

# Eindrapportage

## Onderzoek naar invloed stralingswarmte en spectrale effecten LED belichting

TEELTSEIZOEN 2009-2010

Uitgevoerd in het kader van het energieprogramma

Ministerie van LNV - Productschap Tuinbouw

### Projectnummer

13842

### Hoofdaanvrager I



Projectleider  
ing. S. Persoon  
Zwethlaan 52  
2675 LB Honselersdijk  
stefan@inno-agro.nl

### Onderzoeksinstantie I



Onderzoeker  
ir. A. Aulbers  
ir. G. Oosterhuis  
ir. A. Draaijer  
TNO Industrie & techniek

### Onderzoeksinstantie II



Onderzoeker  
ing. J. Sanders  
Proeftuin Zwaagdijk

Juli 2010 V04

### Financierders:



Ministerie van Landbouw, Natuur en  
Voedselkwaliteit



Kas als Energiebron



## Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Samenwerkende partijen .....</b>	<b>7</b>
1.1	TNO en Ladon .....	7
1.2	Proeftuin Zwaagdijk.....	7
1.3	Tuinbouw Techniek Ontwikkeling .....	7
<b>2</b>	<b>Inleiding.....</b>	<b>8</b>
2.1	Son-T v.s LED als groeilichtbron .....	8
2.2	Ervaringen uit voorgaand onderzoek 2008-2009.....	8
2.3	Probleemstelling teelt.....	9
2.3.1	Warmte straling .....	9
2.3.2	Kleuren .....	9
2.4	Doelstelling .....	9
2.5	Onderzoeksvragen.....	9
2.5.1	Teeltkundig.....	9
2.5.2	Technisch.....	10
<b>3</b>	<b>Literatuurstudie.....</b>	<b>11</b>
3.1	Inleiding .....	11
3.2	Overwegingen voor het onderzoek .....	11
3.2.1	Verschil in spectrum.....	11
3.2.2	Vergelijken van hoeveelheid licht : een valkuil.....	12
3.3	Verwarming van het gewas.....	12
3.3.1	Verticale temperatuur verschillen.....	12
3.3.2	Wortels.....	13
3.3.3	Stengel .....	13
3.3.4	Blad.....	13
3.3.5	Groeipunt.....	13
3.3.6	Vrucht en zaad .....	13
3.4	Spectra in relatie tot gewasgroei .....	13
3.4.1	PAR .....	13
3.4.2	UV .....	13
3.4.3	NIR & FIR.....	13
3.4.4	Daglengte en licht/donker cycli .....	14
3.4.5	Relatie licht tot aanpassingen, fotosynthese, groei en ontwikkeling .....	14
<b>4</b>	<b>Methode van onderzoek .....</b>	<b>15</b>
4.1	Wijze van onderzoek.....	15
4.2	Methode van onderzoek.....	15
4.2.1	Inzet stralingswarmte.....	16
4.2.2	Lichtkleuren tussen 500-600 nm .....	16
4.3	Opzet kasproef .....	17
4.3.1	Lichtbehandelingen afdelingen.....	18
4.4	Gewasregistraties .....	18
<b>5</b>	<b>Onderzoeksafdeling en belichtingsinstallatie .....</b>	<b>20</b>
5.1	onderzoeksafdelingen.....	20
5.2	Belichtingsinstallatie.....	20
5.3	Lichtverdeling .....	21
5.4	Infrarode belichting.....	22
5.5	Meet/Regel systeem.....	23
<b>6</b>	<b>Waarnemingen gewas.....</b>	<b>24</b>
6.1	Visueel .....	24
6.2	Groei en ontwikkeling.....	24
6.3	Planttemperatuur .....	25
6.4	Klimaat.....	26

6.4.1	Ervaring voorgaande teeltseizoen 2008-2009.....	26
6.4.2	Teeltverloop teeltseizoen 2009-2010 volgens de telers.....	26
6.5	Time lapse films.....	27
6.5.1	Inleiding.....	27
6.5.2	Gewas groei en ontwikkeling.....	27
6.5.3	Discussie.....	28
6.6	Verdamping.....	29
6.6.1	Inleiding.....	29
6.6.2	Wortels visueel.....	29
6.6.3	Discussie verdamping.....	30
<b>7</b>	<b>Productie.....</b>	<b>31</b>
7.1	Inleiding.....	31
7.2	Productie resultaat.....	31
7.2.1	discussie productie.....	32
<b>8</b>	<b>Gewasmetingen.....</b>	<b>34</b>
8.1	Zetting.....	34
8.2	Diameter stengel.....	34
8.3	Bladrandjes.....	35
8.3.1	discussie.....	35
8.4	Blad- en stengellengte.....	35
8.5	Metingen LAI.....	36
8.5.1	discussie.....	37
8.6	Houdbaarheidsproef.....	37
8.7	Chemische gewasanalyses.....	38
8.7.1	Suikergehalte vrucht.....	38
8.7.2	Drogestof meting vrucht en blad.....	38
<b>9</b>	<b>Gerealiseerde belichting.....</b>	<b>40</b>
9.1	Gerealiseerde lichtniveau.....	40
9.2	Gerealiseerd spectrum.....	40
9.2.1	discussie.....	40
9.3	Inzet infrarood straling.....	41
9.3.1	Instellingen.....	41
9.3.2	Werking infrarood installatie.....	42
9.3.3	Elektra verbruik.....	42
9.3.4	discussie.....	43
<b>10</b>	<b>Discussie.....</b>	<b>45</b>
10.1	Productie onder LED verlichting.....	45
10.2	Rol stralingswarmte.....	45
10.3	Rol kleurtjes.....	45
<b>11</b>	<b>Conclusies.....</b>	<b>46</b>
<b>12</b>	<b>Aanbevelingen.....</b>	<b>46</b>



## Samenvatting

LED belichting is mondiaal bezig aan een opmars om conventionele lichtbronnen als gloei-, halogeen en tl lampen te vervangen. Dit komt doordat per opgenomen Watt een LED lamp relatief meer (zichtbaar) licht uitstraalt. In het jaar 2007 heeft LED belichting haar toetrede tot de tuinbouw gemaakt. Zoals wel vaker bij innovaties gebeurt is deze belichtingsvorm op relatief grootschalige wijze ingezet. Uitgangspunt hierbij was dat de plant de meest efficiënte fotosynthese heeft bij rood licht. Ten tijde van de introductie hebben TNO, Fytagoras en Ladon op kleine schaal gedaan onderzoek. Dit onderzoek werd in teeltseizoen 2008-2009 opgevolgd door een onderzoek in vergelijkbare onderzoeksafdelingen met Son-T als referentie. Telersvereniging TTO en DLV Plant hebben destijds moeten constateren dat met alleen rode en blauwe LED de productie 20% lager lag dan bij Son-T. Er werd geconstateerd dat het gewas onder LED door het gebrek aan infrarode straling een verminderde ontwikkelingssnelheid had. Daarnaast was de blad- en gewasopbouw onder rode en blauwe LED's afwijkend ten opzichte van Son-T.

TNO en TTO hebben daarom het onderzoek in 2009-2010 op dezelfde schaal voortgezet, waarbij de nadruk meer op de effecten in de teelt lag dan op de technische ontwikkeling. Hierbij is de Son-T lamp als uitgangspunt genomen en is bekeken welk deel van het spectrum bij LED ontbreekt ten opzichte van deze lichtbron. Naast de genoemde stralingswarmte ontbreekt ook het spectrum tussen 500 en 600 nm (geel/groen). Het was onbekend wat het effect van deze kleuren was op de stuurprocessen in de plant. Doelstelling van het onderzoek was het analyseren hoe het lichtspectrum en de inzet van stralingswarmte de groei en plantontwikkeling van een tomatengewas onder LED belichting beïnvloedt.

Onderzoeksvragen hierbij waren:

- Wat is de invloed van stralingswarmte op bladtemperatuur in verhouding tot ruimte temperatuur?
- Wat is het effect van stralingswarmte op groei, bladafplitsing en zetting?
- Hebben de lichtkleuren tussen 500-600 nm (groen/geel) effect op groei en ontwikkeling ?
- Beïnvloeden de lichtkleuren tussen 500-600 nm (groen/geel) slechts de fotosynthese of hebben de lichtkleuren invloed op de sturing van plantprocessen zoals bladafplitsing en zetting?

Het onderzoek is uitgevoerd in drie gelijke kas compartimenten op de Demokwekerij Westland van elk 108 m<sup>2</sup> : één afdeling met 145 µmol Son-T, één met LED 93% rood en 7% blauw en één met 76% rood, 7% blauw en 17% groen/geel. De LED afdelingen waren voorzien van infrarood stralers, waarbij het uitgangspunt was dat het aandeel infrarood in vergelijking met een Son-T lamp met 1/3 werd verlaagd.

Het ras Timotion werd gezaaid op 28 augustus 2009 en op 14 oktober 2009 (week 42) in de proefvakken geplant. Op 24 oktober zijn de planten op de mat gezet. In het onderzoek was er bewust voor gekozen om de infrarood pas in te zetten tot het moment dat de planten eenzelfde vertraging in ontwikkelingssnelheid vertoonden dan het jaar ervoor. In week 48 was dit het geval en in week 51 van 2009 kwam de productie op gang. Aan de ontwikkelingssnelheid van het gewas was het moment van infrarood toepassen duidelijk te zien; de zetting kwam op eenzelfde niveau als de Son-T. In het productie verloop was terug te zien dat de verminderde productie bij de rode en blauwe LED voor een groot deel veroorzaakt wordt door deze eerste periode, toen de infrarood straler nog niet was ingezet.

Het onderzoek naar de extra inzet van LED kleuren groen en geel lag gecompliceerder. Zo lag de productie achter ten opzichte van de andere LED afdeling. Visueel leek het gewas meer op dat van de SON-T afdeling. Ten opzichte van LED rood en blauw oogden de bladschijven oogden groter en de telers ervoeren dat het gewas vitaler, vegetatiever was. Significant konden de verschillen echter niet onderbouwd worden. Een ander opmerkelijk effect van in de afdeling met de kleuren LED was de verdamping. Het tomatengewas in het vak met de vier kleuren LED vertoonde een ander wateropname patroon. Het patroon dat opviel is dat het watergehalte gedurende de donker periode in de LED afdeling rood blauw rechtlijnig bleef zakken terwijl de afname in het watergehalte in het substraat in de SON-T afdeling en de LED afdeling rood blauw geel groen een regulier patroon volgde. Tijdens het onderzoek is hier geen duidelijke verklaring voor gevonden.

Voorts kon bij de LED afdeling met alleen rood en blauw licht worden opgemerkt dat bij perioden van weinig buitenlicht het gewas gedrongen groeide wat zich vertaalde in kortere bladeren, minder lengte groei, minder uitdikking van de stam en een donkerdere kleur van het gewas. Na een periode met veel buitenlicht vertoonde het gewas juist veel vegetatieve ontwikkeling, zoals groei/opzwellen van bladeren en een lichtere kleur. In de afdeling met Son-T waren deze effecten op daglicht veel minder sterk.

Tijdens het onderzoek zijn voorts de volgende verschillen gekwantificeerd:

- Aan het einde van de gehele proefperiode lag het productiecijfer in de Son-T- afdeling 11,4% hoger t.o.v. de productie in de LED afdeling met de kleuren rood en blauw. In vergelijking met de LED afdeling met alle kleuren lag de productie in de Son-T afdeling 12,2% hoger.
- In het teeltseizoen 2008-2009 bleef de zetting van LED nog 12% lager, terwijl in het onderzoek van 2009-2010 de zetting bij de LED slechts 0,5-2 % lager lag dan bij de Son-T.
- In de LED afdeling met rood en blauw is een houdbaarheidstest een significante afname van het vruchtgewicht ten opzichte van de vruchten uit de Son-T ; het verschil na 43 dagen is 20,2% het verdient de aanbeveling in een volgend seizoen dit onderzoek te herhalen

Hoewel de focus van het onderzoek lag op de gewasontwikkeling is na afloop van het onderzoek het energieverbruik in kaart gebracht. Hieruit bleek dat er gemiddeld 35,3 Watt/m<sup>2</sup> aan infrarode warmte is toegevoegd. Beoogd was een maximum van 31,5 Watt/m<sup>2</sup>, wat 2/3 deel is van het vermogen infrarood dat een Son-T levert. Het hoge verbruik werd enerzijds veroorzaakt door de extreem koude winter en anderzijds doordat de installatie moeilijk in vermogen terug te regelen was.

De overtuiging bij zowel onderzoekers als begeleidende telers is dat de LED belichting gezien de snelle verbetering van energie efficiency een lichtbron is welke zeer interessant kan zijn voor de tuinbouw. Hiertoe zal echter het warmte vraagstuk eerst opgelost moeten worden. Naar aanleiding van dit onderzoek is het aan te bevelen om verder onderzoek te doen naar infrarood. Daarnaast zal er gekeken moeten worden naar een alternatieve manier van het verwarmen van de bovenste regionen van een plant.

## 1 Samenwerkende partijen

Een drietal instellingen hebben samengewerkt om 'bottum up' innovatief onderzoek te doen naar de toepassing van LED verlichting boven tomaten planten:

### 1.1 TNO en Ladon

TNO ([www.tno.nl](http://www.tno.nl)), Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek, is een kennisorganisatie voor bedrijven, overheden en publieke organisaties. Als een wettelijke organisatie heeft het een onafhankelijke positie waardoor het objectieve, wetenschappelijk gefundeerde oordelen kan geven. De dagelijkse werkzaamheden van TNO zijn het ontwikkelen van en toepassen van kennis. TNO is opgedeeld in vijf kerngebieden. In dit specifieke project zijn mensen en faciliteiten van mensen en faciliteiten van het kerngebied Industrie en Techniek ingezet. Bij TNO Industrie en Techniek werken ca. 800 mensen. Ladon is een toeleverancier van LED belichtsystemen voor de tuinbouw en utiliteitsbouw. Het bedrijf heeft ten behoeve van het belichtingsonderzoek van 2009-2010 gezamenlijk met TNO de belichtingsinstallatie ter beschikking gesteld voor het onderzoek.

### 1.2 Proeftuin Zwaagdijk

Proeftuin Zwaagdijk ([www.proeftuinzwaagdijk.nl](http://www.proeftuinzwaagdijk.nl)) is een private onafhankelijke instelling welke landbouwkundig onderzoek doet. Het bedrijf in Zwaagdijk is gelegen tussen agrarische gebieden als Grootslag, AgriportA7 en Seedvalley. In het Westland (Honselersdijk) beschikt het bedrijf over een 20 tal onderzoeksafdelingen onder glas en ondersteunende ruimte voor onderzoek en demonstratie. Bij het bedrijf werken 40 medewerkers. Proeftuin Zwaagdijk is de enige private onderzoeksinstelling in Nederland met een ISO-certificaat.; in 1999 is het ISO-9002 certificaat toegekend, later gevolgd door ISO-9001.

### 1.3 Tuinbouw Techniek Ontwikkeling

TTO ([www.tto.nu](http://www.tto.nu)) is een telersvereniging waar 36 glastuinbouwbedrijven lid van zijn met een totaal oppervlak van 668 ha glas. TTO is opgericht omdat de schaalgrootte ervoor zorgt dat innoveren vanuit de praktijk steeds meer risico's met zich mee brengt. De afgelopen jaren zijn er tal van voorbeelden geweest van grote innovaties die door individuele ondernemers gestart zijn, waardoor deze een hoog risico liepen. De doelstelling van TTO is het gezamenlijk opzetten van innovatieprojecten met als doel een verantwoord en duurzaam innovatietraject. TTO wil daarnaast graag namens haar leden een spreekbuis vormen richting overheden en kennisinstellingen, met als doel innovatie goed aan te laten sluiten bij de praktijk. Lidmaatschap van TTO is alleen voorbehouden aan agrarische ondernemers. Het resultaat is dat opgedane kennis snel verspreid worden onder alle glastuinbouwbedrijven in Nederland. Kwekers Hans Zwinkels en Vincent vd Lans hebben namens TTO de onderzoeken intensief begeleidt en tevens veel kennis ingebracht. Beide bedrijven hebben ruime ervaring met belichting van tomaat.

TTO en TNO hebben voorts een aantal specialisten ingeschakeld te weten:

#### *Inno-Agro*

Inno-Agro ([www.inno-agro.nl](http://www.inno-agro.nl)) is een bedrijf dat zich volledig gespecialiseerd heeft in technische innovatie in de glastuinbouw. Hierbij staat Inno-Agro voor een verantwoorde, projectmatige aanpak van het innovatieproces. Stefan Persoon van bovengenoemde bedrijf is door TTO aangesteld als projectleider van het onderzoek. Daarnaast heeft hij licht- en andere technische metingen uitgevoerd.

#### *TICE Agro*

TICE is een bedrijf dat bedrijven ondersteund op teelttechnisch gebied, waarbij de specialisaties met name liggen op de gebieden klimaatbeheersing en plant groei en ontwikkeling. TICE heeft in de LED-proeven van 2009-2010 een wetenschappelijke bijdrage geleverd aan de teelt bijeenkomsten en de bijeenkomsten van het LED platform.

## 2 Inleiding

Initiatiefnemers van het LED onderzoek in 2009-2010 zijn TNO en Tuinbouw Techniek Ontwikkeling (TTO). Het project is uitgevoerd op de Demokwekerij Westland, in de onderzoeksafdelingen van het Fieldlab. Het belichtingsonderzoek is uitgevoerd in met het gewas tomaat.

### 2.1 Son-T v.s LED als groeilichtbron

Son-T belichting is groeilicht waarbij een hoge druk natriumlamp toegepast wordt. Deze belichtingsvorm is algemeen bekend in de tuinbouw en er is veel ervaring mee opgedaan. Telers weten hoe zij om moeten gaan met de beperkingen van deze lichtbron en weten tot op heden de lichtbron op een economisch verantwoorde manier in te zetten, getuige de groei van belichte teelten in de laatste 25 jaar.

Son-T als lichtbron is uitontwikkeld en er zijn weinig tot geen verbeteringen meer mogelijk om de energie efficiency te verbeteren. In de loop der jaren zijn er een aantal alternatieven voor Son-T belichting bekeken zoals TL-belichting en de toepassing van HD-kwik lampen (gecombineerd met HD-natrium).

LED belichting is mondiaal bezig aan een opmars om conventionele lichtbronnen als gloei-, halogeen en tl lampen te vervangen. Dit komt doordat per opgenomen Watt een LED lamp relatief meer (zichtbaar) licht uitstraalt. De efficiency van een LED is nog niet uitontwikkeld en verdubbelt momenteel nog elke 2½ jaar. De toepassing van LED in de tuinbouw lijkt dus voor de hand te liggen, waarbij het een feit is dat de ontwikkeling van de efficiency van LED sneller gaat dan die van Son-T.

### 2.2 Ervaringen uit voorgaand onderzoek 2008-2009

Na een half jaar van fundamenteel onderzoek door Fytagoras in kleine klimaatcellen is begin 2008 door het Fieldlab (TNO/DLV) de conclusie getrokken dat het nog niet wenselijk was om in het teeltseizoen '08-'09 op praktijkbedrijven onderzoek te doen. Er is voor gekozen om verschillende behandelingen met elkaar te vergelijken in kleine kasafdelingen welke compleet separaat stuurbaar waren. In Nederland waren geen andere onderzoeken die op dezelfde wijze met hetzelfde lichtniveau (130 umol) en startdatum (15 oktober 2008) zijn opgezet.

Doordat er sprake was van een referentieafdeling met HD natrium lampen, waren de resultaten toetsbaar aan praktijk omstandigheden. Uit het private onderzoek kwamen een heel aantal conclusies naar voren welke op te vragen zijn bij lampleverancier Ladon, mede financier van het onderzoek.

