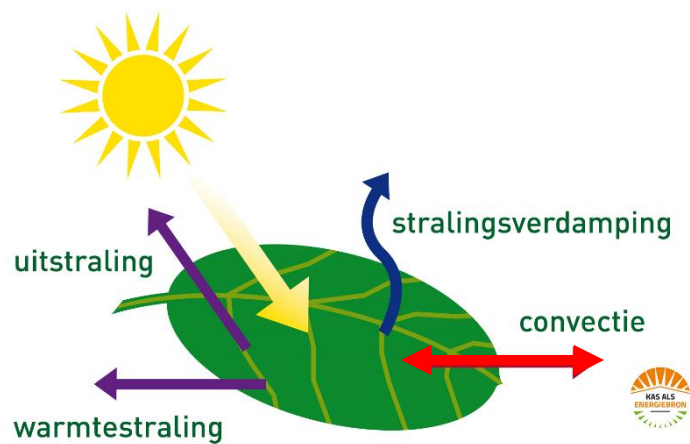


Monitoring huidmondjes: Voldoende opening onder LED-belichting? Deelrapport Paprika



Februari 2022

G. Trouwborst, S.A.J. van den Boogaart, E.P. Noordhoek, S.W. Hogewoning

Monitoring huidmondjes: Voldoende opening onder LED-belichting? Deelrapport Paprika

Februari 2022

G. Trouwborst, S.A.J. van den Boogaart, E.P. Noordhoek, S.W. Hogewoning

Plant Lighting B.V.

Doordraai 1

3981 PE Bunnik

info@plantlighting.nl

www.plantlighting.nl

REFERAAT

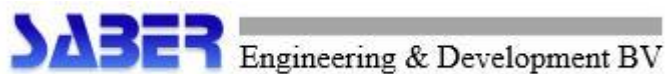
G. Trouwborst, S.A.J. van den Boogaart, E.P. Noordhoek S.W. Hogewoning. 2022.
Monitoring huidmondjes: Voldoende opening onder LED-belichting? Deelrapport paprika.
Plant Lighting B.V., Bunnik. 46p.



Ministerie van Landbouw,
Natuur en Voedselkwaliteit



EXERGEN *Global*
Industrial Sales



Projectnummer: 20143

© 2022 Plant Lighting B.V.

Dit rapport is tot stand gekomen in opdracht van Kas als Energiebron. 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 Plant Lighting B.V. en de bovengenoemde opdrachtgever.

Plant Lighting B.V. is niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen als gevolg van gebruik van gegevens uit dit rapport.

Inhoudsopgave

REFERAAT	3
INHOUDSOPGAVE.....	4
DANKWOORD.....	5
SAMENVATTING.....	6
1 ACHTERGROND EN DOEL.....	8
1.1 Kader onderzoek.....	8
1.2 Probleemstelling onderzoek.....	8
1.3 Doelen samengevat en leeswijzer.....	9
2 MATERIAAL EN METHODEN.....	11
2.1 Proefopzet.....	11
2.2 Warmtestraling	13
2.3 Watergift en klimaat.....	14
2.4 Metingen	15
2.5 De energiebalansmethode samengevat.....	16
3 GEWASONTWIKKELING EN EINDOOGST.....	18
4 RESULTATEN HUIDMONDJESGELEIDING EN FOTOSYNTHESE	21
4.1 Resultaten	21
4.2 Conclusie huidmondjesgeleiding en fotosynthese	25
5 VANGRAILS: WAT IS DE MINIMAAL BENODIGDE OPENING?	26
6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN.....	30
6.1 Conclusies.....	30
6.2 Aanbevelingen	32
REFERENTIES.....	33
BIJLAGE 1 TOEPASSING VAN DE ENERGIEBALANS.....	34
B1.1 Absorptie van straling door bladeren.....	34
B1.2 Energiebalans van de behandelingen	37
B1.2.1 Blad & luchttemperatuur	37
B1.2.2 RV en VPD	41
B1.2.3 Opstelling van de balans.....	41
Conclusies energiebalans	45

Dankwoord

Dit deelrapport is onderdeel van het project “Monitoring huidmondjes: Voldoende opening onder LED-belichting?”. Dit deelrapport geeft de resultaten weer van onderzoek naar de huidmondjesopening van paprika. Dit onderzoek vond plaats in klimaatcellen van Plant Lighting en was gericht op het achterhalen of de energie-input onder LED-belichting voldoende is voor een huidmondjesgeleidbaarheid die niet beperkend is voor de CO₂-opname. In een tweede deelrapport ligt de nadruk op praktijktoepassing van de ‘stomatasensor’ in de kas bij het matig verdampende gewas Anthurium.

Dit onderzoek is ondersteund door het programma ‘Kas als Energiebron’, gefinancierd door het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit en Glastuinbouw Nederland. De gebruikte planttemperatuursensoren zijn gesponsord door Exergen Global B.V. en Saber B.V. We willen Bram Stelt (Exergen) en Rene Stokwielder (Saber) danken voor het meedenken en beschikbaar stellen van de sensoren.

Als laatste willen we de onderzoekscoördinatoren Dennis Medema en Leo Oprel van het programma Kas als Energiebron bedanken voor hun steun bij de totstandkoming en uitvoering van dit project.

Februari 2022,

Sander Hogewoning

Samenvatting

Introductie en doelstelling

Huidmondjes spelen een cruciale rol in de assimilaten-, vocht- en energiebalans. Een te beperkte opening remt de groei. Echter, als huidmondjes verder open staan dan nodig, dan leidt de extra verdamping tot onnodig energieverbruik. “Live” inzicht in de openingsstand van de huidmondjes is dus zeer gewenst. Bij meerdere projecten is gebleken dat de huidmondjesgeleidbaarheid van paprika onder LED-licht zeer laag was. Zodanig laag zelfs dat de fotosynthese bij de 200-300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR beperkt werd. Het is dus zaak om te achterhalen wat onder LED-licht de minimale energie-input moet zijn om voldoende huidmondjesgeleidbaarheid te creëren voor een gezonde plant-ontwikkeling en fotosynthese. Onvoldoende huidmondjesgeleidbaarheid voor een goede benutting van LED-licht kan namelijk verdere implementatie van LED in de weg staan en dat is een gemiste kans.

In dit onderzoek stonden er één hoofdonderzoeksvraag en twee nevenvragen centraal:

1. Is er voldoende huidmondjesopening onder LED-belichting?
2. Kan er een ‘vangrail’ tussen noodzaak en overmaat worden opgesteld om te kunnen beoordelen wat de minimaal benodigde huidmondjesgeleidbaarheid zal moeten zijn bij een bepaald lichtniveau, zodat de CO_2 -opname niet beperkt wordt?
3. Wat voor inzichten biedt de energiebalans-methode (balans van warmte-overdracht via straling, convectie en verdamping op blad- of gewasniveau) op het niveau van een klimaatcabine om de huidmondjesgeleidbaarheid te berekenen?

Materiaal en methoden

In vijf klimaatcabines van Plant Lighting werden er vijf behandelingen uitgevoerd die verschilden in stralingsenergie en lightspectrum.

• SON-T:	190 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR	76W/ m^2 energie
• LED 6% blauw:	190 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR	43W/ m^2 energie
• LED hoog PAR, 6% blauw:	332.5 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR	75W/ m^2 energie
• LED 30% blauw:	190 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR	47W/ m^2 energie
• LED + warmtestraling:	190 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR	76W/ m^2 energie

Alle klimaatcabines hadden als basis achtergrondlicht een winter-daglichtsimulatie: 8 uur lang 80 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ kunstzonlicht. Paprikaplanten cv. ‘Mavera’ zijn vervolgens opgekweekt en met intervallen is de huidmondjesgeleidbaarheid bepaald met een draagbare fotosynthesemeter.

Resultaten en conclusies

Het hoofddoel van dit onderzoek was het achterhalen of de energie-input onder LED-belichting voldoende is voor een huidmondjesopening zodat de fotosynthese niet beperkt wordt. Op bovenstaande vijf manieren is er een verschillend energie-aanbod gegeven. Alleen LED 30% blauw gaf een significant hogere huidmondjesgeleidbaarheid en fotosynthese, alle andere behandelingen verschilden nauwelijks van elkaar ondanks het verschil in aangeboden

stralingsenergie. Het blijkt dat het lightspectrum een grotere rol speelt dan de aangeboden stralingsenergie voor wat betreft de huidmondjesgeleidbaarheid.

In eerste instantie wijzen de resultaten de richting dat waar huidmondjesbeperking van de fotosynthese optreedt, het percentage blauw in de lamp zal moeten worden opgevoerd. Het derde doel: de energiebalans-methode toegepast in de klimaatkamer biedt een belangrijke nuancering. De resultaten van de gemeten en berekende huidmondjes-geleidbaarheid laten zien dat in deze proef niet het aanbod van energie leidend was in de huidmondjesgeleidbaarheid, maar de afvoer van energie: enerzijds via convectie, anderzijds via verdamping. Oorzaak en gevolg kunnen hierin formeel niet onderscheiden worden. Bij de behandelingen SON-T en LED + warmte (hoge energie-input) lijkt het erop dat er een dusdanig hoge convectieve afdracht van energie was doordat de binnenkomende luchttemperatuur 2-3°C koeler was dan de bladtemperatuur waardoor er nauwelijks verdamping plaats hoefde te vinden. Bij de behandeling LED 30% blauw waren de huidmondjes verder open waardoor het erop lijkt dat de verdamping dusdanig hoog was dat de convectieve afdracht van energie automatisch laag is geworden. In de praktijk zal dus in de situatie van LED-belichting én een huidmondjesbeperking op de fotosynthese allereerst de uitstraling (is afvoer van energie) moeten worden geminimaliseerd en de convectieve afdracht van energie moeten worden verkleind zodat de verdamping de primaire afvoer van energie wordt. Pas als dit onvoldoende oplossing biedt, zal gedacht kunnen worden aan het verhogen van het percentage blauw.

Het tweede doel was het opstellen van een 'vangrail' voor de huidmondjesopening. Er zijn twee grote beperkingen van de fotosynthese bij een gegeven lichtniveau bij gewassen die verder onder gunstige omstandigheden groeien, namelijk het CO₂-niveau in de kas en de huidmondjesgeleidbaarheid. Voor optimale sturing kunnen de effecten van CO₂ en huidmondjesgeleidbaarheid als volgt in beeld gebracht worden:

- Huidmondjes: 'Live' de huidmondjesgeleidbaarheid via de energiebalansmethode in beeld brengen ten opzichte van de gewenste huidmondjesgeleidbaarheid via een fotosynthesemodel.
- CO₂: Hiervoor moeten drie lijnen 'live' in beeld worden gebracht: (1) De maximaal haalbare fotosynthese bij CO₂-verzadiging, ten opzichte van (2) de door CO₂ beperkte fotosynthese (dat is de maximaal haalbare fotosynthese gegeven het CO₂-niveau in de kas). En (3) de 'live' fotosynthese die mogelijk ook door de huidmondjes wordt beperkt.

Het verdient aanbeveling om de fotosynthese van bladeren bovenin het gewas online in beeld te brengen. Dit kan door een betrouwbaar mechanistisch fotosynthesemodel mee te laten draaien op dataplatforms zoals Letsgrow. Als afgeleide hiervan kunnen beperkingen in de fotosynthese in beeld worden gebracht. Als deze in beeld zijn, dan kunnen licht, CO₂ en warmte efficiënter benut worden door te voorkomen dat de huidmondjesgeleidbaarheid beperkend is voor de fotosynthese. Anderzijds kan warmte efficiënter benut worden door te voorkomen dat huidmondjes onnodig ver open staan, waardoor meer (latente) warmte moet worden afgelucht (ontvochtigen), of kan door inzicht te geven in de huidmondjesgeleidbaarheid worden voorkomen dat onnodig veel verneveld wordt, waardoor veel warmte verloren gaat.

1 Achtergrond en doel

1.1 Kader onderzoek

Belichting is voor meer dan 80% verantwoordelijk voor het stroomverbruik in kassen. Het programma Kas als Energiebron zet, naast vergroening van de elektriciteit, volop in op reductie van elektriciteit voor belichting. Hierin is de overgang van SON-t naar LED-belichting cruciaal. Hiernaast wordt door Kas als Energiebron gewerkt aan reductie van CO₂-input om een klimaatneutrale glastuinbouw mogelijk te maken. De huidmondjes spelen een cruciale rol in de CO₂- en lichtbenutting van planten. Voor een duurzame inzet van elektriciteit voor belichting en van CO₂ is het ook belangrijk dat huidmondjes de potentieel mogelijke CO₂-opname voor de fotosynthese niet beperken. Het streven is immers zoveel mogelijk productie bij zo min mogelijk input. Anderzijds moet worden voorkomen dat de huidmondjes verder open staan dan nodig. Dan wordt namelijk de verdamping ook onnodig hoog, wat via het afvoeren van vocht veel energie in de vorm van latente warmte kost. Huidmondjes fungeren dus als een soort vangrail tussen noodzaak en overmaat.

1.2 Probleemstelling onderzoek

Huidmondjes spelen een cruciale rol in de assimilaten-, vocht- en energiebalans van een gewas. Een te beperkte opening remt de groei. Echter, als huidmondjes verder open staan dan nodig, dan leidt de extra verdamping tot onnodig energieverbruik. “Live” inzicht in de openingsstand van de huidmondjes is dus zeer gewenst.

In 2019 is het project ‘Monitoring van huidmondjesopening in de kas’ afgerond (Trouwborst *et al.* 2019). De hoofddoelstelling van dat onderzoek was de ontwikkeling van een zogenaamde ‘stomatasensor’, waarmee op een robuuste, betrouwbare en betaalbare wijze de huidmondjesgeleidbaarheid (Gs) in een kassituatie vastgesteld kan worden. Het is gebleken dat de stomatasensor—gebaseerd op de energiebalans zoals geïntroduceerd door Voogt en van Weel (2008)—dit in principe kan bieden bij de testgewassen anthurium (laag verdampend) en paprika (middel- tot hoog verdampend afhankelijk van het seizoen). Dit houdt in dat deze aanpak kan gaan werken voor de meeste kasgewassen, omdat deze qua huidmondjesgeleidbaarheid en verdamping tussen een anthurium en een paprika inzitten. Voor het laagverdampende gewas anthurium was er nog wel een aanpassing nodig via het gebruik van een netto stralingsmeter. Deze aanpassing is uitgewerkt in het deelrapport voor anthurium (Trouwborst *et al.* 2022).

Redenerend vanuit de energiebalans is er pas noodzaak dat een blad zich koelt door verdamping via de huidmondjes, als er voldoende energie aangevoerd wordt welke niet op een andere manier weer wordt afgevoerd (convectie, uitstraling). Dit geeft aanleiding tot de

vraag of belichting met LED wel altijd voldoende energie aanvoert naar het blad om de huidmondjes voldoende te doen openen. Immers, onder LED-belichting is de warmtelast die de planten via straling ervaren significant lager dan onder daglicht en SON-T. Onder RB LED-licht is de warmtelast in W/m^2 zelfs nog minder dan de helft ten opzichte van eenzelfde intensiteit PAR aan daglicht of SON-t. Bij een recent belichtingsonderzoek aan paprika in klimaatcellen van Plant Lighting (Van den Boogaart *et al.* 2019), viel op dat de huidmondjesgeleidbaarheid zeer laag was. Zodanig laag zelfs dat de assimilatie bij de 200-300 $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ PAR aan groeilicht in de cellen beperkt werd. Enerzijds is een lagere verdamping gunstig vanwege een lagere warmtebehoefte voor vochtafvoer, maar in dit geval was de huidmondjes-opening zo beperkt dat het productie (en dus elektra) kost door beperking van de fotosynthese. Deels kan de huidmondjesbeperking weer overwonnen worden door het CO_2 -gehalte in de kas nog verder te verhogen. Het blijft echter zo dat er een minimale verdamping nodig is voor een gezonde plantontwikkeling. Het is dus zaak om te achterhalen wat onder LED-licht de minimale energie-input moet zijn om voldoende huidmondjesgeleidbaarheid te creëren voor gezonde plant-ontwikkeling en fotosynthese, of hoe anderszins voldoende huidmondjesgeleidbaarheid kan worden gestimuleerd.

Met inzicht in de huidmondjesdynamiek kan de tuinder uiteindelijk effectiever sturen op een optimale productie met een zo laag mogelijk energieverbruik: Niet meer verdamping dan nodig (energiebesparing), maar voldoende huidmondjesgeleidbaarheid om licht, CO_2 en warmte goed te kunnen benutten. Zeker bij de toepassing van LED lijkt dit inzicht erg belangrijk te worden.

De doelstelling van dit onderzoek is kennisontwikkeling over het gedrag van huidmondjes onder LED-belichting (Paprika), en het betrouwbaar kunnen meten en interpreteren van huidmondjesgeleidbaarheid in een praktijksituatie (Anthurium). Er zijn twee werkpakketten (WP's) geformuleerd met ieder een eigen doelstelling:

- WP1: Nut en noodzaak van huidmondjesopening onder LED-belichting bij het voorbeeldgewas paprika: wat is de minimale energietoevoer zodat de huidmondjesopening de fotosynthese niet beperkt? Deze vraag geldt in brede zin bij telen onder full-LED belichting en wordt uitgewerkt in dit rapport.
- WP2: Ontwikkeling en validatie van de stomata-sensor die mede gevoed wordt door een netto stralingsmeter. Dit WP wordt uitgevoerd bij voorbeeldgewas anthurium. Dit werkpakket is uitgewerkt in een apart deelrapport.

