 ^{ns}
Bladoppervlak (cm ²)	1193 ^b	990 ^c	1478 ^a
LMA (g m ⁻²)	23.3 ^c	25.9 ^b	32.4 ^a
Totaal drooggewicht (g)	6.5 ^b	5.9 ^c	8.6 ^a
% Drooggewicht in dieven	4.0 ^a	5.1 ^a	2.1 ^b



Bij-belichting met SON-T is de huidige standaard. Vergeleken daarmee presteert bij-belichting met zonlichtspectrum lampen beter en bij-belichting met RB-leds iets slechter. Dit laatste is niet verwonderlijk en is ook in andere onderzoeken regelmatig gevonden. Bij-belichting met RB-leds resulteert vaak in minder strekking en compactere planten met minder bladoppervlak (tabel 1). Dit vertraagt de toename in lichtonderschepping van jonge planten. Dit effect telt met name in de exponentiele groeifase, waarin deze planten zitten, flink aan: door minder lichtonderschepping is er minder fotosynthese en minder assimilaten productie per plant. Dit resulteert in minder groei van bladeren en dus in een extra achterstand in lichtonderschepping. Op deze wijze zorgt een negatief effect op strekkingsgroei ook voor een negatief effect op de productie. Uit eerder onderzoek bleek al dat de fotosynthesesnelheid per bladoppervlak maar beperkt wordt beïnvloedt door deze variaties in lichtspectrum en dat veel de effecten op productie bij jonge planten kunnen worden toegewezen aan een effect op de strekking. Naast deze directe effecten op vorm en biomassa bleek dat bij-belichting met een assimilatie belichting leidde tot een aanzienlijk hogere assimilaten verdeling naar de dieven (4,0% en 5,1% t.o.v. 2,1% bij Son-T en leds t.o.v zonlicht, respectievelijk; tabel 1). Dit was ook visueel goed te zien aan de afmetingen van de dieven. Een goed lichtspectrum stimuleert de groei van de hoofdscheut kennelijk en remt de groei van dieven af. Dit kan naast positieve effecten op productie ook positieven effecten op de benodigde arbeid.

Conclusies

Deze resultaten aan jonge tomatenplanten laten overduidelijk zien dat naast de intensiteit ook het spectrum van assimilaten-lampen een belangrijke rol kan spelen op de fotosynthese en productie van hele planten in kassen en dat dit effect voor een groot deel loopt via door het lichtspectrum van de assimilatielampen geïnduceerde vorm veranderingen.

Een andere belangrijke conclusie is dat bij-belichting met zowel SON-T als ook met RB-leds, zoals in de winter gebeurd in Nederlandse kassen, leidde tot een aanzienlijk lagere productie dan wanneer al dat licht een zonlichtspectrum zou hebben. Er lijkt dus nog aanzienlijke ruimte voor verbetering van de huidige assimilatielampen. Hoe dit is te realiseren zal uit vervolg onderzoek moeten blijken. Verhoging van het aandeel ver-rood in de bij-belichting lijkt op het eerste gezicht een aannemelijke mogelijkheid, maar heeft als nadeel dat ver-rood licht zelf beperkt fotosynthetisch actief is.



Metingen aan het zonlichtspectrum

Introductie

Er is nog weinig bekend over natuurlijke variaties in het zonlichtspectrum als gevolg van seizoen, weer en tijdstip. Omdat het lichtklimaat van een plant overdag voor een belangrijk deel wordt bepaald door het lichtspectrum van het natuurlijke zonlicht is kennis over het verloop van dit spectrum over de dag en over de seizoenen van belang. Dergelijke metingen zijn voor de Nederlandse situatie nog niet beschikbaar. Bij aanvang van dit project was een neven doelstelling dergelijke metingen te gaan verzamelen. De beschikbare hard- en software van de aanwezige fotospectrometers (USB2000+; USB4000 en Jaz, software: Spectra Suite, Ocean Optics Inc.) bleek echter, tegen de verwachting in, niet geschikt en niet aanpasbaar voor het automatisch uitvoeren van langdurige spectrale metingen aan het zonlichtspectrum. Hierdoor leek dit neven doel in eerste instantie niet realiseerbaar binnen dit project. Aan het einde van de officiële looptijd van dit project stelde Ocean Optics essentiële software drivers beschikbaar en is een nieuw intern project bij de leerstoelgroep tuinbouwproductieketen gestart om een dergelijk meetsysteem te ontwikkelen, de benodigde software te schrijven en een spectrale dataset van het natuurlijk daglicht te verzamelen.

