Full LED op praktijkbedrijf tomaat

Als onderdeel van het monitoringsproject

Marcel Raaphorst en Kees Weerheim

Rapport WPR-886

Referaat

Bij Lans Zeeland is een tomatenteelt onder full LED gemonitord. De LED armaturen geven wit licht en hebben een ventilator die de lampwarmte naar beneden blaast.

Uit de monitoring is gebleken dat de gebruikte generatie lampen nog niet praktijkrijp is, maar dat er wel andere klimaatcondities en gewasreacties zijn opgetreden. Zo blijkt het warmtegebruik en de verdamping veel lager te zijn dan bij vergelijkbare SON-T afdelingen. Ook bleek de temperatuur bij de gewaskop hoger te zijn dan bij de vruchten. De gewasgroei en productie is onder LED lampen naar wens van de teler verlopen.

Abstract

At Lans Zealand, a tomato crop under full LED has been monitored. The LED lamps give white light and have a fan that blows the lamp heat downwards. It was observed that this generation of lamps is not commercially viable yet, but has also showed different climate conditions and crop response. The heat use and evaporation in the Full LED compartment has turned out to be much lower than at comparable departments with HPS lamps. The temperature at the height of the crop head also turned out to be higher than at the height of the fruits. The grower is satisfied with the crop growth and production with LED lamps.

Rapportgegevens

Rapport WPR-886

Projectnummer: 3742271300

DOI nummer: 10.18174/477794

Thema: Energie en Klimaat

Dit rapport is tot stand gekomen in het kader van het programma Kas als Energiebron, het innovatie- en actieprogramma van het ministerie van LNV en LTO Glaskracht Nederland en mede gefinancierd door de Stichting Programmafonds Glastuinbouw.

Disclaimer

© 2019 Wageningen, Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research, Business unit Glastuinbouw, Postbus 20, 2665 MV Bleiswijk T 0317 48 56 06, www.wur.nl/plant-research.

Kamer van Koophandel nr.: 09098104

BTW nr.: NL 8113.83.696.B07

Stichting Wageningen Research. Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Stichting Wageningen Research.

Stichting Wageningen Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Adresgegevens

Wageningen University & Research, BU Glastuinbouw

Postbus 20, 2665 ZG Bleiswijk

Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk

T +31 (0)317 48 56 06

Inhoud

	Samenvatting	5
1	Inleiding	7
	1.1 Doelstelling	7
	1.2 Kas en teelt	7
	1.3 Uitvoering	8
2	Resultaten	9
	2.1 Licht en verwarming	9
	2.1.1 Belichting	9
	2.1.2 Lichtspectrum	10
	2.1.3 Lichtverdeling	11
	2.1.4 Verwarming	12
	2.2 Kasklimaat	14
	2.2.1 Temperatuur en RV	14
	2.2.2 Schermstand	16
	2.2.3 Verticale temperatuurverdeling	16
	2.2.4 Planttemperatuur	18
	2.3 Discussie verticale temperatuurverdeling	19
	2.4 Discussie warmtegebruik en verdamping	20
	2.4.1 Gemeten wateropname	21
	2.4.2 Hypothesen	22
	2.4.3 Aanbevelingen	22
	2.5 Productie	22
3	Conclusies en aanbevelingen	23
	3.1 Conclusies	23
	3.2 Aanbevelingen	23

Samenvatting

Bij Lans Zeeland is de eerste tomatenteelt in de praktijk onder $\pm 215 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ full-LED gedurende enkele wintermaanden gemonitord op het gebied van lichtverdeling, kasklimaat en warmtevraag. De LED lampen zijn geleverd door Q-Westland en onderscheiden zich van de meest gebruikelijke LED-lampen door een breed lightspectrum (wit licht) en een ventilator die de lampwarmte naar beneden blaast.

Uit de monitoring is gebleken dat de gebruikte generatie lampen nog niet praktijkrijp is omdat 10-20% van de lampen is uitgevallen, waarschijnlijk door vocht. Het rendement van de lampen is met $1,92 \mu\text{mol}/\text{J}$ onder praktijkomstandigheden 10% lager dan onder lab omstandigheden (volgens opgave leverancier). De lichtverdeling bleek op kophoogte (180 cm onder de lampen) veel minder egaal te zijn dan bij SON-T lampen. Echter, op een hoogte van 230 cm onder de lampen was de lichtverdeling wel egaal en aan de gewasgroei en productie was het PAR-verschil op kophoogte niet te herkennen.

Niet alleen voor de hoeveelheid licht, maar ook voor de temperatuur en de luchtvochtigheid op kophoogte maakt het uit of recht onder de LED lampen wordt gemeten, of tussen de lampen in. De ventilator in de LED-armatuur blaast warme lucht naar beneden en uit rookproeven is gebleken dat deze lucht meer naar beneden wordt geblazen dan zijwaarts, en net tot aan de gewaskop reikt. De rook kwam ook niet dieper in het gewas dan de gewaskoppen.