1.3 Doelen samengevat en leeswijzer

In dit onderzoek staan één hoofdvraag en twee nevenvragen centraal:

1. Is er voldoende huidmondjesopening onder LED-belichting?

- Achterhalen of de energie-input onder LED-belichting voldoende is voor een huidmondjesopening die niet beperkend is voor de CO_2 -opname bij paprika.
- Hoofdstuk 4.

2. Kan er een 'vangrail' worden opgesteld om te kunnen beoordelen wat de minimaal benodigde huidmondjesgeleidbaarheid (G_s) zal moeten zijn:
 - Op basis van de resultaten zal worden berekend wat de minimaal benodigde huidmondjesgeleidbaarheid (G_s) zal moeten zijn bij een bepaald lichtniveau, zodat de CO_2 -opname niet beperkt wordt. Hoofdstuk 5.
3. Wat voor inzichten biedt de energiebalans-methode (balans van warmte-overdracht via straling, convectie en verdamping op blad- of gewasniveau) op het niveau van een klimaatcabine om de huidmondjesgeleidbaarheid te berekenen?
 - Op basis van de energiebalans wordt er een belangrijke nuancering aan de gevonden resultaten die gepresenteerd staan in hoofdstuk 4 toegevoegd. Bijlage 1.

In hoofdstuk 2 staan de materiaal en methoden en hoofdstuk 3 geeft de gewasontwikkeling bij de proefbeëindiging weer. Hoofdstuk 6 sluit af met conclusies.

2 Materiaal en methoden

2.1 Proefopzet

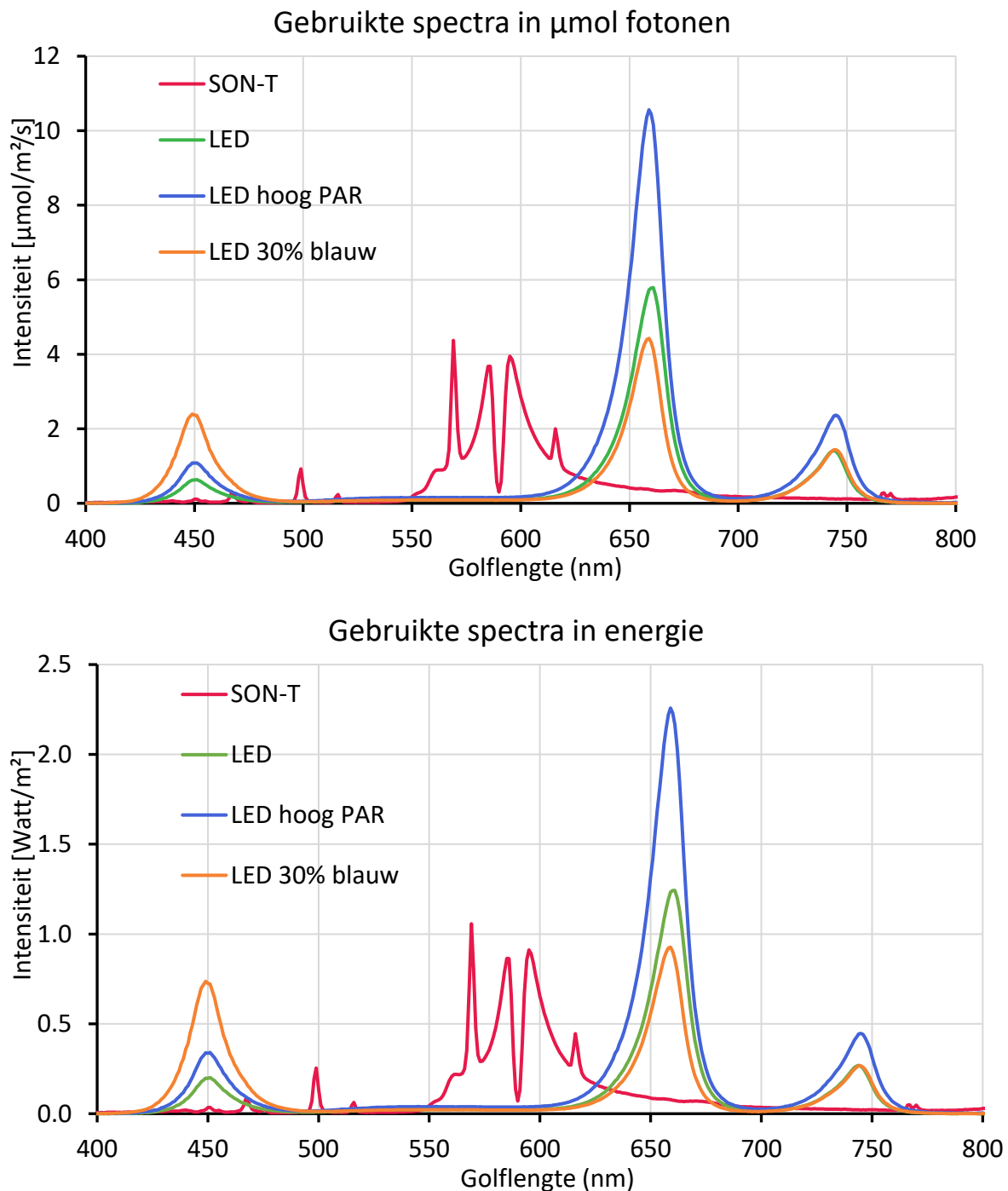
In vijf klimaatcabines (1.25m² per cabine), werden er vijf behandelingen uitgevoerd die verschilden in stralingsenergie en lichtspectrum. Alle cabines hadden als basis een winterlichtsimulatie: 8 uur lang 80 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ kunstdaglicht. Zaailingen Paprika cv. 'Mavera' van 17 dagen oud werden geleverd door plantenkwekerij Plantise en bij Plant Lighting op het blok (Grodan Plantop) gezet (22/10/2020).

Het hoofddoel van de proef was om te achterhalen of de energie-input onder LED-belichting voldoende is voor een huidmondjesgeleidbaarheid die niet beperkend is voor de CO₂-opname. Daartoe zijn er 5 verschillende belichtings-strategieën getoetst welke verschillen in stralingsenergie en/of lichtspectrum (Tabel 1 geeft de details weer):

- SON-T.
- LED (controle): 6% blauw / 10% wit / 84% rood / 20% verrood. NB 20% verrood is niet gebruikelijk maar bij paprika een voorwaarde om een extreem gedrongen gewas te voorkomen (onderzoek: Delphy IC& Plant Lighting: Hoe wordt jaarrondproductie van paprika rendabel?).
- LED met verhoogde intensiteit PAR waardoor er evenveel invallende stralingsenergie is als bij SON-t.
- LED 30% blauw: 10% wit / 30% blauw / 60% rood / 20% verrood.
- LED (controle) + IR-warmtestraling (zie hoofdstuk 2.2, met net zoveel stralingsenergie als SON-T). De hoeveelheid IR-warmtestraling is ingesteld via het bereiken van eenzelfde temperatuur van de bodem van de nog lege cabine en nagemeten met een netto stralingsmeter.

Tabel 1. Intensiteit, energie en spectrale verdeling in %PAR van de verschillende behandelingen. NB de witte LED bestaat ruwweg uit 30% blauw, 50% groen en 20% rood. Vandaar dat het percentage blauw en rood respectievelijk 3% en 2% hoger ligt dan in bovenstaande opsomming. PSS staat voor de berekende balans tussen actief en inactief fytochroom.

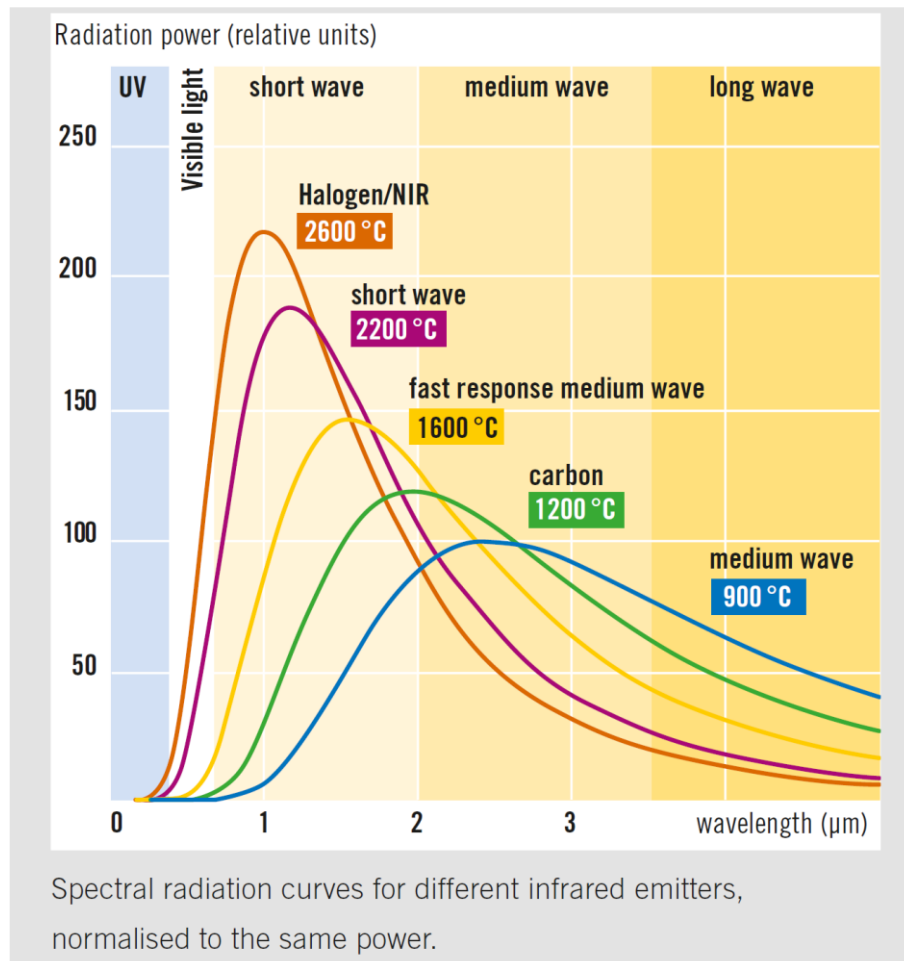
	SON-T	LED	LED hoog PAR	LED 30% blauw	LED + warmte
Intensiteit	190	190	332.5	190	190
Energie	76	43	75	47	43+ ~33=~76
Blauw (400-500nm)	5%	9%	9%	34%	9%
Groen (500-600nm)	55%	5%	5%	5%	5%
Rood (600-700nm)	40%	86%	86%	61%	86%
Verrood (700-800nm)	8%	20%	20%	20%	20%
PSS	0.86	0.84	0.84	0.81	0.84



Figuur 1. Spectrale verdeling in PAR (boven) en in energie (onder) van de verschillende behandelingen. NB de behandeling LED + warmte heeft hetzelfde spectrum als LED en is daarom niet afgebeeld.

2.2 Warmtestraling

Voor de behandeling LED + warmte is een 'medium wave infrarood verwarmmer' gebruikt (500W dimbaar, Heraeus Noblelight, Hanau, Duitsland). Het spectrum van de nabij-infrarode straling staat weergegeven in Figuur 2 (blauwe lijn).



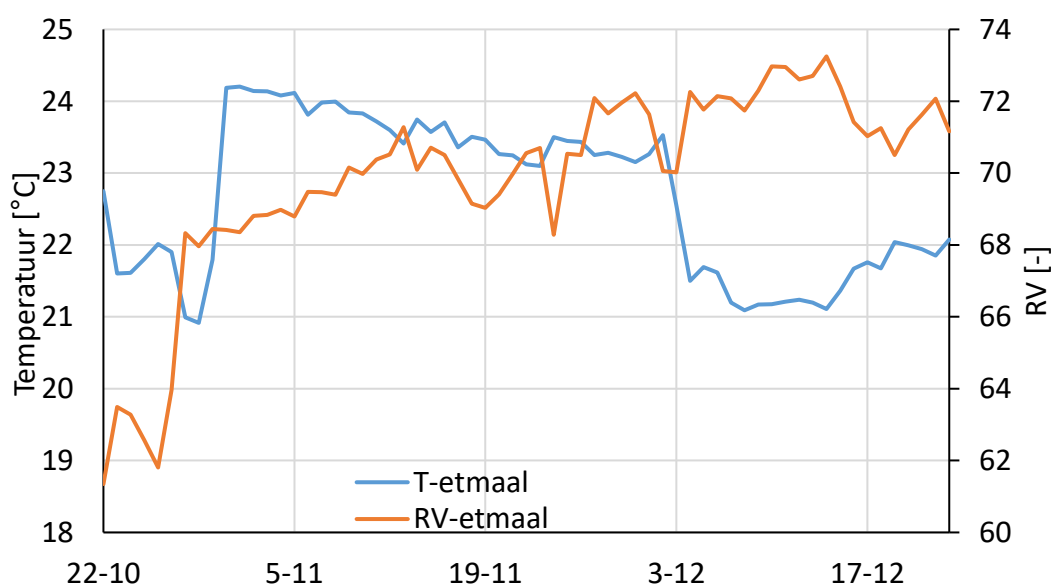
Proportion of heat				
	< 2μm	2–4μm	> 4μm	Typical emitter
600 °C	2,2 %	37,2 %	60,6 %	Ceramic/Metal Sheathed
900 °C	13,0 %	46,4 %	40,6 %	Standard Medium Wave
1200 °C	26,1 %	46,9 %	27,0 %	Carbon
1600 °C	43,2 %	40,1 %	16,7 %	Fast Response Medium Wave
2200 °C	62,5 %	28,7 %	8,8 %	Short Wave
2700 °C	73,3 %	21,0 %	5,7 %	Halogen/NIR
3000 °C	77,9 %	17,6 %	4,5 %	High Powered Halogen/NIR

Figuur 2. Spectra van infrarood verwarmers (Heraeus Noblelight, Hanau, Duitsland). De Medium wave 900°C is in de proef gebruikt (blauw).

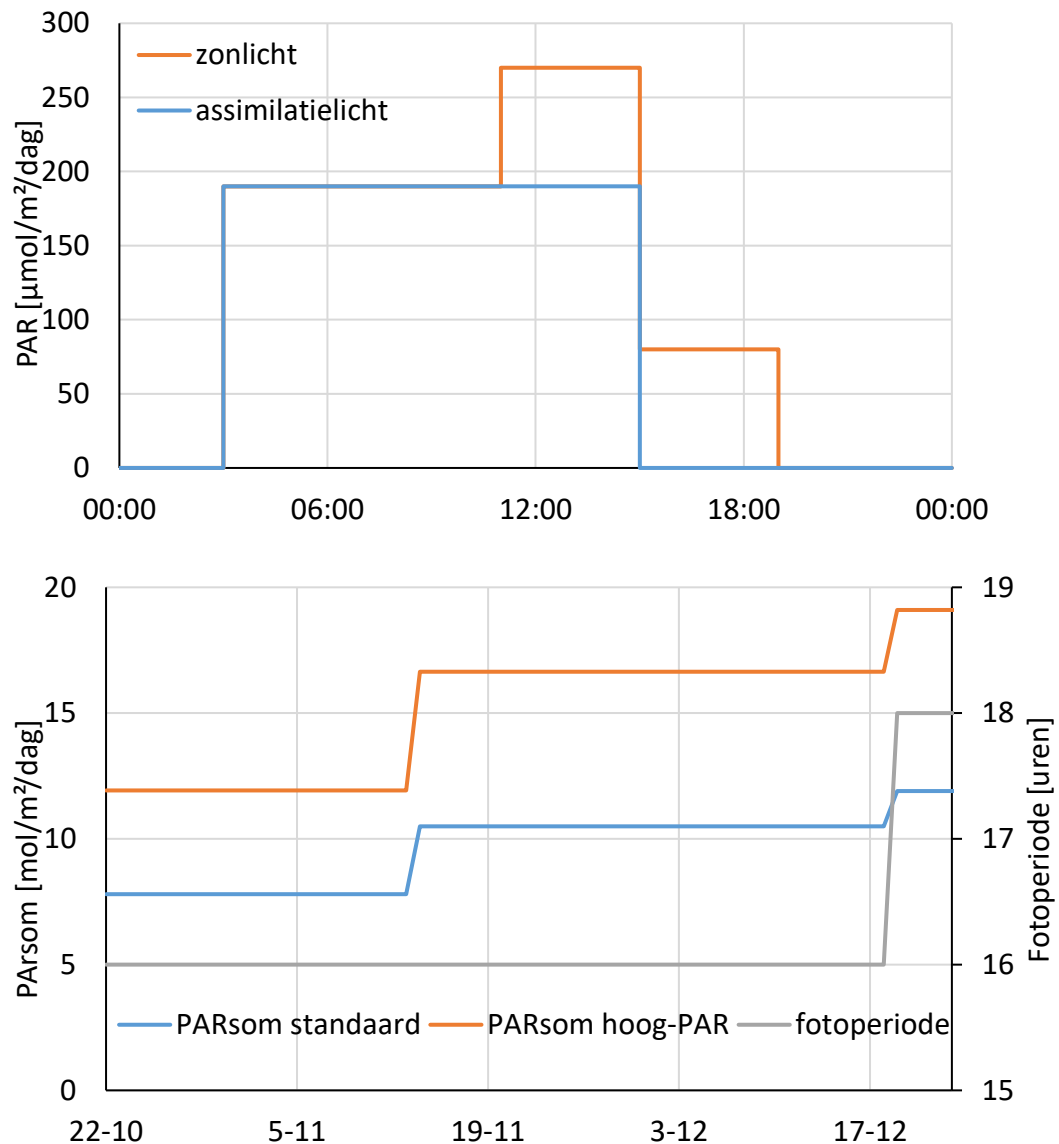
2.3 Watergift en klimaat

Er werd water gegeven naar behoefte. Er werd gegoten met een EC van 3.5 en een pH van 5.2 (standaard paprika voedingsschema). De eerste week nadat de zaailingen op het blok zijn gezet is een etmaaltemperatuur van 22°C aangehouden. Na een week is de etmaaltemperatuur verhoogd naar 24°C om de vegetatieve ontwikkeling van het gewas te versnellen. Omdat bleek dat de vruchtzetting alleen goed ging bij de behandeling 'LED hoog PAR' is de etmaaltemperatuur weer verlaagd naar 21.5°C. Het verloop van het klimaat staat weergegeven in Figuur 3.

