

Komkommer integraal naar een optimaal lichtspectrum

Ontwikkeling van het IDC LED Hoge Draad en onderzoek naar het LED lichtspectrum in komkommer

Kees Weerheim, Puspa Khanal Joshi, Mark van Hoogdalem, Kirsten Leiss



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Referaat

In de glastuinbouw wordt LED belichting steeds vaker toegepast om gewasproductie in de winter te verhogen en energiekosten te verlagen ten opzichte van conventionele belichting. De toepassing is echter niet altijd energie-efficiënt door een beperkte kennis van de lichtspectrumbehoeften van planten. Het lichtspectrum beïnvloedt de gewasvormologie, biomassa-productie, assimilatenverdeling en de weerbaarheid tegen plagen en ziekten. Deze studie onderzocht de effecten van LED-lichtspectrum op biomassa-productie, ontwikkeling en weerbaarheid van twee komkommer cultivars. Verrood licht (FR) werd toegevoegd aan of gegeven in plaats van de fotosynthetische fotonfluxdichtheid (PPFD), wat resulteerde in variërende totale fotonfluxdichtheidsniveaus (PFD). Cultivar-specifieke reacties werden waargenomen: stengel- en bladsteel-lengte namen consistent toe bij hogere FR-doses. Vruchtproductie daalde bij hogere FR-doses bij lagere PPFD, maar nam toe wanneer FR werd toegevoegd bovenop de PPFD. Bladfotosynthese verbeterde wanneer FR werd toegevoegd aan PPFD, maar niet in combinatie met verhoogd blauw en groen licht. FR verhoogde de weerstand tegen trips en beïnvloedde de vestiging van echte meeldauw. Genexpressieanalyse toonde veranderingen in genen voor weerbaarheid en flavonoïdesynthese. Deze resultaten onderstrepen de cruciale rol van LED-spectra in duurzame teeltsystemen.

Abstract

In horticulture, supplementary LED lighting is increasingly used to increase and optimize crop growth during winter and reduce energy costs compared to conventional lighting. However, practical application is not always energy-efficient due to limited understanding of plant light spectrum requirements. Light spectrum influences crop morphology, biomass production, assimilate distribution, and pest and disease resilience. This study investigated the effects of LED light spectra on biomass production, development, and resilience of two *Cucumis sativus* cultivars. Far-red light was added to or partially replaced photosynthetic photon flux density (PPFD), resulting in varying photon flux density (PFD) levels, in addition to a treatment partially replacing red light with blue and green LED light. Cultivar-specific responses were observed: stem- and petiole length consistently increased under higher FR doses. Fruit production decreased under higher FR at lower PPFD but increased when FR was added on top of the PPFD. Leaf photosynthesis improved when FR was added to PPFD but not in combination with increased blue and green light. FR increased resistance to thrips and influenced powdery mildew establishment. Gene expression analysis highlighted changes in resistance and flavonoid biosynthesis genes. These findings emphasize the critical role of LED spectra in sustainable greenhouse systems.

Rapportgegevens

Rapport WPR-1403

Projectnummer: 3742296300

DOI: [https://doi.org/ 10.18174/687363](https://doi.org/10.18174/687363)

Dit project is mede tot stand gekomen door de bijdragen van het ministerie van Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur en Glastuinbouw Nederland binnen het programma Kas als Energiebron, met daarbij een bijdrage in de lampen en de aansturing daarvan in het IDC LED van Signify.



KAS ALS
ENERGIEBRON



Disclaimer

© 2025 Wageningen, Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research, Businessunit Glastuinbouw

Postbus 20, 2665 MV Bleiswijk T 0317 48 56 06, wur.nl/plant-research

Kamer van Koophandel-nr.: 09098104 | BTW-nr.: NL 8113.83.696.B07

Stichting Wageningen Research. Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Stichting Wageningen Research. Stichting Wageningen Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen

Adresgegevens

Wageningen University & Research, Businessunit Glastuinbouw

Postbus 20, 2665 ZG Bleiswijk

Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk

T +31 (0)317 48 56 06

wur.nl/glastuinbouw

Postbus 644, 6700 AP Wageningen

Droevendaalsesteeg 1, 6708 PB Wageningen

T +31 (0)317 48 60 01

wur.nl/glastuinbouw

Inhoud

Samenvatting	5
1 Inleiding	7
1.1 Probleemstelling	7
1.2 Doelstellingen	8
1.3 Onderzoeksvragen	8
1.4 Leeswijzer	8
2 Onderzoeksfaciliteit: IDC LED HD	9
2.1 Inleiding	9
2.2 Kasinrichting	9
2.2.1 Kasdek en klimaatschermen	9
2.2.2 Koeling en bevochtiging	9
2.2.3 Sensoren	10
2.2.4 Watergift	10
2.2.5 Belichtingssysteem	10
2.2.6 Klimaatregeling	11
2.3 Testteelt	12
2.3.1 Inleiding	12
2.3.2 Materiaal en methoden	12
2.3.3 Metingen	13
2.3.4 Resultaten	13
2.4 Conclusies realisatie faciliteit	16
3 Onderzoek naar het optimale lichtspectrum op groei, productie en plantweerbaarheid in komkommer	17
3.1 Inleiding	17
3.2 Materiaal en methoden	19
3.2.1 Teelt en behandelingen	19
3.2.2 Lichtbehandelingen	19
3.2.3 Klimaatmetingen	20
3.2.4 Gewasmanagement	20
3.2.5 Plantmetingen	21
3.2.6 Lichtonderschepping	21
3.2.7 Fotosynthese	22
3.2.8 Bladpigmenten	22
3.2.9 Watergift en voedingsopname	22
3.2.10 Gewasgezondheid	24
3.3 Resultaten	24
3.3.1 Teelt	24
3.3.2 Licht en klimaat	25
3.3.3 Gewasgroei, -ontwikkeling en productie	28
3.3.4 Lichtonderschepping	38
3.3.5 Fotosynthese	39
3.3.6 Bladpigmenten	42
3.3.7 Watergift en voedingsopname	42
3.3.8 Gewasgezondheid	45

4	Effect van lichtspectra op genexpressie	46
4.1	Inleiding	46
4.2	Materiaal en methoden	47
4.3	Resultaten	49
4.3.1	Plantarchitectuur	49
4.3.2	Plantweerbaarheid	52
4.3.3	Assimilatenverdeling	53
4.4	Discussie en conclusies	54
5	Discussie en conclusies	55
	Literatuur	58
	Literatuur hoofdstuk 4	59
Bijlage 1	Watergift en voeding	60
Bijlage 2	Genexpressie	61

Samenvatting

LED belichting biedt de mogelijkheid om op een energiezuinige manier te belichten. In de afgelopen jaren is de belangstelling voor LED belichting sterk toegenomen. De hogere energie-efficiëntie van rond de 4.0 $\mu\text{mol/J}$, wat meer dan een verdubbeling is ten opzichte van SON-T, is het leidende argument om in LED te investeren. Daarnaast zijn er andere voordelen, zoals het snel en frequent kunnen in- en uitschakelen, dimmen, spectrale regelbaarheid en langere levensduur. Het project heeft als doel een efficiënt LED-lichtspectrum te ontwikkelen, de effecten op nutriëntenopname en gewasgezondheid te onderzoeken, en het elektriciteitsverbruik met 40% te verminderen ten opzichte van SON-T. Daarnaast wordt gekeken naar de invloed van verschillende lichtspectra op plantfysiologische processen zoals fotosynthese, verdamping en genexpressie.

Eerdere studies hebben aangetoond dat het gebruik van LED-verlichting, zelfs in combinatie met SON-T, niet de verwachte productieverhoging oplevert. Er is een duidelijke behoefte aan meer spectrumonderzoek voor hoog opgaande gewassen zoals komkommer. Het IDC LED-onderzoek heeft waardevolle inzichten opgeleverd, maar de vertaling van laboratoriumresultaten naar een volledige teelt is nog niet voldoende ontwikkeld. Er is dus nog weinig bekend over hoe het lichtspectrum invloed heeft op gewasopbouw, fotosynthese, verdamping en gewasgezondheid in een praktijkconforme teelt.

De doelstellingen van het project zijn het ontwikkelen van een optimaal lichtspectrum voor komkommers om de efficiëntie van LED-belichting te verhogen en om de effecten op nutriëntenopname en gewasgezondheid te onderzoeken. Er wordt ook gekeken naar het effect van lichtspectra op fotosynthese, verdamping en hormoonhuishouding van de plant. De energiedoelen omvatten een vermindering van het elektriciteitsverbruik met 40% door SON-T verlichting te vervangen door LED, evenals het verbeteren van de productie en energie-efficiëntie van de komkommerteelt.

Het project richt zich verder op het beantwoorden van vragen over het meest geschikte spectrum voor komkommer, de effecten van verschillende spectra op morfologie, fotosynthese en weerbaarheid tegen ziekten en plagen. Er wordt onderzocht of het verlagen van de R:FR (rood:verrood) verhouding de lichtonderschepping verbetert, wat de morfologie en de biomassaproductie zou kunnen verbeteren. Specifieke hypothesen worden getoetst om de effectiviteit van spectra met verhoogd verrood licht of de toevoeging van blauw en groen licht te bepalen.

Het onderzoek is gedaan in het IDC LED HD, een nieuwe kasfaciliteit met goten met apart regelbare LED plafonds, waar gestreefd werd naar een verhouding van 80% lamplicht en 20% zonlicht om zo een teelt onder winterse condities te realiseren. Dit is een nieuw ontwikkelde faciliteit die specifiek geschikt is voor hoge draadgewassen. In dit rapport staat de ontwikkeling van deze faciliteit beschreven.

Uit de resultaten blijkt dat de cultivars Hi Power en Dee Flexion positief reageren op een verhoogde verrood lichtbehandeling (Hoog FR2), wat resulteert in een hogere droge stofproductie, terwijl de toevoeging van blauw en groen licht geen significante voordelen biedt en de energie-efficiëntie verlaagt. De wateropname varieerde licht per behandeling, maar veranderingen in de opname van nutriënten waren niet significant. De resultaten tonen ook aan dat het lichtspectrum invloed heeft op de genexpressie, wat de plantmorfologie en secundaire metabolieten zoals flavonoiden beïnvloedt, wat mogelijk de weerbaarheid versterkt.

Het onderzoek heeft aangetoond dat het lichtspectrum een belangrijke rol speelt in zowel de fotosynthese als in de gewasgezondheid, waarbij variatie in het spectrum kan leiden tot betere of slechtere plantresultaten, afhankelijk van de verhouding van rood, verrood, blauw en groen licht. De onderzoeksfaciliteiten, uitgerust met geavanceerde technieken, hebben aangetoond dat het systeem geschikt is voor spectrum- en energie-efficiëntieonderzoek, en zijn essentieel voor het optimaliseren van de LED-belichting in de teelt van komkommers en andere gewassen.

1 Inleiding

1.1 Probleemstelling

In de afgelopen jaren is het elektriciteitsgebruik in de glastuinbouw toegenomen, door een toename van het areaal en de lichtintensiteit in de belichte teelten. Om een meer rendabele teelt mogelijk te maken, moet jaarrond een hoogwaardig product geleverd kunnen worden, waarvoor belichting onmisbaar is. Het gebruik van elektriciteit kan verlaagd worden door het toepassen van LED belichting. In de komkommersector zijn er een aantal telers met belichting die tegen verschillende problemen aanlopen zoals slechte bladkwaliteit, matige vruchtuigroei en abortie van de vruchten. Een van de onderliggende oorzaken is de suboptimale gewasopbouw met krullend blad, waardoor de lichtonderschepping afneemt. Al deze verschijnselen leiden uiteindelijk tot het achterblijven van de productie. Ook zijn er aanwijzingen dat de waterbalans een belangrijke rol speelt. Uit het onderzoek aan jonge planten in het IDC LED blijkt dat het lichtspectrum een grote invloed heeft op de gewasopbouw en verdamping.

Er is nog onvoldoende kennis opgedaan om de pijnpunten van de verschillende LED spectra vast te stellen en te komen tot een efficiënt LED licht spectrum voor komkommer. Het IDC LED heeft zeker zijn waarde al bewezen met betrekking tot spectrumonderzoek in verschillende gewassen, zoals roos, chrysant, alstroemeria en vruchtgroentegewassen in een jong plantstadium maar de stap naar een volledige teelt is nog te groot. Ook door de telers is aangegeven dat ze behoefte hebben aan spectrumonderzoek naar hoog-opgaande gewassen. Daarvoor zouden we een faciliteit nodig hebben waarin spectraal onderzoek in een hoge draadopstelling met producerende gewassen kan plaatsvinden waarbij de plantbalansen zo volledig mogelijk in kaart worden gebracht.

Dit project volgt op het project "LED licht bij zonlicht" waarbinnen onderzoek is gedaan naar het licht-spectrum bij komkommer (Dieleman, Carpineti, *et al.*, 2022). Voor beide rassen was de tendens hetzelfde, namelijk dat een breder spectrum met minder rood licht en meer verrood licht, zelfs bij gelijke flux en dus minder PAR licht met meer verrood, tot een hogere productie leidden.

De ervaring die er tot nu toe mee opgedaan is in de Winterlichtkas, laten zien dat de productie weliswaar acceptabel is maar onvoldoende om een duurzame komkommerteelt te kunnen realiseren.

Eveneens is in het project "De Groenste Komkommer" gevonden dat ook een combinatie van SON-T en LED niet de productie brengt die men zou verwachten op basis van de gegeven lichthoeveelheid (Marcal Balk *et al.*, 2020). Matige vrucht uitgroei is hieraan debet en mogelijk speelt de waterbalans van de plant, of het verloop van de waterbalans over het etmaal hierin een rol.

Telers die langer ervaring met telen onder LED hebben merken dat de productie fors achterblijft ten opzichte van de verwachting op basis van het geïnstalleerde vermogen. Ook liggen er vragen ten aanzien van de lichtverdeling in het gewas.

Tegelijkertijd leeft het vermoeden dat het lichtspectrum een grote invloed heeft op de hormoonbalans van de plant. Omdat daar weinig kennis over beschikbaar is zal er ook aandacht moeten komen om in kaart te brengen welke processen er worden beïnvloed en welke hormonen daarbij betrokken zijn.

Vanuit al deze onderzoeken en ervaringen blijkt dat belichten in komkommer een uitdaging is en er onvoldoende kennis aanwezig is om LED belichting te implementeren. De eerste stappen zijn gezet in het onderzoek, maar een integrale benadering gecombineerd met passende faciliteiten ontbreekt tot nu toe. In het optimale lichtspectrum moeten alle ingrediënten samen leiden tot een plant die in balans staat, of het nu om de assimilaten, water, voeding, plantweerbaarheid en hormoonhuishouding gaat. Al deze aspecten zijn van belang bij het komen tot een optimaal lichtspectrum in komkommer.

1.2 Doelstellingen

Technische doelstellingen

- Ontwikkeling van een optimaal lichtspectrum voor komkommer om de implementatie van LED belichting te bevorderen.
- Onderzoeken wat de effecten van LED belichting op nutriëntenopname en gewasgezondheid zijn.
- Bepalen hoe verschillende lichtspectra ingrijpen op plantfysiologische processen zoals fotosynthese, verdamping en genexpressie van genen betrokken bij assimilatenverdeling en hormoonhuishouding.

Energiedoelstellingen

- Afname van het elektriciteitsgebruik in een belichte komkommerteelt met 40% door SON-T te vervangen door LED belichting.
- Begrip van de assimilaten-, water- en voedingsbalans onder LED belichting, om zo implementatie van LED belichting (in komkommer) te verbeteren.
- Verhoging van de productie onder LED belichting.
- De onderzoeksfaciliteit is ook relevant voor spectrum- en energiebesparingsonderzoek in andere hoog opgaande gewassen zoals tomaat, aubergine en paprika.

1.3 Onderzoeksvragen

In dit project wordt kennis ontwikkeld over een komkommerteelt door integraal onderzoek en waarvan het uitgangspunt een optimale teelt is. Dit wordt uitgelegd als:

1. Integraal: laag in energieverbruik, de gebruikte energie wordt efficiënt benut, en er wordt geteeld met een minimale input aan gewasbeschermingsmiddelen. Omdat de spectrale effecten op de gewasgezondheid grotendeels onbekend zijn, wordt daar in dit project extra aandacht aan gegeven.
2. Optimaal: weinig energie gebruiken is niet altijd het meest efficiënt. Een gewas heeft altijd een minimale hoeveelheid energie nodig om de groene delen te vormen en te onderhouden. Wanneer er weinig extra energie wordt toegevoegd is er weinig energie beschikbaar om vruchten te vormen, die het doel zijn van de teelt. Er wordt weliswaar weinig energie verbruikt, maar de output is relatief zelfs lager dan wanneer er meer energie wordt gebruikt. Hetzelfde geldt voor een hoog energieverbruik. Dit betekent niet automatisch ook een hoge productie. Dit teeltdoel wordt alleen bereikt als het klimaat en het gewas optimaal worden afgestemd op de energie input.

Om een integraal optimale teelt te realiseren, moeten we de volgende vragen beantwoorden:

1. Wat is het meest geschikte spectrum voor komkommer?
 - a. We weten dat er verrood licht nodig is in het spectrum. Welke hoeveelheid is er nodig?
 - b. Welke spectrumafhankelijke morfologische en fysiologische effecten spelen een rol?
 - c. Een spectrum kan goed zijn voor biomassaproduktie, maar kan leiden tot een "ongezond" gewas wat niet weerbaar is tegen ziekten en plagen. Welke rol speelt het lichtspectrum hierin?
2. Wat is het effect van lichtspectrum op de opname van nutriënten?

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 1 wordt de probleemstelling omschreven, met de doelstellingen en onderzoeksvragen. In hoofdstuk 2 wordt de ontwikkeling en realisatie van de nieuwe Hoge Draad (HD) afdeling binnen het IDC LED beschreven (het Innovatie en Demonstratiecentrum voor LED toepassingen in de glastuinbouw). In hoofdstuk 3 wordt het onderzoek naar lichtspectra in komkommer beschreven wat in dit project is uitgevoerd. In hoofdstuk 4 wordt er dieper ingegaan op het onderzoek van de effecten van lichtspectra op genexpressie. Dit hoofdstuk staat meer op zichzelf gezien de complexiteit. Het rapport besluit met conclusies en aanbevelingen hoofdstuk 5.

2 Onderzoeksfaciliteit: IDC LED HD

2.1 Inleiding

Het doen van experimenten aan hoge draad gewassen vereist een andere aanpak dan die aan jonge groenteplanten of potplanten. De planten hebben een groeihoogte nodig van tenminste 3 meter. Om op schaal spectrale proeven te doen met dit planttype, zijn er vaak meerdere afdelingen nodig wat het onderzoek kostbaar maakt. Daarnaast blijkt vaak bij proeven in kleinere compartimenten, en/of proeven in afdelingen met tafels zoals de bestaande afdelingen binnen het IDC LED, dat de luchtvochtigheid moeilijk te sturen is omdat er vaak minder planten per bruto vierkante meter staan dan in de praktijk. Daarnaast is het van belang om onderzoek te kunnen doen onder winteromstandigheden gedurende het hele jaar. Hierdoor kan er jaarrond kennis gegenereerd worden waar dit anders alleen in het winterseizoen mogelijk is. Dit betekent dat het zonlicht, maar ook de bijbehorende warmtestraling voldoende goed geblokkeerd en gereguleerd moet worden om dit te kunnen realiseren.

Om te komen tot een goede proefopstelling voor hoge draad gewassen is er besloten om een nieuwe faciliteit te ontwikkelen die al deze aspecten goed vervult, het IDC LED Hoge Draad (HD). Het doel is om een kasafdeling van 144 m² in 4 vakken te verdelen met ieder een dynamisch stuurbaar LED belichtingssysteem inclusief alle benodigde sensoren om goed onderzoek te kunnen doen aan dynamische LED intensiteit en spectrum op hoge draad gewassen.

2.2 Kasinrichting

2.2.1 Kasdek en klimaatschermen

De basis voor de hoge draad afdeling binnen het Innovatie en Demonstratie Centrum (IDC) LED, is een kasafdeling van 144 m² (9.6 m bij 15 m). Deze afdeling heeft een breedte van één tralie met dubbele nok, doorlopende nokluchting en diffuus glas.

De afdeling is uitgerust met 3 schermdoeken: op het bovenste dradenbed ligt een Harmony 2315 O FR doek, en op het onderste dradenbed ligt een verduisteringsdoek Obscura 10070 FR WB+B, en een Harmony 4215 O FR doek, alle doeken zijn afkomstig van Ludvig Svensson, Zweden. De gevels zijn uitgerust met verduisteringsschermen.

De afdeling is in 4 gelijke vakken verdeeld van 4.8 m bij 6.5 m door middel van wit plastic.

2.2.2 Koeling en bevochtiging

Er is mogelijkheid om te koelen via een warmtewisselaar en 2 verdeelbuizen. De verdeelbuizen liggen onder de doeken en boven het lampenplafond, onder de nok. Per verdeelbuis is een koeler van 22 kW gemonteerd. Hierdoor heeft het systeem een koelcapaciteit van 300 W/m² bij een watertemperatuur van 9°C.

Naast het aanwezige hogedruk vernevelingssysteem, is er een additioneel bevochtigingssysteem gemonteerd; in winterse omstandigheden is er te weinig stralingsenergie om het vocht dat uit de hogedruk verneveling komt, voldoende snel te laten verdampen, waardoor het neerslaat op het gewas. Om dit te voorkomen zijn er 2 ultrasone bevochtigingssystemen geplaatst van het type DR/LBK 20L met elk een capaciteit van 20 kg/u.

Per compartiment wordt dit verdeeld via een eigen 110mm buis. Hierdoor kan het vochniveau naar wens gereguleerd worden.



Figuur 1 Achterkant van het compartiment met zicht op de 2 koelmachines; tussen de twee koelmachines zijn 2 ultrasoonbevochtigers gemonteerd.

2.2.3 Sensoren

In de kas worden per vak sensoren gemonteerd om klimaatfactoren te monitoren. Het gerealiseerde klimaat wordt gemeten met de geventileerde regel meetbox die in het midden van elk vak was geplaatst, dichtbij de kop van het gewas. Deze meetbox meet temperatuur, luchtvochtigheid en CO₂.

Naast deze meetboxen, die gepositioneerd zijn rond de kophoogte van het gewas, zijn er per vak ook drie 30 MHz geventileerde temperatuur/RV sensoren gemonteerd op verschillende hoogtes: onder de goot, in het midden van het gewas, en bij de kop van het gewas.

Om de lichthoeveelheid en kwaliteit te registreren, is er per vak een Apogee PAR/FAR sensor gemonteerd. Daarnaast zijn er per vak 2 Apogee SQ-301X-SS lijnsensoren gemonteerd om de verticale lichtonderschepping in het gewas te meten.

Tenslotte is er een Kipp & Zonen NR Lite2 nettostralingsmeter gemonteerd in het vak rechtsvoor (RV). Behalve de PAR/FAR sensoren zijn de licht- en stralingssensoren aangesloten op een datalogger.

2.2.4 Watergift

In ieder van de vakken wordt ook de watergift, drain, drain EC en pH en matgewicht gemonitord met behulp van een Hoogendoorn Aquabalance. Deze is geplaatst op goot 2 gezien vanaf de linkerkant.

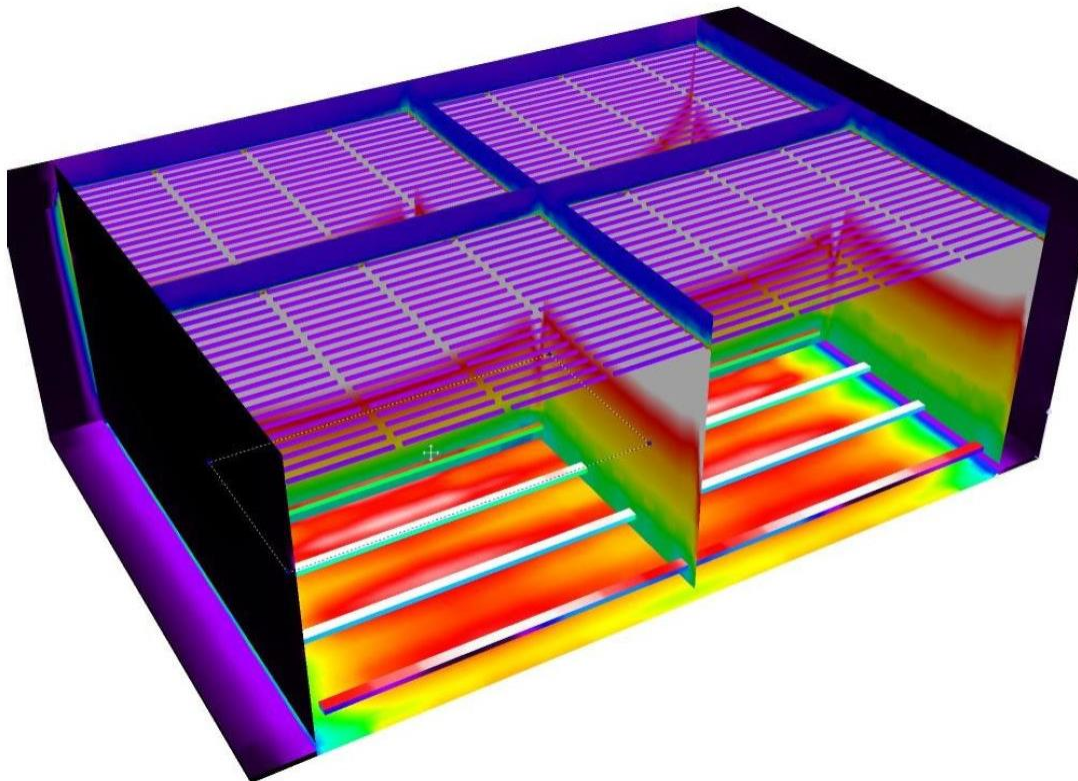
De afdeling heeft 1 watergeefstelsel met 4 kleppen zodat de 4 vakken verschillende hoeveelheden water met nutriënten kunnen krijgen, van hetzelfde recept.

2.2.5 Belichtingssysteem

In het IDC LED hoge draad is een lampenplafond gemonteerd met dynamische LED modules (Philips GreenPower LED productiemodule 3.0 C4). Deze modules zijn instelbaar in de kanalen blauw (piek bij 446 nm), wit (breed spectrum met hoog aandeel groen licht met piek emissie bij 571 nm), rood (660 nm) en verrood (729 nm). Het regelsysteem dat hier bij hoort (GrowWise Control System), maakt het mogelijk op afstand het lichtspectrum in te stellen. De lampen hangen ca. 1.70 meter boven de. Om lichtvervuiling tussen de behandelingen te voorkomen zijn de compartiment van elkaar gescheiden met wit folie.

De vakken bestaan uit 4 rijen met 19 modules (Figuur 2). In elk vak, staan de binnenste 2 rijen modules gedimd op 88% van het vermogen, zodat er geen "bergverdeling" ontstaat in het vak met een piek in het midden.

De homogeniteit van het belichtingssysteem is 0.61 (min/max) op 1 meter onder de modules. Wanneer de randen daarvan niet worden meegerekend (0.9 meter per kant over de lengte, 0.25 meter per kant over de breedte), is de homogeniteit 0.86 bij een gemiddelde intensiteit van $336 \text{ micromol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.



Figuur 2 3D tekening van het compartiment met vier afzonderlijk regelbare lampenplafonds.

2.2.6 Klimaatregeling

Het klimaat wordt geregeld door een ISII-klimaatcomputer (Hoogendoorn). Per vak hangt er een meetbox, en er wordt gestuurd op het gemiddelde van de 4 meetboxen. Bij de experimenten in dit project is het uitgangspunt een belichte teelt onder winterse condities, waarbij ongeveer 80% van het licht dat de planten krijgen afkomstig is van de lampen en ongeveer 20% van de zon. Om dit te realiseren, zijn waar nodig de koelinstallatie en de schermen gebruikt. Er wordt zuivere CO_2 gedoseerd als de lampen branden, waarbij de ingestelde concentratie verschilt per teelt.

De hoeveelheid zonlicht wordt gereguleerd door de zonweringsdoeken te sluiten boven een bepaalde instraling, die afhankelijk is van het gewenste zonlichtniveau. De hoeveelheid inkomend zonlicht wordt gemeten onder het lichtplafond PAR-FAR punt sensor en een lijnsensor (Zie 2.2.3). Bij elk experiment wordt de gerealiseerde hoeveelheid zonlicht berekend door de buitenstraling te vermenigvuldigen met de transmissie gemeten onder het lampenplafond. Hetzelfde wordt gedaan voor de hoeveelheid gegeven LED licht wat ook uitdooft afhankelijk van de lamp-plantafstand waarbij het referentiepunt een lamp-plantafstand van 100 cm is.

2.3 Testteelt

2.3.1 Inleiding

Om te onderzoeken of de faciliteit functioneert zoals verwacht, is er een testteelt uitgevoerd met komkommer. Het doel van deze testteelt is om te onderzoeken of bij gelijke instellingen tussen de vakken, de biomassa productie gelijk is tussen de 4 vakken.

Technische onderzoeksvragen:

1. Er is geen verschil in het gerealiseerde klimaat tussen de 4 vakken.
2. Het lichtniveau is bij gelijke instelling gelijk tussen de 4 vakken.
3. De watergift (hoeveelheid en samenstelling) is vergelijkbaar tussen de 4 vakken.

Gewasonderzoeksvragen:

1. Er is geen verschil in biomassaproductie en ontwikkeling tussen de 4 vakken.
2. Er is geen verschil in wateropname tussen de 4 vakken.

2.3.2 Materiaal en methoden

2.3.2.1 Teelt en behandelingen

Gewas	Komkommer
Rassen	Proloog (Rijk Zwaan)
Zaaidatum	20 Augustus 2020
Plantdatum (start experiment)	9 September 2020
Plantdichtheid	2.5 planten/m ² , meetvelden 2.5 planten/m ² , randrijen 1.6 planten/m ²
Teeltstrategie	In ieder vak van 31 m ² werden komkommerplanten van de twee genotypes geplant op 4 goten van 6.5 m lengte. Op de randrijen stonden 13 planten, en op de middelste 2 meetgoten stonden 26 planten. Na planten zijn alle bloemen uit de onderste 4 oksels verwijderd. Wekelijks werd de vruchtsnoei strategie bepaald, waarbij de standaard strategie is dat om het oksel er een vrucht blijft zitten. De planten werden geteeld in een hoge draadsysteem en draaiden in een carroussel. Snoei van jong blad vond plaats aan de hand van lichtonderscheppingsmetingen. Er werd gestreefd naar een onderschepping van 85-90% waarbij gemiddeld 20-25 bladeren aan de plant werden gelaten. Alle zijscheuten werden verwijderd.
Substraat en watergift	Steenwol en druppelaars
Hoogte van het lampenplafond	4.25 m boven de grond.
Lichtintensiteit referentie	Gemiddeld 200 µmol/m ² /s PPFD vanuit LED (100 cm onder de lampen) Gemiddeld 228 µmol/m ² /s PFD vanuit LED
Lichtspectrum referentie	6%/10%/84% + 14% (B/G/R/FR) op basis van PPFD 5%/9%/74%/12% (B/G/R/FR) op basis van PFD
Fading	30 minuten bij in- en uitschakelen, 17.5 uur vollast belichting.
Lichtsom LED	12.6 mol/m ² /d PPFD 14.4 mol/m ² /d PFD
Streefwaarde zonlichtsom	3 mol/m ² /d PFD
Daglengte	00.00 – 09.00: LED 09.00 – 18.00: LED + zonlicht 18.00 – 00.00: donker
Lichtbehandelingen	Alle vakken hadden de hierboven beschreven behandeling.
Schermsstrategie	Donkerdoek: open in 3 stappen van 9:00-9:30 en sluit tussen 17:30-18:00 Zonweringsdoeken: sluiten bij 450 en 500 W/m ² globale straling
Einde experiment	2 November 2020

2.3.3 Metingen

Licht- en klimaatmetingen

Voor de start van het experiment is het LED licht ingesteld op 100 cm onder de lampen. Per behandeling zijn 7 metingen per goot gedaan, 28 in totaal. De LED licht metingen zijn gedaan met een spectrofotometer (JETI Specbos 1211UV, Jena, Duitsland).

