Improvement Centre BV
Postbus 4
2665 ZG Bleiswijk
Violierenweg 3
2665 MV Bleiswijk

Telefoon 010 522 1771
www.delphy.nl

Hoe wordt jaarrond productie van paprika rendabel?

Toepassing van LED belichting in paprika

Worldwide Expertise for Food & Flowers

Lisanne Helmus-Schuddebeurs[1], Jeroen Zwinkels[2], Sander Hogewoning[3]

1 Delphy- Improvement Centre
2 Delphy
3 Plant Lighting

Bleiswijk, April 2020

Projectnummer Kas als Energiebron: 20095

Onderstaande partijen zijn bij het project betrokken geweest als financier of uitvoerder:

Disclaimer
© 2020 Delphy Improvement Centre, Violierenweg 3, 2665 MV Bleiswijk, Tel. 010- 522 1771

Dit document is auteursrechtelijk beschermd.

Delphy is niet aansprakelijk voor eventuele schade als gevolg van gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen

Inhoudsopgave

Samenvatting 5
1. Inleiding 7
1.1. Doelstellingen 7
2. Aanpak en Kasinrichting 9
2.1. Kasinrichting 9
2.1.1. Belichting 9
2.2. Registraties en metingen 11
2.2.1. Monitoring klimaat en gewasontwikkeling 11
2.2.2. Bepalen gewasfotosynthese 11
2.3. Teeltplan paprika in balans 11
3. Resultaten en discussie 13
3.1. Klimaatgegevens 13
3.2. Belichting en energiegebruik 16
3.3. Gewasstrekking 18
3.4. Paprika in balans 20
4. Bepaling gewasfotosynthese 23
4.1. Verticale lichtuitdoving in het gewas 23
4.2. Respons bladfotosynthese op licht- en CO_2 24
4.2.1. Lichtrespons van de fotosynthese op verschillende gewashoogtes 24
4.2.2. CO_2-respons van de fotosynthese 26
4.2.3. Lichtrespons van de fotosynthese voor de topbladeren in verschillende seizoenen 27
4.2.4. Verval fotosynthese-capaciteit dieper in het gewas 29
4.4. Huidmondjesopening 33
4.5. Gewasfotosynthese: bepaling fotosynthese-parameters 35
4.6. Gewasfotosynthese: uitkomsten model 35
5. Productie en kwaliteit 37
6. Leerpunten en conclusies 43
7. Communicatie 45
8. Literatuur 46
9. Bijlage 47
9.1. kasinrichting. 47
9.2. Productie rassen 47
9.3. Gemiddeld vruchtgewicht rassen 49

Samenvatting

De vraag naar jaarrond Nederlands product neemt toe, waardoor een jaarrond rendabele teelt van paprika steeds dichterbij komt. Met LED kan het klimaat meer onafhankelijk van de belichting worden gestuurd en er kan in het spectrum gevarieerd worden om zo het gewas de juiste richting te geven. Dit onderzoek richt zich op het: 'Ontwikkelen van een teeltstrategie met LED belichting die toekomstbestendig is en moet aansluiten op de transitie richting een klimaatneutrale glastuinbouw'. Het produceren in zetsels en het realiseren van voldoende strekking van de internodia zijn op basis van eerdere onderzoeken met paprika onder belichting aangemerkt als de beperkende factoren voor een succesvolle winterteelt met paprika's. De proefopzet was ingericht op basis van deze 2 pijlers:

- Door het aanbod van assimilaten (source) af te stemmen op de vraag naar assimilaten (sink) kan in de winter een vlakke productie worden gerealiseerd.
- Door het toevoegen van verrood licht wordt een betere strekking van de internodia gerealiseerd.

Bij Delphy Improvement Centre waren 2 kassen van ± 150 m^2 op identieke wijze ingericht met de belichting als onderzoeksfactor:

- Afdeling 10.1 was uitgerust met Hybride belichting bestaande uit 80 µmol/m^2/s SON-t en 120 µmol/m^2/s LED belichting (88% rood; 5% groen; 7% blauw)
- Afdeling 10.5 was uitgerust met een volledige LED installatie met een intensiteit 200 µmol/m^2/s. De LED was schakelbaar in dezelfde stappen als de Hybride afdeling (80 en 120 µmol/m^2/s).
- In de helft van beide afdelingen was 20 µmol/m^2/s (10%) verrood licht toegevoegd, dit zorgde dus voor 4 lichtbehandelingen: Hybride ; Hybride + verrood ; LED ; LED + verrood.

Het gewas werd op 21 september geplant en het hoofdras was 'Mavera'. Er werd geteeld met 2 stengels per plant, om zo voldoende groeikracht te hebben, en de dunstrategie op praktische wijze te kunnen uitvoeren. Om het gewas in balans te houden met het aanbod aan licht is er in het begin van de teelt buitenlicht weggeschermd om te voorkomen dat het aanbod aan assimilaten hoger is dan de vraag. Vervolgens is er vruchtdunning toegepast om te zorgen dat met het afnemende licht de vraag naar assimilaten niet hoger wordt dan het aanbod met lichtsommen van ± 16 mol licht in de winter. Op basis van het verloop van de productie en zetting is aangetoond dat deze rekenkundige benadering van de teelt erin heeft geresulteerd dat er in de winterperiode continue zetting en ook continue oogst is gerealiseerd. De gemiddelde winterproductie lag tussen de 0.7 en 0.8 kg/m^2/week, wat in lijn is met de vooraf berekende potentie van het gewas.

Op basis van het meten van de wekelijkse lengtegroei, het meten van de internodia lengte en de beoordeling van de telers, wordt geconcludeerd dat het toedienen van verrood licht resulteert in extra strekking op de internodia, zowel in de Hybride als in LED behandeling. Door de telers werd de behandeling 'Hybride met verrood' als enige beoordeeld als 'werkbaar', met nog steeds de kanttekening dat meer strekking gewenst is voor een goed werkbaar gewas.

De fotosynthese metingen hebben laten zien dat de verschillende lichtbehandelingen geen verschil opleverde in fotosynthese-eigenschappen van de bladeren. Wel bleek dat er in het voorjaar een snel verval was van de fotosynthese dieper in het gewas. Dit verval was sterker dan in een onbelichte teelt. Dit verval werd vooral veroorzaakt door een beperking van de huidmondjes opening. Deze metingen laten zien dat er dus een stap te maken is in de productie, maar anderzijds zal de oorzaak van dit verval achterhaald moeten worden. Het berekenen van de assimilatensom heeft laten zien dat dit een betere voorspelling van de productie geeft dan de PARsom.

Een onverwacht resultaat in de proef was het verschil in productie tussen de lichtbehandelingen, en specifiek de behandeling 'Hybride + verrood'. Deze lichtbehandeling realiseerde structureel gedurende de teelt een hogere productie met uiteindelijk gemiddeld 2.5 kg/m^2 meer productie tot

week 15 en 5 kg/m^2 aan het einde van de teelt ten opzichte van de overige 3 lichtbehandelingen. De oorzaak voor deze hogere productie is in de proef niet volledig te achterhalen geweest. Metingen aan droge stof % lieten geen verschillen zien. Wel lijkt de oorzaak te relateren aan het aandeel verrood in het lichtspectrum, welke in de behandeling 'Hybride met verrood' het hoogst was. De uiteindelijke productie (rood geoogst) was aan het einde van de teelt 41.7 kg/m^2; 37.5 kg/m^2 ; 35.6 kg/m^2 ; 36.6 kg/m^2 voor respectievelijk 'Hybride + verrood' ; Hybride ; LED + verrood ; LED. Deze gerealiseerde productie biedt potentie richting een rendabele winterteelt. Het vruchtgewicht in de laatste weken van de teelt was te laag en vraagt nog verbetering

1. Inleiding

Nederland heeft een groot areaal paprikateelt waarmee een groot deel van de Europese markt beleverd wordt. Gezonde duurzame paprika's vanuit Nederland zijn echter nog niet jaarrond beschikbaar, wat wel voor een duurzame relatie met de retailer noodzakelijk lijkt. Ook moeten we vooruitkijken naar een paprikateelt die toekomstbestendig is, waarbij we rekening houden met 3 belangrijke pijlers: klimaatneutraal, rendabel en een goede, kwalitatief hoogwaardige productie.

Om jaarrond aan de markt te kunnen zijn is belichting noodzakelijk. In de afgelopen 10 jaar zijn er verschillende onderzoeken uitgevoerd met paprika's onder belichting. Dit heeft tot dusver nog niet geleidt tot toepassingen in de praktijk. Het feit dat dit tot dusver niet is geslaagd heeft zowel teelt technische argumenten als ook de marktpositie van de Nederlandse paprika in de winter. Door de ontwikkeling van LED belichting nemen de kansen op een succesvolle belichte winterteelt van paprika ook toe. Met LED kan het klimaat meer onafhankelijk van de belichting worden gestuurd en er kan in het spectrum gevarieerd worden om zo het gewas de juiste richting te geven. Daarnaast neemt de vraag naar jaarrond Nederlands product toe, waardoor ook op dit vlak een jaar rond rendabele teelt dichterbij komt.

Deze ontwikkelingen in de teelt moeten worden meegenomen in het toekomstperspectief van een klimaatneutrale glastuinbouw. De toepassing van belichting kan naast het bijdragen aan jaarrond productie en een sterkere marktpositie ook bijdragen om de energievraag van de teelt meer in balans te krijgen. Maar allereerst moet hiervoor de teeltkennis voor de toepassing van belichting in paprika worden ontwikkeld. Omdat belichting in de paprikateelt nog beperkt wordt toegepast is het van belang direct de juiste kennis voor de toepassing van LED belichting in de teelt van paprika te ontwikkelen. Belangrijke elementen hierin zijn plantbalans, klimaatstrategie (focus op een stabiele zetting door de juiste balans tussen licht en temperatuur), en lichtspectrum.

1.1. Doelstellingen

Technische doelstellingen

- Ontwikkelen van een teeltstrategie met LED belichting in paprika die toekomstbestendig is en moet aansluiten op de transitie richting een klimaatneutrale glastuinbouw.
- Toepassen van verrood om de strekking van de plant in de winter te bevorderen.

Energiedoelstellingen

- Het is doel is om de toepassing van LED belichting in de teelt van paprika te ontwikkelen zodat er in een belichte teelt direct gekozen kan worden voor de meest efficiënte vorm van belichting. Dit resulteert erin dat de ontwikkeling van het teeltsysteem van de (belichte) paprikateelt toekomstbestendig is en aansluit bij de toekomstvisie van een 'fossielvrije glastuinbouw'.
- De principes van 'Het nieuwe telen' worden toegepast om onder andere de energievraag te beperken en uitstraling te voorkomen.

Teeltdoelstellingen

- Stabiele oogst van ± 0.7 kg/m^2/week.
- Lengtegroei in de winterweken van 7 cm per week nastreven.
- Source/sink balans optimaliseren zodat een vlakke teelt met behoud van zetting gerealiseerd kan worden.

Leerdoelstellingen

Een belangrijk item van het project is om te achterhalen hoe de factoren licht, lichtspectrum en klimaat de gewasontwikkeling van paprika beïnvloeden, 2 specifieke vragen zijn:

- Is een tekortkoming aan strekking in de winter bij paprika een gevolg van een tekortkoming van verrood?
- Wat is het effect van een Hybride belichtingssysteem op het klimaat en op plantontwikkeling t.o.v. full led?

2. Aanpak en Kasinrichting

2.1. Kasinrichting

In het project is er gekozen voor het hoofdras Mavera (Enza zaden), dit ras was gekozen op basis van eerdere positieve ervaringen met dit ras onder (LED) belichting. In het midden van de afdelingen was er een overlap tussen de spectra, in deze goot zijn een aantal extra rassen geplaatst om de ontwikkeling van deze rassen onder LED en Hybride belichting te observeren (Bijlage 8.1 kasinrichting + 8.2 Bijlage Productie rassen). Er werd geteeld met 2 stengels per plant en 7.1 stengels/m^2, het verloop van de teelt was als volgt:

- Zaaidatum: 10 augustus 2018
- Plantdatum: 21 september 2018
- Eerste oogst: 19 november 2018
- Laatste oogst: 4 september 2019

Het project werd uitgevoerd in 2 afdelingen waarvan de kasinrichting identiek was, met uitzondering van de belichting. De afdelingen hadden daarbij de volgende kenmerken:

Afdeling:	10.1 en 10.5, Delphy Improvement Centre, Bleiswijk
Oppervlakte:	bruto opp.: 168 m^2 (9.6m * 17.5 m), netto teeltopp.: 144 m^2 (9.6m* 15 m).
Poothoogte:	6.68 meter
Kasdek type:	Venlo dek – tralie ligger met 2 kappen per tralie.
Glastype:	Helder glas
Verwarming:	Buisrail
CO_2 dosering:	OCAP zuiver CO_2.
Klimaatcomputer:	Hoogendoorn.
Schermen:	Obscura 9950 FR W (Lichtuitstootscherm) Luxous 1147 FR (Energiescherm)
Teeltsysteem:	4 rijen systeem
Substraat:	Grodan Vital.
Verneveling:	capaciteit 0.5 L/m^2/uur
Coating:	8 April ReduFuse aangebracht op het kasdek

2.1.1. Belichting

De belichting in beide afdelingen was uitgerust met een intensiteit van ±200 µmol/m2/s PAR, die in twee stappen schakelbaar was. Proefkas 10.1 was uitgerust met een Hybride belichtingssysteem (± 80 µmol/m^2/s SON-t en ± 120 µmol/m^2/s LED) en proefkas 10.5 met een full-LED systeem (88% rood; 5% groen; 7% blauw). De beide afdelingen waren in tweeën schakelbaar waarbij in 10.1, LED en SON-t apart geschakeld konden worden en in 10.5 kon de LED in twee stappen: 80 µmol/m^2/s en 120 µmol/m^2/s geschakeld worden. Voor aanvang van de teelt zijn door Plant Lighting metingen van het spectrum en de lichtverdeling uitgevoerd, wat een goede lichtverdeling liet zien in de kleine afdeling. Figuur 2-1 toont de lichtverdeling van afdeling 10.5. De gemiddelde intensiteiten belichting gemeten aan het begin van de proef staan in Tabel 1. De gemiddelde lichtintensiteit was 5% tot 9% (afhankelijk van de meethoogte) lager in afdeling 10.1. Hiervoor zijn later in de proef extra armaturen bijgehangen waarmee de intensiteit van beide afdelingen op gelijke hoogte kwam te liggen.

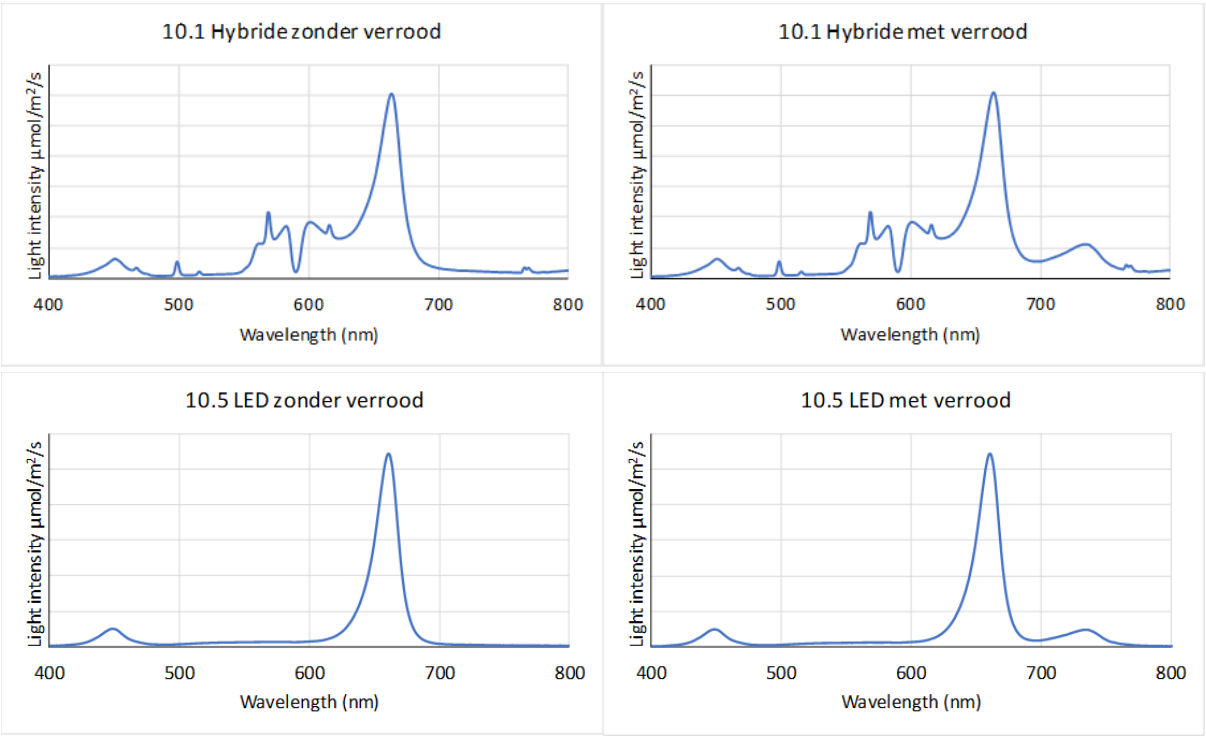
Op basis van kennis uit eerdere proeven met paprika en belichting was op voorhand bekend dat strekking mogelijk een beperkende factor zou kunnen worden in de gewasontwikkeling onder zowel Hybride als ons onder volledig LED. De samenstelling van het lichtspectrum en dan specifiek de verhouding tussen rood en verrood licht kan van invloed zijn op de strekking van het gewas. Beide proefafdelingen waren daarom voor de helft uitgerust met 10% (± 20 µmol/m^2/s) verrode LED-belichting. Dit resulteerde in vier verschillende lichtspectra binnen de totale proefopzet (Figuur 2-2)

Diepte (m)	Matten (#)	g	gg	gg	gg	gg	gg
				Achter gevel			
15	10	120	149	154	162	158	148
13.5	9	147	179	186	190	188	176
12	8	163	195	202	207	208	195
10.5	7	175	201	207	212	213	200
9	6	180	202	207	209	215	201
7.5	5	180	201	204	207	212	201
6	4	176	199	204	203	212	199
4.5	3	173	197	202	202	209	197
3	2	164	192	197	196	202	193
1.5	1	154	179	184	187	191	180
0	0	142	162	164	169	147	163
10.5				Betonpad			
7 LED strengen							g = goot
Meethoogte 140 cm		Gem afd. 186			Gem afd. - rand = 200		µmol/m2/s PAR

Figuur 2-1. Lichtverdeling in µmol/m2/s PAR bij volle intensiteit in afdeling 10.5 (full-LED) zoals gemeten op 140 cm hoogte bij start van de proef. De planten in 2 buitenste goten van de afdeling werden niet meegenomen in de registratie van de productie.

Tabel 2-1. Lichtintensiteit in µmol/m2/s PAR van de belichting gemeten aan het begin van de proef op twee meethoogtes. De lagere intensiteit van streng 2 in 10.1 is na deze meting voor gecorrigeerd door extra armaturen bij te hangen. De waarden zijn in PAR en exclusief het verrode licht van ±20 µmol/m2/s bij de kop van het gewas in de helft van zowel afdeling 10.1 als 10.5.

	Meethoogte 140 cm			Meethoogte 230 cm
	Streng 1	Streng 2	Totaal	Totaal
10.1 (Hybride)	80 (son-t)	103 (LED)*	183*	198*
10.5 (LED)	81 (LED)	119 (LED)	200	209



Figuur 2-2. Spectrale samenstelling van de belichting in de twee proefkassen (10.1 Hybride en 10.5 full-LED), beide voor de helft uitgerust met aanvullende verrode LED-belichting.

2.2. Registraties en metingen

2.2.1. Monitoring klimaat en gewasontwikkeling

- Gedurende de teelt werden het kasklimaat (Temperatuur; luchtvochtigheid, CO_2, PAR), watergift, de kasaansturing (schermen en belichting) en de meteogegevens (buitenlicht en temperatuur) gemonitord met behulp van 5 minuten data.
- De ontwikkeling van het gewas werd uitgevoerd middels het wekelijks vastleggen van de volgende plantparameters:
    - Lengtegroei [cm/week]
    - Zetting [# nieuw gezette vruchten/m^2/week]
    - Geoogste vruchten [# geoogste vruchten/m^2/week]
    - Plantbelasting [# vruchten/m^2]
    - LAI [m^2 blad/m^2]
- Op 3 momenten in de teelt is de internodia lengte bepaald middels het tellen van de internodia in de bovenste 50 cm van het gewas. Dit werd gedaan met een interval van ongeveer 10 weken, de periode waarin het gewas een minimale groei van 50 cm heeft gerealiseerd.
- De paprika's werden 3x per 2 weken geoogst, waarbij de volgende registraties werden uitgevoerd:
    - Productie [aantal kilo's per goot en deze werden op basis van de teeltoppervlakte omgerekend naar kg/m^2]
    - Gemiddeld vruchtgewicht [per goot werd op basis van ±20 vruchten het vruchtgewicht bepaald, dit resulteerde in ±60 vruchten per behandeling per oogstmoment.
    - Uitgroeiduur [aantal dagen van zetting tot oogst].

2.2.2. Bepalen gewasfotosynthese

Om de gewasfotosynthese te berekenen heeft Plant Lighting de volgende zaken uitgevoerd:

- LAI-metingen gedurende de looptijd van de proef (door Delphy IC)
- Lichtuitdoving met een lijnsensor (Li-191R) en bepaling van de extinctie-coëfficiënt voor lichtuitdoving (Monsi & Saeki, 1953).
- Metingen van de fotosynthese op meerdere gewaslagen.
- Meting van de fotosynthese aan topbladeren.
- Fitting van het Farquhar, von Caemmerer & Berry model (1980; FvCB-model) op de fotosynthese- data van de licht- en CO2-response (voor formules zie Yin et al. 2004).

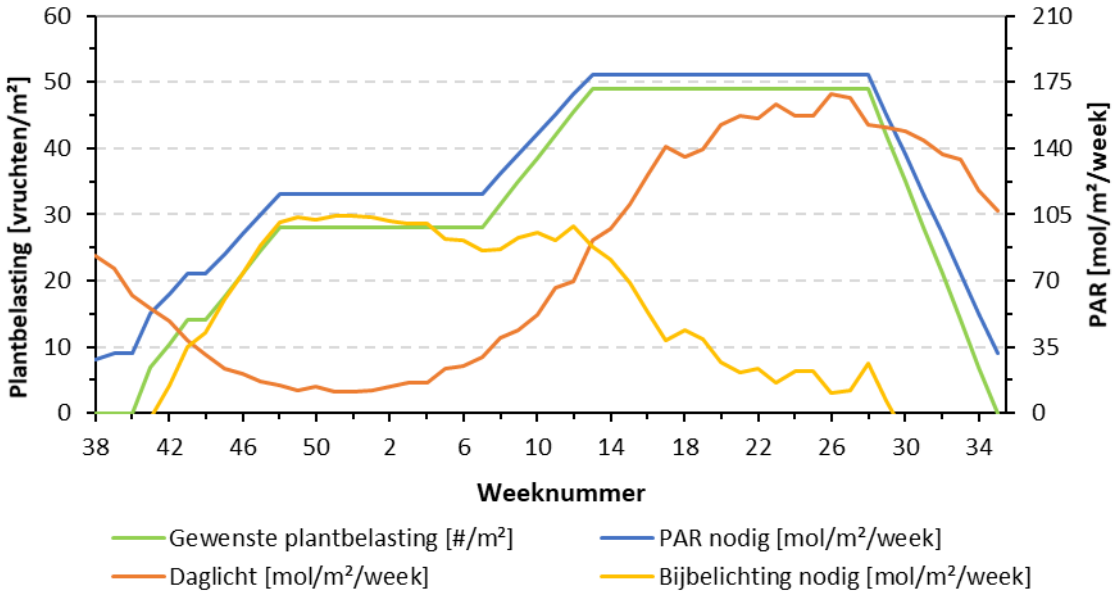
Daarnaast werd gebruikt gemaakt van de gegevens vanuit de hierboven beschreven klimaatmonitoring (PAR, kastemperatuur, RV en CO_2)

2.3. Teeltplan paprika in balans

Voorafgaand aan de proef is een teeltplan gemaakt waarbij getracht is de aanmaak van assimilaten (source) en vraag naar assimilaten (sink) zo goed mogelijk in balans te houden, met als doel een stabiele en zo hoog mogelijke productiviteit te realiseren. Omdat er nog geen model voorhanden was om de assimilatie van het gewas te berekenen, is ingeschat hoeveel mol PAR-som benodigd is bij een zekere plantbelasting (=aantal vruchten per m^2). Wetende dat de PAR-som niet gelijk is aan de assimilatensom. Immers, PAR-som en assimilatensom verhouden zich niet 1:1 vanwege (1) een lagere lichtonderschepping aan het begin van de teelt, (2) een lagere lichtbenutting voor assimilatie wanneer de lichtintensiteit hoog is, en (3) fluctuaties in de CO2-concentratie wat een grote invloed heeft op de assimilatie bij een zekere lichtintensiteit.