De lichtsom is ook stapsgewijze verhoogd gedurende de teelt. Er is, behalve in de behandeling LED hoog PAR, begonnen met een PARsom van 7.8 mol/m², vervolgens 10.5 mol/m² en eindigend op 11.9 mol/m² (Figuur 4). Dit werd verkregen door het aantal uren assimilatielicht stapsgewijs te verhogen van 8 naar 12 naar 14 uur. Het daglicht (8 uur 80 µmol/m²/s kunstdaglicht) was ingesteld van 11:00-19:00. De dag was dus enkele uren verlegd ten opzichte van een natuurlijke winterdag, omdat dit beter uitkwam ten aanzien van de uit te voeren metingen. Het assimilatielicht schakelde aan van 3:00-11:00, van 3:00-15:00 en in de laatste week van 1:00-15:00 (Figuur 4). In tabel 2 staan de belangrijkste teelthandelingen (schakelingen licht, temperatuur en plantdichtheid) vermeld.



Figuur 3. Etmaaltemperatuur en RV gedurende de proef.



Figuur 4. Dagverloop lichtintensiteit van week 46-51 (boven) en PARsom & fotoperiode (onder) gedurende de proef. Tijdens de dag ontstonden er dus drie tijdvakken: alleen bijbelichting met $190 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ($332.5 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ bij behandeling LED hoog PAR), bijbelichting + zonlicht met $270 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ($412.5 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ bij behandeling LED hoog PAR) en alleen zonlicht met $80 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$.

2.4 Metingen

Er werden metingen gedaan van de luchttemperatuur, RV, en de bladtemperatuur (Foto 1):

- Luchttemperatuur en RV: E+E Elektronik, type 071. De sensor was geplaatst ~ 10 cm onder de 'kop' van het gewas.
- Bladtemperatuur: Exergen micro IR uitgerust met een lens van 1:3. Deze werden geplaatst ~ 10 cm boven het gewas, dit geeft een meetvlak van ~ 30 cm doorsnee= 707cm^2 . Doordat de plant naar de sensor toegroeit, verkleinde het meetoppervlak wat tussen de bijstellingen van de sensor door.

De meting van de huidmondjesgeleidbaarheid en de fotosynthese werd uitgevoerd met een LI-6800 draagbare fotosynthesemeter (Foto 2). Deze metingen zijn gedaan bij een vast lichtniveau van 300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR en een CO_2 -niveau van 800 ppm en waren kortdurend (2-3 minuten per meetblad). De heersende lichtintensiteiten in de behandelingen gedurende de dag: alleen bijbelichting, bijbelichting + zonlicht en alleen zonlicht (zie Figuur 4) zijn dus niet gevolgd. Aangezien huidmondjes relatief traag reageren op veranderende omstandigheden (pas na 5-10 minuten), is dat niet erg. Feitelijk wordt zo de huidmondjestoestand van het blad net voordat het in de Li-6800 wordt ingeklemt, vastgelegd. Bij langdurigere meting zal de huidmondjesgeleidbaarheid wel reageren op de heersende energiebalans in de meetcuve.

Tabel 2. Tijdslijn proef.

Weeknr	Actie
Wk 41	maandag 5/10 planten gezaaid bij Plantise
Wk 43	Donderdag 22/10 zaailingen op blok bij Plant Lighting PARsom 7.8 mol: 2.3 mol Zonlicht en 5.5 mol assimilatielicht (8 uur) Tetmaal= 22°C / CO_2 =600 ppm, sturing op gelijke luchttemperatuur in iedere behandeling via verwarming bij de luchtinlaat
Wk 44	Zaterdag 31/1 Tetmaal= 24°C / CO_2 =600 ppm
Wk 46	Zaterdag 14/11 assimilatielicht naar 8.2 mol (12 uur → 4 uur overlap met Zonlicht) Totaal 10.5 mol PAR, in behandeling LED hoog PAR naar 16.6 mol PAR
Wk 47	Maandag 16/11: Aantal planten van 25 naar 20 per cabine Woensdag 18/11: Aantal planten van 20 naar 16 per cabine Vrijdag 20/11: Tetmaal ~23.8°C / CO_2 =800 ppm
Wk 48	Dinsdag 24/11: Aantal planten van 16 naar 12 per cabine
Wk 49	Woensdag 2/12: Aantal planten van 12 naar 9 per cabine Snoeien koppen naar 3 stengels/plant Donderdag 3 dec: Tetmaal naar ~22°C besluit om sturing op gelijke luchttemperatuur per behandeling los te laten en te sturen op een gelijke inblaasttemperatuur
Wk 50	Maandag 8/12: snoeien planten naar 2 stengel/plant
Wk 51	Dinsdag 15 december: Aantal planten van 9 naar 6 per cabine Zaterdag 19/11: 18 uur daglengte: 9.6+2.3=11.9 mol PAR, in behandeling LED hoog PAR naar 19.1 mol PAR.
Wk 52	Donderdag 24/12: beëindiging proef (eindoogst)

2.5 De energiebalansmethode samengevat

Voogt en van Weel (2008) hebben de energiebalansmethode (balans van warmte-overdracht via straling, convectie en verdamping op blad- of gewasniveau) om de huidmondjesgeleidbaarheid te berekenen in de Nederlandse tuinbouw geïntroduceerd. In Trouwborst *et al.* 2019 staat in bijlage 2 de berekening van huidmondjesgeleidbaarheid (G_s) via de energiebalans uitgebreid uitgewerkt. Om te komen tot een berekening van de huidmondjesgeleidbaarheid wordt de energiebalans-theorie gecombineerd met de massa-transfer theorie (Katsoulas & Stanghellini, 2021). Kort samengevat komt het op het volgende neer:

- Energiebalans: $I^*E = R_n - Q$
- Massa transfer: $G_s = E/VPD$

Hierbij staat l voor de verdampingswarmte van water (2256 kJ/kg), E voor transpiratie (kg/m²/s), R_n (W/m²) voor de netto straling, en Q voor de convectieve warmteoverdracht (W/m²). VPD staat voor het dampdrukdeficit tussen kaslucht en de plant (kPa) en G_s voor de huidmondjesgeleiding (kg/m²/s/kPa; G_s wordt ook vaak uitgedrukt in de eenheid mol/m²/s). Q wordt berekend als:

$$Q = h(T_{\text{kas}} - T_{\text{gewas}})$$

Hierbij staat h voor de warmteoverdrachtscoëfficiënt (W/m²/K) en T_{kas} en T_{gewas} voor de lucht- en planttemperatuur (°C of K). Meerdere onderzoeken hebben uitgewezen dat hoewel h formeel afhankelijk is van de grenslaagweerstand en dus ook van de windsnelheid, er met een vaste constante mag worden gerekend (Stanghellini *et al.* 2019, Katsoulas & Stanghellini, 2021). In dit onderzoek is gerekend met een vaste waarde van 7 W/m²/K.



Foto 1. Metingen blad- en luchttemperatuur en RV met respectievelijk een Exergen micro-sensor en een E+E Elektronik, type 071.

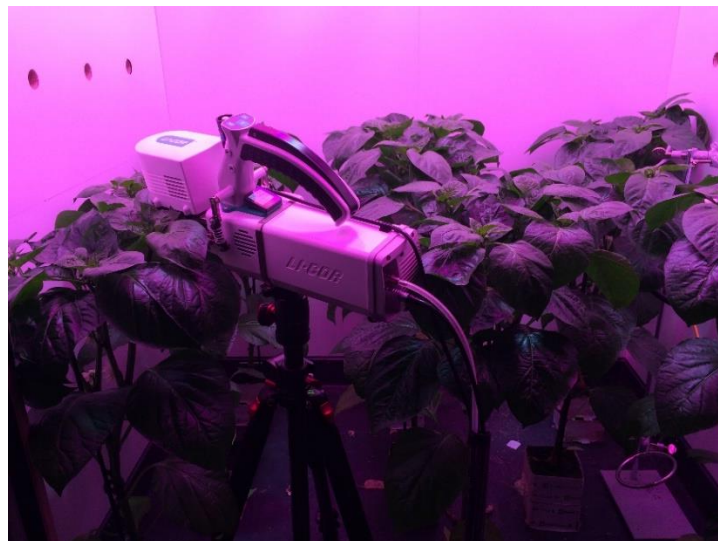


Foto 2. Metingen G_s en CO_2 -opname met een Li-6800.

3 Gewasontwikkeling en eindooft

Foto 3 geeft een indruk van de gewasstadia gedurende de proef van zaailing tot eindooft.

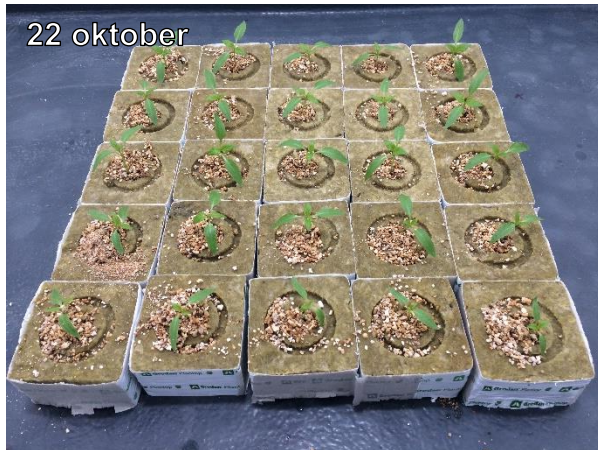


Foto 3. Proefverloop in foto's op momenten dat de plantdichtheid is verlaagd. Te zien is dat het aantal planten per cabine stapsgewijs verlaagd is van 25 naar 20 naar 16 naar 9 naar 6 planten per cabine.

Dit onderzoek was specifiek gericht op het effect van verschillende stralings-strategieën op de huidmondjesopening. Het ging dus om het functioneren van de bladeren in de top van het gewas, en niet om het gewas zelf. Toch laat de gewasontwikkeling enige leerpunten zien:

- De planten zijn onder SON-T en LED hoog PAR het kortst (Tabel 3):
 - Voor SON-T ligt dit mogelijk aan de PSS omdat dit spectrum resulteert in een iets hogere PSS (Tabel 2). De algemene lijn is hoe hoger de PSS, hoe compacter.
 - LED hoog PAR is mogelijk korter door een hogere intensiteit, maar het kan ook verklaard worden door een snellere ontwikkeling van plantbelasting: de vruchten zetten beter en een hoge plantbelasting gaat strekking tegen.
- Tot 3 december bleven de behandelingen met 190 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ vruchtjes aborteren. Alleen LED hoog PAR (332 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) liet veel meer vruchtzetting zien. Dit laat zien dat de etmaaltemperatuur te hoog was ten opzichte van de lichtsom (behalve bij behandeling LED hoog PAR). Bij de eind oogst op 24 december was er min of meer een gelijk aantal vruchten/plant in alle behandelingen, maar onder hoog PAR waren deze veel verder ontwikkeld (Tabel 3 en Foto 4).

Tabel 3. Eind oogst proef. NB door het lage aantal planten ($n=6$) moeten de resultaten niet kwantitatief geïnterpreteerd worden.

	SON-T	LED	LED hoog PAR	LED 30% blauw	LED + warmte
lengte [cm]	83	96	83	101	101
FW plant [g]	269	256	232	268	271
FW vrucht [g]	161	118	396	161	153
aantal vruchten	5.8	5.3	5.8	5.8	5.3
FW per vrucht [g]	31.8	22.8	68.4	31.0	30.7
totaal FW [g]	431	374	627	429	425



Foto 4. Planten 9 dagen voor einde proef (15 december). Te zien is dat de vruchten groter zijn bij LED hoog PAR. Tevens zijn de planten opgegroeid onder SON-T en LED hoog PAR het kortst.

4 Resultaten huidmondjesgeleiding en fotosynthese

Het hoofddoel van de proef was om te achterhalen of de energie-input onder LED-belichting voldoende is voor een huidmondjesgeleidbaarheid die niet beperkend is voor de CO₂-opname.

4.1 Resultaten

Zoals aangegeven in de materiaal en methoden (hoofdstuk 2.3) werd het licht aangeboden in twee blokken:

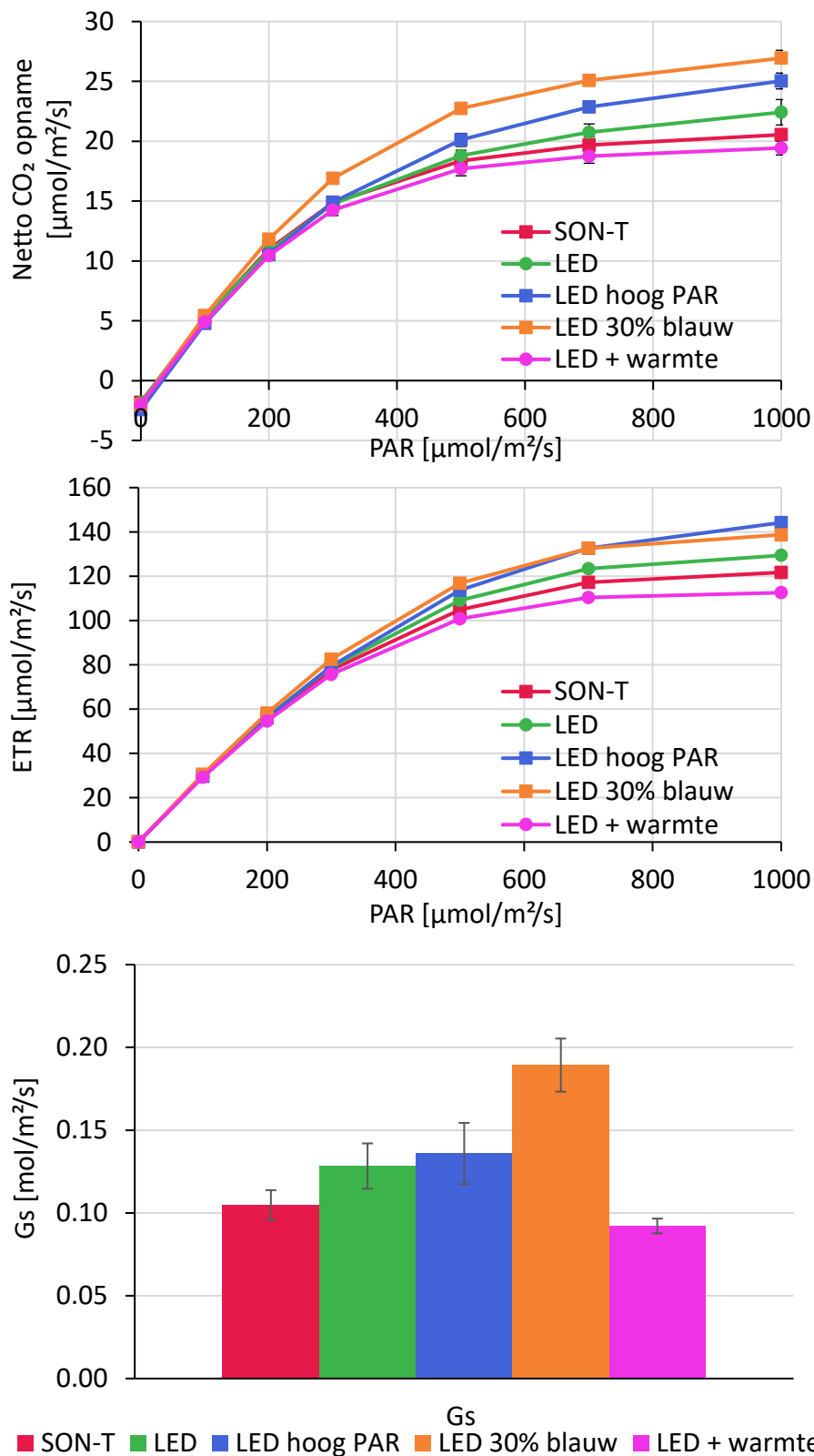
- Assimilatielicht: 3:00-15:00
- Kunstzonlicht: 11:00-19:00