Elk vak is uitgerust met een meetbox die de temperatuur, luchtvochtigheid en CO₂ concentratie meet en is verbonden met de Hoogendoorn ISII klimaatcomputer.

Plantmetingen

Er zijn wekelijks plantmetingen gedaan aan in totaal 20 planten per vak. Hiervan zijn 12 planten gesitueerd op de middelste 2 goten, en 8 planten verdeeld over de randgoten om een indicatie te krijgen van de homogeniteit van de gewasproductie over het vak.

De wekelijkse plantmetingen omvatten: plant lengte en het aantal bladeren.

Tijdens de teelt is alle geproduceerde biomassa gemeten van deze planten. Dit betekent dat bladeren die gesnoeid zijn, zijn geteld en gewogen. Daarnaast zijn alle vruchten gewogen.

Aan het einde van de teelt zijn deze planten uit de vakken gehaald en destructief gemeten. Hierbij zijn de volgende eigenschappen gemeten: plantlengte, aantal bladeren, aantal vruchten, vers- en drooggewichten van vruchten, stengel en blad en bladoppervlakte.

2.3.4 Resultaten

Verloop van de teelt

In de eerste week van de teelt werd de temperatuur niet gerealiseerd zoals ingesteld. De ingestelde temperatuur was 21.6°C terwijl de gerealiseerde temperatuur rond de 20.6°C lag, ongeveer een graad lager. Dit werd veroorzaakt door een te lage koeltemperatuur. De luchtvochtigheid werd wel correct gerealiseerd en was ingesteld op 80%.

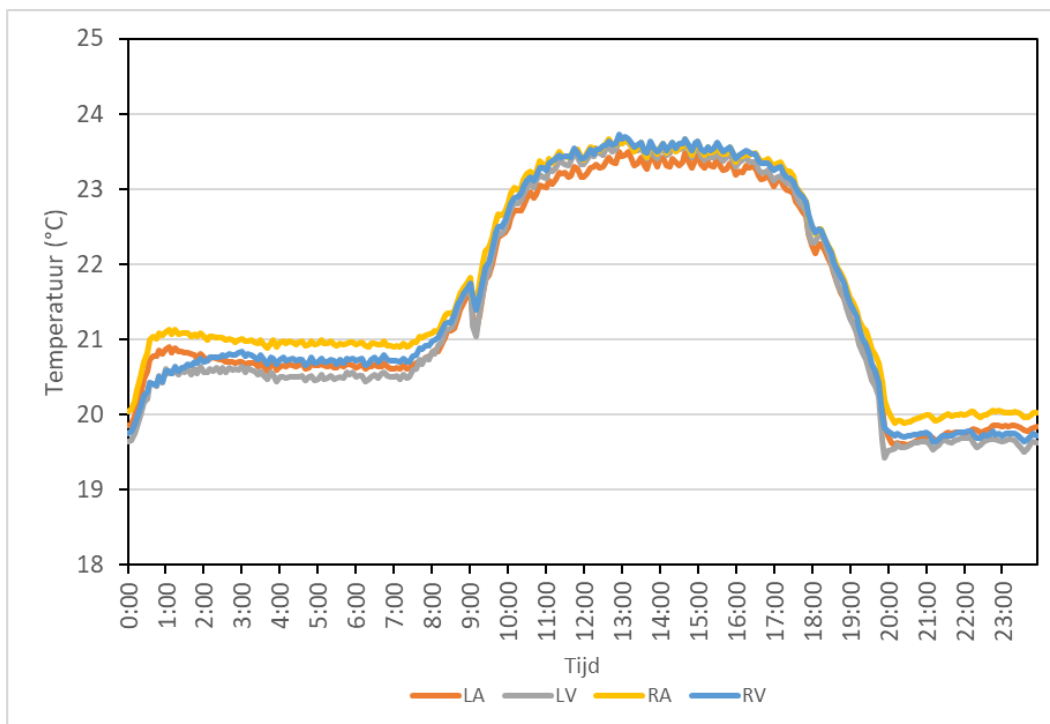
De regeling van de ultrasoon bevochtiging was onrustig. Dit leidde tot grote temperatuur- en vochtschommelingen. Deze regeling is tijdens de teelt beter afgesteld.

Gedurende de teelt nam de hoeveelheid zonlicht van buiten af. Hierop zijn steeds de schermdoekinstellingen aangepast. Er was gestart met een stralingsinvloed van 300W, deze is trapsgewijs verlaagd met inachtneming van de streefwaarde van de zonlichtsom.

Er is een keer een bestrijding tegen luis plaatsgevonden.

Klimaat

De gemiddelde gerealiseerde temperatuur was $21.6 \pm 0.1^\circ\text{C}$ (SD). In vak RA was de temperatuur het hoogst met 21.7°C. Dit was voornamelijk in de (belichte) nacht het geval (Figuur 3). In het vak LV was de temperatuur het laagst met 21.4°C. Het verschil tussen de hoogste en laagste gemiddelde temperatuur was 0.29°C. De dips rond 9:00 en 18:00 worden veroorzaakt door het openen/sluiten van het verduisteringsdoek. De sterkere stijging van de temperatuur tussen 0:00 en 1:00 in de vakken LA en RA is verklaard door het feit dat de verdeelleidingen zich ook in die vakken bevinden, waardoor er feitelijk een groter verwarmend oppervlakte aanwezig is. Deze buizen zijn na deze teelt geïsoleerd zodat deze minder warmte afgeven.



Figuur 3 Cyclisch gemiddelde etmaaltemperatuur over de teelt van de 4 vakken.

Licht

De belichting wordt ingesteld in het GrowWise Control System. Dit is gekalibreerd op het middelpunt van de vakken. Bij een instelling in GrowWise van 228 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ wordt er gemiddeld 230 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ gemeten op 1 meter onder de lampen, dus deze kalibratie is nauwkeurig.

Echter, dit is het middelpunt van het vak. Voor de experimenten is het van belang om de lichtintensiteit te weten van het gebied waar de (meet)planten groeien. Hiertoe is er binnen het vak op 28 punten gemeten.

Tabel 1 Gemiddelde LED lichtintensiteit (PPFD) gebaseerd op verschillende selecties van meetpunten. SD: standaarddeviatie.

	Vak				Gemiddeld	SD
	LA	LV	RA	RV		
Alle metingen	190	189	183	184	186	4
Zonder hoeken	198	197	192	192	195	3
Zonder randen	224	221	219	219	221	2

In Tabel 1 zijn de gemiddelden van de waarden in Figuur 4 samengevat. De verschillen tussen de vakken zijn klein (niet significant) en worden vooral bepaald door de metingen aan de rand van de vakken, waar de variatie het grootst is en een kleine beweging van de sensor in het horizontale vlak tot een groot verschil leidt. De standaarddeviatie neemt af wanneer de hoek- en randmetingen worden weggelaten. Het weglaten van metingen kan alleen worden gedaan wanneer op die plekken geen metingen aan planten worden gedaan.

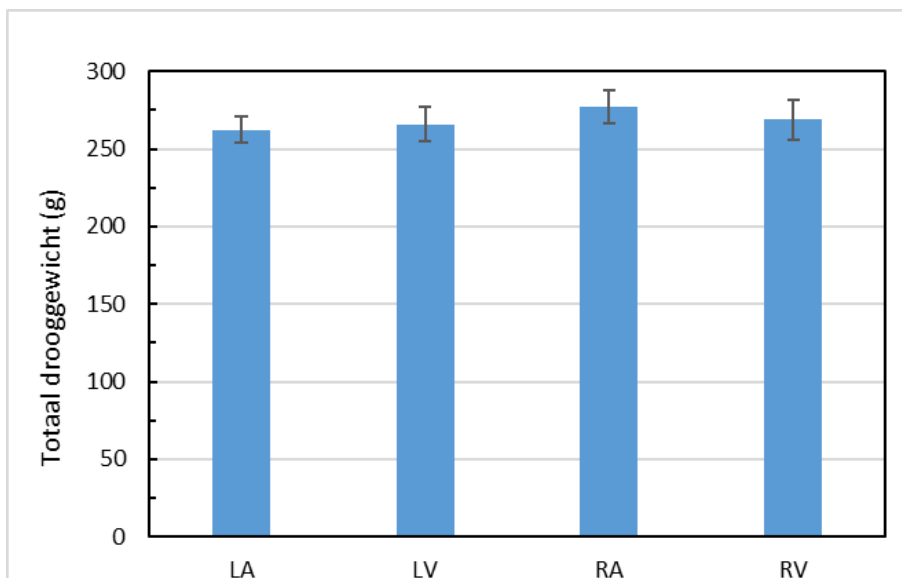
	0.15	1.65	3.15	4.65	0.15	1.65	3.15	4.65
6.25	117	146	172	142	94	124	145	126
5.25	168	220	226	166	165	214	216	177
4.25	180	222	224	186	170	221	218	173
3.25	177	217	LA 217	184	169	211	RA 212	176
2.25	180	222	227	191	173	226	217	179
1.25	182	228	232	192	178	232	226	181
0.25	151	202	182	158	155	202	202	131
6.25	130	162	187	141	139	177	168	125
5.25	181	228	226	185	178	226	225	168
4.25	179	223	224	183	177	223	220	169
3.25	178	214	LV 212	187	172	215	RV 209	166
2.25	184	222	218	189	173	222	216	161
1.25	179	222	216	184	173	221	215	171
0.25	135	173	178	161	144	182	174	146

Figuur 4 Plattegrond van de 4 vakken met de lichtmetingen (PFD) van 7 punten per teeltgoot. De getallen aan de linker- en bovenkant zijn afstanden in meters binnen de vakken.

Plantmetingen

Er zijn geen verschillen gevonden in vers- en drooggewicht van de planten tussen de verschillende vakken (Figuur 5). Ook in de overige gemeten parameters zijn geen verschillen gevonden, behalve in het aantal bladeren. Dit was hoger in vak RA en lager in vak LV. Gemiddeld zijn er 44.4 bladeren aangemaakt per plant. In vak RA was dit 46, terwijl dit in vak LV 42.8 was.

Wat randplanten betreft zien we 12% minder biomassaproductie, wat verklaard kan worden door de lagere lichtintensiteit in de randen.



Figuur 5 Gemiddeld totaal drooggewicht per plant in de 4 vakken ($p=0.804$). De foutbalken geven de standaardfout weer ($n=12$).

2.4 Conclusies realisatie faciliteit

In de voorgaande paragrafen is beschreven welke technieken er zijn toegepast in deze faciliteit, en hoe dit resulteert in een faciliteit waarbij goed belichtings- en spectrumonderzoek gedaan kan worden in hoge draad gewassen.

Het technisch functioneren van alle elementen is van groot belang. Daarom is het noodzakelijk om bij elke teelt alle apparatuur te controleren, en ook tijdens de teelt checks te doen aan de installaties en sensoren. Daarom is er een korte testteelt uitgevoerd om na te gaan of alles naar behoren werkt en ook ingesteld kan worden zodat het gewenste klimaat gerealiseerd kan worden in alle vakken.

Wat temperatuur betreft kan er opgemerkt worden dat het achterin de afdeling, met name rechtsachter, het warmst is. Dit houdt verband met de hogere warmte input door de warmteverdeling die achterin de afdeling plaatsvindt. Hierop is actie ondernomen door deze leidingen te isoleren, en ook delen van het groeibuisnetwerk te isoleren waardoor de warmteafgifte op die plekken omlaag gaat.

Wat het instellen van de LED lichtintensiteit betreft is er nauwkeurige realisatie van de setpoints mogelijk. Er moet wel rekening worden gehouden met het verschil tussen de ingestelde waarden en het gemiddelde over het vak.

Wat plantengroei betreft zien we goede homogene groei in alle planteigenschappen, uitgezonderd het aantal bladeren wat sterk beïnvloedt werd door de temperatuur. Dit benadrukt het belang van een goede monitoring van de luchttemperatuur.

3 Onderzoek naar het optimale lichtspectrum op groei, productie en plantweerbaarheid in komkommer

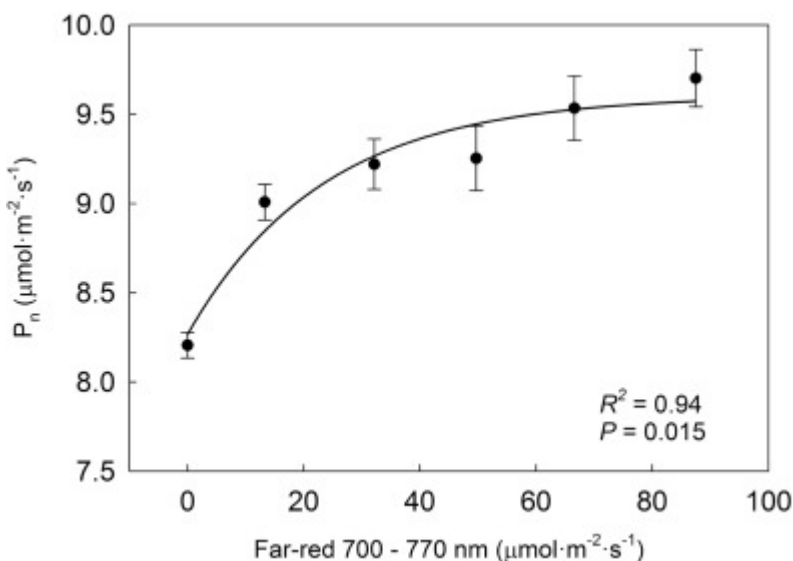
3.1 Inleiding

Op basis van eerder onderzoek zijn er een aantal spectra gevonden die leiden tot een goede vroege productie aan jonge planten (Dieleman, Carpineti, *et al.*, 2022). Met name verrood licht speelt een belangrijke rol in de morfologie van de plant en de conclusie was dat 10% verrood voldoende leek. De rood:verrood verhouding (R:FR), had een sterk effect te hebben op de lengte van de bladstelen, wat gevolgen heeft voor de morfologie. De planten met korte bladstelen onderscheppen minder licht, omdat de bladeren dichtbij de stengel gepositioneerd zijn waardoor er meer licht langs de plant valt.

Uit dit onderzoek blijkt dat het telen onder spectra met rood, blauw en groen licht, zonder verrood, leidt tot slechtere resultaten dan het telen onder spectra met verrood. Verrood blijkt dus noodzakelijk voor een goede biomassaproductie.

Naast de effecten van verrood licht op morfologie, heeft verrood ook invloed op de fotosynthese (Figuur 5). Getoond is een figuur van het effect van verrood op de fotosynthese bij sla, waarbij verrood intensiteiten tot $90 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ een effect heeft op de fotosynthese. De vraag is dus hoeveel verrood licht er noodzakelijk is voor een goede morfologie en in welke mate dit efficiënt is voor de fotosynthese in komkommer.

Uit eerder onderzoek bij komkommer blijkt dat toevoeging van meer verrood licht leidt tot meer productie, maar het is niet altijd duidelijk welke deel daarvan te verklaren is door de morfologie en fotosynthese (Dieleman, Weerheim, *et al.*, 2022).



Aan de andere kant leidt een spectrum wat meer de verhoudingen in het zonlicht benaderd tot een langgerekte plant met veel biomassa in het blad, wat ook niet gunstig is voor de lichtbenuttingsefficiëntie. Kortom, de hoeveelheden blauw, groen, rood en verrood licht zijn op basis van eerdere onderzoeken niet eenvoudig vast te stellen. Daarnaast is bekend dat de effecten van bijvoorbeeld blauw en verrood tegen elkaar inwerken wat betreft de morfologie. Hierdoor kan het zijn dat het verhogen van beide golflengten leidt tot dezelfde morfologie als een spectrum met lagere hoeveelheden blauw en verrood.

In aanvulling op de onderzoeksvragen in hoofdstuk 1.3, zijn de volgende onderzoeksvragen en hypothesen geformuleerd:

1. Kan de morfologie en biomassaproductie verbeterd worden door de R:FR verhouding te verlagen door rood licht te vervangen met verrood licht?
 - a. Hypothese 1a: de morfologie verbeterd wat leidt tot een hogere lichtonderschepping.
 - b. Hypothese 1b: de vervanging van rood met verrood licht gaat niet ten koste van de biomassaproductie.
 - c. Hypothese 1c: het netto resultaat van deze effecten is een hogere biomassaproductie.
2. Kan de biomassaproductie verhoogd worden door verlaging van de R:FR verhouding door toevoeging van verrood licht?
 - a. Hypothese 2a: de morfologie verbeterd wat leidt tot een hogere lichtonderschepping.
 - b. Hypothese 2b: de toevoeging van verrood licht leidt tot een hogere biomassaproductie door toename in fotosynthese.
 - c. Hypothese 2c: het netto resultaat van deze effecten is een hogere biomassaproductie.
3. Leidt een lagere R:FR verhouding in combinatie met een lagere R:G verhouding tot een hogere biomassaproductie en betere plantweerbaarheid tegen ziekten en plagen?
 - a. Hypothese 3a: de morfologie verbeterd wat leidt tot een hogere lichtonderschepping.
 - b. Hypothese 3b: de toevoeging van verrood licht leidt tot een hogere biomassaproductie.
 - c. Hypothese 3c: de toevoeging van blauw en groen licht leidt tot een lagere lichtonderschepping en biomassaproductie.
 - d. Hypothese 3d: het netto resultaat van deze effecten is gelijke biomassaproductie aan de referentie.
 - e. Hypothese 3e: de vervanging van rood door groen en blauw licht leidt tot een betere plantweerbaarheid.

3.2 Materiaal en methoden

3.2.1 Teelt en behandelingen

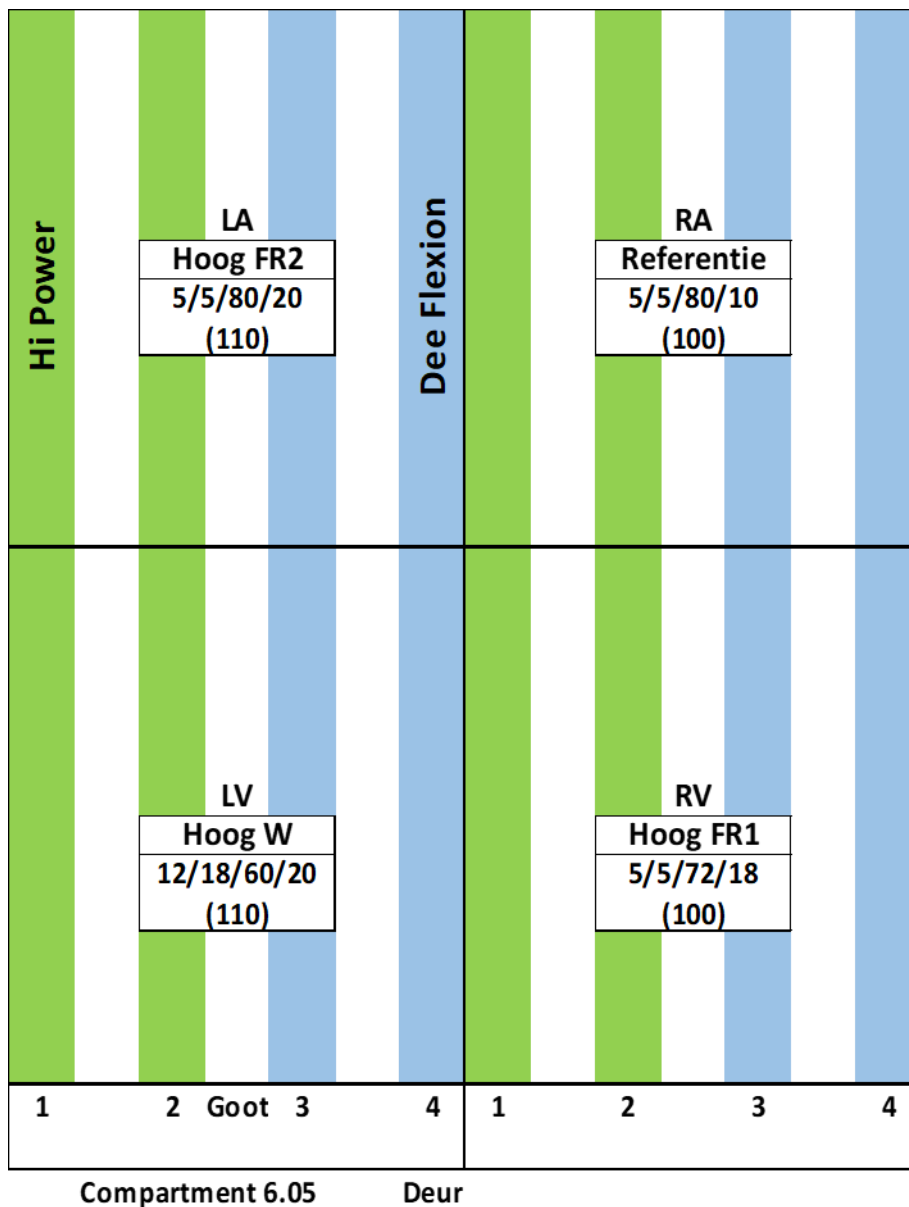
Gewas	Komkommer
Rassen	Hi Power (Nunhems) en Dee Flexion (Enza Zaden)
Zaaidatum	17 November 2021
Plantdatum (start experiment)	6 December 2021
Plantdichtheid	2.2 planten/m ² , meetvelden 2.5 planten/m ² , randrijen 1.6 planten/m ²
Teeltstrategie	In ieder vak van 31 m ² werden komkommerplanten van de twee genotypes geplant op elk 2 goten van 6.5 m lengte. Op de randrijen stonden 10 planten, en op de meetgoten stonden 24 planten. Na planten zijn alle bloemen uit de onderste 4 oksels verwijderd. Wekelijks werd de vruchtsnoei-strategie bepaald. De planten werden geteeld in een hoge draadsysteem en draaiden in een carroussel. Snoei van jong blad vond plaats aan de hand van lichtonderscheppingsmetingen. Er werd gestreefd naar een onderschepping van 85-90% waarbij gemiddeld 20-25 bladeren aan de plant werden gelaten. Alle zijscheuten werden verwijderd.
Substraat en watergift	Steenwol en druppelaars
Hoogte van het lampenplafond	4.25 m boven de vloer
Daglengte en belichtingsduur	00.00 – 09.00: LED 09.00 – 18.00: LED + zonlicht 18.00 – 00.00: donker
Lichtbehandelingen	Zie tabel hieronder
Lichtintensiteit	Zie tabel hieronder; de eerste 30 dagen van de teelt vond opbouw van het gewas plaats waarbij de gemiddelde intensiteit 137 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ was.
Temperatuurstellingen	Ingestelde dag/nacht/etmaal: 22.9/20.9/22.4°C
Vochtinstellingen	Vochtdeficiet dag/nacht/etmaal: 3.7/2.6/3.4 g/m ³
Schermsstrategie	Donkerdoek: open in 3 stappen van 9:00-9:30 en sluit tussen 17:30-18:00 Zonweringsdoeken: sluiten afhankelijk van globale straling met als doel ongeveer 20% zonlicht in de afdeling te realiseren.
Einde experiment	25 mei 2022

3.2.2 Lichtbehandelingen

Voor de start van het experiment is het LED licht ingesteld op 100 cm onder de lampen, en gemeten op 100, 200 en 300 cm onder de lampen. Per behandeling zijn 7 metingen per goot gedaan, 28 in totaal. Voor het vaststellen van de gemiddelde lichtintensiteit zijn de eerste en laatste 2 metingen op de randrijen niet meegenomen in de berekening. De LED licht metingen zijn gedaan met een spectrofotometer (JETI Specbos 1211UV, Jena, Duitsland). Het criterium was dat afwijkingen groter dan 2% niet werden geaccepteerd.

Tabel 2 Berekende spectrale samenstelling van de behandelingen.

Behandeling	Spectrale samenstelling (%)				Intensiteit		R:FR	PSS	Efficacy (2023) $\mu\text{mol}/\text{J}$
	B	G	R	FR	PPFD	PFD			
Referentie	5%	5%	80%	10%	200	222	8.0	0.86	3.5
Hoog FR 1	5%	5%	72%	18%	182	222	4.0	0.83	3.4
Hoog FR 2	5%	5%	72%	18%	200	244	4.0	0.83	3.4
Hoog W	11%	16%	55%	18%	200	244	3.0	0.82	3.1



Figuur 6 Schematisch overzicht van de afdeling met de lichtbehandelingen en locatie van de cultivars. Tussen haakjes staat het percentage aangeduid van de PFD t.o.v. de referentiebehandeling.

De transmissie van het zonlicht is eveneens bepaald op 100, 200 en 300 cm onder de lampen. Deze metingen zijn uitgevoerd op een bewolkte dag met 2 PAR sensoren. Een PAR sensor werd buiten geplaatst op een statief. De andere sensor werd door de paden van de afdeling bewogen met een constante loopsnelheid. Beide sensoren loggen simultaan het invallende licht met een frequentie van 1 meting per 2 s. Vervolgens wordt hiermee de transmissie berekend. In totaal is er op 1012 punten gemeten verdeeld over de 3 hoogtes.

3.2.3 Klimaatmetingen

Het kasklimaat is gemeten met de sensoren zoals omschreven in paragraaf 2.2.3.

3.2.4 Gewasmanagement

Planten werden ondersteund met een draad, en zijscheuten worden twee tot drie keer per week verwijderd. Het gewas werd geringd.

Het aantal nieuw gevormde bladeren per week is ongeveer 6-7, wat betekent dat er twee keer per week ongeveer 3-4 bladeren verwijderd worden. Dit hangt af van hoeveel jonge bladeren er per week uit de kop van de plant worden weggenomen.

De bladsnoei boven in het gewas wordt bepaald aan de hand van de gemeten lichtonderschepping. De bladsnoei onderaan het gewas hangt af van het aantal bladeren wat al eerder gesnoeid is in combinatie met de vruchtposities, aangezien er geen blad gesnoeid wordt waar de vrucht zit.

De eerste 4 oksels zijn gesnoeid tot 0 vruchten. De vijfde oksel bevat een vrucht, en daarna wordt om de oksel de vruchten verwijderd. De vruchtsnoei-strategie wordt wekelijks aangepast aan het aantal nieuw ontwikkelde bladeren, de vruchtontwikkelingssnelheid en de lichtbenuttingsefficiëntie (LBE).

3.2.5 Plantmetingen

Aan het begin van de proef werd een destructieve oogst gedaan aan 10 planten per ras, waarbij plantlengte, aantal bladeren, bladoppervlakte, vers- en drooggewicht van de plant gemeten werd.

Gedurende de teelt werden wekelijks plantmetingen gedaan aan 12 planten per behandeling en cultivar, in totaal 96 planten:

1. Plantlengte
2. Aantal nieuwe bladeren
3. Aantal bladeren boven de bloem
4. Aantal vruchten onder de bloem
5. Aantal bladeren verwijderd boven de bloem
6. Aantal gesnoeide bladeren
7. Gewicht bladschijf en bladsteel gesnoeide bladeren

De vruchten die in bloei waren van meetplanten werden tweemaal per week gelabeld.

Van de gesnoeide bladeren werd twee keer per maand de bladoppervlakte en het drooggewicht van de bladschijven en -stelen bepaald.

Er werd drie keer per week geoogst. De vruchten van de meetplanten werden apart geoogst, geteld en gewogen. De overige vruchten werden per behandeling en ras samengevoegd, geteld en gewogen. De datum op de gelabelde vruchten werd genoteerd en de ontwikkelingsduur werd op basis daarvan berekend.

De vruchten werden verdeeld in 3 klassen:

1. Goede vruchten, >300 gram
2. Kleine vruchten, <300 gram
3. Misvormde vruchten

Aan het einde van de teelt, op 24-25 mei werden de 12 meetplanten destructief gemeten:

1. Totale plantlengte
2. Aantal internodiën
3. Aantal bladeren aan de plant, bladoppervlakte
4. Lengte van de bladstelen van blad 14
5. Versgewicht en drooggewicht van bladstelen en bladschijven apart
6. Aantal vruchten aan de plant, versgewicht en drooggewicht

De data analyse van alle metingen gedaan aan planten, inclusief deze plantmetingen, is gedaan met behulp van een ANOVA met de lichtbehandelingen als factoren, per cultivar. Omdat er geen herhalingen zijn gebruikt, zijn de individuele meetplanten binnen de proefvakken als herhalingen beschouwd. Bij significante verschillen bij de ANOVA is de post-hoc test Tukey toegepast om de specifieke verschillen tussen de behandelingen te bepalen welke aangegeven worden met verschillende letters.

3.2.6 Lichtonderschepping

De lichtonderschepping van LED licht is drie keer gemeten tijdens het experiment, in de maand februari, maart en april. Dit is gedaan met de spectrale lijnsensor (Custom build diffusers met JETI Specbos 1211UV, Jena, Duitsland).

Deze meting is gedaan in 5 herhalingen per behandeling. Op 5 plekken zijn er 2 metingen gedaan tussen 2 planten boven en onder het gewas. Voor de analyse is een twee factor ANOVA toegepast waarbij tijdstip als blockfactor is meegenomen. Als post-hoc test is Tukey toegepast.

3.2.7 Fotosynthese

Fotosynthese werd gemeten met behulp van een draagbare fotosynthesemeter (Li-6800, LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA). Er is op twee manieren gemeten: met een transparante bladkamer van 9 cm² en met een gesloten kamer die een kunstmatige lichtbron bevat van 6 cm². Met de transparante kamer is er gemeten onder de toegepaste LED spectra en intensiteiten. Voor de lichtresponscurves genomen met de gesloten kamer werd een lichtbron gebruikt met 90% rood en 10% blauw licht.

Tabel 3 Instellingen waaronder de fotosynthesemetingen zijn uitgevoerd.

Instelparameter	Bladkamerwaarde	eenheid
Luchtstroomsnelheid	300	μmol s ⁻¹
Drukverschil meetkamer-buitenlucht	0	kPa
Relatieve luchtvochtigheid	75	%
CO ₂ concentratie	700	ppm
Luchttemperatuur	25	°C
Lichtintensiteit open kamer	lichtniveau behandeling	μmol m ² s ⁻¹
Lichtintensiteit licht response curves	1500-0	μmol m ² s ⁻¹

Tijdens de teelt zijn fotosynthesemetingen gedaan aan het bovenste volledig uitgestrekte blad van de planten. Er werden lichtresponscurves bepaald van 6 planten per behandeling (3 planten per tafel), in de behandelingen RB, RhB en RGB met behulp van een draagbare fotosynthesemeter (Li-6800, LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA) uitgerust met een bladkamer met een meetoppervlakte van 2 cm². Voor de lichtresponscurves werd een lichtbron gebruikt met 90% rood en 10% blauw licht, en een lichtreeks van 1250, 1000, 750, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 50 en 0 μmol/m²/s. De CO₂ concentratie in de bladkamer was 600 ppm, de bladtemperatuur was 23 °C en de VPD 0.8 kPa.

3.2.8 Bladpigmenten

Bladpigmenten (chlorofyl en flavonoïden) werden gemeten met behulp van een Multi Pigment Meter (MPM-100, ADC BioScientific Ltd., Verenigd Koninkrijk). In totaal werden bladeren van 10 planten van elke lichtbehandeling en beide cultivars gemeten. Er werd per blad op 2 plekken gemeten waarvan de gemiddelde waarde is berekend.

3.2.9 Watergift en voedingsopname

Watergift en drain data

Elk vak is voorzien van een Aquabalance (Hoogendoorn Growth Management, Nederland). De Aquabalance is een instrument dat continu het gewicht van de mat, EC, pH en het volume van het drainwater kan meten. Ook kan de Aquabalance de watergift aansturen op basis van een ingesteld drainpercentage. In dit experiment werd gestuurd op een drainpercentage van 30%. Wanneer op dag 1 de gewenste hoeveelheid drain niet werd bereikt, probeert de Aquabalance dit op dag 2 te compenseren. De Aquabalance kan het volume van de watergift verhogen of verlagen door de frequentie van de irrigatie aan te passen. De duur van elke beurt stond vast en was voor elk vak hetzelfde (2 minuten). Naast de metingen van de Aquabalance werd het volume van het toevoerwater van één druppelaar per vak opgevangen in een maatbeker en werd het volume dagelijks handmatig geregistreerd. Het drainwater dat uit elke Aquabalance kwam, werd ook opgevangen in een emmer met schaalverdeling en het volume werd ook dagelijks handmatig geregistreerd.

