

Eindrapportage

Lichtkleuren onderzoek:

**Wat is de ontbrekende schakel voor
succesvolle productieverhoging?**



Auteurs:

Dr. ir. S.W. Hogewoning (Plant Lighting)

Ing. J. Sanders (Proeftuin Zwaagdijk)

Ir. T. Peekstok (Tice Agro)

Ing. S. Persoon (Inno-Agro)



Ministerie van Landbouw, Natuur en
Voedselkwaliteit

Eindrapportage lichtkleurenonderzoek

2011-2012

Inhoudsopgave

Samenvatting	4
1 Vooraf	6
2 Samenwerkende partijen	7
2.1 Tuinbouw Techniek Ontwikkeling	7
2.2 Samenwerkende onderzoekspartijen	7
2.2.1 Plant Lighting.....	7
2.2.2 TICE Agro	7
2.2.3 NPR Consultancy.....	7
2.2.4 Inno-Agro.....	7
2.2.5 Proeftuin Zwaagdijk.....	7
2.2.6 Demokwekerij Westland	7
3 Inleiding	9
3.1 Kansen voor nieuwe belichtingsbronnen.....	9
3.2 Ervaringen uit voorgaand onderzoek	9
3.2.1 Wetenschappelijk.....	9
3.2.2 Toegepast onderzoek TTO 2008-2011	10
3.3 Probleemstelling.....	10
3.4 Doelstelling, uitgangspunten & onderzoeksvragen	11
4 Onderbouwing onderzoek	13
4.1 Literatuurstudie: effecten van lichtkleur op gewasontwikkeling.....	13
4.2 Hypothese ontbrekende schakel voor productieverhoging.....	15
5 Onderzoeksmethode	17
5.1 Inleiding	17
5.2 Typering onderzoek.....	17
5.3 Algemene kenmerken proef.....	17
5.4 Algemene Proefopzet.....	17
5.5 Spectrale samenstelling lichtbronnen	18
5.6 Stralingswarmte in de gewassen.....	20
5.7 Inrichting onderzoeksafdelingen en lichtmetingen.....	20
5.7.1 Kas en installaties	20
5.7.2 Licht	20
5.8 Metingen gewasontwikkeling en fysiologie	22
5.8.1 Gewasontwikkeling en productie.....	22
5.8.2 Fotosynthese	23
Doelstelling fotosynthesemetingen (eerste week van januari 2012):.....	23
5.8.3 Bladpigmenten	24
5.8.4 Bladanatomie	24
5.9 Teeltstrategie	25
5.9.1 Inleiding	25
5.9.2 Energie.....	25
5.9.3 Karakteristieke teelt	25
6 Resultaten	26
6.1 Gewasontwikkeling en productie.....	26
<i>Gewasontwikkeling (beoordeeld door BCO)</i>	26
6.1.1 Resultaten teelt algemeen	27
6.1.2 Wateropname	27
6.1.3 Lengtegroei.....	27
6.1.4 Productie, zetting en vruchtontwikkeling	28

Eindrapportage lichtkleurenonderzoek

2011-2012

6.1.5	Bladontwikkeling	33
6.2	Interactie tussen licht en gewas	36
6.2.1	Lichtmetingen	36
6.2.2	Verticale verdeling lichtintensiteit over het gewas	36
6.2.3	Lichtspectrum binnenin het gewas	37
6.3	Verklarende meetresultaten	38
6.3.1	Effect lightspectrum op bladpigmenten	38
6.3.2	Effect lightspectrum op fotosynthese	39
6.3.3	Effect lightspectrum op huidmondjesgeleidbaarheid	41
6.3.4	Effect lightspectrum op bladanatomie	42
7	Sturing gewas met klimaat	44
7.1	Temperatuur	44
7.2	Schermb	44
8	Discussie	45
8.1	Effect verschillende lightspectra op gewasontwikkeling	45
8.2	Verrood: Oorzaken van de effecten en kansen voor toepassing	47
8.2.1	Oorzaken van de verrood effecten	47
8.2.2	Kansen verrood	48
9	Belangrijkste conclusies	49
10	Referenties	50

Financiers:



Eindrapportage lichtkleurenonderzoek

2011-2012

Samenvatting

Uit eerdere onderzoeken bleek dat LED-belichting bij vruchtgroenten niet resulteerde in meerproductie ten opzichte van belichting met SON-T. Dit komt ten dele door een lagere ontwikkelingssnelheid bij LED en ten dele door fysiologische problemen die vaak ontstaan, zoals gekrulde, statische bladeren. Onderzoek bij tomaat heeft aangetoond dat de lagere ontwikkelingssnelheid met extra warmte ter hoogte van de kop van het gewas gecompenseerd kan worden. Echter, de fysiologische problemen lijken te komen door een suboptimaal lichtspectrum en komen in mindere mate ook voor bij SON-T belichting.

Dit gaf aanleiding tot het huidige onderzoek naar de spectrale samenstelling van belichting die vereist is voor een gezond en hoogproductief (tomaten)gewas. Om deze fundamentele vraag te kunnen beantwoorden is de energievraag buiten beschouwing gelaten. Ook het type lichtbron was verder niet van belang. Het onderzoek is dus puur gericht op kennis over gewasreacties op lichtspectra. Het uiteindelijke doel is om met deze kennis energetisch efficiënte lichtbronnen te ontwikkelen. Een lichtspectrum waarbij een gewas optimaal functioneert, leidt niet alleen tot een efficiëntere benutting van kunstlicht, maar ook van het daglicht. Dit draagt bij aan het streven naar energiebesparing in kassen.

Enige achtergrond: Licht levert niet alleen energie voor de fotosynthese en dus de productie, maar is ook een bron van informatie voor de plant over zijn omgeving. Vooral het lichtspectrum heeft een grote invloed op de balans van de verschillende fotoreceptoren in de plant: (1) de cryptochromen, (2) de fototropinen en (3) de fytochromen. Door die balans worden o.a. de hormonen in de plant aangestuurd, die vervolgens weer processen reguleren zoals strekking, bloeiinductie en afrijpsnelheid.

De huidige lichtbronnen (SON-T en rood/blauwe LED's) stralen een volledig ander spectrum uit dan daglicht: in het PAR-gebied (400-700 nm) vertoont het spectrum veel deficiënties en ze stralen vrijwel geen verrode golflengten (700-780 nm) uit. Dit leidt tot een totaal andere balans van bovengenoemde fotoreceptoren dan bij daglicht. Hieruit ontstond de volgende hypothese: *Belichting met een spectrum waarbij de fotoreceptoren in een natuurlijker balans gestuurd worden verhoogt het productiepotentieel vergeleken met een gangbaar lampspectrum.* Om deze hypothese te toetsen zijn zes lichtbehandelingen gekozen die de balans van de fotoreceptoren op een verschillende manier beïnvloeden:

1. 70% SON-T + 30% plasmalicht
2. 70% LED rood/blauw + 30% plasmalicht
3. LED 90 % rood/10% blauw (controle, verwachting dat verbetering mogelijk is)
4. LED 90 % rood/10% blauw + verrood (berekende fytochromabalans als bij zonlicht)
5. LED PAR (zonlichtspectrum, behalve de verrode golflengten)
6. LED ZON (zonlichtspectrum, dus inclusief verrood)

De gedachte achter behandeling 1 & 2 is dat een matige prikkeling van alle fotoreceptoren, door het breedband plasmalicht te mengen met een standaard lichtbron, een mogelijke verbetering geeft. Bij behandeling 3 (LED R/B) zijn alle fotoreceptoren 'uit balans', terwijl ze bij behandeling 6 (LED ZON) juist allemaal een 'natuurlijke balans' hebben. Bij behandeling 4 (LED Verrood) zijn de fytochromen in een balans als bij daglicht, maar de cryptochromen en fotoropinen niet, terwijl bij behandeling 5 (LED PAR) laatstgenoemde fotoreceptoren geprikkeld worden zoals bij daglicht, maar de fytochromen juist niet. Zo wordt het belang van de verschillende fotoreceptoren voor de gewasproductie op een gedegen wijze getoetst.

De proef werd uitgevoerd in 6 kascompartimenten, waarin alle omstandigheden behalve de lichtspectra gelijk gehouden werden. Om de invloed van stralingswarmte op de proefresultaten uit te sluiten werd de koptemperatuur overal gelijk gehouden. De tomatenplanten (cv. Timotion, 3 stengels/m²) werden belicht met een intensiteit van 160 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ (7 oktober 2011 tot 31 maart 2012) en vervolgens een maand onbelicht doorgeteeld. Op basis van uitgebreide metingen van gewaseigenschappen, productie en fysiologische kenmerken zijn de hieronder beschreven resultaten naar voren gekomen.

Financiers:



Eindrapportage lichtkleurenonderzoek

2011-2012

De verschillen in gewasontwikkeling en productieverloop waren groot. Het LED ZON gewas leek in de winter op een onbelicht voorjaarsgewas, met naar het licht toe georiënteerde bladeren, een natuurlijke lichtgroene kleur, en meer strekking van de internodiën dan gangbaar in een SON-T belichte teelt. Het LED Verrood gewas leek in veel opzichten op het LED ZON gewas. De strekking was volgens verwachting extremer. In de andere 4 behandelingen waren de bladeren onnatuurlijk donkergroen en de internodiën kort, zoals gebruikelijk in een belichte teelt. Dit gold in de meest extreme mate voor LED PAR, waar de stengelstrekking geremd werd door zowel het grote aandeel blauw (via de cryptochromen) als het ontbreken van verrood (via de fytochromen) in het lichtspectrum. Dit gewas was ook het meest vegetatief en de bladkwaliteit werd stevast als beste beoordeeld door de betrokken telers.

Aan behandelingen 1 en 2 (*standaard lamp + plasma*) viel verder weinig bijzonders op. De productie bleef iets achter bij LED R/B. Het toevoegen van een beperkte hoeveelheid breedband plasmalicht heeft dus geen toegevoegde waarde, in ieder geval niet ten opzichte van puur blauw licht.

Het mooi ogende, vegetatieve *LED PAR* gewas bleef de eerste maanden qua productie het meest achter. Hieruit kan geconcludeerd worden dat een natuurlijk lichtspectrum binnen het PAR-gebied, en de daaraan gekoppelde natuurlijke balans van de cryptochromen en fototropinen, niet de ontbrekende schakel is voor productieverhoging. Overigens presteerde het LED PAR gewas later in de teelt beter.

Tegen verwachting in produceerde *LED ZON* ook niet meer dan LED R/B, ondanks de natuurlijke fotoreceptorbalans en de natuurlijk ogende gewasontwikkeling. Dus kan gesteld worden dat een natuurlijke balans van alle fotoreceptoren niet vanzelfsprekend tot de beste productie leidt.

De wekelijkse productie van *LED Verrood* was tot de jaarwisseling spectaculair hoger: In week 52 was het versgewicht 25% hoger dan in het op één na best producerend gewas (LED R/B). Bovendien was het percentage drogestof in de vruchten gedurende de gehele teelt 10-20% hoger. Het vruchtgewicht uitgedrukt als drooggewicht loopt dus nog verder voor. Ook bij LED ZON lag het percentage drogestof relatief hoog. Na de jaarwisseling liep de wekelijkse versproductie bij LED Verrood zeer sterk terug. De vraag is nu of een natuurlijke balans van de fytochromen de ontbrekende schakel is voor productieverhoging. Bij LED ZON was de fytochrombalans hetzelfde als bij LED Verrood, maar de productie niet opvallend hoog. Dit komt waarschijnlijk door een minder efficiënte benutting van het grote aandeel blauwe en groene golflengten in het zonnespectrum. Het is verrassend dat het kunstmatige zonlichtspectrum niet tot de hoogste productie leidde. Om te mogen concluderen dat een lichtspectrum met relatief veel rood plus een hoeveelheid verrood voor een natuurlijke fytochrombalans ideaal is, moet eerst aangetoond worden dat de productievoorsprong tot verder in de teelt kan worden vastgehouden.

LED R/B, waarbij alle fotoreceptoren een 'onnatuurlijke balans' hebben, was het op één na best en aan het einde van de teelt zelfs het best producerende gewas. Concluderend kan gesteld worden dat met LED R/B heel redelijk geteeld kon worden. Met toenemende efficiënties ($\mu\text{mol}/\text{Joule}$) en dalende kosten van LED's kan deze combinatie goede perspectieven bieden voor praktijktoepassing. Indien het niet lukt om de spectaculaire effecten van LED Verrood verder uit te buiten, dan is van de beproefde combinaties LED R/B het meest geschikt voor belichting van tomaten.

De kansen om het lichtspectrum te optimaliseren voor een efficiëntere productie liggen dus duidelijk bij de verrood-effecten op de fytochrombalans. Tot de jaarwisseling was de versproductie spectaculair hoger, het drogestof-percentage was continu hoger, en de vruchten ontwikkelden sneller dan onder de andere lichtspectra. De productie-terugval in de loop van de teelt was vooral te relateren aan steeds kleiner wordende bladeren (uitputting gewas), resulterend in een te lage LAI, waardoor een deel van het licht niet meer door het gewas onderschept werd. Ook kwamen relatief veel bladrandjes voor.

Het voorkomen van de productie-terugval, omzetting van het hogere drogestofgehalte in versgewicht, en vooral de combinatie hiervan, zal grote gevolgen hebben voor de productie-efficiëntie per m^2 kas en per Joule energie-input. Dit realiseren vormt de volgende uitdaging. Sturing van de fytochrombalans met verrood licht biedt een interessante kans voor het maken van een efficiëntieslag.

Financiers:



Eindrapportage lichtkleurenonderzoek

2011-2012

1 Vooraf

Dit rapport is geschreven voor geïnteresseerden in het belichten van tuinbouwgewassen, en dan met name opgaande groentegewassen. Hoofdaanvrager van dit project is telersvereniging 'Tuinbouw Techniek Ontwikkeling' (TTO). Het project heeft plaatsgevonden vanaf oktober 2011 tot mei 2012 in de Demokwekerij Westland. Het lichtkleurenonderzoek is gefinancierd door het programma 'Kas als Energiebron' van Productschap Tuinbouw en het Ministerie van EL&I.

Het project is vanuit onderzoeksoogpunt succesvol geweest, mede door het grote enthousiasme van alle betrokkenen. Hierbij willen wij namens alle onderzoekers onze dank uitspreken naar Hans Zwinkels en Vincent van der Lans voor de teeltbegeleiding en naar Dennis Medema en Leo Oprel voor hun steun als onderzoekscoördinatoren.

Leeswijzer

Het onderzoek is te complex om in een beperkt aantal woorden te vatten. Een volledig beeld van de werkwijzen, resultaten en achtergronden vergt bestudering van het volledige rapport. Voor een 'snelle indruk' raden wij aan om in ieder geval door te nemen: paragrafen 3.3 & 3.4 (probleemstelling en doelstellingen), 4.2 (hypothese), 5.3-5.5 (algemene proefopzet en lichtspectra), en de hoofdstukken 6 (resultaten) en 9 (algemene conclusies).

Financiers:



2 Samenwerkende partijen

2.1 Tuinbouw Techniek Ontwikkeling

Telersvereniging TTO is een groep (45 met totaal +/- 800ha) vooruitstrevende telers welke hun krachten bundelen om gezamenlijk innovaties op te pakken op technisch en teelttechnisch gebied. Uitgangspunt hierbij vormt het zogeheten 'bottom-up' innoveren, wat inhoudt dat bedreigingen of juist kansen door de kwekers gezamenlijk opgepakt kunnen worden. Hiermee probeert TTO innovaties beter aan te laten sluiten op de praktijk en de kweker actief te betrekken bij het innovatieproces. TTO vormt een spreekbuis richting overheden en/of kennisinstellingen en fungeert als een paraplu voor allerlei technische innovaties in de tuinbouw. Door het grote aantal leden is slagkracht ontstaan en worden technische en financiële risico's beter gespreid.

2.2 Samenwerkende onderzoekspartijen

2.2.1 *Plant Lighting*

Onderzoeksbureau Plant Lighting vormt de schakel tussen wetenschap en praktijkinnovaties. Binnen het team is Dr. ir. Sander Hogewoning o.a. verantwoordelijk voor de wetenschappelijke onderbouwing van de proef, fysiologisch onderzoek, en voor verklaring van de bevindingen. Zijn kennis van fotosynthese en gewasbelichting zijn ingezet om het praktijkonderzoek naar de effecten van verschillende lichtkleuren op gewasgroei naar een hoger niveau te tillen.

2.2.2 *TICE Agro*

Tice Agro ondersteund zijn klanten in het behalen van verbeteringen op het gebied van groenten teelt in geconditioneerde omstandigheden. De werkzaamheden van TICE Agro evolueren op het vak van bedrijfsontwikkeling en teelt technische ondersteuning.

2.2.3 *NPR Consultancy*

Ronald Duyvensteijn heeft een eigen adviesbureau en is gespecialiseerd in teeltkundig advies aan binnen- en buitenlandse kwekers. In het onderzoek kwam dhr. Duyvensteijn driemaal per week een bezoek aan het onderzoek brengen. De verantwoordelijkheid van NPR Consultancy was het geven van advies over- en bepalen van de strategische lijn.

2.2.4 *Inno-Agro*

Inno-Agro is gespecialiseerd in coördinatie, projectmanagement en initiatief voor technische innovatieprojecten in de tuinbouw. Stefan Persoon van Inno-Agro was projectleider van het onderzoek, verantwoordelijk voor de techniek en eindverantwoordelijk voor het onderzoek.

2.2.5 *Proeftuin Zwaagdijk*

Proeftuin Zwaagdijk is een onderzoekscentrum voor praktijkgericht onderzoek met locaties in Zwaagdijk en het Westland. Jeroen Sanders van locatie Westland was verantwoordelijk voor de gewasmetingen in de proef. Hiernaast was Dhr. Sanders verantwoordelijk voor het ziekten- en plaagbeleid welke was gebaseerd op een 'zero tolerance'-beleid.

2.2.6 *Demokwekerij Westland*

Demokwekerij Westland heeft ruim dertig kasafdeling tot haar beschikking om onderzoek te doen naar o.a. gewasbeschermingsmiddelen, teeltsystemen, belichting en klimaat. Het is het innovatiecentrum van het Westland op het gebied van teelt en techniek in de glastuinbouw. Het doel van Demokwekerij Westland is het stimuleren en faciliteren van ontwikkelingen en onderzoek. In de ruim één hectare kas

Eindrapportage lichtkleurenonderzoek

2011-2012

zijn onderzoeksafdelingen maar ook presentatieruimtes waar toeleveranciers van de glastuinbouwsector producten en innovaties presenteren.

Financiers:



3 Inleiding

3.1 Kansen voor nieuwe belichtingsbronnen

De keuze voor het type lamp dat in de tuinbouw als assimilatiebelichting wordt toegepast is tot dusverre een pragmatische geweest. Decennia lang is de hogedruk natriumlamp (SON-T) de standaard geweest. Dit vanwege het feit dat planten er redelijk goed onder groeien en de hoge efficiëntie vergeleken met andere lampen ($\mu\text{mol PAR}$ output per Joule elektriciteitsinput). Sinds enige jaren wordt volop geëxperimenteerd met rode LED's (met een klein % blauw), waarvan de efficiëntie nog steeds in opmars is. Echter, noch SON-T, noch rode LED's zijn lamptypen die gericht zijn ontwikkeld om planten optimaal mee te laten groeien. Dit blijkt onder andere uit de onnatuurlijke bladstand die bij dit soort lamptypen wordt waargenomen.

Door de recente technische ontwikkelingen ontstaat een grotere keuze uit lichtbronnen die uit mogelijk te gebruiken zijn voor gewasproductie. Zo is een steeds bredere keuze aan verschillende typen LED's beschikbaar en zijn er verschillende plasmalampen op de markt. Dit biedt zicht op ontwikkeling van lichtbronnen met een spectrale samenstelling (kleurenmix) die optimaal is voor het type gewas waarbij ze worden ingezet. Tot dusverre ontbreekt hiertoe echter nog veel essentiële basiskennis.

3.2 Ervaringen uit voorgaand onderzoek

3.2.1 *Wetenschappelijk*

Al meer dan 70 jaar wordt wetenschappelijk onderzoek naar de effecten van lichtkleuren op de ontwikkeling en fotosynthese van planten gedaan. Een bekend voorbeeld hiervan zijn de klassieke werken van McCree (1972) en Inada (1976) over de momentane invloed van de golflengte (=kleur) van licht op de fotosynthesesnelheid van bladeren. De zogenaamde 'McCree-curve' wordt nog veelvuldig aangehaald door fabrikanten van groeilicht. Dit onderzoek was een grote stap voorwaarts, maar zegt nog weinig over de lange termijn effecten van bepaalde lichtkleuren op gewasgroei. Juist die lange termijneffecten zijn van belang voor belichting van tuinbouwgewassen. Verder is vooral in de jaren '70 en '80 onderzoek gedaan naar de effecten van verrood licht op gewasontwikkeling. Hiertoe werden vrijwel altijd gloeilampen gebruikt (zie o.a. Morgan en Smith, 1979).

De beperkte mogelijkheden die de beschikbare lamptypen in het verleden boden maakte gericht onderzoek naar de effecten van de spectrale samenstelling van groeilicht op gewasontwikkeling moeilijk. Daarnaast was de praktische relevantie van dit soort onderzoek toentertijd laag. Immers, er was toch weinig keuze wat betreft de kleursamenstelling van lampen. De opkomst van steeds efficiëntere LED's heeft het lichtkleurenonderzoek een nieuwe impuls gegeven.

Onderzoekers van Kennedy Space Centre begonnen al in de jaren '90 met klimaatkameronderzoek naar de effecten van LED belichting op gewassen (o.a. Goins *et al.*, 1997), gevolgd door wetenschappers van The University of Tokyo enige jaren later (o.a. Matsuda *et al.*, 2004). Een belangrijke conclusie uit deze vroege LED-onderzoeken was dat planten beter functioneren als blauw licht aan rood LED-licht wordt toegevoegd, ondanks de hoge fotosynthese die eerder gevonden was bij kort durende belichting met puur rood licht (McCree, 1972; Inada, 1976).