Tot 30 januari, toen de meetbox op gewaskophoogte werd verplaatst van onder de lampen naar tussen de lampen werd een hogere kasttemperatuur en lagere RV gemeten dan daarna. Dit is ook een van de oorzaken dat in de eerste maanden nauwelijks warmte werd ingezet in het ondernet. De temperatuur en de RV van de meetbox gaven immers een hoge temperatuur en een lage RV aan. Omdat het gewas ondanks deze afwijkende meting naar wens was gegroeid, is de strategie met geringe buisrail niet gewijzigd en bleef de warmtevraag $\pm 35\%$ lager dan in de SON-T afdelingen. Ook bleef de gewasopname ($\approx$ verdamping) lager dan bij de SON-T afdelingen met een vergelijkbaar belichtingsniveau. Dit verklaart echter nog niet het lagere warmtegebruik. De temperatuur op kophoogte bleek bij de LED-afdeling tijdens de belichtingsuren ook na het verplaatsen van de meetboxen iets hoger te liggen dan ter hoogte van de rijpende vruchten, terwijl bij de SON-T afdelingen geen verschil is gemeten. Dit is in tegenstelling tot eerdere proeven met LEDs boven het gewas, en kan deels worden verklaard door de lagere temperatuur van het ondernet en door het effect van de ventilator in de LED-lamp.

De gewasgroei en productie is onder LED lampen naar wens van de teler verlopen. Om kwantitatieve conclusies te kunnen geven is een referentiekas met SON-T lampen en hetzelfde ras nodig. Het monitoringsproject is gefinancierd door Kas als Energiebron.

1 Inleiding

Lans Zeeland is het eerste praktijkbedrijf dat tomaten teelt onder full LED belichting. De verwachting bij deze innovatie is dat bij gelijke μmol -niveaus, het gebruik van LED's dezelfde productie oplevert als het gebruik van SON-T, maar met een lager stroomverbruik. De lampen bevatten rode en witte LED lampen. Hiervoor is gekozen omdat de bij hybride belichting veelgebruikte rood/blauwe LED lampen (met weliswaar een hogere efficiëntie) de gewashandelingen en gewasbeoordeling hindert. De lampen zijn voorzien van diffuus beschermingsglas. Dit met als doel om het licht beter te verspreiden over de kas. De lampen geven volgens de leverancier bij een elektrisch vermogen van 825 Watt een hoeveelheid PAR van 1800 $\mu\text{mol/s}$, waarmee de beoogde geïnstalleerde belichtingsintensiteit neerkomt op $\pm 215 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$.

Omdat de LED-lampen minder warmtestraling produceren, is bij proeven met LED-lampen ervaren dat een hogere kastemperatuur moet worden aangehouden om de planttemperatuur gelijk te houden. Daarom is de verwachting dat de besparing op elektriciteit ten opzichte van SON-T belichting deels wordt tenietgedaan door meer behoefte aan verwarming. Om de extra verwarming te beperken wordt bij iedere lamp een deel van de lampwarmte met een kleine ventilator naar beneden geblazen (zie Figuur 1). Vanaf 20 februari 2018 zijn de LED-lampen bij Lans ook dimbaar gemaakt.

Om het effect van LED op het kasklimaat te toetsen is het kasklimaat van begin december 2017 tot en met april 2018 gemonitord. Dit onderzoek is een onderdeel van het Monitoringsproject van Wageningen U&R Glastuinbouw, dat wordt gefinancierd vanuit het programma Kas als Energiebron.

Figuur 1 Zijaanzicht van de lamp met richting van de luchtstroom. Bron: qwestland.eu.

1.1 Doelstelling

Het doel van het onderzoek is om te monitoren hoe de betreffende LED lampen zich gedragen in de praktijk, zodat kan worden bepaald of dit Full LED belichtingssysteem een interessante manier is om te besparen op de elektriciteitsvraag. Door het meten van het kasklimaat en vergelijking met de kasklimaatinstellingen, moet worden berekend wat het effect is van de LED-belichting op het kasklimaat, de verticale temperatuurverdeling en het warmtegebruik.

1.2 Kas en teelt

De Full LED belichting bevindt zich in kas 3 (zie Figuur 2). In kas 3 is vanaf week 29 2017 het type mini San Marzano geteeld. Omdat dit type niet in andere kassen is geteeld, kan de groei en productie onder LED-licht helaas niet worden vergeleken met die onder SON-T licht. Wel is het effect van de belichting op het klimaat en het warmtegebruik te vergelijken. Zo wordt in kas 2 en 4 met SON-T belicht. De monitoring van de LED belichting heeft plaatsgevonden in afdeling 32 (in kas 3), welke is vergeleken met afdeling 23 (in kas 2) omdat beide kassen een even hoog elektrisch vermogen aan belichting hebben ($\pm 100 \text{ W}_e/\text{m}^2$).

Daarnaast is ook het klimaat vergeleken met afdeling 13 uit kas 1, die zich op een naburige locatie bevindt en waar een vrijwel gelijk lichtniveau wordt gerealiseerd als in afdeling 32.