Waterbemonstering

Wekelijks werden watermonsters verzameld voor zowel gift als drain. Het monster voor de gift werd één keer per week op woensdag uit de voorraadtank genomen (1 voor alle 4 de vakken). In de vakken werd aan het einde van de dag (16.00 uur) om de twee dagen (vrijdag, maandag en woensdag) een submonster van drainwater uit elke emmer onder de Aquabalance verzameld met een spuit (60 ml). Aan het einde van de "bemonsteringsweek" (woensdag) werden de 3 deelmonsters samengevoegd in één monster dat naar een extern laboratorium (Eurofins) werd gestuurd voor de bepaling van de elementconcentratie.

Berekeningen

De wateropname (U_w , L/m²) werd als volgt berekend:

$$U_w = S - D$$

waarbij S en D respectievelijk de gift (L/m²) en de drain (L/m²) waren. Dezelfde berekening werd herhaald met de gegevens van de Aquabalance en met de handmatige meetgegevens.

De nutriëntenopnameconcentratie (U , mmol/l) wordt hier gedefinieerd als de hoeveelheid nutriënten die de planten in een bepaalde periode (U_n , mmol/m²) opnemen, uitgedrukt in relatie tot de wateropname van dezelfde periode (U_w , L/m²). Het werd als volgt berekend:

$$U = U_n / U_w$$

De opname van nutriënten (U_n , mmol/m²) werd berekend met twee methoden:

1. De uitputtingsmethode:

$$U_{n1} = \text{input (mmol/m}^2\text{)} - \text{rest (mmol/m}^2\text{)}.$$

In deze proef werd aangenomen dat de enige bron van toevoer van nutriënten de gegeven nutriëntenoplossing was, en daarom werd deze als volgt berekend:

$$\text{Input} = \text{giftconcentratie (mmol/l)} * \text{watergift volume (l/m}^2\text{)}.$$

In deze proef was de enige bron van restwater het drainwater, en daarom werd het als volgt berekend:

$$\text{Rest} = \text{drainconcentratie (mmol/l)} * \text{drain volume (l/m}^2\text{)}.$$

2. De drogestofmethode:

$$U_{n2} = \sum (\text{droge biomassa (kg/m}^2\text{)} * \text{biomassaconcentratie (mmol/kg)}).$$

De berekening hield rekening met de verschillende bijdrage van bladeren, vruchten en stengel en is per maand berekend.

Voedingsoplossing

Bij de start van de teelt werd het volgende recept gebruikt: pH 5,5, EC 3,0 ds/m, en respectievelijk voor NH₄, K, Ca, Mg, NO₃, S, P in mmol/l 1.1, 8.0, 5.5, 2.2, 18.8, 1.9, 1.9, en Fe, Mn, Zn, B, Cu, Mo in µmol/l 15.0, 10.0, 5.0, 25.0, 0.8, 0.5. De streef-EC voor het drainwater lag tussen de 3,0 en 3,5 ds/m.

Aanpassingen op de recepten zijn toegepast op basis van de aflezing van het drainwater en volgens de richtlijnen van Sonneveld en Voogt om de drainconcentraties dicht bij de streefwaarden te houden (Sonneveld & Voogt, 2009). Aangezien de gift op basis van vier drain analyses moest worden aangepast, werd er altijd een compromis gevonden in de samenstelling van het recept zodat het vak met de grootste afwijking van de streefwaarden het meest gecorrigeerd werd.

3.2.10 Gewasgezondheid

Tijdens de proef (week 9 van de teelt) zijn er bio-toetsen met bladponsjes uitgevoerd om de effecten van de verschillende lichtbehandelingen op ziekten en plagen te onderzoeken. Hiervoor zijn echte meeldauw als een obligaat biotroof, botrytis als een necrotroof en trips als plaaginsect gekozen. Voor elk biotoets zijn 10 planten per vak willekeurig gekozen. Van de top van de stengel, beginnend met het eerste geopende blad, werd van het 9de blad steeds 3 bladponsjes met een diameter van 5 cm genomen. De ponsjes werden in petrischalen met een bodemlaag van 1% wateragar gelegd om de ponsjes vers te houden. Vervolgens zijn de ponsjes elk met een concentratie van 10^5 sporen/ml meeldauw (*Podosphaera xanthii*), 10^6 sporen/ml botrytis (*Botrytis cinerea*) geïnoculeerd of met 5 adulte tripsen (*Frankliniella occidentalis*) geïnfecteerd. De petrischalen met de ponsjes werden in een klimaatkamer bewaard bij 20°C en 65% RV. Zes dagen na inoculatie werd de botrytisschade als diameter verbruining met behulp van een schuifmaat gemeten en 5 dagen na inzetten is de tripsschade visueel als doorschijnende zilverschade in mm² gemeten. De meeldauw infectie werd na 13 dagen als aantal meeldauw spots gemeten. Data zijn met een twee-factoriele ANOVA met cultivar en lichtbehandelingen als factoren geanalyseerd.

3.3 Resultaten

3.3.1 Teelt

In deze paragraaf wordt de teelt beschreven aan de hand van de planning en de zaken die opvielen tijdens vergaderingen van de begeleidingscommissie. De teelt werd begeleid door een tweewekelijkse begeleidingscommissie (BCO).

Bij het planten waren de planten 19 dagen oud en hadden de planten 3 bladeren en een lengte van 7.5 cm. De planten waren jonger dan in de praktijk gebruikelijk is, waardoor het langer duurt voordat de eerste vruchten geoogst kunnen worden. De teeltstrategie in de eerste weken van de teelt was dat het licht trapsgewijs werd opgebouwd van 7 mol/m²/d naar de maximale lichtsommen in de verschillende behandelingen, vanaf de eerste bloei tot een halve week voor volledige plantbelasting. Deze verhoging in DLI vond plaats bij een daglengte van 18 uur. De ingestelde temperatuur was 22.4°C, de streefwaarde voor het vochtdeficiet was 3.4 g/m³ of 80% RV.

De eerste oogst vond plaats op 32 dagen na planten, 2 dagen eerder dan verwacht. Rond dat moment zijn er een aantal aanpassingen gedaan aan het klimaat, waarbij de etmaaltemperatuur is verhoogd naar 22.8°C, en er met name met de groeibuis wordt gestookt i.p.v. het buisrail netwerk, omdat er temperatuurverschillen optraden. De groeibuis is ook lager gehangen, dichterbij de vruchten. Ook het voedingsrecept is aangepast naar een recept met een hoger kaliumgehalte. Streefwaarde voor de drain EC lag tussen 2.5 en 3.0 mS/cm.

Rond het tijdstip van 2 maanden viel het op dat de referentiebehandeling een slank gewas had met kleinere bladeren, waarbij de Hoog FR2 behandeling het meest vol oogde. De bladsnoeistrategie is aangepast omdat de lichtonderschepping erg hoog was. Er zaten 25-27 bladeren aan de plant terwijl er gestreefd wordt naar 20-22. Er was op dit moment sprake van meeldauwaantasting bij de cultivar Hi Power; Dee Flexion bleef vrij van meeldauwbesmetting. De strategie voor chemische bestrijding was om die pas toe te passen na het bemonsteren van blad voor de biotoetsen. In januari is tweemaal een behandeling van Karma toegepast op het ras Hi Power. In februari is de hele afdeling behandeld met Abir.



Figuur 7 Afbeelding van de voorste 2 behandelingen rond 1 week na planten: links behandeling Hoog W en rechts behandeling Hoog FR1.

De bladsnoei-strategie werpte zijn vruchten af begin maart, maar liet nog steeds een hoge lichtonderschepping zien in de behandeling Hoog FR2. Op dit moment werd ook de vruchtsnoei-strategie aangepast aan de ontwikkelingssnelheid en gerealiseerde productie. Er is nog een keer een behandeling met Abir toegepast bij Hi Power.

3.3.2 Licht en klimaat

De gerealiseerde lichtintensiteit en spectrum komen sterk overeen met de setpoints (Tabel 4).

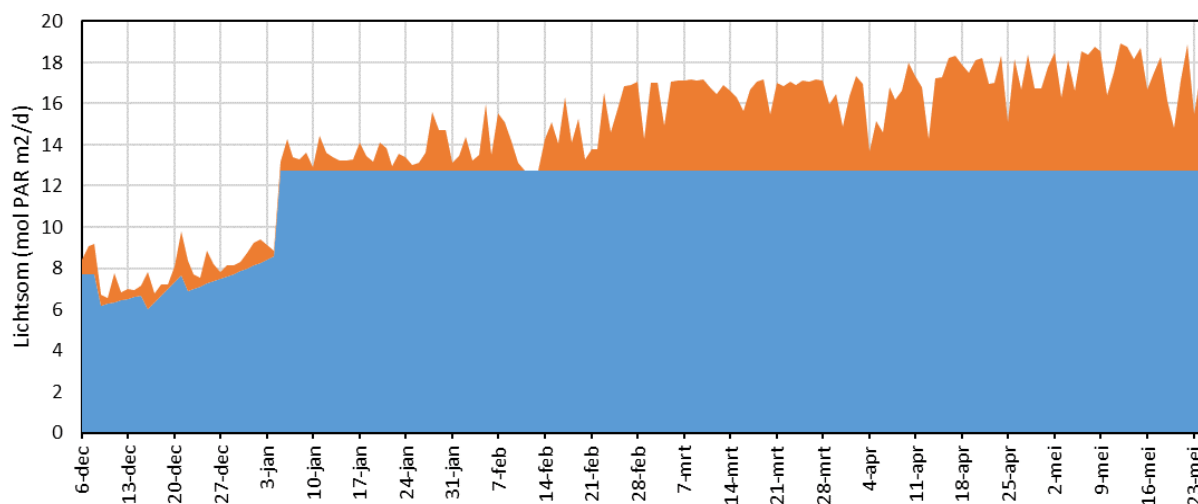
Tabel 4 Gerealiseerde lichtspectra en intensiteiten. De waarden in de twee rechterkolommen geven de afwijking aan ten opzichte van de setpoints.

Behandeling	Spectrale samenstelling (%)				Intensiteit		Intensiteit	
	B	G	R	FR	PPFD	PFD	PPFD	PFD
Referentie	5%	5%	80%	10%	198	220	101%	101%
Hoog FR 1	5%	5%	73%	18%	182	222	100%	100%
Hoog FR 2	5%	5%	73%	18%	205	249	98%	98%
Hoog W	11%	16%	55%	17%	203	246	98%	99%

Dit leidde tot slechts kleine verschillen in lichtsommen. Door de verschillen in PAR (PPFD) en PAR+FR (PFD) leidt dit tot evenredige verschillen in de totale lichtsommen (Tabel 5). In het begin van de teelt was er weinig zonlicht door de lage transmissie van zonlicht. Dit nam toe in het voorjaar. Over de gehele teelt was het aandeel zonlicht 17% (Figuur 8).

Tabel 5 Lichtsommen per behandeling zonder en met verrood in mol/m². Het verschil in procenten is berekend ten opzichte van de referentie lichtsommen.

Behandeling	Lichtsom (mol/m ²)		Verschil (%)	
	PAR	PAR+FR	PAR	PAR+FR
Referentie	2478	2836		
Hoog FR1	2276	2813	92%	99%
Hoog FR2	2500	3081	101%	109%
Hoog W	2486	3052	100%	108%



Figuur 8 Berekende lichtsom (PAR) door de tijd voor LED (blauw) en zonlicht (oranje).

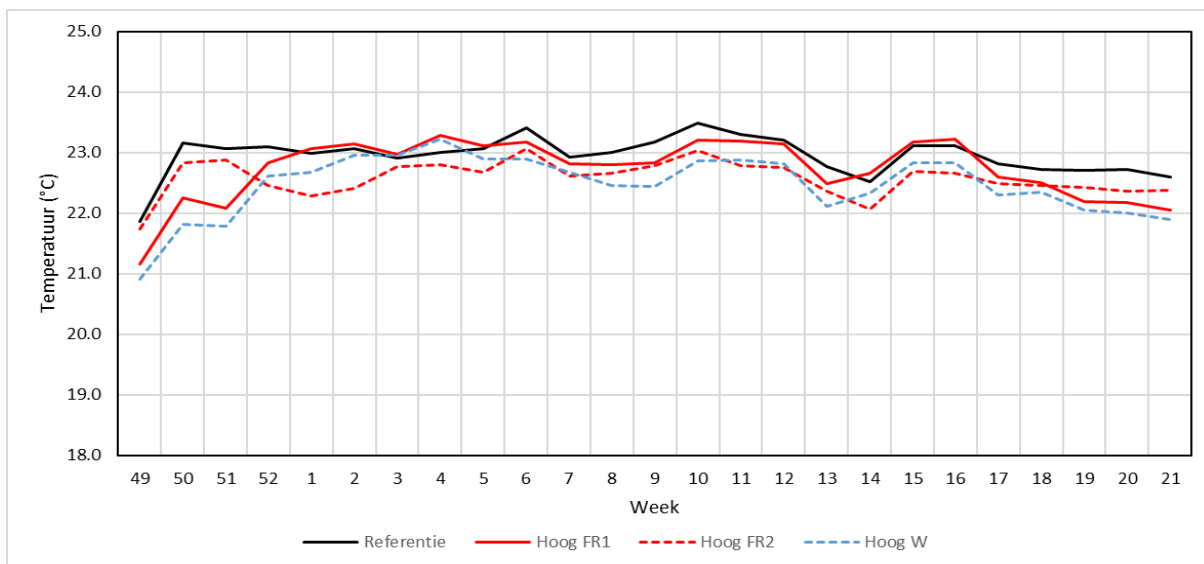
De gemiddelde temperatuur gedurende de teelt kan op meerdere manieren worden benaderd. Op basis van de meetboxen in elk vak, was de temperatuur gemiddeld 22.7°C (Tabel 6). Dit was in lijn met de ingestelde temperaturen, die tijdens de teelt aangepast zijn van 22.4°C naar 22.8°C. De draadloze sensoren gaven op dezelfde positie, in de top van het gewas, 0.4°C hoger aan dan de meetboxen. Dit heeft 2 oorzaken: de draadloze sensoren zijn 2 weken na de start van de teelt geplaatst, en in die eerste 2 weken was de temperatuur lager. Ten tweede zijn de meetboxen niet geventileerd waardoor ze een hogere temperatuur kunnen registreren.

In het begin van de teelt, in de weken 49-51, was de temperatuur lager in de voorste 2 vakken (Figuur 9); Dit betrof de behandelingen Hoog FR1 en Hoog W en werd veroorzaakt door onvolledige isolatie van de afdeling, die aangepast is na week 51.

Tabel 6 Gerealiseerde gemiddelde temperaturen gemeten met de meetbox, en op verschillende hoogtes in het gewas met draadloze sensoren waarover ook de gemiddelde temperatuur is berekend.

Behandeling	Meetbox		Draadloze sensoren		
	Top	Top	Midden	Onder	Gemiddeld
Referentie	23.0	23.4	22.4	22.9*	22.9
Hoog FR1	22.7	23.0	22.5	22.3	22.6
Hoog FR2	22.6	23.2	22.7	22.3	22.8
Hoog W	22.5	22.8	22.4	22.2	22.4
Gemiddeld	22.7	23.1	22.5	22.4	22.7

*) Missende data waardoor de temperatuur niet een-op-een vergelijkbaar is met de andere behandelingen.



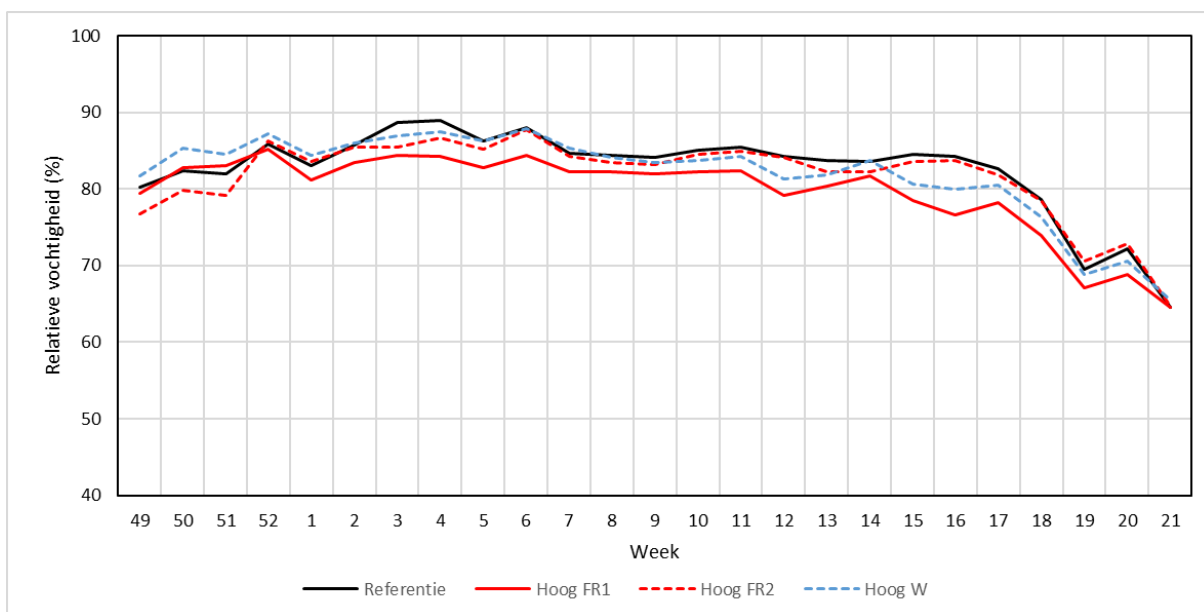
Figuur 9 Weekgemiddelden van etmaaltemperatuur in de verschillende behandelingen.

Het gemiddelde vochtdeficiet was 3.8 g/m^3 , ofwel 81.9% relatieve vochtigheid (RV)(Figuur 10,Tabel 7). Dit is in lijn met de ingestelde setpoints gedurende het experiment. Ook hier geldt dat de draadloze sensoren andere gemiddelden hebben omdat ze later zijn geplaatst en ongeventileerd zijn, waardoor de gemeten temperatuur hoger is. Wat ook opvalt is dat de meetbox en de draadloze sensor een hoger vochtdeficiet registreerde in behandeling Hoog FR1.

Tabel 7 Gerealiseerde gemiddelde vochtdeficiet (g/m^3) gemeten met de meetbox, en op verschillende hoogtes in het gewas met draadloze sensoren waarover het gemiddelde vochtdeficiet is berekend.

Behandeling	Meetbox		Draadloze sensoren		
	Top	Top	Midden	Onder	Gemiddeld
Referentie	3.6	4.1	3.4	3.2*	3.6
Hoog FR1	4.2	4.4	3.7	3.6	3.9
Hoog FR2	3.7	4.0	3.4	3.4	3.6
Hoog W	3.7	4.1	3.6	3.6	3.8
Gemiddeld	3.8	4.1	3.5	3.5	3.7

*) Missende data waardoor het vochtdeficiet niet een-op-een vergelijkbaar is met de andere behandelingen.

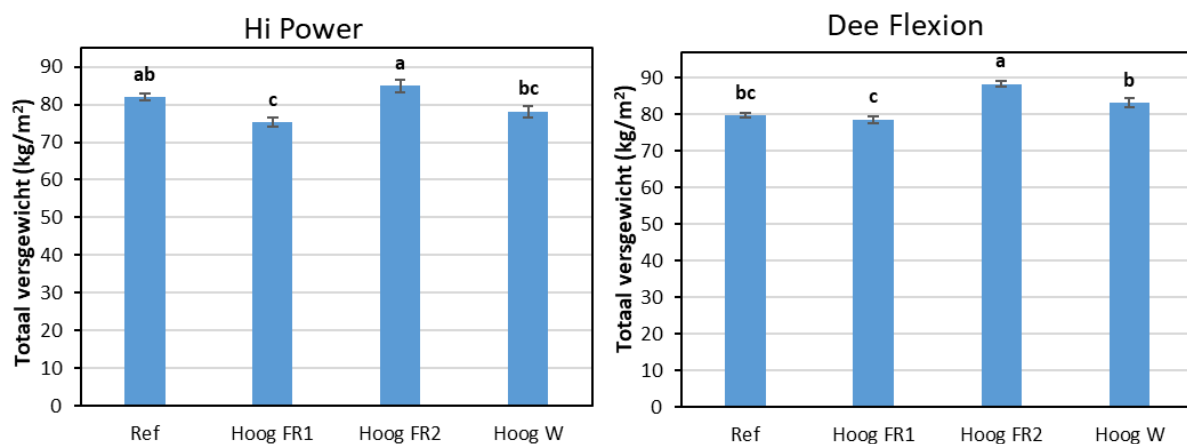


Figuur 10 Weekgemiddelden van luchtvochtigheid in de verschillende behandelingen.

3.3.3 Gewasgroei, -ontwikkeling en productie

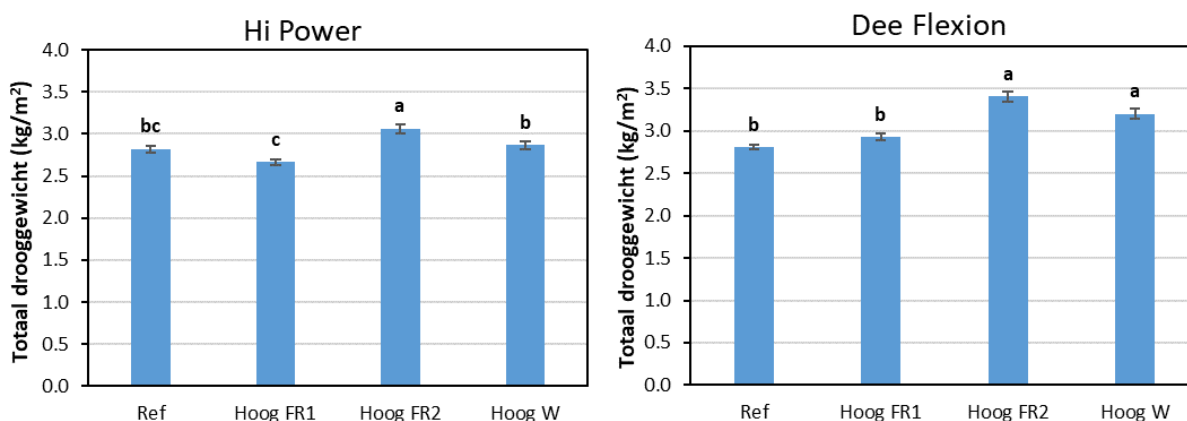
3.3.3.1 Gewasgroei en ontwikkeling

Planten van cultivar Hi Power in behandeling Hoog FR1 hadden aan het einde van het experiment de laagste totale biomassaproductie in versgewicht van 75.3 kg/m² (Figuur 11) ($p < 0.001$). Dit is de optelsom van alle bladeren en vruchten die gesnoeid dan wel geoogst zijn tijdens de teelt, in combinatie met de bladeren, vruchten en stengel die zijn gemeten aan het einde van de teelt. De referentie en Hoog FR2 waren niet significant verschillend, waarbij de biomassaproductie van de behandeling Hoog FR2 het hoogst was met 85 kg/m². De biomassaproductie in behandeling Hoog W was significant lager dan in behandeling Hoog FR2. Bij Dee Flexion laten de resultaten een vergelijkbaar patroon zien met een aantal duidelijke verschillen. De enige behandeling die hier afwijkt van de referentie is Hoog FR2, met een significant hogere biomassa dan alle behandelingen van 88.4 kg/m².



Figuur 11 Totaal geproduceerde biomassa in versgewicht (kg/m²). Links cultivar Hi Power, rechts Dee Flexion. Voor alle resultaten geldt: $n=12$, de foutbalken geven de standaardfout weer.

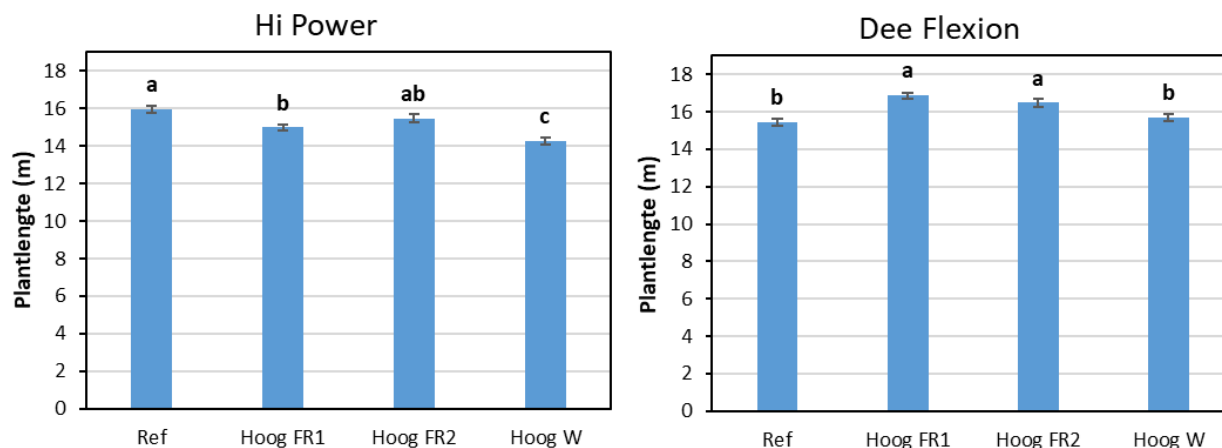
Wat het drooggewicht betreft werden er significante verschillen gevonden tussen de referentiebehandeling Hoog FR1 en Hoog FR2 behandelingen bij Hi Power (Figuur 12) ($p < 0.001$). Hoog FR1 had een 6% lagere hoeveelheid droge stof ten opzichte van de referentie, terwijl er een toename van 9% werd gevonden voor Hoog FR2. Voor Dee Flexion is er een duidelijk verschil tussen de Hoog FR2, Hoog W en de andere behandelingen. Daar is het verschil tussen de referentie en Hoog FR2 behandeling 21%, een toename van 2.8 naar 3.4 kg/m². Ook de Hoog W behandeling liet een toename zien van 14% ten opzichte van de referentiebehandeling. De Hoog FR1 behandeling had geen afname zoals bij Hi Power, en had een vergelijkbare droge stof productie met de referentie.



Figuur 12 Totaal geproduceerde biomassa in drooggewicht (kg/m²). Links cultivar Hi Power, rechts Dee Flexion.

De uiteindelijke plantlengte lag tussen de 14 en 17 meter (Figuur 13). De cultivars laten daarbij verschillende trends zien; bij Hi Power is er geen toename in plantlengte met een hoger aandeel of hogere dosis verrood licht; De Hoog FR1 en Hoog W behandelingen hadden significant minder lengtegroei dan de referentie ($p < 0.001$).

Bij Dee Flexion is de plantlengte toegenomen ten opzichte van de referentie in de behandelingen Hoog FR1 en Hoog FR2, terwijl bij Hoog W een vergelijkbare lengtegroei was als bij de referentie.



Figuur 13 Totale plantlengte aan het einde van de teelt.

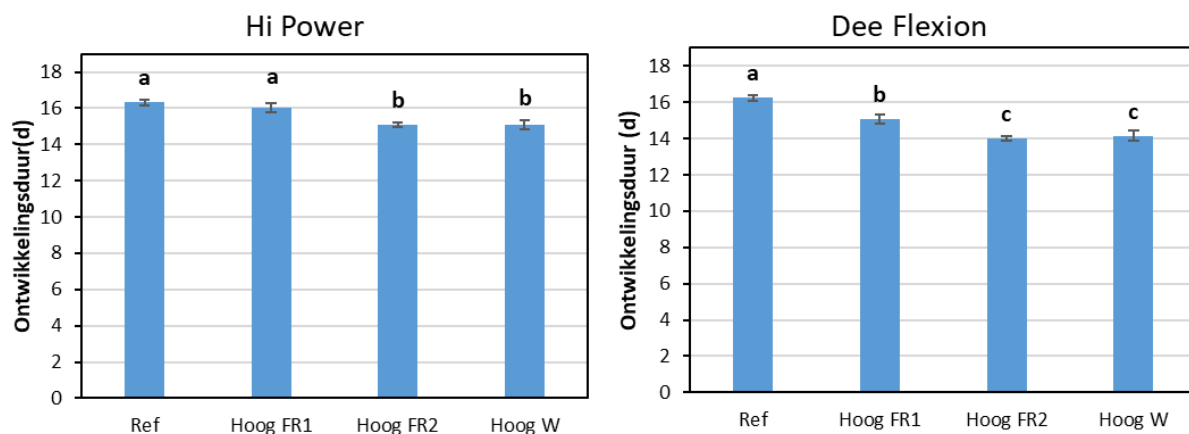


Figuur 14 Planten van Hi Power aan het einde van de teelt; van links naar rechts: Referentie, Hoog FR1, Hoog FR2 en Hoog W.



Figuur 15 Planten van Dee Flexion aan het einde van de teelt; van links naar rechts: Referentie, Hoog FR1, Hoog FR2 en Hoog W.

Wat ontwikkelingsduur van de vruchten betreft is er een vergelijkbare trend waargenomen tussen de cultivars; De ontwikkelingsduur is korter voor de behandelingen Hoog FR2 en Hoog W ten opzichte van de referentie, voor beide cultivars (Figuur 16). Dit betekent dat de vruchten sneller het gewenste oogstgewicht bereiken. De ontwikkelingsduur is sterker afgenomen bij Dee Flexion, waar de ontwikkelingsduur afnam met 2 dagen van 16 dagen naar 14 dagen ($p < 0.001$). Bij Hi Power scheelde dit ongeveer 1 dag met de referentie en de Hoog FR2 en Hoog W behandelingen. Bij Dee Flexion laat ook behandeling Hoog FR1 een daling in ontwikkelingsduur zien met 1 dag.

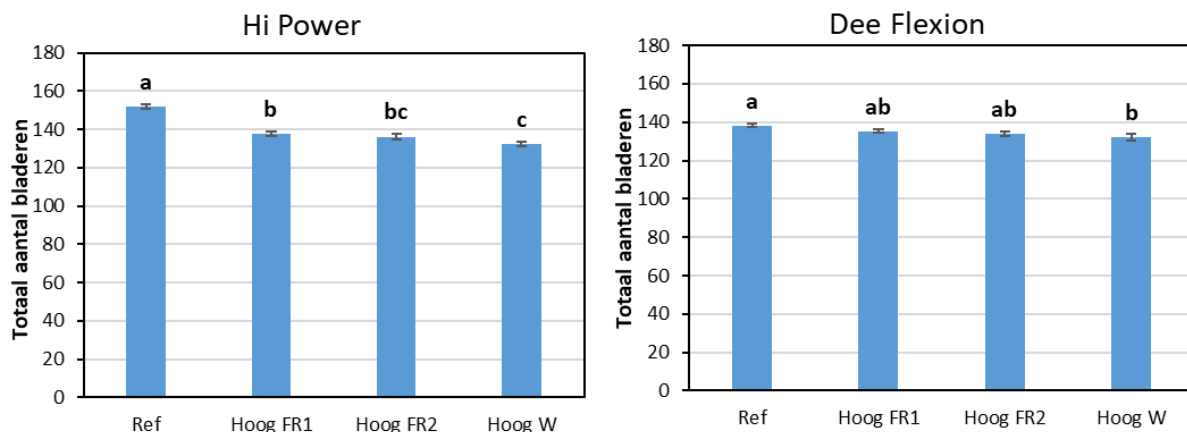


Figuur 16 Gemiddelde ontwikkelingsduur in dagen van bloei tot oogst van de vruchten gemeten gedurende de teelt.

De bladoppervlakte van komkommerplanten varieert gedurende de teelt. In dit onderzoek is er voor gekozen om de LAI als maatstaf te nemen over de hele teelt. Dit betekent dat alle gesnoeide bladeren zijn gemeten, en opgeteld zijn bij het gewas wat aan het einde van de teelt destructief gemeten is. Deze bladoppervlakte is vervolgens uitgedrukt als LAI ($\text{m}^2 \text{blad} / \text{m}^2 \text{vloeroppervlakte}$) (Figuur 18).