In 2005 werd aan Wageningen Universiteit een langlopend fundamenteel onderzoek naar de reacties van planten op lichtkleuren gestart, gefinancierd door STW, Philips en Plant Dynamics. Dit heeft geleid tot een verdere kennisontwikkeling over het aanpassingsvermogen van gewassen aan licht op de langere termijn (zie o.a. de proefschriften van S.W. Hogewoning en G. Trouwborst). Verder werd duidelijk

Eindrapportage lichtkleurenonderzoek

2011-2012

aangetoond dat niet alleen de aanpassing van bladfotosynthese aan licht belangrijk is, maar dat ook de effecten van lichtkleur op de plantmorfologie (plantvorm) van groot belang kunnen zijn voor productie. Deze fundamentele kennis is gekoppeld aan de inzichten uit het toegepaste onderzoek (zie 3.2.2) en vormt de basis voor de huidige onderzoeksvraag: Wat is het optimale spectrum van groeilicht voor tomatenproductie in de praktijk? (zie ook 3.4)

3.2.2 Toegepast onderzoek TTO 2008-2011

Sinds 2008 voert TTO onderzoek uit naar LED belichting in de glastuinbouw. Uit de onderzoeken in de periode 2008-2009 kwam naar voren dat het ontbreken van (stralings-) warmte bij LED een andere groei en ontwikkeling veroorzaakt ten opzichte van gasontlading lampen. Daarnaast leek het spectrum de plantmorfologie te beïnvloeden. In de LED onderzoeken 2009-2011 werd daarom gefocust op energie met de volgende doelstellingen:

2009-2010:

“Ontwikkelt een tomatenplant geteeld onder LED hetzelfde als een tomatenplant onder SON-T wanneer de hoeveelheid stralingswarmte hetzelfde is”

2010-2011:

“Bepalen hoe warmte efficiënt kan worden ingebracht bij een LED-belichte tomatenteelt, met een minimaal gelijke productie als bij traditionele belichtingssystemen.”

Naar aanleiding van het eerste teeltseizoen en latere onderzoeken bij WUR Glastuinbouw, bleek duidelijk dat de ontwikkelingssnelheid van tomaat op peil gehouden dient te worden door voldoende warmte ter plaatse van de kop van het gewas. De ‘koude’ watergekoelde LED-systemen kunnen dit niet bewerkstelligen en het is lastig op te vangen door de hoofdverwarming (het buis-rail systeem).

In het teeltjaar erop (2010-2011) heeft TTO zich gericht op het helder krijgen van de minimale behoefte aan energie. Daarnaast was een belangrijke onderzoeksvraag om te bepalen of deze warmte middels convectie- en/of stralingswarmte kan worden ingebracht. Uit dit onderzoek kwam naar voren dat zowel met convectiewarmte (groeibuis) als met stralingswarmte het mogelijk is om de kop van het gewas op temperatuur te houden. In het geval van stralingswarmte bleek een niveau van 25 Watt infrarode straling¹ per m² kas voldoende. De uitstraling van het gewas en de bijbehorende schermregeling spelen hier een belangrijke rol in. Een risico van LED belichting kan zijn dat te ver teruggegaan wordt met energie inbreng; dit verhoogt de kans op een lagere bladkwaliteit en vergroot de kans op ziekten door de hogere luchtvochtigheid (Holder en Cockshull, 1988). De gewassen met een gebrek aan warmte bovenin het gewas strekten minder en hadden sneller last van bladranden (necrose aan de bladranden).

Uit bovengenoemde onderzoeken naar LED leek echter ook het *spectrum* van de gebruikte rood/blauwe LED-belichting verstoorde gewasreacties te veroorzaken. Bladeren van planten onder LED belichting toonden namelijk, ongeacht de hoeveelheid warmte in het gewas, donker van kleur en “getrokken”. Dit was de kiem voor de probleemstelling van het onderzoek in 2011-2012.

3.3 Probleemstelling

De glastuinbouw sector innoveert continu om efficiënter en energiezuiniger te kunnen produceren. Bijbelichting van gewassen zorgt voor meerproductie, hogere productkwaliteit en spreiding van de afzet, maar kost veel energie. Daarom wordt al enige jaren onderzocht of LED's op termijn als energiezuiniger

¹ Let op: infrarode straling is niet hetzelfde als verrood licht. Met verrood worden golflengten tussen de 700 en 780 nanometer bedoeld. Vanaf 780 nanometer begint het infrarood.

Eindrapportage lichtkleurenonderzoek

2011-2012

alternatief voor de SON-T lamp ingezet kunnen worden. De meeste proeven zijn tot nu toe uitgevoerd met een basis van rode LED's (meest efficiënte LED in $\mu\text{mol}/\text{Joule}$) aangevuld met blauwe LED's (5-15%).



Figuur 1. Een hogedraad komkommerteelt werd belicht met een combinatie van SON-T lampen boven het gewas en rood/blauwe LED's tussen het gewas (links). De controle behandeling bestond uit een zelfde hoeveelheid PAR bijbelichting met alleen SON-T boven het gewas (rechts). De bladeren in het gewas tussenbelicht met rode en blauwe LED's vertonen sterk licht mijdend gedrag (krullende bladeren). Hierdoor onderschepten deze bladeren aanzienlijk minder licht dan in de controlebehandeling, waardoor potentiële productieverhoging verloren ging. Ook de controlebehandeling vertoonde milde bladkrulling, zoals gebruikelijk bij SON-T bijbelichting. Onderzoek Trouwborst et al. 2010.

De rode draad door de onderzoeken van de afgelopen jaren is dat LED-belichting bij vruchtgroenten niet resulteert in meerproductie ten opzichte van SON-T. Dit komt ten dele door een lagere ontwikkelingsnelheid bij LED en ten dele door fysiologische problemen die vaak ontstaan, zoals gekrulde, statische bladeren met een overmatige chlorofylaanmaak (zie Figuur 1). Eerder onderzoek van TTO heeft voor tomaat aangetoond dat de lagere ontwikkelingsnelheid met een acceptabele hoeveelheid extra warmte ter hoogte van de kop van het gewas gecompenseerd kan worden (TTO 2009-2011). Echter, de fysiologische problemen lijken te komen door een suboptimaal lichtspectrum voor de plant en komen in mindere mate ook voor bij SON-T belichting.

Het begrip van gewasreacties op het spectrum van bijbelichting is onvolledig. Meer kennis hierover is essentieel om belichting in de tuinbouw te kunnen optimaliseren. Daarom is de benadering uit het verleden, waarin de effecten van potentieel efficiënte lampen ($\mu\text{mol}/\text{Joule}$) op gewasproductie getest werden, losgelaten in dit onderzoek. Er is gekozen voor een fundamentele benadering. Immers, vast houden aan een efficiënte lamp als basis plus experimentele toevoegingen van andere lichtkleuren zou een eindeloze hoeveelheid te onderzoeken combinaties opleveren. Door het energievraagstuk buiten beschouwing te laten blijft het onderzoek naar gewasreacties op lichtkleuren zuiver: Welke delen van het lichtspectrum zijn essentieel voor een gezonde gewasontwikkeling en welke delen van het lichtspectrum kunnen zonder grote problemen worden weggelaten? Met die kennis kan vervolgens verder gezocht worden naar optimaal groeilicht dat ook energetisch verantwoord kan worden ingezet.

3.4 Doelstelling, uitgangspunten & onderzoeksvragen

Hoofddoelstelling:

Het identificeren van de spectrale samenstelling van belichting die vereist is voor een gezond en hoogproductief (tomaten)gewas.

Eindrapportage lichtkleurenonderzoek

2011-2012

Ervan uitgaande dat een gewas 'ideaal' reageert op een zonlichtspectrum, wordt onderzocht hoe de complexiteit van dit brede, en daarom kostbaar te produceren, spectrum geminimaliseerd kan worden zonder negatieve gevolgen voor het gewas. Hoe minder complex, hoe beter praktisch toepasbaar. Het streven is om op basis van de informatie uit dit onderzoek tot een efficiëntere belichtingsstrategie te komen die toepasbaar is in de praktijk.

Uitgangspunten onderzoek:

- Identificatie van het ideale *lichtspectrum* en niet zozeer het type *lichtbron*.
- Een lichtspectrum waarbij een gewas optimaal functioneert, leidt niet alleen tot een efficiëntere benutting van het kunstlicht, maar ook van het daglicht. Dit draagt bij aan het uiteindelijke doel om te komen tot een hogere energetische efficiëntie van belichting in kassen.
- Resultaten onderzoek bij tomaat ook vertaalbaar naar andere gewassen.

Onderzoeksvragen:

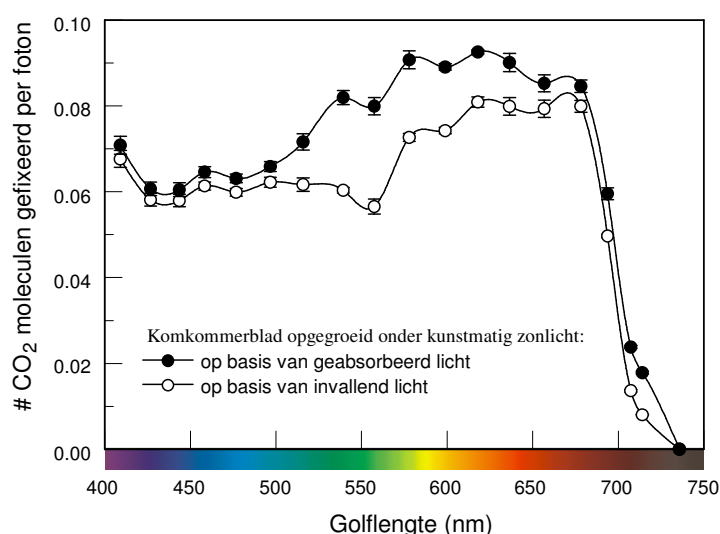
1. Wat zijn de effecten van de spectrale samenstelling van bijbelichting op productie en gewasontwikkeling bij tomaat?
 - ⇒ Identificatie delen van het lichtspectrum die essentieel zijn voor 'natuurlijke gewasontwikkeling'
 - ⇒ Leidt een 'natuurlijke gewasstand' ook tot meerproductie?
 - ⇒ Kennis is vereist om efficiëntere lichtbronnen voor gewasbelichting te ontwikkelen
2. Wat is de reikwijdte van productieverhoging door optimalisatie van het lichtspectrum?
 - ⇒ hieruit blijkt hoeveel verdere productieverhoging haalbaar is door het spectrum van lampen te optimaliseren
3. Wat is de fysiologische oorzaak van de effecten van het lichtspectrum op gewasontwikkeling en productie.
 - ⇒ Hieruit volgen de processen die wat betreft mogelijkheden voor meerproductie een sleutelrol spelen. Kennis hierover geeft de mogelijkheid om nieuwe strategieën uit te werken om deze processen te sturen.

Financiers:

4 Onderbouwing onderzoek

4.1 Literatuurstudie: effecten van lichtkleur op gewasontwikkeling

Licht is zowel een *energiebron* voor de groei en ontwikkeling van planten (assimilatielicht) als een *informatiebron* over de omgeving van planten (stuurlicht). In eerste instantie lijkt met het oog op gewasproductie vooral het energieaspect van belang: de lichtkleur die leidt tot een zo hoog mogelijke fotosynthesesnelheid lijkt de meest gunstige kleur voor gewasbelichting te zijn. Vandaar ook dat de klassieke onderzoeken van McCree (1972) en Inada (1976) naar de effecten van lichtkleur op de momentane fotosynthesesnelheid van bladeren vaak aangehaald worden als het gaat over het lichtspectrum van groeilampen. De 'McCree-curve' is een term die regelmatig terugkomt. Onlangs is met moderne meetmethoden nog bevestigd dat de 'curven' van deze onderzoekers een goed beeld geven van de momentane effecten van lichtkleur op de fotosynthesesnelheid (zie Figuur 2).



Figuur 2. Effect van de golflengte (=kleur) van licht op de fotosynthesesnelheid van een komkommerblad. Weergegeven voor licht dat op een blad valt (open cirkels; 'actiespectrum') en licht dat al door het blad is geabsorbeerd, dus gecorrigeerd voor verliezen door reflectie en transmissie (gevulde cirkels; 'kwantumefficiëntie'). Data uit Hogewoning et al. (2012).

Volgens het actiespectrum¹ als in Figuur 2 dragen alle golflengten tussen 400 nm en 700 nm bij aan de fotosynthese. Dit wordt ook wel het 'PAR-gebied' genoemd. Golflengten in het gebied 350-400 nm en 700-730 nm dragen in slechts beperkte mate bij aan de fotosynthese. Rood licht (600-680 nm) lijkt het meest efficiënte gedeelte van het spectrum voor het aandrijven van de fotosynthese. Alleen redenerend op basis van het actiespectrum zou men dus verwachten dat een lichtbron op basis van alleen rode LED's zeer efficiënt is. Bij deze manier van redeneren worden echter een aantal belangrijke zaken over het hoofd gezien:

Ten eerste geeft het actiespectrum alleen de *momentane effecten* van een enkele lichtkleur (10 tot 20 nanometer bandbreedte) op de fotosynthesesnelheid weer, dus de korte termijn effecten. Recent is aangetoond dat bladeren zich aanpassen aan de lichtkleur waaraan ze voor langere tijd blootgesteld worden (Hogewoning et al. 2012). Hierdoor worden sommige lichtkleuren efficiënter door een gewas benut dan door het actiespectrum weergegeven wordt, vooral de golflengten groter dan 570 nm. Van de

¹ Actiespectrum: Momentane fotosynthesesnelheid uitgezet tegen de golflengte van het licht dat op het blad valt

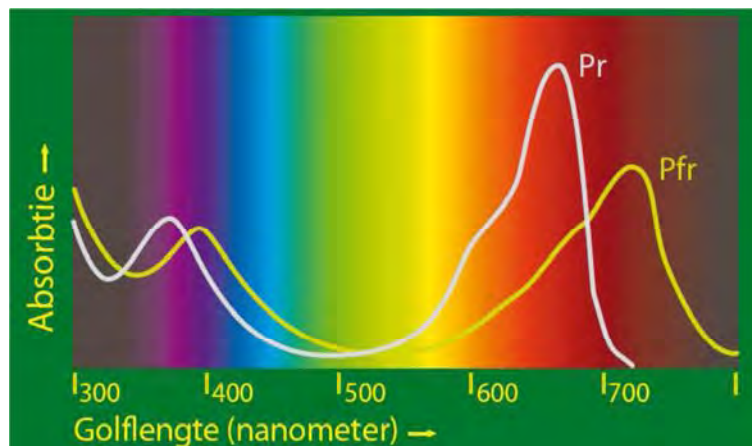
Eindrapportage lichtkleurenonderzoek

2011-2012

golflengten in het blauw-groene gebied (kleiner dan 570 nm) blijft de efficiëntie overigens ook na langere blootstelling lager ten opzichte van rood licht. Dit komt doordat niet-fotosynthetisch-actieve pigmenten in bladeren deze golflengten ten dele wegvangen. Ditzelfde onderzoek toonde aan dat een combinatie van verschillende lichtkleuren effectiever kan zijn dan de som der delen. Vooral de golflengten in het verrode gebied (700-730 nm) worden beduidend efficiënter benut dan het actiespectrum aangeeft, indien deze verrode golflengten worden gecombineerd met andere lichtkleuren. Dit geeft ook aan dat het onzinnig is om alleen op basis van het actiespectrum te bepalen wat de meest efficiënte golflengte is voor gewasbelichting met bijvoorbeeld LED's.

Ten tweede houdt het actiespectrum geen rekening met de eerder genoemde *stuurlichteffecten* van lichtkleuren. Stuurlichteffecten bepalen mede of een blad ook op langere termijn gezond kan functioneren. Dit blijkt onder andere uit het verstoord functioneren van de fotosynthese als een plant onder puur rood licht opgroeit, terwijl toevoeging van minder efficiënt lijkend blauw licht aan het rood de fotosynthesesnelheid aanzienlijk verhoogt (Matsuda et al. 2004; Hogewoning et al. 2010).

Enige uitleg over stuurlicht: De informatie over de omgeving van de plant wordt doorgegeven via speciale pigmenten in planten, zogenaamde *fotoreceptoren*. Deze fotoreceptoren zijn gevoelig voor de spectrale samenstelling van licht. Afhankelijk van die spectrale samenstelling worden signalen afgegeven die de hormoonhuishouding in de plant reguleren. De balans van de verschillende hormonen (o.a. auxine, gibbereline) reguleert allerlei processen in de plant, zoals strekking, bloei-inductie, afrijpsnelheid en veroudering. Er zijn drie groepen fotoreceptoren bekend: cryptochromen, fototropinen en fytochromen. De eerste twee zijn beiden gevoelig voor golflengten van het UV tot het blauw/groene gedeelte van het kleurspectrum (zie Ahmad, 2001). De fytochromen zijn gevoelig voor het volledige spectrum (UV tot verrood), maar reageren vooral sterk op rode en verrode golflengten. Rode golflengten stimuleren de aanmaak van actief fytochroom (Pfr) en verrode golflengten de aanmaak van inactief fytochroom (Pr). De balans tussen actief en inactief heeft een sterke invloed op de hormoonhuishouding en dus allerlei ontwikkelingsprocessen in de plant. Zie o.a. Whitelam en Halliday, 2007.



Figuur 3. Indicatieve illustratie van de spectrale gevoeligheid van de inactieve (Pr) en actieve (Pfr) vorm van fytochroom. Het lichtspectrum stuurt de balans tussen deze twee verschillende vormen van fytochromen en kan via een modelberekening uitgedrukt worden in een waarde: de PSS (phytochrome photostationary state). De PSS waarde heeft een sterke invloed op gewasontwikkeling.

De gevolgen van het lichtspectrum voor de productie van gewassen worden niet alleen bepaald door directe effecten op bladfotosynthese. Ook de ontwikkelingsprocessen van een plant die via de bovengenoemde fotoreceptoren gereguleerd worden zijn bepalend voor gewasproductie. Zo beïnvloedt gewasstrekking de verticale lichtverdeling over een gewas. Een betere verticale lichtverdeling kan leiden tot efficiëntere lichtbenutting, hetgeen ook de gedachte is achter tussenbelichting (Trouwborst, 2010)

en een diffuus kasdek (Dueck et al. 2012). Vooral verrode golflengten sturen de fytochromen in een evenwicht dat leidt tot gewasrekking. Rood licht remt strekking juist via een tegengesteld fytochroomevenwicht, terwijl blauw licht strekking remt via de cryptochromen. Ook bloeiinductie, afrijpingsnelheid, assimilatenverdeling over de plant en bladstand worden beïnvloedt door stuurlichteffecten. Al deze factoren kunnen de gewasproductie beïnvloeden.

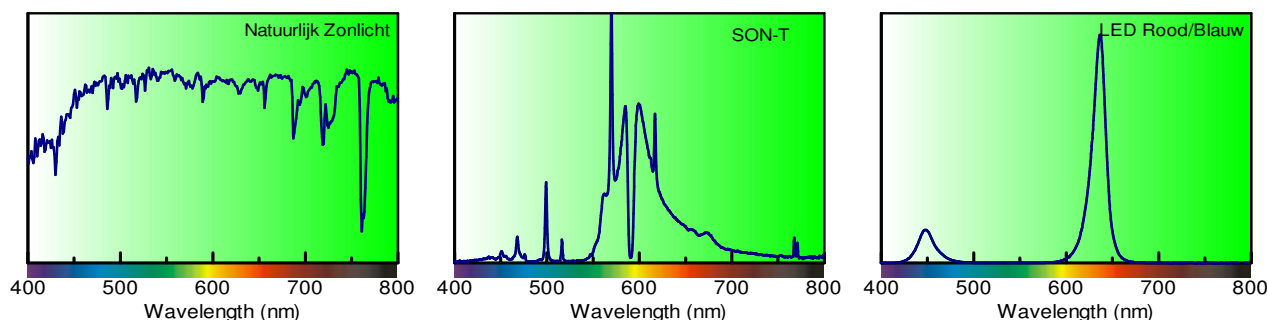
4.2 Hypothese ontbrekende schakel voor productieverhoging

De volgende *algemene hypothese* ligt ten grondslag aan het onderzoek dat moet leiden tot beantwoording van de in 3.4 geformuleerde onderzoeksvragen:

Belichting met een spectrum waarbij de fotoreceptoren in de plant in een natuurlijkere balans gestuurd worden verhoogt het productiepotentieel van hogedraad vruchtgroentegewassen ten opzichte van belichting met gangbare groeilampen.

Met een 'natuurlijke balans' wordt een fotoreceptorbalans zoals bij een natuurlijk daglichtspectrum bedoeld en met 'gangbare groeilampen' worden SON-T lampen en combinaties van rode en blauwe LED's bedoeld. De spectrale samenstelling van deze lamptypen leidt tot een geheel andere fotoreceptorbalans dan het spectrum van daglicht. De genoemde lamptypen stralen (vrijwel) geen golflengten uit in het verrode gebied (700-780 nm; zie Figuur 4), waardoor het fytochroomevenwicht extreem gestuurd wordt in de richting van actief fytochroom (zie Figuur 3).

Daarnaast is het daglichtspectrum een continu spectrum, terwijl SON-T en rode/blauwe LED's geen licht uitstralen in grote delen van het PAR-gebied (400-700nm). Dit leidt tot een andere prikkeling van de verschillende fotoreceptoren vergeleken met daglicht. Het aandeel blauw licht (400 tot 500 nm) binnen het PAR-gebied is ook beduidend lager: $\pm 4.8\%$ bij SON-T en vaak 5-15% bij de combinatie LED rood/blauw, vergeleken met $\pm 30\%$ in daglicht. Hierdoor worden met de genoemde lamptypes de cryptochromen en fototropinen beduidend minder sterk geprikkeld dan met een zelfde hoeveelheid micromolen aan daglicht.



Figuur 4. Spectrale samenstelling van natuurlijk daglicht (links), SON-T licht (midden) en een combinatie van rode (90%) en blauwe (10%) LED's.