Figuur 2 Overzicht van kassen 2-4 (geel) en de afdelingen (wit) waar sensoren zijn geplaatst.

1.3 Uitvoering

In de afdelingen 13, 23 en 32 zijn geventileerde sensoren op meerdere hoogten opgehangen om de verticale temperatuurverdeling te meten. Verder zijn in de afdelingen 13 en 32 tijdelijk warmtebeeldcamera's geplaatst om de gewastemperatuur te volgen. Deze data zijn vergeleken met de klimaatdata uit de klimaatcomputer. Lichtmetingen zijn uitgevoerd betreffende de horizontale lichtverdeling en het spectrum. Verder zijn rookproeven uitgevoerd om de hoeveelheid luchtbeweging rond de lampen, veroorzaakt door de ventilatoren, te bepalen.

2 Resultaten

2.1 Licht en verwarming

2.1.1 Belichting

In alle afdeling wordt gedurende de winter van 0:00 uur tot ± 18:00 uur belicht (zie Figuur 3). Tot en met 21 februari 2018 kon de LED-afdeling (32) nog niet worden gedimd, terwijl bij de SON-T afdelingen (13 en 23) 50% kan worden afgeschakeld. Hierdoor is bij de LED-afdeling meer uren voluit belicht en is vrijwel evenveel elektriciteit gebruikt als in afdeling 13, waar 10% meer elektrisch vermogen is geïnstalleerd. Hierbij is geen rekening gehouden met het uitvallen van de LED-lampen. Naar schatting van de teler hebben gemiddeld 10-20% van de lampen niet gebrand omdat deze uitvielen. Deze uitval heeft verschillende oorzaken gehad, waarvan vocht als grootste boosdoener wordt gezien. Vanwege de uitval van de lampen zullen deze bij de volgende teelt worden vervangen voor een nieuwe generatie.

Na 22 februari konden de LED lampen wel worden gedimd. Helaas is na deze verandering de 5-minuuts registratie van de belichting niet meer bijgehouden. Daarom zijn in Figuur 3 alleen de gegevens tot en met 21 februari weergegeven. De branduren per dag zijn na die periode nog wel vastgelegd (zie Figuur 10). Hieruit blijkt dat (zonder rekening te houden met het uitvallen van lampen) in de LED-afdeling 5% respectievelijk 10% meer elektriciteit is gebruikt dan in de SON-T afdelingen (13 en 23).

Figuur 3 5-Minuutsgegevens van de belichting (elektrisch vermogen in W/m^2).

2.1.2 Lichtspectrum

In Figuur 4 is de spectrumverdeling van de LED-lampen vergeleken met die van SON-T lampen. Wat opvalt is dat de spectrumverdeling van de LED lampen twee smalle pieken vertoont bij 450 en 670 nm en twee dalen rond 490 en 630 nm. Er is relatief veel meer blauw en groen licht aanwezig dan bij SON-T.

In het verrood gebied (boven 700 nm) geven de LED lampen relatief minder licht dan SON-T. Dat is het golflengtegebied waarvan (tomaten)bladeren slechts weinig absorberen en tot 90% reflecteren of doorlaten [Snel, 2011]¹. Dat zou een licht positieve invloed kunnen hebben op de fotosynthese per gegeven $\mu\text{mol PAR}$. Aan de andere kant kan een hogere intensiteit verrood licht leiden tot een verschuiving in de assimilatenbalans ten gunste van de vruchten. De effecten hiervan zijn in deze praktijkproef echter nog niet onderzocht, omdat er geen vergelijking mogelijk was.

Figuur 4 Spectrumverdeling (relatieve intensiteit) van de SON-T lampen in afdeling 13 (boven) en de LED-lampen in afdeling 32 (onder).

¹ Snel, J.F.H. (2011): Fotosynthese-efficiency bij verschillende golflengten, Wageningen UR Glastuinbouw

2.1.3 Lichtverdeling

De stralingshoek van de lichtbundel uit de lamp is voor LED kleiner dan voor SON-T lampen. Zeker als SON-T lampen zijn geplaatst in de veelgebruikte breedstralers. Voor een goede lichtverdeling moeten LED lampen in een vergelijkbare configuratie als SON-T daarom hoger hangen dan SON-T lampen, of ook tussen de tralies worden aangebracht. Voor de afdelingen 32 (LED) en 13 (SON-T), met een vergelijkbaar aantal lampen per tralie, is de lichtverdeling op meerdere hoogten gemeten. Bij de meting op kophoogte (180 cm onder de lampen) is in de LED afdeling een duidelijk patroon te zien: direct onder de tralie waar de lampen aan hangen (zie Figuur 5) is de intensiteit het hoogst ($299 \mu\text{mol}/(\text{m}^2.\text{s})$), terwijl tussen de tralies de intensiteit afneemt tot $98 \mu\text{mol}/(\text{m}^2.\text{s})$ (zie Figuur 6). Gemiddeld was de PAR intensiteit $192 \mu\text{mol}/(\text{m}^2.\text{s})$. Dit is veel lager dan de beoogde $215 \mu\text{mol}/(\text{m}^2.\text{s})$ (zie inleiding). 50 cm lager (230 cm onder de lampen) is het horizontale verschil in lichtintensiteit nauwelijks meer te zien (Figuur 7).

