

Dynamische belichting in tomaat: kansen en uitdagingen

Anja Dieleman, Mark van Hoogdalem, Jaco den Bakker, Anouk van den Bosch, Kees Weerheim



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Referaat

De toenemende kosten voor elektriciteit maken het voor de glastuinbouw interessant om op een andere manier te gaan belichten, waarbij lampen aan staan wanneer de prijzen laag zijn en uit of gedimd wanneer de prijzen voor elektriciteit hoog zijn. In dit onderzoek is gekeken naar het effect van dynamische belichtingsstrategieën op de groei en productie van vruchtdragende tomatengewassen. Het is goed mogelijk tomaten te telen wanneer het licht in de ochtend, als de stroomprijzen hoog zijn, 2 uur uitgeschakeld wordt. Wanneer deze periode verlengd werd naar 4 uur, werden groei en productie negatief beïnvloed, door een lager chlorofylgehalte, lagere lichtabsorptie en minder gewasfotosynthese. Deze effecten zijn met sensoren vroegtijdig te detecteren, zodat hierop gestuurd kan worden in de teelt.

Abstract

Rising electricity costs make it attractive for greenhouse horticulture to adopt a different lighting strategy, with lights switched on when prices are low and switched off or dimmed when they are high. This study examined the effect of dynamic lighting strategies on the growth and production of fruit-bearing tomato crops. Tomatoes can grow well when the lights are switched off for two hours in the morning when electricity prices are high. When this period was extended to four hours, growth and production were negatively affected by lower chlorophyll levels, reduced light absorption, and reduced rates of photosynthesis. These effects can be detected early with sensors, allowing for control of lighting based on crop feedback.

Rapportgegevens

Rapport WPR-1460

Projectnummer: 3742335700

DOI: <https://doi.org/10.18174/700396>

Dit project is mede tot stand gekomen door de bijdrage van de Club van 100 van de Business Unit Glastuinbouw van Wageningen University & Research en de Topsector Tuinbouw en Uitgangsmaterialen.



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

Postbus 644, 6700 AP Wageningen

Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk

Droevendaalsesteeg 1, 6708 PB Wageningen

T +31 (0)317 48 56 06

T +31 (0)317 48 60 01

wur.nl/glastuinbouw

wur.nl/glastuinbouw

Inhoud

Samenvatting	5
1 Inleiding	7
1.1 Achtergrond	7
1.2 Effect dynamische belichting op groei en productie	7
1.3 Onderzoeksvragen en hypotheses	8
2 Materiaal en methoden	9
2.1 Kasinrichting	9
2.2 Lichtbehandelingen	9
2.3 Teeltstrategie en handelingen	10
2.3.1 Teeltstrategie	10
2.3.2 Gewasbescherming	10
2.3.3 Gewashandelingen	10
2.4 Plantmetingen	10
2.4.1 Wekelijkse gewasregistraties en metingen	10
2.4.2 Productiemetingen	11
2.4.3 Sensormetingen	11
2.4.4 Destructieve eindmetingen	12
3 Resultaten	13
3.1 Gerealiseerde teeltcondities	13
3.1.1 Licht	13
3.1.2 Klimaat	14
3.1.3 Water en voeding	16
3.2 Gewasgroei en productie	17
3.2.1 Teeltverloop	17
3.2.2 Wekelijkse plantmetingen	19
3.2.3 Productie	23
3.2.4 Destructieve eindmetingen	26
3.3 Sensormetingen	27
4 Discussie & conclusies	36
4.1 Effecten van dynamische belichtingsstrategieën op groei en productie	36
4.2 Effecten van dynamische belichtingsstrategieën op processen die groei en productie bepalen	36
Literatuur	39

Samenvatting

In de afgelopen jaren zijn elektriciteitskosten sterk toegenomen, waardoor de glastuinbouw op zoek is naar nieuwe belichtingsstrategieën, waarbij energiekosten verlaagd kunnen worden zonder nadelige effecten voor groei en productie. Een van de mogelijkheden zou kunnen zijn om op de uren dat stroomprijzen hoog zijn, met name in de ochtend en einde van de middag, minder of niet te belichten, en dit te compenseren op uren dat de stroomprijzen minder hoog zijn. In het project "DYNAMIEK: Dynamisch belichten op basis van plantsensoren en modellen: wanneer mag het licht uit?" wordt daarom onderzoek gedaan naar de grenzen en mogelijkheden van dynamisch belichten in vruchtdragende tomatengewassen. In vier kasafdelingen zijn tomatengewassen geteeld bij een constante lichtintensiteit van $290 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ gedurende 18 uur, afschakelen van de belichting gedurende 2 of 4 uur in de ochtend, en dit compenseren met een hogere lichtintensiteit gedurende de dag, en een week/weekend strategie waarbij gedurende de week geteeld werd met de belichting 2 uur uit in de ochtend, en in het weekend niet.

Het bleek goed mogelijk tomaten te telen onder dynamische belichtingsstrategieën waarbij de (LED) belichting in de ochtend tijdelijk wordt afgeschakeld. Er bleek nauwelijks effect te zijn van het afschakelen van het licht gedurende 2 uur in de ochtend op groei en productie van het gewas. Wanneer deze periode verlengd werd naar 4 uur, werden groei en productie negatief beïnvloed, door een lager chlorofylgehalte, lagere lichtabsorptie en minder gewasfotosynthese. Deze effecten zijn met sensoren vroegtijdig te detecteren, zodat hierop gestuurd kan worden in de teelt. Een week/weekend strategie waarin gedurende de week geteeld werd met de belichting 2 uur uit in de ochtend, en in het weekend met een constante intensiteit kon probleemloos toegepast worden.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Eén van de grote kostenposten in de glastuinbouwsector is de elektriciteit die nodig is voor belichting. De glastuinbouw staat voor de grote uitdaging om de CO₂-uitstoot te verminderen, onder andere door energie te besparen met belichting. Eén van de stappen die hiervoor de afgelopen jaren is gezet, is het omschakelen van de traditionele hogedruk natriumlampen naar LED belichting, die veel efficiënter elektriciteit omzetten naar licht (tot ca. 4.2 $\mu\text{mol/J}$). Een andere stap om de lichtbenutting te verbeteren, is belichting alleen in te zetten als dit voor het gewas het meest effectief is. Daarbij spelen de elektriciteitskosten een rol: op momenten dat huishoudens en industrie veel energie gebruiken, zijn elektriciteitsprijzen hoog, met name in de ochtend en aan het einde van de middag. Daarentegen kunnen de stroomprijzen overdag heel laag of zelfs negatief zijn wanneer er veel energie opgewekt wordt door windmolens en zonnepanelen. Daarmee staan telers steeds voor de keuze hoe zij hun belichtingsstrategie gedurende de dag het beste in kunnen vullen, waarbij kosten en baten afgewogen moeten worden. In de afgelopen jaren is het gebruik van dynamische LED-belichtingsystemen sterk toegenomen. Deze systemen kunnen gedimd worden zodat de lichtintensiteit momentaan gestuurd kan worden. De nieuwste generaties LED armaturen kunnen verder ook het spectrum sturen. Echter, er is nog maar weinig kennis over hoe dynamische belichtingsregimes groei, ontwikkeling en productie van gewassen beïnvloeden, en dus het beste ingezet kunnen worden. Voor zover er onderzoek gedaan is, is dit vaak met jonge planten gedaan, en niet met vruchtdragende tomatengewassen, waar in dit rapport de interesse naar uit gaat.