Alle beperkingen daargelaten, is uitgegaan van een zekere PAR-som benodigd voor het vegetatieve gewas, plus een zekere PAR-som per vrucht per m^2. Met behulp van weerstatistieken, kastransmissie, en de beschikbare belichting is per teeltweek uitgerekend hoeveel mol licht naar verwachting beschikbaar is. Daarop is de plantbelasting afgestemd. Bij een stengeldichtheid van

7.1 stengels/m^2 is uitgegaan van 0.5 te zetten vruchten per stengel per internodium gedurende het winterseizoen. Dus het ene internodium een vrucht, en het volgende weer niet. Teveel gezette vruchten werden weggedund. In het begin van de teelt was meer daglicht beschikbaar dan benodigd volgens de berekening. Het teveel aan daglicht is weg geschermd (zie details in hoofdstuk 3.3 paprika in balans). Het teeltschema is samengevat in Figuur 2-3.

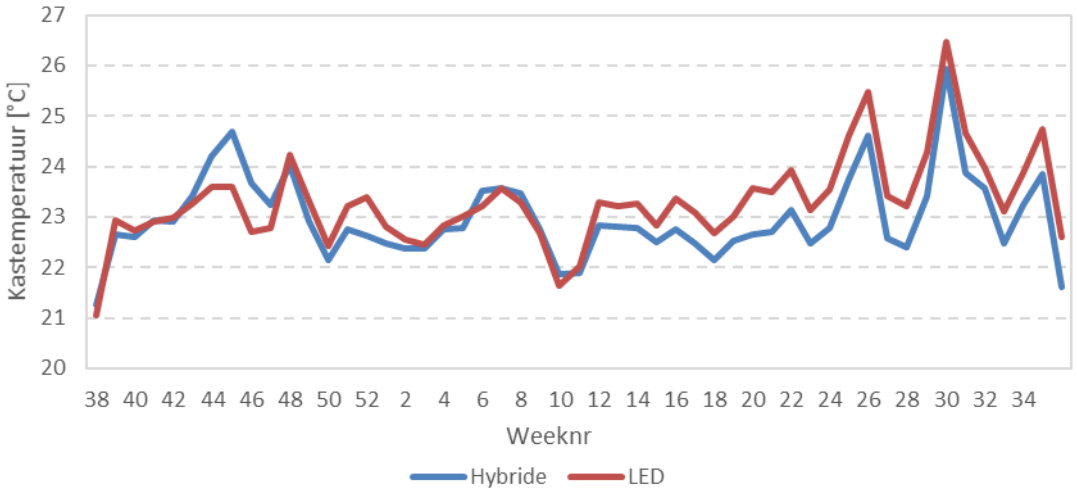


Figuur 2-3. Teeltplan paprika in balans. Er is gerekend met een benodigde gram per mol voor de generatieve en vegetatieve delen van het gewas. Toenemende plantbelasting (groen) betekent dat de benodigde mol PAR (blauw) ook moet toenemen. De benodigde mol PAR minus het 10-jarig gemiddelde aan daglicht (oranje) geeft de benodigde bijbelichting (geel). Alle lichtsommen staan in mol/m^2/week.

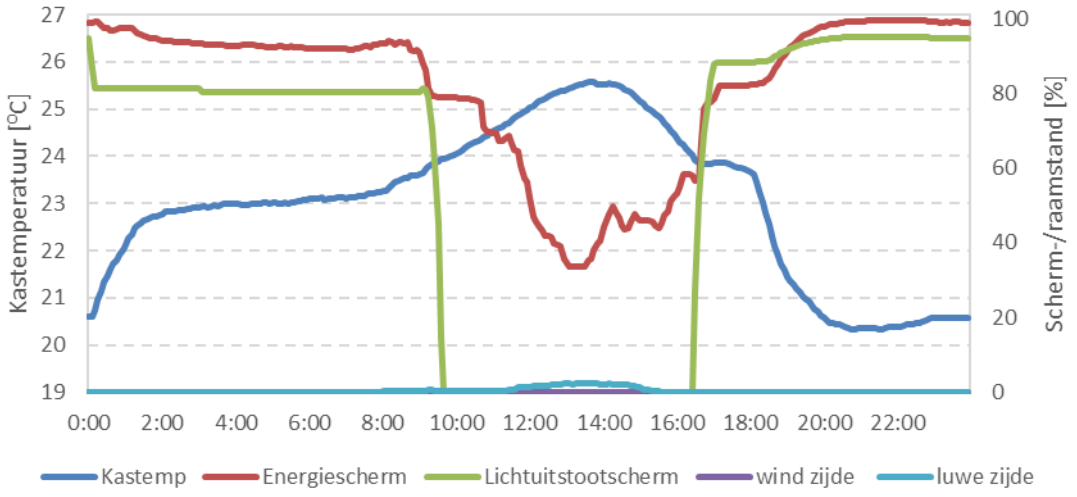
3. Resultaten en discussie

3.1. Klimaatgegevens

Begin van de teelt is gestart met relatief hoge etmaaltemperaturen met als uitgangspunt een snelle ontwikkeling. Dit om de lichtonderschepping te verhogen en het assimilatenverbruik op een hoog niveau te houden, omdat het aanbod van licht in deze fase hoger is dan de vraag. Op basis van de wekelijkse gewasbeoordeling was er geen aanleiding om de etmaaltemperatuur van 23°C te verlagen. De bloemen waren ondanks deze temperatuur nog relatief grof en een verlaging van de temperatuur zou tegen de wensen in de bloemen nog zwaarder maken. Figuur 3-2 toont de strategie in de donkerste weken van het jaar. Hierin is te zien dat schermen intensief zijn ingezet en er ook minimaal werd gelucht. De teeltstrategie was daarmee gericht op het beperken van het warmteverlies, die voor een groot deel werd ingebracht via de belichting. Eind februari werd geconstateerd dat de zetting wat minder was, waardoor de nachttemperatuur is verlaagd naar 18°C. Gedurende de teelt was het uitgangspunt om beide afdelingen optimaal te sturen. De strategie van de stooklijn was dat deze met de lampen aan in de LED afdeling 1°C hoger lag dan in de Hybride afdeling, de grafiek toont echter een klein verschil in de realisatie doordat de temperatuur in de regel boven de stooklijn uitkwam. In het voorjaar werden de afdelingen weer gelijk getrokken in de regeling. Als gevolg van de locatie van de afdeling werd de LED afdeling iets warmer, ondanks gelijke instellingen van de ventilatietemperatuur. De afkoeling in de nacht was in deze afdeling wat moeizamer (Figuur 3-1).

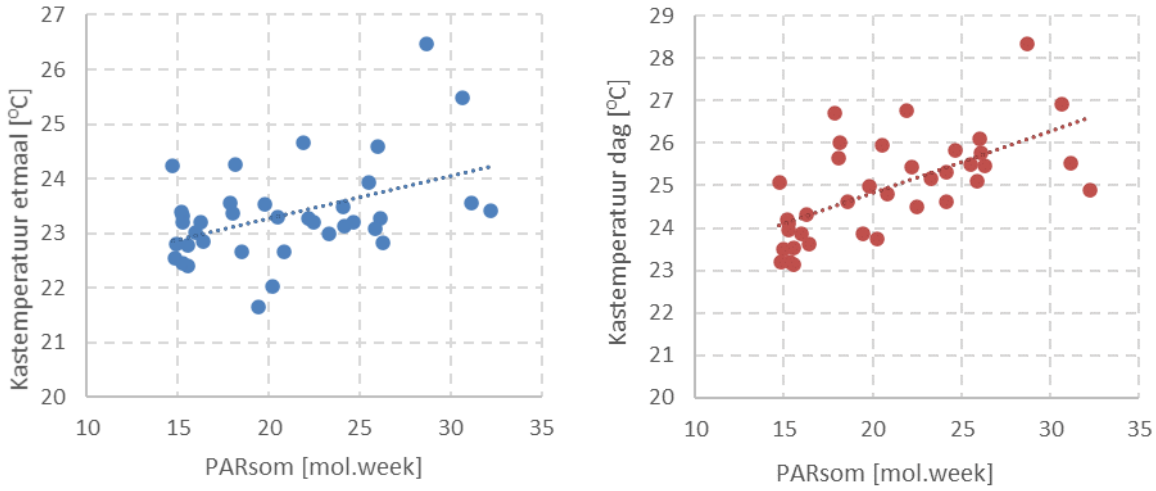


Figuur 3-1. Verloop van de etmaal temperatuur gedurende de teelt in de Hybride en LED afdeling.



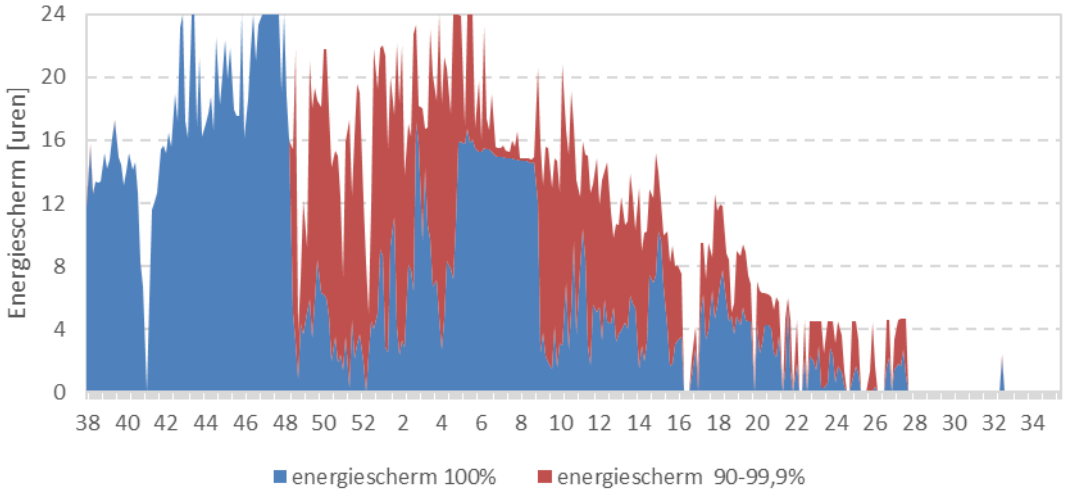
Figuur 3-2 Gerealiseerde inzet van de schermen en raamstanden in de relatie tot de kastemperatuur in afdeling 10.5 (100% LED). De lijnen tonen het cyclisch gemiddelde van de fase van 1 december 2018 t/m 15 januari 2019 (de weken waarin de licht en energietoevoer vanuit het zonlicht minimaal is).

Het realiseren van relatief hoge etmalen in de winter als gevolg van het intensief inzetten van de schermen heeft ertoe geleidt dat de verhouding tussen licht en temperatuur relatief vlak is geweest (Figuur 3-3). De lange daglengte in de belichte periode maakte dat in de belichtingsperiode met name in de belichte nacht een hogere etmaal is gerealiseerd. Met het toenemende buitenlicht in het voorjaar is vooral gedurende de dag periode meer temperatuur gerealiseerd en viel de nachttemperatuur lager uit omdat er minder belichtingsuren werden gemaakt.

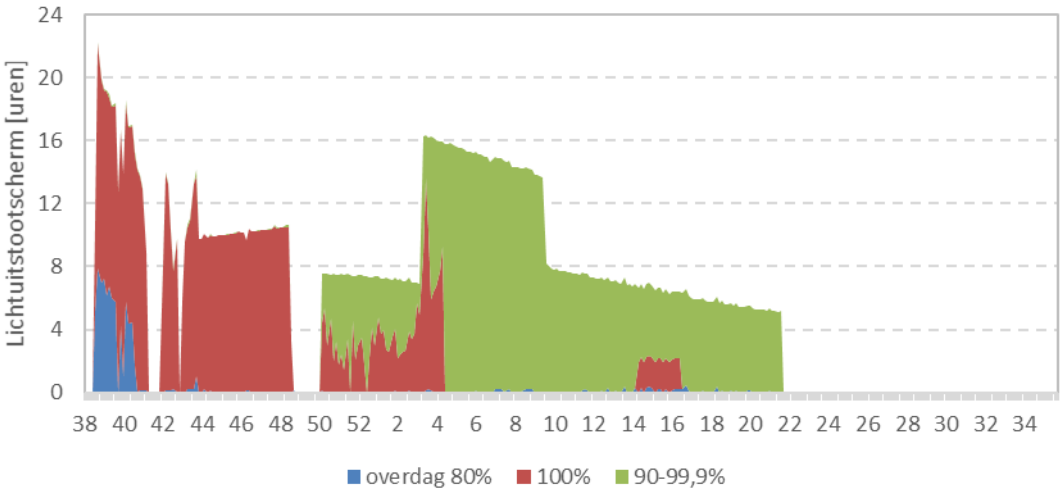


Figuur 3-3 Gerealiseerde licht:temperatuur verhouding tijdens de teelt gedurende het etmaal (links) en gedurende de dag (rechts) in afdeling 10.5 (100% LED), omdat de omstandigheden in beide afdelingen vergelijkbaar waren is afdeling 10.1 niet apart weergegeven.

Figuur 3-4 en Figuur 3-5 tonen de inzet van de schermen tijdens de teelt. Vanaf begin van de teelt mocht het energiescherm open lopen bij een instraling boven de 100 W/m^2. Het lichtuitstootscherm werd gesloten in de periode van zon-onder tot zon-op (met uitzondering van begin van de teelt, zie hiervoor 3.3 paprika in balans). Het energiescherm is gedurende de teelt ruim 3800 uur ingezet met sluitingspercentage >90%, waarvan ruim 2450 uur volledig gesloten. Het lichtuitstootscherm is ruim 2100 uur ingezet, waarvan ruim 1000 uur 100% sluiting.

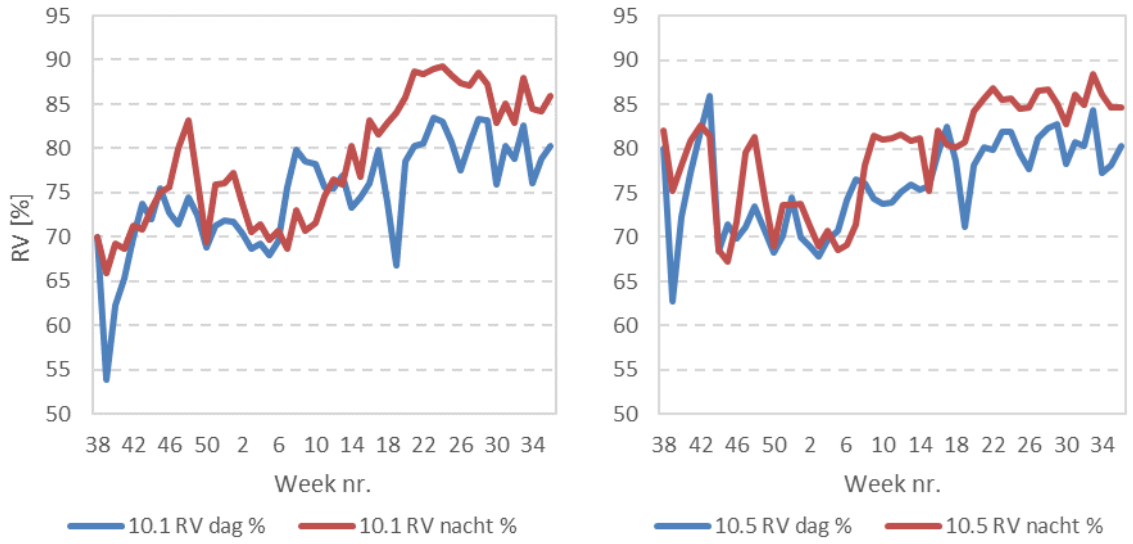


Figuur 3-4. Aantal uren dat het energiescherm is inzet met een sluitingspercentage van 100% en het aantal uren dat energiescherm met een kleine kier werd ingezet. Op basis van de kastemperatuur werd er een kleine kier in het scherm getrokken. Het energiescherm werd zowel gedurende de dag, als gedurende de nacht ingezet om de kas te isoleren. De grafiek toont de schermuren in afdeling 10.5, omdat de gerealiseerde uren in beide afdelingen zo goed als gelijk waren is afdeling 10.1 niet apart weergegeven.



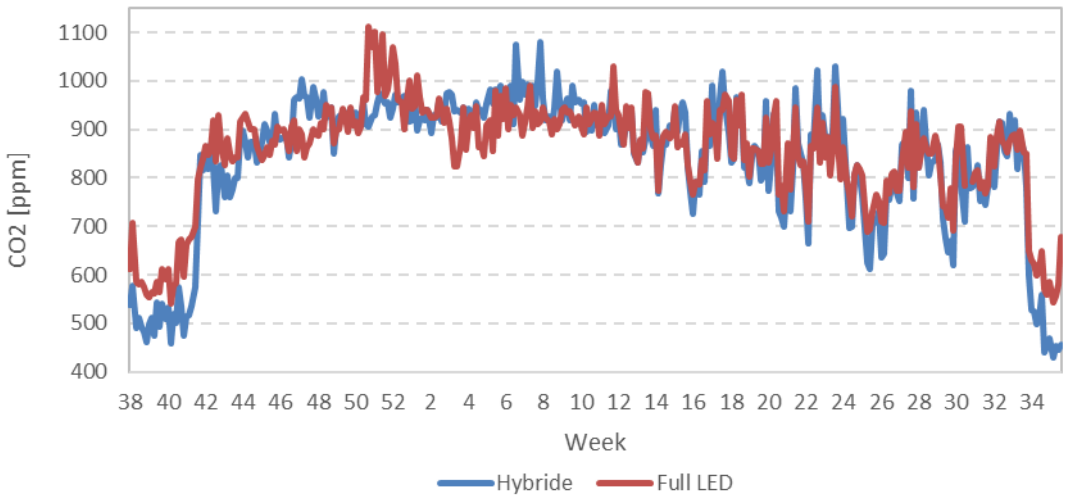
Figuur 3-5. Aantal uren dat het lichtuitstootscherm is ingezet, begin van de teelt om het aanbod aan assimilaten te reguleren (blauw), en om te isoleren/lichtuitstoot tegen te gaan. De grafiek toont de schermuren in afdeling 10.5, omdat de gerealiseerde uren in beide afdelingen zo goed als gelijk waren is afdeling 10.1 niet apart weergegeven.

In de proefafdelingen is het geveloppervlakte ten opzichte van het teeltoppervlakte relatief groot, hierdoor is het lastig om de luchtvochtigheid op het juiste niveau te krijgen. Wanneer de luchtvochtigheid te laag is kan dit van invloed zijn op de opening van de huidmondjes, met als gevolg een lagere fotosynthese. Om het vocht op het gewenste niveau te houden is het vocht in de afdeling gereguleerd met behulp van verneveling. Met de toenemende instraling in het voorjaar is er op de dag ook verneveld met als doel een betere opening van de huidmondjes (Figuur 3-6)



Figuur 3-6. Gerealiseerde relatieve luchtvochtigheid in de Hybride afdeling (10.1,links) en de 100% LED afdeling (10.5, rechts). Om de RV in beide afdelingen op pijl te houden is gedurende de teelt verneveling ingezet.

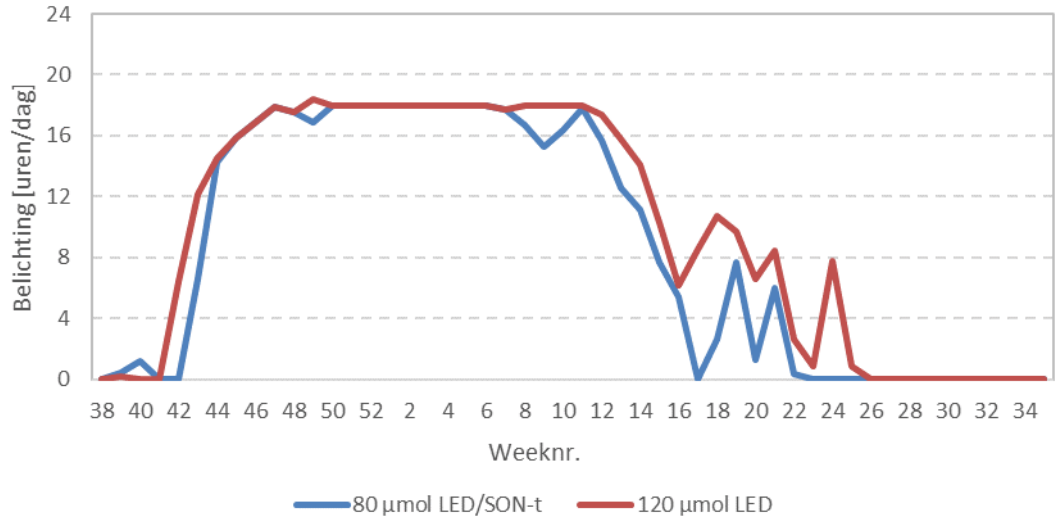
Om een goed vergelijk te kunnen maken tussen de Hybride en 100% LED behandeling was het belangrijk dat CO_2 gedurende de dag vergelijkbaar was, om zo een vergelijkbare potentie te hebben voor de aanmaak van assimilaten. In de eerste 3 weken was er nog een beperkte vraag naar assimilaten van het gewas, waardoor er in deze weken beperkt CO_2 is gedoseerd. Met het toenemen van de plantbelasting is er gestreefd naar een CO_2 niveau van tussen de 800 en 900 ppm. In de belichtingsperiode werden deze waardes goed gerealiseerd. Hoewel in het voorjaar de gerealiseerde waardes iets lager uitvielen is ook in deze fase het CO_2 goed op niveau gebleven. In een praktijksituatie zullen in deze fase van de teelt de CO_2-waardes in de regel lager liggen.



Figuur 3-7. Gerealiseerd CO_2 niveau in de Hybride en Full LED afdeling gedurende de dag. Om bij aanvang van de teelt de aanmaak van assimilaten te beperken is er de eerste 3 weken beperkt CO_2 gedoseerd. De kleine afdeling i.c.m. de inzet van verneveling heeft ervoor gezorgd dat het gewenste CO_2 niveau eenvoudig gerealiseerd kon worden. De gerealiseerde niveaus zijn vergelijkbaar tussen de afdelingen wat belangrijk is voor een goed vergelijk van het verschil in assimilatie.