Materiaal en Methoden

Medio 2011 is door Wageningen Universiteit (Lsg. tuinbouwketens) een apart, stand-alone, hardware systeem opgebouwd, gebaseerd op de USB2000+ fotospectrometer, met externe shutter, en een laptop voor data-acquisitie voorzien van wire-less communicatie. Het geheel werd ingebouwd in een meetbox met temperatuurregeling (ter voorkoming van vorstschade). Voor de besturing en data-verwerking werd custom-made software geschreven in Labview (National Instruments) met gebruik van Ocean Optics drivers (Omnidivers, Ocean Optics Inc). Het systeem werd geplaatst op het dak van het Radix gebouw op de campus van WUR aan de Droevendaalsesteeg te Wageningen. Het meetsysteem stond vrij van directe schaduw van andere objecten en gebouwen en uit de directe 'field of view' van andere objecten en lichtbronnen, maar binnen een straal van 100 meter van mogelijke, via reflecties op wolken, versturende lichtbronnen zoals gebouw-, straat- en kasbelichting). Deze verstoringen bleken zeer beperkt.

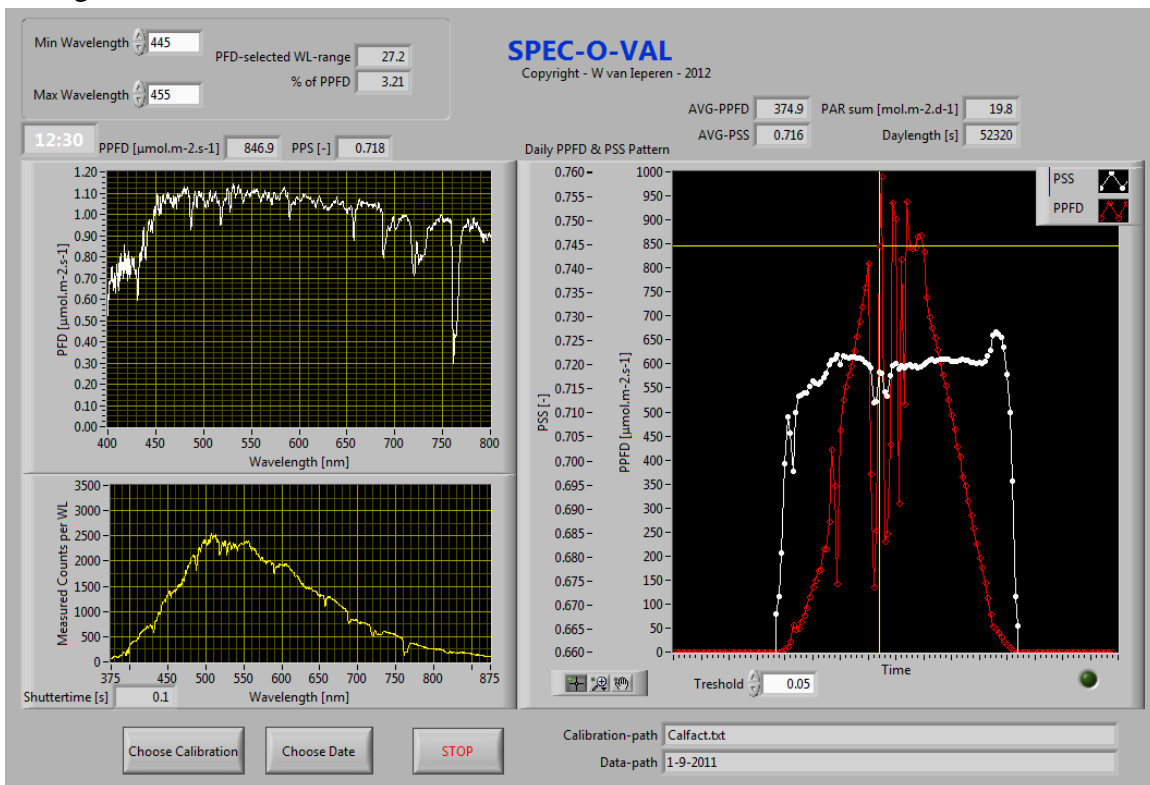
Resultaten

Er is een grote set dagelijkse spectrale metingen (400-800nm) verzameld tussen Augustus 2011 en Juni 2012 met een tijdsinterval van ca. 10 minuten. Deze spectrale lichtmetingen zijn gebruikt om dagelijkse profielen in lichtintensiteit (PAR) en PSS-waarde, een belangrijke maat voor het berekende fytochroom-evenwicht, te berekenen. Uiteraard kan deze dataset ook worden gebruikt om andere kengetallen voor het spectrum



te berekenen zoals bijvoorbeeld het percentage blauw of de rood/verrood verhouding. Daar is echter in eerste instantie niet voor gekozen omdat de dan berekende waarden sterk afhankelijk zijn van de aangehouden definities van ‘blauw’, ‘rood’ en ‘ver rood’ en deze definities zijn arbitrair en hebben geen fysiologische grond. Bovendien is het vooral nog lastiger om deze kengetallen te gebruiken voor fysiologisch georiënteerde karakterisering van het licht spectrum, en zijn ze voor led-licht soms zelfs onmogelijke te berekenen door de absolute afwezigheid van bepaalde golflengten in het spectrum (zoals bijvoorbeeld in led-systemen zonder ver-rood leds).