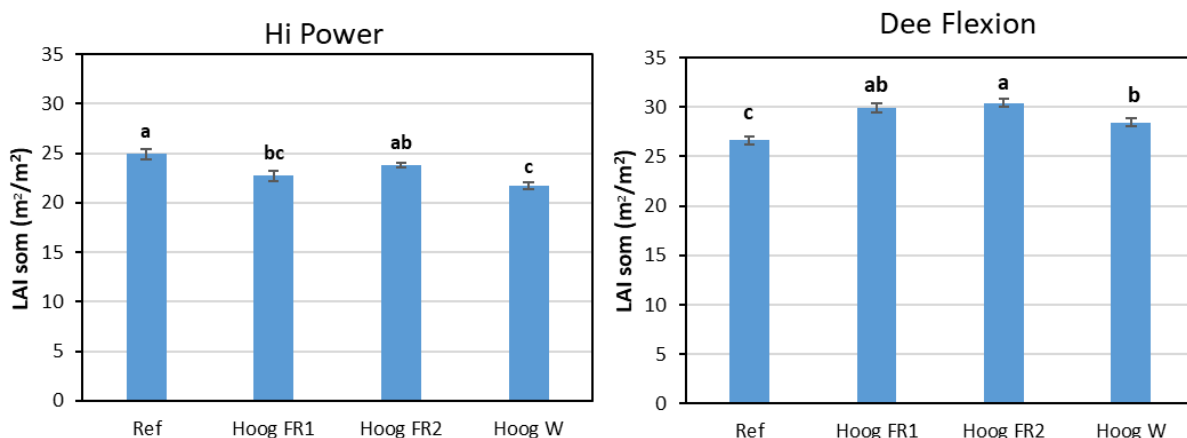
Er zijn verschillen zichtbaar tussen de cultivars. Het totaal geproduceerde bladoppervlakte is lager in de Hoog FR1 en Hoog W behandelingen bij Hi Power ($p < 0.001$). Bij Dee Flexion zien we een andere trend. Daar hadden alle behandelingen met een hoger aandeel verrood een hoger bladoppervlakte ($p < 0.001$). Dit resultaat is niet geheel door de behandelingen wordt bepaald. Tijdens de teelt is het bladsnoei beleid aangepast aan de lichtonderschepping, om die zo constant mogelijk te houden.

Het totaal aantal geproduceerde bladeren verschilde tussen de behandelingen bij beide cultivars (Figuur 17). Bij Hi Power hebben alle behandelingen met meer verrood licht minder bladeren aangelegd dan de referentiebehandeling ($p < 0.001$). Bij Dee Flexion is dit verschil minder groot, en laat alleen de Hoog W behandeling een significante afname in aantal bladeren zien ten opzichte van de referentie ($p = 0.024$).



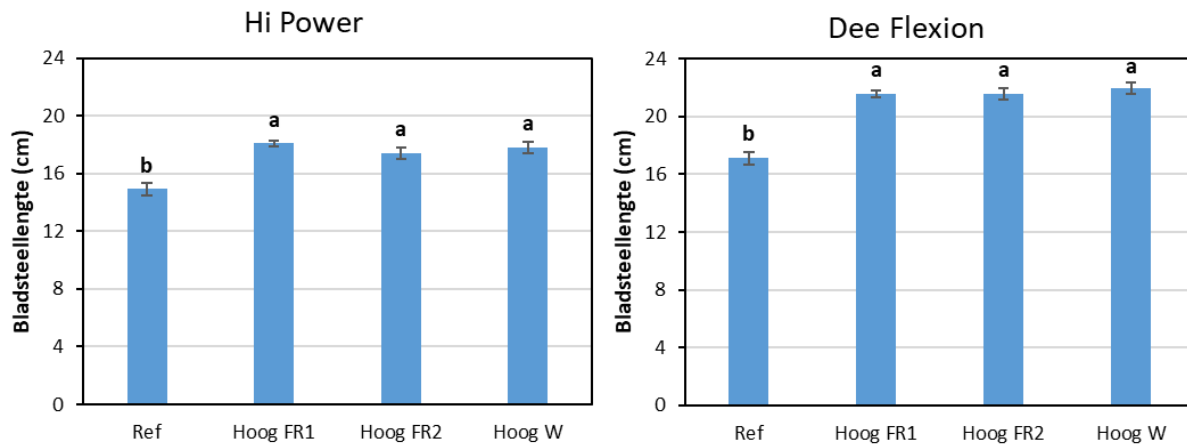
Figuur 17 Totaal aantal bladeren per plant geproduceerd gedurende het experiment vanaf het moment van planten.

Naast het bladoppervlakte en het aantal bladeren, welke door bladsnoei wordt beïnvloedt, speelt ook de bladsteellengte een rol in de morfologie van het gewas. De bladstelen zijn langer bij Dee Flexion dan bij Hi Power. De bladsteellengte wordt sterk beïnvloedt door de hoeveelheid verrood licht (Figuur 19). Hoewel de lengte verschilt tussen de cultivars, is de trend vergelijkbaar; de bladsteellengte nam toe tot 21% bij Hi Power en 28% bij Dee Flexion ($p < 0.001$). Dit scheelde respectievelijk 3.2-4.8 cm.

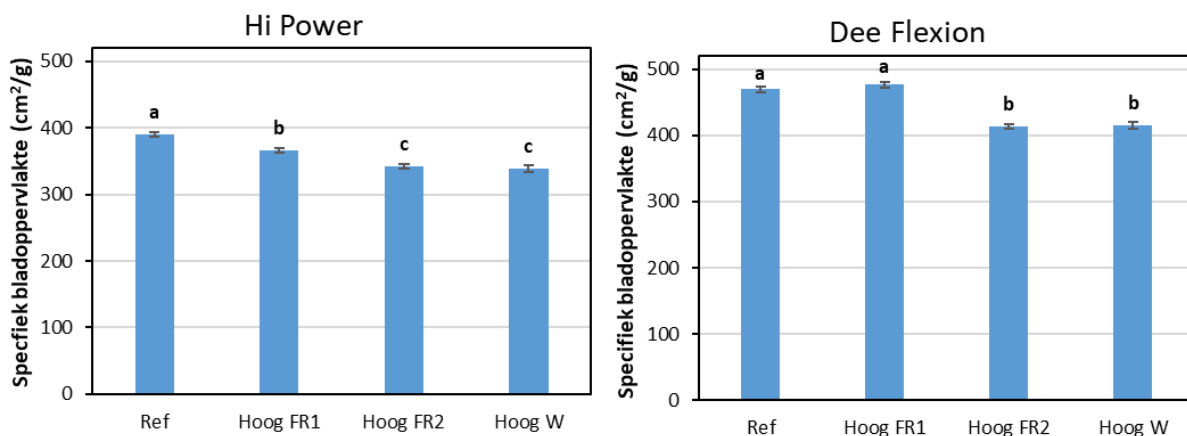


Figuur 18 Totale LAI berekend op basis van de bladoppervlakte van alle gesnoeide bladeren en de bladoppervlakte aan de plant aan het einde van de teelt.

Het specifieke bladoppervlakte (SLA) is de hoeveelheid geproduceerde bladoppervlakte uitgedrukt per eenheid drooggewicht (cm^2/g). In dit onderzoek is dit bepaald aan de bladeren die gesnoeid zijn gedurende de teelt, en van alle bladeren aan de plant aan het einde van de teelt. Voor beide cultivars zien we dat de SLA afneemt bij Hoog FR2 en Hoog W ten opzichte van de referentie (Figuur 20) ($p < 0.001$). Bij Hi Power neemt het ook af in de behandeling Hoog FR1 maar zijn de verschillen tussen de behandelingen kleiner.



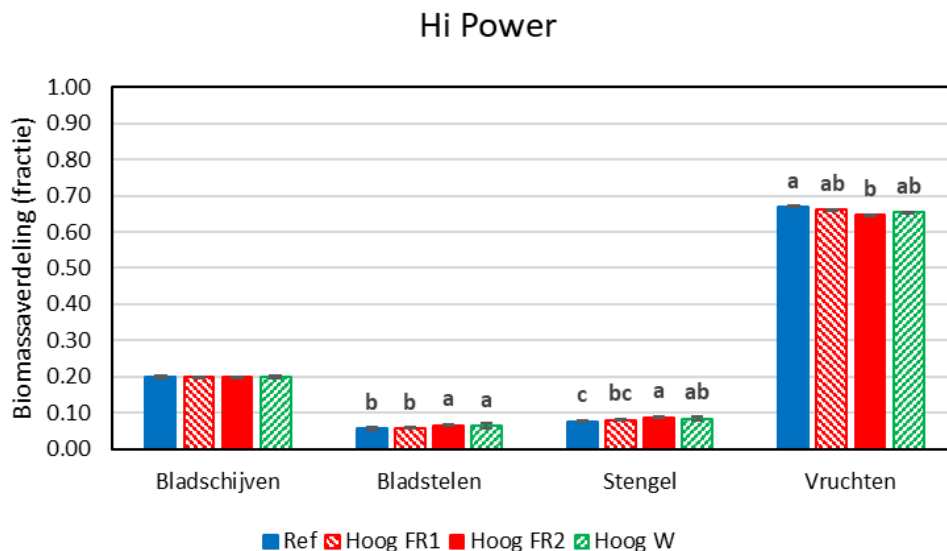
Figuur 19 Bladsteellengte aan het einde van de teelt van blad 14.



Figuur 20 Gemiddeld specifiek bladoppervlakte. Het gemiddeld is berekend over het gemiddelde tijdens de teelt en het gemiddelde van alle bladeren aan de plant aan het einde van de teelt ($n=12$).

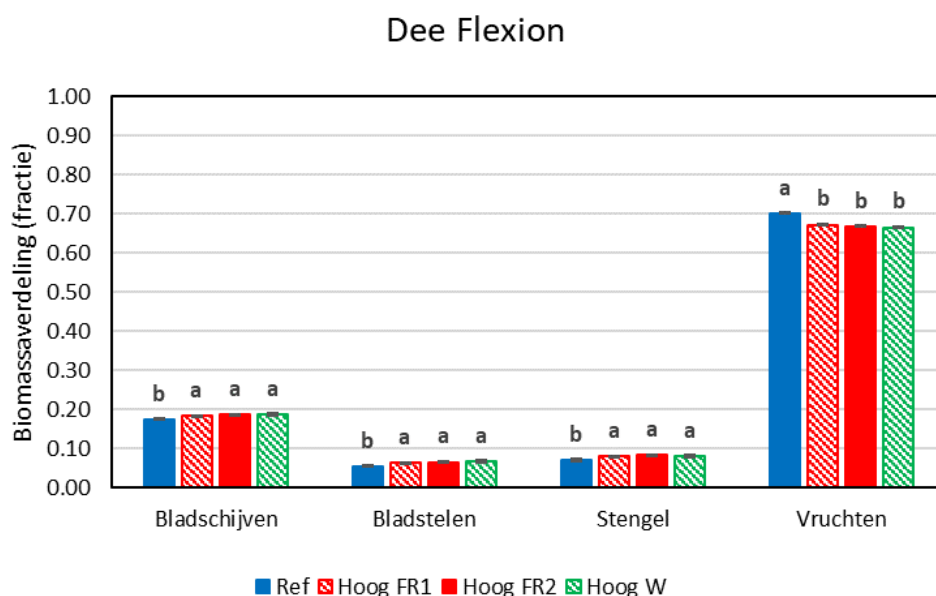
3.3.3.2 Biomassaverdeling

De biomassaverdeling is berekend op basis van droge stof. De som van alle geproduceerde biomassa is uitgesplitst in 4 organen: De bladeren, gesplitst in bladstelen en bladschijven, de hoofdstengel, en de vruchten (Figuur 21). Bij Hi Power zien we dat er ongeveer 1% meer biomassa in de bladschijven is gegaan bij de behandelingen Hoog FR2 en Hoog W. Dit is aannemelijk omdat we in de paragraaf hierboven zagen dat de lengte van de bladstelen ook groter was. Bij de hoofdstengel zien we een vergelijkbare trend waarbij het verschil ongeveer 1% is. Dit gaat ten koste van het aandeel wat naar de vruchten gaat, wat afneemt met 2%.



Figuur 21 Biomassaverdeling van Hi Power (n=12).

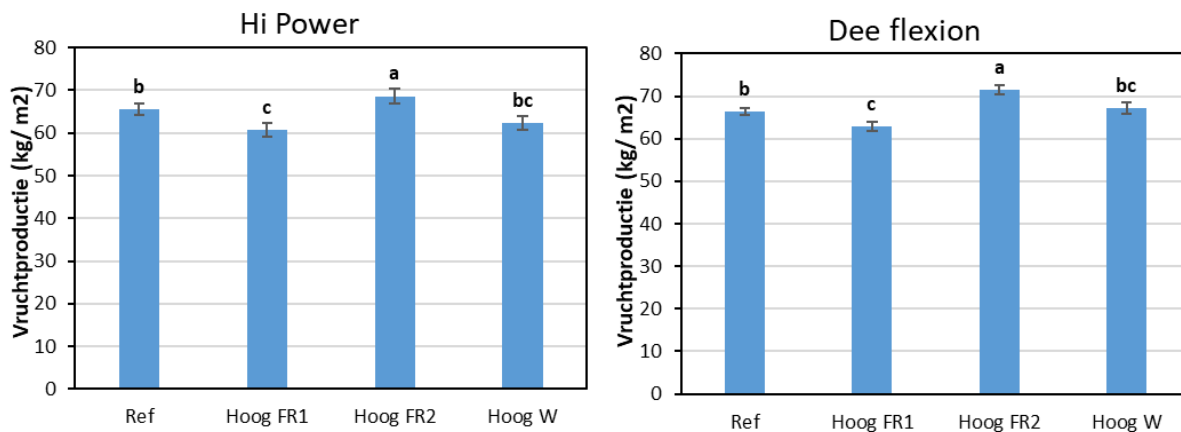
Bij Dee Flexion is er in tegenstelling tot bij Hi Power, ook een verschil in biomassaverdeling naar de bladeren. In alle behandelingen is er een toename van ongeveer 1%, en hetzelfde geldt voor de bladstelen en hoofstengel. Dit leidt ertoe dat er 3% minder biomassa naar de vruchten is gegaan.



Figuur 22 Biomassaverdeling van Dee Flexion (n=12).

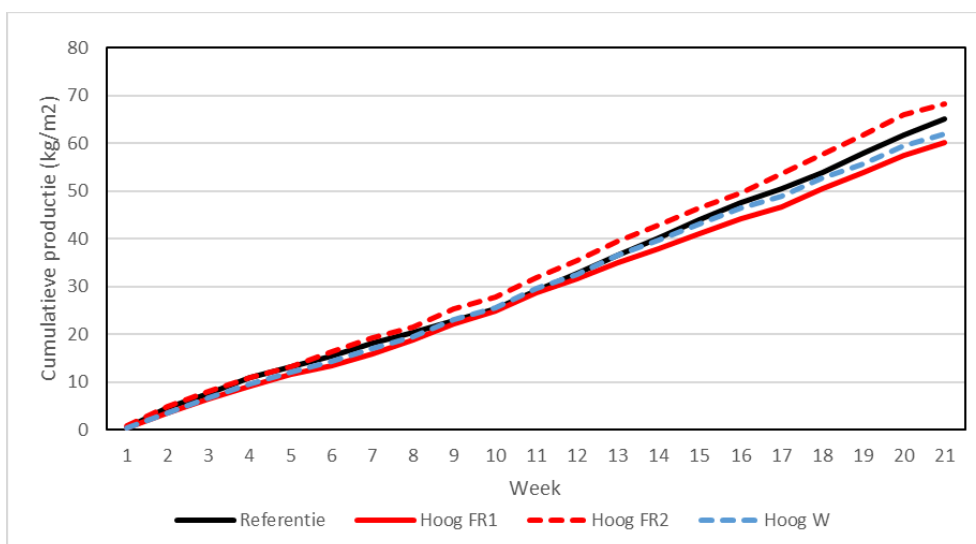
3.3.3.3 Vruchtproductie

De vruchtproductie van goede vruchten liet een vergelijkbare trend zien tussen de cultivars. De productie nam ten opzichte van de referentie af bij behandeling Hoog FR1, terwijl deze hoger was bij Hoog FR2 (Figuur 23) ($p < 0.001$). De hoogste productie werd gemeten bij Dee Flexion, met een totaal van 71.4 kg/m² terwijl de referentie een productie had van 66.3 kg/m², een verschil van 8%. Bij Hi Power was het verschil kleiner, en zat er 5% verschil tussen de referentie en Hoog FR2 behandelingen, met producties van respectievelijk 65.6 kg/m² en 68.6 kg/m².

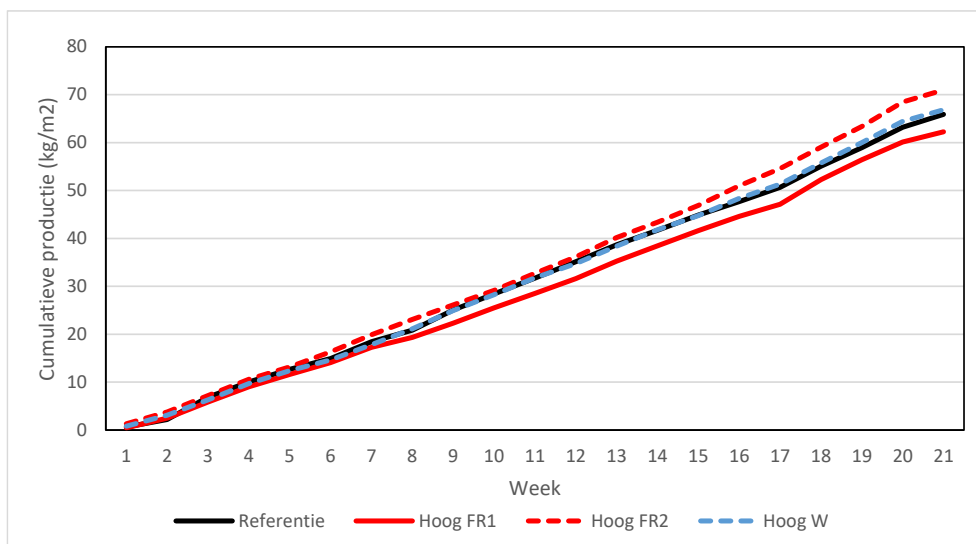


Figuur 23 Totaalproductie van goede vruchten geoogst tijdens de teelt.

Het verloop van de productie is vrijwel lineair, wat te verwachten is in verband met de constante lichthoeveelheid (Figuur 24, Figuur 25). Bij Hi Power loopt Hoog FR2 vanaf week 8 voor op de referentie. Vanaf week 13 gaat Hoog FR1 achterlopen op de referentie. Vanaf week 8 zien we dat bij Dee Flexion de productie van Hoog FR1 gaat achterblijven, en vanaf week 13 loopt behandeling Hoog FR2 op de referentie vooruit. De Hoog W behandeling loopt vrijwel altijd parallel aan de referentie.

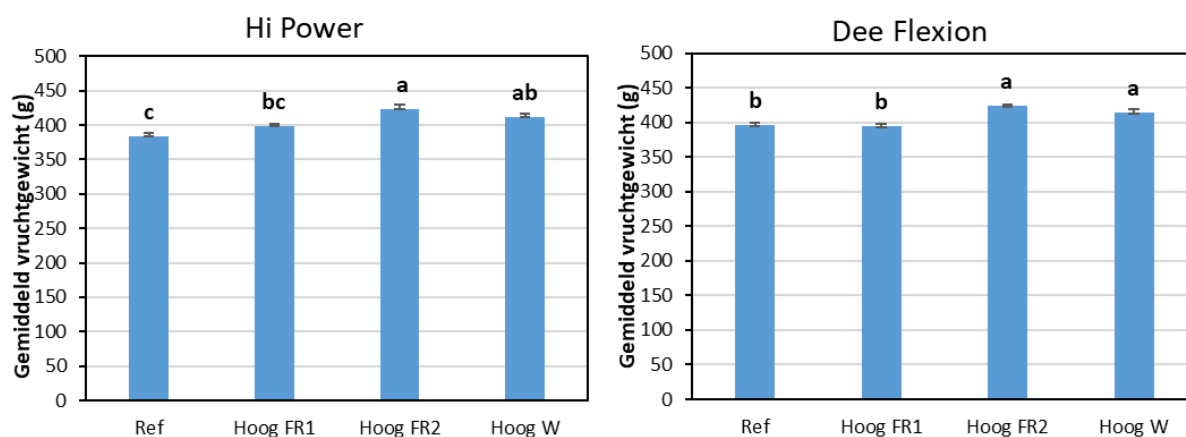


Figuur 24 Cumulatieve productie van goede vruchten van cultivar Hi Power.



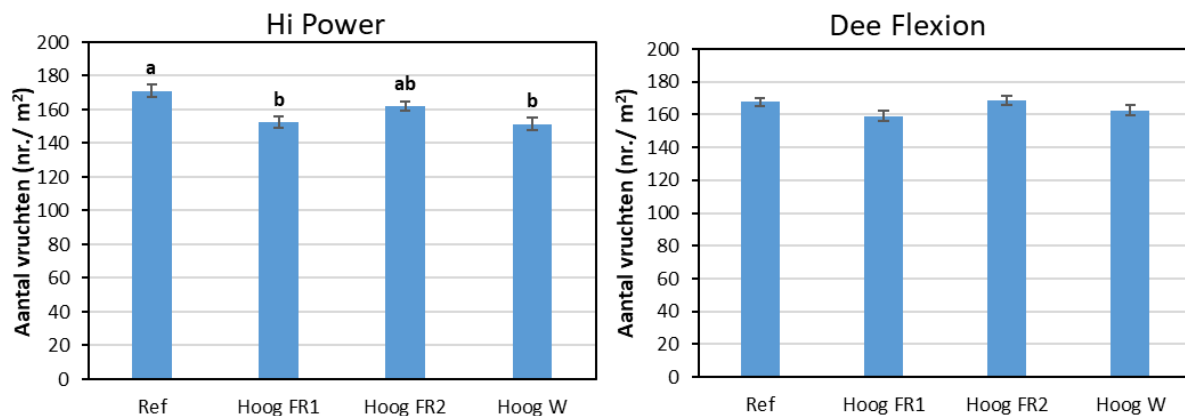
Figuur 25 Cumulatieve productie van goede vruchten van cultivar Dee Flexion.

Het gemiddelde vruchtgewicht was hoger voor de Hoog FR2 en Hoog W ten opzichte van de referentie bij beide cultivars. Dezelfde trend was zichtbaar bij Dee Flexion. Het vruchtgewicht van de referentie behandeling bij Hi Power was 384 gram terwijl dat voor Dee Flexion 396 gram was. Het hoogste vruchtgewicht werd bij beide cultivars waargenomen voor behandeling Hoog FR2 met beide een gemiddelde van 423 gram.



Figuur 26 Gemiddeld vruchtgewicht van goede vruchten.

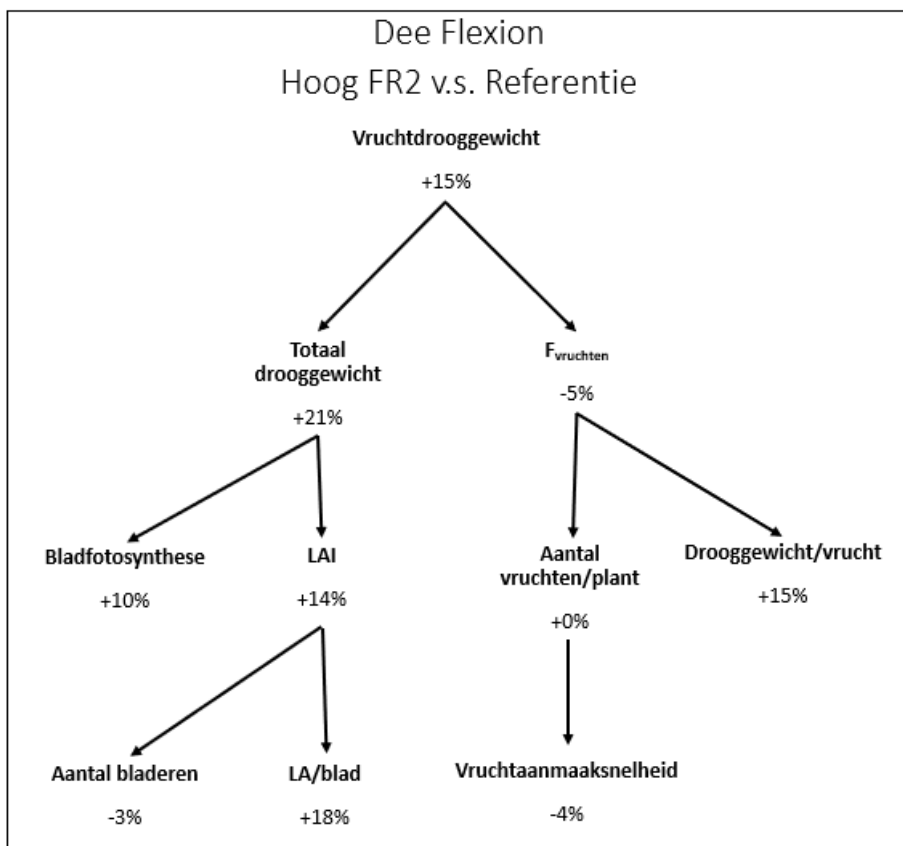
Het aantal geoogste goede vruchten verschilde bij Hi Power maar niet bij Dee Flexion. Bij Hi Power was het aantal bij de Hoog FR1 en Hoog W significant lager dan de referentie (Figuur 27) ($p < 0.001$). Er werden respectievelijk 152 vruchten/m² bij deze behandelingen geoogst ten opzichte van 171 bij de referentie. Dezelfde trend is waar te nemen bij Dee Flexion, waar de referentie op 168 vruchten/m² kwam.



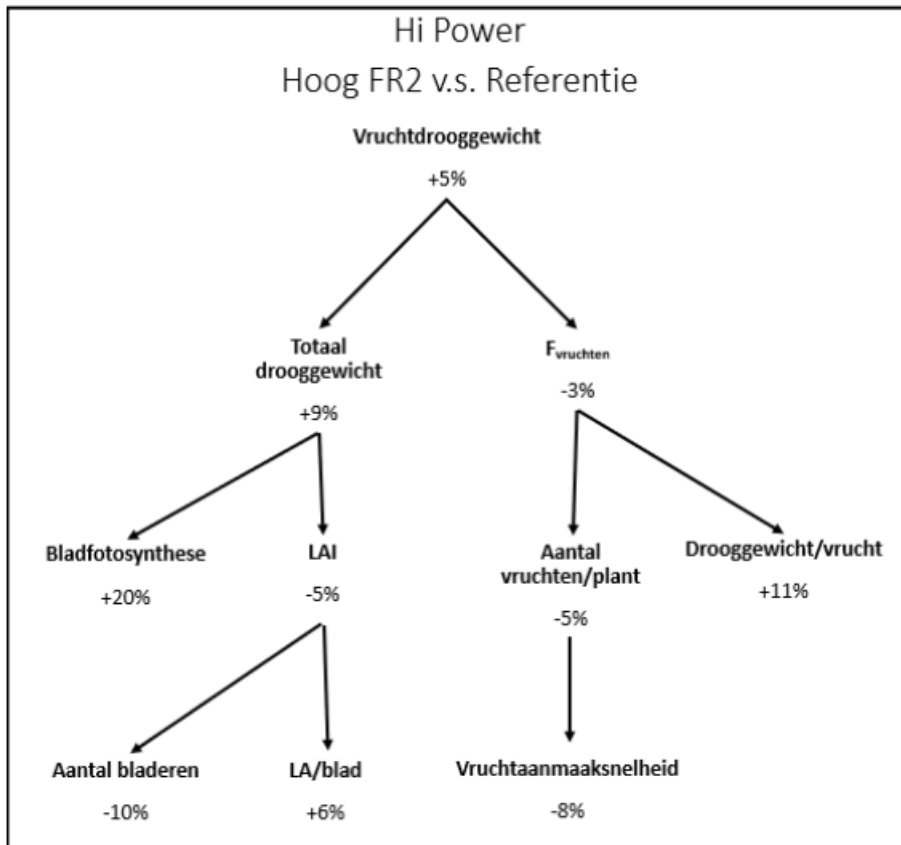
Figuur 27 Aantal geoogste goede vruchten per m².

3.3.3.4 Groeicomponenten analyse

Omdat de vruchtproductie wordt beïnvloedt door veel verschillende factoren, kan een groeicomponenten analyse helpen om inzichtelijk te maken welke processen nu invloed hebben op de vruchtproductie. In dit geval is deze analyse gedaan voor de behandeling Hoog FR2 van cultivar Dee Flexion; Wat opvalt is dat de hogere vruchtproductie, die hier uitgedrukt is in drooggewicht, met 15% toegenomen is ten opzichte van de referentie. Wat versgewicht betreft, was dit verschil 8%. Dit komt omdat de vruchten een hoger droge stofgehalte hebben van 3.5% ten opzichte van 3.3% bij de referentie. Dus naast een hogere hoeveelheid drooggewicht per vrucht, omdat ze zwaarder zijn geoogst, is het percentage droge stof ook hoger, waardoor het versgewicht van de vruchten relatief minder toenam dan het drooggewicht. De oorsprong van het hogere totale drooggewicht komt van een hoger bladoppervlakte, niet door meer bladeren maar door een grotere bladschijf. Dit, in combinatie met een hogere bladfotosynthese, leidt tot een grotere hoeveelheid assimilaten.



Figuur 28 Groeicomponenten analyse voor Dee Flexion waarbij de Hoog FR2 behandeling is vergeleken met de referentie.



Figuur 29 Groeicomponenten analyse voor Hi Power waarbij de Hoog FR2 behandeling is vergeleken met de referentie.

Bij Hi Power wijst de analyse uit dat de componenten anders zijn beïnvloed. De aanmaaksnelheid van nieuwe vruchten en bladeren was lager dan bij de referentie en de totale LAI was ook lager hoewel dat iets werd gecompenseerd door grotere bladeren. De bladfotosynthese nam echter meer toe dan bij Dee Flexion en uiteindelijk leidt dit tot een lagere stijging van het drooggewicht van 9% ten opzichte van 21% bij Dee Flexion.

Er zijn kanttekeningen te maken bij een aantal getallen in de analyse; de bladfotosynthese is gemeten onder het LED lichtspectrum, en in combinatie met zonlicht kunnen de verschillen tussen de behandelingen veranderen afhankelijk van de cultivar. Nu was de invloed van zonlicht voor het grootste gedeelte van de belichtingsperiode minder dan 50% van het etmaal waardoor het een relevante factor blijft.

3.3.3.5 Lichtbenuttingsefficiëntie

Een van de belangrijkste factoren waarop een teelt beoordeeld kan worden, is de lichtbenuttingsefficiëntie (LBE). Hierbij wordt doorgaans de productie uitgedrukt in gram per mol licht. Van oudsher wordt hiervoor PAR licht gebruikt. Omdat verrood licht een steeds belangrijkere factor wordt in verschillende teelten is het noodzakelijk dat dit licht ook meegenomen wordt in de berekeningen. Dit onderzoek laat ook zien dat verrood fotosynthetisch actief is (3.2.7). Tenslotte draait het niet alleen om de LBE. Kosten verbonden met het toepassen van LED belichting hangen o.a. af van het toegepaste lichtspectrum. Dit is een belangrijke afweging die door telers gemaakt wordt bij het kiezen voor een LED-belichtingssinstallatie. Uiteindelijk moet toepassing van LED belichting rendabel zijn.