De belangrijkste conclusies waren:

- Effect van blauw licht op de stomataire geleidbaarheid ; verschil van max. 20% verdamping tussen 2 verschillende behandelingen
- Waarschijnlijk een verstoord transport van assimilaten bij LED licht tov HD natrium; hypothese hieruit voortvloeiend is dat opgehoopte assimilaten niet omgezet konden worden in vruchten konden door slechte zetting ondanks lage plantbelasting
- Waarschijnlijk zorgde de afwezigheid van warmtestraling bij LED op het blad/groei punt voor stagnatie van groei en ontwikkeling bovenin het gewas (duidelijk dankzij strenge winter) na inzet van IR stralers vond verbetering plaats → de kop van de plant was groeizamer
- Indien gebrek aan stralingswarmte vervangen wordt door buiswarmte (groeibuis) ontstaat een droger klimaat en verdampt het gewas meer waardoor meer energie nodig is.
- De totale productie van LED was 20% lager dan de productie onder HD natrium en het aantal gezette trossen was 12% lager

In de LED-proef van 2008-2009 op de Demokwekerij Westland werd een productieverlies van 20% gemeten over het gehele belichte teeltseizoen ten opzichte van SON-T (traditionele belichtings installatie). Hoofdvragen die uit de proeven van teeltseizoen 2008 en 2009 naar voren kwamen concentreerden zich voornamelijk op het ontbrekende deel van het spectrum dat in natuurlijk licht en SON-T verlichting wel aanwezig is en bij LED weggelaten werd, te weten het zichtbare spectrum tussen 500 en 600 nm (geel+groen) en het onzichtbare spectrum >780 nm (infrarode straling).



### 2.3 Probleemstelling teelt

Vanuit het LED onderzoek van Ladon/TNO in 2008 - 2009 kwam naar voren dat het nog niet mogelijk was om bij een gelijkblijvend lichtniveau met LED belichting eenzelfde productie te behalen als met SON-T belichting.

#### 2.3.1 *Warmte straling*

Ervaringen in 2008 en 2009 toonden aan dat het gewas onder alleen rood en blauw LED licht (20% blauw en 80% rood) hoogstwaarschijnlijk ophoping van assimilaten krijgt in het blad door een te lage temperatuur. Dit werd gesuggereerd door de zeer donker groene kleur en de remming van de bladstrekking die de bladeren vertoonden. Hoogstwaarschijnlijk vindt transport van assimilaten in verminderde mate plaats waarvoor de hypothese werd geformuleerd dat er in koude perioden een gebrek was aan warmte omdat er was een aantoonbaar verschil in planttemperatuur tussen LED afdelingen en de SON-T werd waargenomen.

#### 2.3.2 *Kleuren*

In de literatuur is het effect van kleuren op gewassen minimaal omschreven, waarbij enkele onderzoeken elkaar zelfs tegenspreken. De mate van toepassing van blauw licht (+/- 450nm) heeft een zeer grote invloed op de stomataire geleidbaarheid, bijbehorende bladspanning en wateropname. Een hypothese na de proeven in 2008-2009 was dat de verschillen tussen de LED behandeling en de Son-T behandeling mogelijk voor een deel te verklaren zijn door een verschil in spectrum (zie **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**). Hieruit vloeide de hypothese is dat telen onder alleen blauw en rood licht, met een vooraf bepaalde verhouding mogelijk niet optimaal is.

Stralingswarmte, stuurlicht kleuren en het exacte % blauw licht waren tot op heden in de onderzoeken onderbelicht, waarop besloten is om deze factoren nader te onderzoeken. De hieruit vloeiende probleemstelling luidde als volgt:

‘Welke rol spelen stralingswarmte dicht bij het groeipunt en andere kleuren dan rood en blauw en kunnen deze bijdragen aan een productie verbetering in LED belichting?’

### 2.4 Doelstelling

De doelstelling van het onderzoek was het analyseren hoe het lichtspectrum en de inzet van stralingswarmte de groei en plantontwikkeling van een tomatengewas onder LED belichting beïnvloedt.

### 2.5 Onderzoeksvragen

- Is het mogelijk om een gelijke productie onder LED verlichting te behalen als onder SON-T, uitgaande van een gelijk lichtniveau uitgedrukt in  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$  ?

#### 2.5.1 *Teeltkundig*

*invloed stralingswarmte:*

- Wat is de invloed van stralingswarmte op bladtemperatuur in verhouding tot ruimte temperatuur?
- Wat is het effect van stralingswarmte op groei, bladafplitsing en zetting?
- Wat is de invloed van stralingswarmte op de sink-source balans ?

*invloed spectrum tussen 500-600 nm:*

- Hebben de lichtkleuren tussen 500-600 nm (groen/geel) effect op groei en ontwikkeling van het gewas ?
- Beïnvloeden de lichtkleuren tussen 500-600 nm (groen/geel) slechts de fotosynthese of hebben de lichtkleuren invloed op de sturing van plantprocessen zoals verdamping, bladafplitsing en zetting?

### 2.5.2 Technisch

- Onderzoeken op welke wijze de benodigde stralingswarmte voor het gewas zo effectief en goedkoop mogelijk kan worden ingezet op de momenten dat hier behoefte naar is
- Ontwikkelen van een LED belichtingsinstallatie welke gebaseerd is op het spectrum van een Son-T lamp
- Onderzoek naar de lichtverdeling in het gewas van de verschillende belichtingssystemen
- Onderzoek naar het energieverbruik van de verschillende belichtingssystemen

### 3 Literatuurstudie

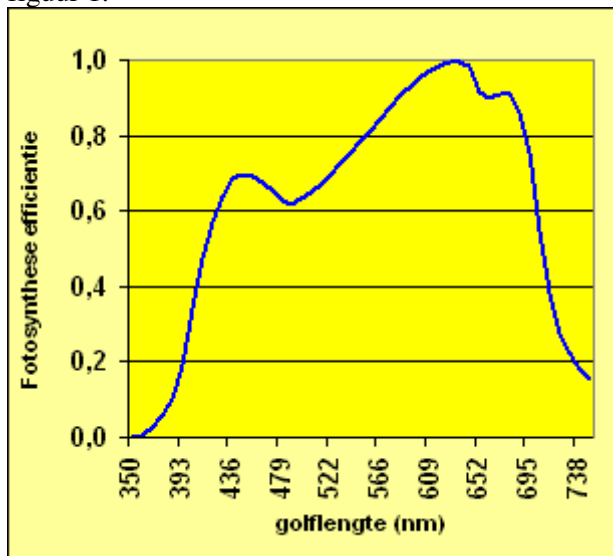
#### 3.1 Inleiding

Voor aanvang van de proef is er uitgebreid onderzoek gedaan naar LED belichting. Dit heeft geresulteerd in een aantal overwegingen voor het onderzoek en een literatuur studie. De literatuur studie die verricht is had betrekking op verwarming van plantdelen en is grotendeels gebaseerd op het rapport 'nieuwe vormen van verwarming van gewasdelen' (Jongschaap et al. 2009).

#### 3.2 Overwegingen voor het onderzoek

##### 3.2.1 Verschil in spectrum

In het verleden is veel onderzoek verricht naar belichting en hoe de plant omgaat met de verschillende lichtkleuren. Planten op de aardbol groeien al miljarden jaren onder het spectrum van de zon en hebben zich hier ook op geëvolueerd. Het is algemeen bekend dat de fotosynthese van een plant plaatsvindt in het golflengte gebied tussen de 400 en 700 nm, uitgedrukt in het 'plantactie spectrum'. De fotosynthese is binnen het plantactie spectrum het meest optimaal rond de 640 nm (rood licht) zoals weergegeven in figuur 1.



Figuur 1 : Fotosynthese efficiency (Mc Cree curve 1972)

LED belichting werd in 2008 geïntroduceerd in de tuinbouw waarbij als uitgangspunt de betere *energie efficiency* werd genomen en de gedachte dat er bespaard kon worden door alleen die *golflengte* licht toe te dienen waar de plant maximale fotosynthese kon behalen (rood licht). Het onderzoek in de Demokwekerij in het seizoen 2008-2009 was hier eveneens op gestoeld. Gedurende het onderzoek kwam de indruk naar voren dat het gewas ten opzichte van Son-T belichting iets 'te kort' kwam. De sterkste indicatie was dat het gewas onder LED een gemis had aan infrarode stralingswarmte en mogelijk ook andere delen van het spectrum. Hiertoe zijn de volgende feiten interessant om de weten:

- Volgens de literatuur<sup>1</sup> wordt ongeveer 31 % van de uitgestraalde energie van een Son-T lamp in het spectrum tot 780 nm uitgestraald (zichtbaar licht).
- Volgens toeleveranciers wordt van een Son-T armatuur 50% van de elektrische energie opgezet in infrarode stralingswarmte (>780 nm); de overige warmte komt vrij als convectie warmte

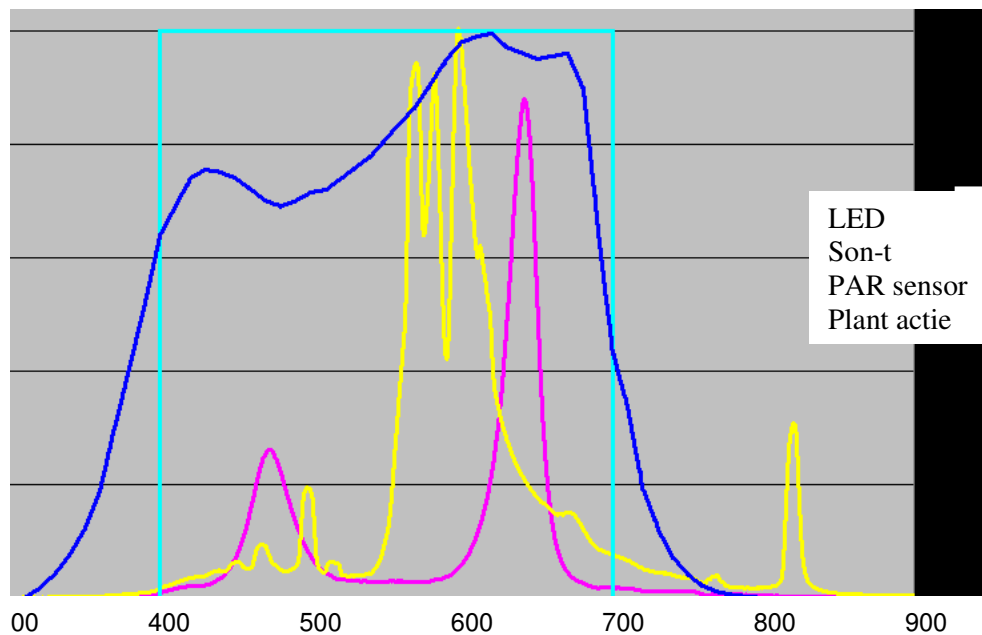
Daarnaast is het onbekend wat het effect is van het verschuiven van het aangeboden spectrum van een Son-T ten opzichte van een LED belichting met 90% rood en 10% blauw licht (voorgaande onderzoeken

<sup>1</sup> J. phys. D: Appl Phys.,. 17 (1984) 367-378, Energy balance of High Pressure sodium discharges under controlled vapour conditions, D. O. Wharmby

hadden reeds aangetoond dat men met 100% rood licht niet kon telen en dat een minimum aan blauw licht de ergste tekortkomingen kon compenseren). Zo wordt er bijvoorbeeld bijna geen licht toegediend tussen de 500 en 600 nm (groen-geel) en licht dus tussen de 700 en 780 nm (verrood licht). In figuur 1 is middels het ‘plantactie spectrum’ te zien dat de plant hier wel actief is. Er is relatief veel onderzoek gedaan naar de efficiency van lichtkleuren op *fotosynthese*, maar minder naar het effect van lichtkleuren op *stuurprocessen* in de plant. Denk hierbij aan strekking van de plant, opening van de huidmondjes, vorming van plantcellen etc. Voor wat betreft de fotosynthese is aangetoond dat rode en blauwe LED’s volstaan, echter over de stuurprocessen is nog onvoldoende bekend over het juiste spectrum.

### 3.2.2 *Vergelijken van hoeveelheid licht : een valkuil*

De hoeveelheid groeilicht wordt uitgedrukt in  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$  wat gelijk staat aan het aantal fotonen licht dat uitgezonden wordt in het gebied tussen de 400 en 700 nm. Het verrode licht (700-780 nm) en het infrarode licht ( $>780$  nm) wordt hier dus niet in meegenomen. Het deel van het licht tussen 700 en 780 nm wordt niet gemeten door een standaard PAR sensor maar is wel relevant vanuit het plantactiespectrum en wordt dus op de een of ander manier ingezet bij de fotosynthese. Het deel van het licht voorbij 780 nm draagt weliswaar niet direct bij aan de fotosynthese, maar wordt wel geabsorbeerd door de plant met als gevolg opwarming van plantdelen. De absorptie coëfficiënt van het blad wordt beïnvloed door de golflengte van het infrarode licht, de kleur van het blad en de samenstelling van het blad.



Figuur 2 : spectrum verschillende lichtbronnen in nm

## 3.3 Verwarming van het gewas

### 3.3.1 *Verticale temperatuur verschillen*

Over de gewenste temperatuurverschillen tussen de top van het gewas, de vruchten en de wortels bestaan (mede vanuit de semigesloten teelt) veel vragen. Telers met traditionele teelten hebben geleerd om met temperatuur verschillen om te gaan, zoals het inzetten van snelle temperatuursverlagingen bij de start van de donkerperiode of langzaam opwarmen. De temperatuur van de plant als geheel beïnvloed direct de assimilaten behoefte, waarbij een te lage of te hoge temperatuur een overschot of tekort aan assimilaten kan veroorzaken. Onder normale omstandigheden geldt dat een temperatuur verhoging van een plantorgaan een snellere ontwikkeling en een hogere sink sterkte geeft voor dat orgaan doordat de activiteit van enzymen verhoogd wordt.

### 3.3.2 Wortels

De temperatuur van wortels kan een sturend effect hebben op de kieming en ontwikkeling van het wortelstelsel en hiermee indirect op de opname van water en nutriënten en de productie van plantenhormonen (cytokinine). De plant status zoals deze gekenmerkt wordt in termen vegetatief en generatief zou door een lagere wortel temperatuur gestimuleerd kunnen worden richting de generatieve groei, doordat de activiteit van abscisinezuur in de wortel bij lage temperatuur wordt gestimuleerd en de vorming van cytokininen, die de groei en productie stimuleren mogelijk wordt verlaagd.

### 3.3.3 Stengel

Het transport door de stengel wordt nauwelijks beïnvloed door lage stengeltemperaturen, tenzij de temperatuur extreem laag wordt gemaakt. Stengeltemperaturen hoeven niet bijzonder hoog te zijn (>12 °C) om het transport van assimilaten niet te hinderen.

### 3.3.4 Blad

Voor de bladeren is o.a. de temperatuur van belang bij de afsplitsing, de uitgroei, de biochemische functies van het blad als de verdamping. De afsplitsingsnelheid van nieuwe bladeren hangt in een temperatuurstraject van 17-27 °C vrijwel lineair samen met temperatuur.

### 3.3.5 Groeipunt

De afsplitsing en uitgroei van de zijknoppen is behalve van de temperatuur ook afhankelijk van het aanbod aan assimilaten.

### 3.3.6 Vrucht en zaad

De vruchtzetting en de kwaliteit van het stuifmeel dat nodig is voor de bevruchting kan door temperatuur worden beïnvloed. De uitgroei van vruchten wordt in hoge mate bepaald door de temperatuur. Vruchten die de gehele teelt opgroeien bij een lagere temperatuur hebben een lagere groeisnelheid, maar temperatuur heeft weinig invloed op de uiteindelijke vruchtgrootte. Het is bekend dat door het gebruik van buisverwarming dichtbij de vruchten (groeibuis) een verticale temperatuur gradiënt in het gewas ontstaat en dat deze de groei en ontwikkeling van het gewas beïnvloedt en een effect heeft op de assimilaten verdeling en afrijping van vruchten.

## 3.4 Spectra in relatie tot gewasgroei

Vuistregel:

- Groeilicht: hoge intensiteit golflengtegebied van 400-700 nm
- Stuurlicht: lage intensiteit golflengtegebied 280-800 nm

### 3.4.1 PAR

Het gedeelte van het licht dat door planten hoofdzakelijk gebruikt wordt voor de fotosynthese. Dit deel van 400-700 nm wordt daarom (in het Engels) photosynthetic active radiation (PAR) genoemd.

### 3.4.2 UV

Het zogenaamde UV-B (300-315 nm) en het UV-A (315-400 nm) zijn verantwoordelijk voor degradatie van cellen. UV straling heeft vooral invloed op de fotomorfogenese en kleuring van planten. Een klein gedeelte van de UV straling wordt ook gebruikt voor de fotosynthese en groei van planten.

### 3.4.3 NIR & FIR

Nabij infrarood (NIR) (680-3.000 nm) is het deel van het zonnenspectrum dat nauwelijks gebruikt wordt door de planten; het wordt voornamelijk omgezet in warmte. Het stralingsgedeelte van 700-800 nm wordt verrood genoemd en dit draagt bij aan de fotomorfogenese, vooral de stengelstrekking en het fotoperiodisme van planten. Ver infrarode straling (FIR) met golflengtes van 3.000-100.000 nm is niet het gevolg van de directe zoninstraling, maar is warmtestraling.

#### 3.4.4 *Daglengthe en licht/donker cycli*

Daglengthe is belangrijk voor alle fotoperiodische processen in de plant. Over de optimale daglengthe bestaat voor tomaat geen duidelijkheid. Een vuistregel is dat bij daglengthes van meer dan 14 uur het effect van het licht op de groei en productie de laatste uren afneemt. Bij lange dag gaan meer suikers naar de bladeren. Onder korte dag wordt de generatieve groei gestimuleerd, de bloemtros wordt daarbij eerder aangelegd. Naarmate de daglengthe langer wordt dan 17 uur neemt de kans op chlorose, afwijkingen, minder groei en productie toe. Fytochrom kan worden vergeleken met het uurwerk van een gewas, de zogenaamde circadian klok (biologische klok). Het begin v/d nacht is hiervoor de 'reset'. Er is in door vele experimenten aangetoond dat er ritmestornissen kunnen ontstaan in het sluitingsmechanisme van de huidmondjes bij andere licht -kleuren / -intensiteiten /-cycli vergeleken met natuurlijke omstandigheden.

#### 3.4.5 *Relatie licht tot aanpassingen, fotosynthese, groei en ontwikkeling*

Theoretisch kunnen alle fotonen met golflengtes tussen 400 en 700 nm door een plant worden gebruikt voor fotosynthese, maar de efficiëntie waarmee dit gebeurt is niet gelijk. De hoeveelheden chlorofyl en carotenoiden in een blad zijn afhankelijk van de lichtkwaliteit waarin het blad zich heeft kunnen ontwikkelen. Naast chlorofyl bevat blad ook andere pigmenten, o.a.  $\beta$ -caroteen met absorptiespectra in het blauw-groene deel. Fotomorfogenese is het proces dat leidt tot de vorm, kleur en bloei van de plant. Dit is voor een deel genetisch vastgelegd maar wordt ook door licht gestuurd. De samenstelling van licht is van invloed op de morfologische ontwikkeling van de plant, en om dat te sturen hebben planten een aantal fotoreceptoren (anthocyanen) ontwikkeld.

## 4 Methode van onderzoek

### 4.1 Wijze van onderzoek

Indien er kunstmatig licht wordt gegeven aan een plant, is het van belang dat het (elektrisch opgewekte) licht zo goed mogelijk aansluit op de wensen van een plant. Het wil dus niet per definitie zo zijn dat wanneer het spectrum van de zon nagebootst wordt dat dit de meest efficiënte wijze van belichten is. Onderzoek zal dit aan moeten tonen, waarbij er grofweg twee methoden van onderzoek zijn:

1. men neemt het spectrum van de zon en bepaalt vervolgens welke minimale lichtbehoefte er is over het gehele spectrum (dus niet alleen het plantactie spectrum)
2. men begint met de twee meest efficiënte kleuren voor fotosynthese, te weten rood en blauw en bepaald middels onderzoek welke minimale golflengtes ontbreken om de plant goed te laten groeien

De eerste methode is tijdrovend en werd pas gedurende het LED onderzoek praktisch mogelijk gemaakt door de komst van een goed functionerende plasmalamp medio winter 2009. Een plasmalamp maakt het mogelijk om het spectrum van de zon nagenoeg geheel na te bootsen. Op het moment van de rapportage van de LED proef worden er eveneens onderzoeken uitgevoerd met een plasmalamp, echter hierbij worden economische aspecten buiten beschouwing gelaten. Zo kan de techniek om plasma licht te maken complex genoemd worden. De tweede methode is reeds ingezet vanaf de introductie van LED in 2008.