Figuur 5 LED lampen hangen onder de tralie.

Figuur 6 Horizontale lichtverdeling ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2.\text{s})$) 180 cm lager dan de lampen bij LED (links) en SON-T (rechts).

Voor een egale lichtverdeling ter hoogte van de gewaskoppen zou tussen de LED-lampen en de gewaskop dus minimaal 230 cm ruimte moeten zijn. Omdat de teler aan het gewas geen verschil zag tussen de productiesnelheid onder de tralie en tussen de tralies is het de vraag hoe noodzakelijk een egale verdeling op kophoogte is. Mogelijk worden de verschillen in fotosynthese per plant uitgevlakt doordat de grootste bladeren halverwege de plant hangen. Tevens verplaatsten de planten zich door het zakken door de kas waardoor ze gemiddeld gezien door de tijd allemaal evenveel LED licht ontvangen.

Figuur 7 Lichtverdeling vanaf onder de tralie (1) tot tussen de tralies (10) op meerdere hoogten (180-455 cm) ten opzichte van de LED lampen (links) en SON-T lampen (rechts).

Omdat de LED armatuur bestaat uit vele LED lampjes, zou de stralingshoek kunnen worden vergroot door alle lampjes per armatuur onder verschillende hoeken aan te brengen (zie Figuur 8).

Figuur 8 Armatuur met LED lampen die recht (links) of schuin (rechts) naar beneden schijnen (indicatief).

2.1.4 Verwarming

Het warmtegebruik is berekend door de buistemperatuur te vergelijken met de kasluchttemperatuur. Rekening houdend met de buisdiameter en het aantal buizen per tralie is hiermee de warmte-afgifte van de buizen bepaald. In Figuur 9 is de warmteafgifte tussen 1 december 2017 en 8 april 2018 voor de drie afdelingen per 5 minuten weergegeven met een kleur. In de kleurenbalk aan de rechterzijde staat welke waarde (in W/m²) hoort bij welke kleur. Duidelijk is te zien dat de kleur blauw (5-25 W/m², ofwel weinig verwarming) in de Figuur veel vaker voorkomt bij afdeling 32 (LED) dan bij afdelingen 23 en 13 (beide SON-T). Het gesommeerde warmtegebruik van de LED-afdelingen in deze periode (14,9 m³/m² aan aardgasequivalenten) is daarmee 31% tot 38% lager dan in de SON-T afdelingen.

Figuur 9 5-Minuuts weergave van de berekende buisverwarming (W/m^2) van 1 december 2017 tot 9 april 2018 van de drie afdelingen.

De verhouding tussen verwarming via de buisrail, de groeibuis en de lampen wordt weergegeven in Figuur 10. Het grootste deel van de verwarming is afkomstig van de lampen. Verder blijkt dat in afdeling 32 (LED-afdeling) 18 tot 35% meer groeibuis is ingezet, maar 62% tot 46% minder buisrail dan in de SON-T afdelingen.

Figuur 10 Energiegebruik per etmaal (in W/m^2) voor de buisrail (blauw), de gewasverwarming (groeibuis, groen) en de belichting (geel), en het totale energiegebruik (omgerekend in m^3/m^2 aardgasequivalenten) van buisrail en groeibuis voor de drie afdelingen (weergegeven in de titel van de grafiek).

Om de oorzaken van deze verschillen te achterhalen zoomen we eerst in op de gemeten temperatuur en de RV in de drie afdelingen.

2.2 Kasklimaat

2.2.1 Temperatuur en RV

In Figuur 11 is het verloop van de kasttemperatuur en de RV weergegeven voor afdelingen 13, 32 (LED) en 23, zoals die zijn gemeten als gemiddelde van twee meetboxen ter hoogte van de kop van het gewas. Opvallend bij afdeling 32 is dat de RV vanaf 30 januari plotseling 10% hoger wordt. Dit is veroorzaakt doordat de meetboxen voor 30 januari dicht bij de uitgeblazen lucht van de LED-lampen hingen. Op 30 januari zijn de meetboxen verplaatst, zodat deze minder werden beïnvloed door de lampwarmte en tijdens belichting en gesloten schermen een $1^\circ C$ lagere temperatuur gingen aangeven. Omdat het gewas naar tevredenheid groeide, is de strategie met geringe buisrail-warmte voortgezet, waardoor de hoeveelheid ingezet warmte ten opzichte van de andere afdelingen laag bleef.

Figuur 11 5-minuutswaarden van de kasttemperatuur (boven) en de RV (onder) bij de drie afdelingen.