Het uitgangspunt is dat de onnatuurlijke fotoreceptorbalans een belangrijke oorzaak is van 'onnatuurlijke' gewasreacties onder SON-T en rode/blauwe LED's, zoals bladkrulling, gedrongen groei en overmatige chlorofyllaanmaak (zie Figuur 1). Om de belangrijkste tekortkomingen in het spectrum van de bovengenoemde lamptypes te identificeren volgen een aantal *subhypothesen*:

Eindrapportage lichtkleurenonderzoek

2011-2012

- a) Alle fotoreceptoren dienen in een natuurlijke balans gestuurd te worden om tot een natuurlijke gewasstand en optimale productie te komen.
- b) Een natuurlijke prikkeling van de fotoreceptorklassen cryptochroom en/of fototropine is een belangrijke factor om tot een optimale productie te komen.
- c) Een natuurlijk evenwicht van de fotoreceptorklasse fytochroom is een belangrijke factor om tot een optimale productie te komen.
- d) Alle fotoreceptoren moeten in een zekere mate, echter niet noodzakelijkerwijs in een mate als bij een daglichtspectrum, geprikkeld worden om tot een optimale productie te komen.

Verwerping van alle bovenstaande subhypothesen zou leiden tot verwerping van de algemene hypothese (zie vorige pagina). Daaruit zou dan geconcludeerd kunnen worden dat een lampspectrum dat het meest gunstig is voor het aandrijven van de fotosynthese optimaal is, en dat alle stuurlichteffecten op gewasontwikkeling weinig invloed hebben op de productie. De spectrale samenstelling van de lichtbronnen in de proef (zie 4.2) is gekozen op basis van de bovenstaande subhypothesen.

Financiers:



5 Onderzoeksmethode

5.1 Inleiding

Het onderzoek naar de effecten van de spectrale samenstelling van belichting op de ontwikkeling en productie van een tomatengewas is uitgevoerd volgens het wetenschappelijke 'ceteris paribus' basisprincipe: De te onderzoeken factor (lichtspectrum) varieerde per onderzoeksafdeling en alle overige omstandigheden werden zover mogelijk gelijk gehouden. Om dit te bereiken werden niet alleen de gewashandelingen en het kasklimaat gelijk gehouden in de onderzoeksafdelingen, maar werden ook de verschillen in warmtestraling voor de verschillende lamptypes gecompenseerd (zie 5.6). Zo wordt gegarandeerd dat de verschillen in gewasrespons volledig gerelateerd zijn aan de spectrale samenstelling van de belichting.

5.2 Typering onderzoek

Door de opzet (zie 5.1) heeft dit onderzoek een fundamenteel karakter. De uitvoering is verder zoveel mogelijk volgens de gangbare teeltpraktijk: er is gebruik gemaakt van moderne onderzoeksafdelingen en de klimaatsturing en gewashandelingen waren ook vergelijkbaar met die in de praktijk. Hiermee komen antwoorden op fundamentele vragen over de effecten van lichtspectrum op gewasontwikkeling beschikbaar, die ook direct bruikbaar zijn voor de praktijk.

De metingen hadden zowel beschrijvende (oogst, plantmorfologie) als verklarende kenmerken (o.a. fotosynthese). De verklarende metingen waren gericht op de fysiologie van blad tot gewasniveau. Hiermee is getracht de interactie tussen klimaat (lichtspectrum) en gewasreactie zo goed mogelijk te verklaren. De achterliggende mechanismen op cel en moleculair niveau vallen buiten het aandachtsveld van dit onderzoek.

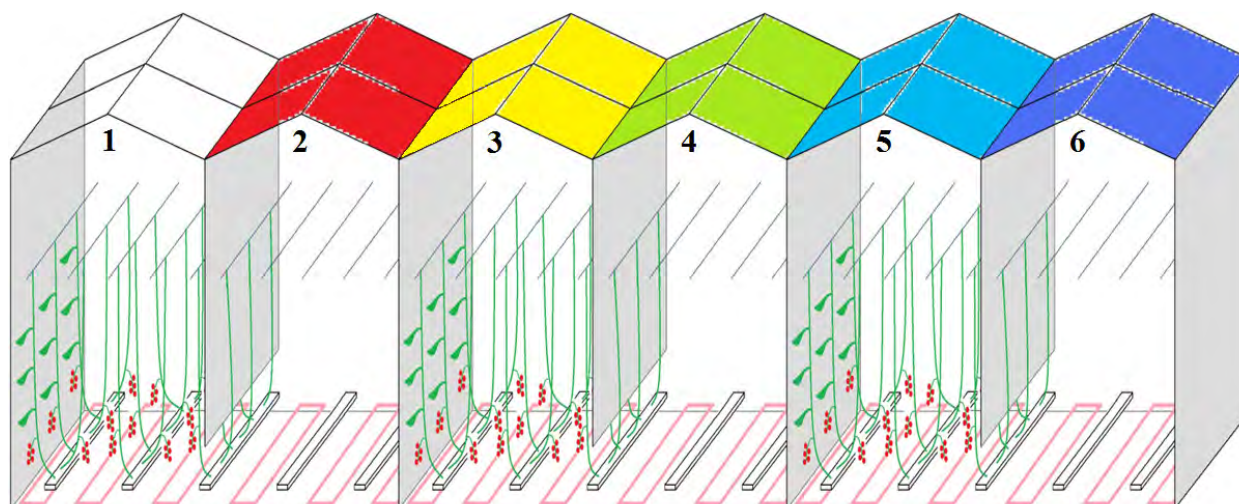
5.3 Algemene kenmerken proef

- | | |
|---------------------------------|---|
| • Tomatenras: | Timotion (cocktail trostomaat) |
| • Plantmateriaal | Geënt op onderstam Maxifor (2 planten per steenwolblok) |
| • Plantdatum: | 7 oktober 2011 |
| • Belichtingsduur | Vanaf 7 oktober opgebouwd tot 18 uur (23.00-17.00 uur) |
| • Lichtintensiteit | 160 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ |
| • Einde belichting | 31 maart 2012 (+ meer daglicht door verwijderen plastic scheiding compartimenten) |
| • Einde proef | 1 mei 2012 |
| • CO ₂ streefwaarde: | 800 ppm |
| • Stengeldichtheid | 3,0 / m ² |

De betrouwbaarheid van de resultaten hangt sterk af van de betrouwbaarheid van de klimaatsgegevens. Daarom is de gelijkheid van lichtintensiteit, CO₂ concentratie en temperatuur zeer nauwkeurig gecontroleerd en waar nodig bijgesteld.

5.4 Algemene Proefopzet

Drie onderzoeksafdelingen waarvan het klimaat apart stuurbaar is waren ieder verdeeld in twee compartimenten (zie Figuur 5). In ieder compartiment werd het tomatengewas belicht met een specifiek lichtspectrum (zie 5.5).



Figuur 5. Een grafische weergave van de scheiding van de teeltvakken om meer behandelingen te kunnen toepassen.

5.5 Spectrale samenstelling lichtbronnen

Ter toetsing van de hypothesen (zie 4.2) zijn de volgende lichtbronnen gebruikt in de verschillende kascompartimenten:

1. SON-T (70%) + plasmalicht (30%)
⇒ zie subhypothese d in 4.2
2. LED rood en blauw (70%) + plasmalicht (30%)
⇒ zie subhypothese d in 4.2
3. LED rood en blauw (10%) (controle, verwachting dat verbetering mogelijk is)
4. LED rood en blauw (10%) + verrood [FR] (berekend fytochromeevenwicht als bij zonlicht)
⇒ zie subhypothese c in 4.2
5. PAR (zonlicht nagebootst met LED's, behalve de verrode golflengten)
⇒ zie subhypothese b in 4.2
6. ZON (zonlicht nagebootst met LED's, dus inclusief verrood)
⇒ zie subhypothese a in 4.2

Bovengenoemde behandelingen worden in het vervolg van dit rapport weergegeven met de volgende namen en kleuren in de figuren:

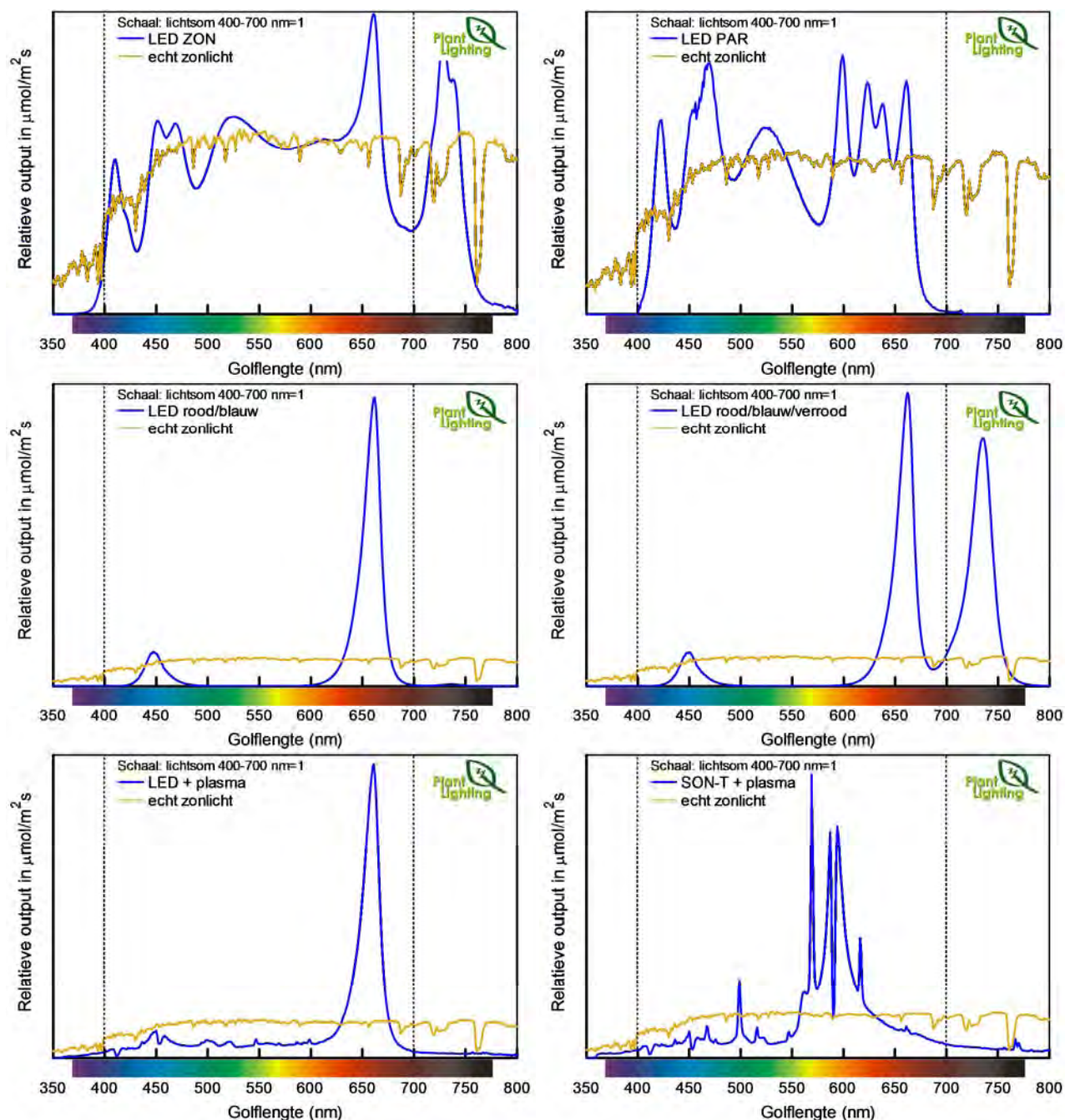
Behandeling	1	2	3	4	5	6
Korte naam	SON-T plasma	LED plasma	LED R/B	LED R/B + FR	LED PAR	LED ZON

Het lichtspectrum is gedurende de proef routinematig gecontroleerd met een gekalibreerde USB2000 spectroradiometer (Ocean Optics, Duiven, Nederland). Zie Figuur 6 voor de spectrale samenstelling van de belichting.

De LED-armaturen zijn gemaakt door Lemnis Lighting, de 600 W SON-T lampen zijn afkomstig van Hortilux en de plasmalampen zijn van het type Gavita Pro Lep 300 watt plasma. De hoeveelheid blauwe LED's in de combinatie LED rood en blauw (70%) + plasmalicht (30%) is zo berekend dat 10% van het PAR-licht bestond uit blauwe fotonen (400 tot 500 nm).

Eindrapportage lichtkleurenonderzoek

2011-2012



Figuur 6. Spectrale samenstelling van de belichting in de verschillende proefcompartimenten (blauwe lijn). De gele lijn geeft in ieder figuur het spectrum weer van natuurlijk daglicht. De verticale stippellijnen markeren het PAR-gebied (400 tot 700 nm) van het licht spectrum.

Het spectrum LED ZON (figuur linksboven) en LED Verrood (midden rechts) is zo samengesteld dat de berekende waarde voor het fytochrome-evenwicht (PSS) vrijwel gelijk is aan de PSS waarde bij natuurlijk daglicht. De PSS-waarde is met een model van Plant Lighting berekend. In LED PAR (rechtsboven) is het daglicht spectrum alleen in het PAR-bied benaderd en zijn de verrode golflengten weggelaten. Het plasmalicht (onder) zorgt voor een breed spectrum van lage intensiteit bovenop het licht van de rode en blauwe LED's (linksonder) en het SON-T licht (rechtsonder).

Eindrapportage lichtkleurenonderzoek

2011-2012

5.6 Stralingswarmte in de gewassen

Het onderzoek richt zich op de effecten van de spectrale samenstelling van de belichting op de gewasontwikkeling. Een veelbesproken punt van LED's is dat ze geen stralingswarmte produceren, in tegenstelling tot SON-T. Dit hoeft niet per definitie een probleem te zijn, zoals uit het onderzoek in 2010-2011 is gebleken. Echter, om alle factoren behalve het lichtspectrum gelijk te houden is ervoor gekozen om de hoeveelheid stralingswarmte in *alle* proefvakken gelijk te houden. Om deze reden was in alle vakken de hoeveelheid stralingswarmte 40 W/m².

5.7 Inrichting onderzoeksafdelingen en lichtmetingen

5.7.1 *Kas en installaties*

Het onderzoek is uitgevoerd in een standaard Venlo kas met een pothoogte van 6,5 m en een vakmaat van 4 m. Er was sprake van 3 afdelingen waarin elk 2 compartimenten zijn gemaakt. De kasafdelingen zijn voorzien van een hangend gotensysteem AG200 mm, waarbij de middelste gootrij werd gebruikt voor metingen. Het lichtniveau (zie 5.7.2) was voor alle afdelingen exact gelijk in de middelste 11 meter van de teeltrij. De kas werd verwarmd met een traditioneel buis-rail systeem (h.o.h. 420 mm ø51); er was dus ook geen groeibuis. Ten slotte waren er twee scherminstallaties: 1 lichtdoek en 1 energiedoek.

De volgende installaties zijn ingebracht om het klimaat te monitoren :

- 3 meetboxen per afdeling (bij mat, bij kop en 1 vrij te plaatsen)
- 1 IR planttemperatuur meter
- 1 weeggoet type Priva Growscale (gekoppeld met klimaatcomputer) (in 4 van de 6 afdelingen)
- 1 draingoot ter meting van de drainage van 6 planten.
- Lichtinstallatie en afscherming als onder beschreven

Voorafgaand en bij start is veel aandacht besteed aan het volledig gelijk krijgen van de afdelingen, zowel op het gebied van klimaat, licht, watergift en plantkwaliteit. Verschillen tussen de afdelingen zijn zodoende volledig toe te schrijven aan het lichtspectrum. Met name de weeggoten hebben een belangrijke bijdrage geleverd in het in kaart brengen van de verdamping en gelijk krijgen van de afdelingen.

5.7.2 *Licht*

Een juiste afstelling van de lichtbronnen cruciaal is voor de kwaliteit dit onderzoek. De afdelingen zijn afgezet met wit-zwart-wit folie waardoor er geen invloed van de belichting vanuit andere afdelingen op het gewas was. Eén gevel van per afdeling grensde aan buiten. Om koude-invloeden tegen te gaan is deze gevel bekleedt met noppenfolie.

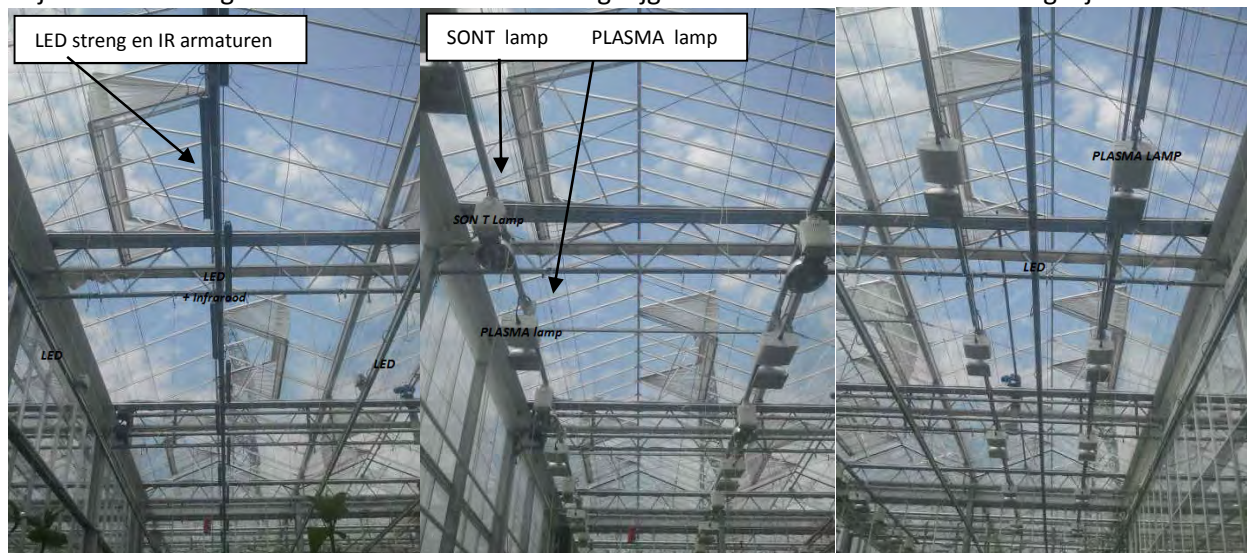
In de afdelingen waren de volgende belichtingsarmaturen geïnstalleerd:

SON-T plasma:	2x5 SON-T	2x5 Plasma	9kW
LED plasma:	3x14 LED	2x5 Plasma	6 kW
LED R/B:	3x23 LED		4,9 kW
LED Verrood:	3x44 LED		9,5 kW
LED PAR:	3x48 LED		10 kW
LED ZON:	3x42 LED		9 kW

De geïnstalleerde vermogens zijn relatief: de LED afdelingen kunnen onderling vergeleken worden de afdelingen met andere stralingsbronnen zoals Plasma en SONT minder, veroorzaakt door uitstralingspatroon van de lamp.

5.7.2.1 Lichtintensiteit

De lichtintensiteit is voorafgaand aan de proef gemeten met een kwantumsensor (LI-COR, Lincoln, USA) en wordt uitgedrukt in $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ PAR (golflengtegebied 400 tot 700 nm). Vervolgens is de intensiteit vrijwel elke week gecontroleerd en wanneer nodig bijgesteld: Het streven was om een gelijk lichtniveau



Figuur 7. LED + IR afdeling

SON T + Plasma

LED + Plasma

van $160 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ tussen 2,20 m en 3,00 m hoogte (kop gewas) te handhaven. Hiertoe werd in elke afdeling een in hoogte verstelbare rij lampen geïnstalleerd. Wanneer bleek dat het lichtniveau te ver afweek, kon deze in hoogte versteld worden. Er werd op 2,20m en op 3,00m hoogte om de strekkende meter een meting uitgevoerd in zowel het pad als tussen het gewas. Wanneer bleek dat er een te grote afwijking was, werden de rijen lampen in hoogte aangepast en werd opnieuw gemeten, net zo lang tot het lichtniveau weer gelijk was. De kwantumsensor is vergeleken met een tweede meter; de afwijking betrof maximaal 2%.

In totaal heeft dit geresulteerd in een gelijk lichtveld over de middelste goot, over een lengte van 11 meter. Zodoende kan de lichtgelijkheid gegarandeerd worden in een kubus van $11 \times 1,5 \times 0,8\text{m}$ (lxbxh; zie ook resultaten hoofdstuk 6.2.1). Het totaal aantal branduren van week 42 t/m week 52 is 1.262 uur en van week 1 t/m week 12 1.348 uur. De installatie heeft dus in totaal 2.610 uur gebrand.

5.7.2.2 Correctie lichtintensiteit

Door met een kwantumsensor gemeten lichtintensiteiten van een verschillende spectrale samenstelling met elkaar te vergelijken ontstaat het risico op systematische fouten. Dit heeft twee redenen:

Ten eerste kan een kwantumsensor waarden weergeven die afwijken van de werkelijke lichtintensiteit. De afwijkingen zijn golflengteafhankelijk en het grootst aan de randen van het PAR-gebied, dus rond 400 nm (de blauw/UV grens) en rond 700 nm (de rood/verrood grens). Vooral bij smalband lichtbronnen (o.a. LED'S) en lichtbronnen die relatief veel golflengten rond 400 nm of 700 nm uitstralen kunnen daardoor aanzienlijke fouten ontstaan. Voor dit type fouten is gecorrigeerd.

Ten tweede telt volgens de definitie licht buiten het PAR-gebied niet mee als zijnde 'groeilicht'. De werkelijkheid is gecompliceerder dan de definitie: golflengten net buiten het PAR-gebied zijn weliswaar minder efficiënt in het aandrijven van de fotosynthese dan golflengten binnen het PAR-gebied, maar ze dragen nog altijd bij aan de fotosynthese en dus aan de productie. Daardoor wordt voor lichtbronnen die relatief veel golflengten buiten het PAR-gebied uitstralen de effectieve lichtintensiteit onderschat. Dat

Eindrapportage lichtkleurenonderzoek

2011-2012

geldt in dit onderzoek vooral voor de behandeling LED Verrood (zie Figuur 6, midden rechts). Op basis van recente inzichten in de bijdrage van golflengten buiten het PAR-gebied aan de fotosynthese (zie Hogewoning et al. 2012) is de gemeten lichtintensiteit gecorrigeerd.

Bovengenoemde correcties leidden voor de behandelingen LED Verrood en LED ZON tot respectievelijk een 13.3% en 6.0% hogere lichtintensiteit dan gemeten met de kwantumsensor. Voor de andere behandelingen was de correctiefactor klein (<2%).