Het onderzoek in het Fieldlab in teeltseizoen 2008-2009 heeft zich gericht op het toepassen van rood en blauw licht. Ook de andere onderzoeken zoals bij Dingemans (paprika) en vd Kaaij hebben zich hierop gericht. De ervaring van het vorige onderzoek (zie ook § 2.5) toonde aan dat de plant weliswaar geteeld kan worden onder rood en blauw licht, maar dat er waarschijnlijk nog enkele aanvullingen nodig zijn in het spectrum. Hierbij was de indicatie dat de ontwikkelingssnelheid van de plant negatief beïnvloed wordt door het ontbreken van stralingswarmte.

Voorafgaande aan het onderzoek is door TNO/TTO uitgebreid overwogen of onderzoek plaats dient te vinden door het onderzoek te richten op specifieke plantfysiologische *deelprocessen* (onderzoek in bijvoorbeeld klimaatkamers) of juist door een *geïntegreerde* aanpak onder praktijkomstandigheden. Voor de laatste optie is gekozen waarbij het van belang was om alle factoren gelijk te houden en alleen op het gebied van de onderzoeksvragen te variëren. Hiertoe is er gekozen voor onderzoek in de vergelijkbare, separaat stuurbare kascompartimenten die ook in 2008-2009 gebruikt zijn.

### 4.2 Methode van onderzoek

Er wordt reeds succesvol belicht met Son-T licht waardoor een vergelijk met deze methode van belichten voor de hand liggend is. Zoals ook toegelicht in § 3.2.2 zijn er een aantal verschillen in het uitgezonden spectrum tussen LED (rood-blauw) en Son-T. Een voor de hand liggende manier om LED technologie te introduceren in de tuinbouw is door beide belichtingsystemen te combineren tot een *hybride* toepassing. Door bijvoorbeeld 33% of 50% van de belichtingsinstallatie uit te rusten met LED en de overige hoeveelheid met Son-T kunnen de 'tekortkomingen' van LED verminderd worden. Echter hier hebben TTO/TNO niet voor gekozen om de volgende reden:

De energie efficiency van LED is tot op heden nog elke 1-1½ jaar verdubbelt waardoor toepassing van deze lichtbron onderzocht moet worden. De PAR efficiency op installatieniveau van LED lag ten tijde van de start van de proef op circa 1,6 µmol/watt en die van Son-T op circa 1,55 µmol/watt. Ten tijde van de rapportage is de efficiency gestegen naar 1,8 µmol/watt (bron: Philips/Lemnis). Indien de efficiency van LED verder doorstijgt is op de *lange termijn* (3-5 jaar) de toepassing van Son-T niet meer aannemelijk. De verwachting is dat in 2013 de PAR-efficiency van LED met 2,3 µmol/watt zo'n 50% hoger ligt dan Son-T (bron : TNO). De problemen die de teelt onder LED ondervindt zullen dus geïsoleerd en opgelost moeten worden. Een hybride installatie mag dan weliswaar een logische en praktische stap zijn, maar vanuit *onderzoeksoogpunt* maskeert een dergelijke installatie de problemen met LED in de ogen van TTO.

TTO heeft er dus voor gekozen om de verschillen ten opzichte van Son-T te isoleren en verder te onderzoeken. De belangrijkste verschillen zijn :

- aandeel infrarode stralingswarmte
- lichtkleuren tussen 500-600 nm welke bij LED rood-blauw ontbreken tov het Son-T spectrum

Het voorgaande seizoen kwam naar voren dat het gemis van infrarode stralingswarmte resulteert in een relatief koude 'kop' (bovenste bladeren en groeipunt) van het gewas. In perioden met veel uitstraling lag de planttemperatuur van het bovenste gedeelte van het gewas circa 2 graden onder de ruimte temperatuur.

#### 4.2.1 Inzet stralingswarmte

De ontwikkelingsnelheid, aanmaak van bladeren en trossaanmaak, wordt beïnvloedt door de infrarode straling van een Son-T lamp. Het warm maken van de kop middels een buis is zeer omstreven bij kwekers, want buiswarmte is niet dezelfde warmte als stralingswarmte. TTO heeft er in dit tweede onderzoeksjaar voor gekozen om eerst helder te krijgen in hoeverre de stralingswarmte een rol speelt, dus wat is het effect op de productie? Hiertoe werd naast LED separaat infrarode straling ingebracht middels IR stralers. De hoeveelheid stralingswarmte mocht hierbij nimmer boven het aandeel stralingswarmte van de Son-T installatie uit komen.

De hoeveelheid stralingswarmte van een Son-T installatie van 145  $\mu\text{mol}$  met een opgenomen vermogen van 93,5 Watt (1,55  $\mu\text{mol}/\text{watt}$ ) is  $\rightarrow 50\% \times 93,5 = 47 \text{ Watt}$ . Deze hoeveelheid stralingswarmte bevindt zich in een breed gebied van nabij-infrarood tot ver infrarood (zie Figuur 3).

In het onderzoek werd als uitgangspunt genomen dat er nimmer meer dan 35% aan stralingswarmte toegediend zou mogen worden, wat **31,5 Watt** betekent aan infrarode straling. Dit uitgangspunt is gekozen uit oogpunt van energiebesparing; indien er teveel elektriciteit wordt toegevoegd is de toepassing economische gezien niet meer realisatisch. Voorts was de uitdaging door het regelen van de installatie het gebruik van IR tot een minimum te beperken. In het geval van het inzetten van een separate installatie om IR op te wekken is het namelijk mogelijk om licht en warmte volledig los te koppelen van elkaar.

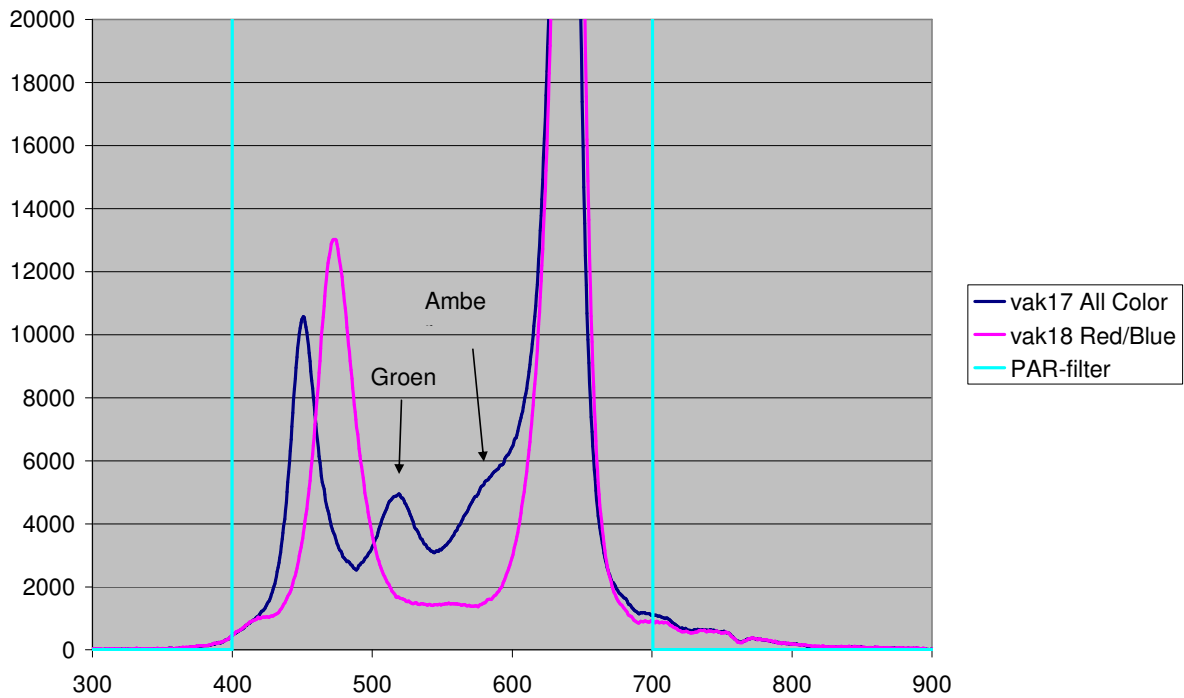
Infrarood of infrarode straling, voor het oog niet waarneembare elektromagnetische straling, met golflengten tussen circa 780 nanometer en 1 mm ( $10^6$  nm), dus tussen het (zichtbare) rode licht en de microgolven. Veelal wordt het golflengtegebied van 780 nm tot 10 micrometer aangeduid met nabij-infrarood, van 10 tot 30  $\mu\text{m}$  met middel-infrarood, van 30  $\mu\text{m}$  tot 300  $\mu\text{m}$  met ver-infrarood en van 300  $\mu\text{m}$  tot 1 mm met sub-millimetergebied. Infrarood betekent 'onder het rood', omdat de frequentie van infraroodstraling iets lager ligt dan die van het rood.

Figuur 3 : Toelichting infrarode straling

#### 4.2.2 Lichtkleuren tussen 500-600 nm

Wanneer Son-T belichting wordt vergeleken met LED belichting (rood+blauw) dan is te zien dat buiten het ontbreken van straling  $>780$  nm (infrarood) er ook geen straling wordt toegediend tussen de 500 en 600 nm. Om het effect van deze kleuren op de productie en gewasontwikkeling te bepalen is daarom gekozen om in het onderzoek deze kleuren in te brengen middels groene en amberkleurige LED's. Door technische beperkingen was het echter niet mogelijk om het niveau op eenzelfde niveau te krijgen als een Son-T lamp. In Figuur 4 is het verschil weergegeven tussen een afdeling met alleen rode en blauw LED's en een afdeling met rode, blauwe, amber en groene LED's.



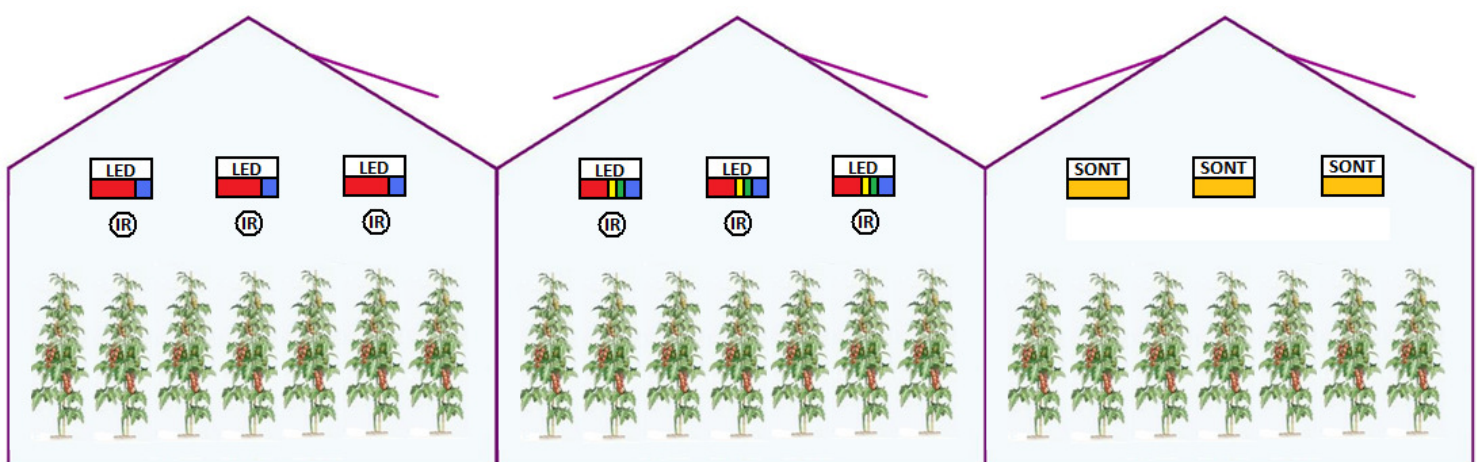


Figuur 4: LED-lampen spectra, groen/amber en rood + blauw enhanced

### 4.3 Opzet kasproef

Drie gelijke kas compartimenten op de Demokwekerij Westland van elk 108 m<sup>2</sup> waren ingericht voor de verschillende experimenten (figuur 5). De afdelingen waren compleet separaat stuurbaar en reeds voorzien van uitgebreide sensing. Doordat de afdeling reeds in 2008 is ingericht waren er weinig installatietechnische risico's.

Het ras Timotion werd gezaaid op 28 augustus 2009 en op 14 oktober 2009 in de proefvakken geplant. Op 24 oktober zijn de planten op de mat gezet. De planten waren 1 op 1 geënt en getopt en met Pepmv geïnoculeerd. In week 51 van 2009 kwam de productie op gang.



Figuur 5: schematische weergave van de kasproef

#### 4.3.1 Lichtbehandelingen afdelingen

##### **LED Afdeling rood blauw (vak 18)**

Afdeling met 100% LED belichting welke watergekoeld was. Naar aanleiding van de ervaringen van vorig jaar van zowel TTO als andere partijen is gekozen voor 7 umol blauw licht (7%). Door middel van een additionele infrarood installatie kon energie worden toegevoegd om de planttemperatuur te beïnvloeden.



##### **LED Afdeling rood blauw geel groen (vak 17)**

Afdeling met 100% LED belichting welke watergekoeld was. De bovenbelichting is idem als de andere LED afdeling met als verschil dat er extra kleuren in de armatuur zijn aangebracht om het volledige spectrum van HD natrium na te bootsen. De verhouding tussen de lichtkleuren is als volgt : 76 % rood, 7% blauw en 17 % groen-geel. Door middel van een additionele infrarood installatie kon energie worden toegevoegd om de planttemperatuur te beïnvloeden.



##### **SON-T afdeling (vak 19)**

Dit is het referentievak HD natrium waar onder 145 umol tomaten worden geteeld. De twee begeleidende telers telen eveneens onder dit lichtniveau, waarbij 1 teler hetzelfde ras heeft.



#### 4.4 Gewasregistraties

Gedurende de gehele proefperiode zijn er verscheidene registratie/metingen uitgevoerd op zowel plant, voeding, en substraatniveau. In tabel 6 zijn de belangrijkste metingen weergegeven. Deze metingen zijn uitgevoerd op 10 gemarkeerde planten geteeld op de middelste teeltgoot. De resultaten zijn wekelijks overlegd met betrokkenen. Op basis van de resultaten zijn er o.a. aanpassingen uitgevoerd in teeltstrategie.

Gewas	Meting	parameter	interval	Periode
1	Lengtegroei (incl cumulatief)	cm	Wekelijks	26-10-09 t/m 2-4-10
2	Lengte internodiën	cm	Wekelijks	26-10-09 t/m 2-4-10
3	Kopdikte	mm	Wekelijks	26-10-09 t/m 2-4-10
4	Bladlengte eerst volgroeid blad	cm	Wekelijks	26-10-09 t/m 2-4-10
5	Zetting	#	Wekelijks	26-10-09 t/m 2-4-10
6	Bloei	#	Wekelijks	26-10-09 t/m 2-4-10
7	Productie	kg/m <sup>2</sup>	Wekelijks	24-11-09 t/m 21-4-10
8	Vruchtgewicht	g	Wekelijks	24-11-09 t/m 21-4-10
9	Diameter vrucht	cm	Wekelijks	24-11-09 t/m 21-4-10
10	Houdbaarheid vrucht	g.	1 maal	26-03-10 t/m 27-04-10
11	Suiker analyse vrucht	g/ kg ds -	4 maal	Wk. 48, 3, 9 en 13
12	Drogestof vrucht	%	4 maal	Wk. 48, 3, 9 en 13
13	Drogestof blad	%	4 maal	Wk. 48, 3, 9 en 13
14	LAI (leaf area index)	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	2 maal	22-2-10 en 30-3-10
15	SLA (specifieke bladoppervlak)	cm <sup>2</sup> /g (versgewicht)	2 maal	22-2-10 en 30-3-10
Substraat	Meting	parameter	interval	periode
1	Drain	%	dagelijks	22-1 t/m 30-10
2	pH/ EC – drain	-	dagelijks	22-1 t/m 30-10
3	pH /EC – mat	-	dagelijks	22-1 t/m 30-10

Tabel 6 : Overzicht met uitgevoerde metingen / waarnemingen

## 5 Onderzoeksafdeling en belichtingsinstallatie

### 5.1 onderzoeksafdelingen

De proeven zijn uitgevoerd in de onderzoeksafdelingen van het Fieldlab in de Demokwekerij. In tabel 7 zijn de specificaties van de kasafdelingen weergegeven.

1	kastype	Venlo bouw bjr '87
2	tralie	8 m <sup>1</sup>
3	vakmaat	4,5 m <sup>1</sup>
4	oppervlakte	8 x 13,5 m = 108 m <sup>2</sup> (incl pad 1,5 m <sup>1</sup> )
5	poothoogte	4,5 m <sup>1</sup>
6	luchting	2 ruits voorzien van insektengaas
7	gootsysteem	5 goten (AG 200) in 8 m <sup>1</sup> ; hoogte 600 mm boven maaiveld
8	watergift	druppelsysteem 2 L druppelaars
9	substraat	steenwol 20 x 7 x 133 cm
10	scherm	LS 10

Tabel 7 : Specificaties onderzoeksafdeling

### 5.2 Belichtingsinstallatie

Alle kasafdelingen waren voorzien met een belichtingsinstallatie waarin een lichtniveau van 145  $\mu\text{mol}$  PAR werd aangehouden. Een PAR sensor meet het lichtbereik tussen de 400 en 700 nm. De delen van het lichtspectrum welke buiten deze golflengten liggen worden dus niet meegenomen. De LED afdelingen zijn uitgerust met armaturen welke in opdracht van Ladon in het jaar 2008 door TNO ontwikkeld zijn. De lampen zijn in het voorgaande onderzoek ook toegepast waarna ten behoeve van dit teeltseizoen de volgende veranderingen doorgevoerd zijn:

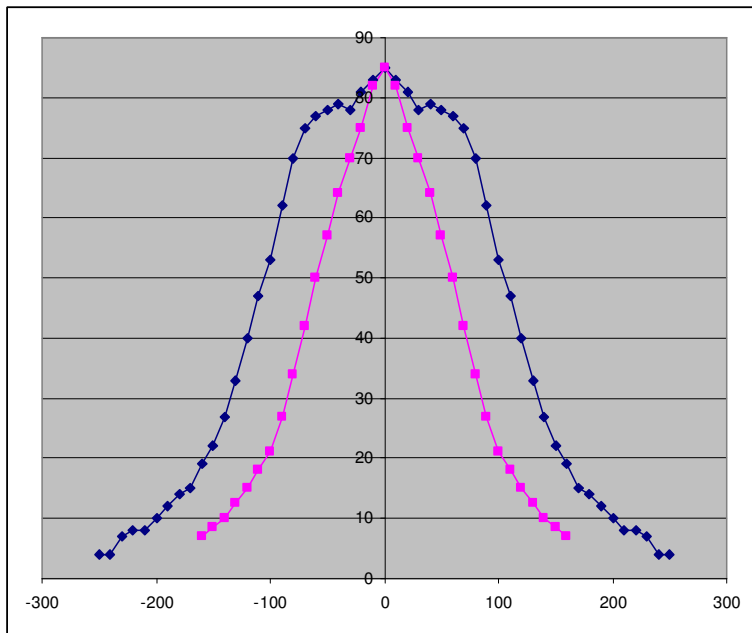
- Geen draadloze communicatie maar RS485 bedrade seriële communicatie
- Om het spectrum van Son-T na te kunnen bootsen zijn een aantal rode LED's vervangen door Groene/Amber LED's
- In het voorgaande jaar waren er problemen waren met de Power Factor en de nul-draad belasting hiertoe is een aanpassing doorgevoerd in het armatuur

De dimbare LED armaturen hebben een opgenomen vermogen maximaal 1300 Watt en zijn watergekoeld. De efficiency van de LED armaturen was Figuur 8 : LED lampen (Rood-Groen-Geel-Blauw) in deze tijd circa 1,0  $\mu\text{mol}$ /watt opgenomen vermogen. Ter vergelijking : ten tijde van de rapportage is de efficiency van LED armaturen gestegen naar 1,9  $\mu\text{mol}$ /watt. De afdeling met Son-T belichting is voorzien van 600 Watt HD natrium lampen. De efficiency van de lampen is circa 1,5  $\mu\text{mol}$  per watt. In figuur 8 is een impressie van de lampen in vak 17 te zien.