2.2.2 Schermstand

Het lage warmtegebruik van afdeling 32 is niet te verklaren door het schermgebruik. De schermstanden in de nacht zijn vergelijkbaar (zie Figuur 12), met rond 6:00 uur meestal een kier van 4-8%.

Figuur 12 5-minuutswaarden van de schermstand bij de drie afdelingen.

2.2.3 Verticale temperatuurverdeling

In zowel afdeling 23 als afdeling 32 (LED) zijn geventileerde sensoren op verschillende hoogten geplaatst om te zien in welke mate de verticale temperatuurverdeling wordt beïnvloed door de lampen. Alle sensoren zijn geplaatst in de buurt van een kaspoot, dus bij de tralie. In februari is de sensor ter hoogte van de gewaskop van de LED-afdeling horizontaal verplaatst naar een plaats tussen de tralies (zie Figuur 13) en daarmee buiten de invloedszone van de lampventilator.

Figuur 13 Sensor op kophoogte tussen de tralies (linksonder) en op lamphoogte onder de tralie (rechtsboven)

In Figuur 14 zijn hiervan cyclische etmaalgemiddelden vergeleken met die van de meetbox, voor een periode voor en na de meetbox verplaatsingen. Uit de Figuur blijkt, dat de verticale temperatuurverschillen in de SON-T afdeling klein zijn, terwijl in de LED-afdeling 32 de meetbox (voor de verplaatsing) gedurende de belichte nacht $\pm 2^{\circ}\text{C}$ hoger is dan de sensoren op vruchthoogte. Na de verplaatsing geeft de meetbox bij de LED-afdeling zowel 's nachts als overdag juist een lagere temperatuur aan dan de sensoren op vruchthoogte. De overige sensoren liggen 's nachts dicht bij elkaar: de temperatuur bij de kop is gemiddeld over het etmaal precies even hoog als ter hoogte van de vruchten. Alleen de sensor ter hoogte van de lampen ligt gemiddeld iets hoger. Wel is bij de LED afdeling te zien dat tijdens de belichte periode met gesloten schermen (tussen 4:00 en 7:00) de temperatuur bij de kop $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ hoger ligt dan ter hoogte van de vruchten. Voor de verplaatsing was dit nog $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Dit is een aanwijzing dat de LED-lampen de koptemperatuur (vooral vlak onder de lampen) relatief meer verhogen dan de SON-T lampen dat doen. Dit is tegengesteld aan de verwachting dat de hogere intensiteit IR-straling van SON-T tot een hogere planttemperatuur zou moeten leiden.

Figuur 14 Cyclische etmaalgemiddelde van de kasluchttemperatuur (°C) op verschillende hoogten in afdeling 23 (SON-T) en 32 (LED) in de perioden voor (boven) en na (onder) de verplaatsing van de meetbox.

2.2.4 Planttemperatuur

Met warmtebeeldcamera's is de gewastemperatuur in afdeling 32 en 13 gedurende enkele nachten geobserveerd. Hoewel de beelden ervan niet scherp zijn (zie Figuur 15), is bij een gelijke bandbreedte van 2,5°C te zien dat het contrast groter is bij de LED afdeling. Dit geeft aan dat het verschil tussen koptemperatuur en lager gelegen plantendelen groter is bij de LED-afdeling dan bij de SON-T afdeling. Dit bevestigt de constatering uit paragraaf 2.2.3.

Figuur 15 Warmtebeelden (boven) en foto's (onder) van het gewas in SON-T afdeling 13 (links) en LED afdeling 32 (rechts) op 8 februari rond 4:00 uur (na ± 3 uur belichting).

2.3 Discussie verticale temperatuurverdeling

De gevonden hogere koptemperatuur bij de LED afdeling is tegengesteld aan de verwachtingen. SON-T lampen zijn veel warmer dan LED lampen en geven dus meer warmtestraling af, waardoor het gewas zou moeten worden opgewarmd. Om een verklaring voor deze tegenstelling te vinden is een eenvoudige simulatie gemaakt van de verschillen in energiestromen bij SON-T en LED (zie Tabel 1).

De lampen zetten een deel van de elektrische energie om in straling (zowel UV, PAR, verrood, NIR, en warmtestraling (FIR)). Voor de golflengtes van 230 tot 1000 nm (UV, PAR, verrood en NIR) is die hoeveelheid gemeten (totaal respectievelijk 52,1 en 41 W/m²). Aangenomen is dat de resterende warmte deels wordt afgevoerd als langgolvlige straling en deels als convectie. Hoe lager de lamptemperatuur en hoe hoger de luchtsnelheid langs de lampen, hoe hoger het aandeel convectie is. Voor SON-T lampen is dat 10% en voor de geventileerde LED lampen 60% van de resterende warmte. Het andere deel van de resterende warmte is stralingswarmte.