Dit geeft drie onderscheiden periodes: alleen bijbelichting met 190 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, bijbelichting + zonlicht met 270 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ en alleen zonlicht met 80 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. In alle drie de periodes zijn metingen uitgevoerd en dat in opeenvolgende weken. Hiernaast zijn er ook nog lichtresponscurves gemeten om na te gaan hoe de fotosynthese en huidmondjesgeleidbaarheid van de planten onder een kortstondig hoger lichtniveau functioneren. Deze staan weergegeven in Figuur 5. Hierbij vallen drie zaken op:

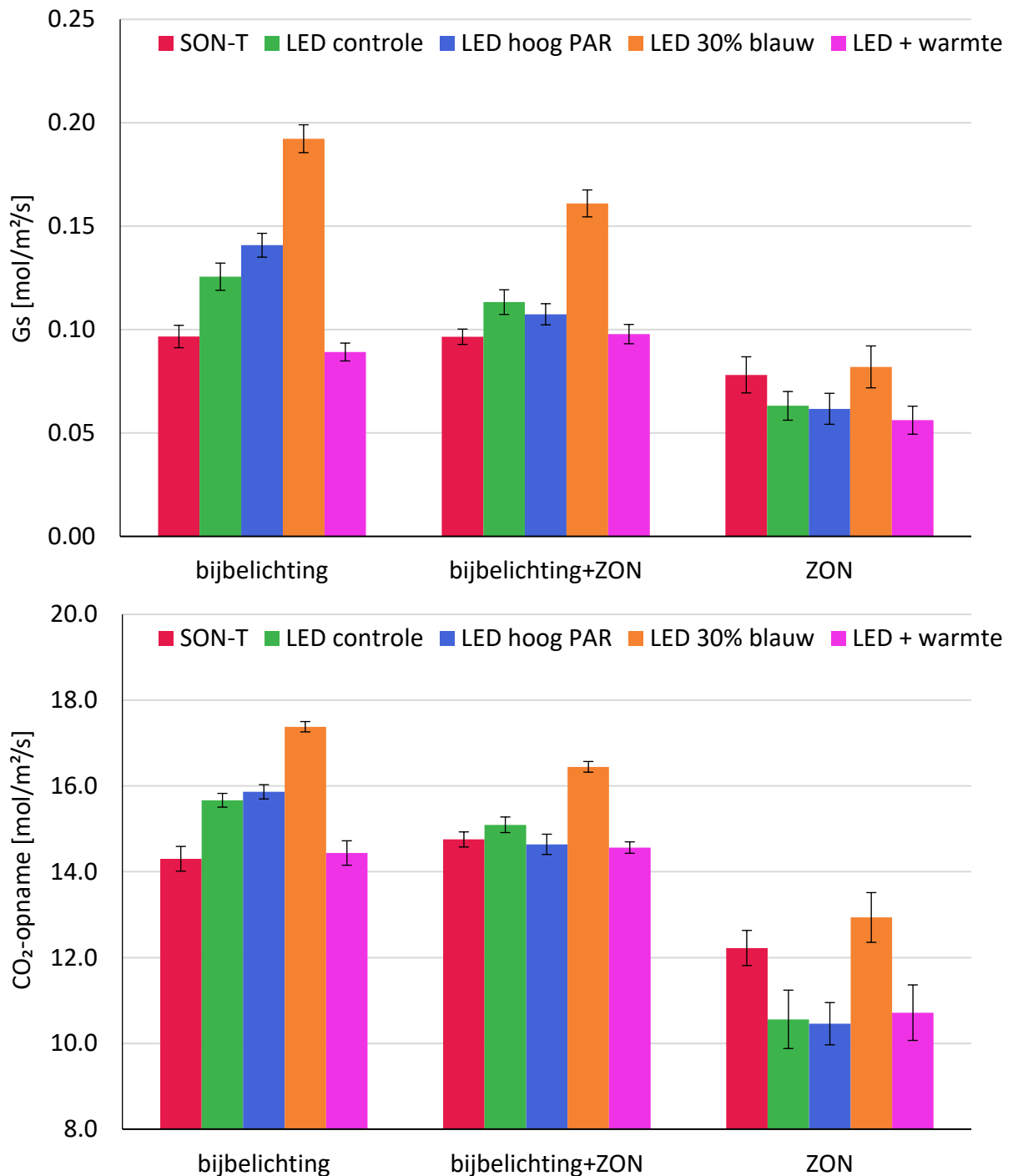
- LED 30% blauw heeft een fors hogere huidmondjesgeleidbaarheid (Gs) en de hoogste CO₂-opnamecapaciteit onder lichtverzadiging.
- LED hoog PAR heeft bij een verzadigende lichtintensiteit een gelijke ETR als 30% blauw. Door het hogere lichtniveau was te verwachten dat de ETR-capaciteit stijgt. Maar door een grotere huidmondjesbeperking blijft de CO₂-opnamecapaciteit achter ten opzichte van LED 30% blauw.
- De ETR-capaciteit en de CO₂-opnamecapaciteit liggen het laagst voor SON-T, LED en LED + warmte.

Figuur 6 geeft de overall gemiddelden van de Gs en bijbehorende fotosynthese weer over de verschillende meetweken. Hierbij valt op dat gemiddeld genomen de Gs tijdens de uren van alleen 'bijbelichting' (3:00-11:00) iets hoger ligt dan tijdens de uren 'bijbelichting+zon' (11:00-15:00) terwijl tijdens de uren 'bijbelichting+zon' de lichtintensiteit 80 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ en de straling 21W/m² hoger ligt (Tabel 4). De laatste uren van de dag onder alleen zonlicht (15:00-19:00) is de Gs duidelijk lager. Verder ligt alleen de Gs bij LED 30% blauw hoger dan de andere behandelingen. Dit is consistent het geval op de verschillende meetdagen (Figuur 7).

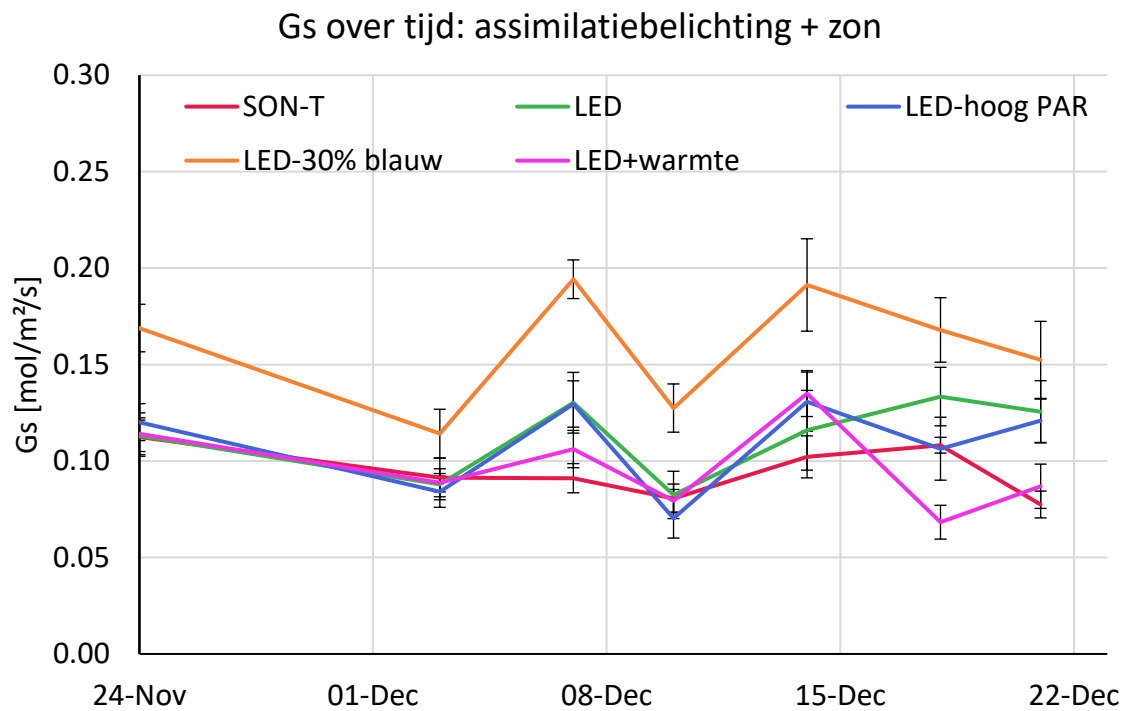
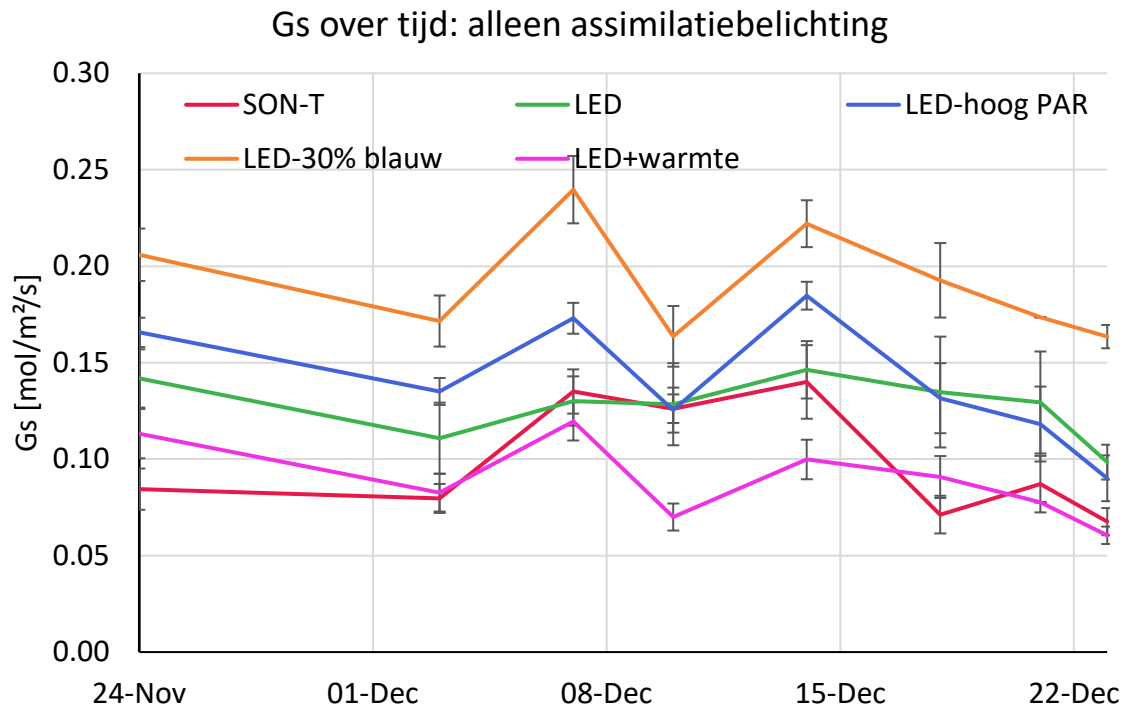
In het tijdvak ZON (15:00-19:00) ligt de Gs het laagst (Figuur 6). Daardoor wordt er een veel lagere CO₂-opname bij 300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR gemeten. Deze verlaagde CO₂-opname is kunstmatig groot omdat er dan slechts 80 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR wordt gegeven en dus de 'live' CO₂-opname rond de 5-6 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ zou liggen, waardoor er in dat tijdvak waarschijnlijk geen huidmondjesbeperking van de fotosynthese plaats vindt bij de dan geldende groeilichtintensiteit.



Figuur 5. Fotosynthese-lichtrespons-curves voor CO₂-opname en ETR en bijbehorende huidmondjesgeleidbaarheid (Gs) bepaald bij de 5 behandelingen (n=4-7).



Figuur 6. Dagpatronen huidmondjesgeleidbaarheid (Gs) en bijbehorende fotosynthese bij een vast lichtniveau van 300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR in de drie tijdvakken bijbelichting 3:00-11:00 / bijbelichting+zonlicht 11:00-15:00 / alleen zonlicht 15:00-19:00 (Dit is een gemiddelde van de getoonde meetdagen in figuur 7). NB in de meetcuve van de fotosynthese-meter is het lichtniveau steeds op 300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR gehouden. Hierdoor is te zien dat de huidmondjesgeleidbaarheid bij LED 30% blauw het minst beperkend was voor de fotosynthese bij 300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR. In het tijdvak ZON 15:00-19:00 ligt de Gs het laagst. Daardoor wordt er een veel lagere CO₂-opname bij 300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR gemeten. Deze verlaagde CO₂-opname is kunstmatig groot omdat er dan slechts 80 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR wordt gegeven en dus de 'live' CO₂-opname rond de 5-6 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ zou liggen, waardoor er in dat tijdvak waarschijnlijk geen huidmondjesbeperking van de fotosynthese plaats vindt bij de groeilicht-intensiteit.



Figuur 7. Verloop huidmondjesgeleidbaarheid (Gs) over de teeltweken voor de tijdsslots alleen assimilatiebelichting (3:00-15:00) en assimilatiebelichting + zonlicht (11:00-15:00), $n=4-7$ per meetdag.

4.2 Conclusie huidmondjesgeleiding en fotosynthese

Het hoofddoel van dit onderzoek was het achterhalen of de energie-input onder LED-belichting voldoende is voor een huidmondjesgeleidbaarheid die niet beperkend is voor de fotosynthese. Op vijf manieren is er een verschillend energie-aanbod gegeven. Bij vier van de vijf behandelingen was de huidmondjesgeleidbaarheid inderdaad beperkend voor de fotosynthese op de uren dat de lichtintensiteit het hoogst was (uren met bijbelichting en kunstzonlicht). Alleen de behandeling met 30% blauw gaf een significant hogere huidmondjesgeleidbaarheid en fotosynthese, alle andere behandelingen verschilden nauwelijks van elkaar. Het blijkt dus dat het lichtspectrum een grotere rol speelt dan de aangeboden energie voor wat betreft de huidmondjesgeleidbaarheid.

In eerste instantie wijzen de resultaten de richting dat waar huidmondjesbeperking van de fotosynthese optreedt, het percentage blauw in de lamp zal moeten worden opgevoerd. Het derde doel: de energiebalans-methode toegepast in de klimaatkamer biedt een belangrijke nuancerings (Bijlage 1). Het lijkt er sterk op dat de klimaatomstandigheden in de klimaatcabine (warmte/straling van de lampen, cabinetemperatuur en de luchttemperatuur van de ingeblazen lucht hierin ook een rol spelen:

- Uit de gemeten huidmondjesgeleidbaarheid (dit hoofdstuk), blijkt dat in deze proef niet het *aanbod* van energie leidend was in de huidmondjesgeleidbaarheid. De berekeningen laten zien dat juist de *afvoer* van energie (enerzijds via convectie, anderzijds via verdamping) leidend was. Oorzaak en gevolg kunnen hierin formeel niet onderscheiden worden. Bij de behandelingen SON-T en LED + warmte (hoge energie-input) lijkt het erop dat er een dusdanig hoge convectieve afdracht van energie was doordat de binnenkomende luchttemperatuur 2-3°C koeler was dan de bladtemperatuur waardoor er nauwelijks verdamping plaats hoefde te vinden. Bij de behandeling LED 30% blauw waren de huidmondjes verder open waardoor het erop lijkt dat de verdamping dusdanig hoog was dat de convectieve afdracht van energie automatisch laag is geworden.
- Convectieve warmteoverdracht kan dus een dempende invloed hebben op de verdamping en zo op de huidmondjesgeleidbaarheid. Nogmaals, oorzaak en gevolg zijn lastig te scheiden (kip-ei discussie): Is er zoveel convectieve afvoer van energie waardoor de huidmondjes niet open hoeven te gaan, of neemt de bladtemperatuur zodanig toe door knijpende huidmondjes waardoor de convectieve afdracht van energie automatisch stijgt?

In de praktijk zal dus in de situatie van LED-belichting én een huidmondjesbeperking op de fotosynthese allereerst de uitstraling (is afvoer van energie) moeten worden geminimaliseerd en de convectieve afdracht van energie moeten worden verkleind zodat de verdamping de primaire afvoer van energie wordt. Pas als dit onvoldoende oplossing biedt, zal gedacht kunnen worden aan het verhogen van het percentage blauw in de lampen.

5 Vangrails: wat is de minimaal benodigde opening?

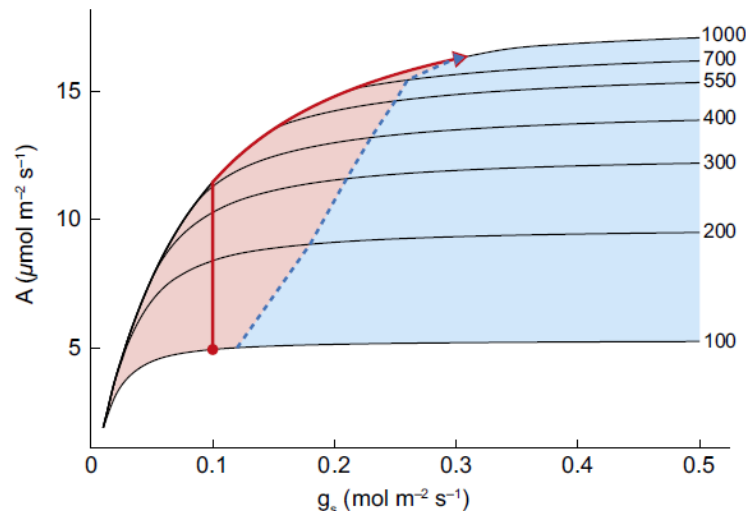
Het tweede (neven)doel van dit onderzoek was om op basis van de resultaten de minimaal benodigde huidmondjesgeleidbaarheid (G_s) te berekenen, zodat bij een bepaald lichtniveau de CO_2 -opname niet beperkt wordt. Door dit te berekenen bij 400 en 800 ppm CO_2 geeft dit de 'vangrail' aan waartussen de G_s zich zal moeten bevinden. Door een fotosynthesemodel mee te laten draaien op het dataplatform waarop het klimaat in beeld wordt gebracht kan deze 'vangrails' ook 'live' inzichtelijk worden gemaakt voor tuinders.