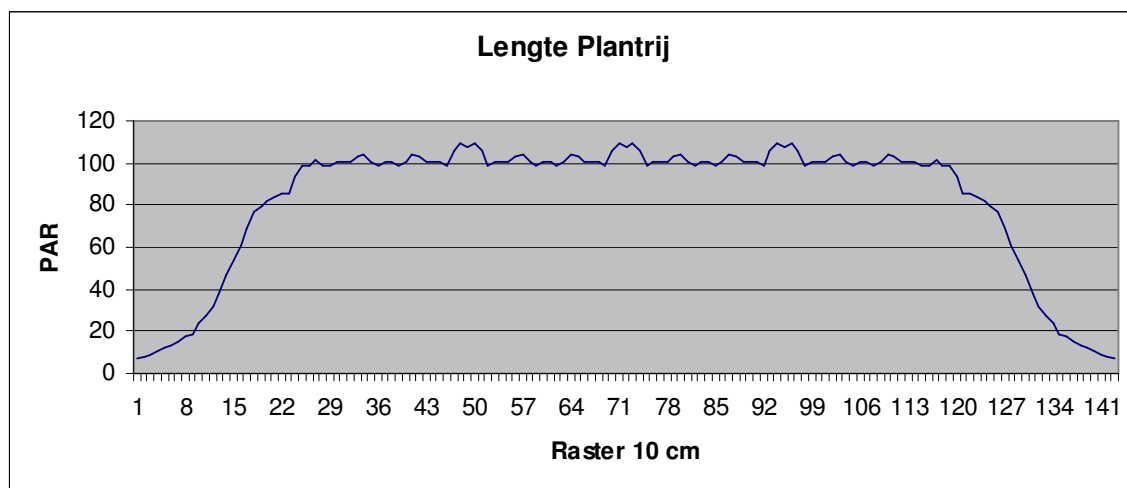
### 5.3 Lichtverdeling

Om te bepalen hoe de lampen het beste opgehangen konden worden zijn er vooraf aan het onderzoek lichtverdeling metingen gedaan. In figuur 9 is de lichtverdeling van een enkele LED lamp op 1.25 meter onder de lamp gemeten op een raster van 10 cm weergegeven. Omdat in de voorgaande proef de lichtverdeling niet voldoende homogeen was, is besloten om gebruik te maken van extra verstrooiingsfolie. De berekende lichtverdeling in het vak is weergegeven in figuur 10 en 11. Ten tijde van de proeven zijn er voorts met tussenposen metingen gedaan om het werkelijke lichtniveau te controleren.

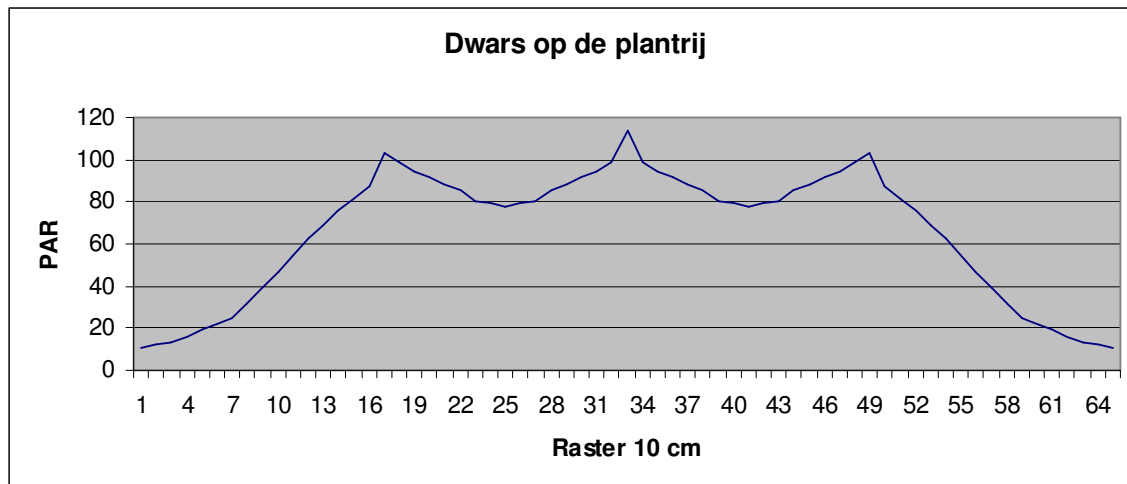


**lengte richting**  
**dwarsrichting**

Figuur 9: Lichtverdeling van enkele lamp met verstrooiing folie.  
x-as : afstand tot hart van de lamp  
y-as : lichtniveau



Figuur 10 : lichtverdeling in de lengte richting van de plantrij



Figuur 11 : lichtverdeling dwars op de planrij (de pieken corresponderen met de plantkoppen)

#### 5.4 Infrarode belichting

De afdelingen waren uitgerust met een installatie welke straling op kan wekken in het infrarode deel van het spectrum, te weten >780 nm. Bij het ontwerp van het infrarood belichtingssysteem is gekozen voor de Medium Wave Hereaus lampen (figuur 12). De lamp bestaat uit een glazen buis met een oppervlakte van circa 2,5 cm<sup>2</sup> met hierin een gloeidraad. Aan de binnenzijde van de glazen buis was reflecterend materiaal ‘opgedampt’ zodat de straling zich in een hoek van 120 graden zou verspreiden. Het maximaal opgenomen vermogen van de buis was 500 W per stuk. In de afdeling zijn 15 infrarood lampen opgehangen; boven elke gewasrij 1 lamp.

Doelstelling vooraf gaande aan het onderzoek was om circa 31,5 Watt/m<sup>2</sup> aan stralingswarmte in te brengen. De installatie mocht daarnaast nimmer meer infrarode staling afgeven dan een Son-T lamp. Het is bekend dat een Son-T lamp circa 50% van haar opgenomen vermogen omzet in stralingswarmte. In het geval van 145 μmol betekent dit 47 Watt. De infrarode installatie was hiertoe traploos regelbaar door de spanning (V) op de gloeidraad te variëren. De strategie van de infrarood is terug te lezen in § 9.3.2



Figuur 12 : Hereaus IR straler met opgedampte reflector

## 5.5 Meet/Regel systeem

Het *meetsysteem* is opgebouwd rondom een zelfgebouwd data-acquisitie systeem. Met dit systeem kunnen de volgende zaken gerealiseerd worden:

- In elk vak Temperatuur, luchtvochtigheid, CO<sub>2</sub> en PAR meten, bladtemperatuur.
- Het ingestraalde vermogen op de kas via een centrale Pyranometer te registreren.
- De centrale temperatuur van het koelsysteem te registreren.
- Het koelsysteem voor de LED-lampen voor de 2 vakken te meten en regelen.
- De stroom door de LED's per vak opgedeeld in 6 kanalen te sturen, meten en regelen.
- Het aan en uitschakelen van de SON-T lampen te sturen.
- De stroom door de infra-rood stralers te regelen en evt via een terugkoppeling van bijvoorbeeld de bladtemperatuur

Alle meet en regeldata worden opgeslagen in een centrale database. Hiervan wordt dagelijks een 5 minuten Excel file gegenereerd. Alle metingen kunnen geregistreerd worden en alle sturingen aangestuurd via een scripting taal, waardoor een flexibel systeem ontstaat. Een en ander is echter niet door een simpele gebruiker te realiseren.

De belangrijkste *regelingen* die in deze applicatie zijn gerealiseerd zijn:

- Aan en uitschakelen van verlichting als functie van de tijd.
- Aan en uitschakelen van verlichting en infrarood als functie van de instraling.
- Het toegediende infra-rood vermogen als functie van het verschil tussen de blad en de ruimtetemperatuur in 6 te onderscheiden tijdvakken. De responsnelheid van deze regeling kan ingesteld worden door:
  - Een minimum en maximum in te stellen
  - Het aantal metingen per tijdseenheid
  - De stapgrootte waarmee de het IR-vermogen geregeld wordt
  - De hysteresis band rondom het ingestelde regelpunt.

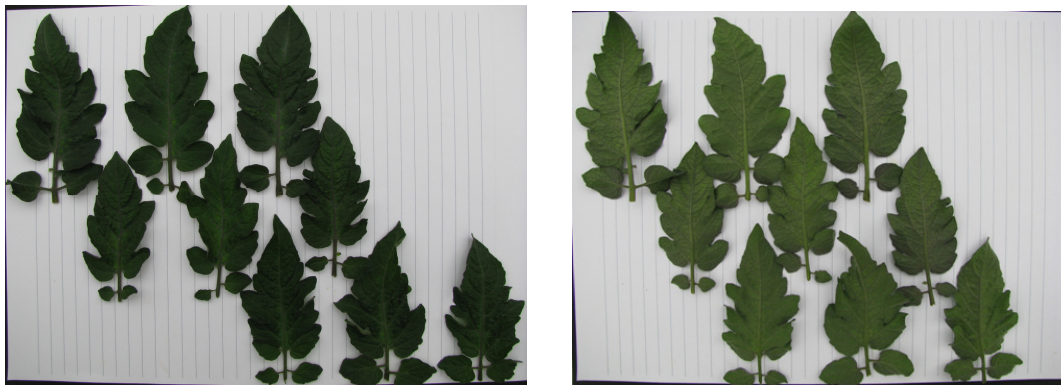
Verder is in de proef gebruik gemaakt van de volgende meetapparatuur :

- meetbox Priva (regulier)
- PAR meting , type Licor per afdeling
- Infrarood (hand)meter type Voltcraft IR 1200-50D
- Licor handmeter inclusief statief

## 6 Waarnemingen gewas

### 6.1 Visueel

In de afdeling 18, waar alleen rood (93%) en blauw (7%) licht werd aangeboden, stond het gewas er duidelijk anders op dan in afdeling 17 waar een kleine hoeveelheid van het ontbrekende PAR-spectrum (geel en groen) was toegevoegd. In de afdeling met de ontbrekende golflengtes tov SON-T oogden de bladschijven groter (Figuur 13), oogde de bovenste tros sterker en leek het gewas meer op dat van de SON-T afdeling. Voor de afdeling met LED rood blauw was na een periode met een hoge concentratie buitenlicht een groter effect zichtbaar op de stand van het gewas ten opzichte van SON-T en de LED afdeling rood blauw. Hierbij merkten telers op dat het leek alsof het gewas bij weinig buitenlicht gedrongen groeide (kortere bladeren, minder lengte groei, minder uitdikking van de stam en een overal donkerdere kleur van het gewas) en na een periode buitenlicht veel vegetatieve ontwikkeling (groei/opzwellen van bladeren, lichtere kleur) vertoonde. In de LED afdelingen werden verschillen opgemerkt dat er meer vegetatieve groei was onderin het gewas bij de LED afdeling met alle kleuren, zeer significant was dit echter niet.



Figuur 13: Bladschijven van het einde van de bladeren van gelijke ouderdom uit de drie afdelingen. De bovenste rij visualiseert de bovenkanten (linker foto) en onderkanten (rechter foto) van de bladschijven uit de afdeling met alle kleuren LED, de middelste rij doet dit voor de afdelingen met rood en blauwe LED en de onderste rij voor de SON-T afdeling.

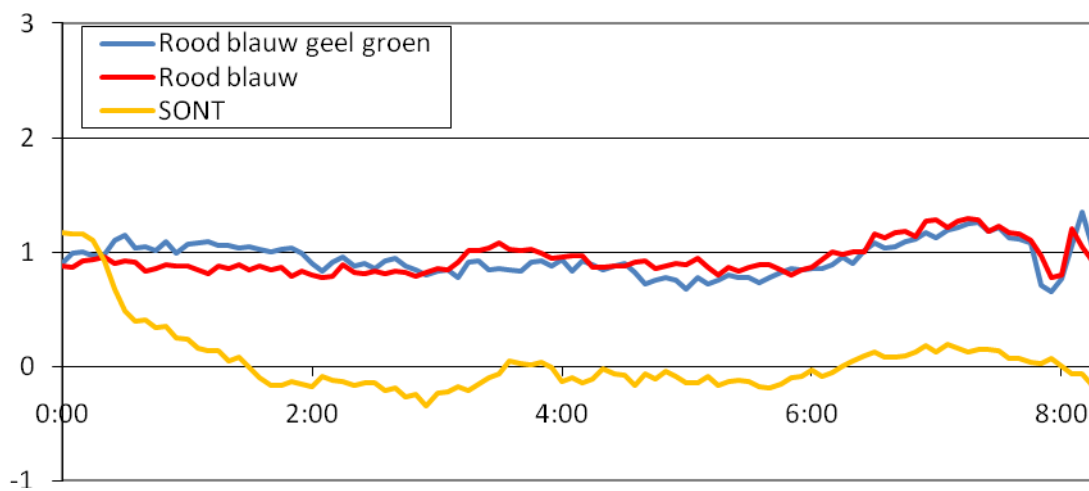
### 6.2 Groei en ontwikkeling

Er is bewust in beiden LED afdelingen gewacht met de inzet van infrarode straling tot gelijke effecten werden waargenomen als in de proef van 2008-2009. Deze effecten werden waargenomen in de vorm van een achterstand in groei en ontwikkeling, welke meest nadrukkelijk meetbaar was in een vertraging van de zettingssnelheid van nieuwe vruchten. Naast een vertraging van de zettingssnelheid was het gewas visueel donkerder en leken bladeren de neiging te hebben naar binnen te krullen. Visueel was het aan de stralers zelf niet te zien dat ze branden, maar het tomatengewas liet na het gebruik van de infrarood (27-11-2010) een gelijke ontwikkelingsnelheid zien in beide LED afdelingen als in de SON-T afdeling. Een en ander is weergegeven in §8.1.

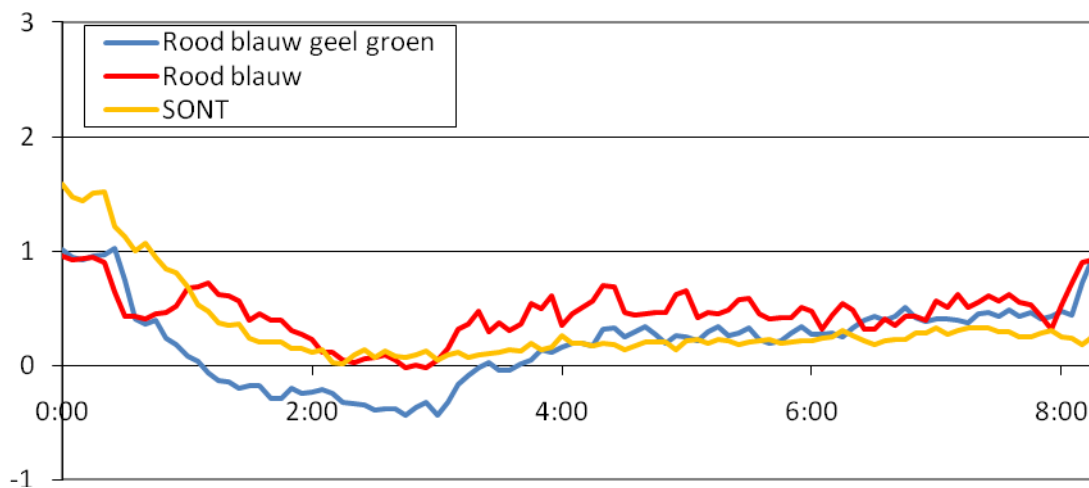


### 6.3 Planttemperatuur

Wanneer de SON-T belichting aan stond was de planttemperatuur in de SON-T afdeling vrijwel gelijk aan de ruimte temperatuur. In de LED afdelingen was de planttemperatuur, zonder infrarood inzet, beduidend lager (0,5 °C tot 2,5 °C) dan de ruimtetemperatuur. Figuur 14 laat het verschil in temperatuur van het gewas en de ruimte zien. In de donkere periode, gedurende belichting van 0:00 tot 8:00 is duidelijk zichtbaar dat het verschil in de LED afdelingen duidelijk groter is dan in de SON-T afdeling. In de donkerperiode, zonder belichting van 18:00 tot 0:00 is zichtbaar dat de verschillen in de LED afdelingen op gelijk niveau liggen met de SON-T afdeling. Nadat de warmtestralers 28-11-2009 waren ingeschakeld op 50 W/m<sup>2</sup> kasoppervlak gingen de gewassen in de LED-afdelingen meer lijken op het gewas in de SON-T afdeling en was de planttemperatuur dichterbij de ruimte temperatuur gedurende belichting (figuur 15). Te zien was dat de bladtemperatuur meer de ruimtetemperatuur volgde en telers merkten op dat het blad minder donker werd dan zonder warmtestraling.



Figuur 14: het verschil tussen de ruimtetemperatuur en de gewastemperatuur (ruimte T - gewas T) zonder inzet van infrarood straling (27-11-2010)



Figuur 15: het verschil tussen de ruimtetemperatuur en de gewastemperatuur met inzet van infrarood straling (30-11-2009)

#### 6.4 Klimaat

In de registratie van de klimaatparameters was zichtbaar dat in de SON-T afdeling de afkoeling naar de nacht toe sneller verliep dan in de LED afdelingen. Wellicht dat dit veroorzaakt werd door het verschil in warmte inbreng. Of dit een significant effect heeft gehad is niet duidelijk. Telers merken op dat dit wel degelijk de plant balans in termen van hogere generativiteit kan beïnvloeden. Enkele dagen werden verticale metingen uitgevoerd om temperatuur en vochtigheid op verschillende niveaus in het warehouse in kaart te brengen. Hierbij werden ook de temperaturen van vruchten en bladeren gemeten. De verschillen die hieruit naar voren kwamen waren niet significant en telers verwachtten hier geen effecten van.

##### 6.4.1 *Ervaring voorgaande teeltseizoenen 2008-2009*

In het voorgaande teeltseizoen waren er problemen om de warmte bij de kop van het gewas te krijgen. De opbrengst van het gewas onder LED belichting was ruim 15% minder dan onder Son-T. Opmerkelijk was dat er een groot verschil was in de stand van het gewas onder LED op lichte en donkere dagen. Na 2 donkere dagen was er een sterk chlorotisch blad te zien. Na een of meerdere dagen met zonnig weer trok dit snel weer bij.

Wat misten de telers voor hun gevoel:

- Warmte bovenin het gewas
- Sturing door de plant

Mogelijke oplossingen hiervoor zijn uitgevoerd in deze proef in de vorm van Infraroodstralers (IR) en het toepassen van de ontbrekende kleuren groen en geel licht.

##### 6.4.2 *Teeltverloop teeltseizoenen 2009-2010 volgens de telers*

Nadat de plant binnen gekomen was is een paar dagen 19<sup>o</sup>C etmaal aangehouden. Hierna zijn de planten op het gat gezet en werd etmaal 21,5<sup>o</sup>C aangehouden. Vanaf 28-10-2009 ging de belichting aan van 3.00 uur tot 17.00 uur met een etmaal van 23,5<sup>o</sup>C.

Dit vonden we fors maar we wilde zien hoelang de rood/blauwe LED kon volgen zonder IR. Vanaf 10-11 zijn we begonnen met belichten van 0.00 tot 17.00 uur. Etmaal 22<sup>o</sup>C. Op 15-11-2009 kregen we de indruk dat de Led rood/blauw kon de snelheid niet volgen en begonnen er verschillen te ontstaan in PT. Vanaf toen werd het etmaal 0,5<sup>o</sup>C verlaagd.

28-11-2009 is begonnen met IR in beiden afdelingen, met als regel planttemperatuur is kasttemperatuur. 1-12-2009: de stand van zaken na de eerste 6 weken. De kleurtjes liepen 1 tros achter en rood/blauw 0,5 tros t.o.v de Son-T.

In december zagen we dat de Son-T net zo staat als bij de telers. Licht bladrandje in de kop en een wat zwakkere bloeiende tros maar wel een grove mooie onderste tros.