Hoeveel straling en convectie daadwerkelijk op de bovenste bladeren terecht komt verschilt per golflengte. Van UV en PAR wordt het grootste deel (90%) door het blad geabsorbeerd. Bovendien is aangenomen dat 10% van de PAR-energie wordt benut voor fotosynthese en daardoor niet bijdraagt aan de verwarming van het blad. Van verrood (FR) en nabij infrarood (NIR) is de absorptie veel lager ($\pm 20\%$). Van de warmtestraling wordt aangenomen dat de helft richting kasdek of scherm en de andere helft richting gewas gaat. Convectieve warmte (vooral geproduceerd bij LED) heeft de neiging om te stijgen, maar door de ventilatoren wordt ook warmte naar beneden gestuurd. Aangenomen is dat 50% van de convectie bijdraagt aan de opwarming van de (bovenkant van) het gewas. Van de warmtestraling die richting de plant gaat, wordt ongeveer 90% geabsorbeerd, waardoor in totaal maar 45% van de warmtestraling door het blad wordt geabsorbeerd.

Tabel 1

Eenvoudige simulatie berekening van de mogelijke hoeveelheid toegevoerde warmte door de lampen aan de (bovenste) bladeren.

	formule	SON-T	LED	absorptie door blad
Elektrisch vermogen	a	110	100	
230-400 nm (gemeten UV)	b	0.3	0.1	90%
400-700 nm (gemeten PAR)	c	37.6	40.1	90%
700-800 nm (gemeten FR)	d	4.1	0.7	20%
800-1000 nm (gemeten NIR)	e	10.1	0.1	20%
Totaal gemeten	$f=b+c+d+e$	52.1	41.0	
Resterende energie	$g=a-f$	57.9	59.0	
Geschat aandeel van resterende energie is convectie	h	10%	60%	
Convectie (W/m ²)	$i=g*h$	5.8	35.4	50%
Warmtestraling (W/m ²)	$j=g-i$	52.1	23.6	45%
Geabsorbeerde totale straling (W/m ²)	$k=\text{somproduct (straling*absorptie)}$	60.4	47.0	
Afvoer voor fotosynthese (W/m ²)	$l=c*\text{absorptie}*10\%$	3.4	3.6	
Opwarming blad straling (W/m ²)	$m=k-l$	57.0	43.4	
Opwarming blad convectie (W/m ²)	$n=i*\text{absorptie}$	2.9	17.7	
Opwarming blad totaal (W/m ²)	$o=m+n$	59.9	61.0	

Uit deze eenvoudige berekening blijkt dat de LED belichting ondanks de lagere hoeveelheid warmtestraling toch iets meer warmte bij de kop van het gewas brengt (61 tov 59.9 W/m²). Deze berekening beoogt geen nauwkeurige schatting te zijn, maar het model kan wel worden gebruikt ter ondersteuning van de discussie. Daarnaast zijn er nog meer factoren die de verticale temperatuurverdeling beïnvloeden:

In de LED-afdeling is veel minder gebruik gemaakt van de (buisrail) verwarming dan in de SON-T afdeling. Hierdoor is vrijwel alle ingezette warmte afkomstig van de lampen, waardoor de temperatuur bovenin snel warmer wordt dan onderin.

Gewasverdamping verlaagt de bladtemperatuur. Verdamping wordt beïnvloed door het dampdrukverschil (temperatuurverschil en RV) tussen blad en kaslucht, de huidmondjesweerstand en de grenslaagweerstand van het blad. Luchtbeweging verlaagt het temperatuurverschil tussen blad en lucht en verlaagt de grenslaagweerstand. Deze invloeden zijn tegenstrijdig, waardoor een nauwkeurige simulatie van de verdamping moeilijk is.

Stralingswarmte dringt dieper in het gewas dan de convectieve warmte van de LED-lampen. Rookproeven lieten zien dat de lucht die uit de LED-lampen werd geblazen niet verder reikt dan de kop van het gewas.

2.4 Discussie warmtegebruik en verdamping

Omdat de verwarming bij de LED-afdeling tijdens de belichte periode in de nacht 22-35 W/m², ofwel 26-47% lager is dan gemiddeld in de twee SON-T afdelingen (zie Figuur 16), en het onderlinge verschil tussen kastemperatuur en buitentemperatuur (delta-T) klein is, is de vraag ontstaan hoe dit verschil in verwarmingsinzet is ontstaan.

Figuur 16 Gemiddelde verwarming (W/m^2 , links) en delta-T ($^{\circ}\text{C}$, rechts) per etmaal over de uren waarbij in alle afdelingen de belichting brandt en het scherm is gesloten. (afd 13, 23 SON-T, afd 32 LED).