5.7.2.3 Lichtdoordringing in het gewas

Het lichtspectrum heeft *direct* en *indirect* invloed op de verticale doordringing van licht in een gewas. Direct omdat het percentage licht dat door een blad heen schijnt (transmissie) verschilt per golflengte. Zo dringen groene en vooral verrode golflengten dieper door in een gewas dan blauwe en rode golflengten. Hierdoor verandert ook de spectrale samenstelling van het licht naarmate het dieper in een gewas doordringt. Het lichtspectrum heeft ook invloed op de stand van het gewas, waardoor de lichtdoordringing indirect wordt beïnvloedt: Een uitgestrekter gewas of kleinere bladeren zullen bijvoorbeeld leiden diepere doordringing van licht.

De verticale lichtdoordringing in het gewas is op 04 januari en op 06 februari 2012 gemeten met een lijnsensor (LI-COR, Lincoln, USA). Dit is een kwantumsensor die licht integreert over de lengte van 1 meter. Er is op drie verticale posities gemeten: bij de kop van het gewas, in het midden tussen de kop en de onderste bladeren, en boven de onderste bladeren. De lichtintensiteit *in het gewas* is per hoogte bepaald als het gemiddelde van drie metingen boven de goot: één loodrecht en twee diagonaal ten opzichte van de goot. Bij de meting op 6 februari is tevens aan de zijkanten van het gewas gemeten (parallel aan de goot). Er is na zonsondergang gemeten zodat versturende effecten door daglicht uitgesloten zijn.

Op 26 januari is ook de spectrale samenstelling van het licht gemeten op dezelfde verticale posities in het gewas. De invloed van het lichtspectrum op het fytochroom evenwicht dieper in het gewas is op basis van deze meetgegevens berekend met een PSS-model.

5.8 Metingen gewasontwikkeling en fysiologie

5.8.1 Gewasontwikkeling en productie

In de periode van week 41 (2011) tot week 18 (2012) zijn er in de 6 verschillende compartimenten (paragraaf 5.5) wekelijks gewasmetingen en gewaswaarnemingen uitgevoerd. Alle meetplanten zijn zo geselecteerd dat ze gedurende de gehele onderzoeksperiode dezelfde lichtintensiteit hebben gekregen. Aan planten die buiten het lichtniveau vielen van de $160 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ zijn geen metingen uitgevoerd. Dit waren de planten die binnen ongeveer 2 meter van de randen en op de 2 buitengoten stonden. Bij aanvang van de proef zijn er op elke middelste goot 10 planten per compartiment genummerd en gelabeld. Tijdens het uitvoeren van de diverse gewasmetingen is nauwkeurig gekeken naar de ontwikkeling van deze planten. Regelmatig is besloten om aan bepaalde planten geen waarnemingen meer uit te voeren, omdat deze te veel afweken van het gemiddelde.

De hoeveelheid geproduceerd versgewicht per m^2 is berekend op basis van de oogst van gemiddeld 34 stengels per compartiment.

Wekelijks zijn er verschillende metingen en waarnemingen uitgevoerd aan planten, vrucht en blad. In bijlage III wordt een korte omschrijving gegeven van de belangrijkste metingen en waarnemingen. De meeste gewasmetingen en productieberekeningen zijn uitgevoerd op de 10 gelabelde planten per

Eindrapportage lichtkleurenonderzoek

2011-2012

afdeling. De vruchtmetingen (Brix, diameter en dichtheid) zijn te allen tijde uitgevoerd op de tweede gezette vrucht van de geogoste tros. De bladanalyses op drogestof zijn uitgevoerd op de onderste (geogoste) bladeren van de gelabelde planten.

Met een wekelijks interval is het gewas beoordeeld door de twee telers uit de begeleidingscommissie (BCO). Zij hebben op verschillende gewaskenmerken cijferbeoordeling gegeven. Deze beoordelingen zijn wekelijks verwerkt en besproken met de onderzoekers. Op basis van deze beoordeling is besloten om waarnemingen te beëindigen of te continueren. De telersbeoordelingen en de uitwerkingen ervan worden weergegeven in bijlage I en II.

Met behulp van de weeggoten werd de wateropname gemonitord. Vier weeggoten werden geïnstalleerd in vak LED ZON, LED Verrood, SONT met Plasma en LED met Plasma. Voor deze initiële opzet werd gekozen om inzicht te verkrijgen in hoeverre de verdamping zou verschillen tussen de verschillende vakken en tussen de meest verschillende lamp-typen. Toen na 6 weken het inzicht voldoende was is de weegschaal uit de LED Plasma verplaatst naar de LED Rood-blauw om zo inzicht te verkrijgen of het spectrum bijdraagt aan een mogelijke verandering van de wateropname.

In de weken 09 t/m 16 is er door 2^{de} jaar studenten van de opleiding Food, Commerce and Technology van InHolland te Delft een sensorische en houdbaarheid onderzoek uitgevoerd op de tomaten uit de verschillende onderzoeksafdelingen. Daarnaast hebben zij een marktonderzoek uitgevoerd met de vraag of tomaten uit een belichtende teelt kunnen voldoen aan de eisen van de consument.

De samenvatting van het onderzoek worden besproken in bijlage IV. Het totale eindverslag is op te vragen bij de proefuitvoerenden.

5.8.2 Fotosynthese

Doelstelling fotosynthesemetingen (eerste week van januari 2012):

1. Gerichte metingen van de fotosynthese-capaciteit aan de bovenste bladeren het gewas geven inzicht of belichting met een bepaalde spectrale samenstelling ertoe leidt dat het gewas efficiënter kan omgaan met het toenemende lichtniveau gedurende het vroege voorjaar.
2. Metingen aan de top van het gewas met een 'open' (transparante) bladkamer bij de behandelingen LED R/B en LED Verrood geven inzicht in het effect van verrood op de fotosynthese (NB verrode golflengten worden grotendeels niet als PAR meegeteld; zie 5.7.2.2).

Met de draagbare fotosynthesemeter (Figuur 8) is de lichtrespons van de bladfotosynthese gemeten. Hierbij wordt een blad ingeklemd (rode pijl in Figuur 8). Vervolgens wordt bij licht van een *interne* LED-lamp bij oplopende PAR-waarden de fotosynthesesnelheid gemeten. In deze metingen is er voor gekozen om aan 6 tot 9 bladeren per behandeling te meten bij 0, 40, 80, 160, 300, 600, 1200, 1600, 2000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ PAR. Hiermee wordt de maximaal haalbare fotosynthesesnelheid in kaart gebracht. Dit geeft weer hoe de planten kunnen omgaan met hoge lichtintensiteiten in de kas, welke in het voorjaar bij helder weer voorkomen. Deze metingen zijn verricht aan net volgroeide topbladeren (onbeschaduwd) om het effect van de spectrale samenstelling van de belichting op de maximale fotosynthese te meten. Tevens zijn enkele oude bladeren onderin het gewas gemeten. Alle fotosynthesemetingen zijn verricht bij 800 ppm CO₂.

Verder zijn met een transparante bladkamer metingen verricht aan net volgroeide topbladeren om de momentane (*in situ*) fotosynthese te meten: de fotosynthese gegeven de heersende lichtkleur en lichtintensiteit. Dit is gedaan bij de behandeling LED R/B ten opzichte van LED Verrood. De meting werd

Eindrapportage lichtkleurenonderzoek

2011-2012

verricht in de vroege ochtend met de schermen dicht om het effect van daglicht uit te sluiten (13 tot 14 bladeren per behandeling).

Uit de fotosynthesemetingen is niet alleen de fotosynthesesnelheid (CO_2 fixatie door blad), maar ook de geleidbaarheid van de huidmondjes gemeten. Een hogere geleidbaarheid leidt ertoe dat een blad gemakkelijker water kan verdampen.



Figuur 8. Licor-6400 draagbare fotosynthesemeter, gebruikt voor het meten van de CO_2 opname (fotosynthese) door Plant Dynamics B.V.

5.8.3 Bladpigmenten

De verhouding tussen de bladgroen-pigmenten chlorofyl a en chlorofyl b geeft een indruk van de mate van aanpassing van het blad aan de veranderingen in het lichtspectrum dieper in het gewas. Verrode golflengten dringen dieper door in het gewas dan andere lichtkleuren en daarom is de hoeveelheid verrood diep in het gewas relatief hoog (mits de lichtbron boven het gewas verrode golflengten uitstraalt). Een grote toename van de hoeveelheid chlorofyl b ten opzichte van chlorofyl a (dus een lage Chl a/b ratio) duidt op een efficiënte benutting van het verrode licht door de oudere bladeren (zie Hogewoning et al. 2012).

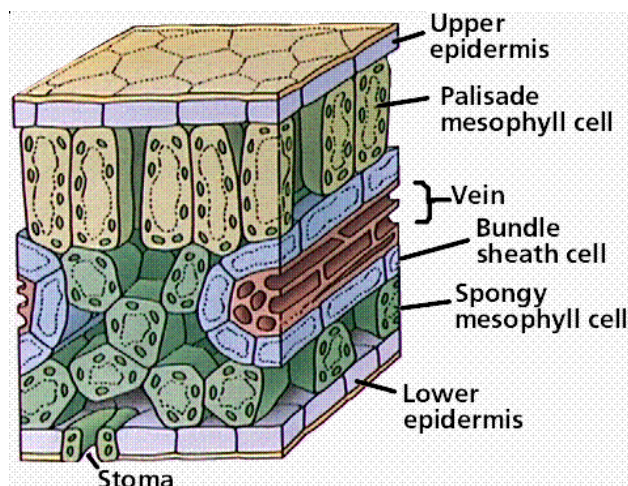
De totale hoeveelheid chlorofyl geeft aan of een bepaalde lichtbehandeling leidt tot een andere chlorofyalaanmaak dan bij een 'natuurlijke' spectrale samenstelling (LED ZON).

In de eerste week van februari 2012 zijn bladmonsters genomen voor pigmentanalyse. Bladpunsjes werden gesneden uit bladeren op dezelfde verticale posities in het gewas waar ook de lichtdoordringing en het lichtspectrum zijn gemeten (top, midden en onderste blad, zie 5.7.2.3). De pigmenten werden onttrokken aan het blad in het oplosmiddel N,N-dimethylformamide en geanalyseerd met een Cary 4000 spectrofotometer (Varian Instruments, USA). De concentratie chlorofyl a en b werd vervolgens berekend zoals beschreven in Wellburn (1994).

5.8.4 Bladanatomie

Een zekere mate van bladkrulling is een bekend fenomeen bij belichting van gewassen met groeilampen (zie Figuur 1). Om meer inzicht te krijgen in de effecten van de spectrale samenstelling van de belichting

op bladanatomie zijn een aantal dwarsdoorsneden van bladeren gemaakt en geanalyseerd onder de microscoop (zie schematisch voorbeeld Figuur 8).



Figuur 9. Schematische weergave van de anatomie van een blad.

5.9 Teeltstrategie

5.9.1 *Inleiding*

In alle afdelingen is stabiel geteeld, dat inhoudt dat er gestreefd werd naar een minimum aan veranderingen in klimaatstrategie. Veranderingen die werden doorgevoerd zijn minimaal een week aangehouden worden alvorens nieuwe veranderingen te implementeren.

5.9.2 *Energie*

In alle afdelingen is gestreefd naar een minimale energie-input door middel van de volgende instrumenten;

- Beperken minimum buis.
- Afkoeling naar de voornacht niet geforceerd.
- Temperatuur integratie over meerdere (3-5) dagen.
- Donkerperiode ≥ 6 uur.
- Ruime marges op directe en indirecte invloeden.
- Irrigatie strategie afgestemd op klimaatstrategie.

5.9.3 *Karakteristieken teelt*

- 24 uur streef temperatuur gewas is gerelateerd aan de lichtsom van zowel het groeilicht als het buitenlicht. Hierbij speelt ook de plantstatus (balans vegetatieve / generatieve groei en ontwikkeling) een rol, waarbij de leidraad is dat bij een vegetatief gewas een hogere 24-uur temperatuur en een grotere DIF wordt aangehouden ten opzichte van een generatief gewas. De 24 uur streef temperaturen werden berekend middels formules zoals geformuleerd door Heuvelink (2005) en de Koning (1989).
- Vuistregel voor de minimum buis is 40°C gedurende 24 uur met uitzondering van de voornacht welke in de regel 2-4 uur duurt (na zon onder).
- Schermen is gedaan naar aanleiding van de gewenste energiehuishouding, echter, met de geldende wetten met betrekking tot lichtafscherming in ogenschouw genomen.

6 Resultaten

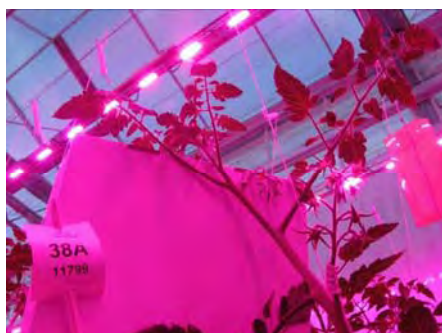
De resultaten worden weergegeven in drie categorieën: de effecten van de spectrale samenstelling van belichting op de gewasontwikkeling en productie (6.1), de interactie tussen licht en gewas (6.2), en ten slotte de verklarende fysiologie (6.3).

6.1 Gewasontwikkeling en productie

Gewasontwikkeling (beoordeeld door BCO)

Elke week zijn de gewassen in de zes verschillende afdelingen beoordeeld op algemene plantkwaliteit door de betrokken BCO-leden. In de onderstaande paragrafen worden de belangrijkste opmerkingen tijdens deze beoordelingen per week beschreven. In bijlage I zijn de op- en aanmerkingen van de BCO-leden verder uitgewerkt. Tevens worden in de bijlage cijfermatige beoordelingen van de algemene plantkwaliteit en bladkwaliteit gegeven (van 1 t/m 10; 1=zeer slecht en 10=zeer goed).

Voor de planten belicht met de LED Verrood zijn gedurende grote delen van de proefperiode als matig tot slecht beoordeeld op algemene plantkwaliteit. De planten in de LED PAR afdeling zijn gedurende de gehele proefperiode als goed beoordeeld. Vooral de eerste periode van de proef werd het gewas van de LED PAR beoordeeld met een 9. In deze fase van de teelt waren de planten in de LED PAR afdeling compact en vegetatief met zeer weinig bladslijtage (zie Figuren 10 t/m 13). Ook het gewas van de LED R/B afdeling werd als boven gemiddeld goed beoordeeld.



Figuur 10. Gestrekte kop - LED verrood (week 49)



Figuur 11. Gedrongen kop - LED PAR (week 49)

Het blad van de LED Verrood afdeling stond gedurende een groot gedeelte van de proefperiode onder druk. Het blad vertoonde veel bladrandjes en vergeling en werd door de BCO met een gemiddelde van 4 over de gehele lengte van de plant als slecht beoordeeld. Het blad van de LED PAR afdeling scoorde opvallend goed op algemene bladkwaliteit met een gemiddelde van 9 (Figuur 12 en 13).



Figuur 12. Blad met necrose - LED Verrood (week 49)



Figuur 13. Blad zonder necrose - LED PAR (week 49)

Eindrapportage lichtkleurenonderzoek

2011-2012

De bovenstaand omschreven beoordelingen waren op basis van de visuele indruk van het gewas van door twee ervaren tomatentelers. In de volgende paragrafen wordt duidelijk dat de visuele beoordeling zeker niet altijd overeenkwam met de metingen: Soms was de productie het hoogst voor het gewas dat er op het oog het minst vitaal uitzag (LED Verrood tot week 52, zie 6.4).

6.1.1 Resultaten teelt algemeen

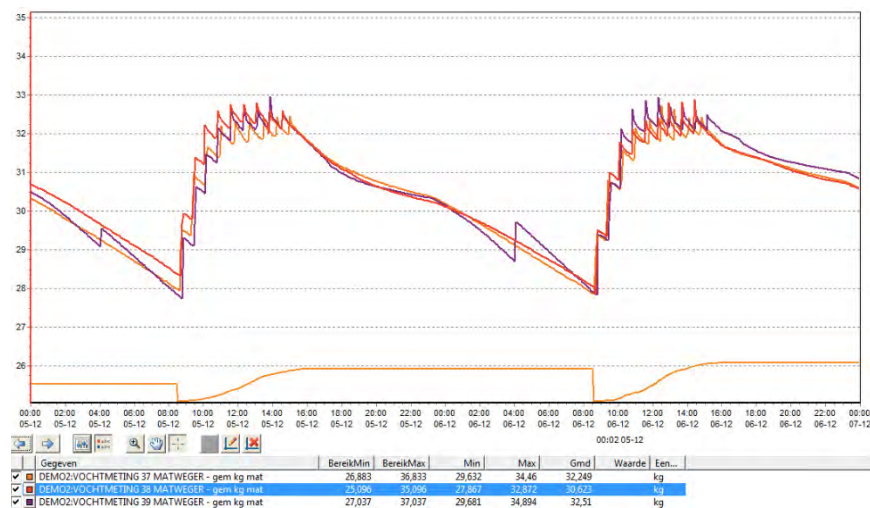
De teelt is zonder veel bijzonderheden verlopen. Gedurende de hele proef zijn trosbeugels aangebracht. In de voorgaande proef 'knikten' enkele trosstelen waardoor mogelijk de doorstroming niet optimaal was. Door continue trosbeugels aan te brengen is het effect hiervan geminimaliseerd.

6.1.2 Wateropname

Uit verscheidene metingen met betrekking tot de wateropname kwam naar voren dat het SON-T gewas altijd een hogere wateropname vertoonde wanneer de lampen aanstonden. In onderstaande figuur is duidelijk te zien dat de paarse lijn (de water-inhoud van het substraat in de SON-T afdeling) vanaf 00:00 (aangaan lampen) sneller daalt dat de bovenste oranje lijn (LED ZON) en de rode lijn (LED Verrood) duidend op een hogere wateropname voor SON-T. Zonder een watergift in de nacht voor de SON-T afdeling (04:00) zou de plant teveel waterstress ervaren.

Een opmerkelijk verschil tussen de LED Rood Blauw en de andere afdelingen was dat consequent in alle metingen de Ec van het drain water 0.5 lager was, duidend op een hogere opname van elementen.

De overige verschillen tussen de afdelingen waren niet constant of significant. Er waren indicaties dat de verrood afdeling minder water consumeerde maar dit was niet significant in de 24h metingen. Ook kwam dit verschil niet als significant naar boven uit de metingen van de weeggoten.



6.1.3 Lengtegroei

In Tabel 1 worden de belangrijkste wekelijkse gewasmetingen met betrekking tot lengtegroei besproken. Deze metingen zijn wekelijks uitgevoerd op een totaal van 10 planten per afdeling.

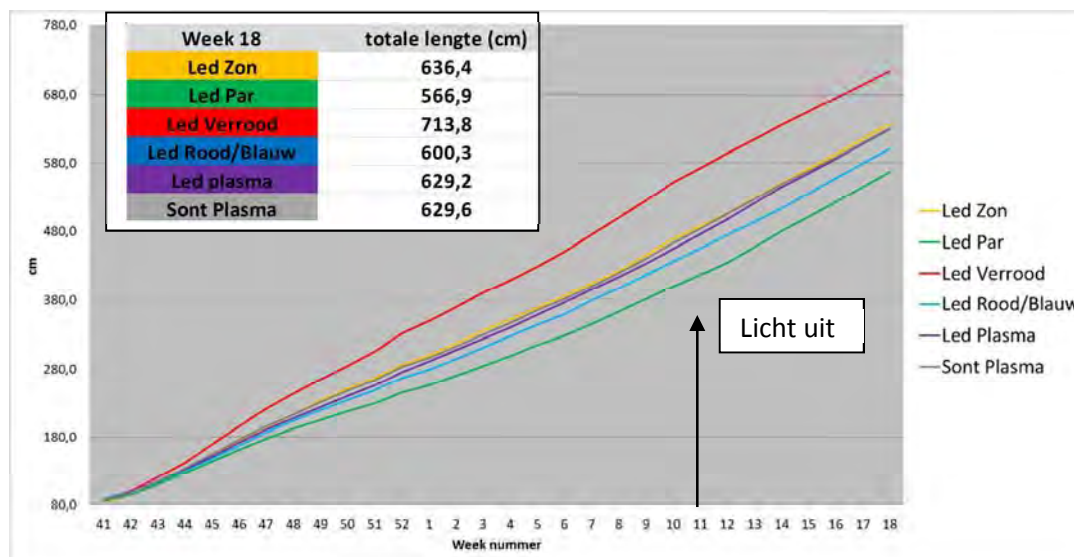
Tabel 1. Stengellengte, lengte van internodiën en kopdikte. De waarden zijn gemiddelden over de twee aangegeven perioden (voor en na week 11).

Eindrapportage lichtkleurenonderzoek

2011-2012

	Week 41 t/m 10			Week 11 t/m 18		
	wekelijkse lengtegroei (cm)	Internodien lengte (cm)	kopdikte (mm)	wekelijkse lengtegroei (cm)	Internodien lengte (cm)	kopdikte (mm)
Led Zon	18,8	4,7	12,7	19,4	5,4	10,2
Led Par	15,2	3,5	12,2	18,8	5,1	11,3
Led Verrood	22,6	5,4	13,2	20,5	5,6	10,6
Led Rood/Blauw	16,9	4,0	13,0	20,4	5,0	11,0
Led Plasma	17,8	4,2	12,4	21,4	5,3	10,9
Sont Plasma	18,3	4,3	12,3	20,8	5,6	10,8

Van week 41 t/m week 07 laten de planten in de LED Verrood afdeling in vergelijking met de andere afdelingen een spectaculaire groei zien. Met een gemiddelde lengtegroei van 22,5 cm ligt de groei 5,7 cm hoger dan de wekelijkse lengtegroei in de LED R/B afdeling. Deze extra lengtegroei wordt direct veroorzaakt door de strekking van de internodiën. Deze strekking heeft geen negatief effect gehad op de diameter van de stengel (kopdikte). De stengeldiameter is in de LED Verrood afdeling gedurende het eerste gedeelte van de onderzoeksperiode van week 42 tot week 52 gemiddeld beduidend dikker dan de kopdikte van de planten in de andere afdelingen. Na week 04 is er een duidelijke afname van de kopdikte in de LED Verrood afdeling t.o.v. de andere afdelingen.



Figuur 14. Cumulatieve lengtegroei (cm) – van week 41 t/m 18

Aan het einde van de proef is de gemiddelde stengellente in de LED Verrood (714 cm) afdeling 19% hoger t.o.v. de gemiddelde stengellente in de LED R/B afdeling (600cm; Figuur 14).