3.2. Belichting en energiegebruik

De toepassing van belichting in de paprika moet naast een goede productie en kwaliteit resulteren in een teeltconcept dat energetisch in balans is. Binnen de proef is er in de kas met hybride belichting een gelijk aantal belichtingsuren gemaakt als in de kas met alleen LED belichting. In de winter was de maximale belichtingsduur 18 uur. Totaal is er 2965 uur belicht met de volledige belichtingsinstallatie en 473 uur met alleen 120 µmol LED belichting (Figuur 3-8). De verrood schakelde alleen aan wanneer de volledige belichtingsinstallatie aan stond en heeft dus ook 2965 branduren gemaakt. Voor het bepalen van het elektraverbruik is een berekening gemaakt op basis van het aantal belichtingsuren, voor de verschillende onderdelen van de belichting is er gerekend met de volgende efficiëntie getallen: SON-t: 1.85 µmol/Watt ; LED DRWLB: 3.3 µmol/Watt ; verrood: 2.7 µmol/Watt (Tabel 3-1).

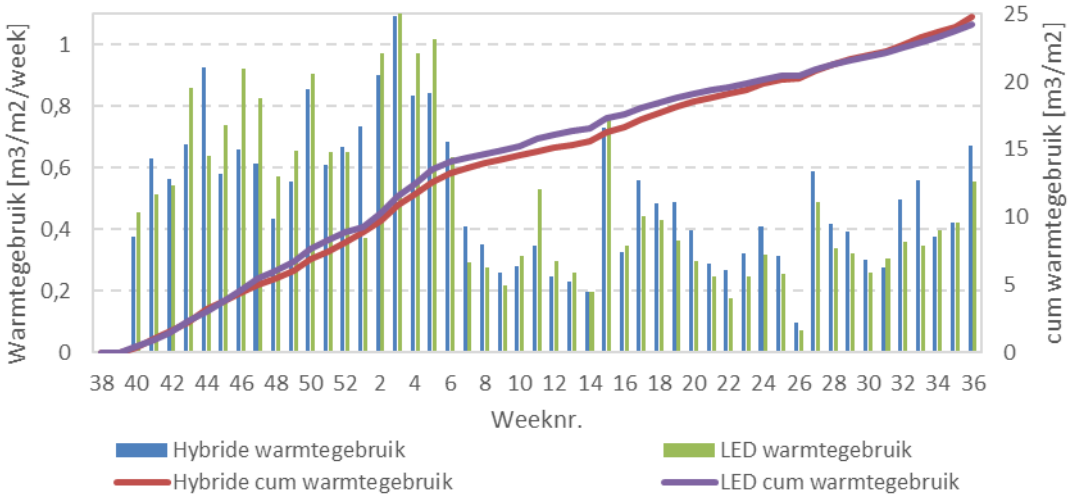


Figuur 3-8. Gerealiseerde belichtingsuren per dag. Het aantal belichtingsuren was in de Hybride afdeling en de LED afdeling identiek. De SON-t belichting in de Hybride afdeling, had daardoor dezelfde schakelmomenten als de 80 µmol/m^2/s schakeling in de LED afdeling, de overige 120 µmol/m^2/s schakelde ook op het zelfde moment aan en uit. Totaal is 2965 uur belicht met de volledige installatie en daar bovenop nog 473 uur met alleen de 120 µmol/m^2/s LED in beide afdelingen.

Tabel 3-1 Gerealiseerd elektraverbruik van de verschillende belichtingsinstallaties op basis van de gerealiseerde belichtingsuren en de efficiëntie per systeem. Het verbruik is opgedeeld in het aandeel van de verschillende installaties, met ter vergelijk wat het verbruik zou zijn in een situatie met volledig SON-t belichting.

	LED (Kwh/m²)	SON-t (Kwh/m²)	Verrood (Kwh/m²)	Totaal (Kwh/m²)
Hybride	**125**	**128**		**253**
Hybride + FR	**125**	**128**	**22**	**275**
LED	**197**			**197**
LED + FR	**197**		**22**	**219**
Son-t 200 µmol (ter vergelijk)		**351**		**351**

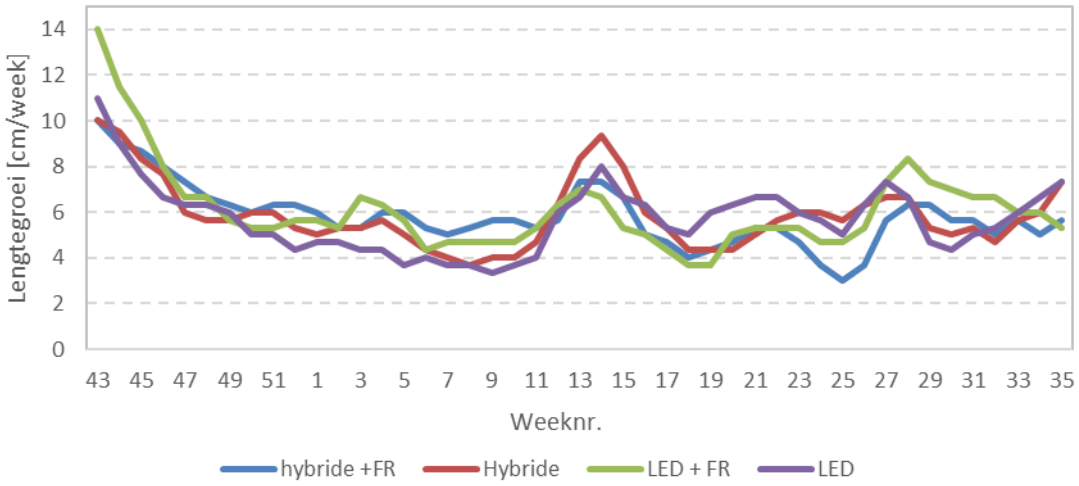
Omdat het project werd uitgevoerd in afdelingen met een oppervlakte van 168 m^2 is de inzet van warmte niet 1-op-1 naar een praktijksituatie te vertalen. Het relatief grotere geveloppervlakte zorgt voor meer uitwisseling via de gevels, waardoor ook het vocht en de afvoer hier niet in lijn is met de praktijk. Wel geven de resultaten een indicatie van de klimaatstrategie in een belichte teelt en de inpassing ervan binnen een toekomstbestendige fossielvrije glastuinbouw. Figuur 3-9 toont het warmtegebruik gedurende de teelt. De totale warmtevraag was in beide afdelingen ± 24 m^3/m^2. Waarbij met name in januari een wat hogere warmtevraag is gerealiseerd als gevolg van de lage buitentemperaturen in die weken. Dit is vooral terug te zien aan een hogere buisvraag in de donkerperiode. In de periode vanaf week 8 is de wekelijkse input vrij stabiel en gemiddeld 0.35 m^3/m^2/week, waarbij dit hoofdzakelijk is toe te schrijven aan de donkerperiode. Wanneer we het gerealiseerde warmtegebruik toespitsen op een fossielvrije toekomst, dan biedt de inpassing van LED belichting i.c.m. het intensief schermen goede aanknopingspunten om de teelt energetisch in balans te krijgen. De hogere etmaaltemperaturen in de winter beperken het warmteverlies en zullen resulteren in een hogere warmteterugwinning dan dat is aangetoond in het project van Helmus et al. 2019. Verdere optimalisatie is realiseerbaar in de inrichting van het verwarmingssysteem. In de paprikateelt wordt alleen gewerkt met een ondernet, waardoor het verwarmingsoppervlakte relatief klein is. Bij koude buitenomstandigheden resulteert dit al snel in hoge buistemperaturen. Het uitbreiden van het verwarmingsoppervlakte zal resulteren in lagere buistemperaturen, waarmee met lagere verwarmingstemperaturen gewerkt zou kunnen worden.



Figuur 3-9 Warmtegebruik [m^3/m^2] per week en cumulatief gedurende de teelt in de Hybride en LED afdeling.

3.3. Gewasstrekking

De hypothese voorafgaand aan de teelt was dat met het toevoegen van verrood licht aan het lichtspectrum de internodia beter zouden strekken. De strekking op de internodia is met name belangrijk voor een goede werkbaarheid van het gewas. Om het verschil tussen de behandelingen vast te stellen is een wekelijkse lengtemeting uitgevoerd. In de belichtingsperiode was de wekelijkse lengtegroei gemiddeld tussen de 4 en 6 cm per week, waar dit in een onbelichte teelt voor het ras Mavera tussen de 7-8 cm per week is. Tussen de behandelingen zijn de verschillen klein, maar de behandeling 'LED' toont wel structureel de minste lengtegroei, waar de 'Hybride + verrood' structureel de meeste lengtegroei laat zien. Opvallend is dat er begin van het voorjaar wat meer lengtegroei is gerealiseerd (week 12 t/m 15). Dit is de fase dat het aanbod van assimilaten toenam, maar de plantbelasting nog niet op het niveau voor de vraag was, wat een mogelijke verklaring voor de extra lengtegroei kan zijn. In de fase erna stabiliseert de strekking van het gewas weer rond de 6 cm, wat dus nog steeds lager is dan een onbelichte teelt. Visueel was ook waarneembaar dat het gewas onvoldoende herstel toonde met het toenemende buitenlicht (Figuur 3-10).

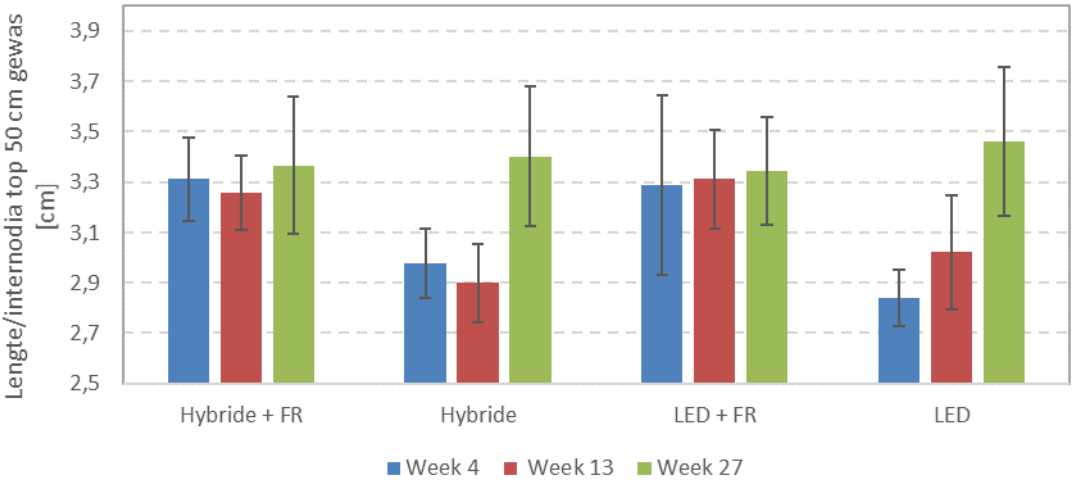


Figuur 3-10. Lengtegroei per week van het gewas in de 4 verschillende lichtbehandelingen. De metingen zijn weergeven als het voortschrijdend gemiddelde per 3 weken om zo een beter beeld te krijgen van de ontwikkeling.

De wekelijkse lengtegroei geeft nog geen informatie over eventuele verschillen in de plantopbouw. Om dit te kwantificeren is de lengte van de internodia in de verschillende lichtbehandelingen bepaald. Dit is gedaan door het aantal internodia vast te stellen in de bovenste 50 cm van het gewas op 3 momenten in de teelt: week 4; week 13 en week 27. Hierin is meegenomen dat het gewas in 10 weken tijd ongeveer 50 cm lengtegroei heeft gerealiseerd en de bovenste 50 cm van het gewas dus volledig is vernieuwd. Figuur 3-11 toont dat in de belichtingsperiode week 4 (= ontwikkeling tussen week 46 en week 4) en week 13 (=ontwikkeling tussen week 4 en week 13) in beide behandelingen met verrood licht de meeste strekking op de internodia is gerealiseerd ten opzichte van de behandelingen zonder verrood licht. In week 27 is er geen verschil meer tussen de behandelingen, maar opvallend is dat de internodiumlengte ten opzichte van de belichtingsperiode nauwelijks is toegenomen. In de behandelingen zonder verrood is wel een toename te zien, maar in de behandelingen met verrood is er geen toename vast te stellen.

Omdat de werkbaarheid van het gewas lastig in cijfers is uit te drukken, is er naast de metingen ook om de beoordeling van de telers gevraagd. Dit is gedaan begin januari, het moment dat het aandeel buitenlicht het laagst was. De beperkende factor voor de telers zit hierbij vooral in het indraaien van de koppen. Er werd gesteld dat de 'LED' resulteert in een niet werkbaar gewas; 'LED + verrood' en 'Hybride' werden iets beter beoordeeld maar nog steeds als lastig werkbaar gezien. 'Hybride + verrood' werd door de telers als beste beoordeeld. Deze behandeling werd wel werkbaar

genoemd, maar nog steeds met de kanttekening dat iets meer strekking en minder stugge internodia gewenst zijn (Foto 3-1).



Figuur 3-11. Gemiddelde Lengte per internodium per lichtbehandeling. De internodia lengte is op 3 momenten in de teelt bepaald door het tellen van het aantal internodia in de bovenste 50 cm van het gewas. De lengte is bepaald op basis van 20 stengels.

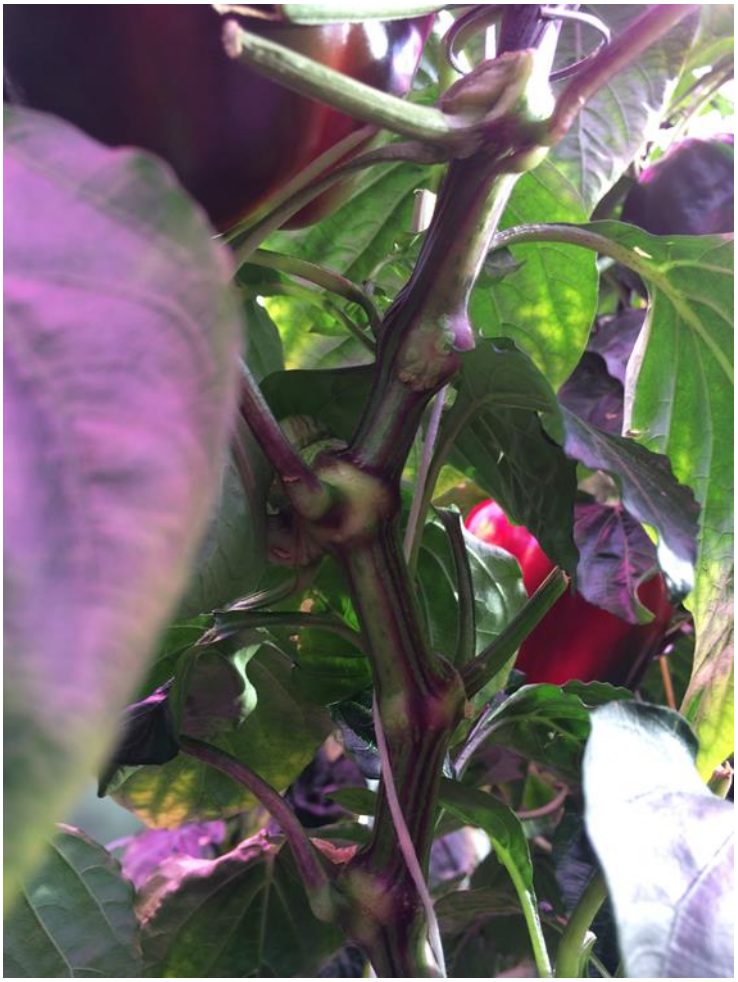


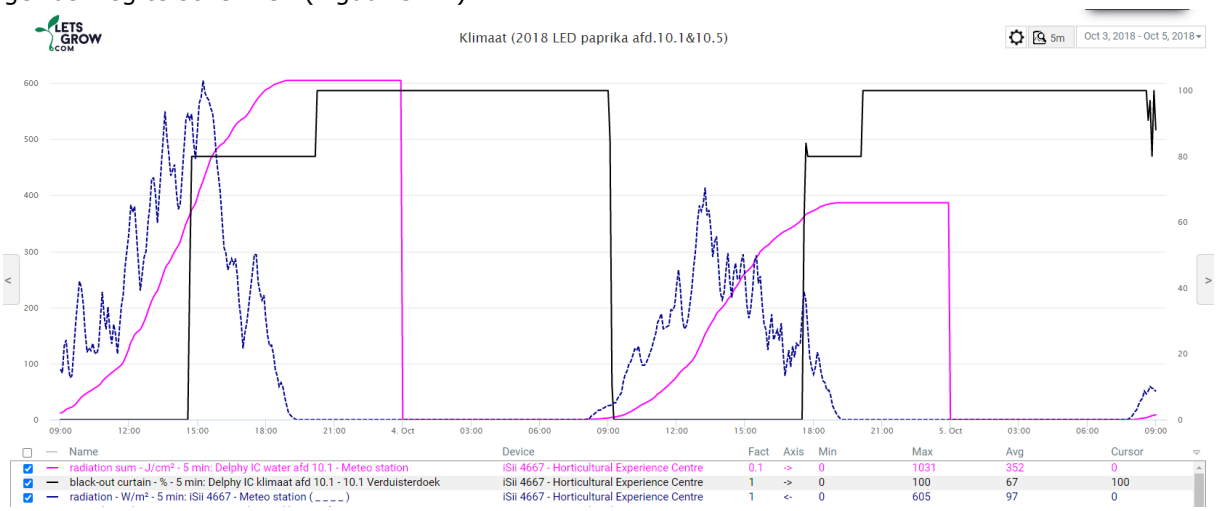
Foto 3-1. Toont een indruk van de kort geschakelde internodia in het gewas, de foto is genomen in de behandeling 'LED'.

3.4. Paprika in balans

Uitgangspunt van de teelt was om de aanmaak van assimilaten af te stemmen op het verbruik van assimilaten. Verschillende fases van de teelt vragen hierin om een verschillende strategie om dit te realiseren:

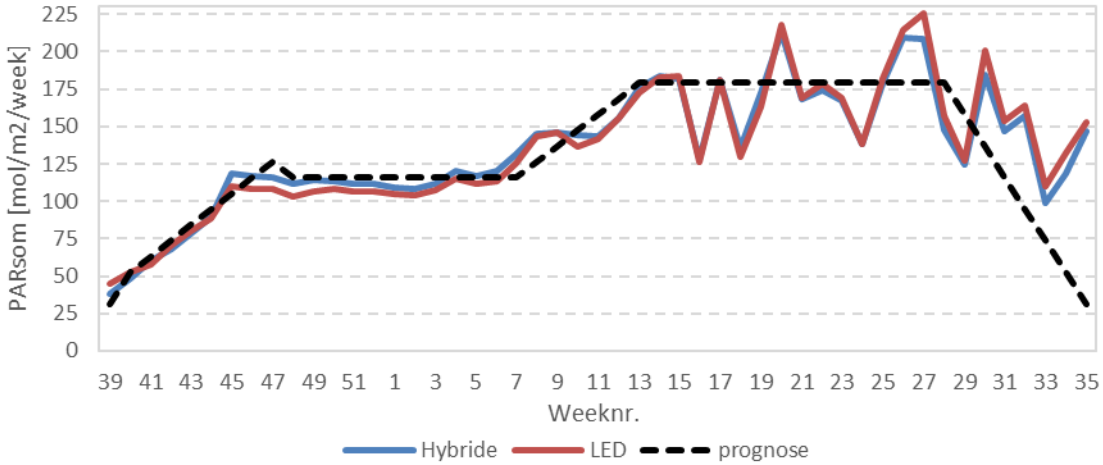
1. Bij aanvang van de teelt is het aanbod van licht groter dan de vraag van het gewas. De strategie is er in deze fase opgericht om overbodig licht voor het gewas weg te nemen.
2. In de winter is het aanbod van licht de beperkende factor. Het maximale aantal vruchten moet worden afgestemd op het beschikbare licht in deze fase (belichting + 2 mol gemiddeld buitenlicht in de donkerste weken). Belangrijk hierin is gelijke matige opbouw van de plantbelasting. Om dit te realiseren is vanaf begin van de teelt vruchtdunning toegepast.
3. In het voorjaar neemt het buitenlicht geleidelijk weer toe en gaan we eigenlijk naar een vergelijkbare situatie als in een zomerteelt. Licht is voldoende aanwezig, en plantbelasting zal vanaf deze fase hoofdzakelijk door het gewas zelf gereguleerd worden.

In de fase dat het aanbod van licht groter was dan de vraag is met het lichtuitstootscherm actief licht weg geschermd. Bij realisatie van de gewenste PARsom werd het lichtuitstootscherm met een kier van 20% (voor beheersing van de temperatuur) dichtgetrokken om overbodig licht voor het gewas weg te schermen (Figuur 3-12).



Figuur 3-12. Het lichtuitstootscherm sloot in de eerste weken van de teelt op basis van de gerealiseerde stralingssom om de aanmaak van assimilaten te beperken. De grafiek toont het sluiten van het scherm op 3 oktober, waarbij de stralingssomgrens van 600 J/cm^2 om 14:45 uur is gerealiseerd en het doek voor 80% sluit. Op 4 oktober sluit het scherm op basis van deze voorwaarden om 17:30 uur.