1.2 Effect dynamische belichting op groei en productie

Uit onderzoek met jonge tomatenplanten blijkt dat groei en biomassa bij sterk wisselende lichtniveaus negatief beïnvloed werd ten opzichte van een constante lichtintensiteit (Kaiser et al., 2018, Dieleman et al., 2024). Bij dynamische lichtbehandelingen waarbij de lichtintensiteit varieerde per minuut, 30 minuten of meerder uren, bleek dat het plantgewicht alleen lager was als de lampen aan en uit werden geschakeld. Dit effect was sterker naarmate de frequentie van de fluctuaties toenam. Als tenminste een minimum lichtniveau van 25 $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ werd aangehouden, was er geen effect op plantgewicht en onderliggende planteigenschappen als bladoppervlakte en strekking. Vergelijkbare resultaten werden gevonden in sla (Bhuiyan en Van Iersel, 2021). Als slaplanten werden blootgesteld aan lichtwisselingen per 15 minuten tussen 0/400, 40/360, 80/320, 120/280, 160/240 of constant 200 $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ hadden alleen de planten die geteeld werden bij 0/400 minder bladeren en een lager chlorofylgehalte dan in de andere behandelingen. Andere effecten van wisselende lichtniveaus zijn een lager bladoppervlak (Bhuiyan en van Iersel, 2021), dunnere bladeren (lager bladgewicht per bladoppervlak) (Zhang et al., 2020) en een lagere fotosynthesecapaciteit van die bladeren (Violet-Chabrand et al., 2017). Echter, als een minimum lichtniveau van 25 $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ werd aangehouden, bleken de efficiëntie van fotosysteem II (ΦPSII) en de elektronentransportsnelheid (ETR) niet beïnvloed te worden door de wisselende lichtniveaus (Dieleman et al., 2024a, 2025a). De volgende vraag was hoe variabele belichtingsstrategieën groei en productie van vruchtdragende gewassen zouden beïnvloeden. Uit onderzoek met dwergtomaten bleek dat wanneer de lampen elke 30 minuten aan- of uitgezet werden, dwergtomaten planten korter bleven, kleinere bladeren hadden, minder vruchten produceerden en daarmee een lagere productie en plantgewicht hadden (Dieleman et al., 2024b). Wanneer tenminste een lichtintensiteit van 60 $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ werd aangehouden, was het aantal geoogste vruchten nog wel lager. Als alleen 's ochtends de lampen een uur uitgezet werden, was er geen effect op plantgewicht en productie (Dieleman et al., 2024b). In werkpakket 2 van dit project, werden ook dwergtomaten geteeld bij een aantal dynamische belichtingsstrategieën, zoals in deelrapport I van dit project is te lezen (Dieleman et al., 2025b).

De resultaten uit de eerste proef stemmen goed overeen met de eerder genoemde resultaten: wanneer er een minimum lichtintensiteit aangehouden wordt (in dit geval $60 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$), is de groei en productie van dwergtomaten onder wisselend licht vergelijkbaar met constant licht. Wanneer het licht afgeschakeld wordt, worden de bladeren kleiner en dikker, en nemen plantgewicht en vruchtproductie af. De effecten waren sterker in de behandeling waar het licht 4.5 uur aan was, dan 8 uur uit en dan weer 4.5 uur aan dan bij wisselingen per uur. De redenen hiervoor waren waarschijnlijk de lagere lichtbenutting door een lager chlorofylgehalte en een lagere fotosynthese (Dieleman et al., 2025b). Dat betekent dat een donkerperiode van 8 uur tussen twee lichtperiodes in te lang is, en negatief is voor de groei en productie. In de tweede proef met dwergtomaten, werd het licht gedurende 8 uur, 4 uur of 2 uur afgeschakeld, in aanwezigheid van zonlicht. Een langere lichtonderbreking leidde tot een lager plantgewicht, al was alleen het effect van 8 uur significant. Een week/weekend strategie, waarbij gedurende 5 dagen het licht 2 uur werd afgeschakeld, en in het weekend met een constante intensiteit werd belicht, had geen negatief effect op groei en productie.

1.3 Onderzoeksvragen en hypotheses

In het project "DYNAMIEK: Dynamisch belichten op basis van plantsensoren en modellen: wanneer mag het licht uit?" wordt onderzoek gedaan naar de grenzen en mogelijkheden van dynamisch belichten. In werkpakket 2 zijn experimenten uitgevoerd met dwergtomaten, maar er is nog (nagenoeg) geen kennis van de effecten van dynamisch belichten op een producerend hoge draad tomatengewas. Daarom is in werkpakket 4 van dit project een experiment gedaan waarin dat onderzocht is. De onderzoeksvragen hierbij zijn:

- Is het mogelijk tomaten te telen onder een dynamische belichtingsstrategie waarbij in de ochtend, gedurende een periode waarin de stroomprijzen hoog zijn, de belichting enkele uren afgeschakeld wordt?
- Wat zijn de grenzen van deze periode waarin de belichting uitgeschakeld wordt voor het gewas?
- Wat zijn de effecten van een dynamische belichtingsstrategie op de groei en productie van een tomatengewas, en wat zijn de onderliggende processen?
- Wat is een van de eerste plantprocessen die (zichtbaar) beïnvloed wordt door wisselende lichtomstandigheden, en is dit bruikbaar als een vroege indicatie van mogelijk negatieve effecten?
- Is dit plantproces goed vroegtijdig en geautomatiseerd te meten met een sensor, en zo ja, welke?

Op basis van de proeven in werkpakket 2 met dwergtomaten, zijn behandelingen gekozen waarbij het licht in de ochtend gedurende 1, 2 of 4 uur uit werd geschakeld. De behandeling "4 uur uit" had bij dwergtomaten wel effect op totale biomassa, maar niet (significant) op productie. De verwachting is dat een producerend hoge draad tomatengewas sterker zal reageren op fluctuerende lichtomstandigheden. Daarom is deze behandeling als extreemste gekozen. Daarnaast is de behandeling toegevoegd waarin in het weekend met een constante intensiteit wordt belicht, en gedurende weekdays het licht 2 uur af werd geschakeld in de ochtend. Gezien de variaties in elektriciteitsprijzen gedurende de week, is dit een interessante strategie. De verwachting is dat dit uitgevoerd kan worden zonder negatieve effecten op groei en productie.

In dit rapport wordt de opzet van het experiment beschreven in hoofdstuk 2, de resultaten in hoofdstuk 3, en wordt in hoofdstuk 4 een beschouwing gegeven over de implicaties van dit onderzoek.

2 Materiaal en methoden

2.1 Kasinrichting

Het onderzoek is uitgevoerd in het IDC hoge draad, een kasafdeling van 144 m² (9.6 m bij 15 m), die speciaal is ingericht voor belichtingsonderzoek. De kas heeft diffuus glas en is uitgerust met een energiedoek (LS Ultra) en verduisteringsdoek (LS Obscura). De kas kan gekoeld worden via een warmtewisselaar en een verdeelslang, die in het midden van de kas hangt.

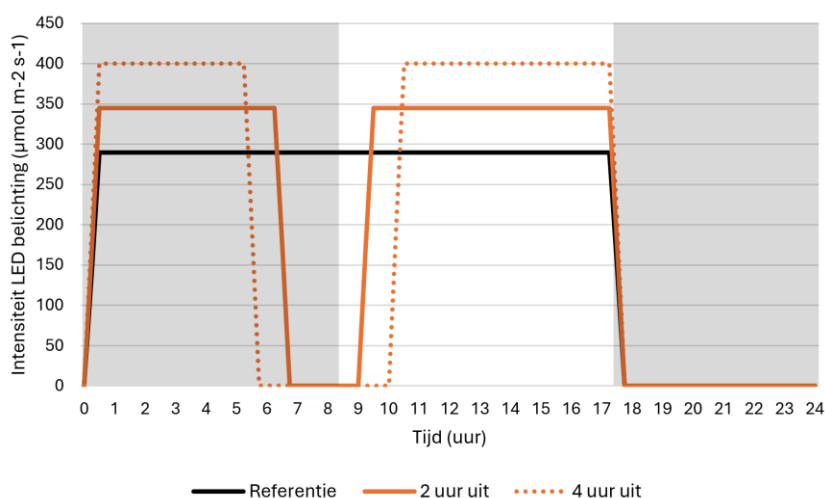
De kas is verdeeld in vier afdelingen van 4.8 bij 6.5 meter, met wit plastic. Elke afdeling is ingericht met 72 Philips GreenPower LED Dynamic productiemodules 3.0, op 4.5 m boven het vloeroppervlak. De belichting wordt aangestuurd door het GrowWise Control System die de intensiteit in de kanalen blauw (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) aanstuurt per afdeling. Daarmee kan het licht in iedere afdeling apart aangestuurd worden. De andere klimaatfactoren (temperatuur, luchtvochtigheid en CO₂) worden op niveau van de hele kas aangestuurd. Ieder van de 4 afdelingen heeft twee enkele randrijen en twee dubbele rijen planten. De kas heeft 1 irrigatiesysteem met vier kleppen, zodat de vier afdelingen een eigen watergeefstrategie kunnen hebben, maar wel met dezelfde nutriëntensamenstelling.