De noodzaak van huidmondjesgeleidbaarheid neemt toe bij meer licht. Dit wordt mooi geïllustreerd in Figuur 8¹. Het volgende is te zien:

- Iedere curve laat bij een gegeven lichtniveau van 100 tot 1000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR de fotosynthese (y-as) zien bij een toenemende huidmondjesgeleidbaarheid (x-as).
- De blauw gestreepte lijn geeft de mate van huidmondjesgeleidbaarheid aan die nodig is om 95% van het maximum van de CO_2 -opname bij een gegeven lichtintensiteit te bereiken.
- Het rood gearceerde gebied is dus gelimiteerd door de huidmondjesgeleidbaarheid.
- Het blauw gearceerde gebied geeft aan waar er onnodig waterverlies plaats vindt ten opzichte van de CO_2 -opname.
- De rode lijn laat het traject zien van de CO_2 -opname nadat de lichtintensiteit ineens van 100 naar 1000 μmol gaat (rode punt als initiële G_s en pijlpunt als eindpunt van de G_s).

Naarmate het lichtniveau stijgt, is er dus een hogere G_s nodig om de CO_2 -opname niet te beperken.

¹ Dit Figuur is ook besproken in Trouwborst et al. 2019, maar wordt voor de volledigheid opnieuw weergegeven.



Figuur 8. Theoretische relatie tussen de netto CO₂-opname (A) en de huidmondjesgeleidbaarheid (Gs) als een functie van de lichtintensiteit van 100 naar 1000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (zwarte lijnen). Iedere 'lichtcurve' laat de netto CO₂-opname zien bij toenemende Gs. De rode lijn laat het traject zien van de CO₂-opname nadat de lichtintensiteit van 100 naar 1000 μmol gaat (rode punt als initiële Gs en pijlpunt als eindpunt van de Gs). De CO₂-opname stijgt in eerste instantie direct, gevolgd door een langzame toename van de CO₂-opname die beperkt wordt door de (langzame) huidmondjesgeleidbaarheid. De blauw gestreepte lijn laat de Gs zien die nodig is om 95% van het maximum van A bij een gegeven lichtintensiteit te bereiken. Waardes aan de linkerkant van de blauwe lijn (rood beschaduwde gebied) zijn Gs-gelimiteerd terwijl aan de rechterzijde er onnodig waterverlies plaats vindt ten opzichte van CO₂-winst. Temperatuur en RV waren constant in deze berekening (Bron: Lawson et al. 2018).

Doordat de huidmondjesgeleiding als getal betrekkelijk weinig zegt, kan de beperking van de huidmondjesgeleidbaarheid het meest eenvoudig worden weergegeven als beperking van de fotosynthese. Er spelen twee grote beperkingen een rol in een kassituatie:

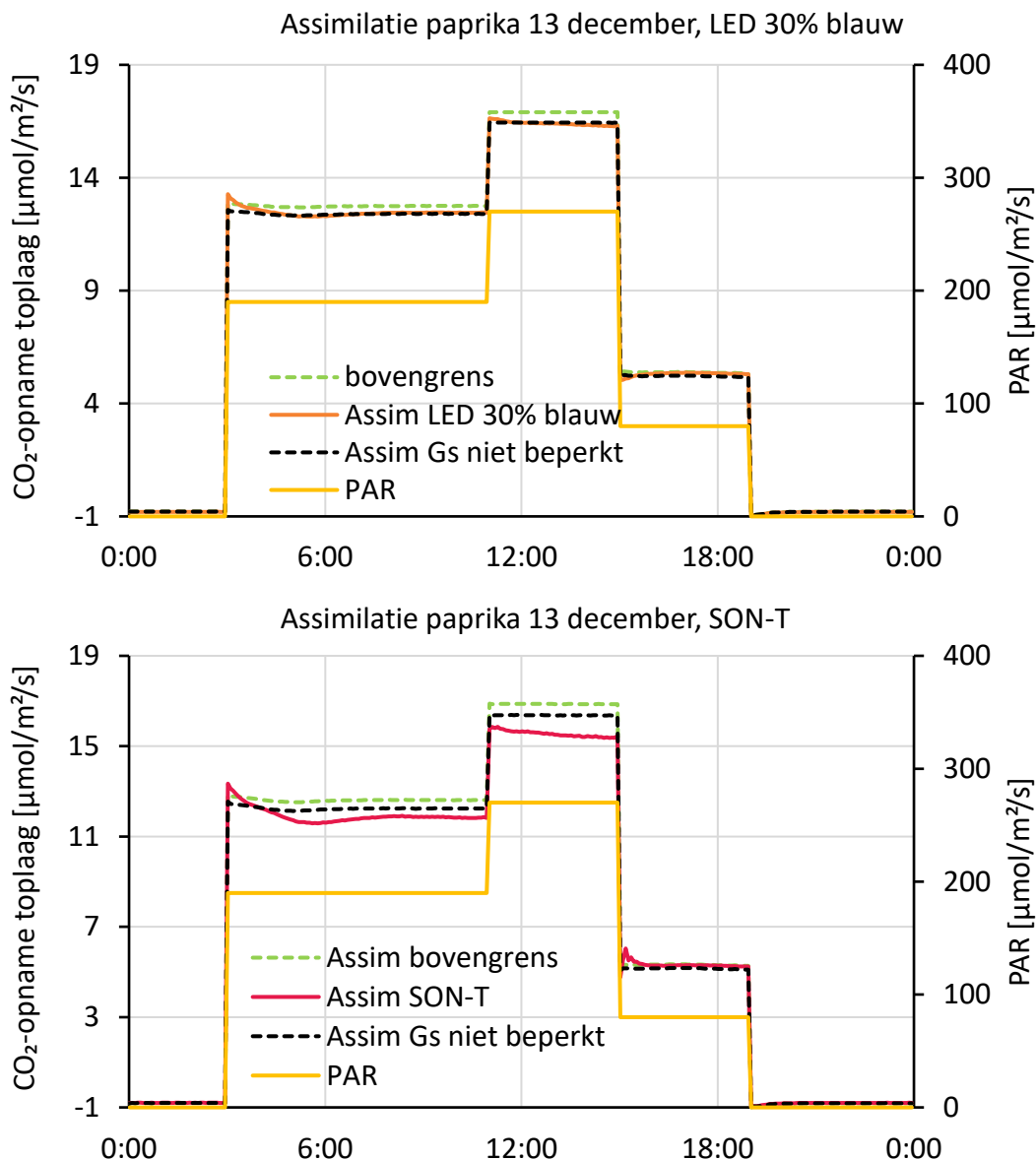
- Sub-optimale CO₂-omstandigheden. Voor C3-planten ligt het theoretisch maximum voor 95% van de maximale fotosynthese gegeven het licht tussen de 800-1000 ppm CO₂.
- De huidmondjesgeleidbaarheid zelf. Bij knijpende huidmondjes kan het CO₂-gehalte in het blad fors lager liggen dan rondom het blad. Huidmondjesbeperking wordt in dit rekenvoorbeeld gedefinieerd als het CO₂-gehalte in het blad op minder dan 75% ligt dan in de kaslucht. Dus:
 - Bij 800 ppm CO₂ moet het CO₂-gehalte in het blad boven de 600 ppm blijven om niet aangemerkt te worden als huidmondjesbeperking.
 - Bij 400 ppm CO₂ moet het CO₂-gehalte in het blad boven de 300 ppm blijven om niet als aangemerkt te worden als huidmondjesbeperking. Er is hier echter wel een CO₂-beperking van de fotosynthese.

Door nu op drie niveaus de fotosynthese te berekenen, kunnen beide beperkingen in beeld worden gebracht (Figuur 9):

- De fotosynthese van het bovenste blad in een gewas bij 800 ppm zonder huidmondjesbeperking. Dit geeft een waarde aan die dicht bij het theoretisch maximum van de fotosynthese gegeven het lichtniveau uitkomt (groen gestreept).

- Vervolgens wordt de fotosynthese berekend bij het heersende CO₂-niveau in de kas zonder dat de huidmondjes beperkend zijn voor de fotosynthese (zwart gestreepte lijn). Als de zwarte lijn afwijkt van de groene lijn is het CO₂-niveau suboptimaal.
- Vervolgens wordt de 'live' fotosynthese van het bovenste blad weergegeven (in respectievelijk oranje en rood behorend bij de behandelingen SON-T en LED 30% blauw). Als de 'live' fotosyntheselijns afwijkt van de zwart gestreepte lijn, dan is er een huidmondjesbeperking.

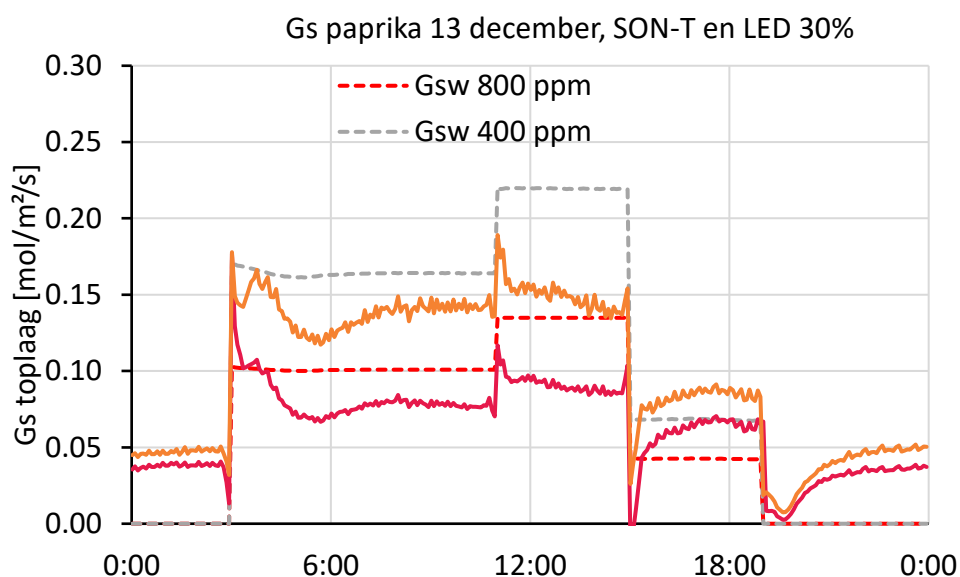
Dit concept kan 'live' inzichtelijk gemaakt worden voor tuinders door een fotosynthesemodel mee te laten draaien op het dataplatform waarop het klimaat in beeld wordt gebracht.



Figuur 9. Voorbeeldberekening paprika CO₂- en huidmondjesbeperking voor de behandelingen SON-T en LED 30% blauw op 13 december 2020 toegepast op de klimaatcabines. Met behulp van het FvCB-model is de fotosynthese behorend bij het lichtniveau berekend bij 800 ppm CO₂ (min of meer theoretisch maximum; groen gestreept). Als de zwart gestreepte lijn onder groen gestreepte lijn ligt, dan is het CO₂-niveau suboptimaal. Als de 'live' fotosyntheselijns afwijkt van de zwart gestreepte lijn, toont dit een huidmondjesbeperking aan. Dit laat onder SON-T een huidmondjesbeperking zien, terwijl deze er niet was onder LED 30% blauw.

Een overmaat aan huidmondjesgeleidbaarheid is niet via berekende bladfotosynthese aan te geven. Wel kan vanuit een fotosynthesemodel berekend worden wat het minimum aan huidmondjesgeleidbaarheid moet zijn om huidmondjesbeperking te voorkomen. Echter, er moet gerealiseerd worden dat dit een eenzijdige benadering vanuit de fotosynthese is. Immers, onder hoge instraling kan het zeer nuttig zijn voor de plant als de minimale huidmondjesgeleidbaarheid wordt overschreden, omdat het blad ook afdoende gekoeld moet worden. Zo is uit Figuur 8 af te lezen dat een G_s van $0.3 \text{ mol/m}^2/\text{s}$ nodig is voor de fotosynthese bij $1000 \text{ } \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ PAR en 800 ppm CO_2 . Echter, om de bladtemperatuur bij deze lichtintensiteit onder controle te houden, zal waarschijnlijk eerder een G_s van $0.6 \text{ mol/m}^2/\text{s}$ gewenst zijn ('s zomers gemeten waarden bij paprika en tomaat, Trouwborst *et al.* 2019). In de winter is het wel interessant om te weten waar de overmaat begint, omdat het voorkomen van onnodige verdamping energiebesparing op kan leveren. Het gevaar hierbij is weer dat mogelijk de huidmondjesgeleidbaarheid vanuit fotosynthese-oogpunt te hoog is, maar dat de verdamping te laag is voor nutriënten-transport. Hierover is nog weinig bekend.

In Figuur 10 worden de berekende niveaus van huidmondjesgeleidbaarheid bij 400 en 800 ppm weergegeven (grijze en rode stippellijnen). Te zien is dat de G_s onder SON-T (rode lijn) inderdaad onder het minimum van de 800 ppm-lijn zat terwijl de behandeling LED 30% blauw er ruim boven lag (oranje lijn). Logischerwijze moet de huidmondjesgeleidbaarheid bij 400 ppm veel hoger liggen om niet beperkend te zijn voor de fotosynthese. Echter uit deze lijn wordt niet duidelijk dat er op dat moment een forse CO_2 -beperking is. Vandaar dat deze benadering niet afdoende is en de benadering uit Figuur 9 ook nodig is om én CO_2 -beperking én huidmondjesbeperking zichtbaar te maken.



Figuur 10. Huidmondjesgeleidbaarheid (G_s) van de behandelingen SON-T en LED 30% blauw ten opzichte van de benodigde huidmondjesgeleidbaarheid om de fotosynthese niet te beperken bij een bepaald CO_2 -niveau in de kas. Te zien is dat de G_s onder SON-T beperkend was voor de fotosynthese, terwijl er onder 30% blauw een overmaat was. De benodigde G_s bij 400 ppm CO_2 ligt logischerwijze fors hoger, echter daarmee wordt niet duidelijk dat de fotosynthese dan wel door het CO_2 -niveau beperkt wordt.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

In onderstaand overzicht worden de drie onderzoeksvragen beantwoord.

1. Is er voldoende huidmondjesopening onder LED-belichting?

In deze proef is er op vijf manieren een verschillend energie-aanbod gegeven. Bij vier van de vijf behandelingen was de huidmondjesgeleidbaarheid beperkend voor de fotosynthese op de uren dat de lichtintensiteit het hoogst was op de uren met bijbelichting en (kunstmatig) zonlicht. Alleen onder LED 30% blauw werd geen huidmondjesbeperking gemeten. Het blijkt dat het lichtspectrum een grotere rol speelt dan de aangeboden stralingsenergie voor wat betreft de huidmondjesgeleidbaarheid.

In eerste instantie wijzen de resultaten de richting dat waar huidmondjesbeperking van de fotosynthese optreedt, het percentage blauw in de lamp zal moeten worden opgevoerd. Het derde doel: de energiebalans-methode toegepast in de klimaatkamer biedt een belangrijke nuancerings. Dit wordt onder punt 3 verder uitgewerkt (zie ook Bijlage 1).

2. Opstellen 'vangrail' tussen noodzaak en overmaat voor huidmondjesgeleidbaarheid.

Er zijn twee grote beperkingen van de fotosynthese voor een gewas gegeven een zekere lichtintensiteit, namelijk het CO₂-niveau in de kas en huidmondjesgeleidbaarheid. Alleen de beperking in huidmondjesgeleidbaarheid weergeven biedt te weinig informatie. Voor optimale sturing in kassen zullen beide beperkingen in beeld gebracht moeten worden. Beide beperkingen kunnen als volgt in beeld gebracht worden:

- Huidmondjesbeperking: 'Live' de huidmondjesgeleidbaarheid via de energiebalans-methode in beeld brengen ten opzichte van de gewenste huidmondjesgeleidbaarheid via een fotosynthesemodel
- CO₂-beperking: 'Live' de maximaal haalbare fotosynthese bij CO₂-verzadiging in beeld brengen ten opzichte van een niet door huidmondjes beperkte fotosynthese en een 'live' fotosynthese die mogelijk door de huidmondjes wordt beperkt.

3. Wat voor inzichten biedt de energiebalans-methode op het niveau van een klimaatcabine om de huidmondjesgeleidbaarheid te berekenen?

Zoals gezegd onder punt 1 laten de resultaten van de *gemeten* huidmondjesgeleidbaarheid zien dat in deze proef niet het aanbod van energie leidend was in de huidmondjesgeleidbaarheid. De resultaten van de *berekende* huidmondjesgeleidbaarheid laten zien dat in deze proef de afvoer van energie een grote rol heeft gespeeld: enerzijds via convectie, anderzijds via verdamping.

Anders gezegd, convectieve afvoer van energie en afvoer van energie via verdamping laten een waterbedeffect zien: Als de ene omhooggaat, gaat de andere naar beneden en andersom. Dit is overigens inherent aan de wet van behoud van energie.