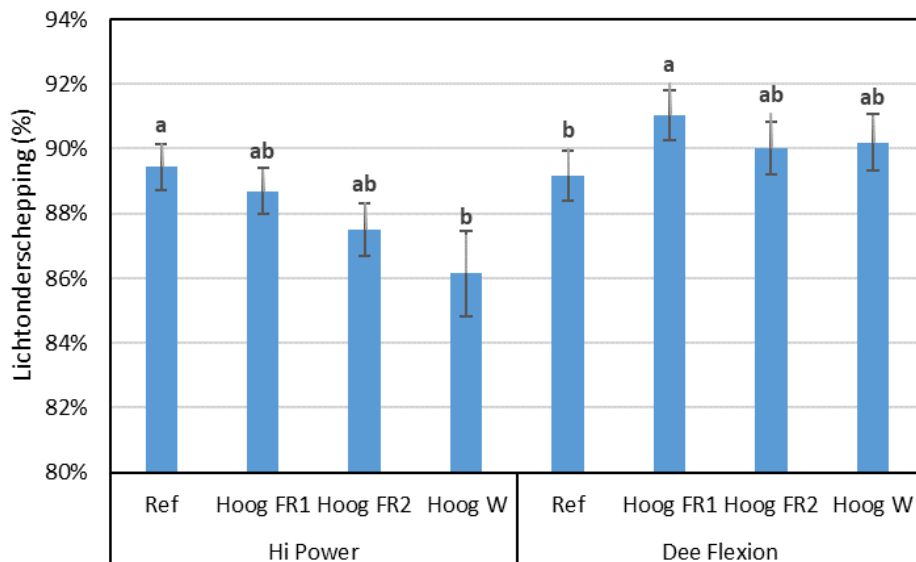
Tabel 8 Lichtbenuttingsefficiëntie (LBE) uitgedrukt in PPFD, PFD en elektra van de verschillende cultivars en behandelingen.

Cultivar	Behandeling	LBE		
		PPFD (g/mol)	PFD (g/mol)	PFD (kWh/kg)
Hi Power	Referentie	27.4	23.9	2.7
	Hoog FR1	27.6	22.3	3.0
	Hoog FR2	28.4	23.0	3.0
	Hoog W	25.9	21.1	3.5
Dee Flexion	Referentie	27.7	24.2	2.7
	Hoog FR1	28.5	23.1	2.9
	Hoog FR2	29.6	24.0	2.8
	Hoog W	28.0	22.8	3.3
Gemiddeld		27.9	23.0	3.0

Op basis van PARsom komt de behandeling Hoog FR2 er het meest gunstig uit voor beide cultivars; echter, gegeven het feit dat dit onderzoek ook aantoont dat verrood licht leidt tot fotosynthese, en het daarbij energie kost om het te geven, is het noodzakelijk om dit mee te nemen in de berekening in de vorm van de totale flux (PFD). Op basis van de totale gegeven fotonenflux heeft de referentiebehandeling de hoogste LBE. Daarnaast is de LBE uitgedrukt in kWh/kg vruchten, waarbij de totale hoeveelheid belichtingsenergie is berekend op basis van de efficacy als gevolg van het spectrum ($\mu\text{mol/J}$, Tabel 2). Omdat ten tijde van dit onderzoek verrood licht minder efficiënt geproduceerd kan worden dan rood licht, is de LBE op basis van kWh/kg hoger voor de referentiebehandeling. Met name de behandeling Hoog W heeft een lage LBE (kWh/kg) omdat dit spectrum het meeste energie kost om te produceren, en het daarbij in het geval van Hi Power ook een lagere biomassa-productie per mol heeft. Dit leidt tot een LBE van 3.5 kWh/kg, een toename van 29.6% ten opzichte van de referentie. Het specifiek lichtspectrum is dus een zeer belangrijke factor bij het kiezen van een belichtingsinstallatie.

3.3.4 Lichtonderschepping

De lichtonderschepping is een belangrijk factor in de teelt. Verschillen in lichtonderschepping tussen de behandelingen kunnen leiden tot verschillen in biomassa-productie en dus vruchtproductie. Over het algemeen was de lichtonderschepping van Hi Power lager dan Dee Flexion ($p < 0.001$). Gemiddeld is dit een verschil van 2% (Figuur 30). De cultivars hadden een verschillende lichtonderschepping als gevolg van de behandeling en bladsnoeibeleid. Hoog W had een significant lagere onderschepping bij Hi Power van 86%, terwijl de referentie op 89% zat. Bij Dee Flexion had Hoog FR1 een hogere onderschepping van 91% terwijl de referentie een onderschepping had van 89%.

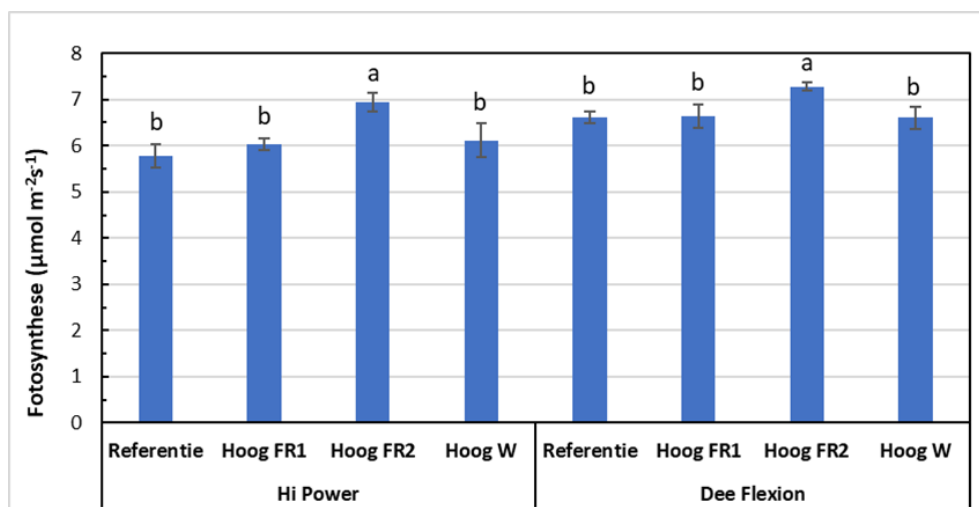


Figuur 30 Gemiddelde lichtonderschepping gemeten op 3 tijdstippen gedurende de teelt (n=15).

3.3.5 Fotosynthese

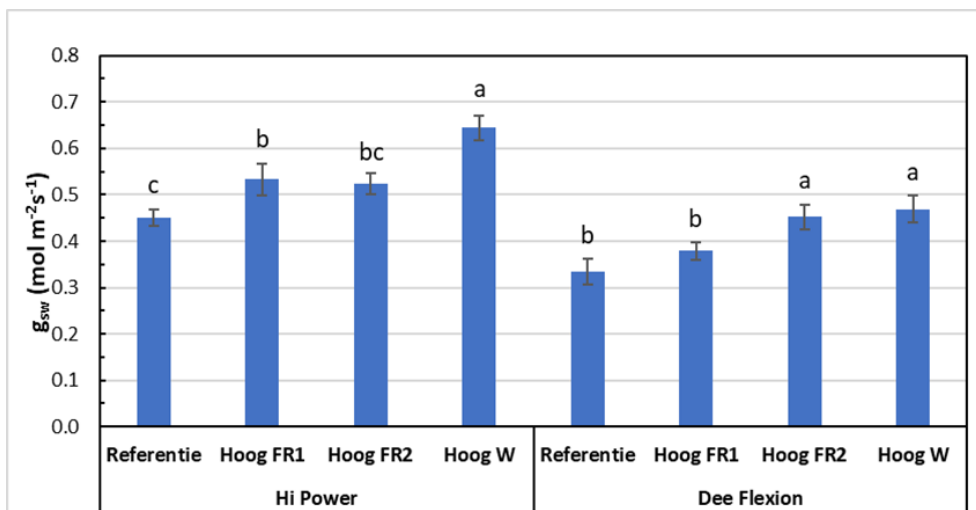
3.3.5.1 Open kamer

Een statistisch significant hogere fotosynthese werd gevonden in behandeling Hoog FR2 in cultivars Hi Power ($p=0.014$) en Dee Flexion ($p=0.047$) in vergelijking met de rest van de behandelingen (Figuur 31).



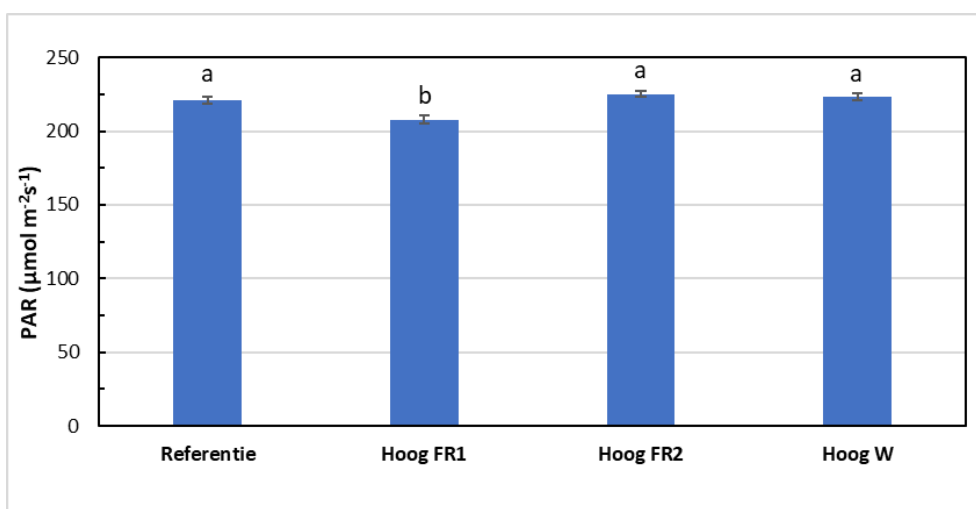
Figuur 31 Fotosynthese gemeten onder het heersende lichtspectrum en intensiteit. De statistiek is separaat gedaan voor de 2 cultivars. Foutbalken geven de standaardfout aan (n=10).

De huidmondjesgeleidbaarheid verschilde tussen de cultivars ($p<0.001$). Over het algemeen is deze hoger bij Hi Power. Net zoals bij de fotosynthese metingen richten we ons op de verschillen binnen de cultivars als gevolg van de lichtbehandelingen (Figuur 32) ($p<0.001$, $p=0.002$ voor respectievelijk Hi Power en Dee Flexion). De hoogste waarde is gemeten bij de cultivar Hi Power onder de behandeling Hoog W met $0.64 \text{ mol/m}^2/\text{s}$.



Figuur 32 Huidmondjesgeleidbaarheid gemeten onder het heersende lightspectrum en intensiteit. De statistiek is separaat gedaan voor de 2 cultivars. Foutbalken geven de standaardfout weer (n=10).

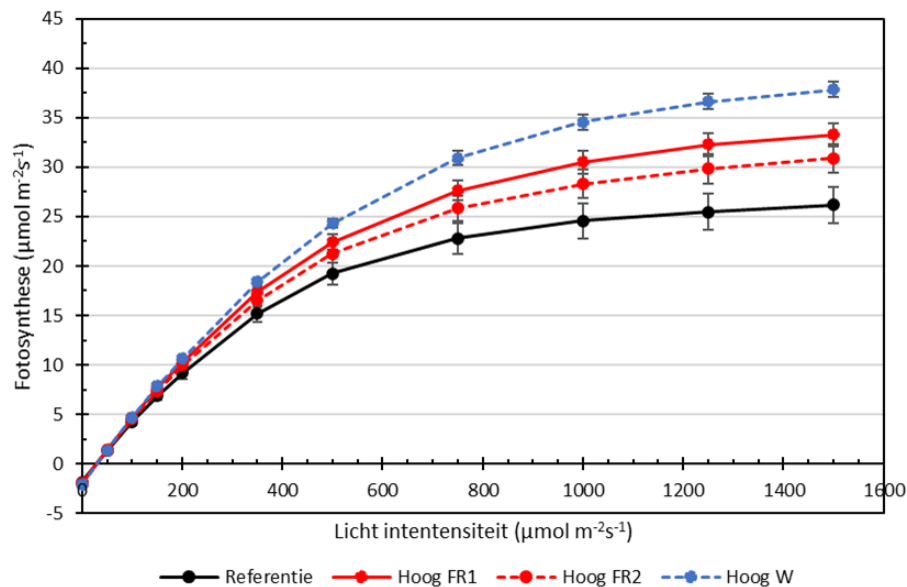
Bij de metingen met open kamer is het van belang dat de lichtintensiteit die op de bladkamer valt overeenkomt met de ingestelde lichtintensiteit, en alleen verschilt tussen de behandelingen waarvan je het op basis van de instellingen mag verwachten. De gemeten lichtintensiteit bij de bladkamer verschilde alleen bij de behandeling Hoog FR1, wat te verwachten is omdat deze behandeling een lagere ingestelde PAR heeft (Figuur 33). Er waren geen verschillen tussen de cultivars, dus de metingen zijn samengevoegd per behandeling.



Figuur 33 PAR lichtintensiteit gemeten bij de bladkamer tijdens de metingen met de open kamer. Foutbalken geven de standaardfout weer (n=20).

3.3.5.2 Gesloten kamer

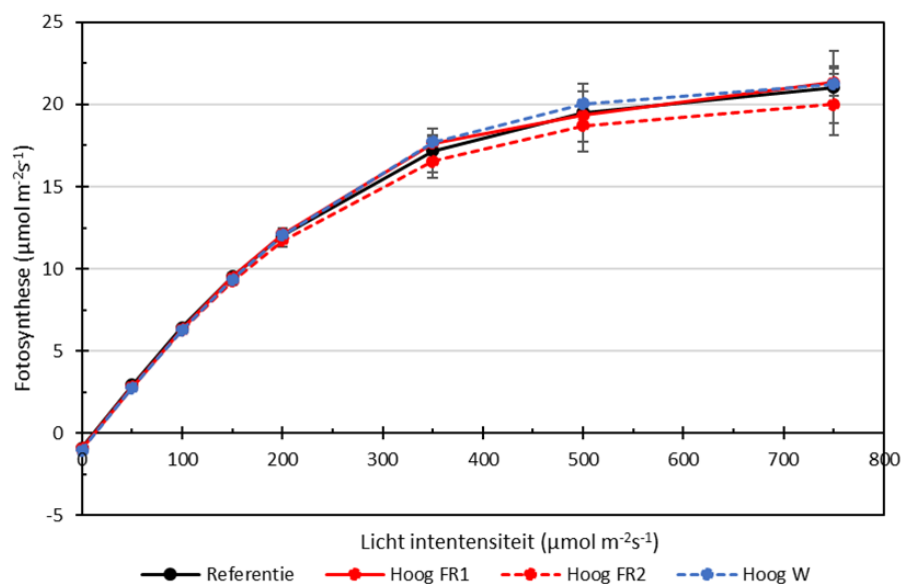
Metingen met de gesloten kamer werden alleen gedaan in cultivar Hi Power in de bovenste bladlaag (blad 6-7) en onderste bladlaag (blad 17-18). De bovenste bladeren van de planten lieten geen statistisch verschil in fotosynthesesnelheid tussen behandelingen bij lichtintensiteiten 100 en 200 μmol/m²/s (Figuur 34). Echter, bij hogere intensiteiten, namelijk van 350-1500 μmol/m²/s, vertoonde behandeling Hoog W significant hogere fotosynthese in vergelijking met de rest van de behandelingen ($p < 0.025$). Daarnaast is de fotosynthese van behandeling Hoog FR1 vanaf 500-1500 μmol/m²/s ook significant hoger dan de referentie ($p < 0.009$). De fotosynthese van Hoog FR2 was alleen bij 1500 μmol/m²/s hoger dan de referentie ($p < 0.025$).



Figuur 34 Licht response curve van fotosynthese metingen uitgevoerd aan bladeren bovenin het gewas. Foutbalken geven de standaardfout weer (n=6).

Deze resultaten wijken af van de open kamer metingen. Dat heeft mogelijk te maken met het toegepaste lichtspectrum, wat geen FR bevat, waardoor de bladeren een ander spectrum krijgen dan in de kas. De verschillen zijn niet relevant, omdat de verschillen optreden bij hogere lichtintensiteiten die niet vaak voorkwamen tijdens dit onderzoek.

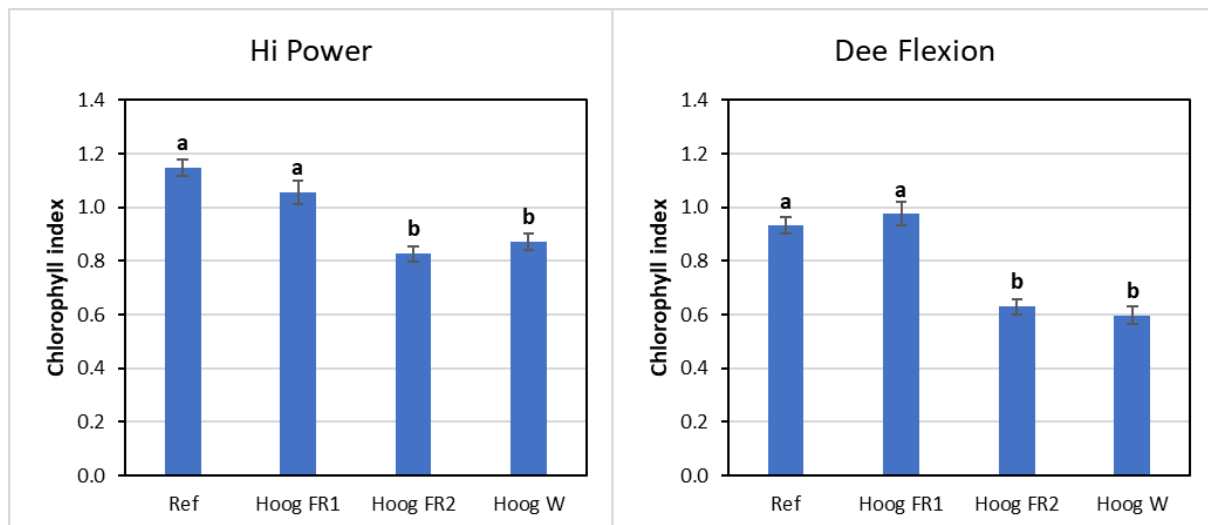
De bladeren lager in het gewas lieten geen verschillen zien in fotosynthese bij alle gemeten intensiteiten tussen de behandelingen (Figuur 35).



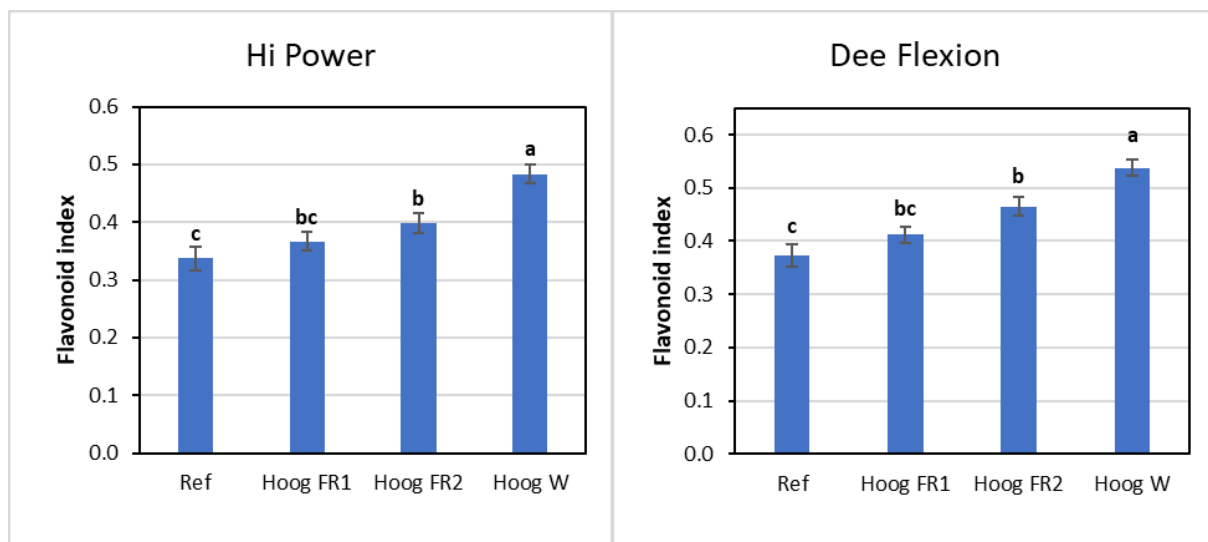
Figuur 35 Licht response curve van fotosynthese metingen uitgevoerd aan bladeren onderin het gewas. Merk op dat de assen een kleiner bereik hebben dan de figuur hierboven. Foutbalken geven de standaardfout weer (n=6).

3.3.6 Bladpigmenten

De referentie en Hoog FR1 behandelingen vertoonden significant hogere chlorofylgehalten chlorofyl in vergelijking met de rest van de behandelingen voor beide cultivars ($p < .001$) (Figuur 36). De hoeveelheid flavonoiden was echter significant hoger in behandeling Hoog W gevolgd door Hoog FR2 in vergelijking met de referentie, terwijl Hoog FR1 tussen de referentie en Hoog FR2 behandeling in zit ($p < .001$) (Figuur 37).



Figuur 36 Chlorofyl index van Hi Power (links) en Dee Flexion (rechts) ($n=10$).



Figuur 37 Flavonoiden index van Hi Power (links) en Dee Flexion (rechts) ($n=10$).

3.3.7 Watergift en voedingsopname

Het gemiddelde drainpercentage over de gehele teeltperiode was zeer vergelijkbaar tussen de behandelingen, wat het doel was van de watergiftstrategie (Tabel 9). Het kleine verschil tussen de behandelingen werd veroorzaakt door de Aquabalance. Deze was niet altijd in staat om een over/onder-irrigatieregime te compenseren. Over het algemeen kan gesteld worden dat het verschil in drain tussen de behandelingen verwaarloosbaar klein is. Het verschil tussen de Aquabalance en de handmatige registratie werd toegeschreven aan fouten aan beide kanten (kalibratie, onnauwkeurige aflezing en overstromen van de maatbekers, variatie in druppeldruk, enz.). Over het algemeen lijkt de automatische registratie betrouwbaarder omdat er geen ontbrekende data waren, terwijl bij de handmatige dataverzameling 28% van de dagen geen registratie heeft plaatsgevonden in verband met onder andere afwezigheid van personeel in het weekend.

Ook de wateropname werd berekend met zowel de Aquabalance als de handmatige meting. Bij ongeveer gelijke gift weerspiegelt de wateropname het verschil in drain tussen de handmatige metingen en de Aquabalance. De verschillen tussen de behandelingen zijn klein, maar de berekende wateropname met de Aquabalance ligt hoger in alle behandelingen ten opzichte van de referentie.

Tabel 9 Berekende drain, watergift en wateropname berekend op basis van de Aquabalance en handmatige data.

	Referentie	Hoog FR1	Hoog FR2	Hoog W
Drainpercentage (%)				
Aquabalance	33	32	30	29
Handmatig	23	20	25	21
Watergift (L/m²/dag)				
Aquabalance	3.3	3.5	3.5	3.4
Handmatig	3.6	3.8	3.4	3.4
Wateropname (L/m²/dag)				
Aquabalance	2.0	2.2	2.2	2.2
Handmatig	3.0	2.7	2.8	2.6

Nutriëntentenenmanagement

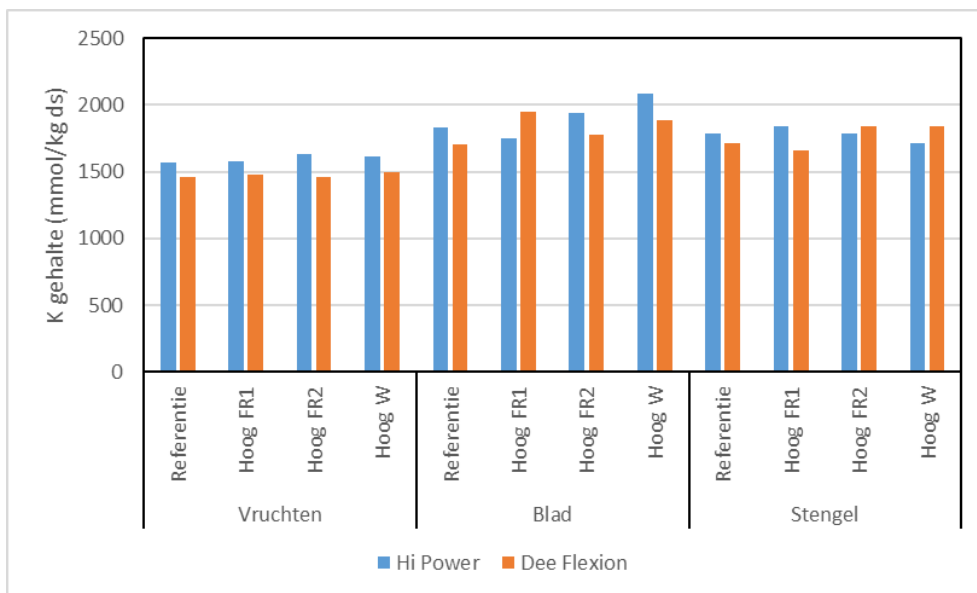
Drain EC en pH lagen gemiddeld zeer dicht bij de streefwaarden (Tabel 10). De drain EC van Hoog FR2 was gemiddeld 0.6 dS/m lager dan referentie. Dit wijst op een hogere opname van nutriënten uit het voedingswater, wat voor de hand ligt in verband met de hogere fotosynthese en groei. Omdat er 1 voedingsrecept kon worden toegepast, was de gift EC een compromis tussen de hoogste en de laagste drainwaarden. Om te voorkomen dat de EC te ver weg zou zakken was de strategie dat de drain EC boven de 3.0 dS/m moet blijven. De gemiddelde EC van het voedingsrecept was 3.0 dS/m. Het lijkt aannemelijk dat alle behandelingen voldoende nutriënten kregen tijdens de teelt en dat geen behandeling werd blootgesteld aan tekort of overschot. De dynamiek van de concentratie van nutriënten in het water in de loop van de tijd was zeer vergelijkbaar tussen de behandelingen voor alle nutriënten. De gemiddelde nutriëntenconcentratie in het drainwater lag dicht bij de streefwaarden van komkommer, zoals Sonneveld en Voogt, 2009 (Zie bijlage). Er werd geconcludeerd dat alle behandelingen voldoende nutriënten kregen, en niet waren blootgesteld aan extreme (hoge of lage) concentraties gedurende de gehele teeltcyclus.

Tabel 10 EC en pH-waarden van gift en drain in de verschillende behandelingen.

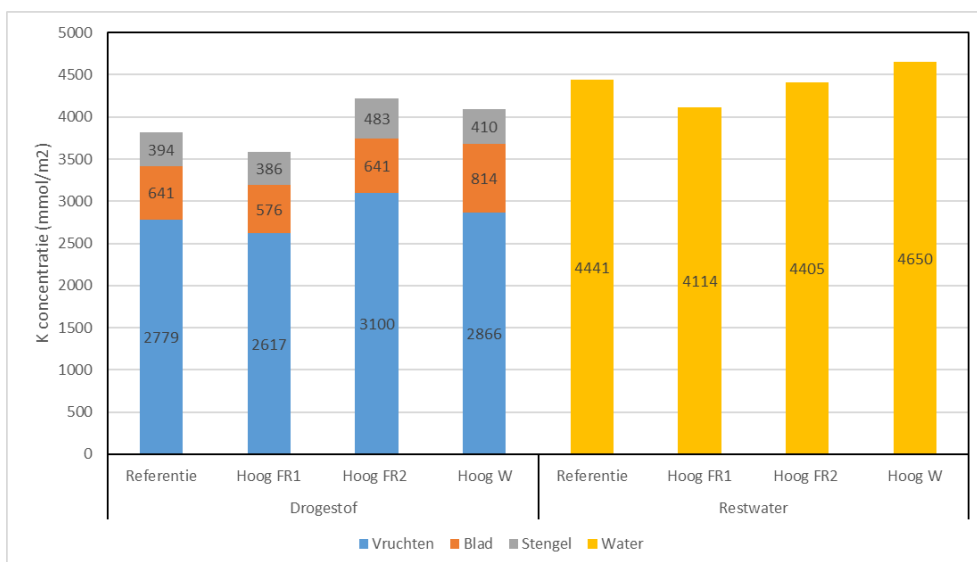
Parameter	Gift	Referentie	Hoog FR1	Hoog FR2	Hoog W
EC (dS/m)	3.0	3.6	3.6	3.0	3.3
pH	5.6	6.2	5.7	6.3	6.2

Opname van nutriënten

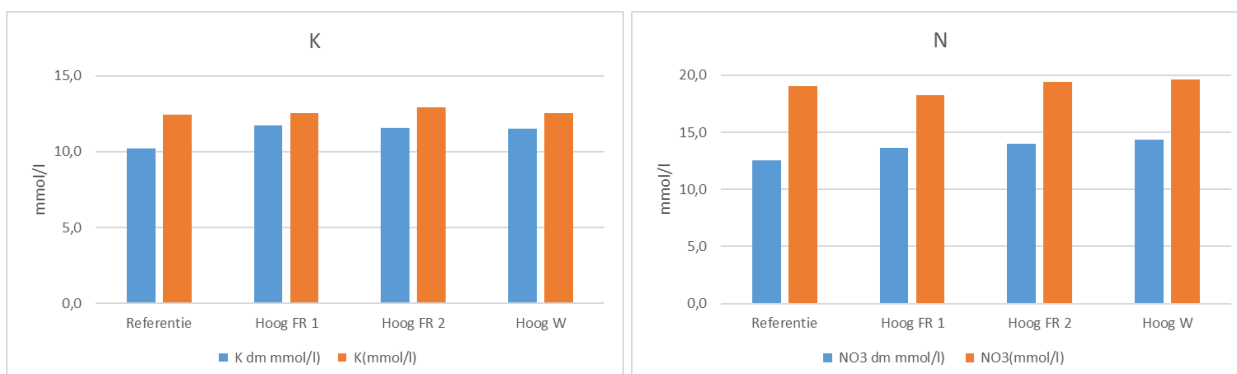
Het nutriëntengehalte in de biomassa bleek zeer vergelijkbaar te zijn tussen de behandelingen voor alle organen (bladeren, vruchten, stengel). Een voorbeeld is weergegeven voor Kalium (Figuur 38). De opname van voedingsstoffen (mmol/m²) was hoger in Hoog FR2 en Hoog W dan in de referentie en Hoog FR1 behandelingen. Dit resultaat is verkregen met beide berekeningsmethoden (Figuur 39). Dit resultaat was te verwachten omdat het de hogere biomassa van deze behandelingen weerspiegelt (Zie paragraaf 3.3.3 Gewasgroei, -ontwikkeling en productie). Wanneer er verschillen in biomassa zijn bij een gelijk droge stofgehalte, is de totale hoeveelheid opgenomen elementen ook hoger. Daarom is ervoor gekozen om, naast de absolute opname van voedingsstoffen, ook de relatieve opname te evalueren. De opname van de voedingsconcentratie (U) vertoonde geen trends tussen de behandelingen voor beide berekeningsmethoden (voorbeeld gegeven voor K en N in Figuur 40). U_{n1} berekend met de uitputtingsmethode resulteerde in een hogere opname dan U_{n2} , berekend met de droge stofmethode. Een verschil tussen de twee methoden wordt vaak gevonden. Dit was vooral hoger voor N. Bij U_{n1} worden stikstofverliezen als gevolg van vervluchtiging of consumptie door andere organismen niet in aanmerking genomen. Voor K is het verschil voornamelijk te wijten aan het deel van K dat in de matten achterblijft of K-verlies als gevolg van lekkage.



Figuur 38 Gehalte aan Kalium per orgaan per cultivar.



Figuur 39 Berekende concentratie van Kalium voor Hi Power door middel van de droge stof- en restwatermethode.