2.2 Lichtbehandelingen

De lichtbehandelingen die in dit project worden toegepast, zijn gekozen op basis van eerder onderzoek met dwergtomaten in het IDC LED (Dieleman et al., 2025, werkpakket 2 van het project DYNAMIEK). In iedere afdeling werd een van de onderstaande lichtbehandelingen ingezet:

1. Referentie: belichten met 290 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ gedurende 18 uur (middernacht tot 18:00 uur)
2. 2 uur uit: belichten met 345 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, LEDs uit tussen 7:00 en 9:00 uur
3. 4 uur uit: belichten met 400 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, LEDs uit tussen 6:00 en 10:00 uur
4. Week/weekend: maandag – vrijdag: 2 uur uit, weekend: referentie

Het donkerdoek was open tussen 08:30 en 17:30, om daarmee een winterse daglengte na te bootsen. De behandelingen staan schematisch weergegeven in Figuur 2.1.



Figuur 2.1 Schematisch overzicht van het verloop van de lichtintensiteit van de LEDs gedurende de dag. De grijze vlakken geven de periode aan waarin de donkerdoeken gesloten zijn.

2.3 Teeltstrategie en handelingen

2.3.1 Teeltstrategie

De planten (cv. Maxcize, geënt en getopt op 2 stengels) zijn gezaaid bij de plantenkweker op 27 november 2024 en op 16 januari 2025 bij WUR Glastuinbouw op de mat gezet. De planten zijn eerst naast het gat gezet en op moment van bloei van de 3^e tros zijn de planten op het gat gezet om in de mat door te kunnen wortelen. De stengeldichtheid was 3,6 stengels/m², waarbij de stengeldichtheid op de middelste 2 rijen 3,8 stengels/m² was en in de randrijen 2,25 stengels/m².

In het begin van de teelt was de streefwaarde voor de etmaaltemperatuur 23 °C, die werd afgebouwd naar 20,5 °C bij toenemende plantbelasting (aantal vruchten aan de plant). Aangezien er 1 klimaatinstelling is voor de 4 afdelingen werd er gestuurd op de meetbox van de referentie. Om de planten in alle behandelingen dezelfde (goede) start te geven, werden ze de eerste weken onder dezelfde condities geteeld. Er werd vanaf het begin belicht met 290 µmol/m²/s en een belichtingsperiode van 10 uur per dag. De belichtingsperiode werd wekelijks met 2 uur per dag verlengd. Op moment dat er 14 uur per dag werd belicht, werd begonnen met de lichtbehandelingen. Dat was op 6 februari 2025, 3 weken na de start na de teelt.

De strategie voor de watergift was volgens de praktijk en kon in iedere afdeling afzonderlijk gestuurd worden, op basis van de gegevens van de weeggoot (aquabalance). Tijdens de belichte nacht werden er 2 tot 3 beurten gegeven. In de periode van 1 uur voor de dimperiode tot 1 uur na de dimperiode werd er geen water gegeven. Het streven was om drain te realiseren op de dag na de dimperiode, waarna er weer op tijd gestopt werd met watergeven om voldoende intering in de donkere nacht te realiseren.

De proef werd begeleid door een ervaren teeltadviseur (Joop Verhoeven, Delphy), die wekelijks advies gaf ten aanzien van klimaatinstellingen en gewashandelingen.

2.3.2 Gewasbescherming

Er werd preventief biologische bestrijding uitgezet tegen witte vlieg. Er zijn geen schadelijke insecten of plagen tijdens de teelt waargenomen.

2.3.3 Gewashandelingen

De gewaswerkzaamheden zijn uitgevoerd zoals in de praktijk gebruikelijk is. Wekelijks werd in de kop van de plant een blad uitgehaald om een open gewas te creëren. Later in de teelt gebeurde dit 2-wekelijks. Er is aan de onderkant van de plant dusdanig blad geplukt dat de rijpende tros altijd vrij hing. De bestuiving is handmatig gedaan door driemaal per week de bloeiende tros te 'trillen'. De inzet van hommels is door de grote hoeveelheid plastic en de beperkte hoeveelheid planten per afdeling niet (goed genoeg) mogelijk. De zetting is zonder problemen verlopen. De opvolging van de vruchten was zoals verwacht mag worden van bestuiving door hommels.

2.4 Plantmetingen

2.4.1 Wekelijkse gewasregistraties en metingen

In iedere afdeling zijn 6 meetplanten aangewezen met ieder twee stengels. Van deze in totaal 12 stengels is eenmaal per week het volgende bepaald:

- Stengellengte
- Aantal nieuw gevormde bladeren
 - Het nieuwste (jongste) blad is het hoogste blad van minstens 7 cm lang.
- Aantal verwijderde bladeren
 - Vers- en drooggewicht van deze bladeren.

- Kopdikte
 - De stengeldiameter ter hoogte van de lengte van de plant in de voorgaande week.
- Aantal trossen
- Aantal bloemen per tros
- Aantal gezette vruchten per tros
 - Vrucht is gezet wanneer diameter ≥ 1 cm.
 - Om de uitgroeiduur en vruchtgroei te kunnen bepalen is de eerste gezette vrucht van een tros voorzien van een label met datum.
- Bladlengte
 - Lengte van het blad onder de hoogste bloeiende tros
- Aantal geoogste trossen
- Versgewicht van geoogste trossen

2.4.2 Productiemetingen

Voor het bepalen van de productie per m^2 is het aantal geoogste trossen/vruchten per afdeling, met uitzondering van de randrijen, geteld en gewogen. Om de vruchtgroei te kunnen bepalen is eenmaal per week van alle meetstengels de maximale diameter van de eerst gezette vruchten gemeten. De vruchtgroei is de wekelijkse toename in maximale vruchtdiameter. De Brix waarden per afdeling zijn bepaald door wekelijks van iedere afdeling 15 geoogste vruchten (willekeurig gekozen) in een blender te vermalen tot één mengsel, waarvan vervolgens 4 keer een sample is genomen en gemeten met een Refracto 30PX handheld refractometer (Mettler-Toledo B.V., Tiel, Nederland).

2.4.3 Sensormetingen

2.4.3.1 Bladpigmenten

Eenmaal per week zijn bladpigmenten (chlorofyl, flavonoïden en anthocyanen) gemeten met behulp van de MPM-100 Multi Pigment Meter (Opti-Sciences Inc., Hudson, NH, USA). De metingen zijn gedaan aan alle meetstengels (12 per behandeling) en altijd aan blad nummer 5 of 6 (geteld vanaf de top), waarbij blad nummer 1 het hoogste blad van minstens 10 cm lang was.

2.4.3.2 Chlorofylfluorescentie en ETR

Chlorofylfluorescentie (ϕPSII) is tijdens de proef ieder half uur gemeten met behulp van het MICRO-PAM systeem (Heinz Walz, Effeltrich, Duitsland). Iedere afdeling was uitgerust met 1 sensor, geïnstalleerd in het midden van de afdeling. Deze werden geplaatst op blad nummer 5 of 6 van een stengel in de buurt van de sensor. Om te voorkomen dat het klemmen van de sensor op het blad de metingen teveel zouden beïnvloeden (door schade aan het blad te veroorzaken) werd de sensor iedere maandag, woensdag en vrijdag verplaatst naar een ander blad, indien mogelijk van een andere stengel. De Electron Transport Rate (ETR) is berekend met de volgende formule: $\text{ETR} = \phi\text{PSII} * \text{PPFD} * \text{lichtabsorptie blad} * 0.5$ (Maxwell and Johnson, 2000). De 'lichtabsorptie blad' is het percentage van het LED licht (toegepast in deze proef) dat geabsorbeerd werd door het blad. Deze waarde is gebaseerd op metingen van de lichtabsorptiespectra van bladeren, zoals hieronder beschreven.