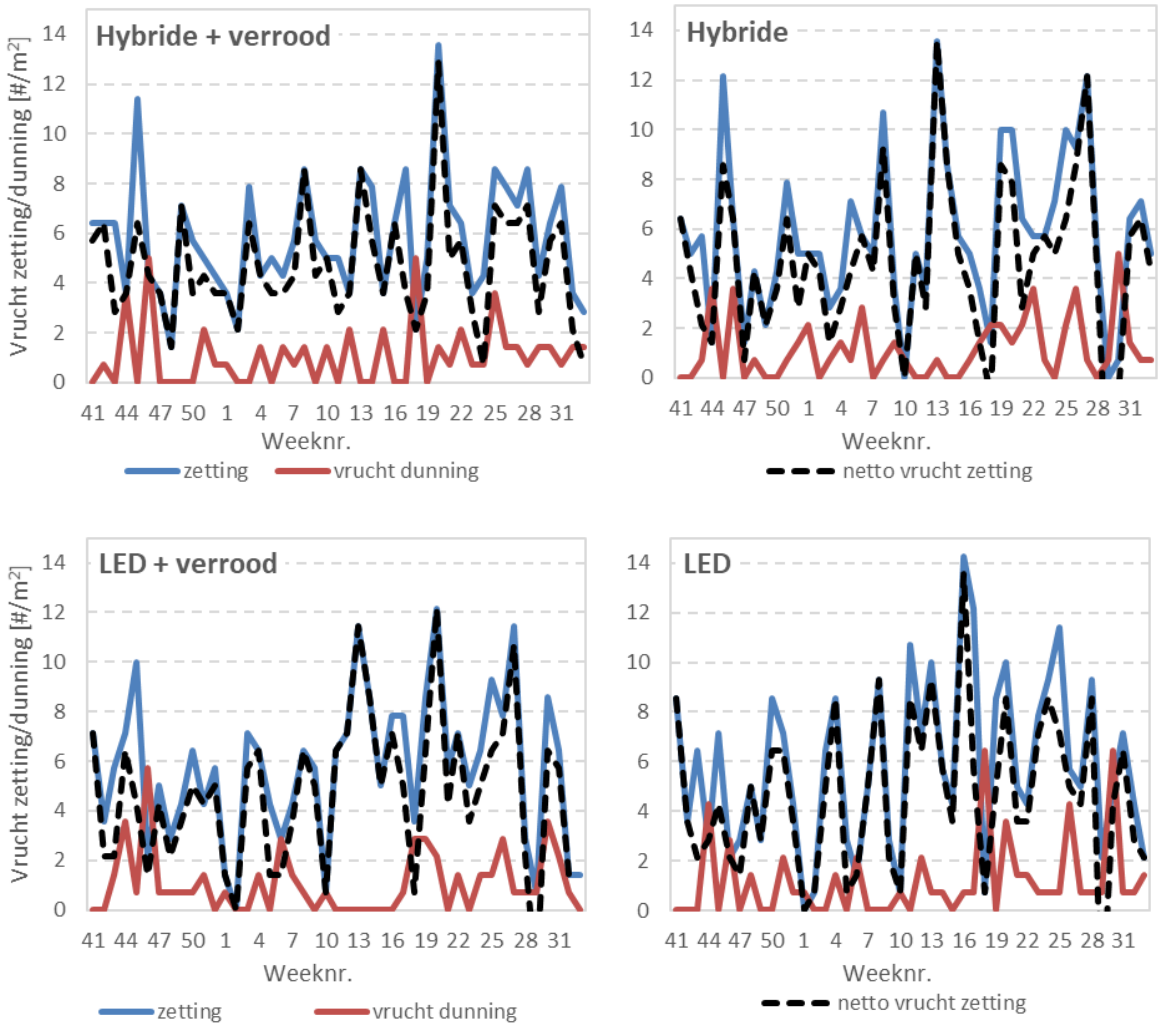
Figuur 3-13 toont de prognose voor het aanbod van licht ten opzicht van de gerealiseerde lichtsommen vastgelegd met de PAR-sensoren. Er is te zien dat de opbouw van de gerealiseerde lichtsommen netjes de geprognosticeerde lijn volgt. Dit is gerealiseerd door enerzijds het wegschermen van overmatig licht en anderzijds het geleidelijk opbouwen van het aantal belichtingsuren. Vanaf week 42 is er gestart met het inzetten van de assimilatiebelichting (zie ook 3.2. Belichting en energiegebruik). In de eerste weken werd alleen belicht met 120 µmol/m^2/s LED belichting. Met deze strategie kon er in het begin van de teelt een langere dag worden gerealiseerd zonder dat de lichtsom te hoog zou worden. In de winterperiode is het aantal belichtingsuren opgehoogd tot maximaal 18 uur, hiermee werd 13 mol/dag (91 mol/week) belicht. Vanaf week 48 wordt het stabiele aanbod aan licht hoofdzakelijk bepaald door de belichting. Doordat de transmissie van de proefafdelingen iets lager is dan van een grote kas vallen de gerealiseerde lichtsommen ongeveer 1 mol lager uit dan vooraf berekend. Vanaf week 8 lopen de lichtsommen weer geleidelijk op, en wordt er afgeschakeld met het aantal belichtingsuren.



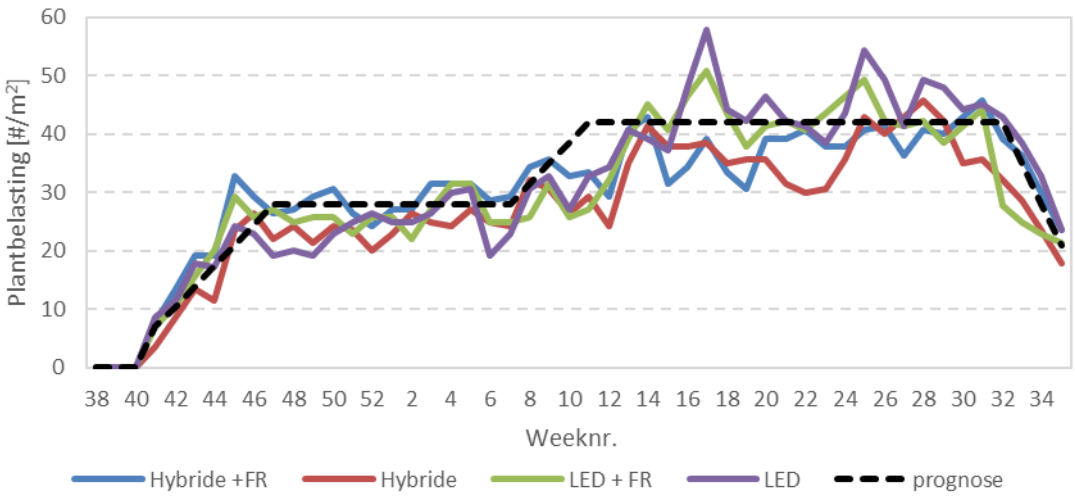
Figuur 3-13. Gerealiseerde PARsom per week in de Hybride en LED afdeling ten opzichte van de vooraf opgestelde prognose. Vanaf week 6 neemt de prognose toe op basis van het toenemende buitenlicht. In de zomer was de gemiddelde benodigde lichtsom gesteld op 179 mol/m^2/week. Omdat het buitenlicht in deze fase dominant is wijkt het buitenlicht in deze periode vaak af van de prognose. In de winter daarentegen ligt de gerealiseerde lichtsom dicht op de prognose omdat dan 80-90% van het licht van de lampen afkomstig is.

Voor het realiseren van een stabiele plantbelasting en productie is een gelijkmatige opbouw van het aantal vruchten belangrijk. Een te hoge zetting zal resulteren in onbalans in het gewas op het moment dat de vraag naar suikers van de uitgroeiende vruchten geen ruimte laat voor zetting van nieuwe vruchten. Figuur 3-14 toont de ontwikkeling van de vruchtzetting per week. De figuur toont dat de pieken in zetting aan het begin van de teelt zijn weggedund. Het patroon laat zien dat er gedurende bijna de volledige teeltduur vruchtdunning is toegepast, maar dat de nadruk met name aan het begin van de teelt ligt. Met het toenemende buitenlicht in het voorjaar is een piek in de zetting zichtbaar, omdat in het voorjaar de plantbelasting verder mocht toenemen is deze piek niet of beperkt weggedund.

Het resultaat van de vruchtzetting en het dunnen van vruchten is wekelijks gemonitord middels het vastleggen van de gerealiseerde plantbelasting en deze te vergelijken met de prognose (2.3. Teeltplan paprika in balans). Figuur 3-15 toont dat middels het toepassing van vruchtdunning de geprognotiseerde lijn goed is gevolgd, specifiek in de winter. Te zien is dat de plantbelasting in de behandeling 'Hybride+verrood' structureel iets hoger ligt in de winterperiode dan in de overige behandelingen: deze behandeling volgt netjes de lijn van de geprognotiseerde 28 vruchten/m^2 in de winter. De stijging van de plantbelasting bij het toenemend buitenlicht laat een vertraging zien ten opzichte van de prognose. De Hybride afdeling heeft in het voorjaar ten opzicht van de LED een iets lagere plantbelasting en ligt ook gemiddeld iets onder de geprognotiseerde lijn. In de LED afdeling loopt de plantbelasting op sommige momenten hoger op dan geprognotiseerd, dit heeft uiteindelijk gevolgen gehad voor het vruchtgewicht (5. Productie en kwaliteit).



Figuur 3-14. Ontwikkeling van het aantal gezette vruchten per week, het aantal gedunde vruchten per week en de netto zetting. Voor de netto zetting is een correctie gemaakt voor de vruchten die de week erna zijn gedund. Omdat een vrucht niet altijd exact de week erna is gedund kan er van week tot week nog steeds wat variatie aanwezig zijn.



Figuur 3-15. Ontwikkeling van de plantbelasting [#/m²] in de 4 behandelingen uitgezet tegen de prognose. De tellingen zijn het gemiddelde van 10 stengels per behandeling.

4. Bepaling gewasfotosynthese

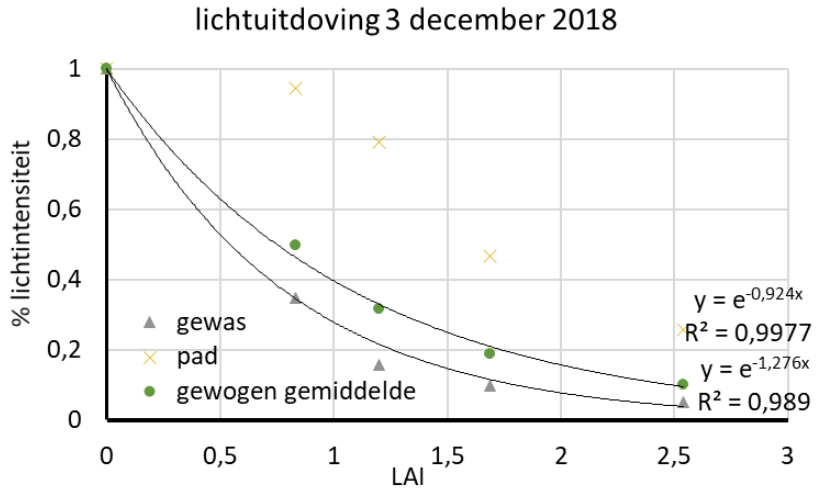
Plant Lighting heeft de assimilatie van het gehele gewas berekend met een fotosynthese-model. Dit op basis van metingen van de klimaatdata, de LAI (m^2 blad per m^2 teeltoppervlak), de lichtuitdoving in het gewas en de fotosynthese-eigenschappen van de verschillende bladlagen. Tussen de specifieke meetmomenten zijn de gefitte parameters geïnterpoleerd om een jaarverloop van fotosynthese-parameters te maken die op dag-basis telkens iets van elkaar verschillen. Vervolgens is de gewasfotosynthese op basis van de 5-minutenwaarden van het klimaat berekend. Tabel 4-1 bevat een overzicht van de meetmomenten voor lichtuitdoving en fotosynthese.

Tabel 4-1. Overzicht meetmomenten voor de berekening van de gewasfotosynthese.

Datum	Handeling
19 september '18	start proef
25 september '18	lichtuitdoving
2 oktober '18	bladfotosynthese op drie hoogtes (beide compartimenten)
5 november '18	lichtuitdoving
14&15 november '18	bladfotosynthese op drie hoogtes (beide compartimenten)
3 december '18	lichtuitdoving
17 december '18	bladfotosynthese toplaag (beide compartimenten)
30 januari ' 19	bladfotosynthese toplaag (beide compartimenten)
14 februari '19	bladfotosynthese toplaag (100% LED)
19&20 maart '19	bladfotosynthese op drie hoogtes (beide compartimenten)
15 mei '19	bladfotosynthese toplaag en 10 oksels lager (beide compartimenten)
21 juni '19	bladfotosynthese toplaag en halverwege (beide compartimenten)
7 juli '19	bladfotosynthese op drie hoogtes (100% LED)
27 augustus '19	bladfotosynthese toplaag (100% LED) na kop eruit rond 29 juli '19. Meting aan bladeren op zijscheuten van rond de 20 cm lengte.

4.1. Verticale lichtuitdoving in het gewas

Gedurende de eerste 3 maanden van de teelt is driemaal de lichtuitdoving gemeten in het gewas. De lichtintensiteit is gemeten op vijf hoogtes in het gewas en in het pad. De hoogtes in het gewas waren gekoppeld aan okselnummers en zo kon de lichtintensiteit versus de LAI, welke gedurende de eerste maanden van de teelt wekelijks werd gemeten, worden weergegeven (Figuur 4-1). Tabel 4-2 geeft de resultaten weer. De lichtextinctie-coëfficiënt is consequent hoog en ligt in de buurt van de 1. Om de zaken niet nodeloos de compliceren is de gewasfotosynthese berekend met k=0.95.



Figuur 4-1. Lichtuitdoving ten opzichte van de LAI (m^2 blad per m^2 grondoppervlak kas). Het gewogen gemiddelde is berekend op 110cm gewasbreedte en 50 cm pad breedte. Ieder meetpunt (geel of grijs) is een gemiddelde van 10-12 waarnemingen (data 3 december).

Tabel 4-2. Bepaling van de extinctie-coëfficiënt (k-waarde) uit de Monsi-Saeki vergelijking. De fit op het gewogen gemiddelde van het licht is berekend op 110cm gewasbreedte en 50 cm padbreedte.

	in gewas* t.o.v. bruto en (netto) LAI	in pad	fit op gewogen gemiddelde licht
25-9-'18, LAI~0.61	1.601 (1.000)	0.532	1.114
5-11-'18, LAI~1.67	1.551 (1.066)	0.382	0.974
3-12-`18, LAI~2.6	1.276 (0.980)	0.444	0.924

**NB de lichtuitdoving in het gewas en pad is berekend over het bruto grondoppervlak (gewasbreedte+padbreedte). De netto LAI is in het gewas in realiteit veel hoger en in het pad veel lager.*

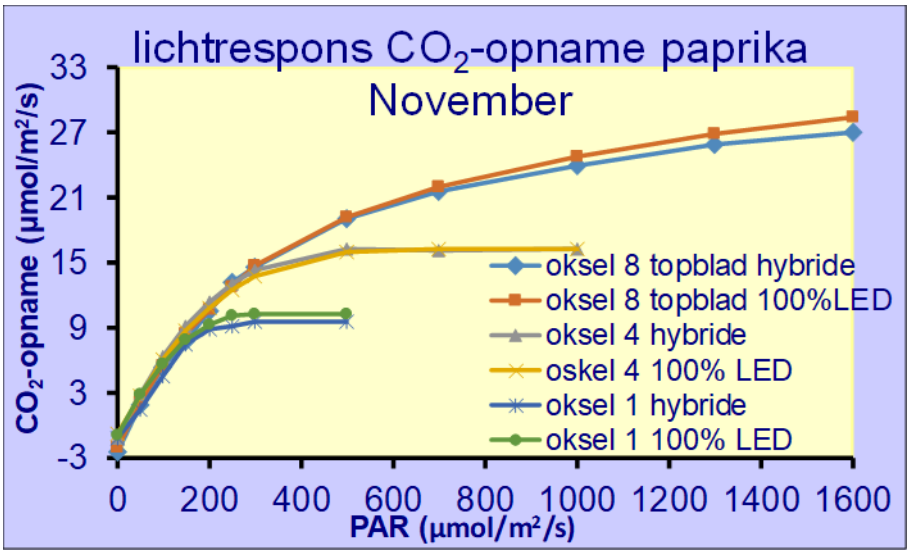
4.2. Respons bladfotosynthese op licht- en CO_2

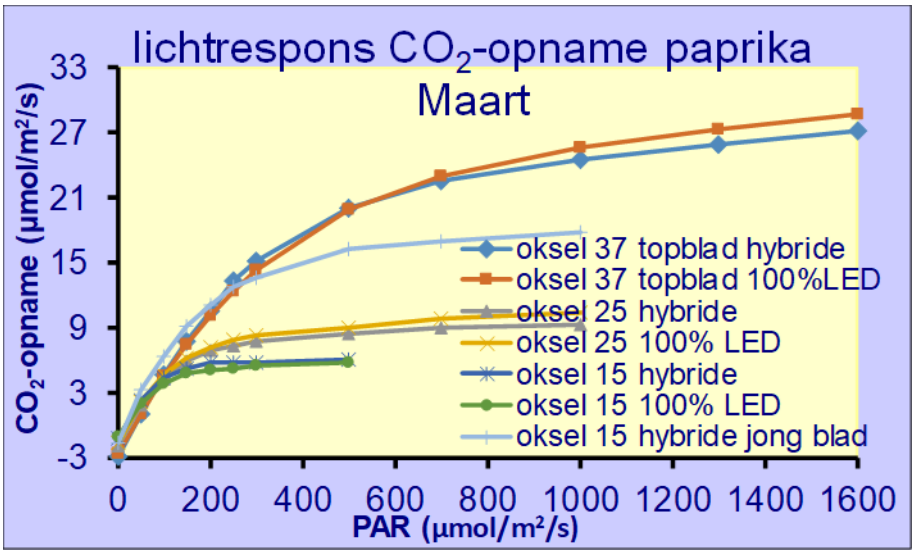
De fotosynthesemetingen hadden meerdere doelen:

- Nagaan of de behandelingen van elkaar verschilden. Dit was niet het geval.
- Bepalen van fotosynthese-karakteristieken (CO_2- en lichtrespons) van bladeren op verschillende gewashoogtes. Dit was nodig in verschillende seizoenen om uiteindelijk de gewasfotosynthese te berekenen.
- Nagaan hoe de huidmondjes reageerden gedurende de dag op dagen met forse instraling (paragraaf 4.4).

4.2.1. Lichtrespons van de fotosynthese op verschillende gewashoogtes

Figuur 4-2 toont de lichtrespons van de fotosynthese in november 2018 en maart 2019 op drie verschillende gewashoogtes. In één oogopslag is te zien dat op beide meetmomenten er geen meetbaar verschil is in de fotosynthese tussen de beide belichtingsbehandelingen (Hybride en full-LED) op drie verschillende gewashoogtes. De metingen zijn verricht in het gedeelte van beide kascompartimenten zonder aanvullend verrood licht. Ter controle zijn er ook enige metingen verricht in het gedeelte met aanvullend verrood licht. Deze metingen gaven geen aanleiding om hierin onderscheid te maken.





Figuur 4-2. Lichtrespons van de fotosynthese in november 2018 (boven) en maart 2019 (onder) van het topblad, halverwege en laag in het gewas (okselnummers tellen op vanaf de splitsing=oksel 0). Er is gemeten bij 700 ppm CO_2 (n=4 per curve). Er is duidelijk te zien dat de fotosynthese-capaciteit tussen de Hybride en full-LED behandeling niet verschilde op de verschillende gewaslagen en meetmomenten (november & maart). De metingen aan de lager liggende bladeren zijn verricht aan bladeren die 'vrij' aan padkant hingen en dus niet direct beschaduwd werden. Tevens is er alleen gemeten aan visueel gezond weefsel. In maart liggen de waarden voor de bladeren dieper in het gewas (oksel 15 en 25) relatief laag, terwijl een meting aan een jonger blad ter hoogte van oksel 15 veel hogere waarden laat zien!

Wat verder opvalt is dat de 2e gemeten gewaslaag vanaf de top ter hoogte van oksel 25 tijdens de meting in maart een relatief lage fotosynthese-capaciteit heeft vergeleken met de meting in november (alle bladeren hingen aan padkant en niet midden in het gewas). Dit kan veroorzaakt worden door een grotere overliggende LAI. Dit was echter niet het geval. In november 2018 was namelijk de totale LAI ~2m^2/m^2 (13 oksels, waarvan oksel 8 het hoogste volgroeide blad was en onder oksel 1 ~0.6 m^2/m^2; Tabel 3). De middenlaag (oksel 4) had dus maximaal ~1 m^2/m^2 overliggende LAI. In maart 2019 was de LAI ~3.8 m^2/m^2. Hier is te zien dat bladeren van oksel 25 een overliggende LAI hadden van ~0.8 m^2/m^2. Dit verschil is dus vergelijkbaar met de november meting. De oorzaak voor de relatief grotere daling in fotosynthese-capaciteit is dus niet duidelijk. Hier wordt in paragraaf 4.2.4 dieper op ingegaan.

Tabel 4-3. Schatting van de LAI tot de verschillende okselnummers. Oksel 1 was de eerste oksel na de splitsing.

Oksel	LAI m^2/m^2
41 (telling 28 mrt '19)	~3.8
25 (telling 7 jan' 19)	~3
13 (telling 11 nov' 18)	~2
4 (telling 12 okt' 18)	~1
1 (telling 28 sept' 18)	~0.6

Foto 4-1 laat zien dat de bladranden van de bladeren ter hoogte van oksel 25 en vooral van de lagere bladeren chlorose vertoonden. Ook hier is de reden niet duidelijk. Mogelijk is er wel een samenhang met de scherpe daling in fotosynthese-capaciteit. Verder valt op dat een nieuw ontwikkeld blad op een zijscheut ter hoogte van oksel 15 wel een veel hogere fotosynthese-capaciteit heeft (Figuur 4-2 onder). Oudere bladeren functioneren dus onder dezelfde schaduwomstandigheden slechter dan jonge bladeren. Van tomaat is bekend dat niet zozeer bladleeftijd een rol speelt in afname van de fotosynthese-capaciteit dieper in het gewas, maar vooral de afname in lichtintensiteit door beschaduwing (Trouwborst et al. 2011). Waarom dit niet blijkt te gelden in dit paprikagewas is nog onbekend en erg interessant.

Topblad

Oksel 25

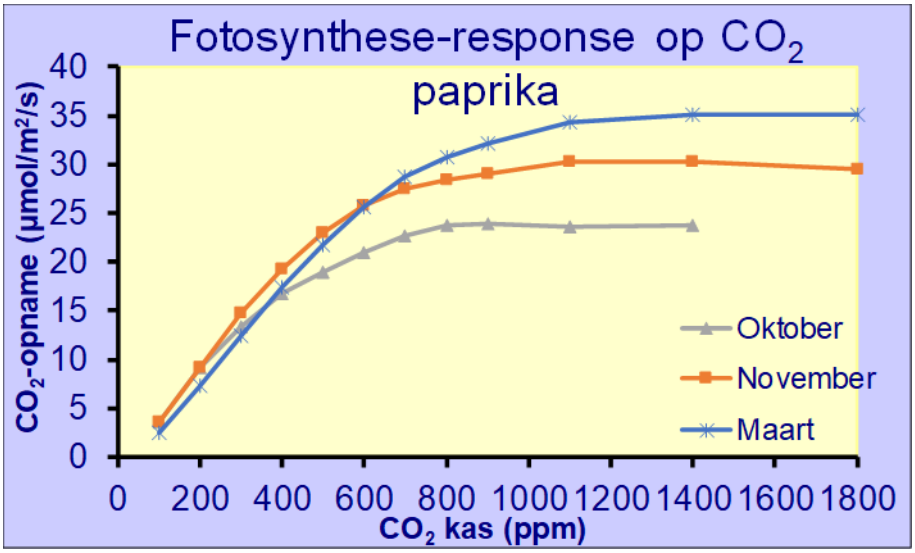
Oksel 15

Foto 4-1. Meting fotosynthese in maart 2019. De metingen aan de lager liggende bladeren zijn verricht aan bladeren die 'vrij' aan de padkant hingen en dus niet direct beschaduwd werden. Tevens is er alleen gemeten aan visueel gezond weefsel, dus niet op de chlorotische plekken (foto's 19 en 29 maart 2019).

4.2.2. CO_2-respons van de fotosynthese

De CO2-respons is op drie momenten tijdens de teelt bepaald (Figuur 4-3). Het verzadigingspunt bleek samen te hangen met de mate van huidmondjesopening. In oktober 2018 hadden de bladeren waaraan de CO2-respons-curven werden gemeten een meer dan twee keer zo hoge huidmondjesgeleiding (Gs) dan in november en maart. Hierdoor lag de CO2-verzadiging in oktober op ongeveer 800 ppm—min of meer standaard voor C3-gewassen—terwijl dit in november en maart meer naar de 1000 ppm neigde. Hierbij moet worden opgemerkt dat als huidmondjes hier een sterke invloed op hebben, lichtniveau dit ook heeft: Bij lagere lichtniveaus is een lagere Gs niet beperkend voor de fotosynthese en zal het CO2-verzadigingspunt eerder worden bereikt. Verder valt op dat de CO2-opname bij verzadigend licht juist lager ligt in oktober, waar de huidmondjes

juist verder open waren. Deze schijnbare tegenstrijdigheid is vanwege de hogere lichtsom waar het blad aan gewend is in november en maart. In oktober werd immers geschermd om de PAR-som te beperken (zie hoofdstuk 3.3). Hierdoor was in oktober de capaciteit van lichtreactie van de fotosynthese lager (ETR, zie Figuur 4-4 onder).