2.4.1 Gemeten wateropname

Omdat er minder warmte is ingezet in de LED-afdeling, is te verwachten dat er ook minder verdamping is geweest. Dat blijkt ook uit de registraties van de irrigatie en drain (zie Figuur 17), al blijkt de wateropname van kas 2 (SON-T), waarin afdeling 23, ook veel hoger te zijn geregistreerd dan die van kas 1 (ook SON-T), waarin afdeling 13. Hieruit blijkt de wateropname sterker te zijn beïnvloed door het ras dan door het type belichting. Gemiddeld tot begin februari is de geregistreerde wateropname van kas 3 (waarin afdeling 32) met LED 0,15 respectievelijk 0,48 $\text{l}/(\text{m}^2.\text{dag})$ lager dan van kas 1 en 2 met SON-T. Dat staat voor een verdampingswarmte van gemiddeld 4 en 13 W/m^2 , hetgeen het verschil in verwarming slechts gedeeltelijk verklaart. Als er ook rekening mee wordt gehouden dat voor het afvoeren van vocht meer luchtuitwisseling nodig is (ongeveer 50% latent en 50% voelbaar), dan wordt het verschil met kas 2 voor wat betreft het warmtegebruik volledig verklaard door het verschil in verdamping. Het verschil in warmtegebruik met kas 1 kan er echter niet mee worden verklaard.

Figuur 17 Vergelijking van de wateropname (watergift-drain in $\text{l}/(\text{m}^2.\text{etmaal})$), van de drie kassen.

Met deze berekening zou de hoeveelheid lucht waarmee vocht wordt afgevoerd ook lager moeten zijn in de LED-afdeling. Dit komt niet overeen met de hogere raamstand gedurende de belichte nacht in afdeling 32.

2.4.2 Hypothesen

Hieronder worden drie hypothesen uiteengezet om te pogen de verschillen in warmtegebruik en verdamping te verklaren:

- Hypothese: Inzet van buisrailverwarming leidt tot minder verhoging van de kasttemperatuur bij de kop van het gewas omdat het meer bijdraagt aan de verhoging van de bodemtemperatuur.
 - Buisverwarming geeft ongeveer 50% stralingswarmte af en 50% convectieve warmte. Omdat de buisrail vlak boven de kasbodem ligt, wordt ongeveer de helft van de stralingswarmte aan de bodem afgegeven. Dit betreft ongeveer 10 W/m², maar waarschijnlijk is dat minder, omdat een deel van die bodemwarmte gedurende het etmaal weer wordt afgegeven aan de kaslucht.
- Hypothese: De straling van de SON-T lamp genereert relatief meer verdamping dan de convectie van de LED-lamp.
 - Door straling wordt het blad warmer en dit geeft een hogere dampdruk, wat leidt tot een hoger dampdrukverschil wat de drijvende kracht achter verdamping is. Bij netto hogere straling en geringe luchtbeweging stijgt de bladtemperatuur en zal het blad hoofdzakelijk afkoelen door verdamping. De verdampingswarmte is dan bijna gelijk aan de netto stralingswarmte. Indien het gewas warmer is dan de kaslucht zal luchtbeweging tot afkoeling leiden, waardoor minder energie overblijft voor de verdamping. Indien het gewas koeler is dan de kaslucht, dan leidt luchtbeweging juist tot aanvoer van energie aan het blad, waardoor het meer gaat verdampen. In de LED-afdeling is de extra convectie afkomstig van de lampventilatoren. Deze door de lampen opgewarmde lucht is warmer dan het gewas, waardoor de verdamping boven in het gewas juist wordt gestimuleerd. Gezien de constatering dat de luchtbeweging niet veel verder reikt dan de bovenste bladeren, wordt het effect op de totale gewasverdamping niet hoog geacht.
 - Simulaties met de uitstralingsmonitor (www.glastuinbouwmodellen.wur.nl/radiationmonitor) laten zien dat bij een belichtingsinstallatie van 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ LED lampen met een efficiëntie van 2.0 $\mu\text{mol}/\text{J}$ 11 g/(m²·h) minder verdamping geven dan SON-T lampen. Dat betreft een verdampingswarmte van 7 W/m². Deze waarde ligt tussen de twee berekeningen (4 en 13 W/m²) van paragraaf 2.4.1 in.

2.4.3 Aanbevelingen

Al met al geven deze hypothesen onvoldoende verklaring voor de verschillen in warmtegebruik en verdamping. Om te toetsen of deze LED-lampen daadwerkelijk 31 tot 38% kunnen besparen op de warmtevraag en om te verklaren waardoor dat komt, zullen in minstens twee afdelingen de volgende handelingen en metingen moeten worden uitgevoerd:

- IJking van de buistemperatuurmeter.
- IJking van de waterstromen (watergift en drain).
- Meting van de planttemperatuur (hoge resolutie warmtebeelden) op meerdere hoogten.
- Horizontale temperatuurverdeling op kophoogte en op vruchthoogte.

2.5 Productie

Omdat tegelijkertijd met de teelt in de LED-afdeling geen andere teelt met hetzelfde ras (mini San Marzano) heeft plaatsgevonden, is de effectiviteit van LED op de productie niet gemeten. Wel kunnen hier de bevindingen van de teler worden genoemd, en die zijn dat het gewas onder LED beter is te beoordelen vanwege het brede lichtspectrum, dat het gewas er groeikrachtig uit blijft zien en dat er in de eerste vier maanden van 2018 $\pm 0,5$ kg meer is geproduceerd dan bij hetzelfde ras in het voorgaande seizoen. Aangezien deze vergelijking een andere kas, met een ander belichtingsniveau en een ander buitenklimaat betreft, en omdat vanwege het uitvallen van de lampen niet precies bekend is hoeveel PAR er op het gewas is gekomen, zijn hier verder geen harde conclusies uit te trekken.