- Meer convectieve afdracht van energie (door lage inblaastemperatuur) geeft een lagere warmtelast om weg te koelen. En daarom een lage huidmondjesgeleidbaarheid.
- Een redenatie andersom is ook mogelijk. Een lage huidmondjesgeleidbaarheid geeft slechts een beperkte koeling, daardoor stijgt de planttemperatuur, dit geeft automatisch een grotere convectieve afvoer van energie.

De vraag kan gesteld worden welk proces hierin leidend is:

- Aan/afvoer van convectieve energie is leidend: door het vergroten van de convectieve afvoer is er minder noodzaak tot opening van de huidmondjes. Dit is een lijn die onder andere gevolgd wordt door Schymanski & Or 2016: door meer wind is er minder verdamping en daardoor een hogere water use efficiency. Dit lijkt het geval te zijn bij de behandeling SON-T en LED + warmte.
- Huidmondjes zijn leidend: door forse huidmondjesgeleidbaarheid is er meer verdamping en daardoor juist veel minder koeling of zelfs opwarming door convectie. Dit lijkt het geval te zijn bij de behandeling LED 30% blauw.

Het antwoord hangt dus af aan welke knop er gedraaid wordt: als er aan de factor convectieve overdracht gedraaid wordt, dan reageren de planten door meer of minder te koelen (via de huidmondjesstand). Als de factor verdamping beïnvloed wordt (door huidmondjesstand of VPD) dan volgt als vanzelf vermindering of vermeerdering van de convectieve warmteoverdracht.

Terugkerend naar de hoofdvraag: is er voldoende huidmondjesopening onder LED-belichting? Er zal dus goed moeten worden gekeken hoe de inkomende energie wordt afgevoerd. Als de huidmondjes beperkend zijn voor de fotosynthese, dan moet er enerzijds gestuurd worden met % blauw tot opening van de huidmondjes en anderzijds moet gepoogd worden om de convectieve afdracht van energie en afdracht van energie door uitstraling te verminderen, waardoor er meer energie zal moeten worden afgevoerd via transpiratie. De vraag is dan hoe dit concreet kan worden uitgewerkt:

- Het blootstellen van de bladeren aan zeer koele buitenlucht is een aanjager van de convectieve overdracht wat dus vermeden moet worden.
- Het te ver verlagen van de convectieve overdracht door verminderde luchtbeweging is gevaarlijk omdat dan ook de grenslaagweerstand voor zowel verdamping als de CO₂-opname verhoogd wordt.
- Wanneer uitstraling naar het kasdek hoger is dan instraling is er extra warmteafdracht, wat de noodzaak tot verdamping via de huidmondjes remt. Het voorkomen van netto uitstraling met bijvoorbeeld schermdoeken (isolatie) helpt dan.
- Door de RV te verlagen, wordt de verdamping aangejaagd, maar als dit te veel wordt verlaagd, kan dit huidmondjessluiting in de hand werken waardoor de verdamping vermindert.
- De RV mag verhoogd worden tot het niveau dat de verdamping beperkt wordt. Als de verdamping beperkt wordt, dan zal de bladtemperatuur stijgen, waardoor niet alleen

de convectieve afdracht van energie weer stijgt, maar ook de huidmondjes verder kunnen openen om de extra warmte af te voeren.

Bovenstaande punten suggereren dat na isolatie (voorkomen van uitstraling) en het binnen veilige marges verhogen van de RV een verhoging van het percentage blauw in de lampen de meest veilige oplossing is.

6.2 Aanbevelingen

Het verdient aanbeveling om de fotosynthese van de bovenste bladeren van een gewas online in beeld te brengen. Dit kan door een betrouwbaar mechanistisch fotosynthesemodel mee te laten draaien op een dataplatform zoals Letsgrow. Als afgeleide hiervan kunnen beperkingen in de fotosynthese in beeld worden gebracht. Als deze in beeld zijn dan kan licht, CO₂ en warmte efficiënter benut worden door te voorkomen dat de huidmondjesgeleidbaarheid beperkend is voor de fotosynthese. Anderzijds kan warmte efficiënter benut worden door te voorkomen dat huidmondjes onnodig ver open staan, waardoor meer (latente) warmte moet worden afgelucht (ontvochtigen). Ook kan door inzicht te geven in de huidmondjesgeleidbaarheid worden voorkomen dat onnodig veel verneveld wordt, waardoor veel warmte verloren gaat.

Referenties

Nelson JA, Bugbee B, 2015. Analysis of Environmental Effects on Leaf Temperature under Sunlight, High Pressure Sodium and Light Emitting Diodes. PLoS ONE 10(10)

Katsoulas N, Stanghellini, C. Modelling Crop Transpiration in Greenhouses: Different Models for Different Applications. Agronomy 2019, 9, 392.

Stanghellini C, Van 't Ooster B, Heuvelink E. 2019. Greenhouse horticulture: technology for optimal crop production. Wageningen Academic Publishers.

Schymanski, SJ, Or D. (2016) Wind increases leaf water use efficiency. Plant, Cell & Environment, 39: 1448–1459.

Trouwborst G, Voogt JO, Reijm P, Hogewoning SW. 2019. Monitoring van huidmondjesopening in de kas: ontwikkeling en validatie. Plant Lighting B.V., Bunnik. 68p.

Trouwborst G, Noordhoek SE, Hogewoning SW. 2021. Monitoring huidmondjes: Gebruik van de netto stralingsmeter, deelrapport Anthurium. Plant Lighting B.V., Bunnik.

Van den Boogaart SAJ, Hogewoning SW, Trouwborst G, Krause A. 2019. Hoe wordt jaarrond productie in paprika rendabel? Vooronderzoek naar het effect van lichtspectrum. Plant Lighting B.V., Bunnik. 25p

Voogt JO, Van Weel P, 2008. Climate Control Based on Stomatal Behavior in a Semi-Closed Greenhouse System 'Aircokas'. Acta Hort. 797: 151-156

Bijlage 1. Toepassing van de energiebalans

Het derde doel in dit onderzoek was om na te gaan of de energiebalans-methode (balans van warmte-overdracht via straling, convectie en verdamping op blad- of gewasniveau) om de huidmondjesgeleidbaarheid te berekenen nog extra inzichten biedt op het niveau van een klimaatcabine. De methode is door Voogt & van Weel (2008) in de Nederlandse tuinbouw geïntroduceerd. In het onderzoek van Trouwborst *et al.* 2019 werd al vastgesteld dat in praktijksituaties in kassen er voor paprika een goede overeenkomst is tussen de berekende waarde en de gemeten waarde met de Li-6800 fotosynthesemeter. In B1.1 wordt de absorptie van straling door bladeren besproken. In B1.2 wordt de energiebalans opgesteld.

B1.1 Absorptie van straling door bladeren

Bladeren absorberen straling afhankelijk van de golflengte:

- PAR: ~0.8-0.95
- NIR: ~0.1- ~0.9 → 0.3 (eigen berekening door vermenigvuldiging van de absorptie van een komkommerblad van 700-2500nm te vermenigvuldigen met het NIR-spectrum van een 1000W SON-T; Nelson&Bugbee 2015 noemen ~0.26 voor SON-T)
- Langgolvig: ~0.97

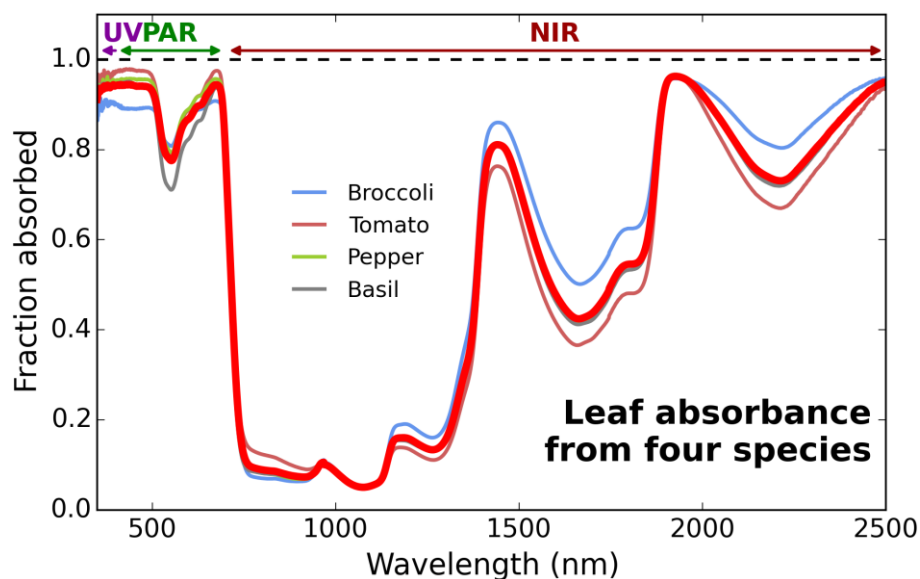
Figuur 11 geeft de bladabsorptie weer van 4 plantensoorten. Er blijken slechts beperkte verschillen te zijn tussen de soorten. De verhouding tussen bladreflectie en bladtransmissie is ruwweg 50%. Op gewasniveau ligt dit anders, omdat gereflecteerd en doorgelaten licht weer door andere bladeren geabsorbeerd kan worden. Figuur 12 laat de bladabsorptie zien van een komkommerblad. Deze volgt globaal dezelfde lijn als de getoonde lijnen in Figuur 11, vandaar dat het een redelijke aanname is dat het absorptiespectrum van paprika overeenkomt met komkommer. Door het energiespectrum met het absorptiespectrum te vermenigvuldigen kan de procentuele bladabsorptie per lichtbron worden berekend. Dit wordt weergegeven in Tabel 4. Er kan worden geconstateerd dat op het niveau van de bovenste bladlaag er twee groepen behandelingen aftekenen:

1. Hoge energie-absorbtie onder LED hoog PAR (63W) en LED + warmte (65W)
2. Lage energie-absorbtie onder SON-T (45W), LED 30% blauw (40W) en LED (36W).

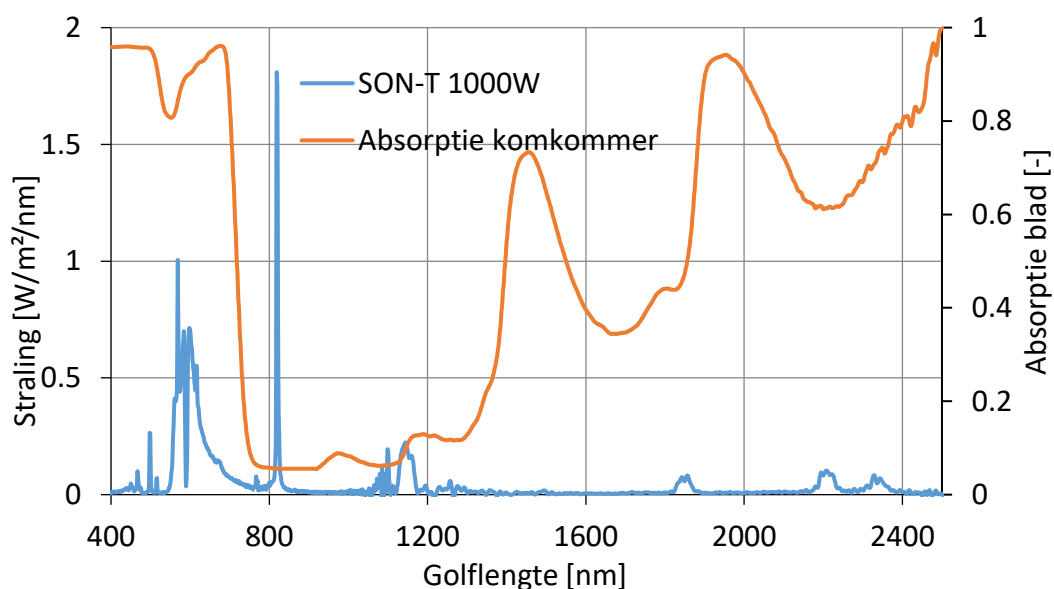
De NIR/MIR van de warmtestraler wordt dus op bladniveau beter geabsorbeerd dan de NIR van de SON-T. Zoals gezegd wordt er van het niet geabsorbeerde NIR ongeveer 50% gereflecteerd en 50% doorgelaten. Dat betekent dat dieperliggende bladlagen onder SON-T relatief wel meer energie krijgen dan onder LED.

Tabel 4. Aangeboden energie per lichtbron, procentuele absorptie en de geabsorbeerde energie in de bovenste bladlaag. De aangeboden energie is berekend uit het gemeten PAR-spectrum (fotospectrometer).

Spectrum	Aangeboden energie [W/m ²]	Absorptie	Geabsorbeerde energie bovenste bladlaag [W/m ²]
Zon-lamp	21	83%	17.5
SON-T	76	60.4%	45.9
LED	43	84%	36
LED hoog PAR	75	84%	62.8
LED 30% blauw	47	85%	39.9
LED + warmte	43+ ~33=~76	84% en 88%	65.1



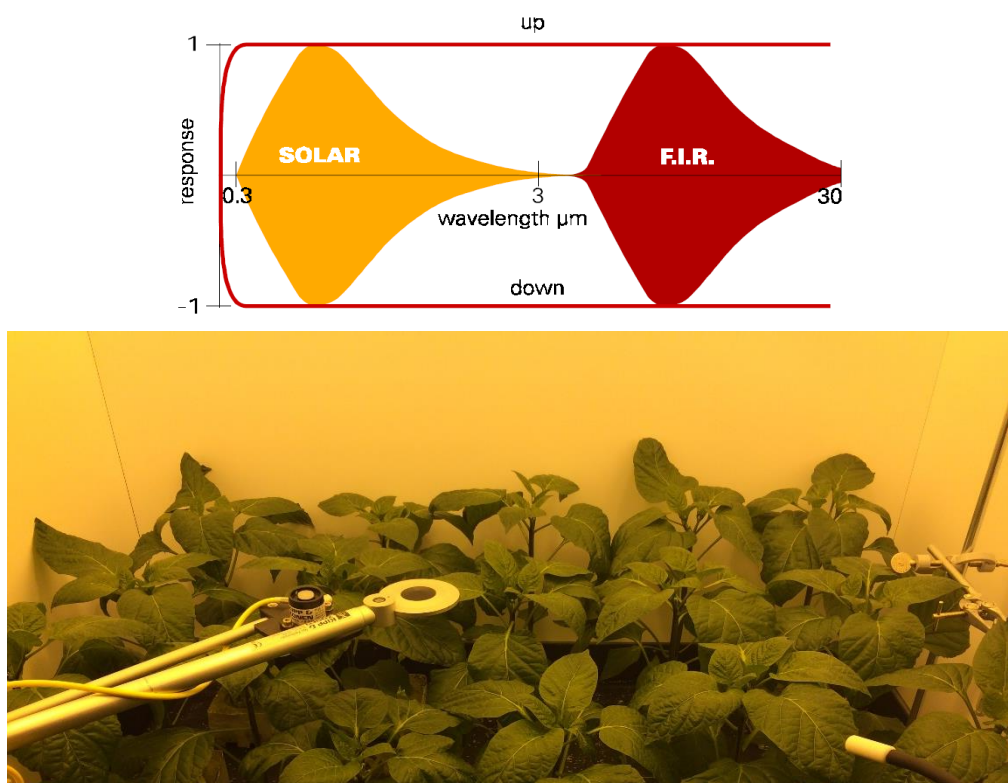
Figuur 11. Lichtabsorptie van bladeren van vier gewassoorten (Bron: Nelson&Bugbee, 2015).



Figuur 12. Bladabsorptie van komkommer en energiespectrum van SON-T 1000W. De SON-T geeft ongeveer 38% straling in het PAR-gebied, 37% straling in het NIR-gebied en de overige 25% is een combinatie van convectie en langgolvlige straling. Bron: Plant Lighting.

De energie is ook gemeten met een netto stralingsmeter (NR Lite2, Kipp, Nederland). Een netto stralingsmeter meet de resultante van inkomende en uitgaande straling en zou niet spectrumafhankelijk moeten zijn (Figuur 13). Deze blijkt bij LED, LED hoog PAR en LED 30% blauw dicht bij de berekende inkomende straling te liggen (Tabel 5). Dit suggereert dat de reflectie door het gewas heel laag is, wat overeenkomt met een hoge absorptie in het PAR-gebied. Bij de twee behandelingen met NIR (SON-T en LED + warmte) is er wel een behoorlijk verschil tussen berekende inkomende straling en gemeten netto straling. Dit suggereert dat er in die behandelingen veel meer NIR-reflectie door het gewas plaats vindt.

Opgemerkt moet worden dat de *absolute* ijking tussen verschillende typen sensoren zoals de NR-Lite2 en bijvoorbeeld een kwantum-sensor behoorlijk kan verschillen. Hiernaast kan de cosinus-correctie (meting straling onder een lage invalshoek) fors verschillen tussen verschillende typen sensoren. Als laatste kan worden vermeld dat de gebruikte SON-T een lager wattage (150W) heeft dan de standaard 1000W SON-T, waardoor er mogelijk een afwijkend spectrum was ten opzichte van de 1000W SON-t zoals in Figuur 12.



Figuur 13. Spectrale gevoeligheid van de netto stralingsmeter in het gebied van de zonnestraling en FIR (verre infrarood; boven) en een PAR-meter en de netto stralingsmeter (onder). Te zien is dat de vorm van de sensor voor de invallende straling wezenlijk verschilt waardoor er een totaal andere cosinuscorrectie kan zijn.