Bij LED zagen we dat de tros sterker werd en de trossen goed vulden, echter zagen we ook een bladrandje in de rood/blauw behandeling en niet in kleurtjes behandeling. De bladeren in kleurtjes leken voller en groter en ook de kop en stam waren dikker. Wat bovenin te zien was aan kracht in de LED vertaalde zich niet in grofheid.

In Januari 2010 werd er veel geschermd in de middag en werd er geprobeerd een snelle afkoeling en diepe voornacht te halen van 14<sup>o</sup>C. Door de kou was dit niet moeilijk. Het gewas in de afdelingen met LED reageerde hierop door meer zetting en het gewas oogde vitaler. In de kleurtjes wordt de temp in de middag verhoogd om een bladrandje op te zoeken. Het leek dat hier meer vocht door de plant ging. Dit zou in de winter een positief effect kunnen zijn. De etmaaltemperatuur in de kleurtjes was 18,6<sup>o</sup>C en in de andere afdelingen 18,3<sup>o</sup>C

20-1-2010 zagen we dat er in 17 meer evenwicht in de plant kwam, en de zwelling in de buik het grootst werd. Rood blauw vertoonde de volste kop, een tros die zwakker was dan die van de kleurtjes en de vruchten waren zichtbaar grover. Son-T bleef voldoen.

Begin februari 2010 had de rood/blauwe LED de Son-T weer bijgehaald en bij de kleurtjes was de achterstand ook 0,4 kleiner geworden. Ook probeerden we de IR terug te schroeven, alleen de gehele

maand februari was het te koud en te donker om hiermee te gaan. Zodra de ramen open gingen bij LED ging de IR eruit.

In maart nam het licht toe en kon de etmaal temperatuur rustig omhoog. Uiteindelijk rond ½ maart werd dit zo'n 20,5°C. Dit kon ook omdat we nog steeds op beginstand stonden. De proef duurde tot eind april en om effecten goed te kunnen zien moesten we het niet moeilijk gaan maken door extra koppen aan te gaan houden.

**Samenvatting Teler:**

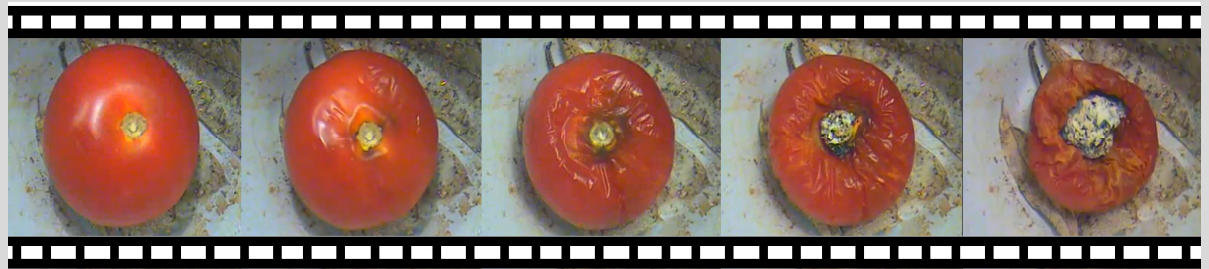
- Son-T heeft altijd gestaan zoals je het zou willen. Bovenin weleens dun met een bladrand onderin veel bladlijtage maar altijd voldoende grof.
- Rood/blauw Het buitenlicht vormt een belangrijke factor in de stand van het gewas. Alles gaat dus met meer golfbewegingen waarbij de plant bij dagen met minder licht zijn vruchten het eerst laat zitten wat een daling in vruchtgewicht geeft.
- Kleurtjes: wij hebben sterk het idee dat dit snel bladgroei geeft. Vruchtgewicht valt snel tegen terwijl de grootte er wel voor het oog lijkt te hangen. Wellicht is hier teelttechnisch een oplossing voor in de vorm van een grotere negatieve DIF eind van de dag

**6.5 Time lapse films**

**6.5.1 Inleiding**

Timelapse films werden op afzonderlijke dagen voor alle drie de vakken geproduceerd. In Figuur 16 is de techniek nader toegelicht. Één dag is een opname gemaakt zonder infrarood toediening in de LED afdeling rood blauw. De foto reeksen zijn gevormd met een interval van 10 minuten. Voor drie afzonderlijke dagen werden films geproduceerd voor de drie vakken. Door deze zogenaamde timelapse films zijn nieuwe inzichten verkregen. Aan de hand van geprekken met telers en de klimaat registratie zijn opmerkelijk zaken in de timelapse series verklaard, weerlegt of opmerkelijk genoemd.

**Timelapse-fotografie** is een techniek waarbij er bij het afspelen van film beelden de tijdseenheid verkleind is dan bij opname. Dit levert een versnelde film op, waardoor effecten zichtbaar gemaakt kunnen worden die normaal te traag zouden verlopen om zichtbaar te zijn. Door deze techniek kan bijvoorbeeld 24 uur in een minuut bekeken worden.



Figuur 16 : Toelichting Time lapse film

**6.5.2 Gewas groei en ontwikkeling**

Door middel van de timelapse films konden we de groei en ontwikkeling analyseren. Hieronder een omschrijving van opvallende zaken in de timelapse films met mogelijke verklaringen:

- De bloemen openen en sluiten gelijktijdig voor alle afdelingen (2:00-15:00)

Alle afdelingen starten gelijktijdig met belichten (00:00), twee uur na het aanschakelen van de belichting gaan de bloemen open, dit gold voor alle afdelingen. Deze waarneming kan wellicht betekenen dat het openen van de bloemen niet afhankelijk is van één van de golflengtes die in één of meerdere afdelingen ontbreken. Fotoperiodisme is de reactie van organismen naar de lengte van de dag. Een bekend voorbeeld

is het bloeien van bepaalde gewassen welke direct wordt beïnvloed door fotoperiodisme. Normaliter valt het einde van de belichtings periode ongeveer gelijk met het einde van het natuurlijk daglicht. Hiervoor zijn de bloemen reeds gesloten. Er is een denkwijze dat het gewas in de LED afdeling rood blauw op donkere dagen, waarbij de instraling van buiten laag is, mogelijk een signaal voor de nacht mist aan het einde van de belichtings periode. De denkwijze is dat de plant hierdoor constant last heeft van een jet-lag na donkere dagen. Het opengaan van de bloemen laat zien dat dit process niet gevoelig is voor de verschillen in spectra tussen de behandelingen. Dit sluit echter niet uit dat andere processen wel anders zouden kunnen verlopen door een verschil in spectra.

- Strecking van internodiën:

De stretching van internodiën lijkt voor de SON-T (afd 19) en de LED afdeling met alle kleuren (afd 17) gelijkmatiger over de dag verdeeld te zijn ten opzichte van de LED afdeling rood blauw (afd 18). Het gewas in de LED afdeling rood blauw lijkt gedurende de voornacht (eerste deel van de donker periode) 'niks' te doen en bij het begin van de belichtings periode erg veel. Wellicht dat dit een aanwijzing is dat in afdeling 18 (alleen rood en blauw licht) een signaal ontbreekt voor het ingaan van de donker periode. Wellicht dat de voorgenoemde circadian klok hierin een rol speelt.

- Blad beweging:

In afdeling 17 en 19 is de bladbeweging geïntendeerd in een op en neer beweging. In afdeling 18 is de beweging meer in het bovenste gedeelte van het gewas geconcentreerd. Met alleen assimilatie belichting is er in afdeling 18 een stuk minder beweging vergeleken met afdelingen 17 en 19. Ook valt op dat in afdeling 18 er voor korte tijd veel beweging aan het begin belichtingsperiode plaatsvindt en hierna minder. Hierbij gaan de bladeren meer omhoog geïntendeerd staan. Ten opzichte van afdeling 19 vindt in afdelingen 17 en 18 minder beweging op en neer plaats.

- Vocht tekens:

In afdeling 17 valt op dat in de nacht de bladschijven omhoog krullen. Dit kan een indicatie kan zijn voor een water tekort op dit moment.

- Geen IR:

Zeer opvallend is dat de beweging van de bladeren zonder infrarood zeer beperkt is. Dit kan een indicatie zijn dat de plant moeite heeft om op 'spanning' (turgor) te komen. Vorig jaar werd bij het ontbreken van warmte in LED behandelingen een vertraging van de groei en ontwikkeling waargenomen, wellicht dat dit direct gelinkt is aan de mindere beweging die wordt waargenomen als er geen infrarood wordt toegedient in de LED-behandelingen.

### 6.5.3 Discussie

Vele zaken die opvallen in de time-lapse films in de LED behandelingen zijn anders dan we gewend zijn in traditionele teelten. Specialisten werden geraadpleegt wat bepaalde zaken zouden kunnen betekenen. Echter is deze techniek dusdanig revolutionair dat naar veel zaken gegist wordt.

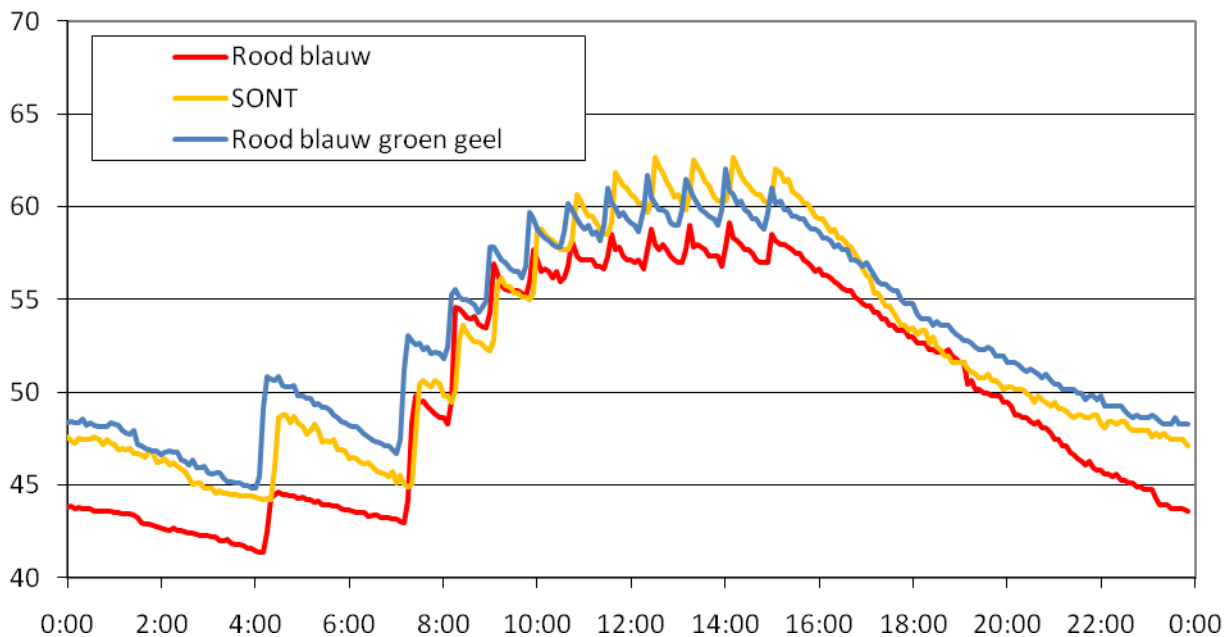
#### Samenvatting gewaswaarnemingen

- De Led afdeling met alle kleuren leek een vegetatievere inslag te hebben in vergelijking met de LED rood-blauw en SONT.
- Zonder IR was naast een vertraging van de zettingssnelheid het gewas visueel donkerder en leken bladeren de neiging te hebben naar binnen te krullen.
- In de LED afdelingen was de planttemperatuur, zonder infrarood inzet, beduidend lager (0,5 °C tot 2,5 °C) dan de ruimtetemperatuur. Nadat de warmtestralers waren ingeschakeld gingen de gewassen in de LED-afdelingen meer lijken op het gewas in de SON-T afdeling en was de planttemperatuur dichterbij de ruimte temperatuur gedurende belichting.
- Duidelijk uit de time lapse films is dat het bewegen van planten anders verloopt. In een behandeling waar rood licht overheerst komen de resultaten, het omhoog staan van bladeren in combinatie met beweging en de ontbrekende stretching in de voornacht, overeen met eerder verrichte onderzoeken.
- Het minder bewegen van het gewas wanneer infrarood wordt weggenomen is wellicht direct gelinkt aan de vertraagde groei en ontwikkeling zoals die vorig jaar werd waargenomen. Wellicht is de hoeveelheid beweging gekoppeld aan de activiteit van groei en ontwikkeling.

## 6.6 Verdamping

### 6.6.1 *Inleiding*

Het tomatengewas in vak 17 met LED alle kleuren vertoonde een ander wateropname patroon. Twee maal werd met twee verschillende methoden voor een periode van vijf weken het watergehalte van het substraat geregistreerd. Een meetmethode was gebaseerd op watergehalte meters (WG) en de andere meetmethode op registratie van drain. In Figuur 17 is de watergehalte meter weergegeven. Het patroon dat opviel is dat het watergehalte gedurende de donker periode in de LED afdeling rood blauw rechtlijnig bleef zakken terwijl de afname in het watergehalte in het substraat in de SON-T afdeling en de LED afdeling rood blauw geel groen een regulier patroon volgde.

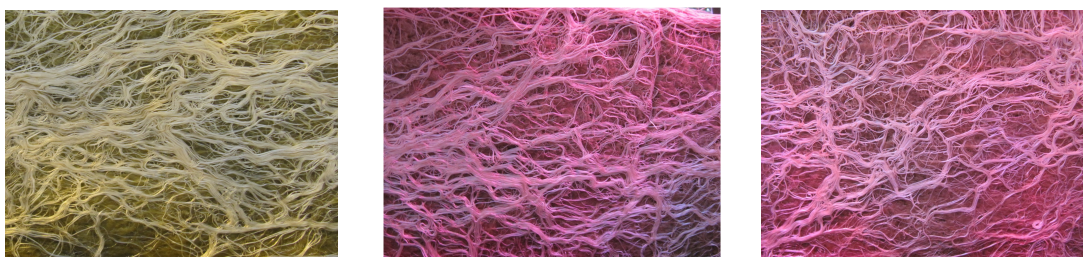


Figuur 17: Watergehalte meting in de verschillende afdelingen (24-12-2009)

Opmerkelijk was dat na een zonnige dag (met meer natuurlijk licht) het watergehalte in de substraten nagenoeg gelijke progressies vertoonden. Voor wat betreft de verdamping kunnen de verschillen dus niet verklaard worden door verschil in morfologie.

### 6.6.2 *Wortels visueel*

Visuele observatie van de wortel van de gewassen in de drie afdelingen toonde dat er gemiddeld meer wortel massa aanwezig was in het gewas in de SON-T afdeling, gevolgd door de LED afdeling met rood blauw licht (figuur 18).



Figuur 18: foto's van de wortels in de verschillende afdelingen (van links naar rechts; SON-T LED, LED rood blauw, rood blauw geel groen)

### 6.6.3 Discussie verdamping

Duidelijke oorzaken en gevolgen aanduiden met betrekking tot de verschillen in spectra in de proef is lastig. Het onderzoeksteam heeft meerdere aanwijzingen gevonden die wijzen op een veranderde waterhuishouding van het gewas. Voor een optimaal functionerende plant is het wenselijk dat de groei en verdamping in balans zijn met de aanvoer van water door de wortels en er dus geen tekort of ophoping optreedt. Wanneer de aanvoer van water onvoldoende is om de verdamping in stand te houden (waterstress) neemt de celspanning (turgor) af. Een consequentie van verlies aan turgor is minder celstrekking, d.w.z. minder versgroei, kleinere vruchten, kleinere bladeren. Men denkt dat door het reguleren van de huidmondjesopening de plant probeert de fotosynthese te maximaliseren t.o.v. het waterverlies. Wellicht dat de indicaties, hiervoor gepresenteerd, duiden op een verstoring van het stomata regulerings mechanisme.

Vanuit het spectra onderzoek zijn als belangrijkste onbekenden naar voren gekomen:

- ? Men weet niet of verschillende processen ook verschillende functies hebben in de dag/nacht cycli en in hoeverre deze worden gereguleerd door spectra.
- ? De werking van zelfgegulerende processen (zoals huidmondjes opening en morfologische adaptaties zoals huidmondjes aantal en omvang) en de grote van het effect van spectra hierop kan nog niet verklaard worden.
- ? Hoe verloopt de celstrekking en kan deze beïnvloed worden door veranderde spectra?
- ? We hebben het gewas anders zien reageren wanneer er meer buitenlicht aanwezig is geweest, telers zeggen dat het gewas verbeterd. Komt dit doordat er meer blauw licht beschikbaar is dat de opgeslagen suikers geëxporteerd worden? Is een positief effect te verwachten wanneer we andere spectra aanbieden op donkere dagen?
- ? Is de lichtverzaadiging gelijk wanneer we het spectrum veranderen? Wanneer we veel licht binnen een specifieke golflengte aanbieden wordt het specifieke enzymapparaat voor deze golflengte wellicht overbelast.
- ? Blijft de daglengte waarneming gelijk wanneer we ons belichtingsspectrum over de dag gelijk houden? Is een verandering van ons spectrum gedurende 24-uur een mogelijke positieve aanpassing (bv het spectrum van de zon nabootsen aan het einde van de licht periode om de biologische klok van het gewas minder te verstoren)?
- ? Welk effect op productie / assimilaten distributie is te verwachten wanneer huidmondjes zich anders gedragen dan 'normaal'?
- ? Wanneer bladeren zich specialiseren voor een bepaald spectrum is een aanpassing later nog (compleet) mogelijk? Hoeveel energie gaat hierdoor verloren? Zijn constante aanpassingen aan veranderende spectra aannemelijk en in hoeverre kosten deze aanpassingen productie?

## 7 Productie

### 7.1 Inleiding

Het ras Timotion werd geplant op 14 oktober 2009 waarna binnen een week was de eerste tros van de plant in bloei was. In week 51 van 2009 kwam de productie op gang welke is afgebroken is in week 16.

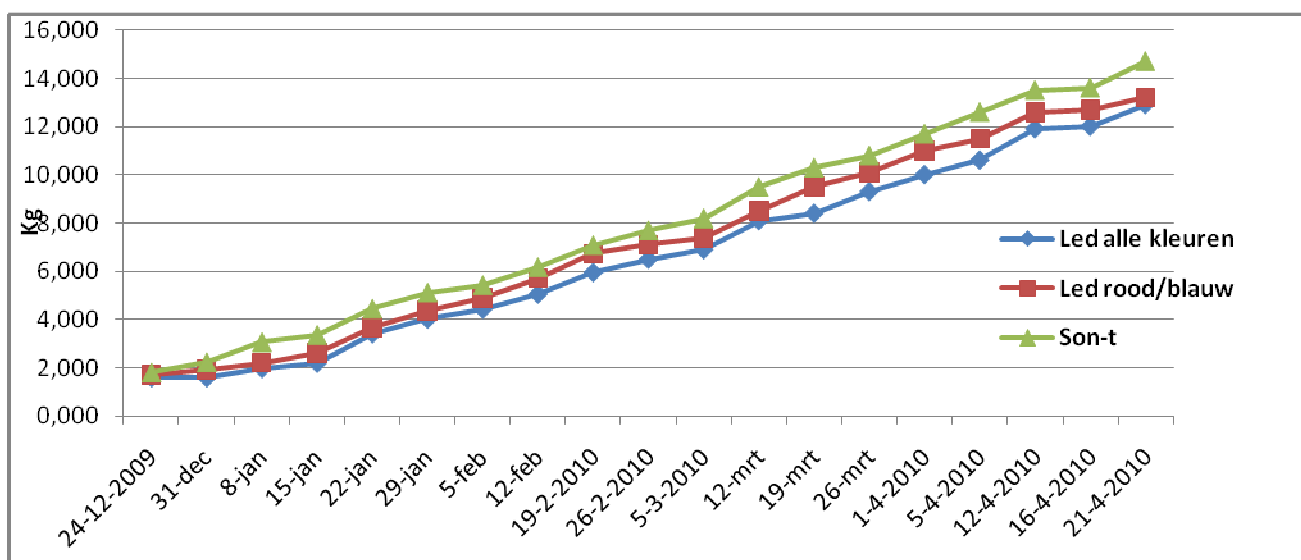
### 7.2 Productie resultaat

In de periode van week 48 (2009) tot week 16 (2010) is de totale productie per m<sup>2</sup> gemeten in de drie betreffende onderzoeksafdelingen, wat is weergegeven in tabel 19 en figuur 20. Vooral in de eerste oogstweken (t/m tros 3) is er een duidelijke stijging in de productie van de Son-T afdeling t.o.v. de productie van beide LED afdelingen.