Figuur 9 toont een schermafbeelding van de analyse software. De figuur bevat een voorbeeld van een dagelijks spectrale lichtprofiel meting. De rechter grafiek bevat het PAR stralings profiel over de dag (rode lijn) en het verloop van de PSS-waarde over de betreffende dag (witte lijn). Bij deze grafiek zijn ook enkele andere stralingsgegevens gegeven, zoals de dagelijkse lichtsom (PAR) en de daglengte. Met de gele lijn cursor in deze grafiek kan een bepaald tijdstip op de dag worden gekozen (in dit geval 12:00). Het lichtspectrum op dat tijdstip is weergegeven in de bovenste figuur. De PAR(=PPFD) en de PSS-waarde op dat moment van de dag staan boven die grafiek. De onderste linkergrafiek geeft de ruwe, ongecalibreerde output data van de fotospectrometer op dat moment van de dag.



Figuur 9: Screenoutput van een de analysesoftware voor dagelijkse spectrale metingen.



Uit een eerste analyse van de resultaten blijkt dat het spectrum van natuurlijk zonlicht over de dag aanzienlijk kan verschillen, maar dat het effect van deze dagelijkse variaties op bijvoorbeeld de PSS-waarde beperkt is. Rond zonsopgang en zonsondergang is de PSS meestal het laagst: ca. 0.65-0.66. De rest van de dag varieert deze waarde rond de 0.70-0.73, afhankelijk van de bewolgingsgraad en weerscondities. De verschillen tussen de seizoenen zijn kleiner dan de dagelijkse variaties. Het effect van assimilatiebelichting op de PSS-waarde is veel groter: SON-T produceert licht met een PSS-waarde van ca. 0.85 en RB-leds zelfs nog iets hoger. Bijbelichting met deze lichtbronnen heeft dus een veel groter effect op het fytochroom evenwicht dan de normale spectrale variaties van het zonlicht tijdens de dag en over de seizoenen. Het nauwkeurig meten van de natuurlijke variaties lijkt daarom voor kasteelten nauwelijks van belang, voor zover het gaat om de effecten op de fytochroom status.



Samenvattende Conclusies

1. Er is een zonlichtspectrumlamp ontwikkeld met een emissie spectrum vergelijkbaar met dat van natuurlijk zonlicht tussen 400nm en 740(2500)nm. Deze lamp uniek in zijn soort, en van grote waarde voor het nabootsen van een realistisch lichtspectrum in klimaatkamers. Een dergelijke lamp kan in o.a. het belichtingsonderzoek belangrijk bijdragen aan het versnellen van het traject van fundamenteel onderzoek naar toepassingen in de praktijk.
2. De kwetsbaarheid en korte levensduur van onderdelen van de lampen maakt langdurige toepassing van de lampen onder praktijkomstandigheden lastig. Ook is geen onderzoek gedaan aan de energie efficiëntie van de ontwikkelde lamp. Voor gebruik van deze lamp is goede technische ondersteuning tijdens experimenten nog een vereiste.
3. Diverse kasgewassen (o.a. tomaat, komkommer, chrysant, petunia) groeien uitstekend onder de zonlichtspectrum lamp. De vorm van deze planten was i.h.a. vergelijkbaar met die van planten opgegroeid in een normale kas. Alle geteste gewassen vertoonden onder enkel zonlichtspectrum altijd een hogere biomassa toename dan onder SON-T of RB-leds (bij verder gelijke lichtintensiteit en belichtingsduur).
4. In een pilot experiment met jonge tomatenplanten bleek bijbelichting met assimilatie licht (zonlicht aangevuld met SON-T en RB-leds) slechter te scoren dan 100% zonlicht. Er lijkt dus vanuit plant perspectief nog aanzienlijke ruimte voor verbetering van het spectrum van de huidige assimilatielampen. Hoe dit is te realiseren zal uit vervolg onderzoek moeten blijken.
5. Het spectrum van natuurlijk zonlicht buiten de kas laat dagelijkse en seizoensafhankelijke variaties zien. Deze variaties zijn echter klein in vergelijking met de verschillen die worden veroorzaakt door bijbelichting met assimilatielampen (SON-T en leds).