2.4.3.3 Lichtabsorptiespectra van bladeren

Om het lichtabsorptie spectrum per behandeling te meten, werden de dag voor de metingen (30 april 2025) van 6 willekeurige stengels per afdeling een deelblaadje genomen van blad nummer 5 of 6. De blaadjes werden per stuk verpakt in plastic zakken met een natte tissue om uitdroging te voorkomen. Vervolgens werden de blaadjes in een koelbox geplaatst en getransporteerd naar Wageningen, waar ze overnacht in de koelkast (4°C) werden bewaard. In het WUR Lichtlab is de volgende dag de reflectie en transmissie in stappen van 5 nm tussen 350-750 nm van ieder blad gemeten met een spectrofotometer (Lambda 950 US/VIS, PerkinElmer, Waltham, MA, United States). De absorptie per blad werd vervolgens berekend als $1 - \text{transmissie} - \text{reflectie}$.

2.4.3.4 Fotosynthese

Fotosynthese van het blad (A_{net}) is gemeten met een draagbare Li-6800 fotosynthesemeter (LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA) op 16 en 17 april 2025, tussen 11:22 en 15:26 (altijd ten minste 2 uur na aanschakelen van de LEDs). De metingen zijn gedaan aan jong volgroeid blad (blad nummer 4, 5 of 6 van boven geteld) en oud blad (4 bladeren onder het jonge volgroeide blad) van 4 representatieve planten per afdeling. De metingen zijn uitgevoerd met een gesloten bladkamer (6 cm²) uitgerust met LEDs (spectrum 90% rood, 10% blauw; intensiteit 300 of 1000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$). In de kamer werd een luchtstroomsnelheid van 300 $\mu\text{mol}/\text{s}$ ingesteld, een relatieve luchtvochtigheid van 70%, een CO₂ concentratie van 600 ppm en een luchttemperatuur van 23°C.

2.4.3.5 Lichtonderschepping

De verticale lichtonderschepping door het gewas werd tijdens de proef iedere 5 minuten gemeten met twee vaste Apogee SQ-301X-SS lijnsensoren per afdeling (Apogee Instruments, Inc., Logan, UT, USA), geïnstalleerd ter hoogte van de mat. Daarnaast zijn er op 21 maart 2025 uitgebreide metingen gedaan met het SunScan Canopy Analysis System - SS1 (Delta-T Devices Ltd., Cambridge, UK). Op 6 locaties per afdeling is de verticale lichtonderschepping gemeten met dit systeem op verschillende hoogtes: 25, 50, 100, 150 en 200 cm onder de kop van het gewas en ter hoogte van de mat.

2.4.3.6 Verschil blad- kasluchttemperatuur

Blad- en kasluchttemperatuur zijn gedurende drie dagen eenmaal per minuut gemeten met het LAT-B3: Leaf-to-Air Temperature Broadleaf Type systeem (Ecomatik GmbH, Dachau, Duitsland). De metingen zijn gedaan van in de periode van 17 - 20 maart 2025 aan blad nummer 5 of 6 (van boven geteld) van 2 of 4 representatieve stengels per afdeling.

2.4.4 Destructieve eindmetingen

Naast de metingen beschreven in paragraaf 2.4.1 is aan het einde van de proef van iedere meetstengel het volgende bepaald:

- Trosnummer van de jongste bloeiende tros
- (tros)nummer van de jongste gezette vrucht
- Gewicht van gezette trossen (trossen met minimaal één gezette vrucht)
- Aantal rode en groene vruchten per tros
- Vers- en drooggewicht van rode en groene vruchten
- Aantal bladeren aan de plant
- Bladoppervlak van bladeren aan de plant
 - Gemeten met een LI-3100C Leaf Area Meter (LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA)
- Vers- en drooggewicht van bladeren aan de plant
- Stengellengte
- Aantal internodia
- Vers- en drooggewicht van stengel

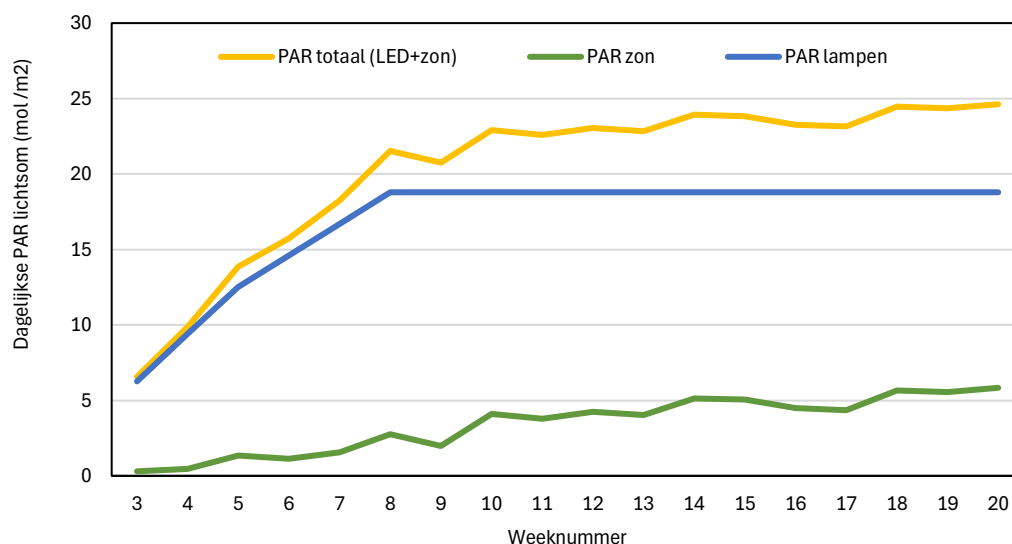
Droge stof gehalten en droge stof verdeling zijn bepaald met behulp van de resultaten van de wekelijkse plant- en productiemetingen en de destructieve eindmetingen.

3 Resultaten

3.1 Gerealiseerde teeltcondities

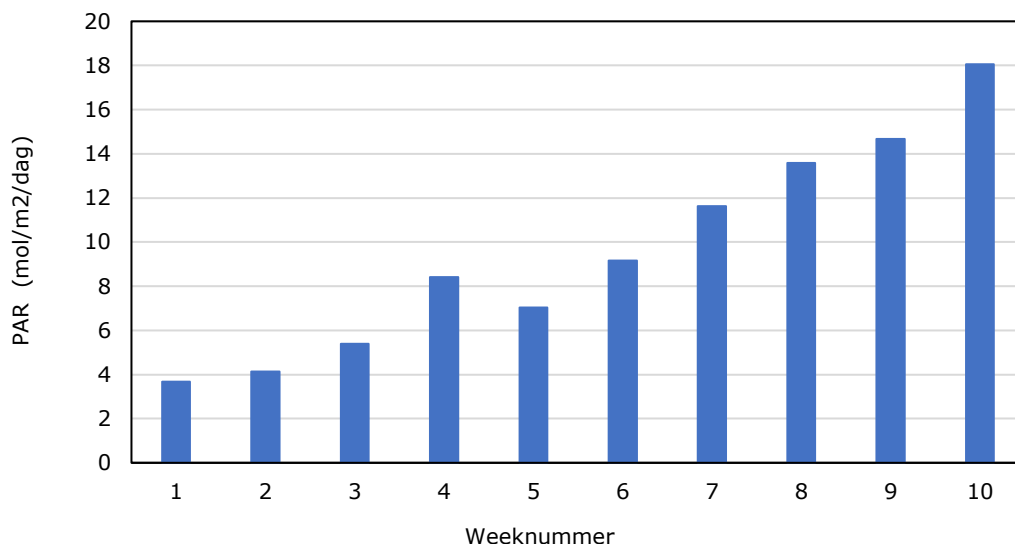
3.1.1 Licht

In alle afdelingen werd licht gemeten met een vaste PAR sensor. Daarnaast werd de hoeveelheid PAR in de afdelingen berekend door het PAR aandeel van de globale straling te vermenigvuldigen met de transmissie van de kas en te corrigeren voor transmissie van het scherm als de schermdoeken gesloten zijn. De PAR berekening stemt goed overeen met de gemeten PAR, maar is een robuustere meting, en wordt daarom hier gepresenteerd. In de eerste weken van de teelt werd de lichtsom opgebouwd naar de behoefte van de plant (Figuur 3.1). In week 8 is de maximale belichtingsduur bereikt (18 uur), en wordt 18.8 mol/m²/dag aan LED licht gegeven.