Vanaf 31 maart is de belichting uitgeschakeld en groeien alle gewassen alleen nog onder natuurlijk daglicht. Hierop vallen de verschillen in wekelijkse lengtegroei tussen de afdelingen weg. Er is dus nauwelijks een na-ijl effect van de lichtbehandelingen op de gewasontwikkeling.

6.1.4 Productie, zetting en vruchtontwikkeling

In de periode van week 41 t/m week 18 is het gemiddeld aantal gezette trossen per afdeling berekend en het totaal aantal geoogste trossen (Tabel 2 en Figuur 15).

Tabel 2. Aantal gezette trossen en totaal aantal geoogste trossen – t/m week 18 (2012)

Eindrapportage lichtkleurenonderzoek

2011-2012

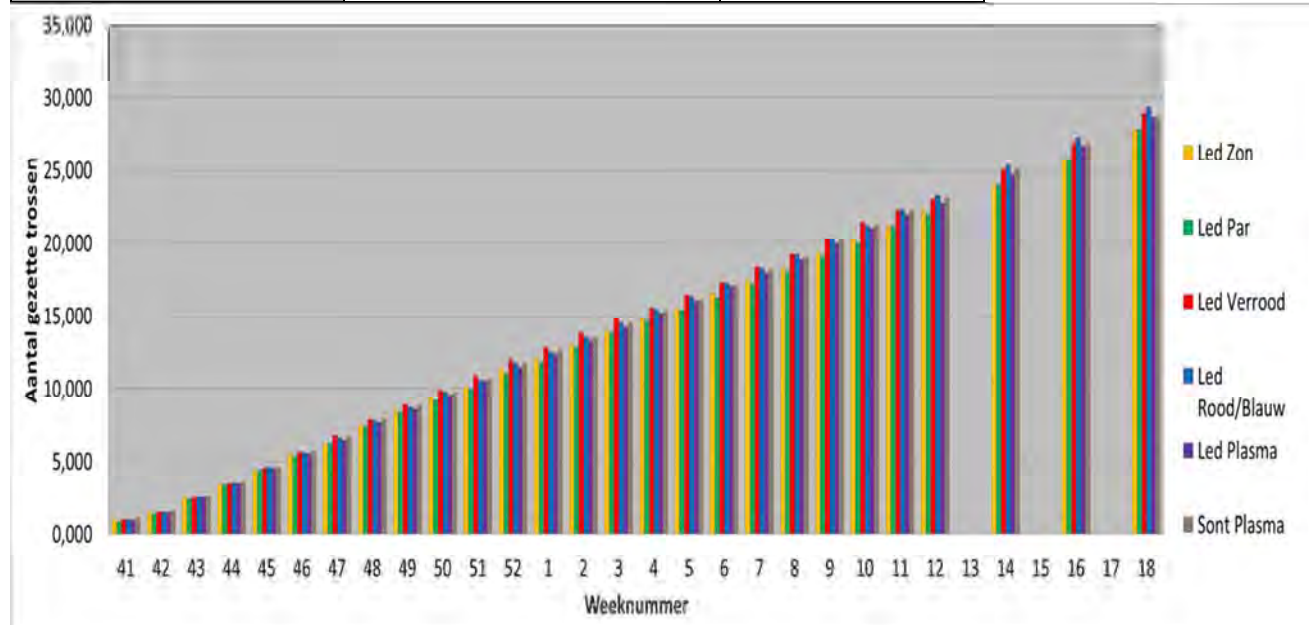
	Totaal aantal gezette trossen	Totaal aantal geoogste trossen
Led Zon	27,8	18,9
Led Par	27,9	18,5
Led Verrood	28,9	19,6
Led Rood/Blauw	29,3	19,3
Led plasma	28,7	19,3
Sont Plasma	28,6	19,2

Aan het einde van de proefperiode in week 18 waren er in de LED R/B afdeling de meeste vruchten gezet (29,3). Dit zijn totaal 243,4 vruchten per m². In de LED zon en in de LED par waren aan het einde van de proefperiode met 27,8 en 27,9 de minste vruchten gezet.

In week 18 waren in de LED Verrood afdeling totaal 19,7 trossen geoogst.

In de onderstaande figuren wordt de zetting in de verschillende teeltperioden weergegeven.

	Totaal aantal gezette trossen	Totaal aantal geoogste trossen
Led Zon	27,8	18,9
Led Par	27,9	18,5
Led Verrood	28,9	19,6
Led Rood/Blauw	29,3	19,3
Led plasma	28,7	19,3
Sont Plasma	28,6	19,2

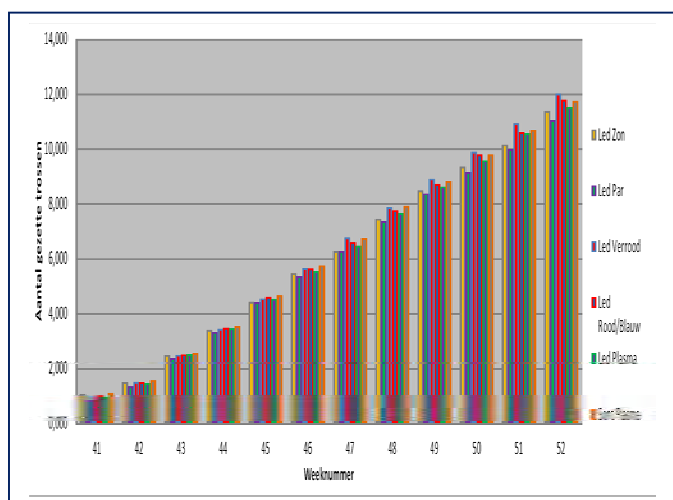


Figuur 15a. Cumulatieve zetting (#) – week 41 t/m week 18

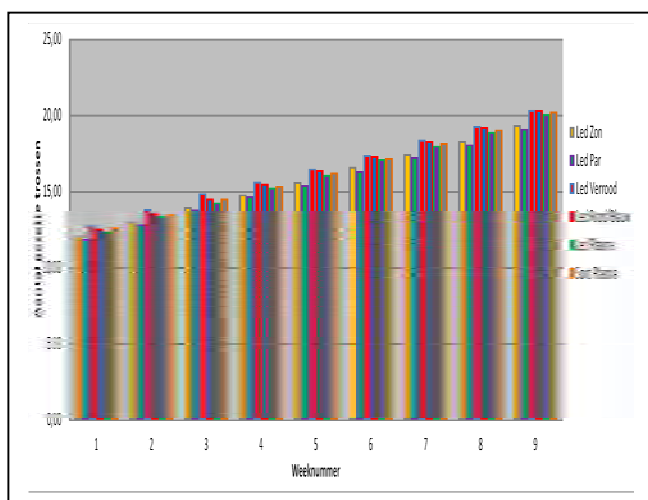
Financiers:

Eindrapportage lichtkleurenonderzoek

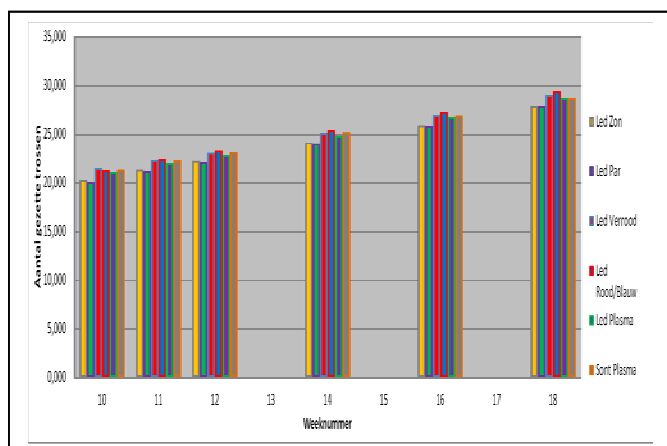
2011-2012



Figuur 15b. Cumulatieve zetting (#) – week 41 t/m 52



Figuur 15c. Cumulatieve zetting (#) – week 01 t/m 9



Figuur 15d. Cumulatieve zetting (#) – week 10 t/m 18

Opvallend is de snellere zetting van de vruchten na week 46 in de LED Verrood afdeling in vergelijking met de andere afdelingen. Tot en met week 10 waren er in deze afdelingen 21,5 vruchten per stengel gezet, ten opzichte van 20,3 trossen in de LED ZON afdeling en 20,0 trossen in de LED PAR afdeling. Na week 10 is er een opvallende toename van het aantal gezette trossen in de afdeling LED R/B t.o.v. de cumulatieve zetting in de andere afdelingen. Aan het einde van de proefperiode in week 18 waren er in de LED R/B afdeling de meeste trossen gezet (29,3) en in de LED ZON afdeling de minste (27,8).

Over de periode van week 48 tot week 18 (2012) is de cumulatieve productie berekend. De productiecijfers zijn uitgedrukt in het aantal geogoste tomaten per m². Verder is het gemiddeld vruchtgewicht wekelijks berekend. De plantbelasting wordt berekend over het totaal aantal gezette trossen per stengel (Tabel 3).

Tabel 3. Productiecijfers week 48 t/m week 07 en week 08 t/m week 18

Eindrapportage lichtkleurenonderzoek

2011-2012

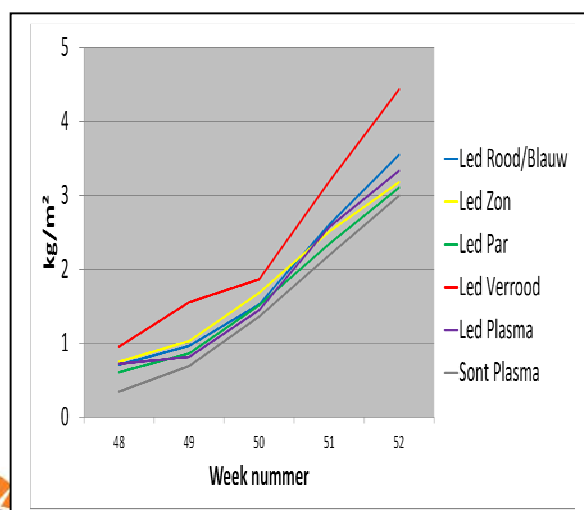
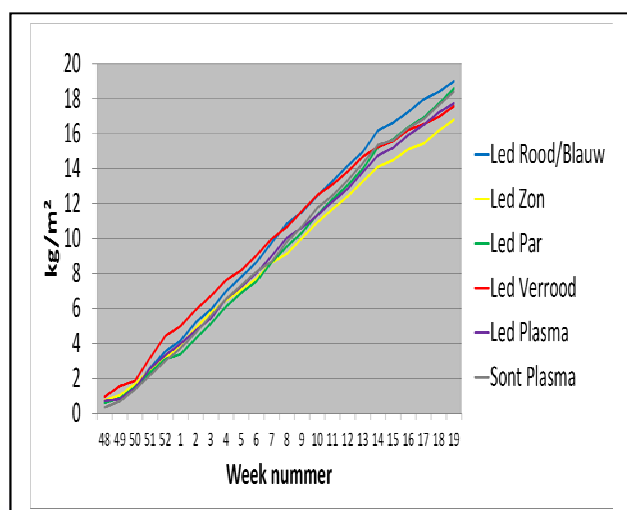
	Week 48 t/m 07				Week 08 t/m 18			
	Productie t/m week 07 (kg/m ²)	Week productie (kg/m ²)	Vruchtgewicht (g)	Plantbelasting (#/trossen per stengel)	Productie t/m week 18 (kg/m ²)	Week productie (kg/m ²)	Vruchtgewicht (g)	Plantbelasting (#/trossen per stengel)
Led Zon	8,6	0,7	40,3	7,3	16,8	0,6	40,6	7,1
Led Par	8,6	0,7	36,9	7,4	18,6	0,8	40,4	7,3
Led Verrood	10,0	0,8	40,8	7,2	17,6	0,6	38,5	6,9
Led Rood/Blauw	9,8	0,8	40,3	7,8	19,0	0,7	42,5	7,4
Led Plasma	9,0	0,8	38,7	7,7	17,5	0,6	38,9	7,7
Sont Plasma	8,7	0,7	37,3	8,0	18,4	0,7	40,4	7,7

In de periode van week 48 t/m week 07 waren er in de LED Verrood afdeling totaal 9,99 kg/m² tomaten geoogst. Deze productie lag beduidend hoger t.o.v. de gerealiseerde productie in de LED ZON, LED PAR en SON-T plasma afdeling (Tabel 3). De hogere productie werd voornamelijk veroorzaakt door een combinatie van een hoger vruchtgewicht en een snellere doorkleuring van de vrucht.

In de periode van week 47 t/m week 50 zijn in de LED Verrood afdeling de nieuwe trossen op 7 gezet in plaats van op de standaard 8 vruchten per tros. De verhouding plantkwaliteit en vruchtbelasting kwam in deze afdeling te veel onder druk te staan, waardoor deze teeltmaatregel noodzakelijk werd geacht. Ook in de LED ZON afdeling werden nieuwe aangelegde trossen in de periode van week 47 t/m week 52 op 7 gezet i.p.v. 8 vruchten per tros. Hierdoor, maar ook door de snellere doorkleuring, was de totale plantbelasting (aantal vruchten per stengel) in de LED Verrood afdeling lager, ondanks de hogere zetting (zie week 7 in Figuur 15).

In de periode van week 08 t/m week 18 is er een opvallende afname van 6% van het gemiddeld vruchtgewicht in de LED Verrood afdeling in vergelijking met het vruchtgewicht gedurende de eerste fase van de proefperiode. In de andere afdelingen is het gemiddeld vruchtgewicht juist toegenomen. Vooral in de SON-T plasma afdeling is deze toename met 8% relatief hoog. Om de plantbelasting meer in verhouding te krijgen met de algemene gewaskwaliteit is in de LED Verrood afdeling in week 8 besloten een tros uit de kop te halen. Hierdoor is de algemene plantbelasting gedaald in vergelijking met de andere afdelingen. Dit heeft echter niet geleid tot een gemiddeld zwaardere vrucht en een verbetering van de algemene gewaskwaliteit.

Onder wordt het verloop van de cumulatieve productie gedurende de gehele proefperiode weergegeven (Fig. 16A) en uitgesplitst voor de periode tot de kortste dag (Fig. 16B), vanaf de kortste dag totdat de belichting werd uitgeschakeld (Fig. 16C) en het resterende gedeelte van de teelt zonder belichting (Fig. 16D).

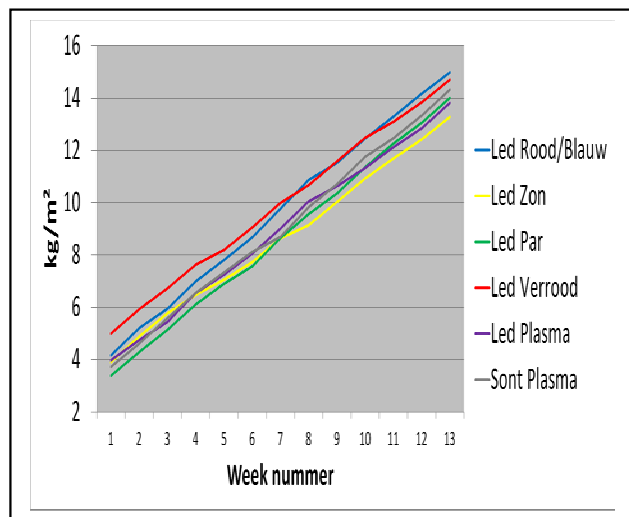


Financiers:

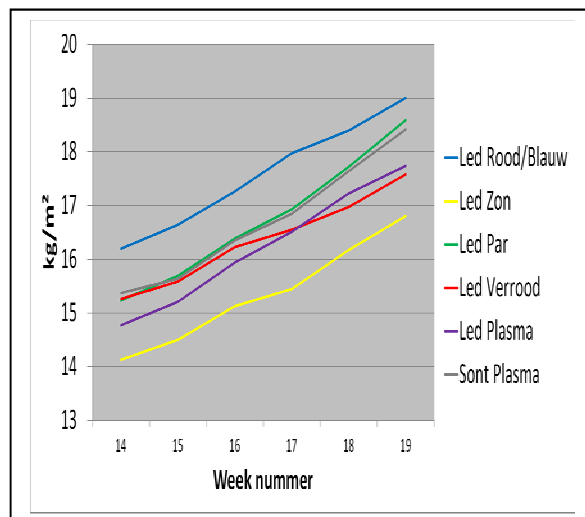
Eindrapportage lichtkleurenonderzoek

2011-2012

Figuur 16A. Cumulatieve productie (kg/m^2) week 48-18
52



Figuur 16B. Cumulatieve productie (kg/m^2) week 48-



Figuur 16C. Cumulatieve productie (kg/m^2)
week 1 t/m week 13 (licht uit)

Figuur 16D. Cumulatieve productie (kg/m^2)
week 14 (licht uit) t/m week 18 (einde proef)

In Tabel 4 worden de belangrijkste resultaten van de diverse vruchtanalyses weergegeven.

Tabel 4. Algemene vruchtanalyses op brix, dichtheid en drogestof

	Week 52 t/m 07			Week 08 t/m 12		
	Brix %	Dichtheid vrucht (g/cm)	Drogestof % vrucht	Brix %	Dichtheid vrucht (g/cm)	Drogestof % vrucht
Led Zon	5,6	1,02	6,1	3,8	1,03	*
Led Par	5,0	0,91	5,5	3,6	1,02	5,2
Led Verrood	6,0	1,03	6,2	4,4	1,01	6,1
Led Rood/Blauw	5,1	0,99	5,4	3,7	1,06	5,1
Led plasma	5,2	0,96	5,7	4,4	0,99	*
Sont Plasma	5,1	0,96	5,9	4,2	1,08	5,2

Gedurende de proefperiode is het Brix-percentage van de geoogste vruchten geanalyseerd. Brix is een maat voor de hoeveelheid opgeloste droge stof (bijvoorbeeld suiker) in een waterige vloeistof en geeft aan hoeveel massa-procent van de vloeistof uit vaste stof bestaat. Er mag worden aangenomen dat bij een hoog suiker gehalte in de vrucht het Brix percentage ook hoog is. Opvallend is het hoge Brix percentage in de vruchten geoogst in de LED Verrood afdeling en de LED ZON afdeling. Vooral in de periode van week 52 t/m week 07 zijn de gemiddelde Brix percentages met respectievelijk 6,01 en 5,56 hoog. In de periode van week 8 tot week 12 is het gemiddeld Brix percentage lager dan in de eerste fase van de proefperiode.

In zowel de LED Verrood afdeling als in de LED ZON afdeling is het gemiddelde drogestof-percentage (DS) van de geoogste vruchten hoger in vergelijking met de vruchten uit de andere afdelingen. De vruchten uit LED Verrood bevatten 15 tot 20% meer DS dan de vruchten uit LED R/B. De cumulatieve productie (Figuur 16) is weergegeven als versgewicht. Als dat versgewicht omgerekend zou worden naar

Eindrapportage lichtkleurenonderzoek

2011-2012

drooggewicht, dan zou LED Verrood veruit het best producerende gewas zijn over de gehele teeltperiode. Vooral het drogestof percentage van de vruchten uit de afdelingen LED R/B en LED PAR is relatief laag.

6.1.5 Bladontwikkeling

In Tabellen 5 en 6 worden de verschillen in bladkwaliteit en bladontwikkeling tussen de verschillende afdelingen beschreven.

De LAI (Leaf Area Index) is in elke afdeling totaal tweemaal berekend. De LAI staat voor het totale bladoppervlak per vierkante meter teeltoppervlak. In de tomatenteelt wordt een gemiddelde LAI waarde van 3 aangehouden als goed. Naast de LAI is ook de SLA (Specific Leaf Area) berekend. Dit is het totale bladoppervlak (cm²) gedeeld door het versgewicht van het blad. Het blad van planten met een relatief hoge SLA zijn i.h.a. dunner dan blad van planten met een lage SLA.

De verschillen in LAI tussen de verschillende afdelingen in de weken 46 en 51 zijn opvallend laag. Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat de nauwkeurigheid van de LAI gegevens te wensen over laat. De reden hiervoor is dat in een lopende proef de meetplanten zo min mogelijk beschadigd mogen worden. Daarom zijn ten behoeve van de LAI metingen slechts een beperkt aantal bladeren geplukt. Visueel leek de LAI in de gewassen onder LED Verrood en LED ZON beduidend lager dan in de andere gewassen, hetgeen bevestigd lijkt te worden door de afmetingen van de individuele bladeren (Tabel 6).

Tabel 5. LAI/SLA-metingen week 46 en week 51.

Week 46	LED Zon	LED Par	LED Verrood	LED Rood/Blauw	LED Plasma	SONT Plasma
LAI (blad opp./m ²)	2,6	2,7	2,8	2,9	2,7	3,0
SLA (cm ² /g (versgewicht))	21,8	22,5	23,9	20,2	19,4	21,8
Week 51	LED Zon	LED Par	LED Verrood	LED Rood/Blauw	LED Plasma	SONT Plasma
LAI (blad opp./m ²)	2,5	2,2	2,5	2,9	2,5	2,5
SLA (cm ² /g (versgewicht))	25,0	17,6	23,7	18,4	20,1	23,0

De SLA-waarden zijn wel op een betrouwbare wijze vastgelegd en zijn voor de planten geteeld onder LED Verrood en LED ZON relatief hoog. Vooral in week 51 zijn de bladeren in deze afdelingen dunner dan het blad in de andere afdelingen.