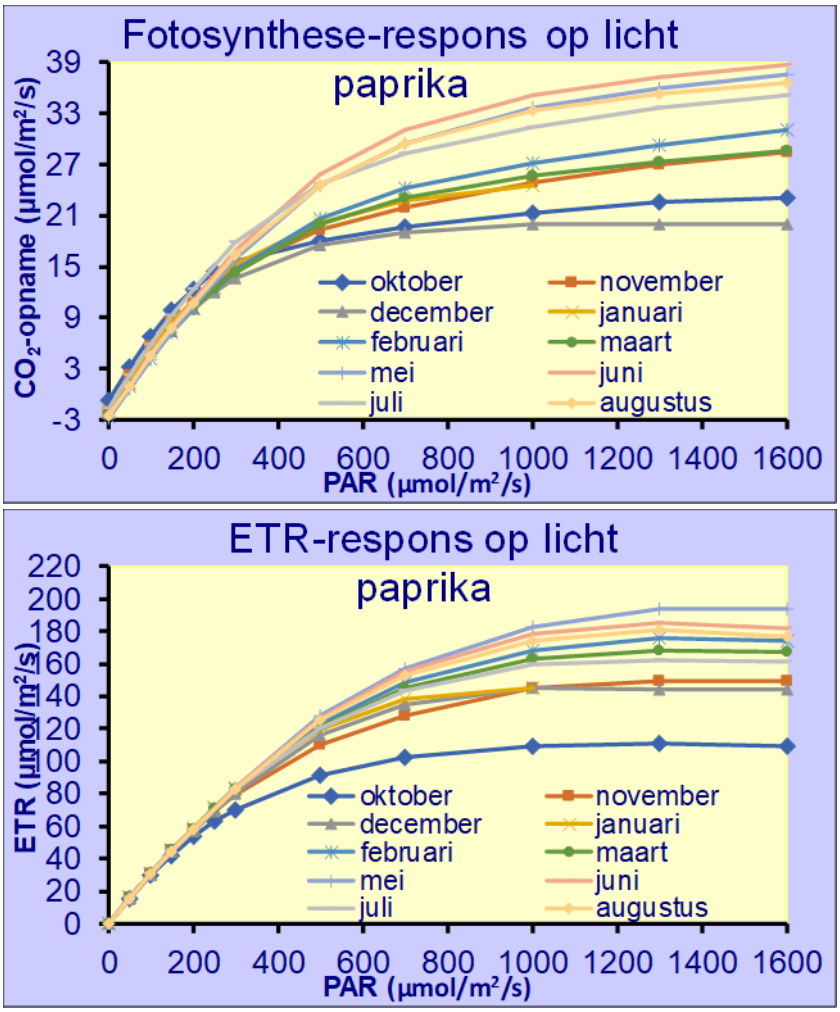
Figuur 4-3. CO_2-respons paprika op drie meetmomenten: oktober 2018, november 2018 en maart 2019. De meting werd uitgevoerd aan topbladeren bij 1000 µmol PAR. Verzadiging van de fotosynthese voor CO_2 trad op bij 800 ppm (oktober) of hoger. Dit hangt samen met de actuele huidmondjesopening tijdens de metingen: In maart en november lag de huidmondjesgeleidbaarheid voor waterdamp rond de 140 mmol/m²/s en in oktober rond de 300 mmol/m²/s (n=4-5 per curve).

4.2.3. Lichtrespons van de fotosynthese voor de topbladeren in verschillende seizoenen

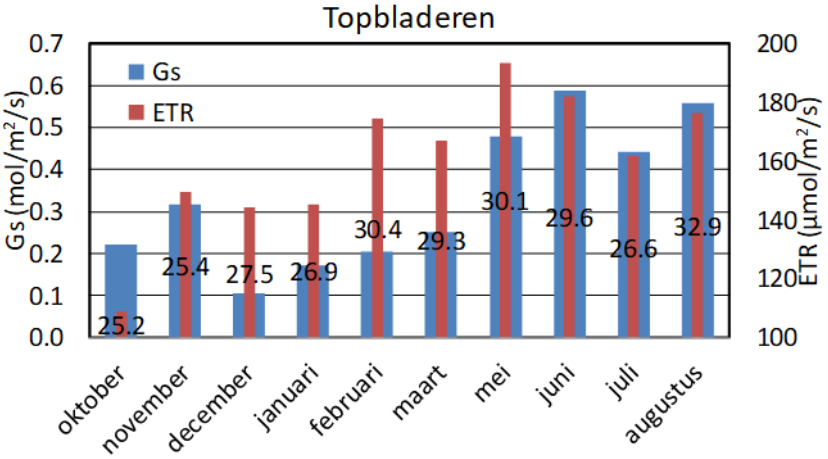
De lichtrespons van de fotosynthese van de topbladeren gedurende het teeltseizoen is weergegeven in Figuur 4-4. De volgende zaken vallen op:

- De curven van de CO2-opname vallen ruwweg te verdelen in drie groepen: (1) oktober en december, (2) november, januari, februari & maart, en (3) mei, juni, juli & augustus.
- De curven van de ETR-respons: 'ETR is de door licht opgewekte energiestroom om suikers te maken' vallen ruwweg in dezelfde drie groepen te verdelen, maar er zijn enkele uitzonderingen:
    - De decembermeting valt niet meer samen met de oktobermeting, maar ligt veel hoger. Dit kan worden verklaard door de veel lagere huidmondjesopening in december. Deze was dus beperkend voor de fotosynthese in december bij hogere lichtniveaus.
    - De februari- en maartmeting vallen niet meer in de middengroep, maar er worden al zomerse waarden gemeten. Vermoedelijk heeft de temperatuur (weergegeven in getallen in Figuur 4-5) een groot positief effect op de ETR.
    - In de hoogste groep valt op dat de juli-meting het laagst ligt, waarschijnlijk ligt dit aan de lagere meettemperatuur.

Al deze data zijn gebruikt om een seizoenseffect op de fotosynthese van de topbladeren te simuleren. Het gebruikte FvCB-model normaliseert de gefitte waarden naar een standaardtemperatuur van 25°C. Dus verschillen in meettemperatuur leveren geen probleem op voor de curve-fitting in het model.



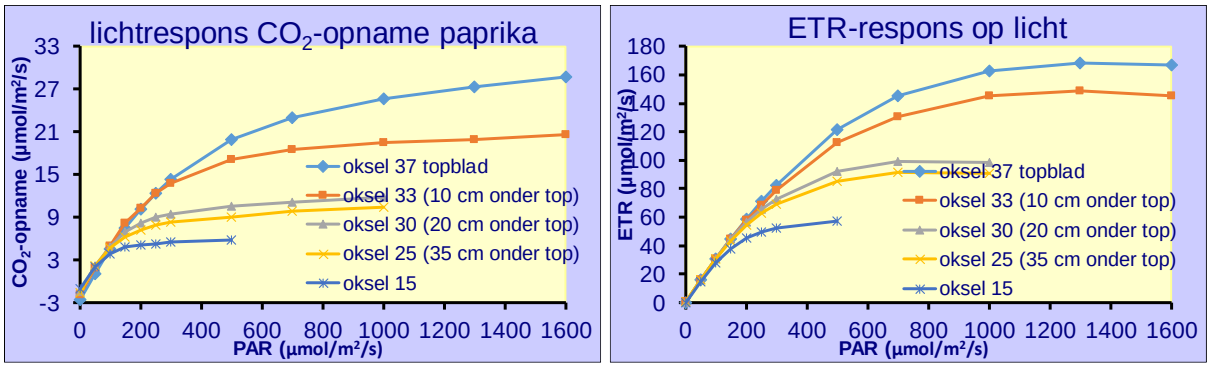
Figuur 4-4. Lichtrespons van de fotosynthese (boven) en ETR (onder) van oktober 2018 tot augustus 2019 van de topbladeren, alle curves zijn gemeten in compartiment 100% LED. NB in januari en februari is gemeten bij 800 ppm in plaats van 700 ppm CO_2 (n=4-8). Figuur 4-5 onder geeft de Gs en de temperatuur tijdens de metingen weer.



Figuur 4-5 Huidmondjesopening en ETR-capaciteit van oktober 2018 tot augustus 2019 van de topbladeren behorend bij Figuur 6. De meettemperatuur varieerde voor de verschillende dagen tussen de 25-33°C en staat in het staafdiagram weergegeven (n=4-8).

4.2.4. Verval fotosynthese-capaciteit dieper in het gewas

Op grond van de gemeten fotosynthese in maart (Figuur 4-2) is al de conclusie getrokken dat er een zeer snel verval van de fotosynthese dieper in het gewas plaatsvindt. Figuur 4-6 bevat de lichtrespons van de fotosynthese op vijf verschillende gewashoogtes. Opnieuw valt op dat de fotosynthese-capaciteit een zeer sterk verval kent van boven naar onder: 7 oksels onder top (20 cm) is de fotosynthese-capaciteit 60% lager (40% lagere ETR-capaciteit). Dit kan voor een groot deel verklaard worden door een beperking in huidmondjesopening bij de diepere gewaslagen. Het verval in ETR-respons (wat de potentie aangeeft) is namelijk minder extreem. Maar voor een overliggende LAI van ~1 bij oksel 25 (gemeten aan pad-zijde) is het verval nog steeds opvallend groot.



Figuur 4-6. Lichtrespons van de fotosynthese in maart 2019 van bladeren in de LED-afdeling zonder verrood, op verschillende hoogtes in het gewas (okselnummers tellen op vanaf de splitsing=oksel 0). Er is gemeten bij 700 ppm CO_2 (n=3-6 per curve).

De vraag kwam op of dit altijd bij paprika het geval is, of dat dit specifiek ligt aan paprika cv 'Mavera', of aan de belichte teelt. Om dit fenomeen nader te onderzoeken is in de zomer deze meting overgedaan in de proef en in de praktijk bij kwekerij Midberg te Harmelen op respectievelijk 8 juli 2019 en 16 juli 2019. Tabel 4-4 geeft schematisch de verschillen weer tussen de omstandigheden bij beide gewassen. Figuur 4-7 en Figuur 4-8 laten de afzonderlijke resultaten zien bij Improvement Centre en Midberg. Figuur 4-9 en Figuur 4-10 laten gemeten verschillen tussen beide locaties zien.

Tabel 4-4 Eigenschappen paprikagewassen te Delphy en Midberg, beide cv 'Mavera' gemeten op respectievelijk 7 en 16 juli 2019.

Proef Improvement Centre Bleiswijk	Praktijk Midberg 1 Harmelen
meetdag fotosynthese 8 juli 2019	meetdag fotosynthese 16 juli 2019
Belichte teelt (LED)	Onbelichte teelt
Diffuus coating sinds april	Geen coating
21 september 2018, 4 rijen systeem	24 november 2018 geplant, 2 rijen systeem
250 cm gewas na splitsing LAI>5 (28 juni)	250 cm gewas na splitsing Visueel grotere bladeren dan bij Delphy, LAI onbekend en ongetwijfeld >5
~60 knopen na splitsing Relatie aantal knopen en aantal cm onder kop: -5: ~20 cm onder kop -10: ~40 cm onder kop -15: ~60 cm onder kop	~38 knopen na splitsing Relatie aantal knopen en aantal cm onder kop: -5: ~20 cm onder kop -10: ~50 cm onder kop -15: ~80 cm onder kop
Bovenste ~40 cm visueel gezond (Foto 4-2) (hoogte rijpende paprika's) NB fotosynthesemetingen alleen op de visueel gezonde plekken	Gehele gewas visueel gezond (Foto 4-3 en Foto 4-4), sporadisch wat gele vlekken en krullerig Randplanten vertoonden visuele overeenkomsten met planten Delphy (Foto 4 rechtsonder)

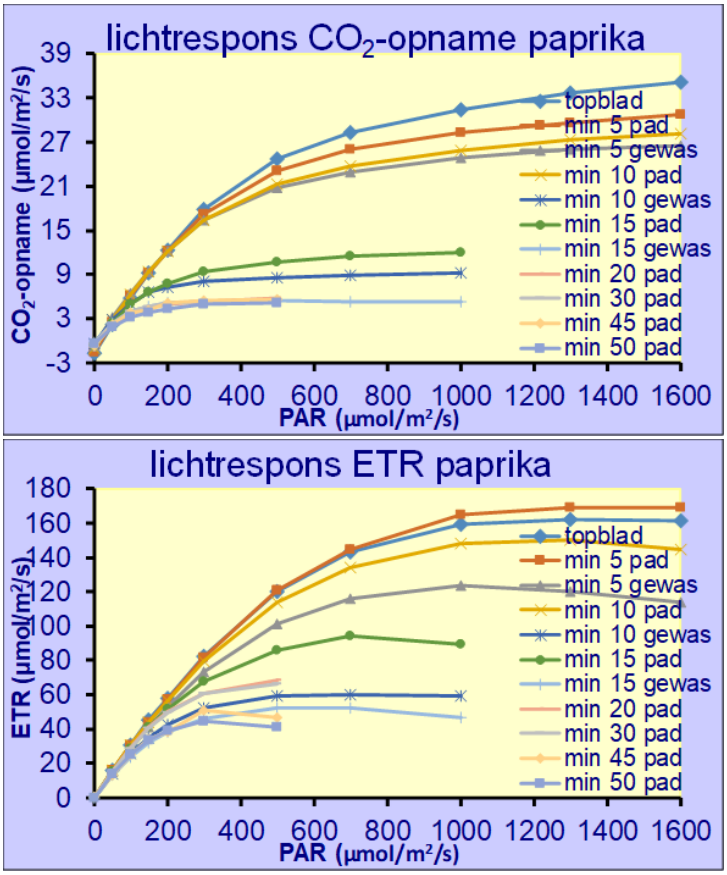
Foto 4-2. Bladeren 40 cm onder de kop bij het Improvement Centre: Regelmatig bladkrulling en vergelende bladpunten. Foto 8 juli 2019.

Foto 4-3. Bladeren bij Midberg op 40 (links) en 155 cm (rechts) onder de kop: Er was geen zichtbare chlorose en bladkrulling was beperkt. Foto 16 juli 2019.

Foto 4-4. Gewas bij Midberg in de rij en op de kopse kant. Visueel leken de planten op de kopse kant van de rijen bij Midberg op de planten in de proef bij Delphy. Foto 16 juli 2019.

Figuur 4-7 geeft de resultaten weer van de metingen bij Improvement Centre. De metingen werden uitgevoerd op een redelijk grijze dag met 's middags wat zon (8 juli 2019). Er is gemeten bij 700 ppm CO_2, T_{blad} was ~27°C onder hoog licht. De volgende zaken vielen op:

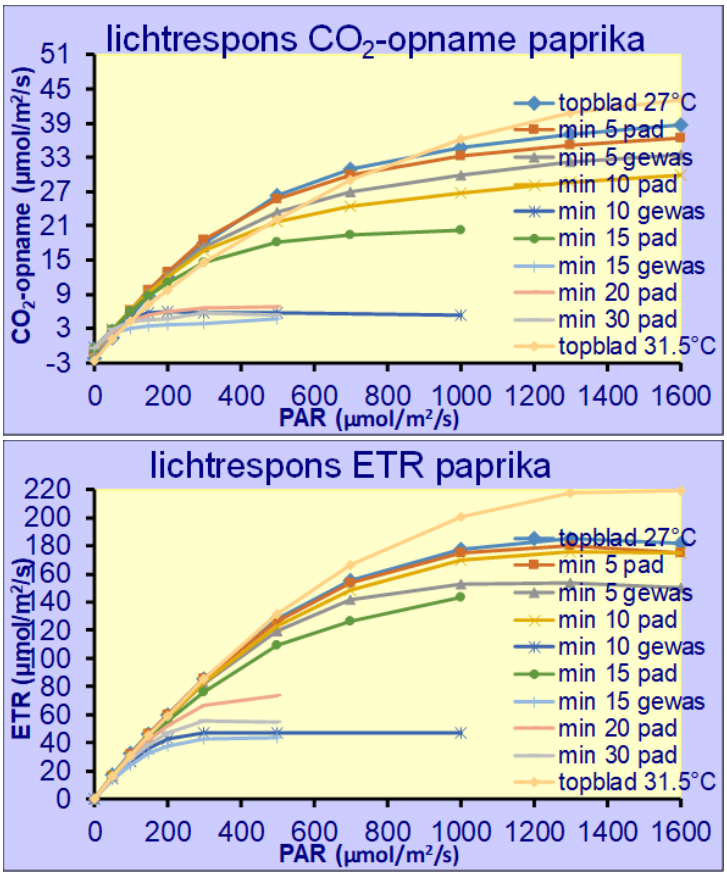
- Er vond een sterke daling in fotosynthese-capaciteit (CO_2-opname èn ETR) plaats bij de bladeren aan padkant vanaf min 15 knopen onder de kop (= 60 cm onder kop), dus onder de visueel gezond ogende bovenste 40 cm gewas.
- De fotosynthese-capaciteit (CO_2-opname èn ETR) van bladeren aan de gewaskant namen nog sterker af (-10 gewas=donkerblauwe lijn is slechts ~40 cm onder de kop).
- De fotosynthese-capaciteit aan padkant voor bladeren vanaf min 20 oksels en dieper is laag en verschilt nauwelijks.



Figuur 4-7. Lichtrespons van de fotosynthese (boven) en ETR (onder) op verschillende dieptes in het gewas bij Delphy. Alle curves zijn gemeten in compartiment 100% LED zonder verrood. Er is gemeten bij 700 ppm CO_2 (n=4). De legenda geeft de okselpositie aan, geteld vanaf de top naar beneden.

Figuur 4-8 geeft de resultaten weer van de metingen bij Midberg. De metingen werden uitgevoerd op een redelijk grijze dag met in de tweede helft van de middag enige zon (16 juli 2019). Er is gemeten bij 700 ppm CO_2, T_{blad} was ~28°C onder hoog licht. De volgende zaken vielen op:

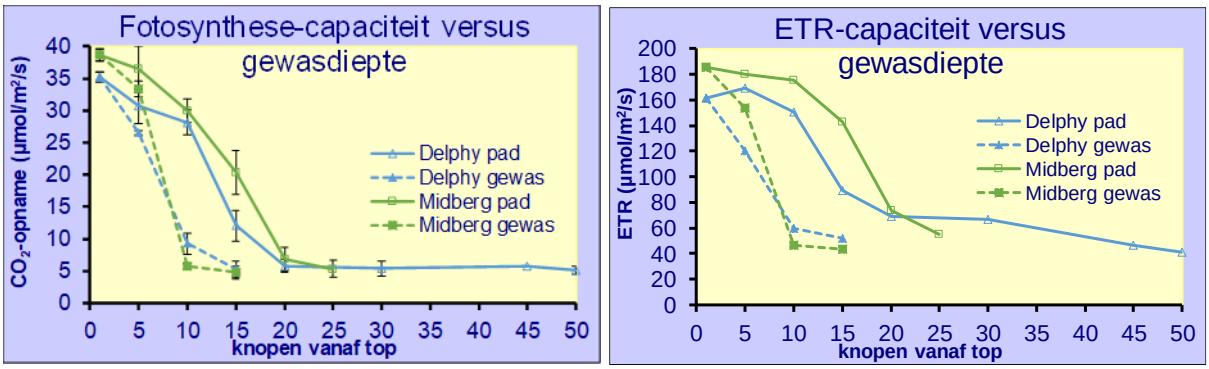
- Er vond een sterke daling in fotosynthese-capaciteit (CO_2-opname èn ETR) plaats bij de bladeren aan de padkant vanaf min 20 knopen onder kop (~115 cm onder kop).
- De fotosynthese-capaciteit (CO_2-opname èn ETR) van bladeren aan de gewaskant namen nog sterker af (-10 gewas=donkerblauwe lijn is rond de 40 cm onder de kop).
- Ook hier verschilt de fotosynthese-capaciteit voor bladeren aan padkant nauwelijks voor bladeren vanaf min 20 oksels en dieper.
- Temperatuur heeft onder hogere lichtniveaus een positief effect op ETR en CO_2-opname (lichtgele lijn)



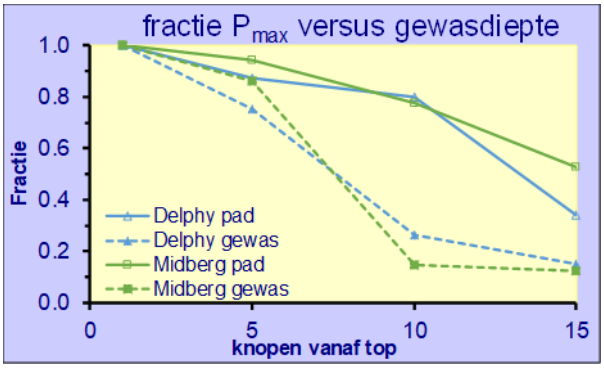
Figuur 4-8. Lichtrespons van de fotosynthese (boven) en ETR (onder) op verschillende dieptes in het gewas bij Midberg. Er is gemeten bij 700 ppm CO_2 (n=4). De legenda geeft de okselpositie aan, geteld vanaf de top naar beneden.

Figuur 4-9 laat het verval zien in fotosynthese-capaciteit per 5 oksels vanaf de top van het gewas bij Improvement Centre en bij Midberg. Het volgende valt op:

- De fotosynthese-capaciteit van de topbladeren ligt in de praktijk wat hoger: 38.6 versus 35.2. Mogelijk is Midberg een lichtere kas dan de kleine proefkas van Delphy. Tevens was de kas van Midberg niet gecoat en die van Delphy wel. Dit is dus niet bijzonder.
- De verlaging in fotosynthese-capaciteit van bladeren binnenin het gewas verloopt ruwweg gelijk (stippellijnen) en loopt in beide gevallen zeer snel af: 10 oksels onder de top (40 cm bij Delphy en 50 cm bij Midberg) is de fotosynthese-capaciteit ruwweg 70% gedaald ten opzichte van de topbladeren. Op basis van LAI-metingen van Delphy is dit ongeveer na 1m^2/m^2 overliggende LAI.
- In het pad neemt de fotosynthese-capaciteit minder hard af. Dit komt doordat er meer licht is in het pad ten opzichte van binnenin het gewas.
- De verlaging in fotosynthese-capaciteit van bladeren aan de padkant is 10 oksels onder de kop nog min of meer gelijk: beide ruim 20% lagere CO_2-opname dan top en ruim 5% ETR.
- 15 oksels onder de kop is er bij Delphy een 66% lagere en bij Midberg een 47% lagere fotosynthese-capaciteit dan bij de topbladeren (zie ook Figuur 4-10). De ETR lag 45% versus 23% lager. Bij Midberg zat het 15e oksel op 80 cm onder de kop en bij Delphy 60 cm onder de kop (door langere internodiën bij Midberg). Logischerwijs hingen de bladeren aan padkant bij Midberg dus donkerder dan bij Delphy. Normaal gesproken zou op een donkerdere positie de fotosynthese-capaciteit juist verder terug moeten lopen in plaats van minder ver, zoals hier het geval is. Tevens moet nog opgemerkt worden dat de metingen bij Delphy zijn uitgevoerd op de visueel onbeschadigde plekken op het blad. Gemiddeld geeft dit dus een overschatting van de fotosynthese bij Delphy.



Figuur 4-9. *Vergelijk fotosynthese-capaciteit bij Delphy en Midberg aan padkant en in het gewas. Er is gemeten bij 700 ppm CO_2 (n=4).*



Figuur 4-10. Relatieve afname van de fotosynthese-capaciteit van bladeren dieper in het gewas gerekend in knopen (of oksels) vanaf de top, weergeven voor bladeren aan padkant en in het gewas. Te zien is dat de relatieve afname bij oksel 15 groter is bij Delphy vergeleken met Midberg.