Figuur 3.1 Verloop van het berekende gerealiseerde weekgemiddelde van de lichtsom (mol/m²) per dag van de lampen, de zon en het totaal per afdeling gedurende de teelt.

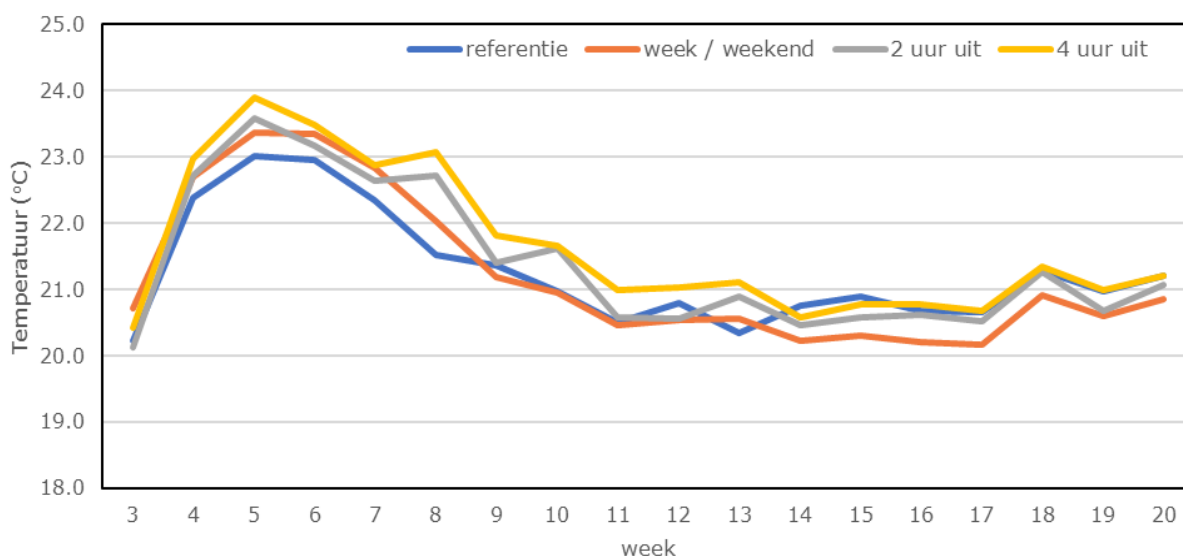
In dit onderzoek werden tomatenplanten geplant op 16 januari, wat niet praktijkconform is. In Figuur 3.1 is te zien dat de gemiddelde dagelijkse lichtsom van zonlicht in de kas gemiddeld tussen week 10 en week 20 4,75 mol/m² is. De vraag is met welke omstandigheden in de praktijk dit vergeleken kan worden. De transmissie van het IDC Hoge draad, de kas waar deze proef werd uitgevoerd is door de vele constructiedelen, het lampenplafond en de koelingsinstallatie maar 25%, terwijl er in een praktijkkas met 70% transmissie wordt gerekend. Dat betekent dat de lichtsom die we in de kas hadden van 4,75 mol/m² zonlicht in de kas, omgerekend naar de praktijk zou betekenen een lichtsom van 6.8 mol/m²/dag PAR buiten de kas ($100/70 \times 4,75$). In Figuur 3.2 is het weekgemiddelde per dag van lichtsom (mol/m²) van buiten de kas weergegeven van de eerste 10 weken van het jaar. De lichtomstandigheden die wij in de teelt hadden in weken 10-20 met instraling van buiten, kan voor de praktijk worden vergeleken met een wintersituatie van week 4/5 (eind januari).



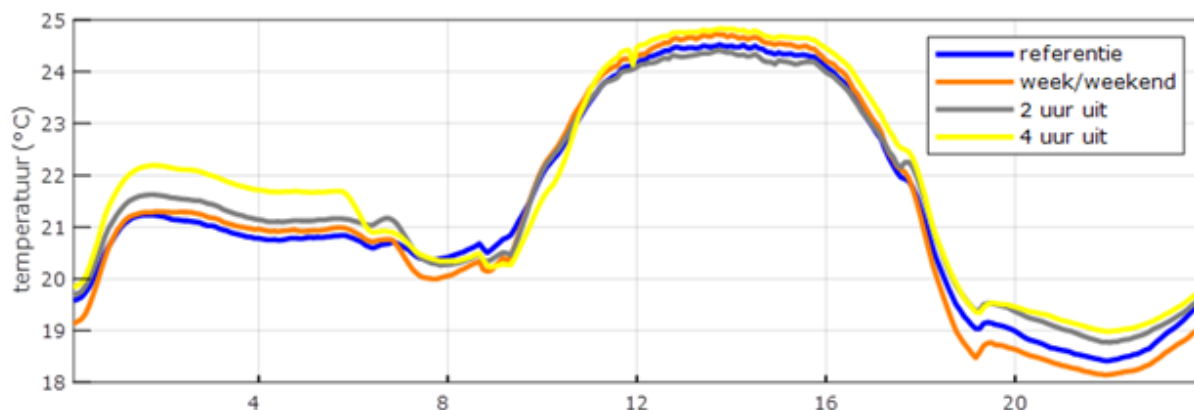
Figuur 3.2 Verloop van het langjarig weekgemiddelde van de lichtsom (mol/m^2) per dag (gebaseerd op meteo gegevens 2011 – 2025) in de tijd.

3.1.2 Klimaat

Vanaf de start van de teelt werd een hoge etmaaltemperatuur aangehouden om de planten vlot te laten groeien en daarmee een generatieve plant te creëren. Op moment dat de plantbelasting (aantal vruchten aan de plant) verder toenam, werd het setpoint voor de etmaaltemperatuur verlaagd (Figuur 3.3). Er werd gestuurd op de referentie-afdeling, omdat daar de klimaatmeetbox hing. De etmalen van de overige afdelingen werden zoveel mogelijk hetzelfde gehouden. Dit kon niet altijd volledig gerealiseerd worden, omdat er maar 1 verwarmingsgroep, 1 ventilatiegroep en 1 schermgroep voor de gezamenlijke afdelingen was. In Figuur 3.4 is het cyclisch gemiddelde van de temperatuur over de gehele teelperiode weergegeven. De verwachting was dat de temperatuur van de behandelingen waarin gedimd werd tijdens de dimperiode (als de lampen uit waren) lager zou zijn. Dat is wel te zien, maar de effecten zijn beperkt. Dat heeft er mee te maken dat er op momenten dat er gedimd werd in die afdelingen niet minder gestookt kon worden vanwege de klimaatregeling van de hele afdeling. In een praktijkkas waarin het licht gedimd zou worden, zou de temperatuurstrategie hierop aangepast worden, zodat het effect van dimmen op temperatuur groter zou zijn dan wij in deze proef hebben gerealiseerd.

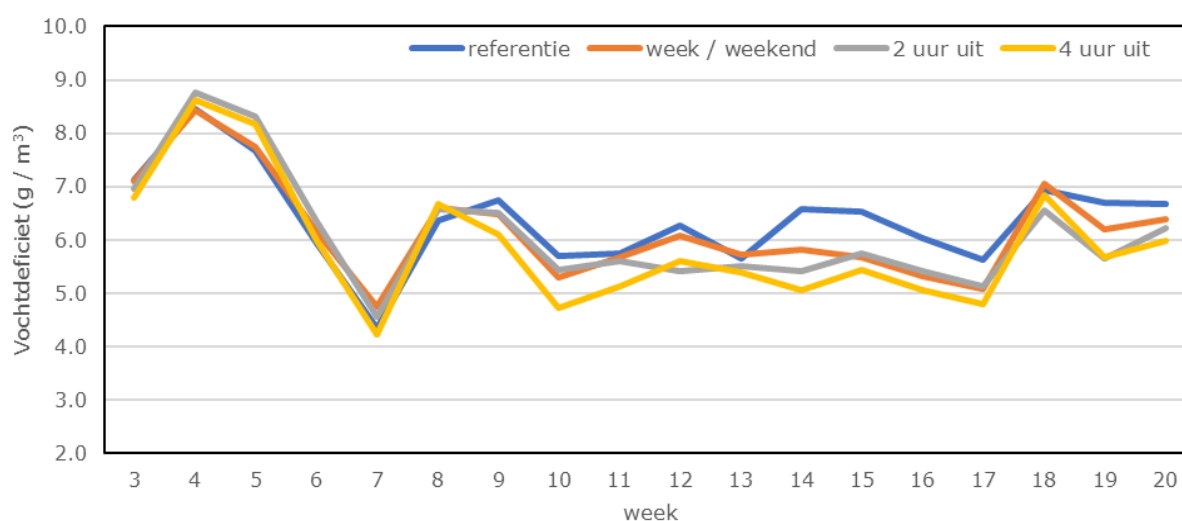


Figuur 3.3 Verloop van het weekgemiddelde van de gerealiseerde etmaaltemperatuur van de 4 behandelingen gedurende de teelt.