Tabel 5. Gemeten netto straling (NR Lite2) ten opzichte van de berekende straling bij de verschillende behandelingen.

Behandeling	berekening stralingsenergie [W/m ²]	meting netto straling [W/m ²]	fractie
SON-T	76	62	0.82
LED	43	45	1.04
LED hoog PAR	75	74	0.99
LED 30% blauw	47	48	1.01
LED + warmte	76	65	0.86

B1.2 Energiebalans van de behandelingen

B1.2.1 Blad & luchttemperatuur

De theorie achter de energiebalansmethode staat uitgewerkt in Trouwborst *et al.* 2019. De energiebalans van het gewas kan worden opgesteld door het meten van de (netto) straling, de berekening van de convectie door het meten van de blad- en luchttemperatuur (rekenend met een vaste warmteoverdrachtcoëfficiënt tussen gewas en omgeving), en door het meten/berekenen van de verdamping.

Zoals in de Materiaal en methoden (Tabel 2) aangegeven, werd per 3 december 2020 sturing op gelijke luchttemperatuur per behandeling uitgevoerd in verschillende klimaatcabines losgelaten. De energiebalans is uitgewerkt voor 13 december, dagen hieromheen verschilden soms iets in temperatuur. Ruwweg kwamen de volgende patronen naar voren (Figuur 14):

- De lucht- en planttemperatuur overdag was het hoogst voor SON-T en LED + warmte.
- De lucht- en planttemperatuur was het laagst bij LED en LED 30% blauw.
 - Hierbij valt op dat de ruimtetemperatuur van LED 30% blauw iets hoger is dan bij LED en de planttemperatuur praktisch gelijk is. Het verschil in lucht-planttemperatuur is dus groter (Figuur 14), wat duidt op een hogere verdamping van LED 30% blauw.
- Een tussenliggende waarde werd ingenomen door LED hoog PAR, alhoewel er ook dagen waren waarbij de temperatuur dichterbij LED en LED 30% blauw kwam.
 - Gedacht vanuit de aangeboden stralingsenergie (Tabel 4 en 5) is dit vreemd. Het was logischer geweest als de plant- en luchttemperatuur van LED hoog PAR dichterbij de behandelingen SON-T en LED + warmte hadden gelegen.
- De inblaasttemperatuur lag 's nachts hoger dan de gemeten luchttemperatuur maar overdag tot wel 2-3°C onder de luchttemperatuur in de klimaatcabines.

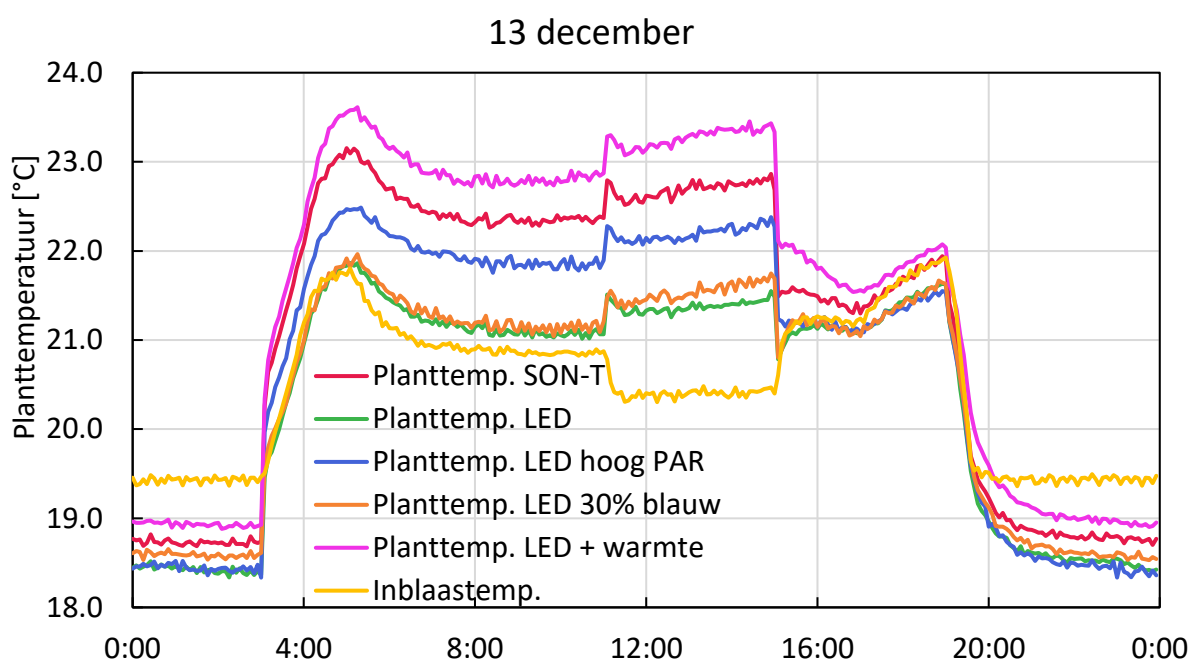
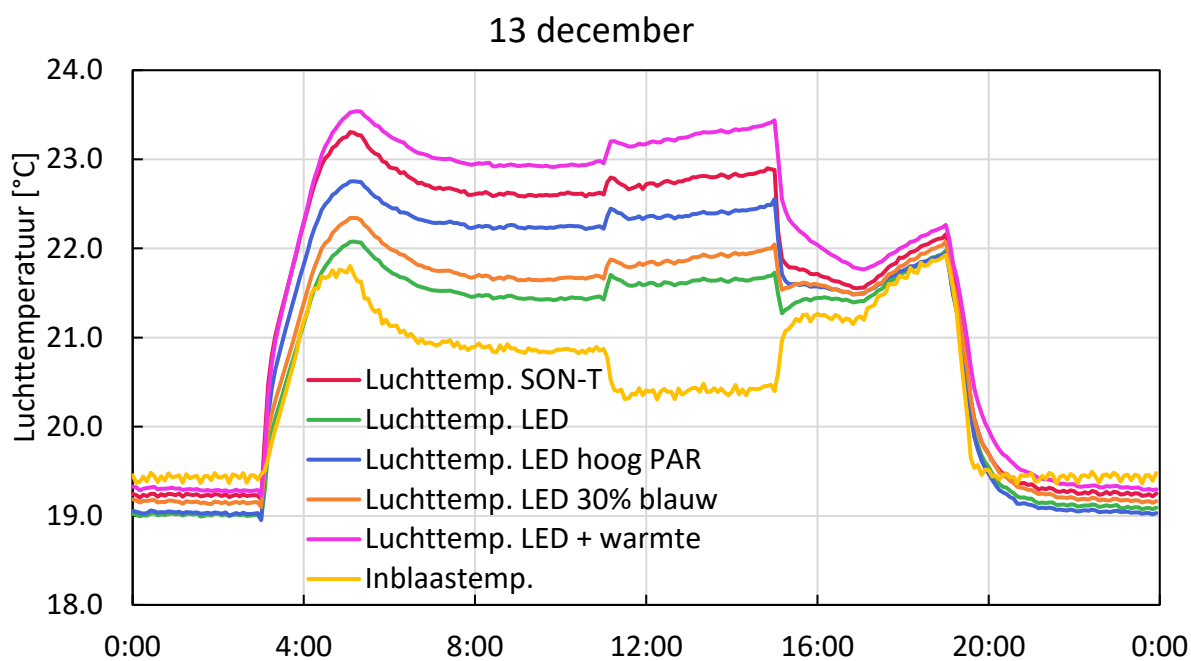
Het verschil tussen de lucht- en planttemperatuur wordt weergegeven in Figuur 15. Hierbij valt op dat dit verschil tussen de behandelingen erg klein is (maximaal 0.3°C) en de gemeten luchttemperatuur (bijna) altijd hoger ligt dan de gewastemperatuur. Bij LED 30% blauw is het verschil tussen de lucht- en planttemperatuur het hoogst. Ten opzichte van de behandelingen met min of meer gelijke energietoever (SON-T en LED, Tabel 4) duidt dit op een hogere

verdamping. Overdag is de delta lucht-planttemperatuur kleiner dan 's nachts en ligt rond de 0.2°C. Gedacht vanuit convectie-energie, leidt dit tot de conclusie dat er altijd een kleine aanvoer van energie van lucht naar blad plaats vindt aangezien de luchttemperatuur hoger is dan de bladtemperatuur. Voor de topbladeren zou dit dan in de orde grootte van 3-5W moeten liggen (zie paragraaf 2.5: $Q = h(T_{\text{kas}} - T_{\text{gewas}}) \rightarrow 7 \cdot +0.2^\circ\text{C} \cdot 2\text{-zijdig blad} = 2.8\text{W}$).

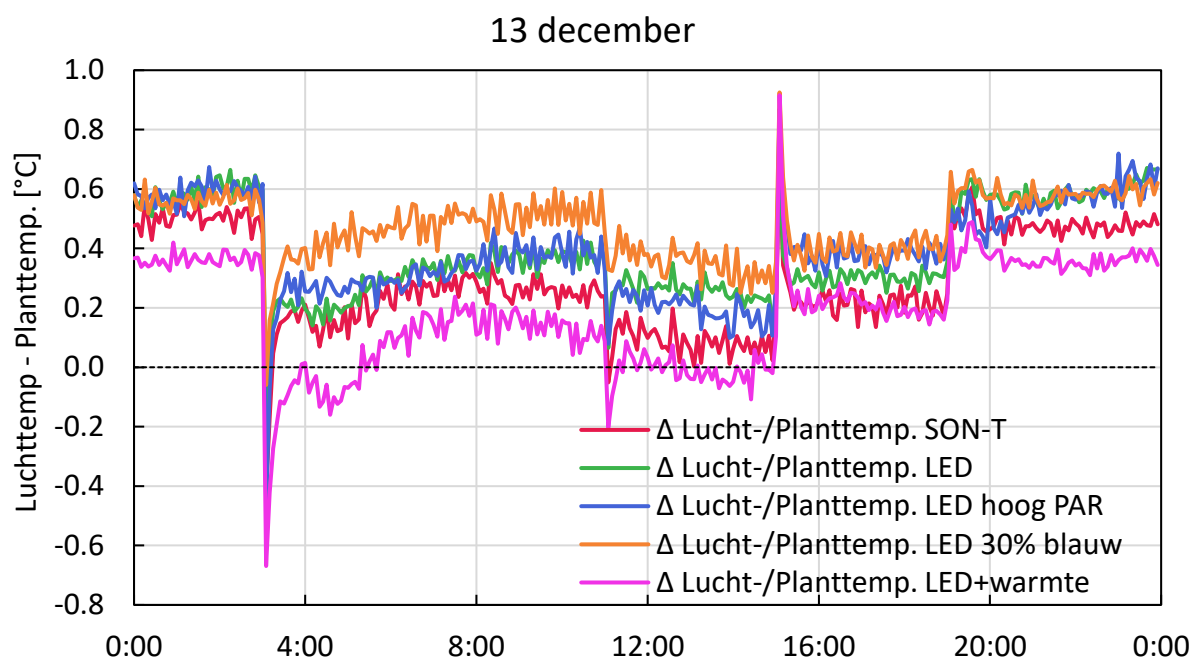
Bovenstaande beredeneerde convectieve aanvoer van energie richting de bladeren lijkt in het geheel van de werking van een klimaatkamer niet logisch, omdat de lampen de primaire energiebron zijn die via straling het gewas opwarmen. Vervolgens vindt er afvoer van energie plaats via gewasverdamping en convectie door het inblazen van koele lucht. Dan zou je verwachten dat de luchttemperatuur koeler is dan de planttemperatuur. Er vindt echter ook opwarming van de lucht plaats doordat de lamparmaturen ook warm zijn (wel ruimtelijk gescheiden van de planten met behulp van ETFE-folie) en via geabsorbeerde straling door de wanden van de klimaatcabines. De gemeten klimaatcabine-luchttemperatuur is dus een resultante van:

- De bladtemperatuur (opwarming door straling, afkoeling door verdamping)
- De wandtemperatuur (opwarming door straling)
- De temperatuur van de lampafdeling van de cabine (opwarming door lamparmaturen)
- De inblaastemperatuur (koeling door koelunit klimaatkamer)

De inblaastemperatuur in de klimaatcabine is wel tot 2-3°C lager dan de bladtemperatuur (gele lijn in Figuur 14). Deze zal—gezien de gewasgrootte van paprika—primair het gewas koelen en pas secundair de wanden van de klimaatcabine. De vraag kan gesteld worden of de inblaastemperatuur niet een betere maat vormt voor de luchttemperatuur (en afvoer van convectieve energie) dan de gemeten ruimtetemperatuur die werd bepaald op ongeveer 10 cm onder de kop van het gewas (Foto 1) aan de uitblaaskant van de klimaatcabine. Als de inblaastemperatuur als uitgangspunt voor de afvoer van convectieve energie wordt genomen, vormt deze een forse afvoer van zo'n 30-40W energie via convectie ($7 \cdot -2^\circ\text{C} \cdot 2\text{-zijdig blad} = -28\text{W}$). Beide mogelijkheden worden in paragraaf 5.2.3 uitgewerkt waarbij blijkt dat het verdisconteren van de inblaastemperatuur een veel realistischer beeld geeft dan het verdisconteren van de klimaatcabinetemperatuur.



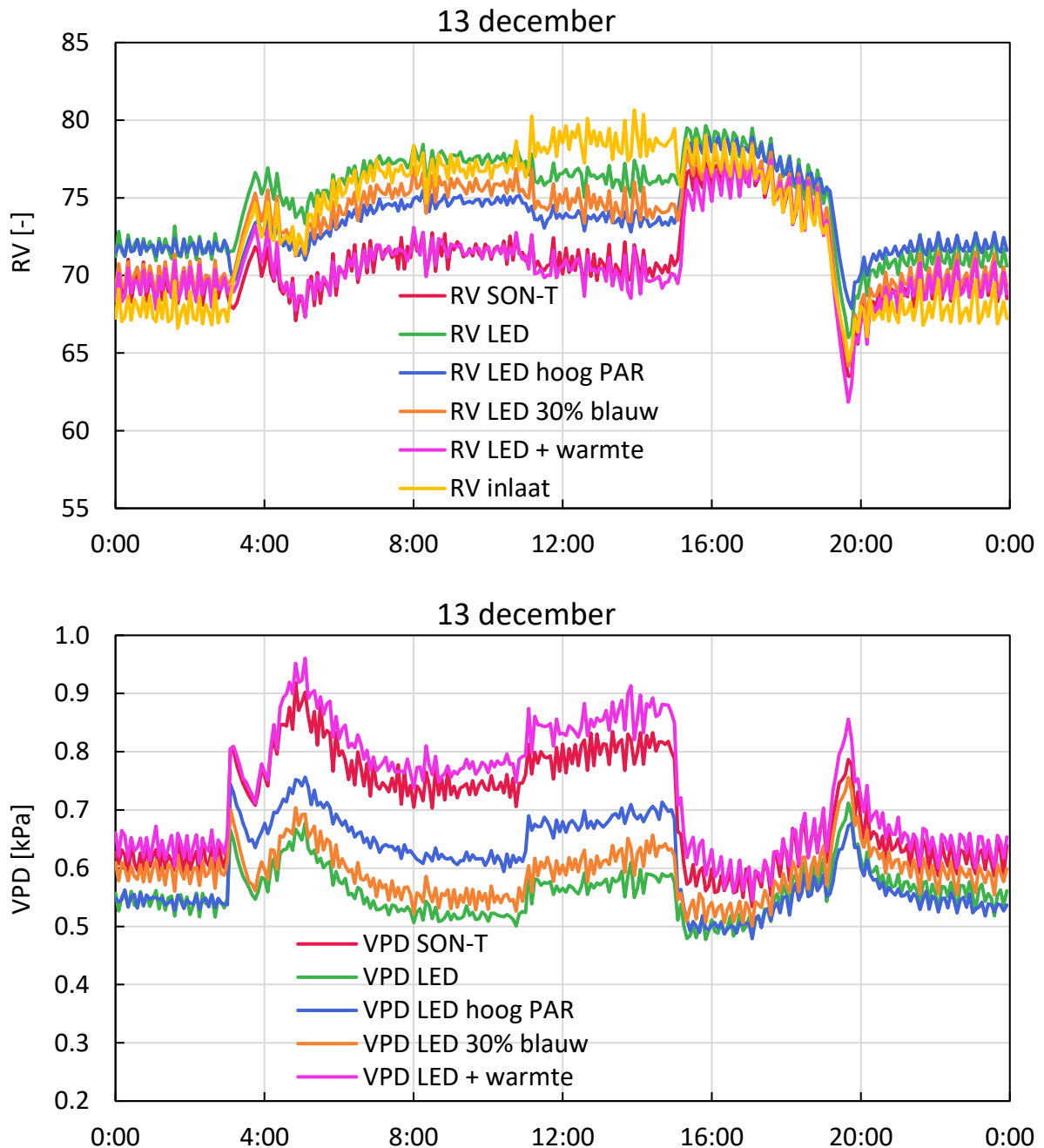
Figuur 14. Lucht- en planttemperatuur bij de verschillende behandelingen op 13 december 2020. Te zien is dat de SON-T en de LED + warmte het hoogst liggen. LED en LED 30% blauw liggen het laagst en LED hoog PAR neemt een middenpositie in.