Bovenstaande metingen in juli 2019 zijn uitgevoerd om de volgende vraag te beantwoorden: "Ligt het zeer snelle verval van de fotosynthese dieper in gewas aan cv 'Mavera', aan de belichte teelt bij Improvement Centre, of is dat een eigenschap van paprika in het algemeen?" De volgende zaken zijn in ieder geval duidelijk:

- Het verval in fotosynthese-capaciteit aan padkant is in de belichtingsproef bij Improvement Centre in juli duidelijk minder extreem dan in maart (volop belichtingsseizoen).
- Bij de juli-metingen vervalt de fotosynthese aan padkant in de praktijk minder snel dan bij Improvement Centre. Nb. Fotosynthese aan de padkant is relevanter dan middenin het gewas, omdat middenin het gewas toch weinig licht valt.

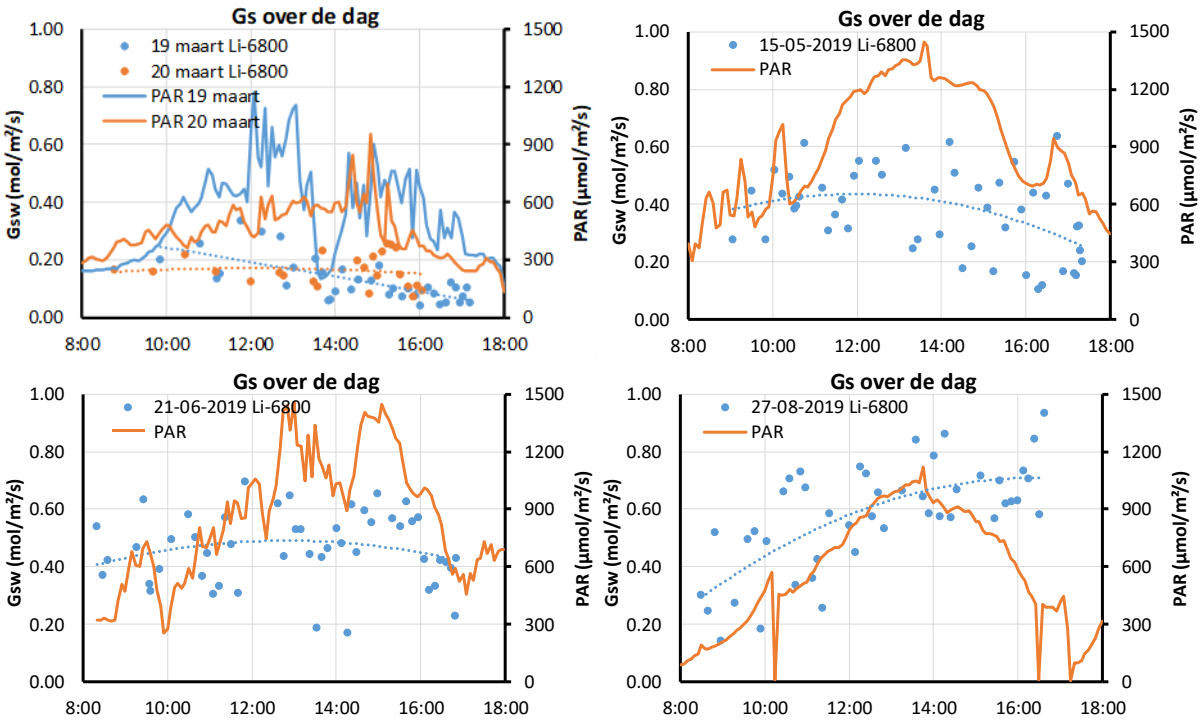
Hieruit valt te concluderen dat de lichtbenutting voor fotosynthese van bladeren onder de toplaag van het gewas in de belichtingsproef bij Improvement Centre minder efficiënt is dan in de praktijk. Hoewel er in de praktijk ook een fors verval is, is de vraag waarom dit verval in de belichtingsproef hoger is, nog niet opgehelderd.

4.4. Huidmondjesopening

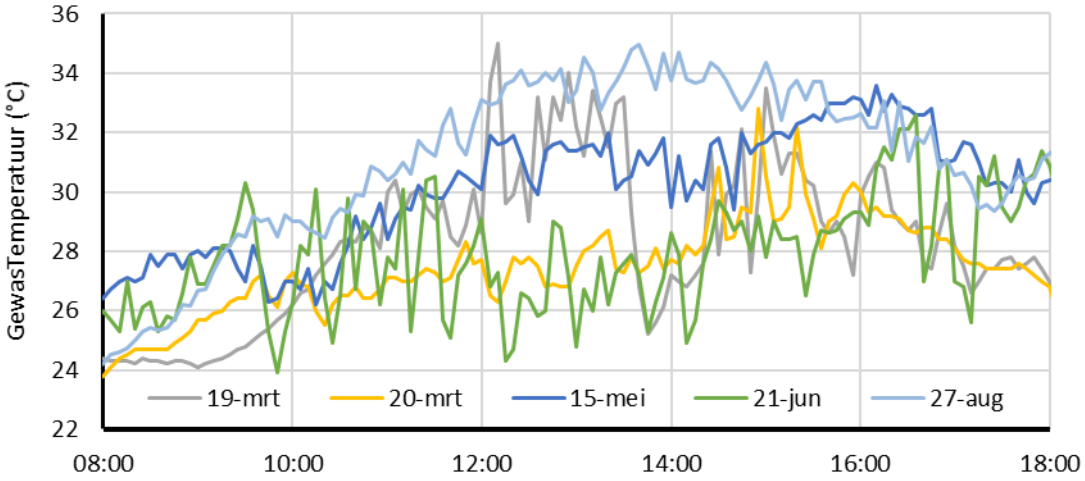
Op zes dagen is de huidmondjesgeleidbaarheid (Gs) van topbladeren bepaald. Dit behoorde bij het project 'Monitoring van huidmondjesopening in de kas: Sturen op laag energieverbruik zonder over de grens te gaan' (zie Trouwborst et al. 2019). Hier werd nagegaan of de huidmondjes een sluitingsreactie vertonen op het moment dat er niet meer verneveld wordt, waardoor de RV in de kas daalde en de VPD steeg. Dit bleek tegen verwachting in, slechts beperkt het geval te zijn geweest.

Figuur 4-11 geeft de data weer van vier dagen waarop de huidmondjesopening is bepaald. Op 19 & 20 maart 2019 (Figuur 4-11 linksboven) zijn op beide dagen in de ochtend nog wat hogere waarden gemeten, maar naarmate de middag vorderde, waren de gemeten waarden steeds lager: dit duidt op huidmondjesbeperking. Op 15 mei lag de Gs in absolute zin fors hoger dan in maart. Rond 16:00 werden ook lage waarden gemeten. Dit valt samen met een VPD van rond de 2.5

kPa—de vernevelinstallatie was die dag rond 12:00 uitgezet. Tegelijkertijd zijn er ook bladeren die nog een hoge Gs hebben en dus nog geen droogtestress ervaren. Idealiter moeten zulke hoge VPD's dus voorkomen worden. Op 21 juni en 27 augustus is de vernevelingsinstallatie ook uitgezet. Maar op die dagen werd er geen huidmondjessluiting waargenomen. Terwijl de VPD die dagen toch rond de 2 kPa lag. Wat verder op de laatste drie meetdagen opvalt is de relatief grote spreiding in gemeten Gs rondom de ruwe trend die met een stippellijn is aangegeven. Beelden van de thermoviewcamera geven ook een heterogeen beeld in gewastemperatuur. Dit wordt verklaard door de gemeten variatie in Gs tussen bladeren. Figuur 4-12 geeft de gewastemperaturen weer op de verschillende meetdagen. Hierbij valt op dat de gewastemperatuur op 19 maart overdag beduidend hoger ligt dan op 15 mei en 21 juni, terwijl de instraling wel veel lager was (Figuur 4-12). Dit laat zien dat het gewas in de zomermaanden beter in staat was zich te koelen dan in de wintermaanden. Hoge instraling in maart/april lijkt dus meer stress te geven dan later in het seizoen. Dit is een aandachtspunt voor het moment van coaten. Daarnaast is het de vraag of het gebrekkige vermogen om voldoende te verdampen in het voorjaar een normale reactie is op de toenemende instraling, of dat het te relateren is aan de belichting gedurende de afgelopen periode. Dit is een belangrijke vraag. In het laatste geval kan het effect van de belichtingsstrategie (spectrum, fotoperiode?) op het huidmondjesgedrag wel eens bepalend zijn voor de prestatie van het gewas in de periode volgend op het belichtingsseizoen.



Figuur 4-11. Huidmondjesgedrag (stippen) en PAR (ononderbroken lijn) op 19 en 20 maart (linksboven), 15 mei (rechtsboven), 21 juni (linksonder) en 27 augustus 2019 (rechtsonder). Iedere stip is een afzonderlijk meetblad, de stippellijn geeft een ruwe trend aan. Per meetdag zijn er rond de 50 verschillende bladeren gemeten. De laatste drie meetdagen is de verneveling halverwege de dag uitgezet om huidmondjessluiting te induceren. Dit gebeurde tot op zekere hoogte op 15 mei (VPD rond 2.5 kPa), maar niet op 21 juni en 27 augustus, ondanks een oplopende VPD voorbij de 2 kPa. De meetdatum staat vermeld in de legenda van de figuren (zie ook Trouwborst et al. 2019).



Figuur 4-12 Gewastemperatuur op de meetdagen zoals getoond in Figuur 4-11

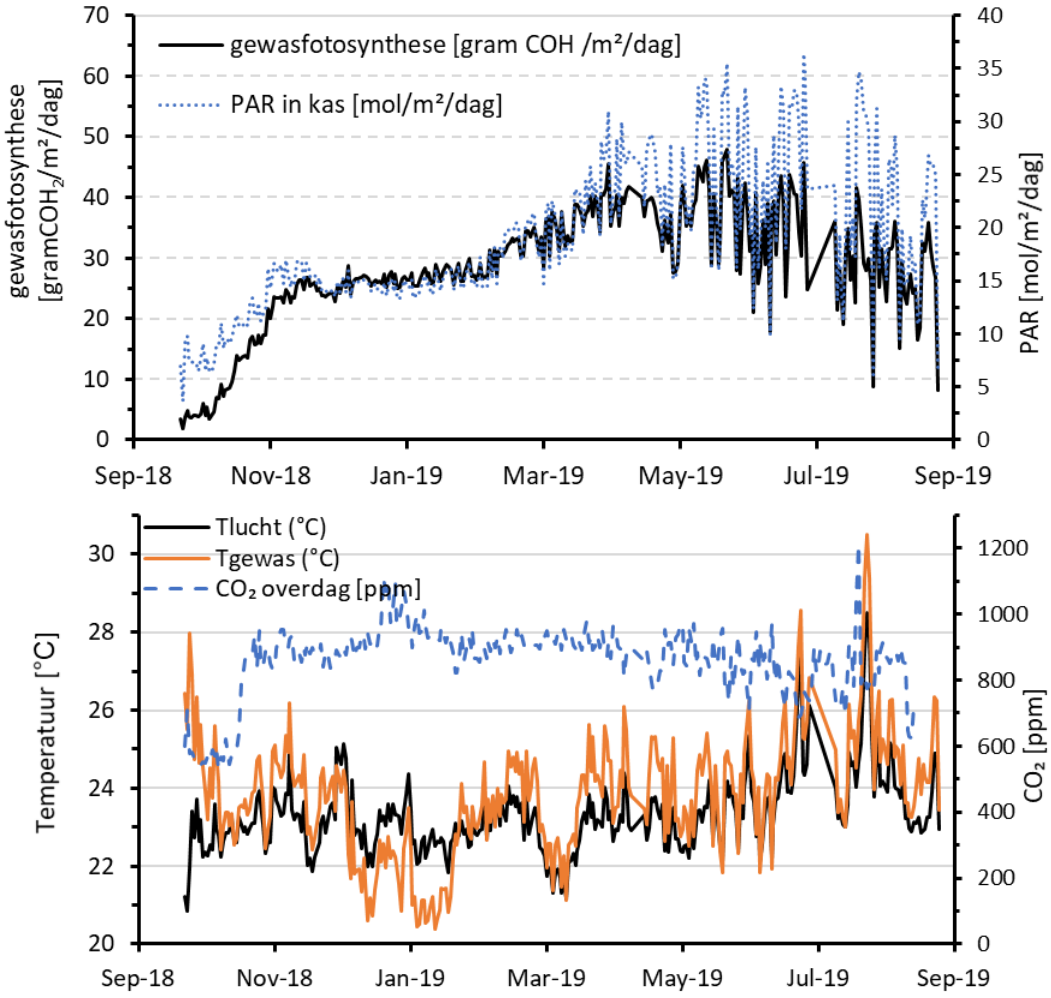
4.5. Gewasfotosynthese: bepaling fotosynthese-parameters

Op basis van de in voorgaande paragrafen gepresenteerde data zijn de fotosynthese-parameters van het Farquhar, von Caemmerer & Berry model (1980) gefit. Hierbij is de fotosynthesecapaciteit van het topblad tussen de verschillende meetmomenten geïnterpoleerd, waardoor de fotosynthese-capaciteit van de topbladeren iedere dag iets verschuift. Tevens is het effect van de daling in fotosynthese-capaciteit dieper in het gewas gesimuleerd door de afname in fotosynthese-capaciteit te koppelen aan overliggende LAI.

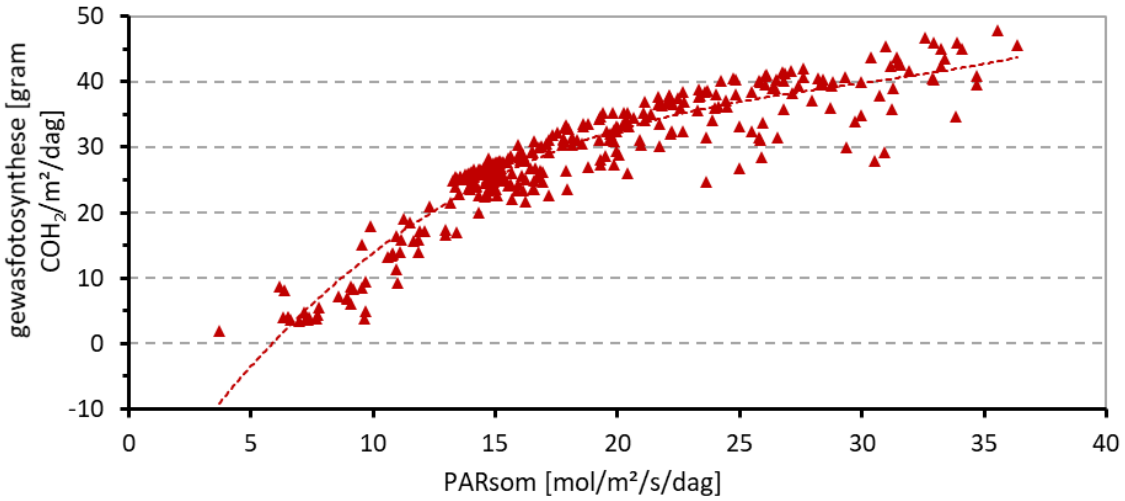
4.6. Gewasfotosynthese: uitkomsten model

Figuur 4-13 geeft de resultaten van de berekende assimilatie per m^2 gewas weer voor de gehele teeltperiode. Te zien is dat de gewasfotosynthese in het winterseizoen synchroon loopt aan de lichtsom. Een gram/mol of gram/joule benadering voor de voorspelling van de productie is dan prima. Echter, aan het begin van de teelt ligt de fotosynthese van het gewas relatief lager ten opzichte van het licht. Dit komt doordat de LAI en zo de lichtonderschepping in het begin nog laag is. Daarnaast was de CO_2 concentratie in het begin van de teelt lager, en waren er momenten met een relatief hoge lichtintensiteit. Beide verlagen de lichtbenutting voor de fotosynthese.

In de lente en zomer neemt de fotosynthese minder toe dan je op grond van een gram/mol-benadering zou mogen verwachten (Figuur 4-13). Dit komt door (1) de verzadigingsrespons van de fotosynthese en (2) wegzakkend CO_2 op dagen met hoge instraling. In de praktijk zal dit sterker spelen dan hier getoond, want CO_2 bleef op een relatief hoog niveau te zien in Figuur 4-13 onder. De lagere lichtbenutting voor assimilatie in de lichtere voorjaar- en zomerperiode zou zich moeten vertalen in een lagere productie per mol licht. Dit is inderdaad het geval en wordt verder besproken in '5.Productie en kwaliteit'.



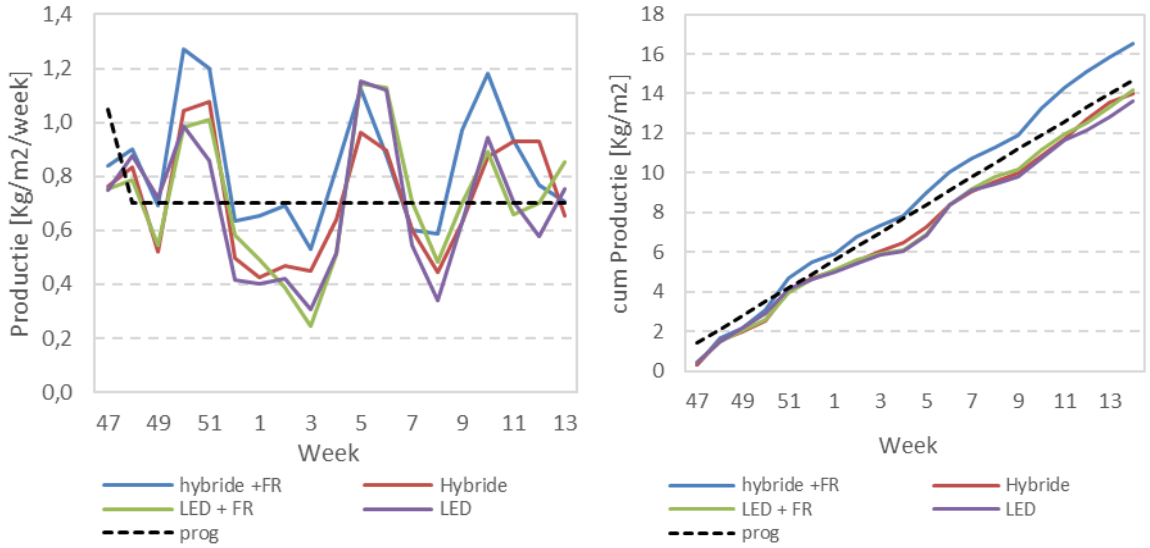
Figuur 4-13. Berekende gewasfotosynthese in de jaarrondteelt van paprika. LED-behandeling (de Hybride behandeling liet hetzelfde patroon zien en wordt daarom niet getoond). In de onderste figuur wordt de gemiddelde temperatuur (Tlucht en Tgewas) en het gemiddelde CO2-gehalte gedurende de lichtperiode weergegeven.



Figuur 4-14. Assimilatensom versus PARsom over de gehele teelt van de LED-behandeling. De Hybridebehandeling liet hetzelfde patroon zien en wordt daarom niet getoond. Duidelijk is te zien dat de assimilatensom niet evenredig toeneemt met de PARsom. De gestreepte lijn geeft een ruwe trend weer. Een gram/mol-benadering als voorspelling van de assimilatie gaat dus in de wintermaanden vrij goed, maar loopt bij toenemende lichtsommen uit de pas.

5. Productie en kwaliteit

De in het hoofdstuk beschreven assimilatie van het gewas, zou in lijn moeten zijn met de berekende assimilatie zoals hierboven beschreven. Voor het realiseren van de juiste balans in het gewas werd in week 44 de eerste vrucht hardgroen geoogst. Omdat niet iedere plant een extra vrucht op het eerste oksel had, resulteerde dit in een productie van gemiddeld 0.45 kg/m^2 voor alle lichtbehandelingen. De eerste vruchten op kleur werden geoogst in week 47, ongeveer 9 weken na planten. Belangrijk uitgangspunt van de winterteelt was het realiseren van een vlakke productie van ten minste 0.7 kg/m^2/week. Figuur 5-1 toont het productieverloop in periode tot week 14 (na deze fase kreeg het buitenlicht snel de overhand). Deze grafiek laat zijn dat er ondanks een vrij goede balans toch wat pieken en dalen te zien zijn. Wat daarnaast opmerkelijk is, is de continue hogere productie van de lichtbehandeling 'Hybride + verrood'. De productie komt in deze behandeling ook niet onder de 0.5 kg/m^2/week, terwijl de andere behandelingen begin januari een kleine dip in de productie tonen. De behandeling Hybride + verrood toont aan het einde van de winter een cumulatief verschil van gemiddeld 2.5 kg/m^2 ten opzichte van de overige behandelingen. Ook behaald deze behandeling een hogere productie dan de vooraf opgestelde prognose.



Figuur 5-1. Productie van de rood geoogste vruchten weergeven als lopend gemiddelde per 2 weken (vanwege een oogstfrequentie van 3x per 2 weken) en cumulatief in de teeltfase dat op basis van de teeltomstandigheden een productie van 0.7 kg/m^2/week gerealiseerd moest worden (t/m week 14).

Gedurende de teelt is het vruchtgewicht in de Hybride + FR gemiddeld iets hoger dan de overige behandelingen (Figuur 5-8), maar dit kan niet het verschil in productie verklaren. Ook de uitgroeiduur was niet opvallend korter (Figuur 5-7). In de behandeling 'Hybride + verrood' zijn dus meer vruchten geoogst. De vraag blijft waarom deze lichtbehandeling erin slaagde om meer vruchten te produceren. Waarbij de verklaring zich richt op het hogere aandeel verrood dat is gerealiseerd door het combineren van SON-t met extra verrood (PSS-waarde =0.83 t.o.v. Hybride zonder verrood =0.865; LED + verrood = 0.854 ; LED = 0.88).
Hiervoor zijn tijdens de teelt een aantal hypotheses geformuleerd:

1. Het toevoegen van verrood zorgt voor het beter functioneren van de fotosynthese waardoor er meer assimilaten zijn geproduceerd.
2. De vruchten bevatten een lager droge stof % waardoor er minder suikers per vrucht nodig zijn.
3. Door extra verrood zetten vruchten gemakkelijker.
4. Door extra verrood worden meer assimilaten van de bladeren naar de vruchten getransporteerd.

Gedurende de teelt is zoveel mogelijk geprobeerd om een antwoord te geven op de opgestelde hypotheses.