Tabel 6. Bladmetingen: bladlengte, bladdiameter, bladrandjes en drogestof-percentages blad

	Week 41 t/m 07				Week 08 t/m 18			
	Blad lengte (cm)	Blad diameter (cm)	Bladrandjes (1-5)	Drogestof % blad	Blad lengte (cm)	Blad diameter (cm)	Bladrandjes (1-5)	Drogestof % blad
Led Zon	41,1	38,2	4,6	11,6	37,8	34,9	4,3	10,7
Led Par	40,5	37,0	4,9	11,7	40,8	37,9	4,8	9,8
Led Verrood	39,7	36,2	3,8	11,5	36,6	32,1	3,9	10,9
Led Rood/Blauw	41,0	38,5	4,7	10,7	40,5	36,5	4,6	9,8
Led Plasma	41,8	38,2	4,8	10,8	40,9	36,9	4,6	9,9
Sont Plasma	41,5	37,8	4,8	11,1	39,5	34,7	4,6	10,0

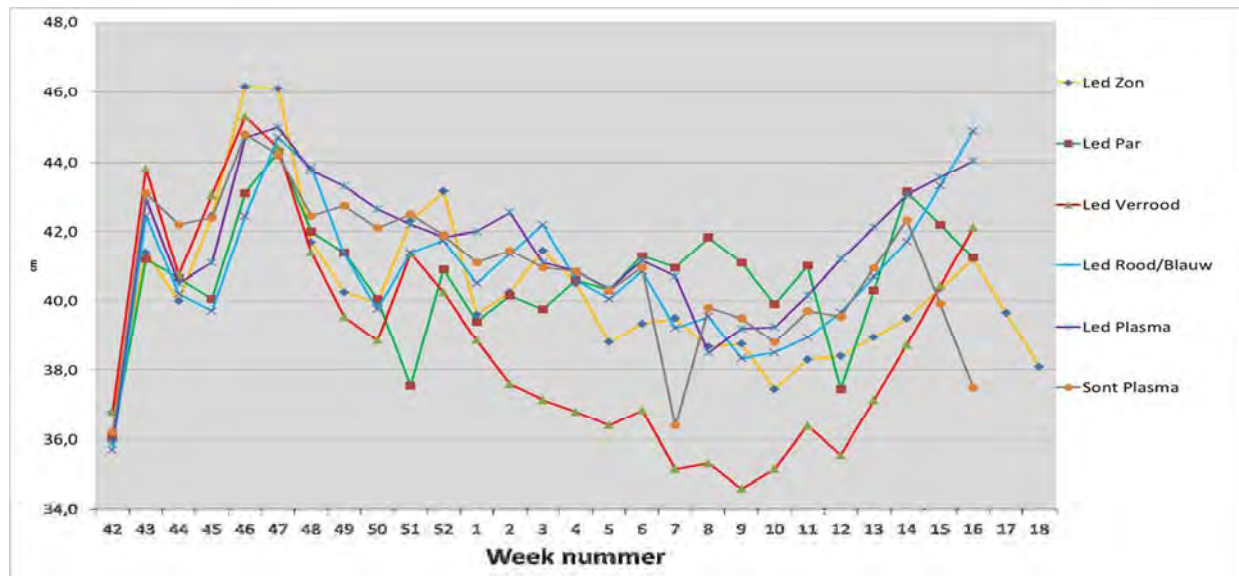
Eindrapportage lichtkleurenonderzoek

2011-2012

Het percentage bladrandjes, necrose verschijnselen aan de bladranden, was in de LED Verrood afdeling gemiddeld zeer hoog. Dit wordt uitgedrukt door het relatief lage cijfer in Tabel 6. Blad over de gehele lengte van de plant heeft in deze afdeling voor een groot gedeelte van de proefperiode onder druk gestaan. Van week 08 tot week 12 nam het aantal bladrandjes opvallend toe in de LED ZON afdeling. Na week 12 namen de bladrandjes in het gewas duidelijk af.

Opvallend is verder het drogestof percentage in het blad. Dit percentage was vooral laag in de bladeren van de LED R/B en LED plasma afdelingen (Tabel 6; week 41 t/m 07). Evenals het drogestof-percentage van de vruchten (Tabel 4) was het voor het blad juist relatief hoog in LED Verrood en LED ZON (vooral in week 08 t/m 18). De drogestof is bepaald van bladeren onderin het gewas.

Wekelijks is zowel de maximale lengte als de maximale diameter van het eerste volgroeide blad gemeten op gemiddeld 30 centimeter onder de kop van de plant. Opvallend zijn de relatief korte en smalle bladeren in de LED Verrood afdeling t.o.v. de bladeren in de andere afdelingen later in de teelt, terwijl er gedurende de eerste weken van de teelt nauwelijks een verschil was (zie Tabel 6 en Figuur 17). Na week 51 wordt vooral het blad in de LED Verrood afdeling korter. Vooral in de periode van week 1 t/m week 12 waren de bladeren met een gemiddelde van 36,2 cm korter. Nadat de belichting werd uitgeschakeld en meer daglicht werd toegelaten door verwijderen van de plastic afscheidingen (week 12) is de bladlengte in deze afdeling weer toegenomen. Dit duidt erop dat het LED Verrood gewas, dat duidelijk zwaar onder druk stond (bladranden, kleine bladeren), nog veerkrachtig genoeg was om te herstellen bij toenemend daglicht.

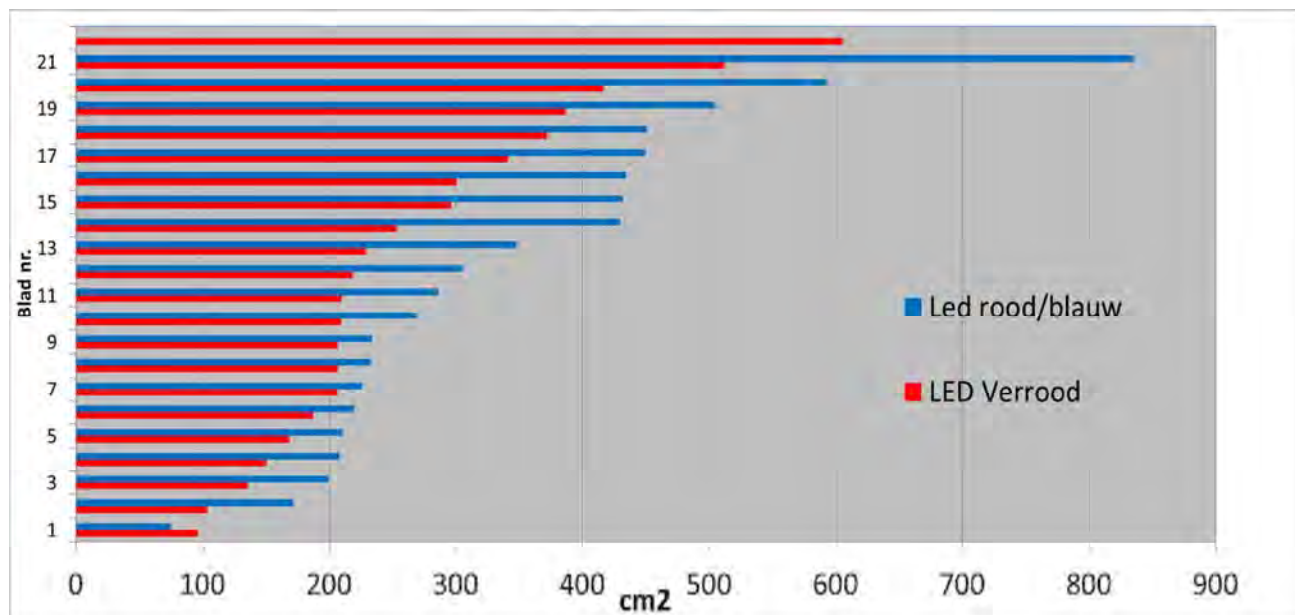


Figuur 17. Maximale bladlengte (cm) van het eerste volgroeide blad – week 42 t/m week 18

In de onderstaande figuur wordt de bladlengte-verdeling per plant weergegeven van planten in de LED Verrood en de LED R/B afdelingen. Deze meting is uitgevoerd in week 5.

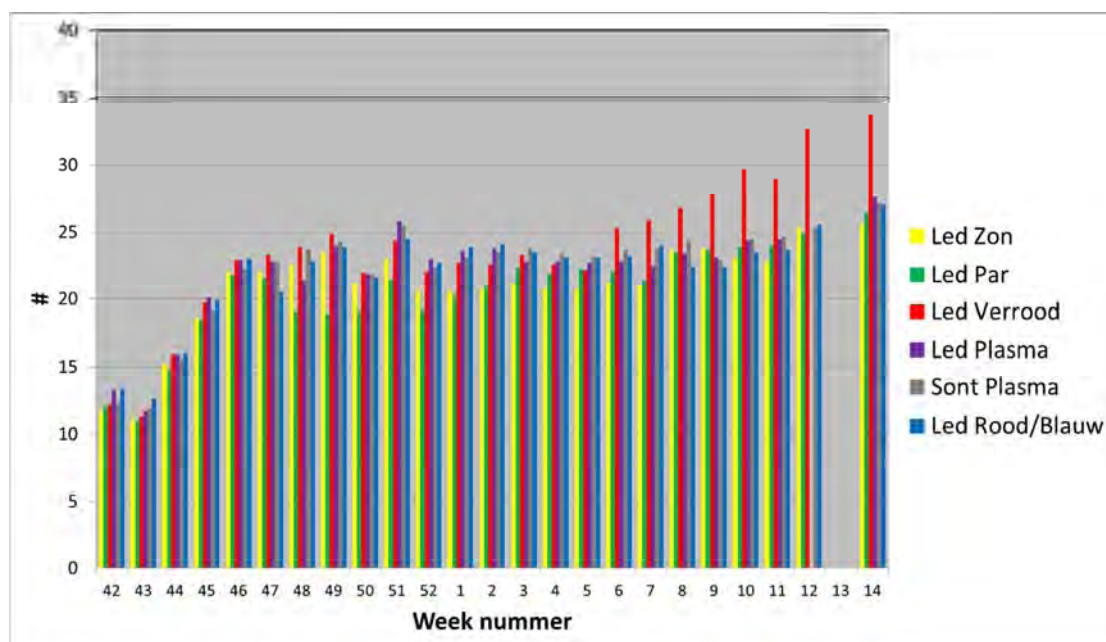
Eindrapportage lichtkleurenonderzoek

2011-2012



Figuur 18. Bladlengte-verdeling per plant LED in de afdelingen LED Verrood en LED R/B (week 5)

Over de gehele stengellengte zijn de bladeren in de LED Verrood afdeling korter dan in de LED R/B afdeling. De LAI kwam door deze relatief korte bladeren dusdanig onder druk te staan, dat er in week 6 is besloten om in de LED Verrood afdeling meer bladeren per stengel te laten zitten. Aan het einde van de proefperiode zaten aan de stengels in de LED Verrood afdeling gemiddeld 33 bladeren. In de andere afdelingen lag dit gemiddelde op 27 bladeren per stengel (zie Figuur 19). Ook in LED ZON kwam de LAI onder druk te staan. Achteraf gezien was het beter geweest om eerder te beginnen met het aanhouden van extra bladeren in LED Verrood en ook in LED ZON extra blad aan te houden. De terugval in productie vanaf week 1 bij deze twee afdelingen (Figuur 16C) lijkt namelijk gerelateerd aan een steeds verder afnemende LAI (zie ook discussie hoofdstuk 8).



Figuur 19. Gemiddeld aantal bladeren per stengel – week 42 t/m week 14

Eindrapportage lichtkleurenonderzoek

2011-2012

6.2 Interactie tussen licht en gewas

Opmerking: alle lichtmetingen zijn in het donker uitgevoerd

6.2.1 *Lichtmetingen*

De volgende lichtintensiteit is gemeten in de verschillende onderzoeksafdelingen:

Tabel 7. *Wekelijkse lichtmetingen in $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$.*

Gemiddeld per wk	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	1	2	3	gem	%
LED ZON	169	170	170	171	162	153	144	135	210	190	170	150	150	150	163,9	102,7%
LED PAR	162	162	161	161	155	150	144	138	186	174	162	150	150	150	157,5	98,7%
LED Verrood*	147	147	148	148	152	157	161	165	186	179	171	164	157	151	159,5	100,0%
LED Rood-Bauw	167	166	165	164	165	165	166	167	185	173	161	150	150	150	163,9	102,7%
LED Plasma	159	158	157	156	154	151	149	147	159	157	154	152	152	152	154,1	96,6%
SONT Plasma	164	162	159	157	155	154	152	150	158	156	153	151	151	151	155,2	97,3%

Hieruit blijkt dat de gemiddelde lichtintensiteit op $160 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ lag, met een afwijking van maximaal 3,4%. Hierbij is de correctie voor verrode golflengten (zie 5.7.2.2) al verrekend.

*=Bij aanvang van het onderzoek waren er een aantal LED's in de afdeling verrood welke een verminderde capaciteit hadden; dit is later in het onderzoek gecompenseerd.

6.2.2 *Verticale verdeling lichtintensiteit over het gewas*

De onderstaande tabellen geven de uitdoving van het licht weer naarmate het dieper doordringt in het gewas. De $\pm 160 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ licht bij de kop van het gewas is weergegeven als 100% licht; dieper in het gewas is de lichtintensiteit weergegeven als percentage van het licht bij de kop. De getallen zijn gemiddelden van vijf bepalingen per lichtbehandeling. Overigens moet opgemerkt worden dat de twee behandelingen met plasmalampen niet goed vergelijkbaar zijn met de andere behandelingen, vanwege de andere positie van de lampen ten opzichte van het gewas (zie 5.7.2).

Tabel 8. *Verticale lichtverdeling in het gewas (meting 4 januari 2012).*

Meting tussen gewas:	LED ZON	LED PAR	LED Verrood	LED R/B	LED plasma	SON-T plasma
Bovenste blad	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Blad middenin	39%	28%	40%	26%	25%	27%
Onderste blad	10%	9%	9%	10%	7%	5%

Wat opvalt aan de meting van 4 januari is de fors hogere lichtintensiteit bij de middelste bladeren bij LED ZON en LED Verrood (40% t.o.v. 25-28% bij de andere behandelingen). De verticale lichtverdeling over deze gewassen was dus gelijkmatiger. Dat is gunstig voor de benuttingsefficiëntie van het licht door het gewas. Vooral overdag, als de lichtintensiteit hoger is door de combinatie daglicht en lamplicht, leidt een betere lichtverdeling tot een hogere gewasfotosynthese. De hoeveelheid licht die op de bladeren onderin het gewas valt verschilt nauwelijks. Veel licht helemaal onderin zou ongunstig zijn, omdat licht dan niet door bladeren wordt geabsorbeerd en dus verloren gaat.

Tabel 9. *Verticale lichtverdeling in het gewas (meting 6 februari 2012).*

Meting tussen gewas:	LED ZON	LED PAR	LED Verrood	LED R/B	LED plasma	SON-T plasma
Bovenste blad	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Blad middenin	38%	35%	34%	28%	29%	28%
Onderste blad	12%	9%	12%	8%	7%	7%
Meting zijkant gewas:						

Eindrapportage lichtkleurenonderzoek

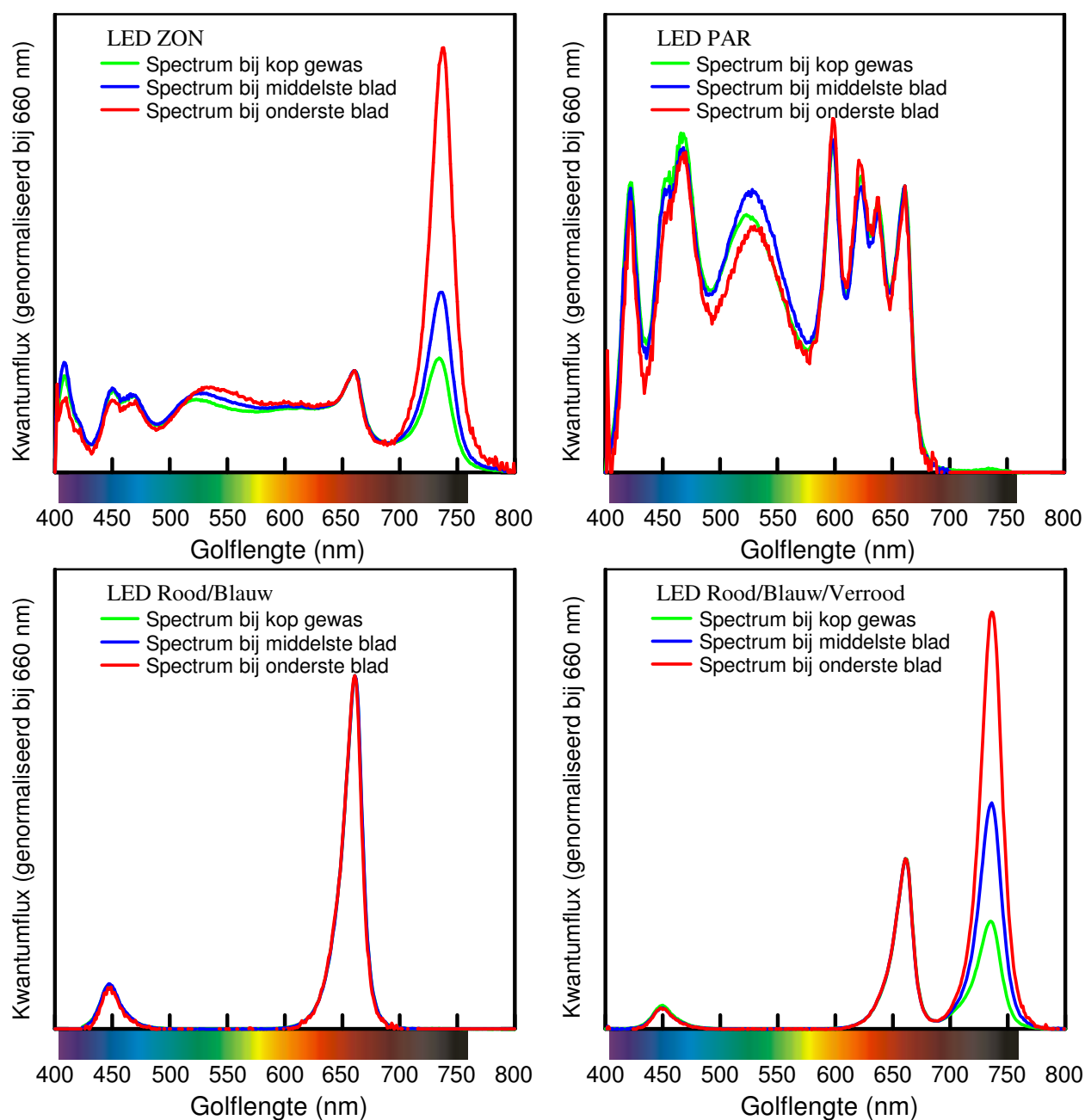
2011-2012

Blad middenin	27%	29%	40%	28%	29%	38%
Onderste blad	10%	9%	19%	14%	15%	14%

Op 6 februari is de lichtdoordringing anders dan op 4 januari. Bij de behandelingen LED ZON en LED Verrood valt relatief meer licht op de onderste bladeren, vooral bij LED Verrood aan de zijkant van het gewas. Dit duidt op een te open gewas waar aanzienlijke lichtverliezen optreden.

6.2.3 Lichtspectrum binnenin het gewas

Afhankelijk van zowel de spectrale samenstelling van de belichting als van de stand van het gewas verandert de spectrale samenstelling van licht naarmate het dieper in het gewas doordringt (Figuur 20).



Figuur 20. Spectrale samenstelling van het licht bij de kop van het gewas, bij de middelste bladeren en vlak boven de onderste bladeren. De weergegeven spectra zijn genormaliseerd bij 660 nm, zodat de kwalitatieve verschillen in het licht op de verschillende hoogten in het gewas goed zichtbaar zijn. De spectra zijn gemiddelden van minstens 5

Eindrapportage lichtkleurenonderzoek

2011-2012

metingen. Per meetpositie middenin of onderin het gewas was de variatie groot bij de behandelingen LED ZON en LED Verrood (zie tabellen onder).

Zoals was te verwachten verandert de spectrale samenstelling van de lichtbronnen zonder verrode golflengten (LED R/B en LED PAR) nauwelijks dieper in het gewas. Wat betreft de lichtbronnen die wel een aanzienlijk aandeel verrood uitstralen (LED ZON en LED Verrood) neemt het relatieve aandeel verrood sterk toe naarmate het licht dieper in het gewas doordringt. Dit komt doordat de transmissie van verrode golflengten (>700 nm) door een blad heen veel hoger is dan de transmissie van golflengten binnen het PAR gebied (400-700 nm). Zoals duidelijk wordt uit de gemeten patronen bij LED ZON treedt die toename van verrood dieper in het gewas ook op bij daglicht. Dit geeft een 'schaduw-signaal' aan de bladeren dieper in het gewas. Het uitblijven van zo'n 'schaduw-signaal' bij lichtbronnen zonder verrood is dus zeer afwijkend van de natuurlijke patronen.

De veranderingen in lichtspectrum dieper in het gewas hebben grote gevolgen voor het fytochroom-evenwicht in bladeren dieper in het gewas, uitgedrukt als PSS-waarde in Tabel 10 onder. Doordat lokale verschillen optreden in de dichtheid van het gewas is de variatie in het aandeel verrood in het spectrum en daardoor de variatie in PSS dieper in het gewas groot (zie standaard afwijkingen in Tabel 10).

Tabel 10. Effect van veranderingen van het lichtspectrum bij doordringing in het gewas op de fytochroombalans (PSS-waarde).