3 Conclusies en aanbevelingen

3.1 Conclusies

Het meest opvallende verschil tussen de LED afdeling en de SON-T afdelingen betreft de warmtevraag. In de LED-afdeling was deze tussen 1 december 2017 en 7 april 2018 $\pm 35\%$ lager. Tijdens de belichte periode met gesloten scherm was dit verschil zelfs $\pm 42\%$. Verklaringen hiervan worden gezocht in de lagere verdamping bij LED lampen en door een hoger warmtetransport naar de bodem doordat bij SON-T meer gebruik is gemaakt van buisrail verwarming. Deze hypothesen geven echter geen sluitende verklaring voor de lagere warmtevraag bij LED. Het lage warmtegebruik gaat gepaard met een lagere wateropname, maar het is niet helder of het lage warmtegebruik is veroorzaakt door een lagere gewasverdamping, of dat de lagere gewasverdamping is veroorzaakt door een lagere warmte-inzet van de buisrail. Ook is niet achterhaald wat het aandeel van de ventilator in de LED-armaturen is geweest op het lagere warmtegebruik.

In de kas met de LED lampen was de temperatuur rond de kop van het gewas tijdens de belichte uren hoger dan rond de vruchten, terwijl dat temperatuurverschil bij de SON-T lampen minder groot was. Dit is een bevinding die tegenstrijdig is met eerdere proeven met SON-T en LED lampen en wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de ventilator in de lampen en een lagere warmte-inzet van de buisrail in de LED-kas.

De gewasgroei en productie is onder LED lampen naar wens van de teler verlopen. Om hier kwantitatieve conclusies te kunnen geven is een referentiekas met SON-T lampen en hetzelfde ras nodig.

De LED-lampen geven bij 100 W/m^2 gemiddeld $192 \mu\text{mol}/(\text{m}^2.\text{s})$ en hebben dus een bedrijfsrendement van $1.92 \mu\text{mol/J}$. Dit is hoger dan dat van SON-T lampen, die in kas 1 $187 \mu\text{mol}/(\text{m}^2.\text{s})$ bij 110 W/m^2 gaf, maar $\pm 10\%$ lager dan volgens opgave van de leverancier. Dit zou kunnen komen doordat LED-lampen bij een hogere temperatuur minder PAR afgeven.

Als de LED lampen aan de tralie worden bevestigd en daardoor een breedte van 5 meter moeten overbruggen, dienen voor een gelijke lichtverdeling de gewaskoppen zich minstens 230 cm onder de lampen te bevinden. Bij Lans was deze afstand gemiddeld 180 cm, waar de lichtste plek recht onder de tralie 3 keer zo veel PAR kreeg als de donkerste plek tussen de tralies. Dit verschil heeft zich niet zichtbaar geuit in een ongelijke productie.

Bij gesloten schermen is op kophoogte de luchttemperatuur recht onder de LED-lampen ongeveer $0,5^\circ\text{C}$ warmer dan op kophoogte tussen de lampen.

3.2 Aanbevelingen

Bij de monitoring van de eerste teelt met full-LED op tomaat zijn een aantal verschijnselen waargenomen die niet (volledig) zijn verklaard. Vanwege de gevonden grote verschillen in het warmtegebruik wordt aanbevolen om het onderzoek te vervolgen, waarbij het lage warmtegebruik en de lage verdamping in alle afdelingen moeten worden gecontroleerd door de buistemperatuurmeter en de waterstroommeters te iken, en de temperatuurverdeling met meer sensoren te volgen. De verdamping gedurende de belichte nacht zou dan ook momentaan moeten worden gevolgd (bijv. met prodrain).

Om uitspraken te doen over het effect van het spectrum (en de verticale temperatuurverdeling) op de gewasgroei en productie, is een referentieafdeling nodig met hetzelfde ras (en plantdatum) als in de LED-kas. Vanwege het hoge uitvalpercentage van de LED lampen blijken de lampen nog niet praktijkrijp te zijn. Hiervoor dienen deze robuuster te worden (onder andere tegen vochtige omstandigheden). Ook dient te worden onderzocht waar de 10% lagere PAR-opbrengst door is veroorzaakt. Verder zou kunnen worden onderzocht of het schuin aanbrengen van LED elementen in het armatuur zonder lichtverlies kan zorgen voor een bredere stralingsbundel.

To explore
the potential
of nature to
improve the
quality of life

Wageningen University & Research,
BU Glastuinbouw
Postbus 20
2665 ZG Bleiswijk
Violierenweg 1
2665 MV Bleiswijk
T +31 (0)317 48 56 06
www.wur.nl/glastuinbouw

Rapport WPR-886

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 5.000 medewerkers en 10.000 studenten behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.