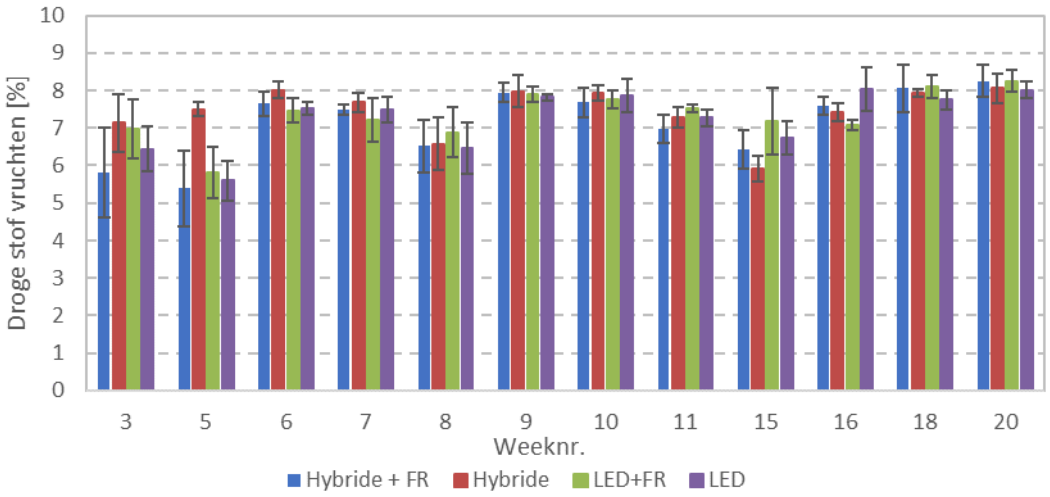
Wat betreft de fotosynthese: toevoeging van het verrood heeft geen meetbare verschillen opgeleverd in de fotosynthese-eigenschappen van de bladeren. Wel is het zo dat de ±20 µmol/m^2/s toegevoegd verrood ten dele bijdraagt aan de assimilatie. Een benutting voor assimilatie van hooguit 50% van het verrode LED-licht (~730 nm) t.o.v. PAR-licht (400-700 nm) is een redelijke aanname (Hogewoning et al, 2012). Dat zou in de wintermaanden tot een ±4% hogere effectieve lichtsom leiden, wat hooguit een klein deel van de substantieel hogere productie (±17% t/m week 14) verklaren kan in de behandeling Hybride + verrood.

Zowel aan het blad als aan de vruchten zijn droge stof metingen uitgevoerd. Figuur 5-2 toon het % droge stof in de vruchten, hieruit blijkt dat er geen verschil is in het % droge stof in de vruchten. Dus het percentage drogestof verklaart ook niet de meer-productie in de behandeling Hybride + verrood.

Een effect van verrood op de zetting lijkt wel sprake van te zijn. Een effect van lichtspectrum op zetting kan plaatsvinden via de effecten van het lichtspectrum op de hormoonhuishouding van de plant. Ontwikkelende paprikavruchten exporteren auxine wat de zetting van nieuwe vruchten remt. Gibbereline is mogelijk ook benodigd voor een succesvolle zetting (beschreven voor tomaat; Serrani et al, 2007), en verrood stimuleert gibberelline-synthese (Whitelam en Halliday, 2007). Mogelijk beïnvloedt verrood de zetting van paprika via hormonale routes, maar verdere details hierover zijn vooralsnog onbekend.

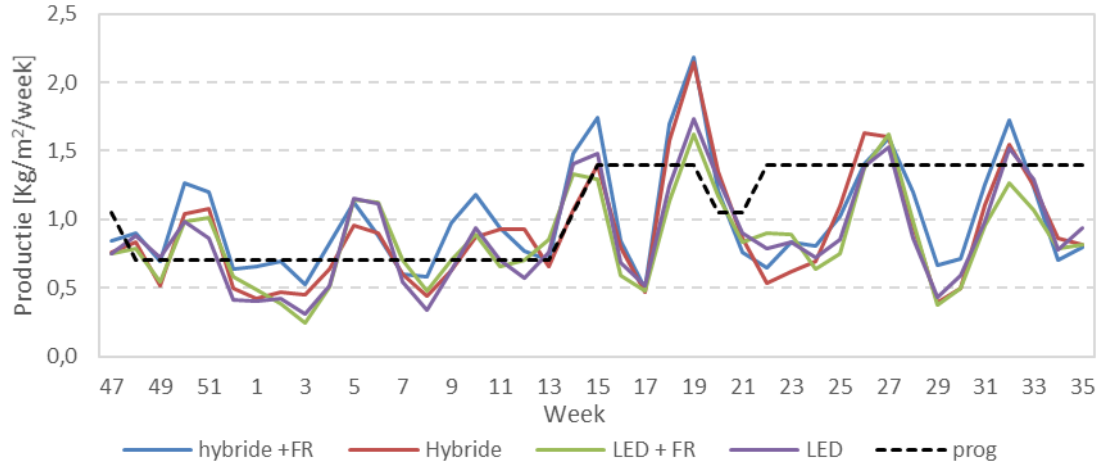
Een sterkere allocatie van assimilaten richting de vruchten ten koste van vegetatieve plantendelen is gemeten bij tomaat belicht met aanvullend verrood (Hogewoning et al, 2013). In die proef was het percentage drooggewicht hoger in de vruchten uit de behandeling met aanvullend verrood. Dat is in de huidige paprikaproef niet gemeten (Figuur 5-2)

Een volledige verklaring voor de hogere productie in de afdeling Hybride + verrood kunnen we dus nog niet geven. Het meest opvallend is de succesvollere vruchtzetting en hogere plantbelasting in de winter in deze behandeling.

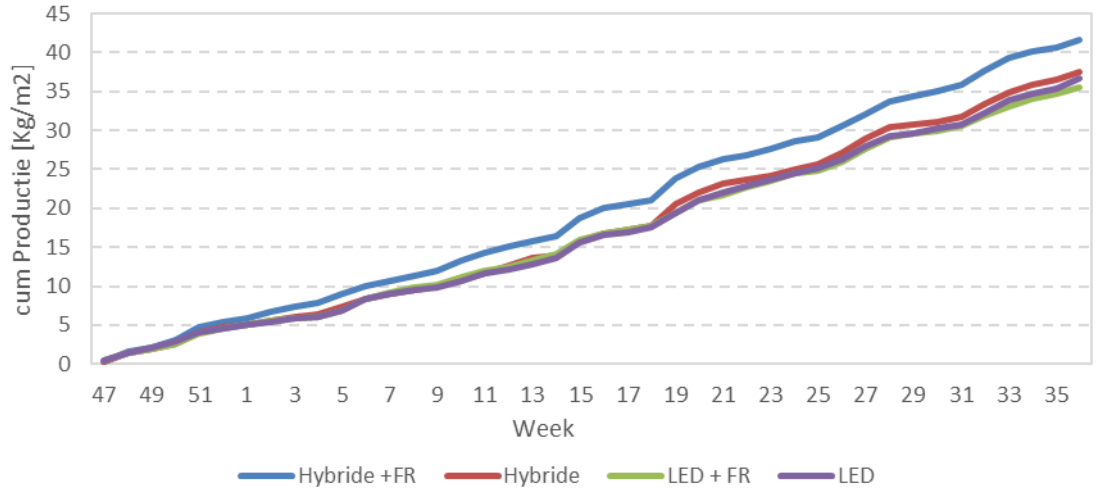


Figuur 5-2. Droge stof % van de vruchten in de periode van week 3 t/m week 20. De metingen zijn gestart op het moment dat duidelijk werd dat de behandeling 'Hybride+verrood' meer produceerde ten opzichte van de overige behandelingen, tot het moment dat de belichting nauwelijks meer werd ingezet. Iedere metingen is het gemiddelde van 10 vruchten, de data tonen het gemiddelde inclusief de standaarddeviatie.

Na week 14 zou op basis van de toenemende lichtsommen de wekelijkse productie moeten gaan toenemen (Figuur 5-3, zwarte stippellijn). Tussen week 15 en week 20 wordt de geprognotiseerde van 1.4 kg/m^2/week ook gerealiseerd, maar na week 21 is de productie lager dan de vooraf berekende productie. De meest voor de hand liggende verklaring voor de lagere productie aan het einde van de teelt is het verval van de fotosynthese zoals eerder beschreven (Verval fotosynthese-capaciteit dieper in het gewas). Figuur 5-4 toont de cumulatieve productie aan het einde van de teelt (rood geoogst). De behandeling 'Hybride + verrood' realiseert een productie van 41.7 kg/m^2 wat een goede potentie toont voor een belichte paprika teelt. De overige behandelingen realiseren een productie van 37.5 kg/m^2; 35.6 kg/m^2 ; 36.6 kg/m^2 voor respectievelijk Hybride ; LED + verrood en LED. Opvallend is dat in de LED behandeling het extra verrood licht niet resulteert in extra productie.



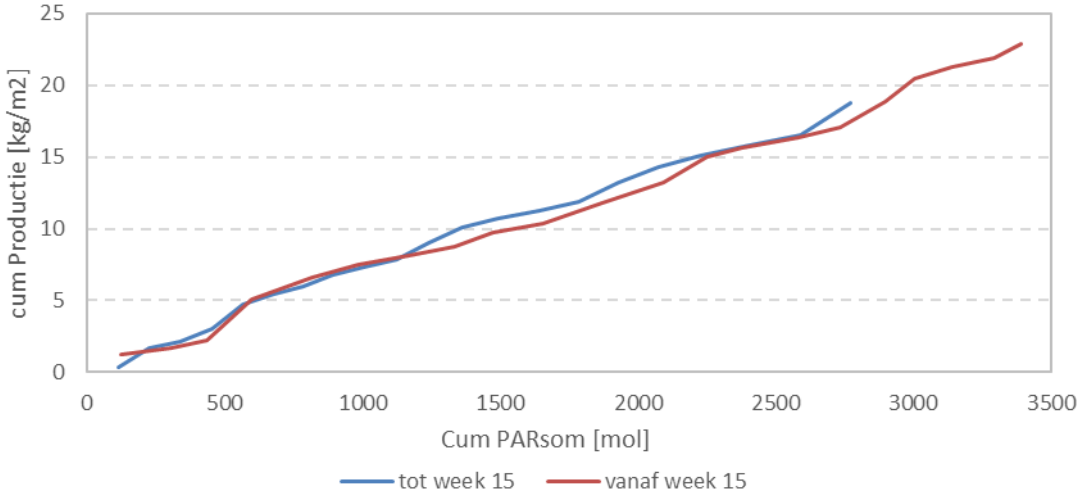
Figuur 5-3. Productie verloop gedurende de teelt van de 4 lichtbehandelingen ten opzichte van de prognose. Iedere behandeling toont het gemiddelde van 3 goten, omdat er geoogst werd met een frequentie van 3x per weken is in de grafiek het lopend gemiddelde per 2 weken weergegeven.



Figuur 5-4. Cumulatieve productie van de 4 lichtbehandelingen.

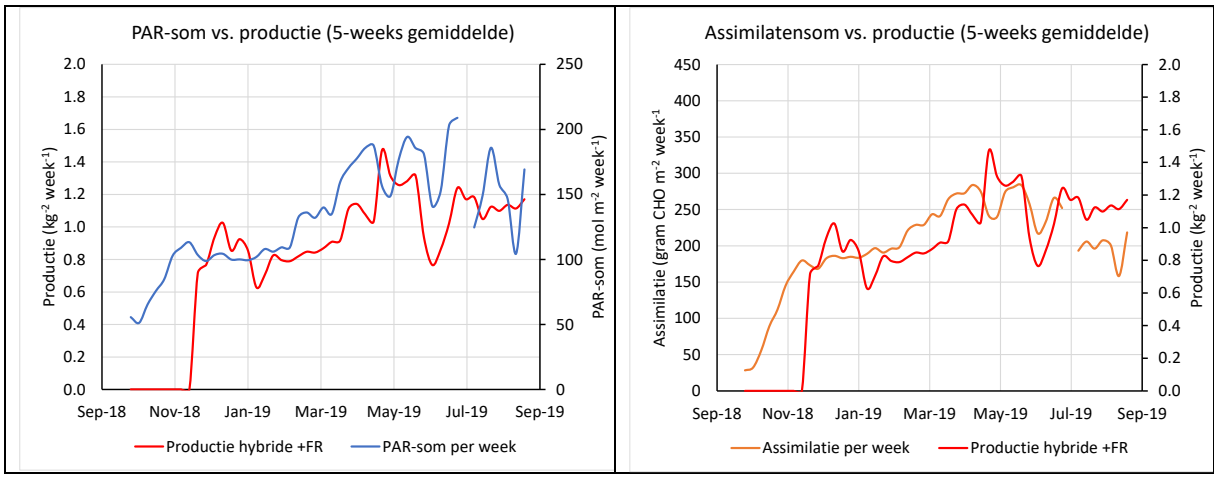
Wanneer we echter kijken naar de productie per mol licht dan zien we het volgende. Over de gehele teelt heeft het gewas 6680 mol licht ontvangen. De behandelingen Hybride + FR heeft hiermee 41.7 kg/m^2 paprika's geproduceerd (exclusief groen geoogst product). Dit omgerekend is 6.2 gram vers gewicht per mol licht. Omdat 1 vrucht een uitgroeiduur heeft variërend tussen de 6 en 7 weken is het lastig om exact op ieder moment de benutting van het licht te bepalen. Figuur 5-5 toont de productie ten opzichte de hoeveelheid ontvangen PAR door het gewas van de eerste 21 oogstweken en 2de 21 oogstweken van de behandeling Hybride + FR. Hierin is te zien dat de lijnen van de productie tot week 15 en vanaf week 15 dicht op elkaar liggen en het gewas het licht in vergelijkbare mate heeft kunnen omzetten naar vruchten. Wanneer we de vegetatieve opbouw

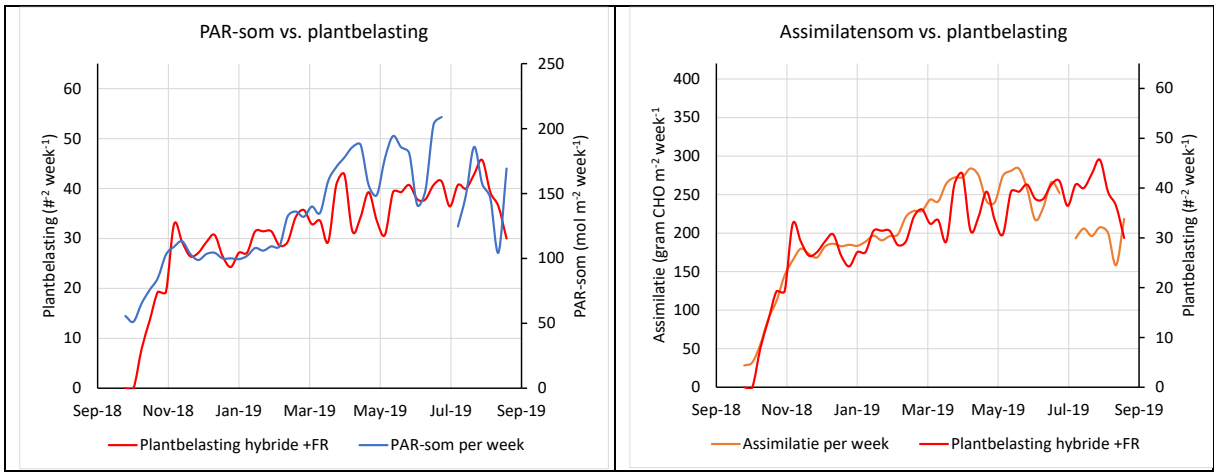
van het gewas niet meenemen dan heeft het gewas in de periode van eerste oogst tot week 15, 2770 mol licht ontvangen en hiermee 18.8 kg/m^2 paprika's geproduceerd. Dit resulteert in 6.8 gram versgewicht per mol licht. In de periode na week 15 tot einde teelt heeft het gewas 3295 mol licht ontvangen en hiermee 22.9 kg/m^2 geproduceerd. Dit resulteert in 6.95 gram versgewicht per mol licht.



Figuur 5-5. Gerealiseerde productie ten opzichte van de hoeveelheid ontvangen licht door het gewas van de behandeling Hybride + FR, van de eerste 21 weken van de teelt (tot week 15) en de laatste 21 weken van de teelt (vanaf week 15).

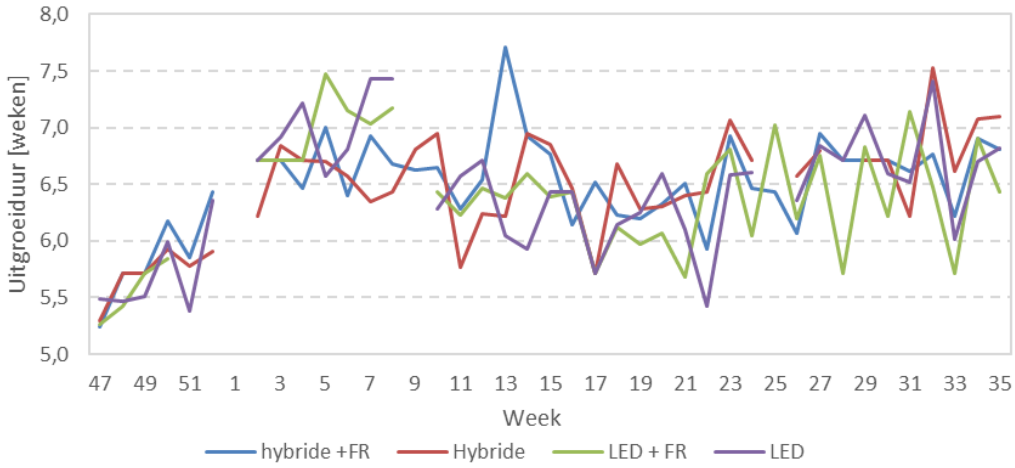
Wanneer we nog iets verder verdiepen in de benutting van het licht dan is duidelijk te zien dat de productie per eenheid PAR lager wordt na februari in de meest succesvolle Hybride + verrood afdeling (Figuur 5-6). De productie komt veel beter overeen met de berekende assimilatie dan met de PAR-som. In de periode februari-april lijken niet alle assimilaten goed te worden benut voor productie. Hier ligt een kans voor productieverbetering. De plantbelasting lijkt vanaf juni (te) hoog te worden ten opzichte van de beschikbare assimilaten. Vanaf die periode daalt ook het gemiddeld vruchtgewicht tot onacceptabel lage waarden (Figuur 5-8).





Figuur 5-6. Productie (voortschrijdend gemiddelde over 5 weken) en plantbelasting per teeltweek, uitgezet tegen de PAR-som (links) en de berekende assimilatensom van die teeltweek voor behandeling Hybride + Fr.

Voor het bepalen van de juiste gewasbalans is de uitgroeiduur ook een belangrijke parameter. Hoe hoger de temperatuur, hoe sneller de vruchten rijp zijn, maar hoe hoger de vraag naar assimilaten is, waardoor er dus een lagere plantbelasting aangehouden kan worden. Zoals beschreven in '3.2 Klimaatgegevens' waren de gerealiseerde etmaaltemperaturen hoger dan vooraf was beoogd. Dit resulteerde dus in kortere uitgroeiduur van de vruchten (Figuur 5-7).

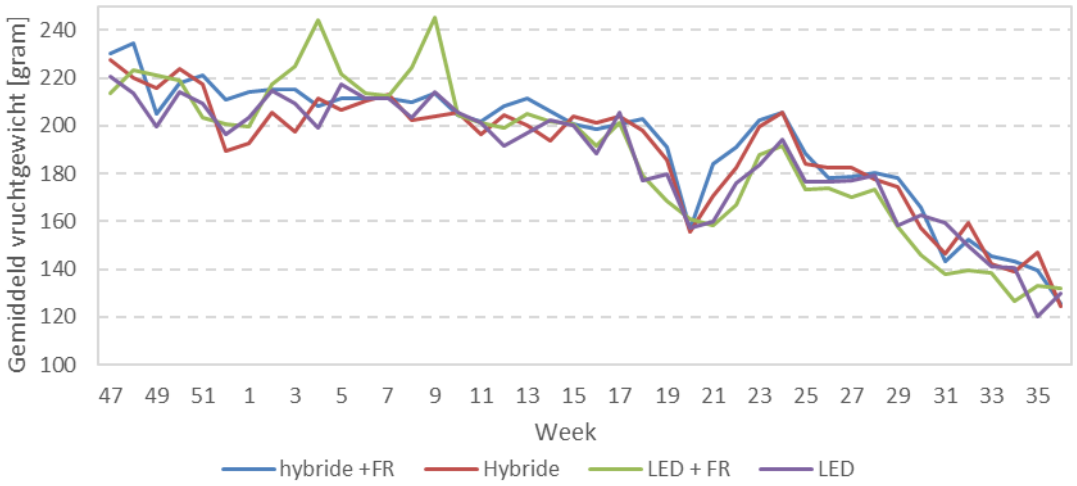


Figuur 5-7. ontwikkeling van de uitgroeiduur van de vruchten gedurende de teelt in alle 4 de lichtbehandelingen. Als gevolg van de hogere etmalen was de gerealiseerde uitgroeiduur uiteindelijk lager dan geprognotiseerd. De uitgroeiduur is vastgesteld op basis van de telplanten, waarbij 1 datapunt het gemiddelde is van 10 planten.

Vanaf het begin van de teelt waren ondanks de snelle uitgroeiduur de vruchtgewichten hoog. Opvallend kwaliteitsaspect bij de vruchten was de dikwandigheid van de vruchten (Foto 5-1).

Foto 5-1. De vruchten in de winter hadden een hoog vruchtgewicht, een opvallende constatering aan de vruchtkwaliteit was de dikwandigheid van de vruchten.

Tot juni bleef dit hoge vruchtgewicht behouden, maar vanaf week 25 begon het vruchtgewicht sterk terug te lopen in alle behandelingen. Vanaf week 30 was het vruchtgewicht te laag voor een goede kwaliteit paprika. De laatste 5 weken van de teelt voldeden de specificaties van de vruchten niet meer aan de eisen voor een goede vruchtkwaliteit (Figuur 5-8). Naast het lage vruchtgewicht werden er richting het einde van de teelt ook steeds meer vruchten met binnenrot gesneden. Het is lastig om hiervoor een specifieke oorzaak aan te wijzen. Het lijkt niet waarschijnlijk dat er een relatie is met licht of het lichtspectrum, de oorzaak van binnenrot zal eerder gezocht moeten worden in de suboptimale teeltomstandigheden in de kleine afdelingen.



Figuur 5-8. Ontwikkeling van het gemiddeld vruchtgewicht gedurende de teelt voor de 4 verschillende lichtbehandelingen.

6. Leerpunten en conclusies

De doelstelling van het project was het ontwikkelen van een toekomstige teeltstrategie met LED belichting in paprika. Het toetsen van de 4 verschillende lichtbehandelingen en metingen die tijdens de teelt zijn verricht heeft geresulteerd in nieuwe inzichten en toont ook de potentie van een belichte paprikateelt. Hieronder staan de leerpunten en conclusies uit het onderzoek beschreven ten opzichte van de vooraf opgestelde doelstelling.

Source/Sink balans optimaliseren
Bij aanvang van de teelt was een prognose opgesteld die als uitgangspunt had om vraag en aanbod van assimilaten op elkaar af te stemmen. Omdat een paprika zijn vruchtzetting geeft in zetsels, wordt met deze aanpak voorkomen dat er productiepieken ontstaan. Om de source (aanbod) en sink (vraag) in balans te brengen werd in de eerste fase van de teelt de source beperkt door het wegschermen van overtollig buitenlicht met het lichtuitstootscherm. Met vruchtdunning in met name de eerste fase van de teelt werd de plantbelasting geleidelijk opgebouwd richting de maximale plantbelasting gegeven de hoeveelheid licht in de winter. De opbouw van de plantbelasting was in lijn met de opgestelde prognose. Daarnaast toonden de resultaten dat er iedere week nieuwe zetting was wat resulteerde in een relatief vlakke productie. In de weken met veel vruchtzetting hadden op sommige momenten nog iets meer vruchten gedund kunnen worden om de oogst nog wat verder uit te vlakken. Omdat er in de teelt 1 dunstrategie werd toegepast kunnen we niet concluderen of vruchtdunning van invloed is geweest op de productie. Wel kunnen we stellen dat vruchtdunning heeft bijgedragen aan een gelijkmatigere productie en het continue realiseren van nieuwe zetting in de winter. Openstaande vraag hierin is nog wel of we meer vruchten hadden kunnen aanhouden en daarmee meer productie hadden kunnen realiseren? Daarnaast is er mogelijk nog een verbeterslag te realiseren in de opbouw van de plantbelasting in het voorjaar, waar deze nu achter bleef op de vooraf opgestelde prognose.