PSS-waarde (Fytochroomevenwicht) voor lichtspectrum in het gewas*)
± standaard afwijking van het gemiddelde

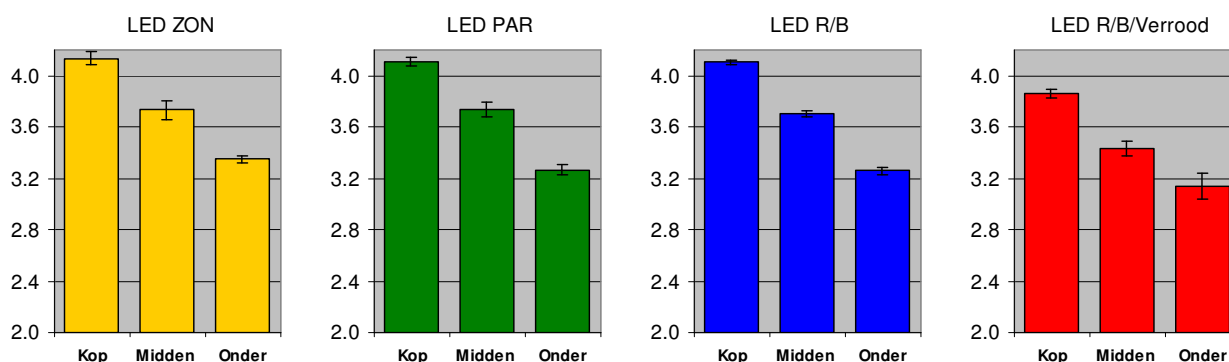
Lichtbron	LED ZON	LED PAR	LED R/B	LED Verrood
Meetpunt				
Kop gewas	0.72 ± 0.00	0.85 ± 0.00	0.88 ± 0.00	0.73 ± 0.01
Middelste blad	0.68 ± 0.01	0.85 ± 0.00	0.88 ± 0.00	0.64 ± 0.05
Onderste blad	0.59 ± 0.11	0.86 ± 0.01	0.88 ± 0.00	0.54 ± 0.08

*)PSS van zonlicht = ±0.72; meer verrood geeft een lagere PSS-waarde

6.3 Verklarende meetresultaten

6.3.1 Effect lichtspectrum op bladpigmenten

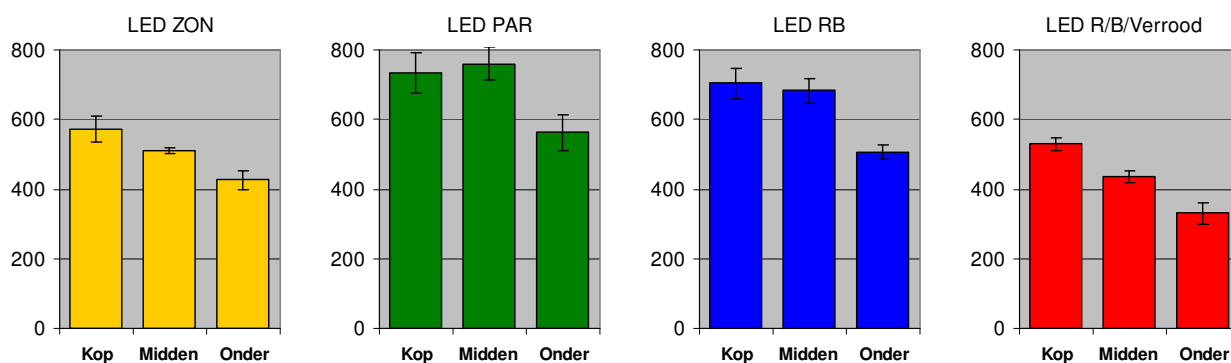
Wat betreft de relatief grote hoeveelheden verrood licht dieper in het gewas bij de behandelingen LED ZON en LED Verrood (Figuur 20) dringt de vraag zich op in hoeverre bladeren dit licht kunnen benutten voor fotosynthese en dus productie. Specifieke metingen om dit te achterhalen waren niet mogelijk binnen de grenzen van dit project. Zoals in 5.8.3 uiteengezet kan de verhouding van de bladgroenpigmenten chlorofyl a en chlorofyl b hiertoe wel een indicatie geven. Relatief meer chlorofyl b (dus een lagere chlorofyl a:b ratio) is een aanwijzing voor efficiëntere benutting van verrode golflengten.



Figuur 21. Chlorofyl a:b ratio van volgroeide bladeren in de kop, in het midden en onderin het gewas (let op: y-as begint niet bij 0).

In Figuur 21 is te zien dat de chlorofyl a:b ratio afneemt naarmate de bladeren zich dieper in het gewas bevinden. Dit is een normale reactie bij een afnemende lichtintensiteit (Walters en Horton, 1994). De chlorofyl a:b ratio is in het algemeen iets lager bij LED Verrood ten opzichte van de andere behandelingen. Echter, de relatieve afname voor bladeren dieper in het gewas is vrijwel gelijk voor alle behandelingen: De chlorofyl a:b ratio is ongeveer 10% lager middenin en 20% lager onderin het gewas, ten opzichte van de kopbladeren. Dit is een *indicatie* dat de bladeren dieper in het gewas bij LED ZON en LED Verrood zich *niet* volledig hebben aangepast om de relatieve toename in het verrood ten volle te kunnen benutten. Echter, om dit zeker te weten zijn specifiekere metingen nodig.

De totale hoeveelheid bladgroen (chlorofyl a+b) in mg per m² vers blad nam zoals verwacht ook af naarmate bladeren zich dieper in het gewas bevonden (Figuur 22). De lagere gemeten chlorofylconcentratie in bladeren uit LED ZON en LED Verrood komt overeen met een duidelijk zichtbare lichtere bladkleur.



Figuur 22. Totale inhoud aan chlorofyl (a+b) in mg per m² vers blad van volgroeide bladeren in de kop, in het midden en onderin het gewas.

6.3.2 Effect lichtspectrum op fotosynthese

Bij alle behandelingen zijn volledige licht-respons curven gemeten met een gesloten bladkamer. Verder is het effect van blad-chlorose op de fotosynthese verkend. Bij de behandelingen LED R/B en LED Verrood is tevens met een 'open' (transparante) bladkamer gemeten om het effect van de verrode golf lengten op de fotosynthese te kwantificeren.

6.3.2.1 Lichtrespons fotosynthese

In Figuur 23 staat de lichtrespons van de fotosynthesesnelheid van jong volgroeide topbladeren voor de 6 behandelingen weergegeven. De volgende zaken vallen op:

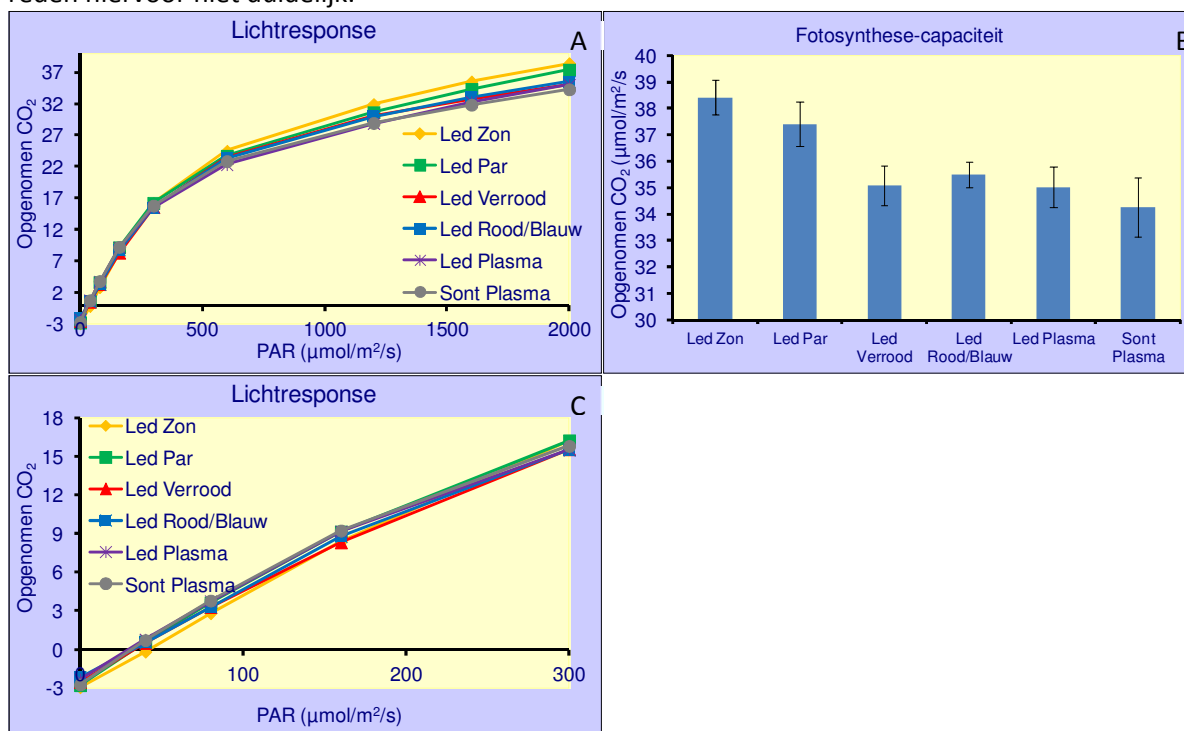
- Globaal genomen zijn verschillen in de lichtrespons van de fotosynthese beperkt (Fig. 23A).
- De maximale fotosynthese (bij hoog licht) is het hoogst voor de bladeren van behandelingen LED PAR en LED ZON (Fig. 23B). Waarschijnlijk houdt dit verband met het feit dat beide behandelingen relatief veel blauw licht bevatten (Figuur 6). Deze twee behandelingen zullen bij hoge lichtintensiteiten (heldere dagen) beter presteren.
- De fotosynthesesnelheid gemeten bij eenzelfde lichtintensiteit als waaraan het gewas door de belichting blootgesteld wordt (160 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$) is het laagst voor LED Verrood (Fig. 23C). Echter, dit is te wijten aan de meetmethode: Het meetlicht in de lichtbron van het meetapparaat (geen verrood) wijkt sterk af het groeilicht (veel verrood). Hierdoor onderschat de meting de

Eindrapportage lichtkleurenonderzoek

2011-2012

werkelijke fotosynthesesnelheid bij het spectrum van het groeilicht. Dit is ook aangetoond door te meten met een transparante bladkamer (zie 6.3.2.2).

De waarden voor de fotosynthesecapaciteit zijn zeer hoog voor de 1^e week van januari. De waarden liggen zelfs ongeveer twee keer zo hoog vergeleken met metingen bij Dekker Glascultures die in januari 2010 gemeten zijn (Pot et al. 2010). Buiten het feit dat het ras verschilt (Timotion of Komeett) is de reden hiervoor niet duidelijk.



Figuur 23. A: Lichtrespons van de fotosynthesesnelheid van jong volgroeide topbladeren gemeten bij zes lichtbehandelingen. B: de fotosynthesecapaciteit bij hoog licht. C: uitvergroting van de 'helling' van de lichtrespons.

In de proef trad bij de topbladeren enige mate van chlorose op (Figuur 24). Dit kwam bij de behandelingen LED verrood, LED ZON en SON-T plasma meer voor dan bij LED plasma, LED R/B en LED PAR (in die volgorde). Van één chlorotisch blad is de fotosynthesesnelheid gemeten. Die bleek bij zowel hoge als lage lichtintensiteiten zo'n 20% lager te liggen dan de fotosynthese van onbeschadigde bladeren.



Figuur 24. Topblad met chlorose.

6.3.2.2 Effecten verrood op bladfotosynthese

Om de momentane fotosynthese te bepalen onder het groeilicht is voor de behandelingen LED R/B en LED Verrood fotosynthese gemeten met een transparante bladkamer. Bij een gelijke hoeveelheid gemeten PAR (PAR-sensor meet geen verrood) was de netto fotosynthese 15% hoger en de bruto fotosynthese \pm 12% hoger bij LED Verrood dan bij LED R/B (zie Tabel 11). Dit laat zien dat het een goede aanname was om bij het afstellen van de lichtintensiteit bij de behandeling LED Verrood 13.3% bij het gemeten PAR op te tellen, als correctie voor de bijdrage van de verrode fotonen aan de fotosynthese (zie ook 5.7.2.2).

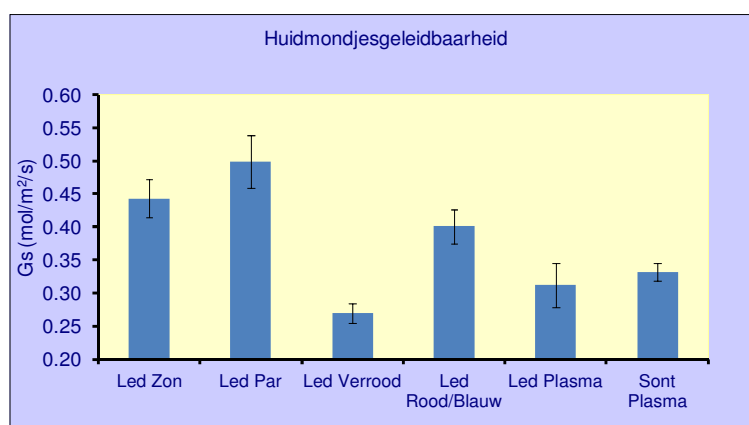
Tabel 11. Meting van de fotosynthese onder omgevingskleuren (transparante bladkamer bij eenzelfde gemeten PAR. De metingen werden verricht in de vroege ochtend zodat het natuurlijk daglicht werd buitengesloten. Uit de hogere gemeten fotosynthese bij LED Verrood blijkt dat de 13.3% correctie voor het gemeten PAR redelijk blijkt (zie 5.7.2.2).

behandeling	LED R/B	LED Verrood	Fractie
Netto fotosynthese*	4.67 (\pm 0.12)	5.35 (\pm 0.05)	1.15
Lichtintensiteit	140.4	140.1	1.00
# aantal waarnemingen	13	14	

*De weergegeven fotosynthese is de netto fotosynthese. De bruto fotosynthese (=netto fotosynthese + ademhaling) zal op ongeveer 5.67 en 6.35 liggen \rightarrow 12% verschil.

6.3.3 Effect lichtspectrum op huidmondjesgeleidbaarheid

In Figuur 25 staat de huidmondjesgeleidbaarheid van de bladeren weergegeven. De huidmondjesgeleidbaarheid is een maat voor hoe gemakkelijk planten kunnen verdampen. Opvallend is dat de LED Verrood behandeling de laagste verdamping heeft. In deze afdeling was gemiddeld gezien het drain percentage ook hoger. Mogelijk kan dit in relatie gebracht worden met het feit dat bij deze behandeling bladrandjes veruit het meest voorkwamen. Echter ook bij LED Zon kwam vrij veel bladrand voor terwijl de geleidbaarheid hoger was dan bij LED R/B, waar maar zeer beperkt bladrand werd geconstateerd.



Figuur 25. Huidmondjesgeleidbaarheid van jonge volgroeide bladeren opgegroeid onder 6 verschillende kleuren licht.

Eindrapportage lichtkleurenonderzoek

2011-2012

6.3.4 Effect lichtspectrum op bladanatomie

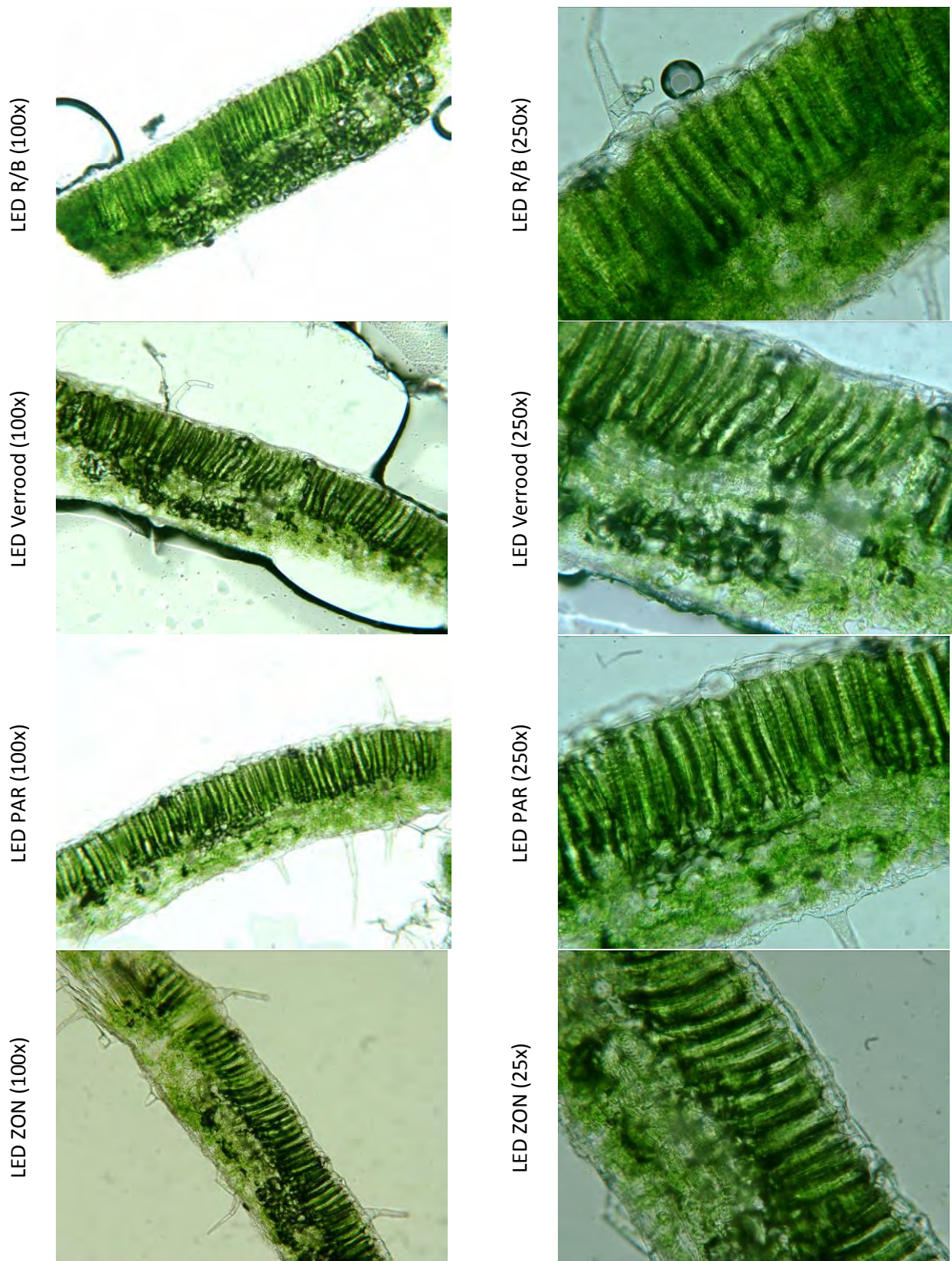
De dwarsdoorsneden van bladeren (Figuur 26) geven enig inzicht in de effecten van het lichtspectrum op de bladanatomie. De dikte van de laag palissade-mesofyl cellen was 45-46% van de totale bladdikte bij LED PAR en LED R/B, en 37-39% van de totale bladdikte bij LED ZON en LED verrood. In het algemeen is de laag palissade-mesofyl relatief dikker in bladeren die aan een hoge lichtintensiteit aangepast zijn, terwijl bladeren opgegroeid bij laag licht typisch een relatief dikkere laag spons-mesofyl hebben. Dit suggereert 'hoog-licht aanpassing' van de anatomie van de LED PAR en LED R/B bladeren.

Financiers:



Eindrapportage lichtkleurenonderzoek

2011-2012



Figuur 26. Dwarsdoorsneden van jonge, volgroeide tomatenbladeren opgegroeid onder verschillende lichtspectra onder de microscoop. Vergroting 100x en 250x.

Financiers:

7 Sturing gewas met klimaat

7.1 Temperatuur

Wanneer de groei en ontwikkeling afweek van het gewenste, werd ingegrepen. Op basis van metingen werden de bijgaande veranderingen als volgt doorgevoerd:

- Vertraging groei en ontwikkeling : verhoging 24 uur plant temperatuur
- Vertraging tros afsplitsing : verhoging 24 uur plant temperatuur
- Toenemende stengeldiameter : verhoging 24 uur plant temperatuur
- Vertraging / verlaging tros bloei : groter verschil dag & nacht temperatuur
- Vertraging vrucht uitgroei : verhoging van de 24 uur plant temperatuur
- Verminderde zwelling van vruchten : snellere en grotere afkoeling aan het einde van de lichtperiode / begin van de donkerperiode
- Bladlengte neemt af : afhankelijk van de voorgaande omstandigheden wordt ofwel het vocht verhoogd ofwel de planttemperatuur gedurende de lichtperiode verhoogd

Deze strategie werd voor alle afdelingen ingezet en heeft geresulteerd in een goede plantbalans (in termen vegetatieve – en generatieve ontwikkeling) en de gewenste ontwikkelingssnelheid.

7.2 Scherm

Schermen zijn ingezet zoals dit in de praktijk ook geschiedt. Op basis van buitentemperatuur en instraling werd het energiescherm geopend dan wel gesloten. Hierbij hebben we ons ten allen tijden gehouden aan de geldende regels met betrekking tot licht uitstoot. Er is geen verschil aangebracht in de hoeveel schermgebruik tussen de verschillende afdelingen.

8 Discussie

Uit eerder onderzoek is gebleken dat gewassen niet op een natuurlijke wijze reageren op het spectrum van gecombineerd rood/blauw LED licht (Figuur 1). Ook bij SON-T belichting is de gewasstand onnatuurlijk. Hoofddoelstelling van dit onderzoek is het identificeren van de spectrale samenstelling van belichting die vereist is voor een gezond en hoogproductief (tomaten)gewas.

Het uitgangspunt is dat de onnatuurlijke *fotoreceptorbalans* een belangrijke oorzaak is van de 'onnatuurlijke' gewasreacties onder SON-T en rode/blauwe LED's. Licht geeft namelijk niet alleen de energie aan een plant voor fotosynthese en dus de groei, maar heeft ook een sturende werking op allerlei ontwikkelingsprocessen in de plant. Die sturende werking wordt gereguleerd via de balans van de signalen die de verschillende fotoreceptoren in de plant geven. De signaalwerking vanuit die fotoreceptoren is sterk afhankelijk van de spectrale samenstelling van het licht (zie ook hoofdstuk 4 en Whitelam en Halliday, 2007).

8.1 Effect verschillende lichtspectra op gewasontwikkeling

Bij de LED PAR behandeling zouden de fotoreceptoren van het type cryptochroom en fototropine een natuurlijke balans moeten hebben, terwijl de fotoreceptoren van het type fytochroom in eenzelfde onnatuurlijke balans als bij LED R/B staan. Zowel de sterke prikkeling van de cryptochromen door het ruime aandeel blauwe golflengten, als het effect van de afwezigheid van verrode golflengten op de fytochroombalans, zouden de strekking moeten remmen (zie spectrum in Figuur 6). Dit was duidelijk te zien: De LED PAR planten waren nog meer gedrongen dan LED R/B (Figuur 14). Het gewas was (te) vegetatief, de bladeren onnatuurlijk donkergroen en de bladstand was mooi. Echter, de productie bleef in de wintermaanden achter (Figuur 16).

Hieruit kan geconcludeerd worden dat een natuurlijk lichtspectrum binnen het PAR-gebied, en de daaraan gekoppelde natuurlijke balans van de cryptochromen en fototropinen, niet de ontbrekende schakel is voor productieverhoging. Overigens presteerde het LED PAR gewas wel relatief goed toen de dagen gingen lengen. Blijkbaar profiteerde het gewas bij toenemend daglicht van de relatief vegetatieve stand in de voorgaande periode.