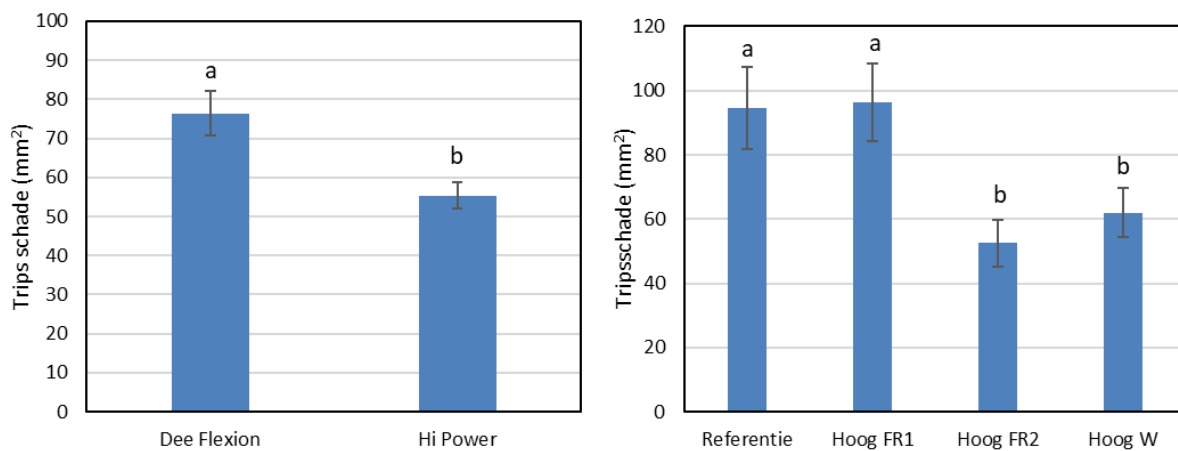
Figuur 40 Opnameconcentratie van nutriënten berekend met de droge stofmethode (blauwe balken) en uitputtingsmethode voor Hi Power. Links: element Kalium; Rechts: element Stikstof.

Deze proef toonde aan dat voor de behandelingen Hoog FR2 en Hoog W de planten meer groeiden dan in de referentie en Hoog FR 1 behandelingen. Hieraan gekoppeld was ook de opname van voedingsstoffen hoger in Hoog FR2 en Hoog W. Zowel de concentratie van voedingsstoffen in het gewas als het droge stofgehalte werden niet beïnvloed door de behandelingen. Bovendien vertoonde de relatieve opname van voedingsstoffen, uitgedrukt als opnameconcentratie, geen duidelijk verschil of trends tussen behandelingen. Hieruit kunnen we concluderen dat deze lichtspectra geen effect hadden op de opname door planten voor specifieke nutriënten.

3.3.8 Gewasgezondheid

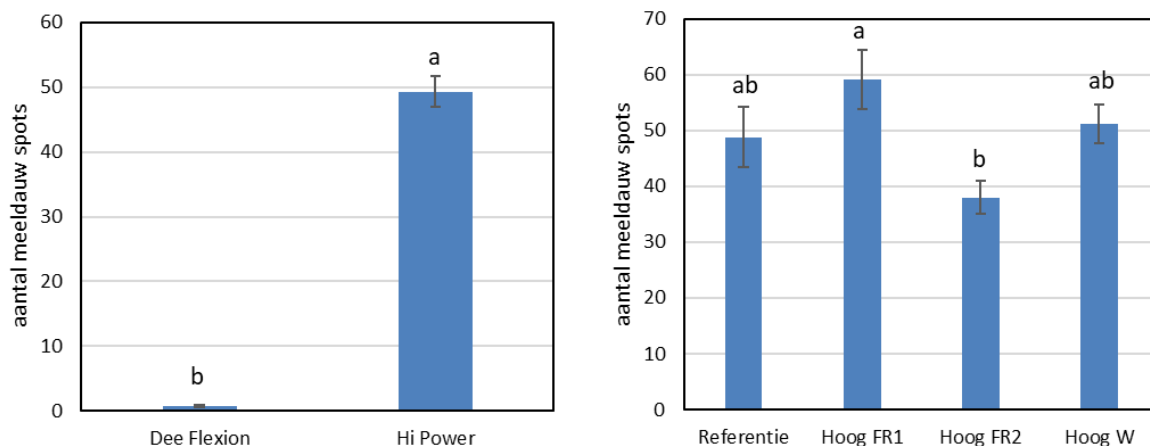
Er zijn drie typen biotoetsen gedaan, voor trips, botrytis en meeldauw. De botrytis toets liet geen infectie zien, dus die test is niet meegenomen in de resultaten.

Bij trips is gevonden dat Dee Flexion vatbaarder is voor schade (Figuur 41). De cultivars reageren daarbij verschillend op de trips insecten. Bij Hi Power is er geen significant verschil tussen de behandelingen, terwijl bij Dee Flexion zichtbaar is dat de Hoog FR2 en Hoog W behandelingen een lagere mate van aantasting hebben. Deze mate van infectie daalt met respectievelijk 45% en 35%.



Figuur 41 Tripsschade aan komkommerbladeren bij de cultivars (behandelingen samengevoegd, links) en voor de behandelingen bij cultivar Dee Flexion (n=10).

De toets op meeldauw laat duidelijk zien dat Dee Flexion resistent is tegen meeldauw (Figuur 42). Tussen de behandelingen bij Hi Power blijkt er alleen een verschil op te treden tussen de behandelingen Hoog FR1 en Hoog FR2, waarbij Hoog FR1 55% meer meeldauw spots heeft. Beide behandelingen verschillen niet significant van de referentie.



Figuur 42 Het aantal meeldauw spots per cultivar (links) en het aantal meeldauw spots per behandeling bij Hi Power (rechts)(n=10).

4 Effect van lichtspectra op genexpressie

4.1 Inleiding

In dit onderzoek is gekeken naar het effect van verschillende lichtspectra op de groei, ontwikkeling en productie van komkommer. Om meer inzicht te krijgen in de onderliggende processen die verantwoordelijk zijn voor de gevonden effecten (beschreven in de hoofdstukken hiervoor) zijn ook de effecten van de lichtspectra op de hormoonhuishouding van de plant onderzocht (van Hoogdalem *et al.*, 2021). Plantenhormonen zijn in de natuur voorkomende stoffen die al in zeer lage concentraties processen kunnen beïnvloeden (Davies, 2010). Ze dienen als chemische boodschappers: ze geven informatie vanuit de omgeving (zoals het lichtspectrum) door en passen fysiologische processen hierop aan. Deze aanpassingen kunnen vervolgens effect hebben op zaken als plantarchitectuur, assimilatenverdeling, de uitgroeiduur van vruchten, weerbaarheid en/of de groei- en ontwikkelingssnelheid van het gewas. Een bekend voorbeeld van het effect van hoe licht de hormoonhuishouding beïnvloed is de schaduw-ontwijkingsreactie: een lagere R:FR ratio (meer verrood licht) zorgt in veel planten voor de aanmaak van meer groeihormonen auxine en gibberellinezuur (GA) en het transport hiervan, o.a. naar bepaalde cellagen in bladstelen waardoor deze zullen strekken.

Hormonen zelf zijn lastig te meten, en ook is het vaak niet duidelijk hoe men hormoonconcentraties in plantmateriaal moet interpreteren. Echter, het is bekend dat hormonen fysiologische processen beïnvloeden doordat ze de activiteit (expressie) van genen reguleren die betrokken zijn bij deze processen. Daarom is er in dit project voor gekozen om de expressie van genen te bestuderen waarvan bekend is dat ze een rol spelen in hormonale regulatie van de fysiologische processen waarin we geïnteresseerd zijn.

Door de invloed van verschillende lichtspectra op onderliggende processen zoals de hormoonsignalering bestuderen krijgen we meer inzicht in de mechanismen via welke het lichtspectrum de groei en ontwikkeling van het gewas beïnvloed. Dit kan helpen in de zoektocht naar het 'optimale lichtspectrum' en geeft inzicht in aan welke 'knoppen je kunt draaien' om de gewasontwikkeling te sturen tijdens een teelt. Daarnaast kan het helpen met het vertalen van gevonden resultaten naar toepassingen in andere teelten. Bijvoorbeeld doordat het bijdraagt aan het ontwikkelen van methoden (obv genexpressie analyses) om in een vroeg stadium al te voorspellen wat het effect van een (spectrum)behandeling zal zijn op een gewas.

Aanpak: Welke genen bestuderen, wanneer en in welk type weefsel?

In dit project ligt de focus op het effect van lichtspectrum op plantarchitectuur, de assimilatenverdeling en weerbaarheid. Op basis van een kort literatuuronderzoek (hieronder samengevat) zijn meer dan 30 genen geselecteerd waarvan de expressie naar verwachting inzicht kan geven in hoe lichtspectrum fysiologische processen kan beïnvloeden die invloed hebben op de plantarchitectuur en de assimilatenverdeling. Deze staan in tabel B2.3 in de bijlagen.

Plantarchitectuur

Met betrekking tot plantarchitectuur zijn we vooral geïnteresseerd in het effect van lichtspectrum op strekking en de stand van bladstelen, het bladoppervlak en de bladvorm (gekruld of vlak). Deze zaken worden sterk bepaald door celexpansie (toename in het formaat van de cel). De eerstgenoemde processen worden onder andere gereguleerd door transcriptiefactoren (eiwitten die activiteit van genen kunnen beïnvloeden), waarvan HY5 en PIF3,4,5 en 7 zeer belangrijke zijn. Deze transcriptiefactoren beïnvloeden o.a. de activiteit van genen betrokken bij de aanmaak en afbraak van hormonen die celexpansie stimuleren, zoals GA en auxine. Om het effect van het lichtspectrum op processen die plantarchitectuur beïnvloeden te bestuderen zullen we de expressie van *PIFs* en *HY5* analyseren, maar ook van genen die worden aangestuurd door *PIFs* en *HY5*, zoals genen betrokken bij de aanmaak van GA en auxine en de aanmaak van enzymen betrokken bij het losmaken van de celwand (*EXPA* genen). Dit laatste is een vereiste voor celexpansie. De expressie van deze genen zal worden bestudeerd in monsters van (jonge) bladeren en delen van bladstengels.

Uit experimenten met komkommers binnen het project 'Duurzame teeltsystemen met LEDs' (Dieleman *et al.*, 2021) bleek dat FR toevoegen strekking stimuleerde. Rond het midden van de dag is het effect van FR op strekking van bladstelen het sterkst (want bladstelen blijven iets korter onder de 6/6R/6 behandeling; het ging hier overigens niet om significante verschillen), maar er is ook een effect wanneer FR op andere momenten op de dag wordt toegediend. Daarom zal expressie van deze genen geanalyseerd worden op verschillende tijdstippen waarop bemonsterd wordt.

Plantweerbaarheid

De hormonen Jasmonzuur (JA), Salicylzuur (SA) en ethyleen spelen een belangrijke rol in plantweerbaarheid. Er zijn verschillende genen bekend waarvan de expressie is gerelateerd aan de afweer via deze hormonen. De vraag is of het bestuderen van genetische markers voor de signaleringsroutes van deze hormonen echt iets zegt over het effect van het lightspectrum op plantafweer aangezien de route pas wordt aangeschakeld als er een infectie plaatsvindt. Expressie van afweergenen wordt gemeten in bladmonsters.

Assimilatenverdeling

De assimilatenverdeling wordt sterk bepaald door het transport van suikers van source (plaats van aanmaak) naar sinks (plaats van gebruik). Hiervoor moeten suikers vanuit de source eerst 'geladen' worden in het floëem, waarna deze via het floëem worden getransporteerd naar de sinks, en daar weer worden 'gelost'. In komkommer kunnen suikers zowel actief als passief worden getransporteerd. Uit de literatuur zijn verschillende genen geselecteerd die coderen voor eiwitten (transporters en enzymen) die betrokken zijn bij de twee typen transport, en dan met name bij het laden en lossen van suikers. Daarom zal er gekeken worden naar de expressie van deze genen in source materiaal (blad) en sink materiaal (jonge vruchten). Het effect van het lightspectrum op expressie van genen hangt vaak af van het moment van de dag. Daarom is het belangrijk genexpressie te meten op een aantal tijdstippen. Uit experimenten met komkommers binnen het project 'Duurzame teeltsystemen met LEDs' (Dieleman *et al.*, 2021) bleek dat FR toevoegen aan R licht gedurende de hele dag, of alleen aan het begin en einde van de dag, de droge stof verdeling richting vruchten het sterkst stimuleert en resulteert in de hoogste productie. Dat betekent dat veranderingen in expressie van genen gerelateerd aan assimilatentransport door FR waarschijnlijk niet plaatsvinden op het midden van de dag.

4.2 Materiaal en methoden

Bladmonsters verzamelen voor genexpressie analyse

Op twee momenten tijdens de teelt zijn van beide cultivars bladmonsters genomen voor genexpressie analyse:

1. Op 16 februari 2022, tussen 08:00 en 09:00. Dit is halverwege de lichtperiode, 8-9 uur nadat de LED lampen aangingen.
2. Op 28 maart 2022, tussen 01:00 en 02:00. Dit is aan het begin van de lichtperiode, 1-2 uur nadat de LED lampen aangingen.

De tijdstippen zijn zodanig gekozen dat er geen zonlicht aanwezig was tijdens het nemen van de bladmonsters zodat eventuele effecten op genexpressie alleen worden veroorzaakt door verschillen in LED spectra.

Bladmonsters zijn genomen van het 6^e blad, geteld van boven. Er is voor dit blad gekozen omdat aangenomen wordt dat dit een nog jong groeiend blad is wat veel licht opvangt, maar al groot en actief genoeg is om suikers te exporteren naar andere plantdelen. De bladmonsters zijn genomen door per blad steeds met een pons 2 schijfjes van 1cm uit te snijden, daarbij de grote bladnerven ontwijkend (zie Figuur B2.1 in de bijlagen). Deze zijn vervolgens direct in een steriel 2ml Eppendorf buisje gedaan met daarin 2 metalen kogeltjes en ingevroren in vloeibare stikstof. Na het oogsten van alle bladmonsters zijn de Eppendorf buisjes met de bladmonsters bewaard bij -80°C tot de volgende stap.

RNA extractie en cDNA synthese

Voor RNA extractie is gebruik gemaakt van de RNeasy Plant Mini Kit van Qiagen. Hiertoe zijn de bevroren bladmonsters (in de Eppendorf buisjes) eerst gehomogeniseerd met een dismembrator. Vervolgens is direct Lysis buffer toegevoegd aan de Eppendorf buisjes met het materiaal en is de RNA extractie uitgevoerd volgens protocol van de RNeasy Plant Mini Kit. Na extractie van het RNA is het DNA uit het bladmateriaal is de opbrengst en de kwaliteit van de RNA monsters getest doormiddel van spectrofotometrie en gelelektroforese. De resultaten hiervan staan in Tabel B2.1, Tabel B2.2 en Figuur B2.2 in de bijlagen. Er is geen RNA geïsoleerd uit de bladmonsters van Dee Flexion die genomen zijn op 28 maart 2022. Een deel van het RNA geïsoleerd uit de verschillende bladmonsters is vervolgens gebruikt voor omzetting in cDNA volgens het protocol van de QuantiTect Reverse Transcription Kit (Qiagen). De resulterende cDNA monsters zijn vervolgens 5x verdund in demiwater en opgeslagen bij -20°C, tot de volgende stap.

Quantitative real-time PCR

Het meten van genexpressie in de verschillende monsters is gedaan doormiddel van Quantitative real-time PCR (qPCR). Hiervoor is gebruik gemaakt van de QuantiTect SYBR Green PCR Kit (Qiagen) en een CFX96 Touch Real-Time PCR Detection System (Biorad Laboratories Inc). PCR reacties zijn uitgevoerd in 96 wells platen en een reactievolume van 20µL per well (1.5 µL verdund cDNA). Het volgende PCR protocol is gebruikt:

1. 50°C for 02:00
2. 95°C for 15:00
3. 94°C for 00:15
4. 55°C for 00:30
5. 72°C for 00:30
- + Plate Read
6. GOTO 3; 39 keer herhalen
7. Melt Curve 65°C to 95°C; °C increment 0.5°C for 00m05s + Plate Read
- END

Primers

Voor het bestuderen van de expressie van de geselecteerde genen zijn primersequenties opgezocht in de literatuur. Deze primers zijn besteld en geleverd door Eurofins (Ebersberg, Duitsland). De lijst met primersequenties is te vinden in Tabel B2.4 in de bijlagen.

Alle primers zijn vervolgens getest op een beperkt aantal bladmonsters. Op basis van de uitkomst van de tests is besloten om niet alle genen te analyseren met de primersets die in eerste instantie zijn geselecteerd. Zie Tabel B2.4 in de bijlagen voor verdere toelichting.

Berekenen relatieve genexpressie

Relatieve genexpressie (ten opzichte van de expressie onder het Referentie spectrum) is berekend doormiddel van de $\Delta\Delta C_t$ methode (Livak and Schmittgen, 2001). Om het effect van de verschillende lichtbehandelingen op de expressie van de genen waarin we geïnteresseerd zijn te kunnen bepalen moet er eerst een referentie gen (ook wel huishoud gen genoemd) worden gekozen. Een dergelijk gen dient als een interne controle en dient stabiel tot expressie te komen, ongeacht de behandeling. Uit de literatuur zijn voor drie referentie genen primersets geselecteerd en hiermee zijn PCRs uitgevoerd met alle monsters. In Tabel 11 zijn de gemiddelde C_t waarden te zien van de verschillende sets monsters.

Tabel 11 Gemiddelde C_t waarden van referentiegenen in de drie

Monsters	Cultivar	Datum bemonstering	Tijdstip bemonstering	Ct EF1 α (gemiddelde $\pm$ SD)	Ct ACT (gemiddelde $\pm$ SD)	Ct UBQ (gemiddelde $\pm$ SD)
1 t/m 20	Hi Power	16-02-2022	08:00	28,45 $\pm$ 1,70	26.26 $\pm$ 1,08	23,23 $\pm$ 0,73
21 t/m 40	Dee Flexion	16-02-2022	08:00	25,29 $\pm$ 0,64	22.42 $\pm$ 0,52	21,57 $\pm$ 0,52
41 t/m 72	Hi Power	28-03-2022	01:00	34,21 $\pm$ 2,26	25.00 $\pm$ 2,19	27,97 $\pm$ 1,73

De variatie in Ct waarden is het kleinst voor UBQ. Daarom wordt deze genomen als referentiegen. Opvallend is de grote variatie in Ct waarden in de monsters 41 t/m 72. Op basis hiervan is besloten geen genexpressie analyses uit te voeren op deze monsters. De mogelijke reden voor de afwijkende waarden en grote variatie van deze monsters is onduidelijk.

Er zijn dus uitsluitend genexpressie analyses uitgevoerd op bladmonsters die genomen zijn om 08:00 (het midden van de lichtperiode, wanneer er nog geen zonlicht toegelaten werd).

Statistiek

Statistische toetsen voor het bepalen van statistisch significante verschillen in genexpressie zijn uitgevoerd in R (versie 4.2.1). Indien aan de voorwaarden voor ANOVA werd voldaan is deze toets gebruikt en vervolgens een Tukey HSD post-hoc test. Werd er niet aan de voorwaarden voor ANOVA voldaan, dan is een Kruskal-Wallis toets gebruikt en vervolgens een Dunn's toets.

4.3 Resultaten

4.3.1 Plantarchitectuur

Om inzicht te krijgen in hoe lichtspectrum invloed heeft op de plantarchitectuur van komkommer is in eerste instantie gekeken naar expressie van de genen *HY5*, *PIF5* en *EXPA1* (Figuur 43).

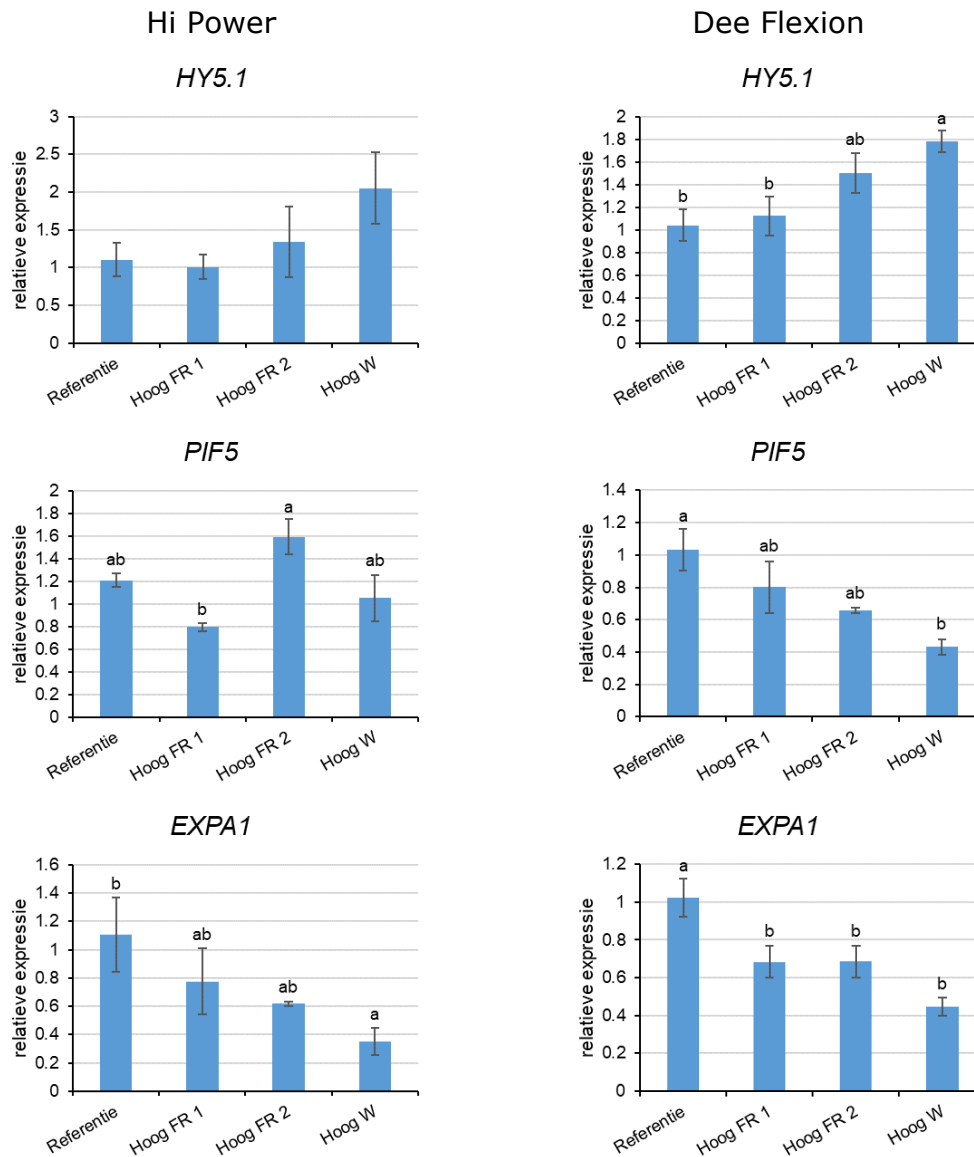
Het eiwit HY5 is een 'master regulator' die veel genen reguleert en dus bij veel processen betrokken is, waaronder cel strekking, de aanmaak van chlorofyl en flavonoiden, de opname van nutriënten en de activatie van verschillende afweerreacties (Gangappa & Botto, 2016; Xiao *et al.*, 2022). HY5 doet dit onder andere door de hormoonhuishouding van de plant te beïnvloeden: het onderdrukt de aanmaak/activiteit van groeihormonen als auxine en GA, maar stimuleert de aanmaak/activiteit van afweers hormonen SA en JA. Ook stimuleert het eiwit HY5 de expressie van het *HY5* gen. Dus expressie van het *HY5* gen is een indicatie voor de activiteit van het HY5 eiwit in de plant.

Uit de genexpressie analyse van *HY5* blijkt dat de verschillende lichtspectra geen statistisch significant effect hadden op *HY5* expressie in het blad van de cultivar Hi Power. Wel is er een trend zichtbaar waarbij de expressie onder Hoog W en in mindere mate onder Hoog FR2 gemiddeld hoger is dan onder het Referentiespectrum en het Hoog FR1 spectrum. Deze trend is ook zichtbaar in Dee Flexion. In het blad van deze cultivar is sprake van een statistisch significant verschil tussen *HY5* expressie onder het Referentiespectrum en het Hoog W spectrum.

PIF eiwitten zijn net als HY5 belangrijke transcriptiefactoren in de plant die betrokken zijn bij veel processen. Vaak functioneren PIFs als antagonisten van HY5: in veel gevallen hebben ze precies het tegenovergestelde effect op processen in de plant. Zo stimuleren PIF eiwitten juist de aanmaak/activiteit van groeihormonen GA en auxine en onderdrukken ze doorgaans de aanmaak/activiteit van afweers hormonen SA en JA. Er zijn meerdere soorten PIF eiwitten en dus ook meerdere *PIF* genen. Echter, in dit onderzoek bleek het uiteindelijk alleen mogelijk om de expressie van *PIF5* te meten. De qPCR analyses met primers uit de literatuur voor *PIF3* en *PIF4* bleken niet te werken. Wat de reden hiervoor was is niet verder onderzocht binnen dit project.

Uit de analyses van Hi Power bladmateriaal blijkt alleen een statistisch significant verschil in expressie van *PIF5* tussen de spectra Hoog FR1 en Hoog FR2: laatstgenoemde resulteert in hogere expressie van *PIF5*. De analyses laten een ander resultaat zien voor Dee Flexion. In deze cultivar blijkt *PIF5* expressie significant hoger onder het Referentiespectrum dan onder het Hoog W spectrum. Hoewel uit deze resultaten blijkt dat er in sommige gevallen een effect is van het lichtspectrum op *PIF5* genexpressie, en mogelijk dus op de aanmaak van deze transcriptiefactor, hoeft dat niet te duiden op een verandering in activiteit van het PIF5 eiwit. Om daar meer inzicht in te krijgen is ook gekeken naar expressie van *EXPA1*. Vanuit onderzoek met *Arabidopsis* is namelijk bekend dat PIF eiwitten expansine (*EXPA*) genen kunnen activeren (Quint *et al.*, 2016; Pedmale *et al.*, 2016). Deze genen coderen voor expansine enzymen die celwanden minder rigide maken, wat celstrekking mogelijk maakt.

Uit de genexpressie analyse van *EXPA1* blijkt in beide cultivars een vergelijkbare trend zichtbaar in de effecten van de geteste lichtspectra op de expressie van dit gen. De expressie van *EXPA1* in het blad is het hoogst onder het Referentiespectrum, iets lager onder de Hoog FR1 en Hoog FR2 spectra, en het laagst onder het Hoog W spectrum. Deze trend is tegenovergesteld aan die van *HY5* expressie onder de verschillende lichtspectra, wat een antagonistische relatie tussen de *HY5* en *PIF* transcriptiefactoren lijkt te bevestigen. In Hi Power was alleen het verschil tussen *EXPA1* expressie onder het Referentiespectrum en het Hoog W spectrum statistisch significant. In Dee Flexion was het verschil tussen *EXPA1* expressie onder het Referentiespectrum en de drie andere spectra statistisch significant.



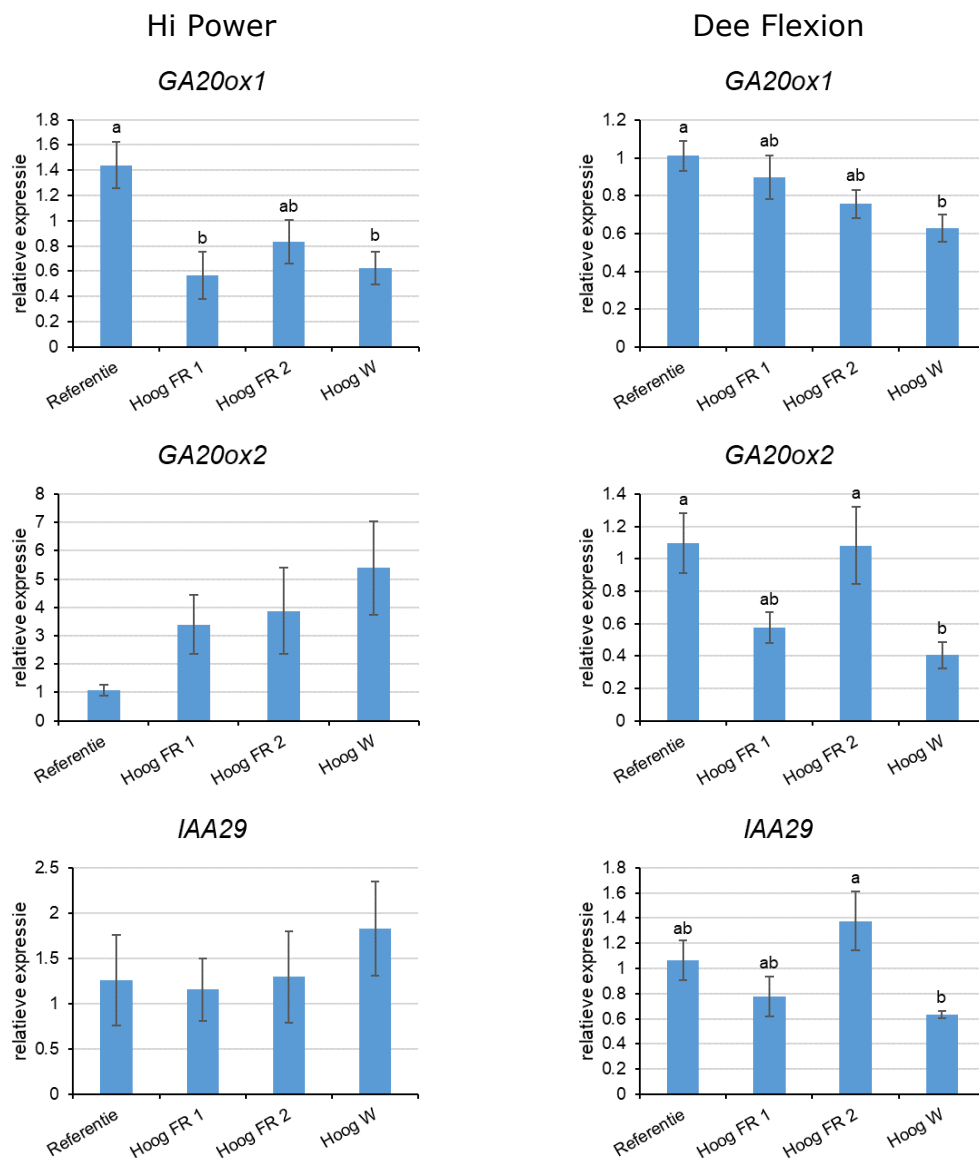
Figuur 43 Expressie van de genen *HY5.1*, *PIF5* en *EXPA1* onder verschillende lichtspectra in het blad van komkommer Cv. Hi Power en Cv. Dee Flexion. Expressie is relatief ten opzichte van expressie onder het Referentie spectrum. Data zijn gemiddelden $\pm$ standaardfout ($n=4$ of 5). Verschillende letters betekent statistisch significant verschil ($P < 0.05$). Detail berekeningen en gebruikte statistische tests in paragraaf 4.2.

De hierboven beschreven resultaten duiden erop dat de activiteit van de *HY5* en *PIF* transcriptiefactoren wordt beïnvloedt door het lichtspectrum. Aangezien deze transcriptiefactoren invloed hebben op de hormoonhuishouding is er vervolgens gekeken naar de expressie van genen die in de literatuur worden aangemerkt als potentiële indicatoren voor de aanmaak of activiteit van specifieke hormonen.

In Figuur 44 zijn de resultaten te zien van genexpressie analyses voor de genen *GA20ox1* en *GA20ox2*, beiden indicatoren voor de aanmaak van het groeihormoon GA. Een hogere genexpressie is hierbij een indicatie voor een hogere GA concentratie. Daarnaast is de expressie van *IAA29* geanalyseerd, een indicator voor de signaaltransductieroute die wordt geactiveerd door het groeihormoon auxine.

Uit de resultaten blijkt in het blad van beide cultivars een significant verschil in expressie van *GA20ox1* tussen het Referentiespectrum en het Hoog W spectrum, waarbij de expressie onder eerstgenoemde hoger is. Dit zou in overeenstemming zijn met informatie uit de literatuur dat HY5 de aanmaak van GA onderdrukt.

Echter, de expressie van *GA20ox2* laat een iets ander beeld zien, waarbij dit beeld ook verschilt tussen de cultivars. In Hi Power heeft het spectrum geen significant effect op de expressie van dit gen. In Dee Flexion is de expressie van *GA20ox2* net als van *GA20ox1* significant hoger onder het Referentiespectrum dan onder Hoog W en dat geldt ook voor de expressie onder het Hoog FR2 spectrum.



Figuur 44 Expressie van de genen *GA20ox1* en *2* en *IAA29* onder verschillende lichtspectra in het blad van komkommer Cv. Hi Power en Cv. Dee Flexion. Expressie is relatief ten opzichte van expressie onder het Referentie spectrum. Data zijn gemiddelden $\pm$ standaardfout ($n=4$ of 5). Verschillende letters betekent statistisch significant verschil ($P<0.05$). Details berekeningen en gebruikte statistische tests in paragraaf 4.2.