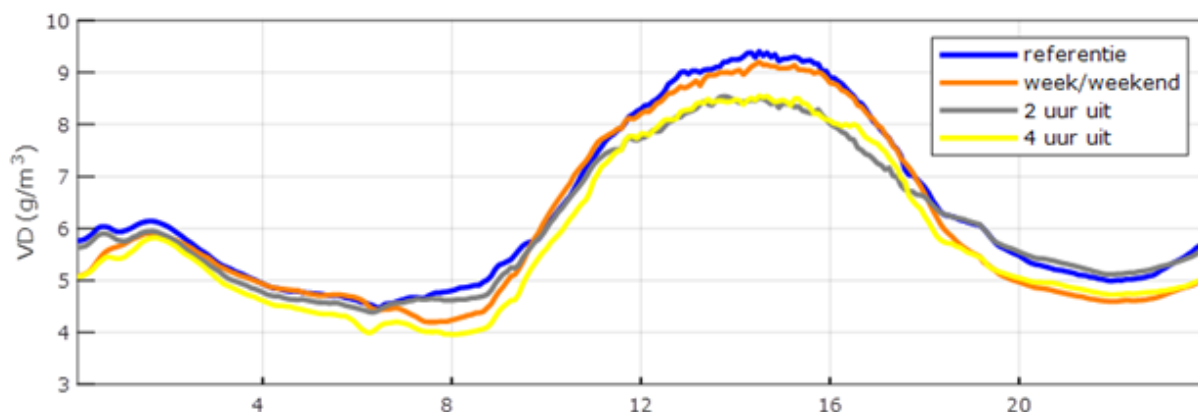


Figuur 3.4 Cyclisch gemiddelde van de kasttemperatuur van de 4 behandelingen over de gehele teeltperiode.

Het etmaalgemiddelde van het vochtdeficiet voor de teeltperiode is weergegeven in Figuur 3.5. Door condensatie tegen de gevel in de kleine afdelingen met relatief veel geveleppervlakte in het IDC Hoge draad is het vochtdeficiet hoger dan in de praktijk. In de eerste teeltweken was er bijna geen verschil in gemiddeld vochtdeficiet per dag tussen de behandelingen. Naarmate het gewas groter werd, bleken er verschillen op te treden in vochtdeficiet tussen de behandelingen. De planten uit de referentie (constante lichtintensiteit) hadden de kortste bladeren, hoewel niet significant verschillend. Deze behandeling had het hoogste vochtdeficiet, mogelijk door een lagere verdamping door minder bladoppervlakte. Dit is ook te zien bij het cyclisch gemiddelde van het vochtdeficiet (Figuur 3.6).



Figuur 3.5 Verloop van het weekgemiddelde van het vochtdeficiet over een etmaal van de 4 behandelingen gedurende de teelt.

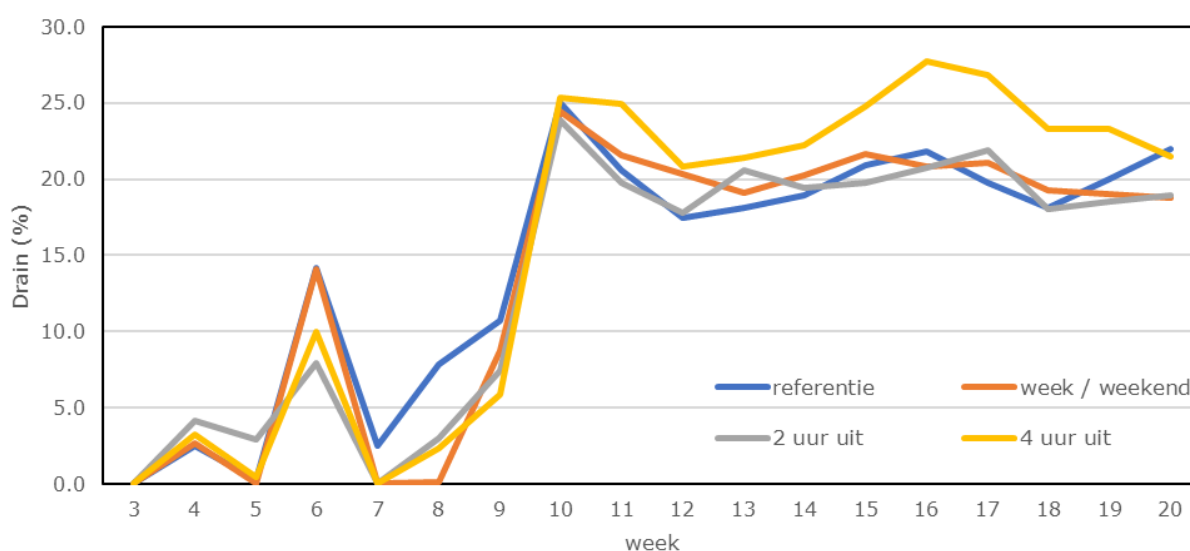


Figuur 3.6 Cyclisch gemiddelde van het vochtdeficiet van de 4 behandelingen van de gehele teeltperiode.

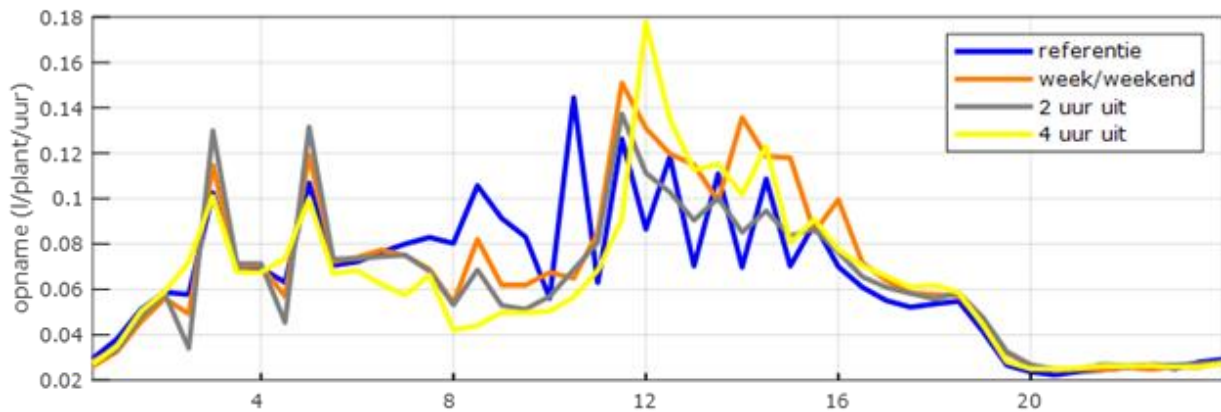
3.1.3 Water en voeding

De watergift werd gestuurd op basis van de data van de aquabalance, waarvan er in iedere afdeling 1 aanwezig was. Volgens het teeltplan zou er in de dimperiode geen water gegeven worden. Als snel bleek dat de periode van watergeven (1 uur na dimperiode tot 3 uur voor lampen uit) om drain te realiseren dan te kort was om voldoende drain te realiseren (Figuur 3.7). Door tijdens de dimperiode 1 beurt water te geven teerde de mat niet verder in en kon er na de dimperiode snel voldoende drain (streefwaarde 20-25%) gerealiseerd worden. Het leek erop dat de wateropname die tijdens de belichte nacht op gang was gekomen niet stopte als de lampen voor een korte (2 uur) of iets langere (4 uur) periode uitgingen, maar op een iets lager niveau gewoon door ging (Figuur 3.8). In de figuur is te zien dat de watergeefmomenten in de belichte nacht voor een piek in de wateropname zorgen. Tijdens de periode van 4 uur (6.00u tot 10.00u in de ochtend) dat de lampen uit gingen, ging wel het donkerdoek na 2,5 uur (8.30u) open, waardoor er een lage intensiteit zonlicht in de kas kwam. Het openen van het donkerdoek is ook terug te vinden in de wateropname. Bij de behandeling '4 uur uit' zorgde dit ervoor dat de wateropname weer omhoog ging en door de hogere lichtintensiteit in deze behandeling piekt de wateropname rond het middaguur.