Gewastrekking
Het toevoegen van 10% verrood aan het lichtspectrum heeft geresulteerd in meer strekking van de internodia. Dit resultaat werd in zowel de Hybride als in de volledig LED afdeling vastgesteld. Hoewel er onderling tussen de behandelingen verschillen zijn vastgesteld, was de bevinding van de telers dat de werkbaarheid in alle behandelingen nog verbeterd kan worden. De behandeling 'Hybride + verrood' werd als enige behandeling beoordeeld als werkbaar. Een opvallende bevinding was dat met het toenemen van het buitenlicht de lengte van de internodia niet toenam, waar dit wel de verwachting was. Dit resultaat vraagt om verdere verdieping naar de invloed van lichtspectrum op de strekking en het herstel van het gewas in het voorjaar. Belangrijk is wel dat strekking geen doel op zich moet zijn, maar uiteindelijk moet resulteren in een voldoende werkbaar gewas en een betere productie.

Lichtspectrum en productie
Op voorhand waren de lichtspectra gekozen op basis van de hypothese dat met verrood meer strekking op de internodia kan worden gerealiseerd. Al kort nadat het gewas in productie kwam, bleek dat de behandeling 'Hybride + verrood' structureel meer produceerde. Dit resulteerde in 2.5 kg/m^2 meer productie t/m week 15, en 5 kg/m^2 meer productie aan het einde van de teelt, gemiddeld ten opzichte van de overige behandelingen. Gedurende de teelt zijn er diverse metingen gedaan om het proces hierachter te begrijpen. De oorzaak lijkt wel te zijn gerelateerd aan het totale aandeel verrood, dat in de behandeling 'Hybride + verrood' het hoogst is, resulterend in een minder extreme balans tussen actief en inactief fytochroom in deze behandeling. In de andere behandelingen was het verschil in fytochroombalans (PSS) met de balans bij natuurlijk licht groter (PSS-waarde natuurlijk licht=0.72; Hybride + verrood 0.83; Hybride=0.865; LED + verrood = 0.854 ; LED = 0.88). Vanuit tomaat is bekend dat met het toedienen van extra verrood licht er meer assimilaten van het blad naar de vruchten kunnen worden gestuurd, maar drogestof metingen konden dit in de teelt niet onderbouwen. Er zijn meer vruchten geoogst in de Hybride + verrood behandeling, zonder dat het gemiddeld vruchtgewicht, de uitgroeiduur en het percentage

drogestof opvallend verschilde van de overige behandelingen. Het lijkt er dus op dat de vruchtzetting gemakkelijker ging bij Hybride + verrood.

Fotosynthese
Het uiteindelijke doel van de fotosynthesemetingen was het parameteriseren van een model om de assimilatie van het gehele gewas te kunnen berekenen. Dat moet het mogelijk maken om veel nauwkeuriger te kunnen sturen op een goede balans tussen de aanmaak van assimilaten (source) en de vraag naar assimilaten (sink) dan op basis van lichtsom alleen. Immers, licht en assimilatie verhouden zich niet één op één, vanwege verschillen gedurende de teelt in bladoppervlakte (LAI), CO_2 in de kas en het voorkomen van hoge piek-lichtintensiteiten. Allereerst werd nagegaan of de lichtbehandelingen van invloed waren op de fotosynthese (de opname van CO_2). De fotosynthese-eigenschappen van de bladeren bleken niet te verschillen. Echter kwamen er wel interessante overige bevindingen naar voren. Hoewel de topbladeren met toenemend licht zoals verwacht een toename van de fotosynthese lieten zien, bleek er lager in het gewas een zeer snel verval van de fotosynthese te zijn vanaf het voorjaar (meting half maart). De lagere fotosynthese werd vooral veroorzaakt door een beperking van de huidmondjesopening in de diepere gewaslagen. Het verval van de ETR-respons was namelijk minder extreem. Ook de bladkwaliteit was zichtbaar slecht (chlorotisch) dieper in het gewas. De oorzaak van dit snelle verval van de bladkwaliteit en fotosynthese dieper in het gewas is op basis van de huidige proef niet direct te achterhalen. Bij het oplossen van dit probleem lijkt wel de sleutel te liggen voor een hogere productie in de belichte paprikateelt. Want hoewel de winterproductie naar wens was, bleef de productie vanaf het voorjaar achter ten opzichte van de prognose.

De berekende assimilatie voor het gehele gewas is voor de volledige teelt doorgerekend. De gerealiseerde plantbelasting en productie blijken inderdaad veel nauwkeuriger overeen te komen met de berekende assimilatie dan met de PAR-som. Waar de plantbelasting hoger lag ten opzichte van de berekende hoeveelheid assimilaten, was ook het vruchtgewicht in de periode daarna lager. Sturen op basis van assimilatensom biedt dus een goede mogelijkheden voor een betere controle over de teelt. En met deze aanpak worden er niet meer belichtingsuren naar de behoefte van het gewas, waardoor de belichting op een efficiënte manier wordt ingezet.

Samenvattende conclusie
Door te sturen op een balans tussen aanbod van en vraag naar assimilaten met behulp van het wegschermen van licht (begin teelt) het toepassing vruchtdunning, en het inzetten van de belichting op basis van de behoefte van het gewas is een redelijk vlakke en hoge winterproductie gerealiseerd. Het ontwikkelde assimilatiemodel voor paprika maakt een nauwkeurigere sturing mogelijk. Het lichtspectrum met het meeste verrood (Hybride + verrood) produceerde het meest. Deze behandeling gaf ook de langste internodia, hoewel de internodia nog altijd erg kort waren en meer strekking wenselijk is. Het verval van bladkwaliteit en fotosynthese richting het voorjaar heeft naar alle waarschijnlijkheid een hogere productie in de weg gestaan. Desalniettemin biedt een eindresultaat van 41.7 kg/m^2 in de meest succesvolle behandeling perspectief om de strategie voor een rendabele jaarrond belichte paprikateelt met LED belichting verder te ontwikkelingen.

7. Communicatie

Gedurende het project zijn er verschillende activiteiten uitgevoerd om de opgedane kennis te delen. Allereerst was er een wekelijkse intensive begeleidingsgroep die bestond uit 4 telers. Van de bijeenkomsten werd een verslag gemaakt en dit werd rondgestuurd naar de verdere betrokken. Daarnaast was er 1x per 6 tot 8 weken een bijeenkomst voor die werd georganiseerd door Glastuinbouw Nederland met vertegenwoordiging van de gewascommissie. Hierin werd de voortgang gepresenteerd en de presentaties werden vervolgens via Glastuinbouw Nederland verspreidt.

Op 15 februari 2019 was er een zogenoemd 'middagje tuinen' georganiseerd bij Delphy Improvement Centre, een openmiddag waarin de sector op de hoogte werd gesteld van de eerste resultaten en er ook een bezoek aan de afdelingen werd gebracht. Voor deze middag hadden 140 personen zich aangemeld, waarmee de voortgang van het project breed is uitgedragen en ook de interesse vanuit de sector voor deze ontwikkeling is getoond.

Het project was onderdeel van de rondleiding tijdens het Energiekevent op 11 april 2019. En was daarnaast onderdeel van de reguliere rondleiding bij Delphy Improvement Centre.

Gedurende het project zijn meerdere weblogs geschreven en geplaatst op de website van www.kasalsenergiebron.nl:

- 11 oktober 2018: https://www.kasalsenergiebron.nl/nieuws/paprika-jaarrond-met-led-of-hybride-belichting/
- 28 november 2018: https://www.kasalsenergiebron.nl/nieuws/led-in-paprika-het-gewas-staat-klaar-voor-de-donkerste-periode/
- 22 januari 2019: https://www.kasalsenergiebron.nl/nieuws/jaarrond-paprika-met-led-gewas-zet-netjes-door/
- 23 April 2019: https://www.kasalsenergiebron.nl/nieuws/paprika-telen-onder-belichting-goed-mogelijk-maar-er-zijn-nog-uitdagingen/
- 12 juni 2019: https://www.kasalsenergiebron.nl/nieuws/zoektocht-naar-een-zomergewas-in-de-belichtingsproef-paprika/
- 3 september 2019: https://www.kasalsenergiebron.nl/nieuws/led-magische-grens-40-kgm2-in-paprika-gerealiseerd/

En zijn er in het vakblad onder glas 2 artikelen verschenen:

- December 2018, nr 12, blz. 46-47. Start onderzoek paprika met LED's en hybridebelichting. 'Belichting in balans kan bijdragen aan jaarrondteelt paprika'.
- April 2019, nr 4, blz. 54-55. Onderzoek paprika met LED's en hybride belichting: 'Evenwichtige plantbelasting lukt, maar de internodiën blijven te kort'.

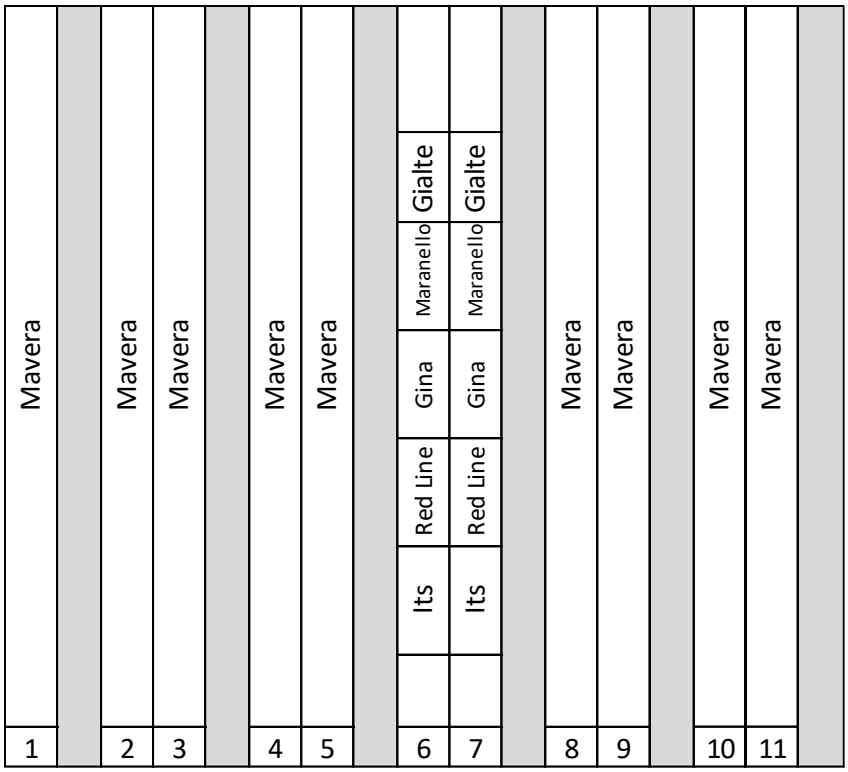
8. Literatuur

- Farquhar GD, Caemmerer SV, Berry JA. 1980. A biochemical-model of photosynthetic CO2 assimilation in leaves of C3 species. Planta 149: 78-90.
- Helmus-Schuddebeurs L, Kalkman H, Kaarsemaker R, Raaphorst M. 2019. Totaalconcept duurzame tomatenteelt. Kas als Energiebron, Projectnr. 20084.
- Hogewoning SW, Sanders J, Peekstok T, Persoon S. 2012. Lichtkleuren onderzoek: Wat is de ontbrekende schakel voor succesvolle productieverhoging? Plant Lighting B.V., Bunnik. 51 p
- Hogewoning SW, Wientjes E, Douwstra P, Trouwborst G, van Ieperen W, Croce R, Harbinson J. 2012a. Photosynthetic quantum yield dynamics: From photosystems to leaves. *The Plant Cell,* 24: 1921-1935.
- Monsi M, Saeki T. 1953. Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. Japanese Journal of Botany 14: 22–52.
- Serrani, Juan & Sanjuán, Rafael & Ruiz-Rivero, Omar & Fos, Mariano & Garcia-Martinez, Jose. (2007). Gibberellin Regulation of Fruit Set and Growth in Tomato. Plant physiology. 145. 246-57.
- Trouwborst G, Hogewoning SW, Harbinson J, & Van Ieperen W. 2011. The influence of light intensity and leaf age on the photosynthetic capacity of leaves within a tomato canopy. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 86(4), 403-407.
- Trouwborst G, J.O. Voogt, P. Reijm, S.W. Hogewoning. 2019. Monitoring van huidmondjesopening in de kas: Sturen op laag energieverbruik zonder over de grens te gaan. Plant Lighting B.V., Bunnik. 61p.
- Whitelam GC, Halliday KJ. 2007. Light and plant development: Blackwell Publishing Ltd.
- Yin X, Van Oijen M, Schapendonk AHCM. 2004. Extension of a biochemical model for the generalized stoichiometry of electron transport limited C3 photosynthesis. Plant, Cell & Environment 27.10 (2004): 1211-1222.

9. Bijlage

9.1. kasinrichting.

De kasinrichting van de Hybride en de LED afdeling was identiek en is hieronder geschetst.

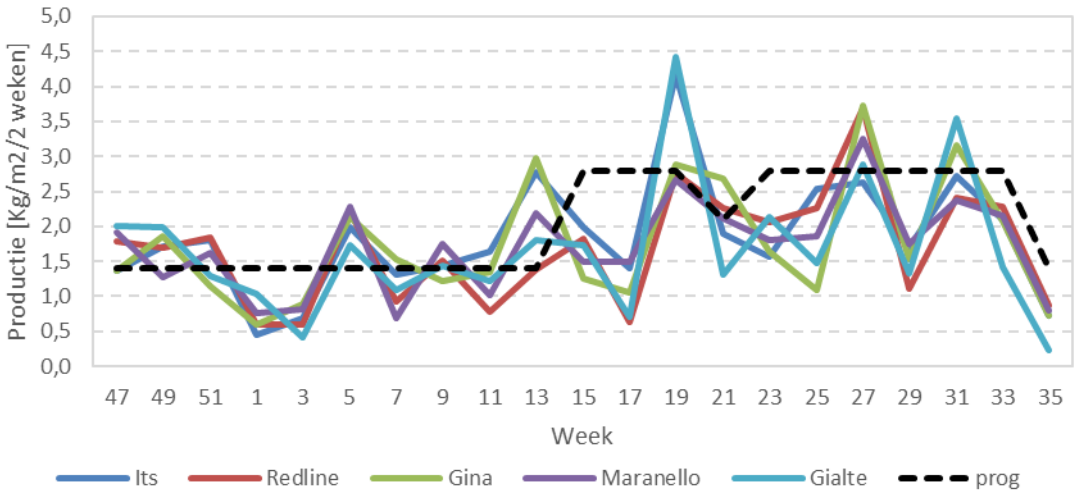


Figuur 9-1. Plattegrond van de beide afdelingen, waarin Mavera het hoofdras was en de 2 middelste goten waren uitgerust met diverse rassen.

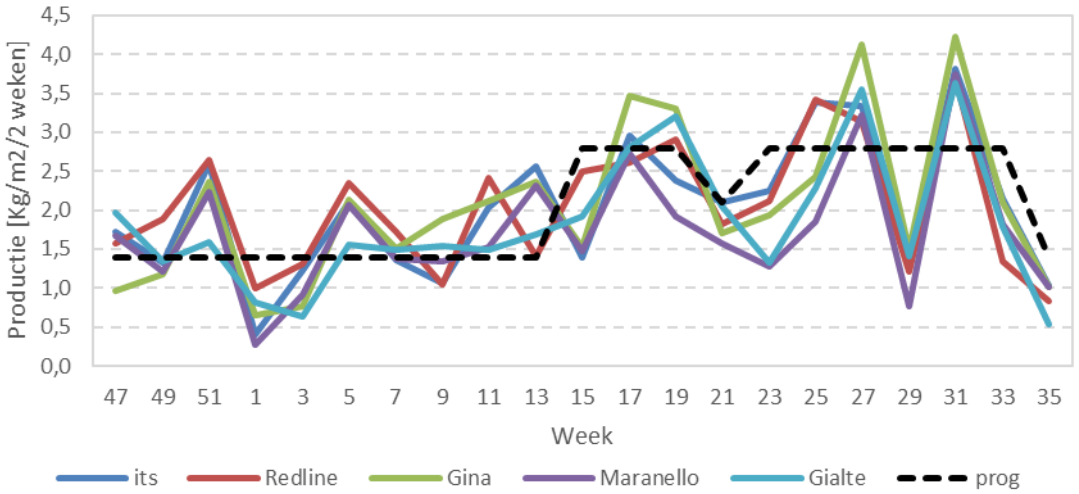
9.2. Productie rassen

In beide afdelingen waren naast het hoofdras nog 5 rassen geplant om de invloed van het ras vast te leggen. Omdat de rassen slecht bestonden uit 10 tot 12 planten, moeten de absolute productie waardes wel als indicatie worden gezien. Visueel toonde Gialte een slechte gewasontwikkeling en met name het blad toonde veel vergeling in een vroeg stadium van de teelt. Maranello had vooral moeite met strekking. Its, Redline en Gina toonde alle 3 een goede ontwikkeling die ten minste vergelijkbaar was met het hoofdras Mavera. De rassen stonden binnen de afdeling op de scheidingslijn tussen de behandeling met en zonder verrood, waardoor er dus niks gesteld kan worden over de invloed van verrood op de rassen. De rassen werden vergelijkbaar gedund als het hoofdras (Figuur 9-2 en Figuur 9-3)

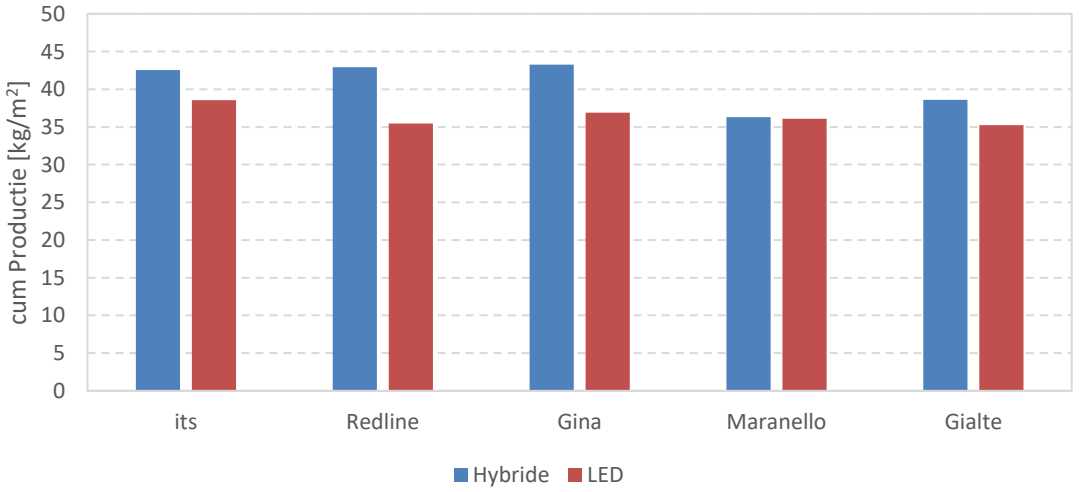
Figuur 9-4 toont de cumulatieve productie van de rassen. De algemene trend is dat de rassen in de Hybride afdeling een iets hogere productie realiseren dan de 100% LED afdeling.



Figuur 9-2. Productie van de 5 rassen in de LED afdeling ten opzichte van de prognose.

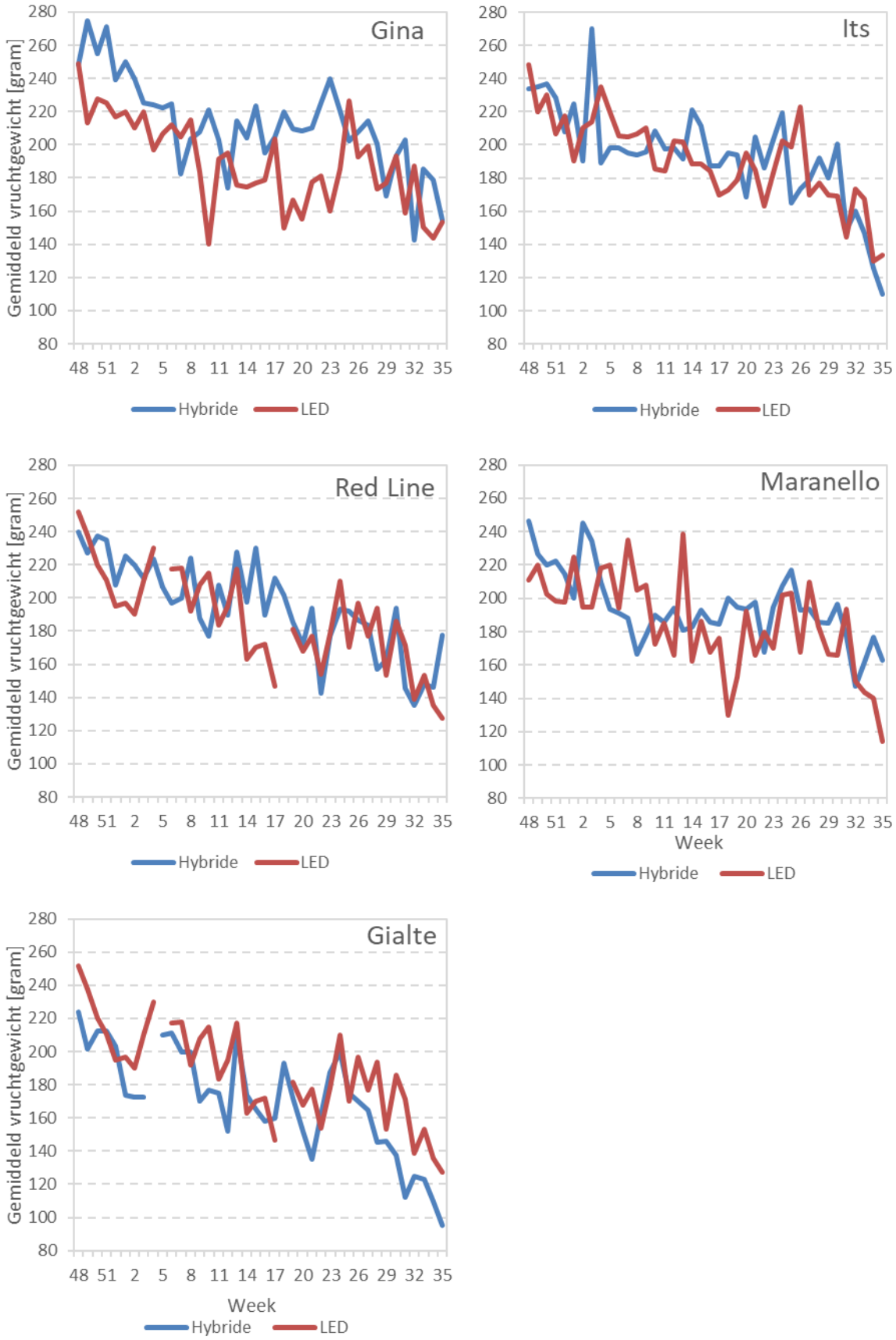


Figuur 9-3. Productie van de 5 rassen in de Hybride afdeling ten opzichte van de prognose.



Figuur 9-4. cumulatieve productie van de rassen in de Hybride en 100% LED afdeling.

9.3. Gemiddeld vruchtgewicht rassen



Figuur 9-5 ontwikkeling van het gemiddeld vruchtgewicht van de 5 rassen in de Hybride en LED afdeling.