Aan het einde van de gehele proefperiode lag het productiecijfer in de Son-T- afdeling 11,4% hoger t.o.v. de productie in de LED afdeling met de kleuren rood en blauw. In vergelijking met de LED afdeling met alle kleuren lag de productie in de Son-T afdeling 12,2% hoger.

Meting	Parameter	Alle kleuren LED	Rood/blauw LED	Son-T
Totaal productie (tot 21-4-01)	(kg/m <sup>2</sup> )	12,9	13,2	14,7
Productie t.o.v. Son-T	%	87,8	89,9	-
Gemiddeld vruchtgewicht	g	36,9	37,3	39,6
Gemiddelde vruchtdichtheid	g/diameter (cm)	17,7	18,4	18,6

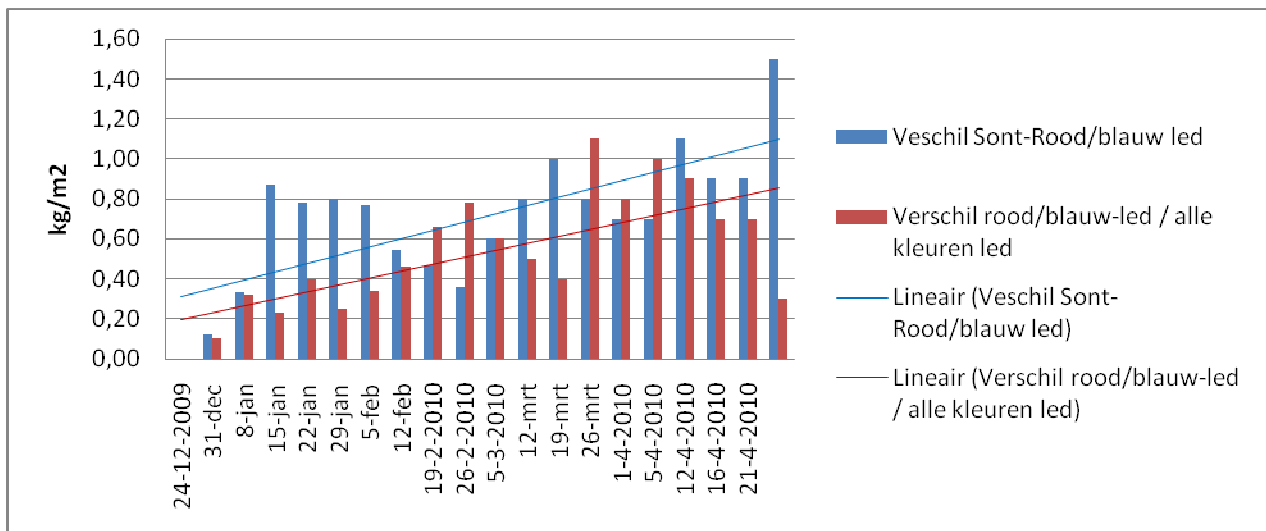
Tabel 19 : Gemiddelde productiecijfers



Figuur 20 : Cumulatieve productie (kg/m<sup>2</sup>) tot 21-04-2010

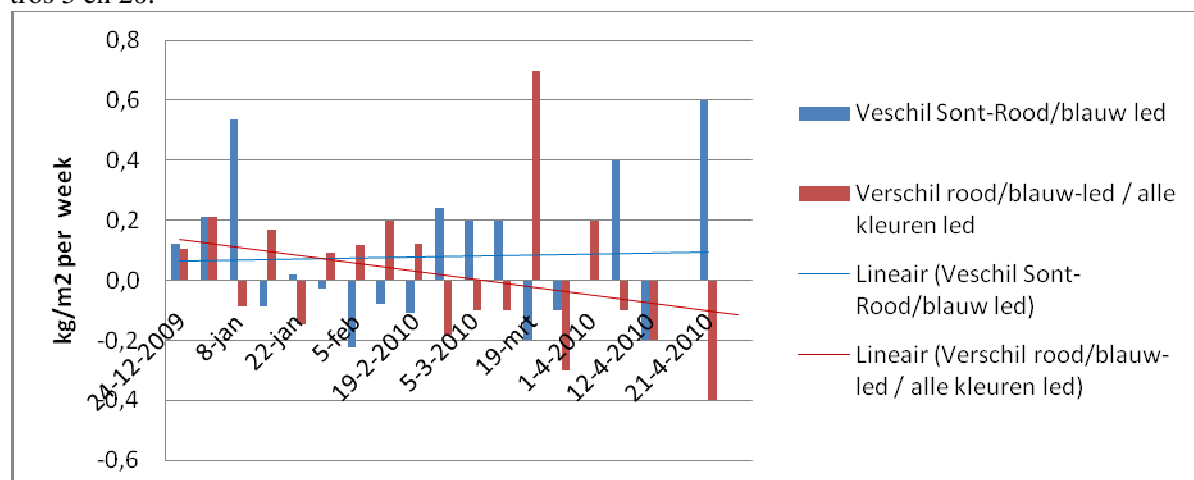
7.2.1 discussie productie

In figuur 20 is te zien dat gedurende de gehele oogstperiode het productiecijfer van de Son-T afdeling boven het productiecijfer van de LED afdelingen lag. Het verschil in cumulatieve productie wordt voornamelijk gemaakt in de periode tot 15 januari. Daarna neemt het niet veel toe gedurende de oogstperiode, zoals te zien is in figuur 21. Tussen 15 januari en 16 april blijft het cumulatieve verschil vrijwel gelijk. Het verschil blijft op een gemiddelde van ongeveer 0,70 kg per m<sup>2</sup>. Aan het einde van de periode is er wel weer een lichte stijging waarneembaar, waarbij het verschil tussen de Son-T afdeling en de rood/blauwe LED afdeling oploopt tot 1,5 kg/m<sup>2</sup>. Het verschil in productie tussen de beide LED afdelingen is laag, met een maximum verschil van 1,10kg/m<sup>2</sup> op 26-3. Dit verschil wordt aan het eind van de periode beduidend kleiner.



Figuur 21 : Verschil in Cumulatieve productie

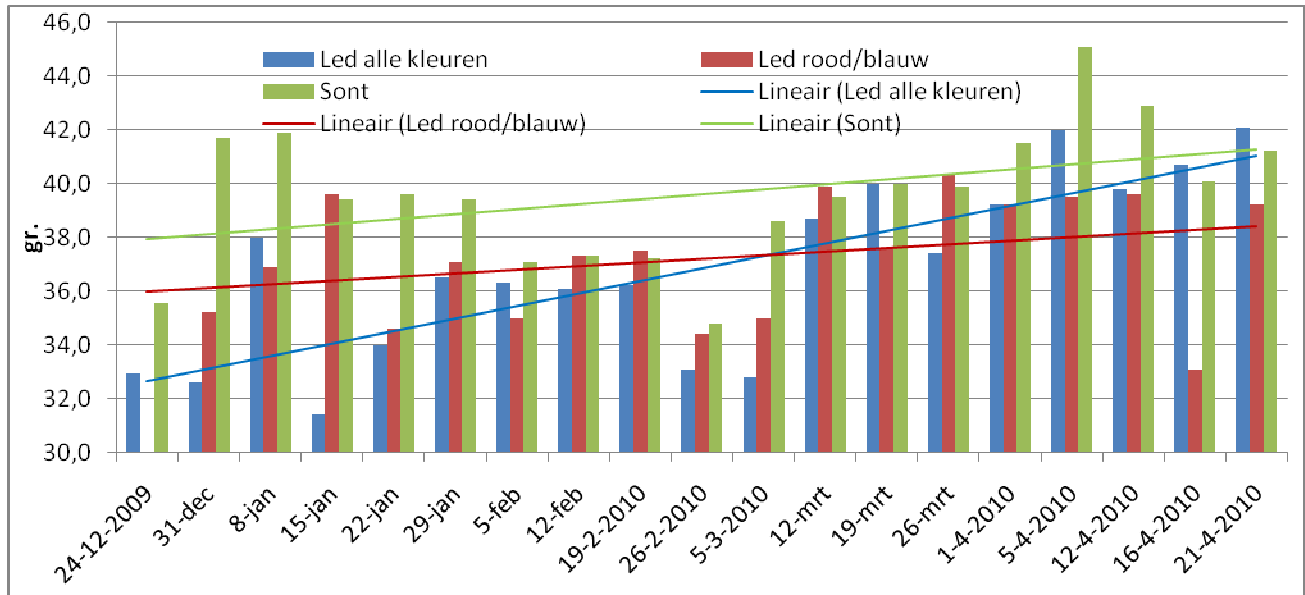
Het verschil in de wekelijkse productie tussen de betreffende afdelingen is over de gehele periode gering, zoals te zien is in figuur 22. Het verschil in eindproductie is vooral veroorzaakt door de relatief hoge wekelijkse productie in de Son-T afdeling op 8-01-10 ( 0,5g/m2) en op 21-4-10 (0,6 g/m2); respectievelijk tros 3 en 20.



Figuur 22 : Verschil in wekelijkse productie



In figuur 23 is het gemiddelde vruchtgewicht weergegeven van de drie behandelingen. Vooral in de eerste oogstweken (tot tros 6) is het verschil in gemiddeld vruchtgewicht tussen de drie afdelingen hoog. Daarbij dient te worden vermeld dat het gemiddeld vruchtgewicht over de gehele proefperiode sterk fluctueert. Vooral in de periode van januari tot maart is het vruchtgewicht in alle drie de afdelingen laag. Uiteindelijk kan geconcludeerd worden dat de gemiddelde hogere weekproductie werd veroorzaakt door het hogere vruchtgewicht bij de planten geteeld onder Son-T belichting.



Figuur 23 : Gemiddeld vruchtgewicht (g.)

#### Samenvatting Productie

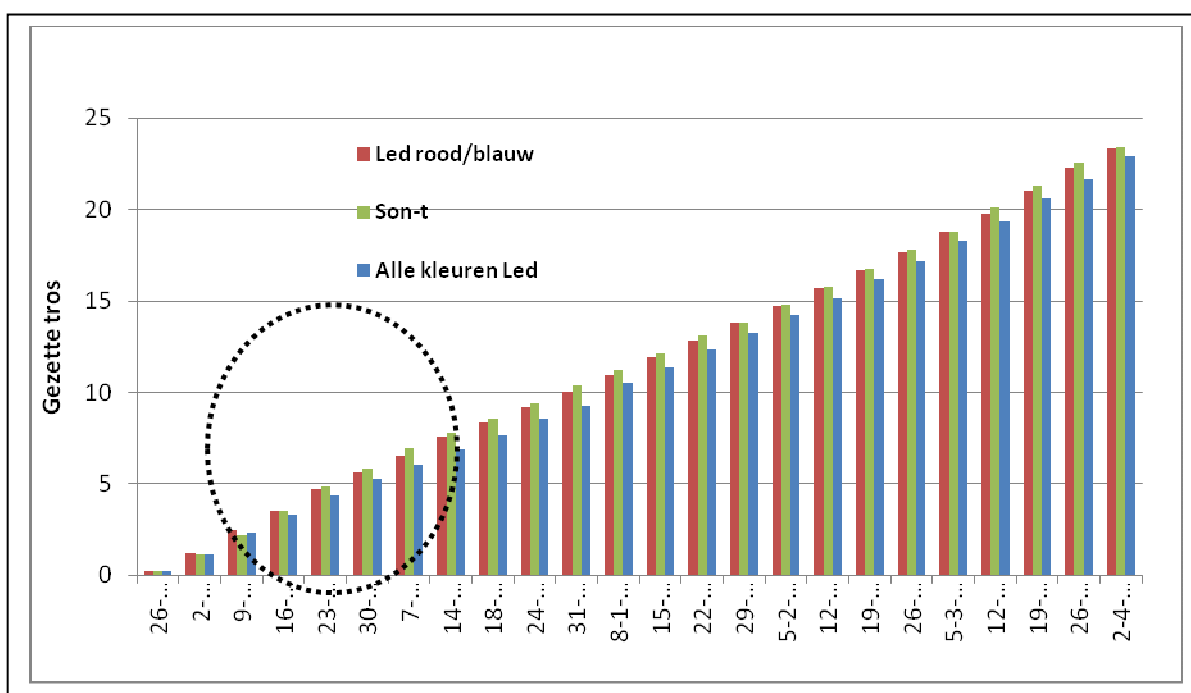
- De eerste oogstweken (t/m tros 3) was een duidelijke stijging in de productie van de Son-T afdeling t.o.v. de productie van beide LED afdelingen waarneembaar.
- Aan het einde van de gehele proefperiode lag het productiecijfer in de Son-T- afdeling 11,4% en 12,2 % hoger dan de productie in de LED afdeling met de kleuren rood en blauw en de LED afdeling met alle kleuren respectievelijk.
- De gemiddeld hogere weekproductie in de eerste drie weken is o.a. veroorzaakt door de het hogere gemiddelde vruchtgewicht bij de planten geteeld onder Son-T belichting.
- Gedurende de gehele oogstperiode was het dichtheidscijfer van de vruchten uit de Son-T afdeling hoger dan voor de vruchten uit de LED-afdelingen. Drogestof analyses vertoonden niet dat het drogestofgehalte in de Son-T vruchten hoger was dan bij de LED vruchten.

## 8 Gewasmetingen

### 8.1 Zetting

Wekelijks is de zowel de zetting als de bloeisnelheid van de gewassen beoordeeld, welke in figuur 24 is weergegeven. Tot week 47 (2009) is de zetting in de LED rood/blauwe afdeling hoger in vergelijking met de Son-T afdeling. Echter na week 48 is er een duidelijke toe name van zetting waarneembaar in de Son-T afdeling. Waarschijnlijk wordt dit verschil in zetting veroorzaakt door een op dat moment gebrek aan warmtestraling in de kop. Op 28 november is daarom besloten op basis van o.a. deze zettingcijfers te starten met de inzet van infrarood (IR) in beide LED afdelingen. Het verschil in wekelijkse zetting is na deze aanpassing niet verder toegenomen gedurende de proefperiode.

Aan het einde van de periode (2-4-10) waren in de Son-T afdeling totaal 23,4 trossen gezet. Dit t.o.v. 23,3 trossen in de LED afdeling rood/blauw en 22,9 in de LED afdeling met alle kleuren. Het verschil in bloeisnelheid tussen de betreffende afdelingen was in de zelfde verhouding als het verschil in zetting. In het voorgaande teeltseizoen bleef de zetting van de LED 12% achter. Dit werd waarschijnlijk veroorzaakt door een 'koude kop'.



Figuur 24 : Cumulatieve zetting tros

### 8.2 Diameter stengel

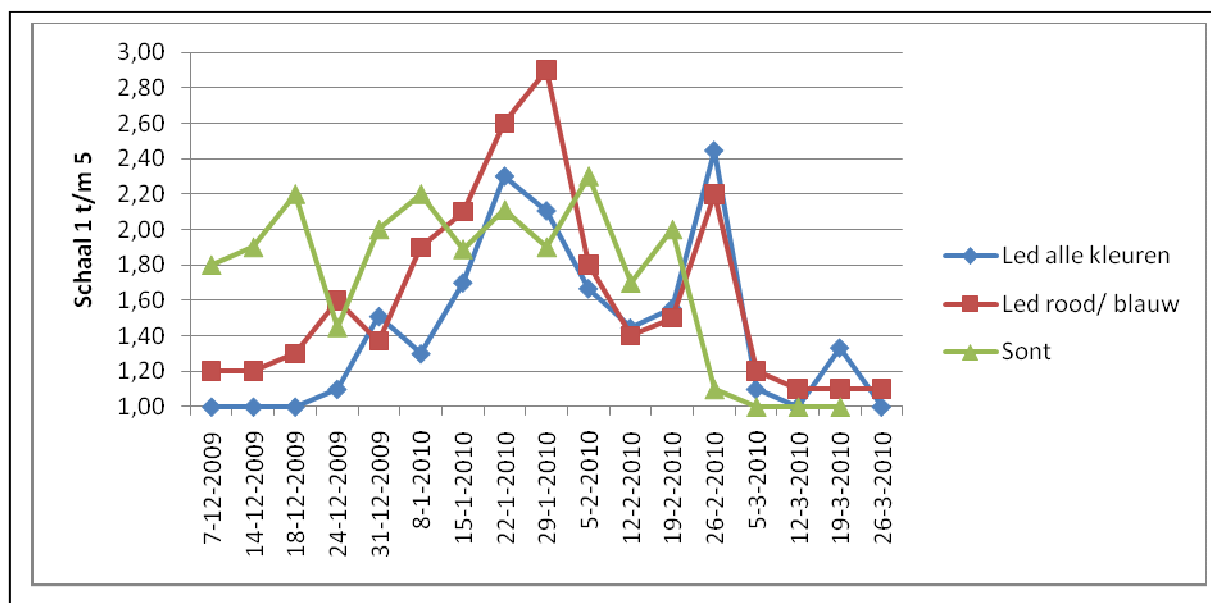
De diameter van de stengel, gemeten vlak boven het eerste volwassen blad in de kop, is gedurende de gehele proefperiode relatief stabiel. De resultaten zijn weergegeven in tabel 25. Tussen de betreffende afdelingen zijn geen significante verschillen waargenomen in stengeldiameter.

Gemiddelde	Alle kleuren LED	Rood/blauw LED	Son-T
Diameter stengel (cm)	10,9	10,8	10,9
Bladrandjes (1 t/m 5)	1,4	1,6	1,7
Bladlengte (cm)	36,6	36,6	34,9
Totale lengte – stengel (cm)	501	497	531

Tabel 25 : Overige gewaswaarnemingen

### 8.3 Bladrandjes

In figuur 26 zijn de bladrandjes weergegeven. Vanaf eind november neemt het percentage bladeren met necroseverschijnselen aan de bladranden in de Son-T afdeling toe. In de LED afdelingen is het aantal bladeren met necroseranden in de kop beduidend lager. Echter in de januari periode is er een significante toename van het aantal bladrandjes in de LED afdeling met de kleuren rood/blauw.



Figuur 26 : Bladrandjes in de kopbladeren

\*Schaal 1 t/m 5 – geen bladranden tot 100 % bladranden in de kop

#### 8.3.1 *discussie*

Het ontstaan van ‘bladrandjes’ wordt waarschijnlijk veroorzaakt door een te snelle verandering in relatieve luchtvochtigheid rond de bladranden, veroorzaakt door het aan en uitschakelen van de assimilatie belichting. In de praktijk wordt het ontstaan van bladrandjes bij planten geteeld onder assimilatie belichting geaccepteerd.