Figuur 15 Delta lucht-planttemperatuur bij de verschillende behandelingen op 13 december 2020. Te zien is dat de delta temperaturen maximaal 0.3°C van elkaar verschillen. Er zijn ook dagen dat deze delta temperaturen nog dichter bij elkaar liggen.

B1.2.2 RV en VPD

Doordat de temperatuur verschilde, verschilden de RV en de VPD ook enigszins per klimaatcabine. De RV verschilde 5-8% en de VPD 0.25 kPa (Figuur 16).

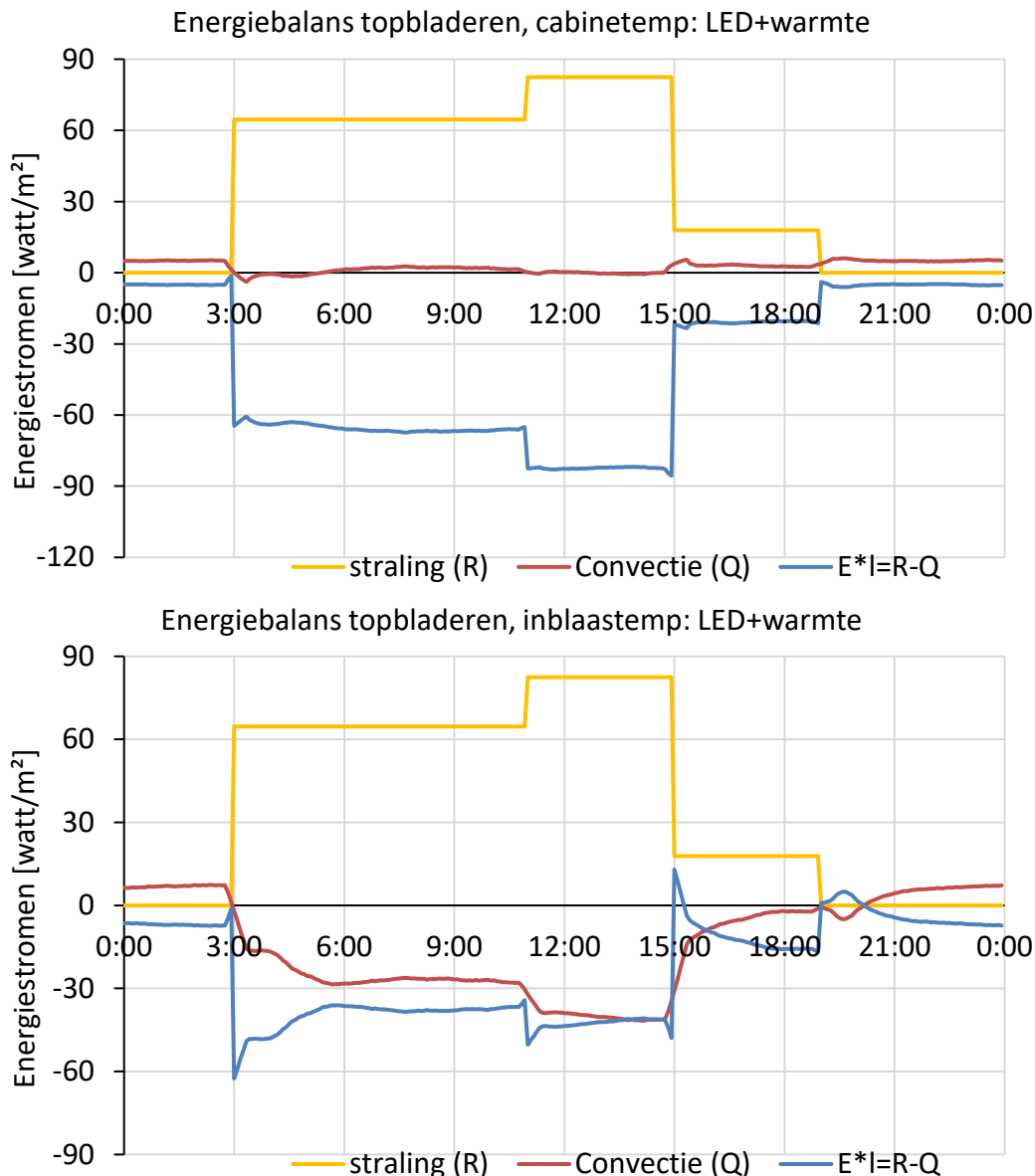


Figuur 16. RV en VPD van de verschillende behandelingen op 13 december 2020.

B1.2.3 Opstelling van de balans

Het wel of niet verdisconteren van de inblaastemperatuur laat een enorm verschil zien op de convectieve warmte-afvoer in de energiebalans. Naarmate de luchttemperatuur van de klimaatcabine meer afwijkt van de inblaastemperatuur neemt dit effect toe. Figuur 17 laat het meest extreme verschil zien tussen het nemen van de luchttemperatuur of de

inblaastemperatuur als uitgangspunt. Dit loopt op van enkele watts aanvoer naar 28 tot 40W afvoer van energie en heeft dus een enorme impact op de berekende verdampingswarmte (blauwe lijn) en vervolgens op de berekende huidmondjesgeleiding.

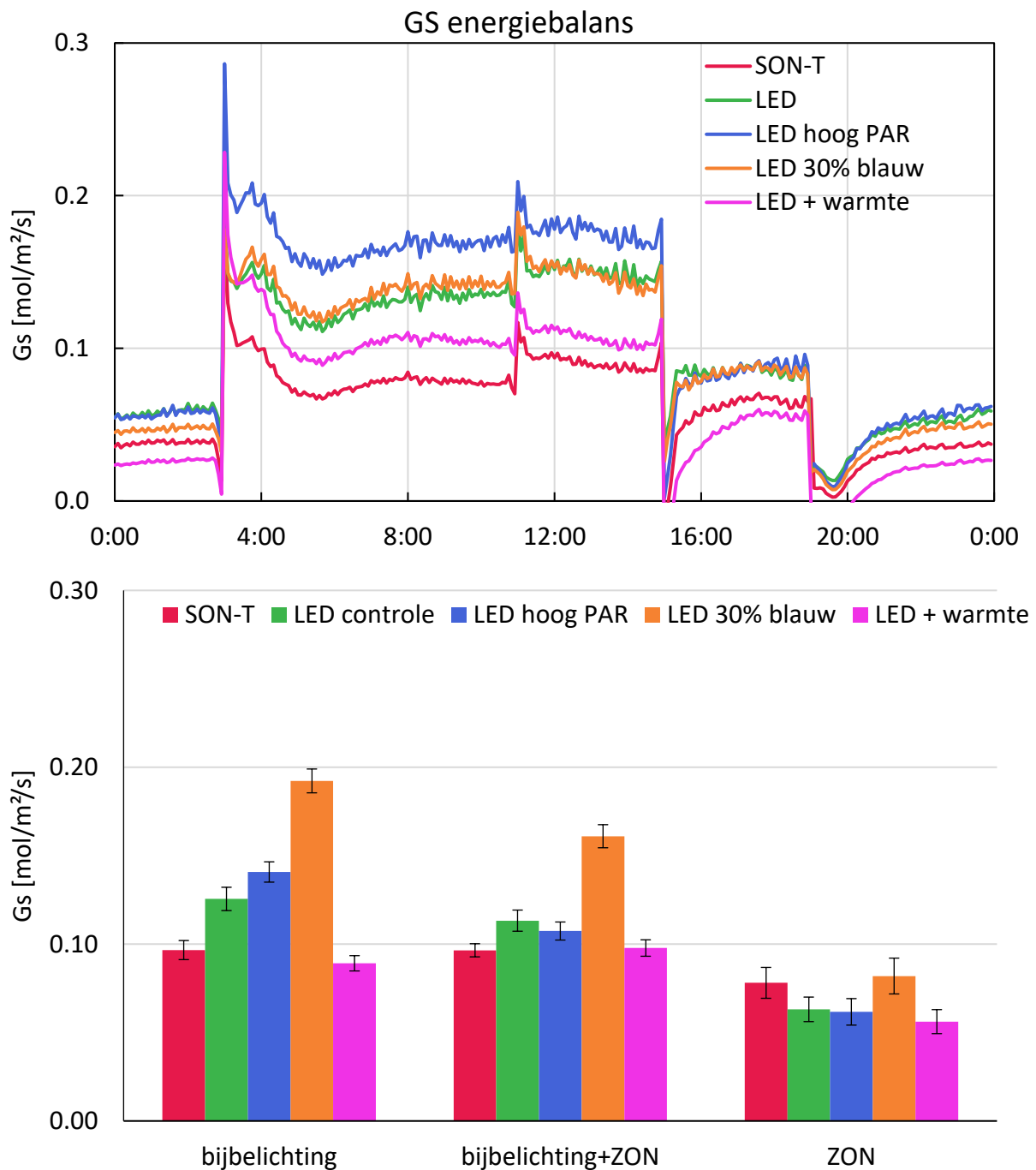


Figuur 17. Energiebalans waarin ruimtetemperatuur als uitgangspunt wordt genomen (boven) of de inblaastemperatuur (onder) voor de convectieve overdracht (Q). Als de ruimtetemperatuur als uitgangspunt wordt genomen, dan is er nauwelijks convectieve warmteoverdracht en daardoor wordt een hoge verdamping ($E \cdot I = R - Q$) berekend. Door de inblaastemperatuur als uitgangspunt te nemen stijgt de convectieve warmteoverdracht fors en ligt de berekende verdamping fors lager.

Figuur 18 boven toont de berekende huidmondjesgeleidbaarheid via de energiebalans waarbij de inblaastemperatuur in de balans is opgenomen:

- Opvallend is dat de orde van grootte van de huidmondjesgeleidbaarheid voor alle behandelingen redelijk goed overeenkomt (vergelijk Figuur 18 boven met Figuur 18 onder).

- De grootste afwijkers zijn LED 30% blauw en LED hoog PAR, die overigens alsnog wel binnen de 75% nauwkeurigheid vallen. De reden waarom volgens de berekening via de energiebalans de huidmondjesgeleidbaarheid van LED hoog PAR het hoogst is, terwijl met de LI-6800 bij LED 30% blauw juist de grootste opening gemeten is, is niet geheel duidelijk. Wel speelt een rol dat:
 - Het in de basis al niet logisch is dat de luchttemperatuur van LED 30% blauw al iets hoger ligt dan bij LED (Figuur 14; kleine afwijking van de luchttemperatuursensor?). Bij een gelijke luchttemperatuur zou dan de bladtemperatuur van LED 30% blauw lager moeten liggen dan bij LED in plaats van gelijk. Hierdoor zou de delta blad-inblaastemperatuur kleiner zijn, waardoor de berekende huidmondjesgeleidbaarheid van LED 30% blauw weer hoger zou komen te liggen. De delta lucht-planttemperatuur is namelijk van die behandeling wel het hoogst (Figuur 15), wat onder een min of meer gelijke instraling duidt op een hogere verdamping.
 - Gedacht vanuit energiestromen zou de blad- en luchttemperatuur van LED hoog PAR op hetzelfde niveau hebben moeten liggen als de behandeling LED + warmte, en boven de temperaturen bij SON-T (Tabel 4 en 5). De mogelijkheid bestaat dat bij de behandelingen LED + warmte en SON-T er meer absorptie van stralingswarmte door de klimaatcabine-wanden plaats vond, waardoor de hele klimaatcabine voor die behandelingen hoger van temperatuur werd.
- De energiebalans laat ook zien dat ondanks dat in het tijdsslot 11:00-15:00 de energie met 21W/m^2 toeneemt (doordat het zonlicht om 11:00 uur aangaat; Tabel 4), dit geheel door de verhoogde convectorie (groter verschil bladtemperatuur en inblaastemperatuur) wordt tenietgedaan. Daardoor wordt het logisch dat het effect op de huidmondjesgeleidbaarheid beperkt blijft.
- In het laatste tijdsslot dalen èn de stralingsenergie èn de berekende en gemeten huidmondjesgeleidbaarheid fors.



Figuur 18. Berekende huidmondjesgeleiding (G_s) vanuit de energiebalans (boven) en gemeten huidmondjesgeleidbaarheid met de LI-6800 (onder; zelfde figuur als Figuur 6) voor de drie tijdsslots: alleen bijbelichting (3:00-11:00), bijbelichting + zonlicht (11:00-15:00) en alleen zonlicht (15:00-19:00).

Conclusies energiebalans

In grote lijnen werkt de energiebalansmethode ook onder klimaatkameromstandigheden. Afwijkingen tussen de berekeningen en de metingen van de huidmondjesgeleidbaarheid lijken te ontstaan door de manier van meten van de luchttemperatuur: klimaatcabine-temperatuur of inblaastemperatuur. Het grotere verschil in lucht- en planttemperatuur is een directe aanwijzing dat er onder 30% blauw meer verdamping plaats vond. Anderzijds is het duidelijk geworden dat de inblaastemperatuur een grote rol speelt in de convectie-overdracht.

De vraag kan naar boven komen wat deze analyse van de energiebalansmethode toevoegt aan de resultaten van hoofdstuk 4. Op grond van hoofdstuk 4 waren de resultaten helder: Onmiskenbaar verhoogt het percentage blauw de huidmondjesgeleidbaarheid. Bovenstaande analyse laat zien dat de grote door de belichting en warmtestraler aangelegde verschillen in energieaanvoer fors verkleind worden door de heersende energiebalans in de klimaatcabines: Een hoge toevoer van energie geeft opwarming van bladeren waardoor er automatisch een groter verschil ontstaat met de inblaastemperatuur. Hierdoor wordt de convectieve afvoer van energie verhoogd. Dit vermindert de noodzaak tot koeling via de huidmondjes. Vooral de manier van *afvoer* van energie lijkt dus de huidmondjesgeleidbaarheid te hebben bepaald in plaats van de *aanvoer*.

Anders gezegd, convectieve afvoer van energie en afvoer van energie via verdamping laten een waterbedeffect zien: Als de ene omhooggaat, gaat de andere naar beneden en andersom. Dit is overigens inherent aan de wet van behoud van energie.

- Meer convectieve afdracht van energie (door lage inblaastemperatuur) geeft een lagere warmtelast om weg te koelen. En daarom een lage huidmondjesgeleidbaarheid.
- Een redenatie andersom is ook mogelijk. Een lage huidmondjesgeleidbaarheid geeft slechts een beperkte koeling, daardoor stijgt de planttemperatuur, dit geeft automatisch een grotere convectieve afvoer van energie.

De vraag kan gesteld worden welk proces hierin leidend is:

- Aan/afvoer van convectieve energie is leidend: door het vergroten van de convectieve afvoer is er minder noodzaak tot opening van de huidmondjes. Dit is een lijn die onder andere gevolgd wordt door Schymanski & Or 2016: door meer wind is er minder verdamping en daardoor een hogere water use efficiency. Dit lijkt het geval te zijn bij de behandeling SON-T en LED + warmte.
- Huidmondjes zijn leidend: door forse huidmondjesgeleidbaarheid is er meer verdamping en daardoor juist veel minder koeling of zelfs opwarming door convectie. Dit lijkt het geval te zijn bij de behandeling LED 30% blauw.

Het antwoord hangt dus af aan welke knop er gedraaid wordt: als er aan de factor convectieve overdracht gedraaid wordt, dan reageren de planten door meer of minder te koelen (via de huidmondjesstand). Als de factor verdamping beïnvloed wordt (door huidmondjesstand of

VPD) dan volgt als vanzelf vermindering of vermeerdering van de convectieve warmteoverdracht.

Terugkerend naar de hoofdvraag: is er voldoende huidmondjesopening onder LED-belichting? Er zal dus goed moeten worden gekeken hoe de inkomende energie wordt afgevoerd. Als de huidmondjes beperkend zijn voor de fotosynthese, dan moet er enerzijds gestuurd worden met % blauw tot opening van de huidmondjes en anderzijds moet gepoogd worden om de convectieve afdracht van energie en afdracht van energie door uitstraling te verminderen, waardoor er meer energie zal moeten worden afgevoerd via transpiratie. De vraag is dan hoe dit concreet kan worden uitgewerkt:

- Het blootstellen van de bladeren aan zeer koele buitenlucht is een aanjager van de convectieve overdracht wat dus vermeden moet worden.
- Het te ver verlagen van de convectieve overdracht door verminderde luchtbeweging is gevaarlijk omdat dan ook de grenslaagweerstand voor zowel verdamping als de CO₂-opname verhoogd wordt.
- Wanneer uitstraling naar het kasdek hoger is dan instraling is er extra warmteafdracht, wat de noodzaak tot verdamping via de huidmondjes remt. Het voorkomen van netto uitstraling met bijvoorbeeld schermdoeken (isolatie) helpt dan.
- Door de RV te verlagen, wordt de verdamping aangejaagd, maar als dit te veel wordt verlaagd, kan dit huidmondjessluiting in de hand werken waardoor de verdamping vermindert.
- De RV mag verhoogd worden tot het niveau dat de verdamping beperkt wordt. Als de verdamping beperkt wordt, dan zal de bladtemperatuur stijgen, waardoor niet alleen de convectieve afdracht van energie weer stijgt, maar ook de huidmondjes verder kunnen openen om de extra warmte af te voeren.

Bovenstaande punten suggereren dat na isolatie (voorkomen van uitstraling) en het binnen veilige marges verhogen van de RV een verhoging van het percentage blauw in de lampen de meest veilige oplossing is.