In de teelt werd gestart met een praktijkconform standaard voedingsschema met een EC van 4. Tijdens de teelt werden de EC en afzonderlijke nutriënten aangepast aan de fase waarin het gewas zich bevond. Er is gestreefd naar een EC in de drain van 4,5 tot 5, praktijkconform voor een grove trostomaat.



Figuur 3.7 Verloop van de hoeveelheid drain (%) per dag gemiddeld per week van de verschillende behandelingen gedurende de teelt.



Figuur 3.8 Cyclisch gemiddelde van de wateropname van de 4 behandelingen over de periode 20 februari - 20 maart 2025.

3.2 Gewasgroei en productie

3.2.1 Teeltverloop

De teelt is over het algemeen goed verlopen. hieronder volgen enkele kenmerken van het teeltverloop:

- De generatieve sturing (realiseren van hoge etmaaltemperatuur aan het begin van de teelt (zie onderstaande foto's) en de plant pas op het gat zetten bij bloei van de 3^e tros) heeft voor een goede balans in de plant gezorgd.



- Na 8 weken teelt waren enkele blaadjes oedeem zichtbaar (onderstaande foto links). Er is daarna op bewust gestuurd om de energieschermen overdag zoveel mogelijk open te houden om verdere ontwikkeling van oedeem te voorkomen. Dit is goed gelukt, de oedeemverschijnselen hebben niet doorgezet.



- De eerste bladrandjes waren ook na ca. 8 weken zichtbaar (bovenstaande foto rechts). Bladrandjes zijn een algemeen voorkomend verschijnsel en worden door de telers niet als een probleem gezien. Het wordt beschouwd als een zichtbaar teken dat de plant maximaal groeit bij voldoende belasting aan vruchten. Dit was in alle behandelingen te zien.



- Een visueel overzicht van de behandelingen na 10 weken teelt geeft aan dat de behandeling '2 uur uit' (links boven), de behandeling 'week/weekend' (rechtsboven) en de referentie hetzelfde beeld van de kwaliteit van de plant geven, terwijl de behandeling '4 uur uit' gele koppen beginnen te vertonen.

- De gele koppen bij de behandeling '4 uur uit' bleef tijdens de verdere teeltduur voorkomen. De ontwikkelingssnelheid van bladeren en trossen was gelijk aan de andere behandelingen. De tros was wel zwak: de bloemen hadden een fletse kleur en de zetting was moeizaam, wat uiteindelijk leidde tot minder vruchten per tros en een lagere productie.



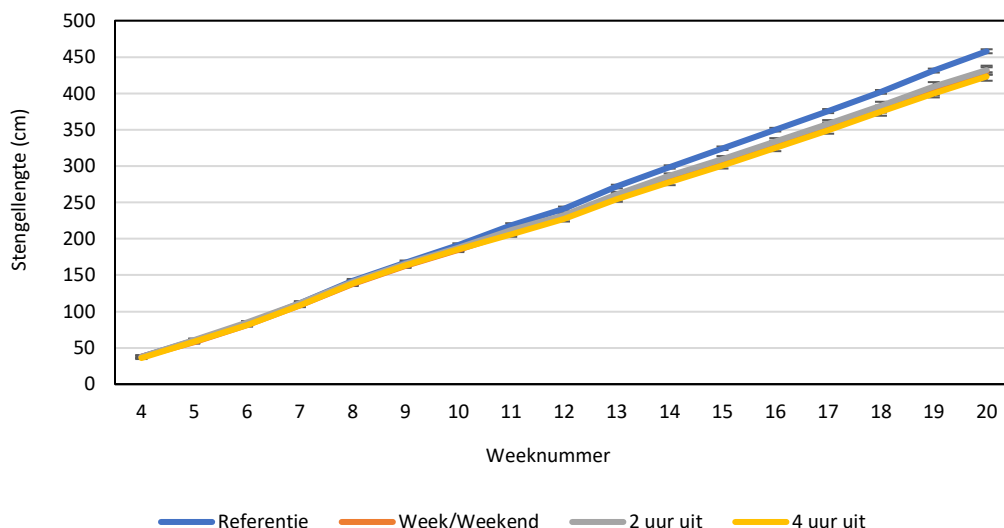
- De kwaliteit van de geoogste vruchten was bij alle behandelingen gelijk. Er was wel variatie tussen de geoogste trossen: trossen met lichte bontverkleuring (links) en mooi doorgekleurde trossen (rechts), maar deze verschillen waren niet terug te herleiden naar de behandelingen.



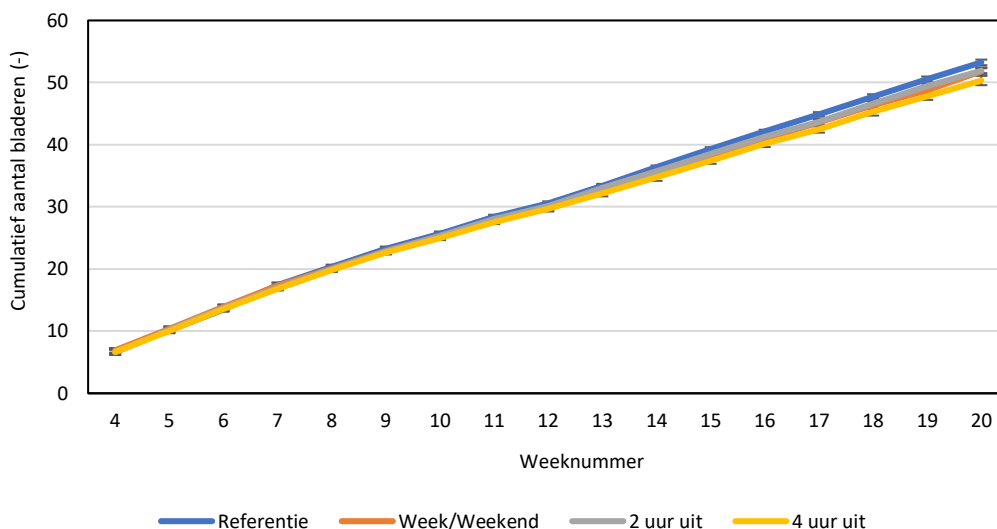
3.2.2 Wekelijkse plantmetingen

Gedurende de proef werden er wekelijks plantmetingen uitgevoerd om het effect van de lichtbehandelingen op groei en ontwikkeling van het gewas te kunnen monitoren. Deze metingen werden verricht aan de twee stengels van 6 meetplanten (dus 12 stengels in totaal) per behandeling. De metingen zijn op dezelfde dag uitgevoerd. De eerste metingen zijn verricht in week 4 van 2025, 1 week na planting. De dynamische lichtbehandelingen zijn gestart aan het einde van week 6, een aantal dagen nadat de metingen in die week verricht waren.

Het effect van de dynamische lichtbehandelingen (Week/Weekend; 2 uur uit; 4 uur uit) was dat de stengellengte iets korter was dan in de referentie behandeling (Figuur 3.9). Het aantal gevormde bladeren was ook iets lager bij de dynamische lichtbehandelingen dan bij de referentie behandeling (Figuur 3.10), al waren deze verschillen erg klein. Van de dynamische lichtbehandelingen resulteerde de '4 uur uit' behandeling in de kortste stengels en het laagste aantal bladeren.