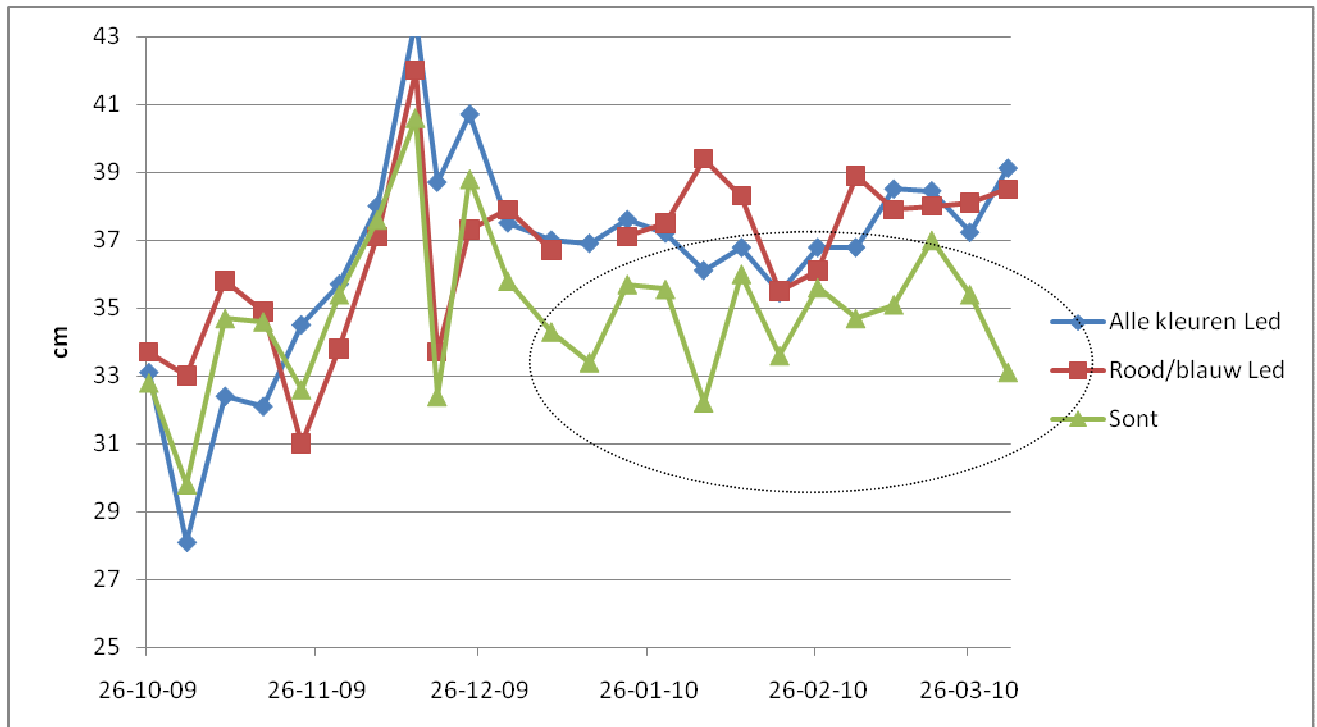
Op basis van der resultaten van deze proef kan niet worden aangenomen dat het verschijnsel bladrandjes een negatief effect heeft op groei en ontwikkeling van het gewas. In de praktijk worden echter wel secundaire problemen waargenomen met een toenemende Botrytis-aantasting als gevolg van verzwakt bladweefsel. In deze proef is echter geen blad-Botrytis waargenomen.

### 8.4 Blad- en stengellengte

Wekelijks is de maximale lengte van het 1<sup>ste</sup> volgroeide samengestelde blad in de kop gemeten, welke in figuur 27 is weergegeven. De gemiddelde lengte van het blad in de LED afdelingen was vanaf eind december hoger in vergelijking met het blad van de Son-T afdeling. Het verschil in bladlengte was gemiddeld 3 cm tussen deze afdelingen. Het kortere blad heeft geen effect gehad op de groei en ontwikkeling van het gewas. Vermeld dient heerbij te worden dat de gemeten LAI-waarde (leaf area index) in de Son-T afdeling niet significant lager was in dan de waarde in de LED afdelingen.

De gemiddelde stengellengte van planten geteeld onder Son-T was aan het einde van de proefperiode groter dan de stengellengte van de planten geteeld onder LED. Dit lengteverschil is voornamelijk veroorzaakt na week 9 (2010). Waarbij uiteindelijk de gemiddelde stengellengte van de Son-T afdeling met 30 cm hoger lag i.v.m. de LED afdelingen. Voor de periode van week 9 waren de verschillen in stengellengte tussen de afdelingen nihil.

De gemiddelde strekking van de internodiën in de kop van de plant was bij de Son-T afdeling echter niet hoger.



Figuur 27 : Gemiddelde bladlengte 1<sup>ste</sup> volgroeide samengesteld blad (cm)

### 8.5 Metingen LAI

De gemiddelde LAI (leaf area index) is per afdeling totaal tweemaal berekend op twee meetdata, welke is weergegeven in figuur 28. De LAI wordt beïnvloed door het gemiddeld aantal bladeren per plant en het gemiddelde bladoppervlak. In de praktijk wordt een LAI aangehouden van tussen de 3 en 3,5. Deze waarde kan echter verschillen per maand waarbij er in het algemeen een hogere LAI wordt aangehouden in de maanden mei/ juni in vergelijking met de maanden augustus/september.

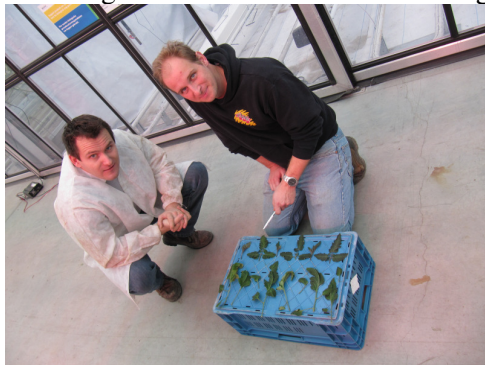
<b>22-2-2010</b>			
	<b>LED alle kleuren</b>	<b>LED rood/blauw</b>	<b>Son-T</b>
LAI (blad opp m2/m2)	2,25	2,17	2,20
SLA (cm2/g (versgewicht))	14,84	13,89	15,33
Drogestof % blad	9,95	9,53	9,75
Aant. blad per plant	23,50	24,00	24,00
<b>30-3-2010</b>			
LAI (blad opp m2/m2)	2,52	2,69	2,44
SLA (cm2/g (versgewicht))	18,46	17,56	18,21
Drogestof gehalte blad (%)	10,14	10,47	9,97
Aant. blad per plant	21	22	21
Dichtheid stengel (gewicht/lengte) –g/cm	1,64	1,79	1,82
Drogestof gehalte stengel (%)	10,18	10,17	10,66

Tabel 28 : LAI-metingen

### 8.5.1 discussie

Er zijn geen significante verschillen waargenomen tussen LAI-waarden bij de drie betreffende afdelingen. Op basis van visuele waarnemingen en de wekelijkse metingen op bladlengte werd verwacht dat de LAI in de Son-T afdeling lager lag in vergelijking met de LED afdelingen. Echter op basis van de uitgevoerde LAI metingen kan dit niet worden geconcludeerd.

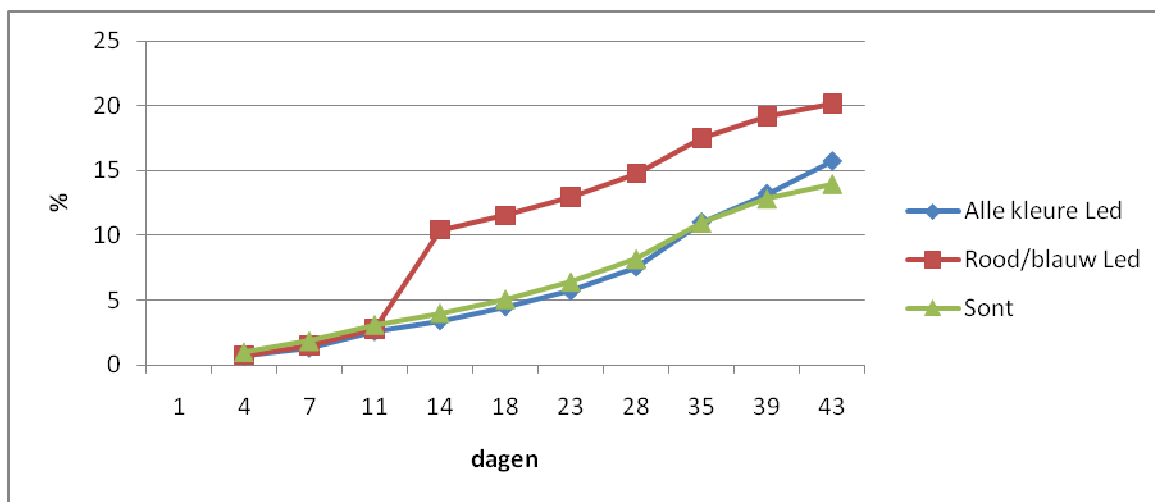
Op basis van de andere uitgevoerde metingen (vermeld in tabel) kunnen geen significante conclusies worden getrokken betreft verschillen in groei en ontwikkeling tussen de betreffende afdelingen.



Figuur 29 : LAI meting

### 8.6 Houdbaarheidsproef

In de periode van 16-03-10 tot 27-04-10 is er een houdbaarheidstest uitgevoerd op geogoste vruchten. 60 vruchten per afdeling zijn voor een vaste periode in het donker bewaard bij kamertemperatuur. (21 °C) en zijn elke 4 dagen gewogen.



Figuur 30 : Procentuele gewichtsafname vrucht (%)

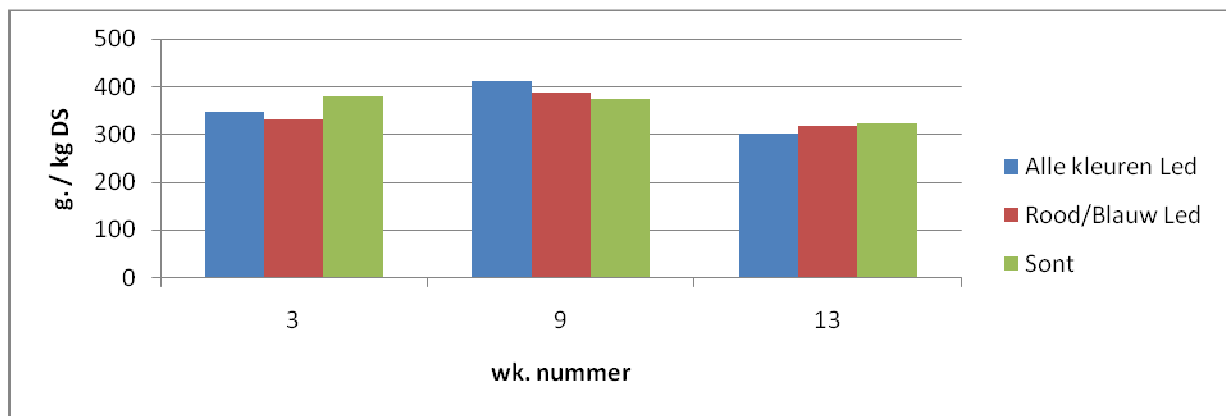
Na 11 dagen bewaring is er een significante afname van het vruchtgewicht bij de vruchten geogost uit de LED afdeling rood/blauw, zoals weergegeven in figuur 30. Deze afname is bij vruchten uit de twee andere afdelingen niet waargenomen. Er kan geen directe verklaring worden gegeven voor deze sterke daling. Wel dient te worden vermeld dat de bemonsterde vruchten uit de LED afdeling rood/blauw snellere verwelkingverschijnselen lieten zien en ook sneller aantasting met secundaire schimmels hadden in de kroon van de vrucht.

De procentuele daling van het vruchtgewicht 43 dagen na oogst, is bij de vruchten geteeld in de LED afdeling rood/blauw 20,2 %. Bij de Son-T en LED alle kleuren afdelingen lag de gewichtsafname op respectievelijk op 14% en 15,7%. Op basis van deze enkele test kunnen statistisch geen directe conclusies worden getrokken betreft verschillen in houdbaarheid tussen de verschillende belichtingsmethoden.

### 8.7 Chemische gewasanalyses

#### 8.7.1 Suikergehalte vrucht

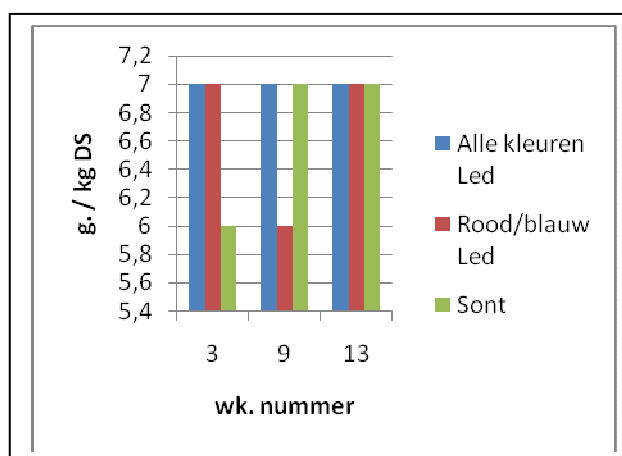
In de gehele proefperiode is totaal driemaal is het suiker gehalte in oogstbare vruchten geanalyseerd, weergegeven in figuur 31. Het suikergehalte in de vrucht kan verschillen wanneer planten onder verschillende lichtniveaus worden geteeld. Het oplosbare suikergehalte zal in een oogstbare vrucht vooral bestaan uit fructose, saccharose en glucose. Deze suikers worden voornamelijk gevormd uit organische zuren. Het suikergehalte is berekend in gram per kilogram drogestof. Er zijn geen significante verschillen waargenomen in suikergehalten tussen de vruchten geoogst uit de verschillende afdelingen.



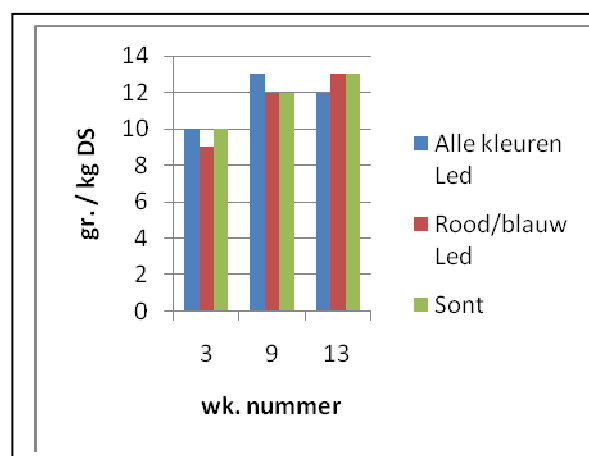
Figuur 31 : Suiker analyse vrucht (g. / kg DS)

#### 8.7.2 Drogestof meting vrucht en blad

Op zowel de vruchten als het onderste en bovenste blad is totaal driemaal een drogestof meting uitgevoerd, weergegeven in resp. figuur 32 en 33. Er zijn daarbij ook analyses uitgevoerd op de belangrijkste hoofd en spoorelementen. Er zijn geen significante verschillen in elementengehaltes aangetroffen tussen vrucht- en bladmonsters uit de drie betreffende afdelingen.



Figuur 32: Drogestof percentage vrucht (%)



Figuur 33: Drogestof percentage blad (%)

Samenvatting gewas metingen

- Zonder IR inzet in de LED afdelingen begon de zetting trager te verlopen in vergelijking tot de SONT afdeling. Na inzet van IR verliep de zetting in de Led vakken gelijk aan het SONT vak.
- In vergelijking met SONT leek de LED afdeling rood blauw gevoeliger voor bladrandjes en de LED afdeling met alle kleurtjes leek minder gevoelig.
- De bladlengte was gemiddeld 3 cm langer in de LED afdelingen. De gemeten LAI-waardes waren niet significant verschillend.
- De gemiddelde stengellengte van planten geteeld onder Son-T was aan het einde van de proefperiode hoger dan de stengellengte van de planten geteeld onder LED.
- Vruchten uit de LED afdeling rood blauw vertoonden een minder lange houdbaarheid.

## 9 Gerealiseerde belichting

### 9.1 Gerealiseerde lichtniveau

Ten tijde van het onderzoek zijn er twee typen lichtmetingen uitgevoerd:

- continue meting op de meetpaal (puntmeting)
- periodieke volveldse meting

De meting werd uitgevoerd met een Licor meting, deze heeft als beperking dat het slechts het lichtniveau in het spectrum tussen 400 en 700 nm meet. De lichtmeting zegt dus ook alleen iets over dit deel van het spectrum. Het bleek niet mogelijk om betrouwbaar de hoeveelheid infrarood te meten, omdat dit een zeer breed spectrum beslaat tussen de 780 nanometer en 106 nm. Het was wel mogelijk om het effect van infrarood vast te stellen door de bladtemperatuur te meten. Dit is met een PT meter gedaan en daarnaast op willekeurige plekken met een hand IR meter.

De puntmeting is niet betrouwbaar te noemen om een gelijk lichtniveau in de afdeling te kunnen garanderen, daarnaast bleken de verschillen de PAR metingen niet exact dezelfde waarde te hebben. Er diende een correctie op uitgevoerd te worden. De meest betrouwbare meting voor het gewas is een volveldse meting, welke in het seizoen meerdere malen werd uitgevoerd.

Tijdens de eerste volveldse PAR meting bleek dat door de combinatie van een kleine plant en een relatief kleine belichtingsinstallatie in de LED afdelingen, het lichtniveau op de kop van het gewas 20% lager lag dan de Son-T welke op 145  $\mu\text{mol}$  lag. Het lichtniveau is toen bijgesteld zodat alle afdelingen gelijk waren naarmate het gewas verder groeide is telkens op de kop van het gewas gemeten. Door schommelingen in de temperatuur van het koelwater bleek dat er tussen de afdelingen soms kleine verschillen waren in het lichtniveau. Deze verschillen waren echter nimmer groter dan 5% en tijdelijk van aard.

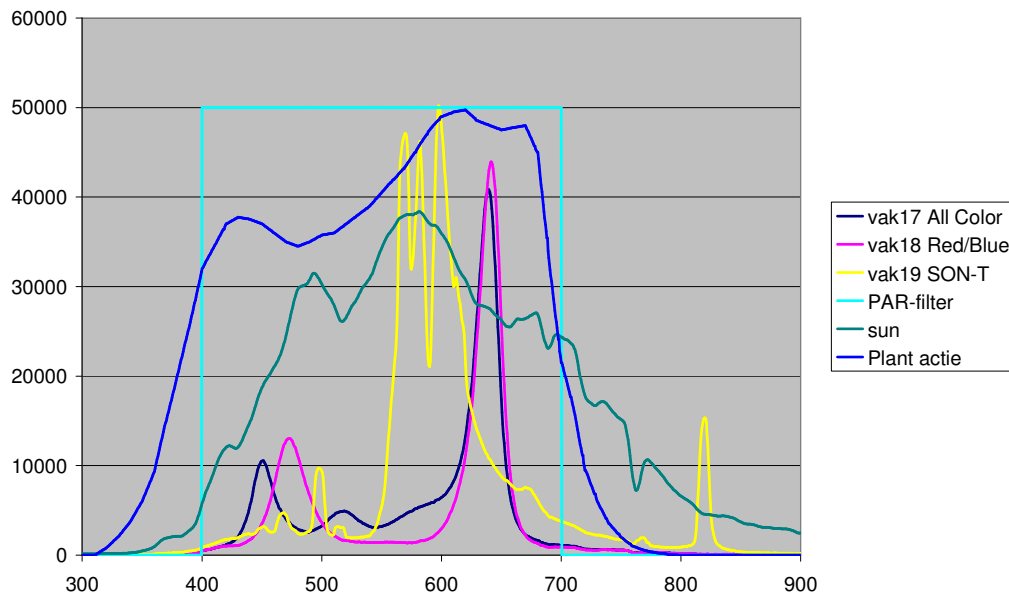
### 9.2 Gerealiseerd spectrum

In de onderstaande figuur 33 is per afdeling het gerealiseerde spectrum per afdeling weergegeven tussen de 300 en 900 nm. Hierin is het volledige infrarode spectrum niet weergegeven, maar slechts het gedeelte tussen de 780 en 900 nm. Afdeling 17 is de LED afdeling waarin naast rood en blauw ook groen en geel licht werd gegeven. Afdeling 18 is de LED afdeling met rood en blauw licht. Afdeling 19 is het referentievak met Son-T licht. Door de groene en amber LED's toe te voegen in afdeling 17 is er invulling gegeven aan dit deel van het spectrum (500-600 nm), echter het niveau in dit deel van het spectrum is niet vergelijkbaar met Son-T. In de figuur is het spectrumbereik van een standaard PAR meter weergegeven.