Aanbevelingen

De ingewikkelde en kwetsbare techniek van plasmalampen maakt toepassing van de huidige lamp buiten een onderzoeksinstituut onwaarschijnlijk. Het ontwikkelen van een technologisch minder kwetsbare zonlichtspectrum lamp dan de huidige op plasma-technologie gebaseerde lamp verdient de aandacht. Led technologie biedt goede opties hiervoor.

De eerste projecten en experimenten waarin de zonlichtlamp werd toegepast tonen het belang van de beschikbaarheid van een dergelijke lamp voor praktijk gerelateerd onderzoek al duidelijk aan. Het verdient aanbeveling bij toekomstige klimaatkamer proeven t.b.v. praktijk gerelateerd onderzoek altijd van te voren te bekijken of het gebruikte lightspectrum van de belichting in de klimaatkamers de resultaten in belangrijke mate zal beïnvloeden.

Bij de opkweek van jonge tomatenplanten bleek bijbelichting met SON-T en leds een lagere productie op te leveren dan bijbelichting met zonlicht. Het is nog niet aangetoond welke delen van het lightspectrum hiervoor verantwoordelijk zijn. Het verdient aanbeveling dit verder uit te zoeken en op basis daarvan de spectra van de huidige asimilatie belichtingsystemen aan te passen.



Related Literatuur

- Blom, T.J., Tsujita, M.J. and Roberts, G.L. 1995. Far-red at end of day and reduced irradiance affect plant height of easter and asiatic hybrid lilies. *Hortscience* 30: 1009-1012.
- Franklin, K.A. and Whitelam, G.C. 2005. Phytochromes and shade-avoidance responses in plants. *Ann Bot-London* 96: 169-175.
- Halliday, K.J., Martinez-Garcia, J.F. and Josse E.M. 2009. Integration of light and auxin signaling. *Cold Spring Harb Perspect Biol.* 1(6):a001586.
- Heuvelink, E., Bakker, M.J., Hogendonk, L., Janse, J., Kaarsemaker, R. and Maaswinkel, R. 2006. Horticultural lighting in the netherlands: New developments. *Acta Hort.* 711: 25-33.
- Hogewoning, S.W., Douwstra, P., Trouwborst, G., van Ieperen, W. and Harbinson J. 2010. An artificial solar spectrum substantially alters plant development compared with usual climate room irradiance spectra. *J Exp Bot.* 61: 1267-1276.
- Hogewoning SW, Trouwborst G, Maljaars H, Poorter H, van Ieperen W, Harbinson J. 2010b. Blue light dose-responses of leaf photosynthesis, morphology and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light. *J Exp Bot.* 61: 3107-3117.
- Lund, J.B., Blom, T.J. and Aaslyng, J.M. 2007. End-of-day lighting with different red/far-red ratios using lightemitting diodes affects plant growth of *chrysanthemum x morifolium* ramat. 'Coral charm'. *Hortscience* 42: 1609-1611.
- McCree, K.J. 1971. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agr Meteorol.* 9: 191-216.
- Morgan DC, Smith H. 1979. Function of phytochrome in the natural environment. 8. A systematic relationship between phytochrome-controlled development and species habitat for plants grown in simulated natural radiation. *Planta*, 145: 253-258.
- Sager JC, Smith WO, Edwards JL, Cyr KL. 1988. Photosynthetic efficiency and phytochrome photoequilibria determination using spectral data. *Trans ASAE*, 31: 1882-1889.
- Trouwborst, G., Oosterkamp, J., Hogewoning, S.W., Harbinson, J. and van Ieperen W. 2010. The responses of light interception, photosynthesis and fruit yield of cucumber to led-lighting within the canopy. *Physiol Plant.* 138: 289-300.
- Tsuchida-Mayama, T., Sakai, T., Hanada, A., Uehara, Y., Asami, T. and Yamaguchi, S. 2010. Role of the phytochrome and cryptochrome signaling pathways in hypocotyl phototropism. *Plant J.* 62: 653-662.
- van Ieperen, W. and Trouwborst, G. 2008. The application of leds as assimilation light source in greenhouse horticulture: A simulation study. *Acta Hort.* 801: 1407-1414.
- Whitelam, G.C. and Halliday, K.J. 2007. *Light and plant development.* Blackwell, Oxford.
- Zhu, X.-G., Long, S. P. and Ort, D.R. 2010. Improving photosynthetic efficiency for greater yield. *Annu Rev Plant Biol.* 61: 235-261.