Bij de LED ZON behandeling zouden alle fotoreceptoren een natuurlijke balans moeten hebben. Het gewas had in de donkerste periode van het jaar het voorkomen van een voorjaarsgewas in een onbelichte teelt. De bladeren stonden vlak en vertoonden niet de onnatuurlijk donkergroene kleur en korte internodiën zoals gebruikelijk bij SON-T en LED rood/blauw belichte gewassen. De verwachting was dat het gewas onder dit kunstmatige zonlichtspectrum zeer goed zou presteren en dat alleen praktische redenen, zoals kosten en energieverbruik, praktijktoepassing in de weg zouden staan. Echter, LED ZON produceerde in de winter minder dan LED R/B (Figuur 16A). Later in de teelt presteerde dit gewas zelfs het slechtst van alle behandelingen (Figuur 16C), hoewel een te lage LAI het gewas wellicht parten speelde in dit opzicht.

Desalniettemin kan gesteld worden dat een natuurlijke balans van alle fotoreceptoren niet vanzelfsprekend tot de beste productie leidt. Het 'natuurlijke' lichtspectrum leidde wel tot een 'natuurlijk' ogend gewas, maar blijkbaar is dat niet de sleutel tot productieverhoging.

De LED Verrood belichting was zo samengesteld dat alleen de fytochromen een natuurlijke balans zouden moeten hebben. De cryptochromen en fototropinen worden minder geprikkeld dan bij natuurlijk daglicht door de ontbrekende golflengten in het PAR gebied en het lagere aandeel blauw. In veel opzichten vertoonde dit gewas gelijkenissen met het LED ZON gewas. De bladkleur was natuurlijk en de

Eindrapportage lichtkleurenonderzoek

2011-2012

planten waren het meest gestrekt van alle behandelingen. Dit laatste was te verwachten, vanwege dezelfde fytochroombalans als bij LED ZON (stimuleert strekking), zonder de combinatie met een strekkingsremmend effect via de cryptochromen vanuit het relatief grote aandeel blauw licht in LED ZON.

De wekelijkse productie van LED Verrood was tot rondom de jaarwisseling spectaculair hoger: In week 52 was het versgewicht 25% hoger dan in het op één na best producerend gewas (LED R/B) en zelfs 47% hoger dan bij SON-T plasma (Figuur 16B). Bovendien was het percentage drogestof in de vruchten van LED Verrood gedurende de gehele teelt 10-20% hoger dan bij LED R/B, LED PAR en LED plasma. Ook bij LED ZON lag het percentage drogestof relatief hoog. LED ZON en LED Verrood hebben een zelfde fytochroombalans (PSS 0.73), hetgeen duidt op een verband tussen de fytochroombalans en drogestof percentage. Het vruchtgewicht uitgedrukt als drooggewicht loopt dus nog verder voor op de andere behandelingen. Na de jaarwisseling liep de wekelijkse versproductie bij LED Verrood zeer sterk terug ten opzichte van de andere behandelingen (Figuur 16C en D). In 8.2 wordt verder ingegaan op de fysiologische oorzaken van de effecten bij LED Verrood en de kansen die uit de inzichten naar voren komen. De lagere wateropname voor het gewas in de verrood afdeling zou een relatie kunnen hebben met de verhoogde necrose verschijnselen.

De vraag is nu of een natuurlijke balans van de fytochromen de ontbrekende schakel is voor productieverhoging. Bij LED ZON was de fytochroombalans hetzelfde als bij LED Verrood, maar was de productie gedurende de gehele teelt niet opvallend hoog. Hiervoor zou de volgende verklaring kunnen zijn: Het LED Verrood spectrum bevatte evenals LED R/B 10% blauw, terwijl het aandeel blauw bij LED ZON en LED PAR rond de 30% lag (Figuur 6). De momentane fotosynthese is 25 á 30% lager voor blauwe fotonen dan voor rode fotonen (McCree, 1972; Hogewoning et al. 2012, zie ook Figuur 2). Dus als (i) de fytochroombalans bepalend is en (ii) een minimale prikkeling van de cryptochromen en/of de fototropinen met beperkt blauw licht afdoende is, dan werkt (iii) het vele blauw in LED ZON juist productieverlagend. Het is een verrassende conclusie dat zonlicht niet het ideale lichtspectrum is om gewassen zo hoog mogelijk te laten produceren. Om te mogen concluderen dat een lichtspectrum met relatief veel rode fotonen plus een hoeveelheid verrood voor een natuurlijke fytochroombalans ideaal is, moet eerst aangetoond worden dat de productievoorsprong tot verder in de teelt kan worden vastgehouden (zie ook 8.2).

LED R/B is een 'standaard combinatie' in belichtingsproeven met LED's. Net als bij LED Verrood is de prikkeling van de cryptochromen en fototropinen minder dan bij natuurlijk daglicht. Ook de fytochromen staan in een onnatuurlijke balans, zoals bij LED PAR. Het gewas had dan ook de kenmerkend korte internodiën en onnatuurlijk donkergroen blad. Het gewas was minder vegetatief dan bij LED PAR. De productie in versgewicht was lange tijd het op een na hoogst (achter LED Verrood) en aan het einde van de teelt zelfs het hoogst (Figuur 16A). De problemen die zich in eerdere jaren voordeden ('getrokken koppen', bladkrulling; Peekstok et al. 2011) deden zich in deze proef in veel mindere mate voor. Mogelijk komt dit door het hogere percentage blauw licht (10%) ten opzichte van voorgaande jaren (5%). Echter, gezien er geen referentie afdeling met 5% was, kan dit niet worden onderbouwd.

Concluderend kan gesteld worden dat met de combinatie van rood (90%) en blauw (10%) LED licht plus de warmtestralers (in alle LED behandelingen aanwezig) heel redelijk geteeld kon worden. Met toenemende efficiënties ($\mu\text{mol}/\text{Joule}$) en dalende kosten van LED's kan deze combinatie goede perspectieven bieden voor praktijktoepassing. Helaas was er geen SON-T referentie om deze conclusie beter te kunnen staven. Indien het niet lukt om de spectaculaire effecten van LED Verrood verder uit te buiten (zie 8.2), dan is van de beproefde combinaties LED R/B het meest geschikt voor belichting van tomaten. De gemeten hogere nutriënten opname is lastig te verklaren. Mogelijk dat dit een rol heeft gespeeld in een mindere vatbaarheid voor necrose aan de randen van de bladeren. Daarbij dient te worden opgemerkt dat dit metingen betreft aan dezelfde planten en er per dag 1 meting per afdeling is gedaan.

LED plasma en SON-T plasma presteerden beiden minder dan het gewas belicht met LED R/B. Het toevoegen van een beperkte hoeveelheid breedband licht aan het smalband rood en blauw LED-licht heeft dus geen toegevoegde waarde. Aangezien blauw licht noodzakelijk is voor het gezond functioneren van het fotosyntheseproces (Matsuda et al. 2004; Hogewoning et al. 2010), kan het toevoegen van plasmalicht aan een lichtbron die geen, of te weinig, blauw uitstraalt wel zinvol zijn. Helaas was er in de proef geen ruimte om te toetsen of het extra blauwe licht bij SON-T plasma een gunstig effect had ten opzichte van puur SON-T, dat slechts 4.8% blauw uitstraalt.

8.2 Verrood: Oorzaken van de effecten en kansen voor toepassing

8.2.1 *Oorzaken van de verrood effecten*

Het meest verrassend waren de productieresultaten bij LED Verrood tot week 52 (Figuur 16B, zie ook 8.1). Een concreet aanwijsbare verklaring voor de hogere productie is de gelijkmatigere verticale verdeling van het licht over het gewas (Tabel 8). Vooral op momenten dat er een redelijke hoeveelheid daglicht in de kas komt bovenop de $160 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ PAR belichting, zal de betere verdeling leiden tot een hogere benuttingsefficiëntie van het licht. Dit is ook de gedachte achter tussenbelichting (Trouwborst, 2011) en diffuus glas (Dueck et al. 2012).

Een aantal andere oorzaken zijn uitgesloten: De hoeveelheid micromolen was aanzienlijk hoger voor LED Verrood vergeleken met de andere proefvakken, omdat maar een klein deel van de micromolen aan verrode golflengten meegeteld werden als PAR. De correctiefactor voor het gemeten PAR met de PAR-sensor (zie 5.7.2.2) is van te voren berekend op basis van theoretische modellen over de bijdrage van verrode fotonen aan de fotosynthese (Hogewoning et al. 2012). Deze correctiefactor (13.3%) zou de werkelijke bijdrage van het verrood aan de fotosynthese in de kop van het gewas kunnen onderschatten. Echter, fotosynthesemetingen met een open bladkamer toonden aan dat bij eenzelfde gemeten PAR de fotosynthesesnelheid 12%-15% (bruto-netto) hoger lag bij LED Verrood vergeleken met LED R/B. De correctiefactor was dus een zeer redelijke inschatting.

Verrode golflengten dringen dieper door in een gewas dan golflengten binnen het PAR-gebied (Morgan en Smith, 1979). Daarom was bij LED Verrood het aandeel verrood dieper in het gewas erg groot (Figuur 20). De bovengenoemde correctiefactor houdt geen rekening met aanpassingen van de bladeren dieper in het gewas om de verrode golflengten efficiënter te kunnen benutten. Een veel lagere fotosysteem I/fotosysteem II ratio dieper in het gewas zou duiden op een efficiëntere benutting van verrood (Chow et al. 1990; Hogewoning et al. 2012). De chlorofyl a/b ratio geeft een indruk van dit soort aanpassingen (Figuur 21). Uit deze metingen is geen indicatie van een veel efficiëntere verroodbenutting dieper in het gewas naar voren gekomen. Een directe bepaling van de fotosysteem I/fotosysteem II ratio is overigens betrouwbaarder.

De vruchten in de afdelingen met verrood waren eerder oogstrijp waren, door de snellere afrijping. De tijd tussen zetting en oogst was 3 tot 7 dagen korter onder invloed van het verrood. Gedurende de teelt was het klimaat in de verschillende afdelingen gelijk. Verrood heeft dus een aantoonbaar effect op het sneller afrijpen van de vruchten.

De afrijping van de vruchten is normaal gesproken temperatuur gerelateerd. Een vrucht heeft een bepaalde temperatuur som nodig om te gaan rijpen. Dit wordt uitgedrukt in graaddagen. Daarbij geldt een gerealiseerde etmaal van 20 graden op een dag mee telt als 20 graaddagen. Onder invloed van het verrood is het aantal graaddagen voor het moment van kleuring vermindert. Daarmee heeft de verrood effect op de kleuring van de vruchten. Het is hierbij onbekend of de meer open structuur van de planten een hogere vruchttemperatuur heeft veroorzaakt en daardoor een versnelde afrijping tot gevolg. Meer aannemelijk is dat er fytochroom-gestuurde hormonale processen aan ten grondslag liggen.

Na week 52 liep de weekproductie terug. Dit ging gepaard met steeds kleinere bladeren (Tabel 6), resulterend in een te lage LAI (Tabel 5), waardoor een deel van het licht niet meer door het gewas onderschept werd (Tabel 9). Het leek erop dat de snellere zetting gedurende de beginperiode van de teelt (Figuur 15) uiteindelijk het gewas teveel uitputte. Tevens was LED Verrood de afdeling waarin veruit de meest bladrandjes voorkwamen. Mogelijk is dit gerelateerd aan een moeizamere verdamping, gekenmerkt door een lagere huidmondjesgeleidbaarheid (Figuur 25) en hogere drainwaarde. Een indicatieve meting duidde op een 20% lagere benuttings-efficiëntie van het licht voor de fotosynthese bij een blad met een gemiddelde chlorose (Figuur 24).

8.2.2 Kansen verrood

Tot week 52 was de productie bij LED Verrood spectaculair hoger dan bij de andere behandelingen, terwijl aan het einde van de teelt LED R/B het meeste versgewicht geproduceerd had (Figuur 16). Of het beïnvloeden van de fytochrombalans met verrood een kans biedt voor productieverhoging en energiebesparing voor vruchtgroentegewassen hangt af van twee factoren:

- (1) De mogelijkheden om met een zo laag mogelijk energieverbruik de gewenste fytochrombalans te bewerkstelligen
- (2) De mogelijkheden om de voordelen zoals geconstateerd bij LED Verrood vast te houden en uit te buiten.

Het eerste punt ligt buiten het aandachtsveld van dit onderzoek, maar lijkt zeer de moeite waard om een vervolgstudie aan te wijden.

Wat betreft het tweede punt: Het teruglopen van de wekelijkse productie na de jaarwisseling lijkt gerelateerd aan een teruglopende LAI (zie 8.2.1). Een hogere stengeldichtheid aanhouden lijkt een eenvoudige oplossing hiervoor. Echter, omdat de individuele bladeren steeds kleiner werden (uitputting gewas) is het de vraag of dit afdoende is. Een iets lagere dosering verrood en/of gestaag afbouwen van de dosering gedurende de teelt voorkomt wellicht dit probleem. Bijkomend effect hiervan is een lager energieverbruik. Verder zal het voorkomen van bladranden ertoe bijdragen dat de productie omhoog gaat en beter op peil blijft. Indien een te lage verdamping hieraan ten grondslag ligt (zie 8.2.1), dan kan klimaatsturing uitkomst bieden.

Verder was het drogestofpercentage van de vruchten bij LED Verrood fors hoger (10-20%). Ook het brixpercentage lag hoger (Tabel 4). Dit vertaalde zich in een betere smaakwaardering ten opzichte van vruchten uit de andere behandelingen (rapport smaakonderzoek door studenten Hogeschool Holland is apart opvraagbaar). Mogelijk kan de betere smaak leiden tot een betere prijsvorming per kg tomaat. Een andere overweging is om met teeltmaatregelen (o.a. EC) te proberen om het hogere drooggewichtpercentage om te zetten in meer versgewicht.

Het voorkomen van de terugval in productie, het omzetten van het extra drooggewichtpercentage in versgewicht, en vooral de combinatie hiervan, zal grote gevolgen hebben voor de productie-efficiëntie per oppervlakte kas en per Joule energie-input. Concluderend kan gesteld worden dat het beïnvloeden van de fytochrombalans met verrood licht een grote kans biedt voor een succesvolle productieverhoging.

De lagere wateropname in de verrood afdeling zou een mogelijk extra stuurmiddel zijn om met minder input een zelfde, of hogere, productie te realiseren. Naast de mogelijke waterbesparing is hier direct een energie besparing mee te realiseren.

9 Belangrijkste conclusies

- De volspectrum lichtbronnen (LED PAR en LED ZON) leidden NIET tot een hogere productie. Dit maakt het optimaliseren van belichting met nieuwe lichtbronnen zoals LED realistisch uitvoerbaar. Immers, als een volspectrum vereist zou zijn voor een optimale productie, dan zou dit zeer moeilijk te realiseren zijn zonder een hoog energieverbruik. Voor de sector een positieve uitkomst dus.
- Het toevoegen van een beperkte hoeveelheid breedband licht heeft GEEN toegevoegde waarde, mits voldoende blauw licht aanwezig is. Dit blijkt uit de betere prestatie van LED R/B ten opzichte van LED plasma (beide vakken totaal 10% blauw licht).
- LED Verrood (benadering fytochrombalans als bij daglicht) laat spectaculaire resultaten zien:
 - Cumulatieve productie in week 52 voor LED Verrood +25% t.o.v. LED R/B en zelfs +47% t.o.v. SON-T plasma
 - Ook hoger percentage drogestof vrucht (+17% in week 52). Dat maakt rond week 52 totaal +29% meer drooggewicht t.o.v. het op één na best presterend gewas LED R/B
 - Factoren die wel/niet bijdroegen aan de goede prestatie van LED Verrood tot week 52
 - de gelijkmatigere verticale lichtverdeling leidde tot betere lichtbenutting
 - geen hogere benutting verrood voor fotosynthese in top gewas gemeten dan al verrekend was in de PAR-correctie voor verrode golflengten
 - geen hogere benutting verrood voor fotosynthese dieper in gewas, zo lijkt te concluderen uit de chlorofyl a:b ratio metingen
 - snellere afrijping vruchten, minder 'graaddagen' nodig (hormonale processen?)
 - Na week 52 valt voorsprong versgewicht weekproductie verrood gestaag weg.
 - Factoren die bijdroegen aan wegvallen voorsprong van LED Verrood na week 52
 - teveel assimilaten naar vruchten ten koste van blad put gewas uit
 - vervolgens te open gewas door lage LAI, waardoor licht verloren gaat
 - relatief veel bladrandjes
 - Wegvallen productievoorsprong LED Verrood kan *wellicht* voorkomen worden door:
 - lagere verrood dosering
 - verrood dosering af te bouwen in de loop van de teelt
 - hogere stengeldichtheid aanhouden om LAI op peil te houden
- Het percentage drogestof van de vruchten was 10-20% hoger in beide vakken met een fytochrombalans zoals bij daglicht (LED ZON en LED verrood, ook na week 52). Mogelijk kan de teelt zo gestuurd worden dat het extra drooggewicht zich vertaalt in extra versgewicht. Dit zou een flinke productietoename betekenen.
 - LED Verrood tomaten werden het best beoordeeld in smaaktests (rapport opvraagbaar)
- Met LED rood (90%)/blauw (10%) kon goed geteeld kan worden.
 - Mogelijk verliep de teelt beter dan in voorgaande jaren vanwege het hogere percentage blauw licht (voorheen 5%)
 - Invloed van de weersomstandigheden t.o.v. andere jaren kan niet uitgesloten worden.
- Benutting van de positieve effecten van verrood biedt grote kansen voor *productieverhoging* en *energiebesparing* in de vruchtgroenteteelt. De uitdaging is om de productievoorsprong vast te houden, te profiteren van het hoge drogestof percentage in de vrucht, en om de fytochrombalans op een op een energetisch verantwoorde manier te sturen. Vervolgonderzoek moet de stap tot praktijktoepassing mogelijk maken.

10 Referenties

- Ahmad M, Grancher N, Heil M, Black RC, Giovani B, Galland P, Lardemer D. 2002.** Action spectrum for cryptochrome-dependent hypocotyl growth inhibition in Arabidopsis. *Plant Physiology*, **129**: 774-785.
- Chow WS, Melis A, Anderson JM. 1990.** Adjustments of photosystem stoichiometry in chloroplasts improve the quantum efficiency of photosynthesis. *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.* **87**: 7502-7506.
- de Koning ANM. 1989.** Development and growth of a commercially grown tomato crop. *Scientia Horticulturae*; **45**: 117-127.
- Dueck T.A., Janse J, Kempkes FLK, Li T, Elings A, Hemming S. 2012.** Diffuus licht bij tomaat. Wageningen: Wageningen UR Glastuinbouw.
- Goins GD, Yorio NC, Sanwo MM, Brown CS. 1997.** Photomorphogenesis, photosynthesis, and seed yield of wheat plants grown under red light-emitting diodes (LEDs) with and without supplemental blue lighting. *Journal of Experimental Botany*, **48**: 1407-1413.
- Heuvelink E. 2005.** *Tomatoes (Crop production science in horticulture)*, Oxford, CAB International.
- Holder R., Cockshull K.E. 1988.** The effect of humidity and nutrition on the development of calcium deficiency symptoms in tomato leaves. In: Cockshull, K.E. (ed.) *The Effects of High Humidity on Plant Growth in Energy Saving Greenhouses*. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, pp. 53-60
- Hogewoning, S.W. 2010.** On the photosynthetic and developmental responses of leaves to the spectral composition of light. *Proefschrift*, Wageningen UR, Wageningen, Nederland.
- Hogewoning SW, Douwstra P, Trouwborst G, van Ieperen W, Harbinson J. 2010.** An artificial solar spectrum substantially alters plant development compared with usual climate room irradiance spectra. *Journal of Experimental Botany*, **61**: 1267-1276.
- Hogewoning SW, Trouwborst G, Maljaars H, Poorter H, van Ieperen W, Harbinson J. 2010a.** Blue light dose-responses of leaf photosynthesis, morphology and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light. *Journal of Experimental Botany*, **61**: 3107-3117.
- Hogewoning SW, Wientjes E, Douwstra P, Trouwborst G, van Ieperen W, Croce R, Harbinson J. 2012.** Photosynthetic quantum yield dynamics: From photosystems to leaves. *The Plant Cell*, **24**: 1921-1935.
- Inada K. 1976.** Action spectra for photosynthesis in higher plants. *Plant and Cell Physiology*, **17**: 355-365.
- Matsuda R, Ohashi-Kaneko K, Fujiwara K, Goto E, Kurata K. 2004.** Photosynthetic characteristics of rice leaves grown under red light with or without supplemental blue light. *Plant And Cell Physiology*, **45**: 1870-1874.
- McCree KJ. 1972.** Action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agricultural Meteorology*, **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.
- Peekstok T, Duyvesteijn R, Persoon S, Sanders J, de Jong, A. 2011.** LED proeven TTO 2010-2011-Focus op energie. TTO.
- Persoon S, Peekstok T, Sanders J. 2010.** Onderzoek naar invloed stralingswarmte en spectrale effecten LED belichting, TTO
- Pot CS, Trouwborst G, Schapendonk AHCM. 2010.** LED-tussenbelichting in tomatenteelt: Praktijkonderzoek bij Dekker Glascultures. Wageningen: Plant Dynamics B.V., 32.

Eindrapportage lichtkleurenonderzoek

2011-2012

- Trouwborst G.** 2011. On the photosynthetic responses of crops to intracanopy lighting with light emitting diodes. *Proefschrift*, Wageningen UR, Wageningen, Nederland.
- Trouwborst G, Oosterkamp J, Hogewoning SW, Harbinson J, van Ieperen W.** 2010. The responses of light interception, photosynthesis and fruit yield of cucumber to LED-lighting within the canopy. *Physiologia Plantarum*, **138**: 289-300.
- Walters, R.G., and Horton, P.** (1994). Acclimation of *Arabidopsis thaliana* to the light environment: Changes in composition of the photosynthetic apparatus. *Planta* **195**, 248-256.
- Wellburn AR.** 1994. The spectral determination of chlorophyll a and chlorophyll b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. *Journal of Plant Physiology*, **144**: 307-313.
- Whitelam G, Halliday K.** 2007. *Light and plant development*, Oxford, Blackwell Publishing.

Financiers:



Ministerie van Landbouw, Natuur en
Voedselkwaliteit