#### 9.2.1 discussie

De figuur laat zeer duidelijk zien dat een PAR meting niet het volledige (spectrum) bereik laat zien dat met een Son-T wordt gegeven. Tot op heden was de meetmethode in  $\mu\text{mol}$  een betrouwbare meetmethode omdat slechts Son-T lampen met elkaar werden vergeleken. Door de komst van nieuwe lichtbronnen volstaat alleen deze meting echter niet meer. Naast de output in het PAR spectrum zal ook de output in het niet zichtbare (>780 nm) deel van het licht meegenomen moeten worden. Een alternatieve meetmethode is op dit moment echter niet mogelijk omdat de huidige kennis over het juiste spectrum en het effect op de plant niet toereikend is. Indien vervolg onderzoek aantoont hoeveel straling in het onzichtbare deel nodig is en wat de juiste mix van verschillende zichtbare spectra is kan de meetmethodiek aangepast worden.





Figuur 33 : Gerealiseerd spectrum licht

*aanpassing van het spectrum*

Omdat ten tijde van het onderzoek sterke indicaties waren dat de kleuren in het spectrum 500-600nm een effect hebben op de verdamping van de plant is in overleg met de onderzoekscoördinatoren tijdelijk het lichtniveau van dit deel van het spectrum verhoogd. Deze aanpassing is gedaan op 20 januari waarbij het lichtniveau van de groene + amber LED's 25% is verhoogd. De verhouding tussen de kleuren was als volgt:

**voor aanpassing**

- 66% rood
- 17% amber
- 8% groen
- 9% blauw

**na aanpassing**

- 58% rood
- 21% amber
- 12% groen
- 9% blauw

9.3 Inzet infrarood straling

9.3.1 *Instellingen*

Door de warmtestralers was er een nieuw stuurmiddel voor handen, waar zowel kwekers als onderzoekers geen ervaring mee hadden. De mogelijkheid van aan- en uitschakelen los van de lichtvraag bracht nieuwe vrijheden en onbekenden met zich mee. Vragen met betrekking tot intensiteit, inzet in de tijd en integratie met de andere klimaat beheersing instrumenten zijn velen malen gedurende vergaderingen ter tafel gekomen. Er is bewust in beiden LED afdelingen gewacht met de inzet van infrarode straling tot er 28 november 2009 gelijke effecten werden waargenomen als in de proef van 2008-2009.

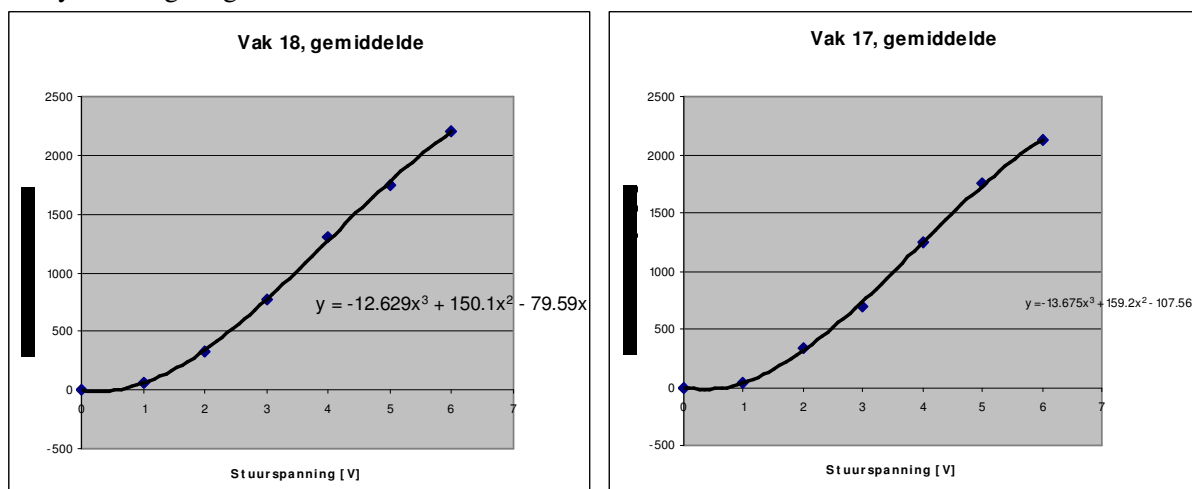
Het instellen van het Infra-Rood vermogen is in eerste instantie gebaseerd op waarnemingen mbt tot de planttemperatuur en anderzijds de indrukken van de teeltadviseurs voor wat betreft de ontwikkelingssnelheid van het gewas (zetting, bladaanmaak). Er is in eerste instantie niet zozeer gekeken naar het verbruikte vermogen. Bij de instelling waarbij de planttemperatuur gelijk was aan die van de SON-T hadden de teeltadviseurs het gevoel dat het vermogen te hoog was. Daarom is de begrenzing dusdanig ingesteld dat de planttemperatuur onder de ruimtetemperatuur lag (variërend van 0.5 tot 1.0 afhankelijk van het tijdstip van de dag. Deze planttemperatuur was duidelijk lager dan die van de SON-T Er is gekozen om de LED afdeling 17 en 18 dezelfde behandeling met infrarood te geven.

De instellingen kunnen als volgt worden samengevat:

- Gelijke intensiteiten op alle momenten voor beiden LED afdelingen
- Inschakeling om 00:00, sinds 15 maart vanaf 2:00
- Uitschakeling om 19:00, sinds 15 maart om 21:00
- Warmte straling alleen aan wanneer er belicht wordt
- De planttemperatuur mocht niet meer dan 1 graad afwijken van de luchttemperatuur
- Dimming vanaf 450 W/cm<sup>2</sup> buitenlicht naar 0% bij 600 W/m<sup>2</sup>

### 9.3.2 Werking infrarood installatie

Het goed meten en bepalen van de hoeveelheid vermogen die door de Infrarood stralers is verbruikt moest worden bepaald door gebruik te maken van True RMS meetapparatuur. Dit komt omdat de dimmers die gebruikt worden om de IR-stralers te regelen, gebaseerd zijn op een thyristor schakeling die een deel van de sinus van de wisselstroom afkapt om zo het vermogen te regelen. Bij Nul vermogen wordt de sinus al bij de nuldoorgang afgekapt. Omdat de vormfactor van de stroom en de spanning dan niet zuiver sinusvormig meer zijn zal heel veel meetapparatuur hier niet goed mee om kunnen gaan. Het gebruik van deze thyristor dimmers gaf nog een onverwacht probleem. Bij inspectie van de temperatuur van de 3 strengen die boven drie plantrijen hingen bleek dat deze verre van gelijk was. Dit bleek veroorzaakt door het feit dat iedere dimmer door een andere fase (T1,T2,T3) gevoed werd. Echter de sturing van de dimmers kwam vanuit steeds dezelfde fase (T1). Hierdoor bleek de timing niet goed geregeld. Toen dit probleem verholpen was bleef er nog een onverklaarbaar klein verschil over tussen de drie strengen die waarschijnlijk te maken heeft met verschillen in de Ohmse weerstand tussen de drie strengen. In figuur 34 en 35 zijn de gemeten gemiddelde vermogens per streng weergegeven voor de twee LED-vakken. Met deze curven kan het totaal gedissipeerde vermogen per vak worden berekend uit de aanstuurspanning voor de thyristor regeling.

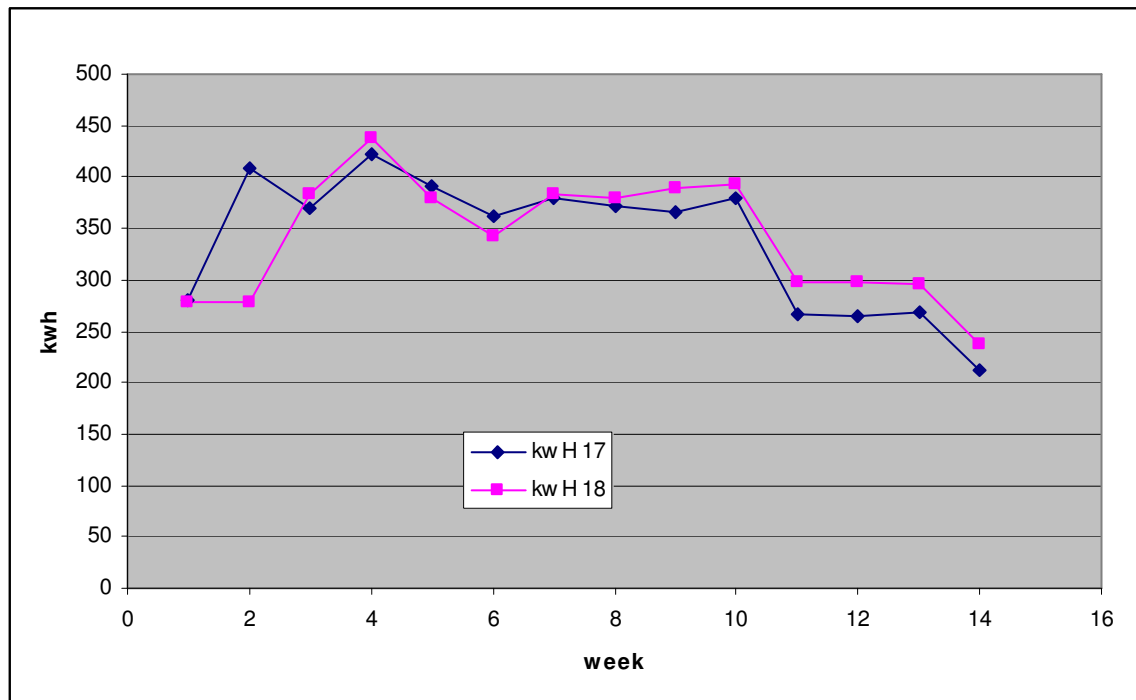


Figuur 34 en 35: Gemiddelde vermogens als functie van de thyristor stuurspanning voor vak 17 en vak 18.

### 9.3.3 Elektra verbruik

In de Son-T afdeling vertegenwoordigd het aandeel infrarood van de installatie 47 Watt. Doelstelling vooraf aan het onderzoek was om het aandeel infrarood niet verder op te laten lopen dan gemiddeld 31,5 Watt (over de branduren van de LED installatie gemeten). In de afdelingen met LED is gebruik gemaakt van een standaard type infrarood straler. Indien alle strengen op hun maximale vermogen staan dan werd ongeveer 3750 Watt vermogen getrokken, dit komt overeen met circa 65 Watt/m<sup>2</sup>. Doordat de regeling traploos dimbaar had dit vermogen naar wens instelbaar moeten zijn tussen 0 en 65 Watt/m<sup>2</sup>. Technisch gezien was dit echter zeer lastig te realiseren.

In figuur 36 is voor de twee LED-vakken het verloop in kwh over de periode van 21 december tot 28 maart per week weergegeven. In tabel 37 is het cumulatieve verbruik te zien.



Figuur 36: kwh verbruik vermogen per vak voor IR-stralers

Over de periode van 28 november tot 28 maart is er voor beide vakken ongeveer 4700 kwh stroom verbruikt. Dit komt neer op een gemiddeld vermogen van 35,3 Watt per m<sup>2</sup>.

	kwH 17	kwH 18
21-27 dec	280	279
28-dec-3 jan	408	279
4-10 jan	370	383
11-17-jan	423	437
18-24 jan	392	380
25-31 jan	362	343
1-7 febr	380	384
8-14 febr	371	380
15-21- febr	366	389
22-28 febr	379	393
1-7 maart	266	298
8-14 maart	264	298
15-21 maart	268	296
22-28 maart	212	237
<b>Totaal</b>	<b>4743</b>	<b>4774</b>

Tabel 37: Stroomverbruik in vak 17 en 18 voor infrarood stralers

### 9.3.4 discussie

Doordat er nog weinig ervaring was met het toedienen van infrarood is ervoor gekozen om dit teeltseizoen niet te focussen op energieverbruik. Daarnaast bleek dat het dimmen van de installatie niet goed mogelijk was; wanneer de installatie gedimd werd veranderde het infrarode spectrum door daling van de gloeidraad temperatuur. Vrijwel het gehele jaar heeft de installatie op het maximum ingestelde vermogen gedraaid.

Het verbruik van gemiddeld 35,3 Watt/m<sup>2</sup> is hoger dan de beoogde 31,5 Watt/m<sup>2</sup>. In de projectgroep heerste echter de overtuiging dat het verbruik vergaand verminderd kan worden. Enerzijds doordat de winter extreem koud was en anderzijds doordat er sommige perioden vol vermogen infrarood werd toegediend terwijl dit niet nodig was.

In tabel 38 is dit vertaald wordt naar een aantal verschillende scenario's.

	100% Son-T	100% LED + IR
<b>installatie TNO (2008)</b>		
efficiency installatie '07	1,55 µmol/watt	1,0 µmol/watt + IR
verbruik elektr. 2009-2010	94 watt	145 watt
aandeel IR in installatie	incl.	35,5 watt
<b>totaal 2009</b>	<b>94 watt</b>	<b>180,5 watt</b>
<b>moderne installatie (2009)</b>		
efficiency installatie '09	1,55 µmol/watt	1,6 µmol/watt + IR
verbruik elektr. 2009-2010	94 watt	90,6 watt
aandeel IR in installatie	incl.	35,5 watt
<b>totaal 2009</b>	<b>94 watt</b>	<b>126,1 watt</b>
<b>begrote installatie (2013)</b>		
efficiency installatie '09	1,55 µmol/watt	2,3 µmol/watt + IR
verbruik elektr.	94 watt	63 watt
verwacht aandeel IR	incl.	< 23,5 watt
<b>totaal 2009</b>	<b>94 watt</b>	<b>&lt; 86,5 watt</b>

Tabel 38 : scenario berekeningen opgenomen vermogen

De tabel toont de efficiency van een LED en Son-T installatie voor :

- de LED installatie gemaakt in 2008 zoals deze gebruikt is in het onderzoek
- de LED installatie die op het moment van het onderzoek nieuw leverbaar was
- de LED installatie 2013 zoals de verwachting is van alle LED onderzoekers is

De verwachting is dat naast de verbetering van efficiency van de LED het ook mogelijk is om het aandeel infrarood verder terug te dringen. Hiervoor is een voorzichtige aanname gedaan van 23,5 watt per m<sup>2</sup>. Indien er geen infrarood nodig blijkt te zijn is het opgenomen vermogen ten opzichte van Son-T 50% lager in 2013.

## 10 Discussie

### 10.1 Productie onder LED verlichting

Ondanks het feit dat de uiteindelijk productie lagere uitkwam in de LED vakken ten opzichte van het SONT vak durven we te stellen dat we hebben aangetoond dat het mogelijk is om onder LED een vergelijkbare productie te realiseren als onder SONT. Wij baseren deze conclusie op het feit dat al het verschil in productie gecreëerd is in de eerste drie weken van de productie, welke overeenstemt met de eerste drie weken waarin we geen IR hebben ingezet. Mogelijk is dat door deze lagere productie de gewas in de LED afdelingen meer energie overhield, echter is het niet aannemelijk dat deze energie de overige 17 weken heeft doorgewerkt.

### 10.2 Rol stralingswarmte

Ons literatuur onderzoek en communicatie met vele onderzoekers leidde ertoe dat we tot de conclusie kwamen dat er in de praktijk beperkt ervaring is met de inzet van stralingswarmte in de tomaten teelt. De ervaringen van zowel het seizoen 2008-2009 en 2009-2010 ondersteunen de gedachtegang dat op bepaalde momenten de stralingswarmte die bij een LED installatie ontbreekt ten opzichte van SONT nadelig voor de groei en ontwikkeling van het gewas. Dit is met name het geval op dagen wanneer de buitenomstandigheden voor veel energie afvoer zorgen, waardoor met name de temperatuur van het groepspunt te laag zou kunnen worden om gewenste groei en ontwikkeling te behouden / behalen.

Vanuit het infra rood onderzoek zijn als belangrijkste onbekenden naar voren gekomen:

- Hoe kan de inzet van stralingswarmte verder worden geoptimaliseerd?
  - Welke parameters kunnen er naast bladtemperatuur gebruikt worden voor een optimale sturing van de dosis stralingswarmte?
  - Welke hoeveelheid IR is minimaal nodig om de gewas groei en ontwikkeling op gewenst niveau te houden?
- Hoe kunnen we IR integreren in de dynamische sturing van aan elkaar gekoppelde kasklimaat sturingen?
- Zouden we met andere vormen van warmte energie inbreng (met name laagwaardige 'rest'-convectiewarmte) gelijke resultaten kunnen behalen?
  - Welke vormen van warmte input zijn financieel aantrekkelijk en praktisch uitvoerbaar?
- In hoeverre kunnen we de export en verwerking van assimilaten nog meer dirigeren naar de vruchten? Is te verwachten dat de paarse kleur (die we in de bladeren en met name nerven gezien hebben) een verlies van productie geeft doordat energie gebruikt wordt voor pigmenten die niks bijdragen?

### 10.3 Rol kleurtjes

Zoals geformuleerd in onze hypothese wilden we zien of het ontbreken van bepaalde golflengtes wellicht sub-optimaal zou zijn met betrekking tot productie onder LED belichting. Uit de resultaten, zoals gepresenteerd in dit rapport, is het zeer moeilijk oorzaak en gevolg aan te wijzen met betrekking tot de effecten van het toevoegen van andere golflengtes. De resultaten wijzen naar een veranderd patroon van water opname en een verstoring van de plantbalans richting meer vegetatieve groei ten opzichte van generatieve groei. De lagere productie zoals deze is gevonden in de LED afdeling met een wijder spectra ten opzichte van de LED afdeling met alleen rood en blauwe golflengtes zou verklaard kunnen worden door een lagere fotosynthese door de minder efficiënte golflengtes en door het investeren van energie in vegetatieve groei. Indien de extra kleuren alleen zouden functioneren als stuurlicht zou het vaststellen van het juist niveau gewenst zijn. Ondanks het feit dat in het onderzoek het niveau gedurende een periode structureel is verhoogd, bleek het niet mogelijk om de gevolgen hiervan statistisch te onderbouwen.

## 11 Conclusies

Naar aanleiding van het LED onderzoek kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Het inbrengen van extra warmte om de bovenste plantdelen op temperatuur te houden is bij LED belichting een vereiste om de productie op eenzelfde niveau te brengen als Son-T
- Het inbrengen van infrarode straling zorgt ervoor dat bij LED de planttemperatuur op eenzelfde niveau kan worden gehouden als bij Son-T
- Door de inzet van infrarode straling is het mogelijk om de ontwikkelingssnelheid van een tomaten gewas onder LED belichting op eenzelfde niveau te houden als Son-T belichting
- Het inbrengen van LED licht in de golflengtes tussen 500 en 600 nm heeft een negatief effect op de productie van het gewas, maar de bladkwaliteit werd verbeterd
- Middels LED belichting kunnen bladrandjes bij tomaat sterk verminderd worden
- LED belichting zorgt niet voor een verschil in suiker- en drogestof gehalte van de vrucht tov Son-T

## 12 Aanbevelingen

Naar aanleiding van het onderzoek in 2009-2010 kunnen de volgende aanbevelingen worden gegeven:

Het inzetten van warmte in de bovenste regionen van het gewas is nodig om onder LED belichting voldoende ontwikkelingssnelheid te behalen in het gewas. De aanbeveling van TTO is om verdergaand onderzoek te doen naar dit warmte vraagstuk. Onderzoeksvragen hierbij kunnen zijn:

- is het mogelijk om op een alternatieve manier dan met infrarode verwarming het gewas te verwarmen?
- hoe kan het gebruik van infrarood verder verminderd worden ?

Door de overmatige inzet van infrarood is in het beschreven onderzoek de efficiency van LED verloren gegaan aan de inzet van infrarood. LED ontwikkeld zich echter in snel tempo door en de verwachting is dat in 2013 de efficiency van LED (in PAR) 50% hoger is dan die van Son-T. Tegelijkertijd is de verwachting van TTO dat de hoeveelheid infrarood sterk terug gebracht kan worden.

Tomaten geteeld onder rode en blauwe LED's hadden in een houdbaarheidstest mindere houdbaarheid dan tomaten geteeld onder de kleuren LED's (rood, blauw, groen, geel) en de Son-T. Dit onderzoek is eenmalig uitgevoerd met 60 vruchten per afdeling en is daardoor statistisch onvoldoende betrouwbaar. Het verdient de aanbeveling om deze test een volgend jaar meerdere keren te herhalen.