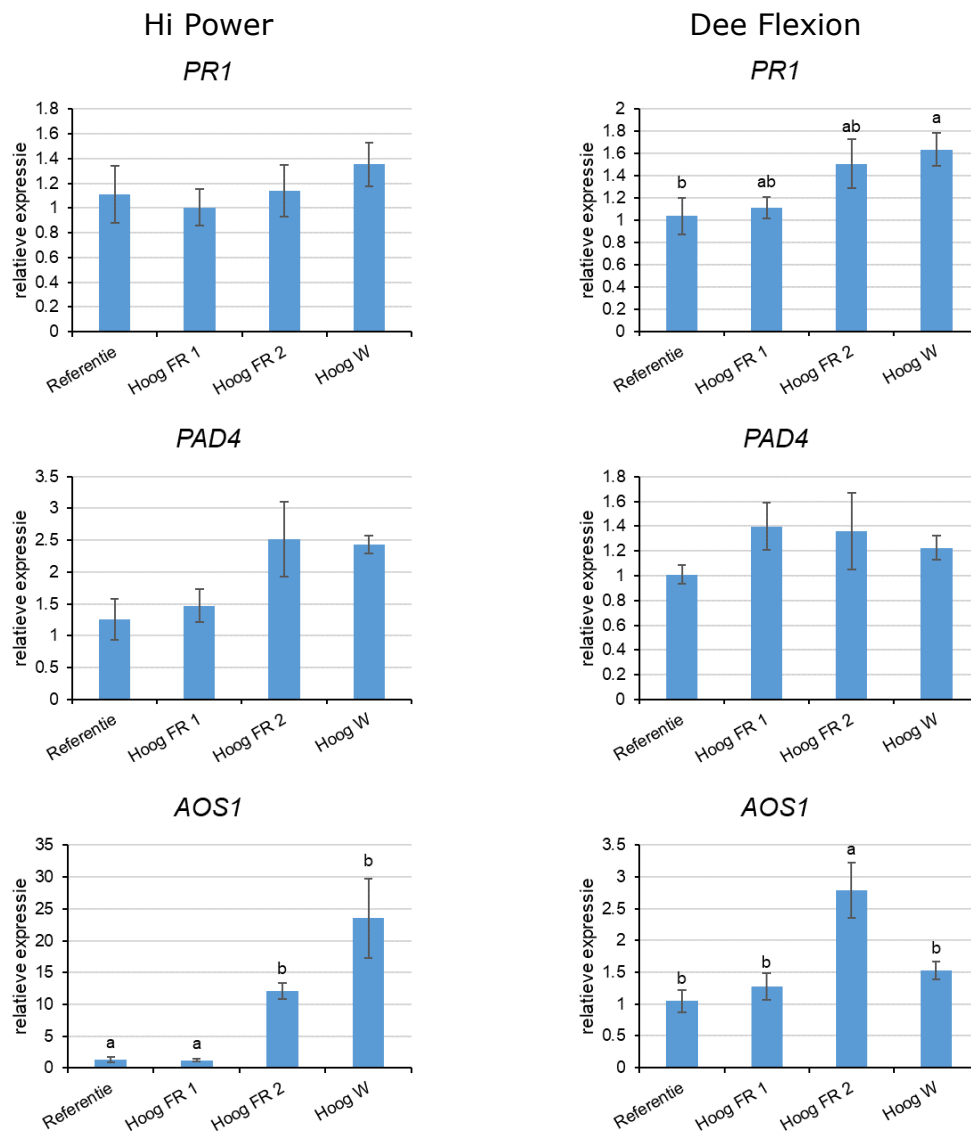
4.3.2 Plantweerbaarheid

Figuur B2.3 in bijlage laat verschillen in expressie zien tussen de twee cultivars onder het referentiespectrum. Er zijn verschillen gevonden voor de genen *PR1* en *AOS1*, die respectievelijk een rol spelen in de SA en JA afweerroutes.

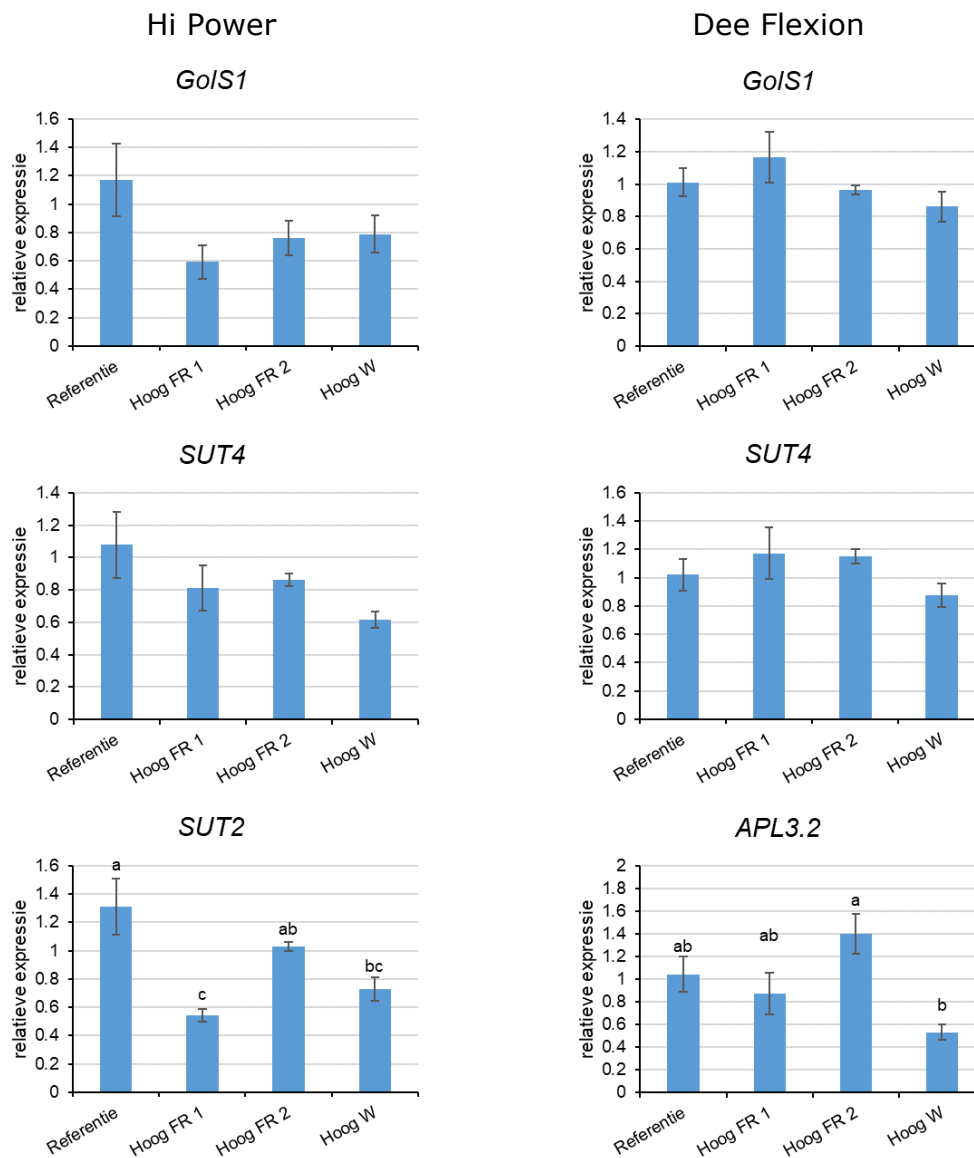
Trips aantasting activeert voornamelijk de JA-route, hoewel de balans tussen SA en JA afhankelijk kan zijn van de plantensoort, de omstandigheden, en de ernst van de aantasting. Een overactieve SA-route kan soms de effectiviteit van JA-afweer verminderen, omdat deze routes elkaar onderdrukkend kunnen beïnvloeden.

Voornamelijk de JA-afweerroute is versterkt in beide cultivars, bij de behandelingen Hoog FR2 en Hoog W, waardoor planten beter bestand zijn tegen trips.

Gen	Functie	Betekenis	Referentie
<i>LOX1</i>	Rol in JA afweerroute	Indicatie JA concentratie/activiteit	Yuan <i>et al.</i> , 2019
<i>LOX2</i>	Rol in JA afweerroute	Indicatie JA concentratie/activiteit	Yuan <i>et al.</i> , 2019
<i>AOS1</i>	Rol in JA afweerroute	Indicatie JA concentratie/activiteit	Yuan <i>et al.</i> , 2019
<i>ACO</i>	Aanmaak ethyleen	Indicatie ethyleen concentratie/activiteit	Yuan <i>et al.</i> , 2019
<i>PAD4</i>	Rol in SA afweerroute	Indicatie SA concentratie/activiteit	Yuan <i>et al.</i> , 2019
<i>PR1</i>	Rol in SA afweerroute	Indicatie SA concentratie/activiteit	Wang <i>et al.</i> , 2010



Figuur 45 Expressie van de genen *PR1*, *PAD4* en *AOS1* onder verschillende lichtspectra in het blad van komkommer Cv. Hi Power en Cv. Dee Flexion. Expressie is relatief ten opzichte van expressie onder het Referentie spectrum. Data zijn gemiddelden $\pm$ standaardfout ($n=5$). Verschillende letters betekent statistisch significant verschil ($P<0.05$). Details berekeningen en gebruikte statistische tests in paragraaf 4.2.



Figuur 46 Expressie van de genen *GoIS1*, *SUT4*, *SUT2* en *APL3.2* onder verschillende lichtspectra in het blad van komkommer. Expressie van *GoIS1* en *SUT4* is gemeten in de cultivars *Hi Power* en *Dee Flexion*. *SUT2* expressie is alleen gemeten in *Hi Power*, *APL3.2* expressie alleen in *Dee Flexion*. Expressie is relatief ten opzichte van expressie onder het Referentie spectrum. Data zijn gemiddelden $\pm$ standaardfout ($n=4$ of 5). Verschillende letters betekent statistisch significant verschil ($P<0.05$). Details berekeningen en gebruikte statistische tests in paragraaf 4.2.

4.4 Discussie en conclusies

Resultaten laten zien dat de geteste lichtspectra invloed hebben op de expressie van verschillende genen in het blad van de komkommer cultivars Hi Power en Dee Flexion. Hierbij is de invloed van het lichtspectrum op genexpressie soms cultivar-afhankelijk, maar niet altijd.

De resultaten van de genexpressie analyses van *HY5* en *EXPA1* (Figuur 4.1) duiden erop dat de activiteit van de belangrijke *HY5* en *PIF* transcriptiefactoren in het blad van beide cultivars wordt beïnvloed door het lichtspectrum. Daarbij is het verschil tussen het Referentiespectrum en het Hoog W spectrum het grootst: *HY5* activiteit lijkt het hoogst onder het Hoog W spectrum en het laagst onder het Referentiespectrum, en voor *PIF* activiteit is het precies andersom. Stimulering van *HY5* en onderdrukking van *PIF* activiteit onder het Hoog W spectrum komt mogelijk door het hogere aandeel blauw licht in dit spectrum (12% i.p.v. 5%).

Aangezien *HY5* celstrekking onderdrukt en *PIF* eiwitten dit juist stimuleert, verklaren de resultaten van de genexpressie analyses van *HY5* en *EXPA1* mogelijk het lagere Specifieke Bladoppervlak (SLA) van de planten geteeld onder het Hoog W spectrum ten opzichte van het Referentiespectrum (zie Figuur 20).

In onder andere *Arabidopsis* en tomaat is aangetoond dat *HY5* ook betrokken is bij de aanmaak van componenten van het fotosyntheseapparaat en secundaire metabolieten waaronder flavonoïden. Hogere bladeren (nr. 6 en 7 geteld van de top) van planten die geteeld werden onder het Referentiespectrum hadden een lagere maximale fotosynthese bij hoge lichtintensiteiten dan planten geteeld onder het Hoog W spectrum (zie Figuur 31). Dit leidt niet tot een hogere productie omdat in deze teelt niet vaak hoge intensiteiten voorkwamen. Mogelijk komt dat doordat de verhoogde activiteit van *HY5* resulteert in een hogere maximale fotosynthesecapaciteit van deze bladeren. Dit zou dan niet het gevolg zijn van een toename in de aanmaak van chlorofyl, aangezien het chlorofylgehalte juist lager was in bladeren van planten geteeld onder het Hoog W spectrum (zie Figuur 36). De concentratie flavonoïden in het blad onder de verschillende lichtspectra volgt een trend vergelijkbaar met die van *HY5* expressie (zie Figuur 37). Verhoogde *HY5* activiteit, die hier uit blijkt, is daarmee een mogelijke verklaring voor hogere flavonoïdeconcentraties in het blad onder het Hoog FR2 en Hoog W spectrum.

Kanttekeningen

Expressie van genen gebruikt als indicatie voor activiteit van belangrijke transcriptiefactoren (*HY5* en *PIFs*) en hormonen. Hoewel dit helpt meer inzicht te krijgen in de regulatie van fysiologische processen onder de verschillende geteste lichtspectra heeft het ook beperkingen. Het genoom van komkommer kent naar schatting zo'n 24000 verschillende genen. Dat maakt het dus lastig erachter te komen of de genen zijn geselecteerd voor onze analyses die daadwerkelijk de meest betrouwbare indicatoren vormen voor de activiteit van specifieke transcriptiefactoren of hormonen. Om deze redenen hebben we ook naar meerdere genen gekeken in dit project. Echter, als deze geen eenduidig resultaat laten zien dan bemoeilijkt dit de interpretatie (zoals bijvoorbeeld in dit geval bij de expressie van afweer- en suikertransportgenen). Toekomstig onderzoek naar de regulatie van de hormoonhuishouding en andere (moleculair) fysiologische mechanismen zal helpen bij het identificeren van meer genen die als aantoonbaar betrouwbare indicatoren kunnen worden gebruikt. Een andere punt om rekening mee te houden bij het analyseren van genexpressie is dat de expressie van genen in veel gevallen door de biologische klok worden gereguleerd (zoals *HY5*). Dit betekent dat de expressie afhankelijk kan zijn van het moment waarop er bemonsterd wordt. In dit project is er uiteindelijk voor gekozen om alleen monsters te analyseren die op het midden van de dag zijn genomen. Wat er op andere momenten op de dag gebeurt met de expressie van de hierboven besproken genen is dus niet met zekerheid te zeggen.

5 Discussie en conclusies

Ontwikkeling faciliteit

De faciliteit is uitgerust met geavanceerde technieken die uitstekend geschikt zijn voor belichtings- en spectrumonderzoek in hoge draad gewassen. Om optimale prestaties te waarborgen, is een korte testteelt uitgevoerd die bevestigde dat het systeem naar behoren functioneert en nauwkeurig kan worden ingesteld om het gewenste klimaat in alle vakken te realiseren. Correcte realisatie blijft bij elk experiment een aandachtspunt.

Dankzij gerichte aanpassingen, zoals het isoleren van leidingen en delen van het groeibuisnetwerk, is de temperatuurverdeling verbeterd, wat bijdraagt aan een constanter klimaat. De LED-lichtintensiteit kan nauwkeurig worden afgestemd op de gewenste setpoints, met minimale afwijkingen tussen de ingestelde waarden en het gemiddelde per vak.

Een belangrijke aanpassing die gedaan kan worden is het toevoegen van 4 individuele kraanvakken aan de afdelingen. Op die manier kunnen verschillen in drain en watergift beter worden beheerst.

Groei en ontwikkeling

Beide cultivars reageren vergelijkbaar op de lichtbehandelingen voor wat betreft de biomassaproductie. In beide gevallen leidt behandeling Hoog FR1, waarbij rood licht is vervangen met verrood licht, niet tot een verschil in droge stof productie wat de hypothese bevestigt (zie 3.1). Eveneens, in beide gevallen leidt behandeling Hoog FR2 tot een significant hogere droge stof productie. In het geval van Dee Flexion loopt dat op tot 21% verschil terwijl het verschil in totale fotonenflux 9% was. Tenslotte leidt behandeling Hoog W tot hetzelfde resultaat als de referentie bij Hi Power maar werd er bij Dee Flexion een significant hogere biomassa geproduceerd.

We stelden ook dat een verlaging van de R:FR verhouding (behandeling Hoog FR1) de morfologie zou verbeteren. Dit is alleen waargenomen bij Dee Flexion, waar de lichtonderschepping ook hoger was doordat de bladeren groter waren, maar bij Hi Power was de morfologie vergelijkbaar met de referentiebehandeling. Het netto resultaat, in tegenstelling tot de hypothese, is dat de biomassa vergelijkbaar is en niet toeneemt wanneer meer verrood ten koste van rood wordt toegepast.

Bij behandeling Hoog FR2 worden de grootste effecten waargenomen, omdat daar naast verandering in R:FR verhouding ook de totale fotonenflux is verhoogd. Hierdoor wordt de morfologie beïnvloed, maar dit leidt niet tot een hogere lichtonderschepping omdat op de toegenomen bladoppervlakte werd gereageerd via een snoei beleid waarbij meer jonge bladeren werden verwijderd. Het grootste effect van deze behandeling wordt veroorzaakt door een toename in de fotosynthese. Recente literatuur wijst er ook op dat verrood hier een invloed op heeft wat de definitie van PAR enigszins ter discussie stelt (Zhen & van Iersel, 2017). Bij komkommer is dit nog niet uitgebreid gedocumenteerd maar zijn wel verrood afhankelijke effecten zoals toegenomen lengtegroei, bladoppervlakte en versgewicht productie gevonden (Zhang *et al.*, 2024). Een belangrijke conclusie is dat verrood licht de fotosynthesesnelheid beïnvloed, afhankelijk van de verhoudingen met andere golflengten.

Bij Hoog W, waar niet alleen rood is vervangen door verrood, maar ook door blauw en groen, was de biomassaproductie in de behandeling Hoog W vergelijkbaar met de referentie. Zoals gesteld, is de morfologie beïnvloed door langere bladstelen maar leidde dit niet tot een hogere lichtonderschepping. De fotosynthese vergelijkbaar met de referentie. Er trad dus niet het effect op zoals bij Hoog FR2. Mogelijk heeft dit te maken met een verdere afname van rood licht door meer blauw en groen toe te passen, waardoor de balans tussen de fotosystemen weer veranderd. Vast staat dat blauw en groen licht een lagere kwantum efficiëntie hebben doordat deze golflengten meer worden geabsorbeerd door niet-fotosynthetisch actieve pigmenten (Terashima *et al.*, 2009).

Alleen bij Dee Flexion heeft dit spectrum effect op de morfologie waardoor de totale bladoppervlakte waarschijnlijk heeft geleid tot een hogere lichtonderschepping, hoewel dit niet significant hoger was op de tijdstippen dat het gemeten is. Omdat meer biomassa naar de vegetatieve delen is gegaan, leidde dit niet tot een hogere vruchtproductie. Het resultaat bevestigt dus de hypothese, dat er geen verschil is in vergelijking met de referentiebehandeling.

Bij alle behandelingen met een hoger aandeel FR zien we dat de plant meer biomassa investeert in bladstelen en de hoofdstengel. Dit leidde ertoe dat de vruchtproductie minder verschilde van de referentie dan de droge stofproductie. Uiteindelijk gaat het in de praktijk om de hoeveelheid en kwaliteit van de vruchten, en hoe efficiënt deze worden geproduceerd.

Productie en lichtbenuttingsefficiëntie

productie nam ten opzichte van de referentie af bij behandeling Hoog FR1, terwijl deze hoger was bij Hoog FR2. De hoogste productie werd gemeten bij Dee Flexion, met een totaal van 71.4 kg/m² terwijl de referentie een productie had van 66.3 kg/m², een verschil van 8%. Bij Hi Power was het verschil kleiner, en zat er 5% verschil tussen de referentie en Hoog FR2 behandelingen, met producties van respectievelijk 65.6 kg/m² en 68.6 kg/m².

Een manier om te bepalen of een teelt op efficiënte wijze is verlopen, is om de vruchtproductie uit te drukken in de lichtbenuttingsefficiëntie (LBE) in gram per mol licht. Daarbij wordt gevonden dat als FR niet wordt meegenomen in de berekeningen, dat de LBE wordt overschat in de behandelingen waar meer FR wordt gegeven. Over het algemeen was de LBE hoog; dit hangt mogelijk samen met het constante klimaat en de strategie van een wekelijks aangepast snoeibeleid van bladeren en vruchten. In combinatie met monitoring van de lichtonderschepping kan zo voorkomen worden dat de lichtonderschepping te hoog oploopt waardoor er bladeren zijn die netto energie kosten in plaats van opleveren. Aan de andere kant kost een te lage lichtonderschepping ook productie. Het streven om in een wintersituatie tussen de 85-90% te onderscheppen lijkt een goede basis te vormen voor een efficiënt gewas.

Wanneer de LBE wordt uitgedrukt in kWh/kg vruchten, blijkt de referentiebehandeling de hoogste waarde te hebben, aangezien verrood licht minder efficiënt geproduceerd kan worden dan rood licht ten tijde van dit onderzoek. De Hoog W behandeling heeft de laagste LBE (hoogste kWh/kg), omdat de totale lichtsom hoger was en dit spectrum meer energie vereist in combinatie met een gelijke. Dit resulteert in een toename van 2.7 kWh/kg naar 3.5 kWh/kg, een toename van bijna 30% ten opzichte van de referentie in het geval van Hi Power. Hieruit blijkt dat de keuze voor het lichtspectrum tot grote verschillen in energieverbruik kunnen leiden, waardoor juiste kennis over het lichtspectrum van essentieel belang is bij het selecteren van een belichtingsinstallatie, afhankelijk van de teeltdoelen.

Omdat in de behandeling Hoog FR2 het verschil in droge stof productie groter was dan de vruchtproductie in vergelijking met de referentie, is dat een indicatie dat er meer potentie is om de vruchtproductie te verhogen. Er is 21% meer biomassa geproduceerd maar uiteindelijk is het verschil in vruchtproductie maar 8%. Mogelijk kan er een hogere vruchtproductie gerealiseerd worden door een verbeterd vrucht- en/of bladsnoeibeleid. Hier is verder onderzoek naar nodig.

Watergift en voedingsopname

Er zijn kleine verschillen in EC gerealiseerd die mogelijk effect gehad kunnen hebben op het gewas. De wateropname was iets hoger in alle behandelingen ten opzichte van de referentie. Dit komt overeen met de gemeten huidmondjesgeleidbaarheid, die een stijgende trend laat zijn bij een hoger aandeel verrood of wit licht. Echter, gecorrigeerd voor deze verschillen in opname, zijn er geen elementen die meer of minder goed worden opgenomen onder de verschillende lichtspectra. Verschillen in opname van elementen kunnen dus eerder worden gerelateerd aan de hoeveelheid wateropname dan aan de verschillende lichtspectra.

Gewasgezondheid

Uit het onderzoek naar trips blijkt dat Dee Flexion gevoeliger is voor schade dan Hi Power. De cultivars reageren verschillend op de aanwezigheid van trips. Bij Hi Power zijn er geen significante verschillen tussen de behandelingen. Bij Dee Flexion is echter vastgesteld dat de behandelingen met Hoog FR2 en Hoog W leiden tot een duidelijk lagere mate van aantasting, met een afname van respectievelijk 45% en 35%. Dit lijkt samen te vallen met de hogere flavonoïde gehalten, een pigment wat een rol speelt in de afweer.

Het is onduidelijk waarom dit bij Hi Power niet het geval is. Mogelijk speelde meeldauwaantasting een rol, waardoor de SA-afweerroute actief is. Dit kan de effectiviteit van de JA-afweer verminderen. Duidelijk is dat het lichtspectrum de weerbaarheid van het gewas beïnvloedt. De hypothese was dat de plantweerbaarheid beter zou zijn in de Hoog W behandeling. Dit is echter niet het geval, en er zijn geen aanwijzingen dat het uit het oogpunt van plantweerbaarheid noodzakelijk is om een hogere aandeel blauw of groen licht toe te passen voor de onderzochte ziekten en plagen.

Effect van lichtspectra op genexpressie

De resultaten tonen aan dat de geteste lichtspectra invloed hebben op de genexpressie in het blad van de komkommerscultivars Hi Power en Dee Flexion. Deze invloed is soms afhankelijk van de cultivar. Het Hoog W spectrum, met een hoger aandeel blauw licht (12%), verhoogt de activiteit van HY5 en onderdrukt die van PIF, terwijl het Referentiespectrum het tegenovergestelde effect heeft.

De verhoogde HY5-activiteit onder het Hoog W spectrum kan het lagere Specifieke Bladoppervlak (SLA) verklaren, doordat HY5 celstrekking onderdrukt en PIF dit juist stimuleert. Daarnaast lijkt de hogere HY5-activiteit de maximale fotosynthesecapaciteit van bladeren te verhogen, ondanks een lager chlorofylgehalte. Ook de concentratie flavonoiden in de bladeren is hoger bij de Hoog FR2 en Hoog W behandelingen, wat mogelijk samenhangt met de verhoogde HY5-activiteit. Deze resultaten suggereren dat de Hoog FR2 en Hoog W spectra positieve effecten heeft op de aanmaak van secundaire metabolieten zoals flavonoiden.

Door het lichtspectrum te variëren, kunnen planten mogelijk worden gestuurd naar meer of minder celstrekking en andere planteigenschappen. Dit biedt waardevolle inzichten voor teeltstrategieën om groei en plantvorm te optimaliseren.

Conclusies

Het IDC LED Hoge Draad is uitgerust met geavanceerde technieken voor belichtings- en spectrumonderzoek, en na een testteelt werd bevestigd dat het systeem goed functioneert en het gewenste klimaat kan realiseren. Nauwkeurige sturing van temperatuur blijft een aandachtspunt.

De onderzochte cultivars Hi Power en Dee Flexion reageren vergelijkbaar op de lichtbehandelingen, met Hoog FR2 die leidt tot hogere droge stofproductie, terwijl Hoog W geen significante effecten heeft op de biomassa in vergelijking met de referentiebehandeling. Behandeling Hoog W verbruikt het meeste energie wat de efficiëntie beïnvloedt. Toevoeging van blauw en groen licht, bovenop de hoeveelheden die in het referentiespectrum aanwezig zijn, leidt niet tot een betere teelt, maar wel tot hogere kosten. Er zijn kleine verschillen in wateropname en drain EC gevonden, maar geen significante veranderingen in de opname van elementen tussen de verschillende lichtspectra.

In termen van lichtbenuttingsefficiëntie (LBE) lijkt de referentiebehandeling de beste keuze in termen van energieverbruik, maar Hoog FR2 biedt een goede balans tussen hogere biomassa productie en efficiënte lichtbenutting, in combinatie met een betere weerbaarheid tegen trips aantasting.

Cultivar Dee Flexion is gevoeliger voor trips, en de behandelingen met Hoog FR2 en Hoog W leiden tot minder schade, mogelijk door verhoogde flavonoïdegehaltes. De lichtspectra beïnvloedde de genexpressie van Hi Power en Dee Flexion, waardoor de morfologie en fysiologie werd beïnvloedt. Deze bevindingen suggereren dat sturing met lichtspectra kan helpen om plantengroei en secundaire metabolieten zoals flavonoiden te optimaliseren.

Met de toename in mogelijkheden van sturing van LED, is het van belang om kennis te genereren waarbij de balans wordt gevonden tussen het toepassen van fundamentele kennis, en inachtneming van de doelstellingen om met minder energie, meer te produceren op een verantwoorde manier.

Literatuur

- Dieleman, A., Carpineti, C., Kruidhof, M., & Weerheim, K. (2022). *Sturen met lichtspectrum: gewasgroei en plantweerbaarheid bij komkommer en tomaat: Deelrapport II van het project "LED licht bij zonlicht."* <https://doi.org/10.18174/629685>
- Dieleman, A., Weerheim, K., Kruidhof, M., Carpineti, C., Fradin, E., Plantenga, F., van Hoogdalem, M., & Leiss, K. (2022). *Duurzame teeltsystemen met LEDs.* <https://doi.org/10.18174/579971>
- Marcal Balk, T., Helmus-Schuddebeurs, L., Smith, R., & Raaphorst, M. (2020). *De groenste komkommer.* https://www.kasalsenergiebron.nl/content/research/20094_Eindrapport_De_Groenste_Komkommer.pdf
- Sonneveld, C., & Voogt, W. (2009). Plant Nutrition in Future Greenhouse Production. *Plant Nutrition of Greenhouse Crops*, 393–403. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2532-6_17
- Terashima, I., Fujita, T., Inoue, T., Chow, W. S., & Oguchi, R. (2009). Green Light Drives Leaf Photosynthesis More Efficiently than Red Light in Strong White Light: Revisiting the Enigmatic Question of Why Leaves are Green. *Plant and Cell Physiology*, 50(4), 684–697. <https://doi.org/10.1093/PCP/PCP034>
- Zhang, M., Ju, J., Hu, Y., He, R., Song, J., & Liu, H. (2024). Meta-Analysis of the Impact of Far-Red Light on Vegetable Crop Growth and Quality. In *Plants* (Vol. 13, Issue 17). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/plants13172508>
- Zhen, S., & van Iersel, M. W. (2017). Far-red light is needed for efficient photochemistry and photosynthesis. *Journal of Plant Physiology*, 209, 115–122. <https://doi.org/10.1016/J.JPLPH.2016.12.004>

Literatuur hoofdstuk 4

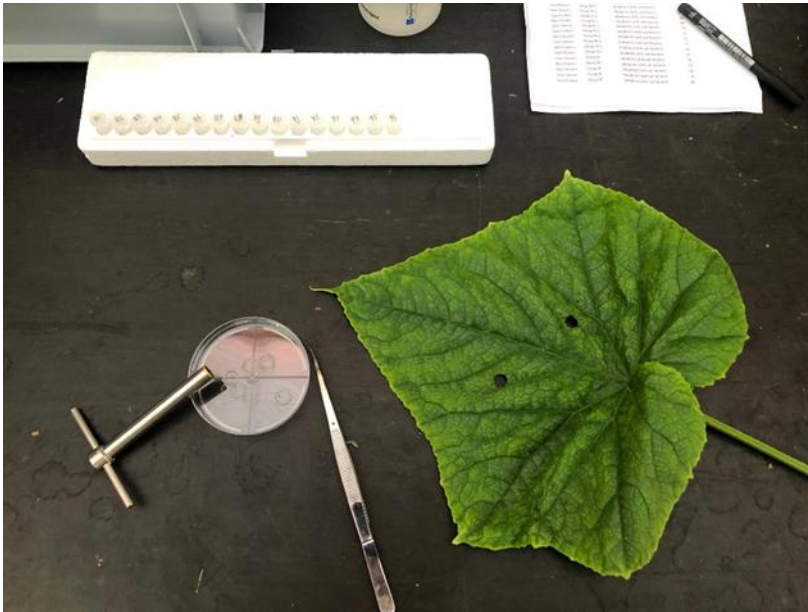
- Bai, L., Deng, H., Zhang, X., Yu, X., & Li, Y. (2016). Gibberellin is involved in inhibition of cucumber growth and nitrogen uptake at suboptimal root-zone temperatures. *PloS one*, 11(5), e0156188.
- Davies, P. J. (Ed.) 2010. *Plant hormones*. Springer, Dordrecht.
- Gan, D., Zhuang, D., Ding, F., Yu, Z., & Zhao, Y. (2013). Identification and expression analysis of primary auxin-responsive Aux/IAA gene family in cucumber (*Cucumis sativus*). *Journal of Genetics*, 92(3), 513-521.
- Gangappa, S. N., & Botto, J. F. (2016). The multifaceted roles of HY5 in plant growth and development. *Molecular plant*, 9(10), 1353-1365.
- Huang, S., Li, R., Zhang, Z., Li, L. I., Gu, X., Fan, W., ... & Li, S. (2009). The genome of the cucumber, *Cucumis sativus* L. *Nature genetics*, 41(12), 1275-1281.
- Li, Y., Feng, S., Ma, S., Sui, X., & Zhang, Z. (2017). Spatiotemporal expression and substrate specificity analysis of the cucumber SWEET gene family. *Frontiers in plant science*, 8, 1855.
- Liang, Y., Kang, C., Kaiser, E., Kuang, Y., Yang, Q., & Li, T. (2021). Red/blue light ratios induce morphology and physiology alterations differently in cucumber and tomato. *Scientia Horticulturae*, 281, 109995.
- Liu, X., Dong, S., Miao, H., Bo, K., Li, C., Yang, Y., ... & Zhang, S. (2021). Genome-Wide Analysis of Expansins and their Role in Fruit Spine Development in Cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Horticultural Plant Journal*.
- Ma, S., Sun, L., Sui, X., Li, Y., Chang, Y., Fan, J., & Zhang, Z. (2019). Phloem loading in cucumber: combined symplastic and apoplastic strategies. *The Plant Journal*, 98(3), 391-404.
- Miao, L., Li, Q., Sun, T. S., Chai, S., Wang, C., Bai, L., ... & Yu, X. (2021). Sugars promote graft union development in the heterograft of cucumber onto pumpkin. *Horticulture Research*, 8.
- Osipowski, P., Pawelkowicz, M., Wojcieszek, M., Skarzyńska, A., Przybecki, Z., & Plader, W. (2020). A high-quality cucumber genome assembly enhances computational comparative genomics. *Molecular Genetics and Genomics*, 295(1), 177-193.
- Pedmale, U. V., Huang, S. S. C., Zander, M., Cole, B. J., Hetzel, J., Ljung, K., ... & Chory, J. (2016). Cryptochromes interact directly with PIFs to control plant growth in limiting blue light. *Cell*, 164(1-2), 233-245.
- Quint, M., Delker, C., Franklin, K. A., Wigge, P. A., Halliday, K. J., & Van Zanten, M. (2016). Molecular and genetic control of plant thermomorphogenesis. *Nature plants*, 2(1), 1-9.
- Rook, F., Corke, F., Card, R., Munz, G., Smith, C., & Bevan, M. W. (2001). Impaired sucrose-induction mutants reveal the modulation of sugar-induced starch biosynthetic gene expression by abscisic acid signalling. *The Plant Journal*, 26(4), 421-433.
- Song, J., Cao, K., Hao, Y., Song, S., Su, W., & Liu, H. (2019). Hypocotyl elongation is regulated by supplemental blue and red light in cucumber seedling. *Gene*, 707, 117-125.
- van Hoogdalem, M., Streminska, M., Arenas, Y. C., de Gelder, A., Weerheim, K., & Dieleman, A. (2021). Nieuwe balansen in Het Nieuwe Telen: hormonen en ecologie (No. WPR-996). Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research, Business unit Glastuinbouw.
- Wang, H., Jiang, Y. P., Yu, H. J., Xia, X. J., Shi, K., Zhou, Y. H., & Yu, J. Q. (2010). Light quality affects incidence of powdery mildew, expression of defence-related genes and associated metabolism in cucumber plants. *European journal of plant pathology*, 127(1), 125-135.
- Xiao, Y., Chu, L., Zhang, Y., Bian, Y., Xiao, J., & Xu, D. (2022). HY5: A pivotal regulator of light-dependent development in higher plants. *Frontiers in plant science*, 12, 800989.
- Yan, S., Che, G., Ding, L., Chen, Z., Liu, X., Wang, H., ... & Zhang, X. (2016). Different cucumber CsYUC genes regulate response to abiotic stresses and flower development. *Scientific Reports*, 6(1), 1-12.
- Yuan, M., Huang, Y., Ge, W., Jia, Z., Song, S., Zhang, L., & Huang, Y. (2019). Involvement of jasmonic acid, ethylene and salicylic acid signaling pathways behind the systemic resistance induced by *Trichoderma longibrachiatum* H9 in cucumber. *BMC genomics*, 20(1), 1-13.

Bijlage 1 Watergift en voeding

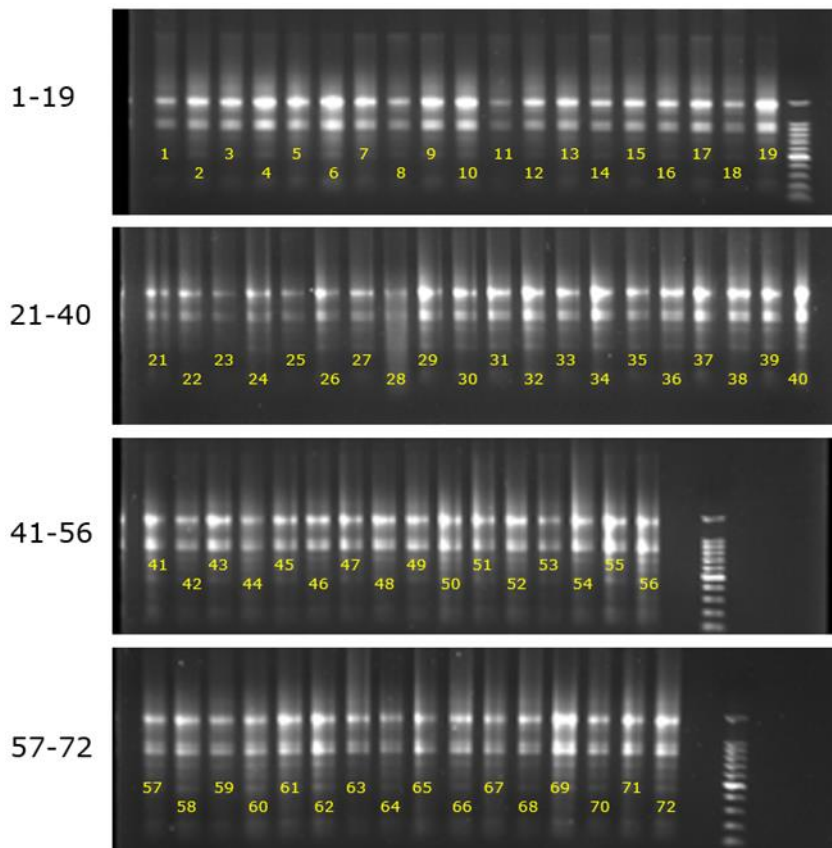
Tabel 12 *Tabel met nutriëntenconcentraties van het drainwater, gemiddelden over de hele teelt.*

	EC	pH	NH4	K	Na	Ca	Mg	NO ₃	Cl	SO ₄	P	Fe	Mn	Zn	B	Cu	Mo
Referentie	3,6	6,2	0,1	7,3	0,9	6,5	2,8	19,3	0,5	3,0	0,6	26,3	10,1	6,5	41,1	1,4	0,3
Hoog FR 1	3,6	5,7	0,1	7,0	0,9	6,6	2,8	19,0	0,4	3,0	0,7	29,8	11,0	7,6	43,1	1,5	0,3
Hoog FR 2	3,0	6,3	0,1	5,8	1,1	7,0	3,0	17,9	0,4	3,5	0,5	31,8	10,2	8,1	48,2	1,6	0,3
Hoog W	3,3	6,2	0,1	6,0	1,0	6,9	3,1	18,1	0,4	3,4	0,6	31,9	10,9	8,7	47,3	1,5	0,2

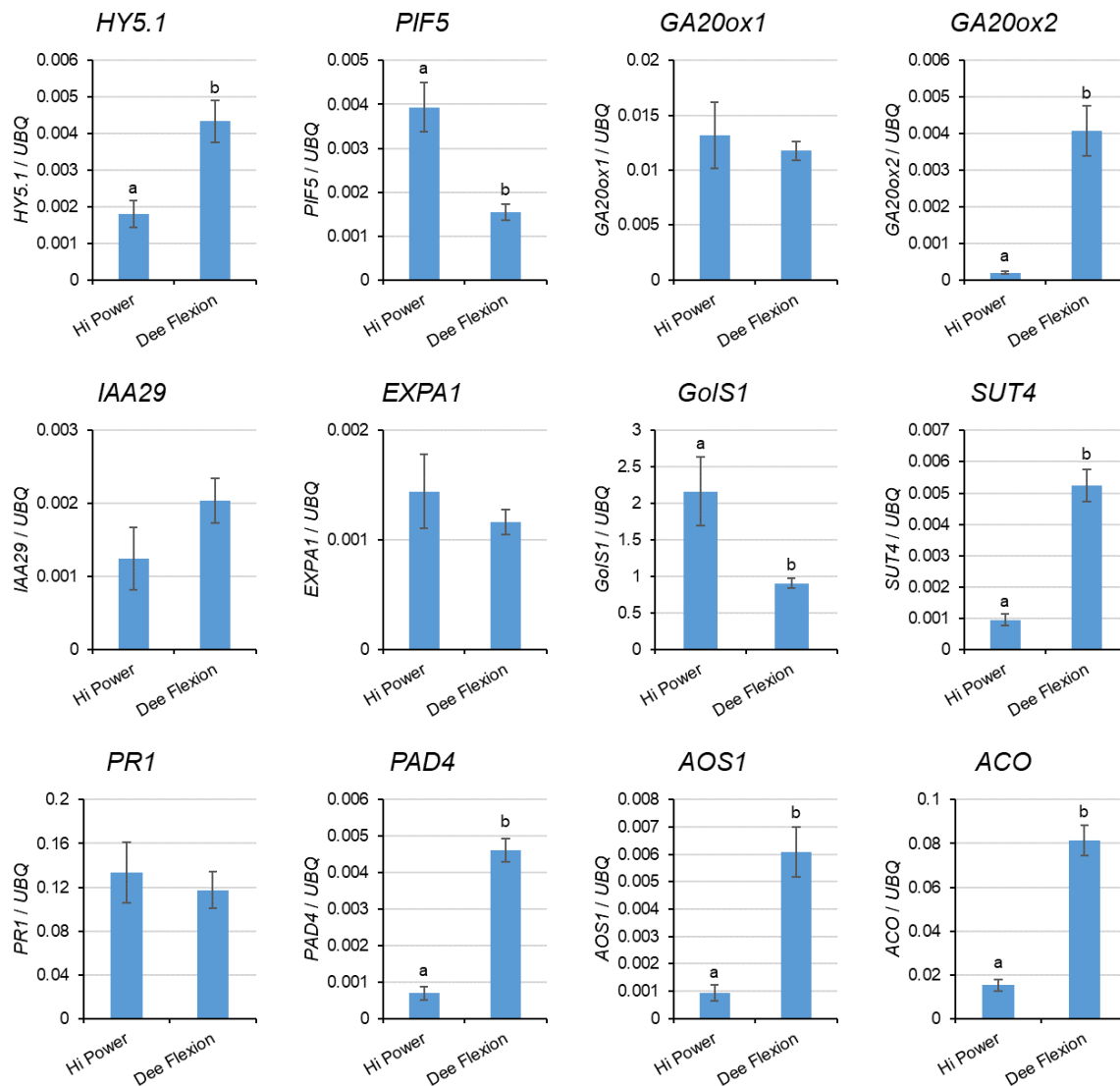
Bijlage 2 Genexpressie



Figuur B2.1 Het oogsten van bladmateriaal voor genexpressie analyse.



Figuur B2.2 Foto's van resultaten gelelektroforese. Van ieder bladmonster 2 μ L RNA extract geladen op agarose gel. Nummers corresponderen met bladmonster nummers in Tabel B4.1 en B4.2.



Figuur B2.3 Expressie van diverse genen onder het 'Referentie' lichtspectrum in het blad van komkommer Cv. *Hi Power* en Cv. *Dee Flexion*. Expressie is steeds ten opzichte van expressie van het referentiegen UBQ. Data zijn gemiddelden $\pm$ standaardfout ($n=5$). Verschillende letters betekent statistisch significant verschil ($P<0.05$). Details berekeningen en gebruikte statistische tests in paragraaf 4.2.

Tabel B2.3 Genen.

Gen	Functie(s)	Waarom interessant?	Literatuur
<i>GoS1</i>	Suikertransport (export uit bladeren, floëem laden, passief)	Indicatie suikertransport van blad naar stengel en vrucht	Ma <i>et al.</i> , 2019
<i>SUT2</i>	Transport assimilaten (export uit bladeren, floëem laden, actief)	Indicatie suikertransport van blad naar stengel en vrucht	Ma <i>et al.</i> , 2019
<i>TUB</i>	Huishoud-gen	Gebruikt voor normalisatie genexpressie (interne controle)	Ma <i>et al.</i> , 2019
<i>EF1a</i>	Huishoud-gen	Gebruikt voor normalisatie genexpressie (interne controle)	Liang <i>et al.</i> , 2021
<i>HY5.1</i>	Transcriptiefactor; PIF-antagonist; remt strekking/cel-expansie; remt aanmaak groeihormonen; stimuleert afweer; stimuleert aanmaak bladpigmenten (chlorofyl en flavonoiden)	Indicatie van aanmaak en activiteit van HY5 transcriptiefactor	Liang <i>et al.</i> , 2021
<i>PIF4</i>	Transcriptiefactor; HY5-antagonist; stimuleert strekking/cel-expansie; stimuleert aanmaak groeihormonen; onderdrukt afweer	Indicatie van aanmaak van PIF4 transcriptiefactor	Song <i>et al.</i> , 2019
<i>GA20ox1</i>	Aanmaak GA	Indicatie GA concentratie/activiteit; mogelijk indicatie activiteit PIF transcriptiefactoren	Song <i>et al.</i> , 2019
<i>IAA02</i>	Auxine signalering (activiteit)	Indicatie auxine concentratie/activiteit	Gan <i>et al.</i> , 2013
<i>SUT4</i>	Suikertransport (export uit bladeren, floëem laden, actief)	Indicatie suikertransport van blad naar stengel en vrucht	Ma <i>et al.</i> , 2019
<i>SWEET12c</i>	Transport assimilaten (export uit bladeren, floëem laden, actief)	Indicatie suikertransport van blad naar stengel en vrucht	Li <i>et al.</i> , 2017
<i>APL3</i>	Aanmaak zetmeel synthese enzymen	Indicatie hoeveelheid beschikbare suikers in blad	Rook <i>et al.</i> , 2001; Miao <i>et al.</i> , 2021
<i>APL3.1</i>	Aanmaak zetmeel synthese enzymen	Indicatie hoeveelheid beschikbare suikers in blad	Rook <i>et al.</i> , 2001; Miao <i>et al.</i> , 2021
<i>APL3.2</i>	Aanmaak zetmeel synthese enzymen	Indicatie hoeveelheid beschikbare suikers in blad	Rook <i>et al.</i> , 2001; Miao <i>et al.</i> , 2021
<i>PIF5</i>	Transcriptiefactor; net als PIF4 mogelijk HY5-antagonist; stimuleert strekking/cel-expansie; stimuleert aanmaak groeihormonen; onderdrukt mogelijk afweer	Indicatie van aanmaak van PIF5 transcriptiefactor	Song <i>et al.</i> , 2019
<i>GA20ox2</i>	Aanmaak GA	Indicatie GA concentratie/activiteit; mogelijk indicatie activiteit PIF transcriptiefactoren	Song <i>et al.</i> , 2019
<i>YUC4</i>	Aanmaak auxine	Indicatie auxine concentratie/activiteit	Yan <i>et al.</i> , 2016
<i>YUC8</i>	Aanmaak auxine	Indicatie auxine concentratie/activiteit; mogelijk indicatie activiteit PIF transcriptiefactoren	Yan <i>et al.</i> , 2016
<i>YUC10b</i>	Aanmaak auxine	Indicatie auxine concentratie/activiteit	Yan <i>et al.</i> , 2016
<i>UBQ</i>	Huishoud-gen	Gebruikt voor normalisatie genexpressie (interne controle)	Yan <i>et al.</i> , 2016
<i>IAA19</i>	Rol in auxine signalering	Indicatie auxine concentratie/activiteit; mogelijk indicatie activiteit PIF transcriptiefactoren	Gan <i>et al.</i> , 2013
<i>IAA27</i>	Rol in auxine signalering	Indicatie auxine concentratie/activiteit	Gan <i>et al.</i> , 2013
<i>IAA29</i>	Rol in auxine signalering	Indicatie auxine concentratie/activiteit; mogelijk indicatie activiteit PIF transcriptiefactoren	Gan <i>et al.</i> , 2013
<i>GA2ox3</i>	Aanmaak GA	Indicatie GA concentratie/activiteit	Bai <i>et al.</i> , 2016
<i>ACT</i>	Huishoud-gen	Gebruikt voor normalisatie genexpressie (interne controle)	Bai <i>et al.</i> , 2016
<i>EXPA1</i>	Aanmaak expansine enzymen voor losmaken celwand zodat cel-expansie kan plaatsvinden	Indicatie activiteit transcriptiefactoren PIF4 en 5 (stimuleren <i>EXPA</i> genen) en HY5 (onderdrukt <i>EXPA</i> genen); indicatie cel-expansie	Quint <i>et al.</i> , 2016; Pedmale <i>et al.</i> , 2016; Liu <i>et al.</i> , 2021
<i>EXPA16</i>	Aanmaak expansine enzymen voor losmaken celwand zodat cel-expansie kan plaatsvinden	Indicatie activiteit transcriptiefactoren PIF4 en 5 (stimuleren <i>EXPA</i> genen) en HY5 (onderdrukt <i>EXPA</i> genen); indicatie cel-expansie	Quint <i>et al.</i> , 2016; Pedmale <i>et al.</i> , 2016; Liu <i>et al.</i> , 2021
<i>LOX1</i>	Rol in JA afweerroute	Indicatie JA concentratie/activiteit	Yuan <i>et al.</i> , 2019
<i>LOX2</i>	Rol in JA afweerroute	Indicatie JA concentratie/activiteit	Yuan <i>et al.</i> , 2019
<i>AOS1</i>	Rol in JA afweerroute	Indicatie JA concentratie/activiteit	Yuan <i>et al.</i> , 2019
<i>ACO</i>	Aanmaak ethyleen	Indicatie ethyleen concentratie/activiteit	Yuan <i>et al.</i> , 2019
<i>PAD4</i>	Rol in SA afweerroute	Indicatie SA concentratie/activiteit	Yuan <i>et al.</i> , 2019
<i>PR1</i>	Rol in SA afweerroute	Indicatie SA concentratie/activiteit	Wang <i>et al.</i> , 2010

Tabel B2.1 Overzicht resultaat RNA extractie uit bladmonsters genomen op 16 februari 2022.

Blad-monster	Cultivar	Datum bemonstering	Tijdstip bemonstering	Behandeling	RNA concentratie (ng/μl)	A260/A280
1	Hi Power	16-02-2022	08:00	Referentie	193.009	2.087
2	Hi Power	16-02-2022	08:00	Referentie	324.603	2.107
3	Hi Power	16-02-2022	08:00	Referentie	269.044	2.107
4	Hi Power	16-02-2022	08:00	Referentie	360.269	2.110
5	Hi Power	16-02-2022	08:00	Referentie	311.223	2.094
6	Hi Power	16-02-2022	08:00	Hoog FR 1	376.122	2.100
7	Hi Power	16-02-2022	08:00	Hoog FR 1	284.449	2.095
8	Hi Power	16-02-2022	08:00	Hoog FR 1	170.470	2.087
9	Hi Power	16-02-2022	08:00	Hoog FR 1	322.748	2.100
10	Hi Power	16-02-2022	08:00	Hoog FR 1	333.933	2.099
11	Hi Power	16-02-2022	08:00	Hoog FR 2	124.601	2.076
12	Hi Power	16-02-2022	08:00	Hoog FR 2	224.487	2.129
13	Hi Power	16-02-2022	08:00	Hoog FR 2	264.150	2.102
14	Hi Power	16-02-2022	08:00	Hoog FR 2	219.655	2.102
15	Hi Power	16-02-2022	08:00	Hoog FR 2	233.689	2.094
16	Hi Power	16-02-2022	08:00	Hoog W	260.151	2.113
17	Hi Power	16-02-2022	08:00	Hoog W	284.803	2.088
18	Hi Power	16-02-2022	08:00	Hoog W	166.496	2.107
19	Hi Power	16-02-2022	08:00	Hoog W	359.030	2.100
20	Hi Power	16-02-2022	08:00	Hoog W	267.050	2.102
21	Dee Flexion	16-02-2022	08:00	Referentie	196,999	2,085
22	Dee Flexion	16-02-2022	08:00	Referentie	196,716	2,089
23	Dee Flexion	16-02-2022	08:00	Referentie	110,940	2,098
24	Dee Flexion	16-02-2022	08:00	Referentie	237,338	2,076
25	Dee Flexion	16-02-2022	08:00	Referentie	102,762	2,080
26	Dee Flexion	16-02-2022	08:00	Hoog FR 1	201,840	2,076
27	Dee Flexion	16-02-2022	08:00	Hoog FR 1	206,531	2,089
28	Dee Flexion	16-02-2022	08:00	Hoog FR 1	222,175	2,084
29	Dee Flexion	16-02-2022	08:00	Hoog FR 1	303,005	2,098
30	Dee Flexion	16-02-2022	08:00	Hoog FR 1	252,080	2,081
31	Dee Flexion	16-02-2022	08:00	Hoog FR 2	255,441	2,085
32	Dee Flexion	16-02-2022	08:00	Hoog FR 2	386,962	2,095
33	Dee Flexion	16-02-2022	08:00	Hoog FR 2	222,705	2,082
34	Dee Flexion	16-02-2022	08:00	Hoog FR 2	344,455	2,086
35	Dee Flexion	16-02-2022	08:00	Hoog FR 2	227,128	2,041
36	Dee Flexion	16-02-2022	08:00	Hoog W	347,470	2,090
37	Dee Flexion	16-02-2022	08:00	Hoog W	365,919	2,099
38	Dee Flexion	16-02-2022	08:00	Hoog W	344,656	2,089
39	Dee Flexion	16-02-2022	08:00	Hoog W	301,532	2,092
40	Dee Flexion	16-02-2022	08:00	Hoog W	319,079	2,089

Tabel B2.2 *Overzicht resultaat RNA extractie uit bladmonsters genomen op 28 maart 2022.*

Blad-monster	Cultivar	Datum bemonstering	Tijdstip bemonstering	Behandeling	RNA concentratie (ng/μl)	A260/A280
41	Hi Power	28-03-2022	01:00	Referentie	285,548	2,109
42	Hi Power	28-03-2022	01:00	Referentie	276,689	2,113
43	Hi Power	28-03-2022	01:00	Referentie	321,921	2,103
44	Hi Power	28-03-2022	01:00	Referentie	274,821	2,105
45	Hi Power	28-03-2022	01:00	Referentie	287,322	2,113
46	Hi Power	28-03-2022	01:00	Referentie	283,268	2,105
47	Hi Power	28-03-2022	01:00	Referentie	274,122	2,116
48	Hi Power	28-03-2022	01:00	Referentie	333,886	2,100
49	Hi Power	28-03-2022	01:00	Hoog FR 1	323,817	2,108
50	Hi Power	28-03-2022	01:00	Hoog FR 1	411,795	2,106
51	Hi Power	28-03-2022	01:00	Hoog FR 1	380,571	2,107
52	Hi Power	28-03-2022	01:00	Hoog FR 1	344,541	2,111
53	Hi Power	28-03-2022	01:00	Hoog FR 1	306,287	2,104
54	Hi Power	28-03-2022	01:00	Hoog FR 1	393,910	2,109
55	Hi Power	28-03-2022	01:00	Hoog FR 1	389,273	2,097
56	Hi Power	28-03-2022	01:00	Hoog FR 1	390,165	2,096
57	Hi Power	28-03-2022	01:00	Hoog FR 2	380,707	2,108
58	Hi Power	28-03-2022	01:00	Hoog FR 2	481,329	2,112
59	Hi Power	28-03-2022	01:00	Hoog FR 2	325,899	2,096
60	Hi Power	28-03-2022	01:00	Hoog FR 2	369,559	2,092
61	Hi Power	28-03-2022	01:00	Hoog FR 2	331,012	2,086
62	Hi Power	28-03-2022	01:00	Hoog FR 2	349,363	2,088
63	Hi Power	28-03-2022	01:00	Hoog FR 2	346,608	2,100
64	Hi Power	28-03-2022	01:00	Hoog FR 2	352,197	2,089
65	Hi Power	28-03-2022	01:00	Hoog W	456,628	2,111
66	Hi Power	28-03-2022	01:00	Hoog W	401,229	2,108
67	Hi Power	28-03-2022	01:00	Hoog W	392,294	2,098
68	Hi Power	28-03-2022	01:00	Hoog W	327,756	2,097
69	Hi Power	28-03-2022	01:00	Hoog W	589,824	2,124
70	Hi Power	28-03-2022	01:00	Hoog W	343,851	2,105
71	Hi Power	28-03-2022	01:00	Hoog W	461,959	2,110
72	Hi Power	28-03-2022	01:00	Hoog W	498,913	2,115

Tabel B2.4 Primers.

Gen	Primer sequenties (Forward en Reverse)	Bron	Opmerking
<i>GolS1</i>	F: AGATGAATCTTTGGATTACAAAATG R: TTGACAACTTCAGCCTCGGAC	Ma <i>et al.</i> , 2019	Gebruikt; data in rapport
<i>SUT2</i>	F: TTCTAACTCCCTATATTACAGACGCTC R: GCAATGCTCCTTTGTATCTCTAA	Ma <i>et al.</i> , 2019	Alleen gebruikt voor Hi Power; data in rapport
<i>TUB</i> (referentie)	F: ACGCTGTTGGTGGTGGTAC R: GAGAGGGGTAAACAGTGAATC	Ma <i>et al.</i> , 2019	Minder hoge en/of stabiele expressie dan UBQ
<i>EF1a</i> (referentie)	F: TCGTTCCTCTCTGGTTTC R: ACGTCCAACAGGGACAGTTC	Liang <i>et al.</i> , 2021	Minder hoge en/of stabiele expressie dan UBQ
<i>HY5.1</i>	F: GTCAGTCGTATGCGCTCGAGT R: TGCCCTTCTTCCAACCTCGC	Liang <i>et al.</i> , 2021	Gebruikt; data in rapport
<i>PIF4</i>	F: TGCATTGCTCTGGAGTTGA R: TTTCTTAGCTGGGGGAAGGT	Song <i>et al.</i> , 2019	Primers werkte niet (geen product)
<i>GA20ox1</i>	F: TTTGCCAACTTTGGTAGGGTTT R: GTCCTAAGGTGAGATGTGGC	Song <i>et al.</i> , 2019	Gebruikt; data in rapport
<i>IAA02</i>	F: CTAAGGAGTTGAACCCACC R: ACGACCCACCAGGAGAGAT	Gan <i>et al.</i> , 2013	Gebruikt voor Hi Power, maar resultaten niet anders dan IAA29; niet in rapport
<i>SUT4</i>	F: GTCTCCCTGGTTGTAGAAGAAAG R: CTCTACCCATCCAATCAGTATCAAG	Ma <i>et al.</i> , 2019	Gebruikt; data in rapport
<i>SWEET12c</i>	F: ATAGCCATAGCAAAGGAAATGAAGC R: TGACTTCAAGGTTTGTGGTTATG	Li <i>et al.</i> , 2017	Waarschijnlijk zeer lage expressie in bladmonsters (hoge/geen Ct waarden)
<i>APL3</i>	F: CGTCGTCTTCATCGTCC R: TCGTGATCCCAAACCCAG	Miao <i>et al.</i> , 2021	Minder hoge expressie in bladmonsters dan APL3.2; niet gebruikt
<i>APL3.1</i>	F: CTCACGGAACCCAAACGA R: CAGAATGATGCCACCACA	Miao <i>et al.</i> , 2021	Minder hoge expressie in bladmonsters dan APL3.2; niet gebruikt
<i>APL3.2</i>	F: GTTATACTGGAGGAGGAGCG R: AGCGAGATGCCTATTGAGC	Miao <i>et al.</i> , 2021	Alleen gebruikt voor Dee Flexion; data in rapport
<i>PIF5</i>	F: ACAAGAAAATCAGACGCATTG R: TTGATTCTTAGCTGGGGGAATGT	Song <i>et al.</i> , 2019	Gebruikt; data in rapport
<i>GA20ox2</i>	F: CAAGCTAAACCTCACCCTCCA R: GGACAAAGCATTGGACAGCG	Song <i>et al.</i> , 2019	Gebruikt; data in rapport
<i>YUC4</i>	F: TGGCTAAAGCAGGGGTGTGA R: CGTTGGCGATTTTCATAGCG	Yan <i>et al.</i> , 2016	Waarschijnlijk zeer lage expressie in bladmonsters (hoge/geen Ct waarden)
<i>YUC8</i>	F: CATACGCCAAGCATTGTGAGAT R: ATGTATTGACCTCGTTACGGG	Yan <i>et al.</i> , 2016	Waarschijnlijk zeer lage expressie in bladmonsters (hoge/geen Ct waarden)
<i>YUC10b</i>	F: CCTTCTGGTCTTGCCACTGC R: CAAAACCGATTGGGGAGG	Yan <i>et al.</i> , 2016	Waarschijnlijk zeer lage expressie in bladmonsters (hoge/geen Ct waarden)
<i>UBQ</i> (referentie)	F: CACCAAGCCCAAGAAGATC R: TAAACCTAATCACCACCAGC	Yan <i>et al.</i> , 2016	Gebruikt als referentie/huishoud gen voor analyses in rapport
<i>IAA19</i>	F: TCCTCCGAGACACTTCC R: GCATCAACAGTGTCTATGG	Gan <i>et al.</i> , 2013	Waarschijnlijk zeer lage expressie in bladmonsters (hoge/geen Ct waarden)
<i>IAA27</i>	F: GTCGACAACATGGAGAACC R: TCGAGCTCAGCTTCAACAG	Gan <i>et al.</i> , 2013	Primer testresultaten vergelijkbaar met IAA29; niet gebruikt
<i>IAA29</i>	F: CTCTGAGGTGGAAGTAGAAGAC R: TCTTCACTCTCACACTGCTCTC	Gan <i>et al.</i> , 2013	Gebruikt; data in rapport
<i>GA2ox3</i>	F: GCTCAACCTCAAAGACCCAG R: GCTATTCAATCCAACCCACAT	Bai <i>et al.</i> , 2016	Minder hoge expressie in bladmonsters dan GA20ox1 en 2; niet gebruikt
<i>ACT</i> (referentie)	F: TTCTGGTGATGGTGTGAGTC R: GGCACTGGTGGTGAACATG	Bai <i>et al.</i> , 2016	Minder hoge en/of stabiele expressie dan UBQ
<i>EXPA1</i>	F: GGACAGAATTGGCAGAGCA R: GCAACCCACTAAAAGTTTGACC	Liu <i>et al.</i> , 2021	Gebruikt; data in rapport
<i>EXPA16</i>	F: CAAGATGGCAACCGATGT R: TTGTAGGAGAGGACTTTCCG	Liu <i>et al.</i> , 2021	Primer testresultaten vergelijkbaar met EXPA1; niet gebruikt
<i>LOX1</i>	F: TTGGAGGAAACAAAATCAAAGGGA R: TGGCACTAATGAGTTGGAAGAAA	Yuan <i>et al.</i> , 2019	Waarschijnlijk zeer lage expressie in bladmonsters (hoge/geen Ct waarden)
<i>LOX2</i>	F: CCTAAGAGCAAACCTTGACCCA R: CAATGCCTCAGCAACTGTAAAG	Yuan <i>et al.</i> , 2019	Waarschijnlijk zeer lage expressie in bladmonsters (hoge/geen Ct waarden)
<i>AOS1</i>	F: ATCAACCATTCGCAACAAGAG R: AAAGTTCAACACCATAAGCC	Yuan <i>et al.</i> , 2019	Gebruikt; data in rapport
<i>ACO</i>	F: AGAACACATAGCCAGCAAAGG R: GGAGATGACGGAGGAAGAAAG	Yuan <i>et al.</i> , 2019	Gebruikt; data in rapport
<i>PAD4</i>	F: AGAACAGCAAGCAGAATAGGAC R: CTTGAAGCAATCGTAGTAACCC	Yuan <i>et al.</i> , 2019	Gebruikt; data in rapport
<i>PR1</i>	F: AACTCTGGCGGACCTTAC R: GACTTCTCCACACTACT	Wang <i>et al.</i> , 2010	Gebruikt; data in rapport

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



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

Rapport WPR-1403



De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.700 medewerkers (7.000 fte), 2.500 PhD- en EngD-kandidaten, 13.100 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.