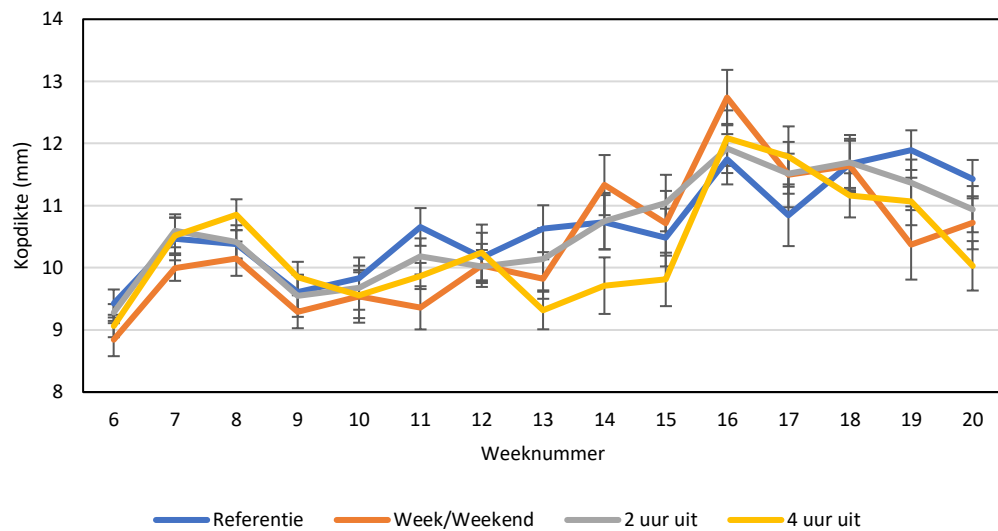
Figuur 3.9 Verloop van de cumulatieve lengtegroei tijdens de teelt voor de vier lichtbehandelingen. Data geven de gemiddelde stengellengte $\pm$ standaardfout weer ($n=12$).



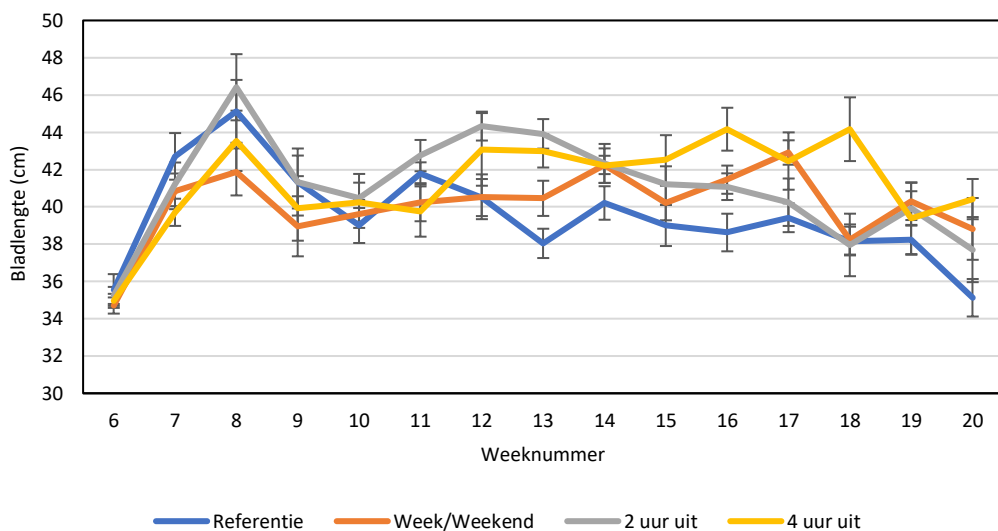
Figuur 3.10 Verloop van het cumulatieve aantal bladeren tijdens de teelt voor de vier lichtbehandelingen. Data geven het gemiddelde aantal bladeren per stengel $\pm$ standaardfout weer ($n=12$).

De gemiddelde kopdikte van de stengels varieerde tijdens de proef tussen de 8,8 en 12,7 mm (Figuur 3.11). Gedurende het grootste gedeelte van de teelt was er geen duidelijk effect te zien van de lichtbehandelingen op de kopdikte. Alleen in de weken 13 tot en met 15 hadden de stengels in de '4 uur uit' afdeling gemiddeld iets dunnere koppen dan de stengels van in de andere afdelingen.

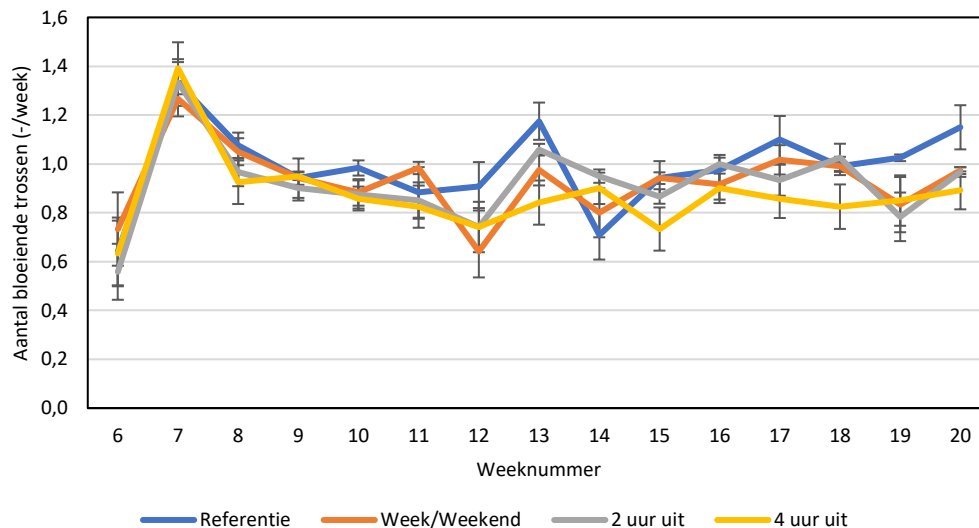
De wekelijkse plantmetingen lieten geen duidelijk effect zien van de behandelingen op de bladlengte (Figuur 3.12), de bloeisnelheid (Figuur 3.13) en de zettingssnelheid (Figuur 3.14).



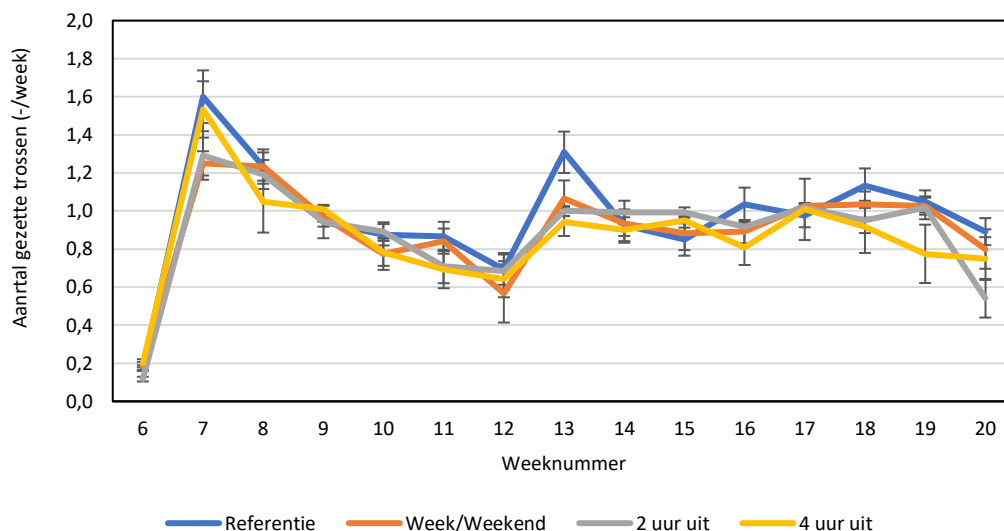
Figuur 3.11 Verloop van de kopdikte tijdens de teelt voor de vier lichtbehandelingen. Data geven de gemiddelde kopdikte $\pm$ standaardfout weer ($n=12$).



Figuur 3.12 Verloop van de bladlengte tijdens de teelt voor de vier lichtbehandelingen. Data geven de gemiddelde lengte van het blad onder de hoogste bloeiende tros $\pm$ standaardfout weer ($n=12$).

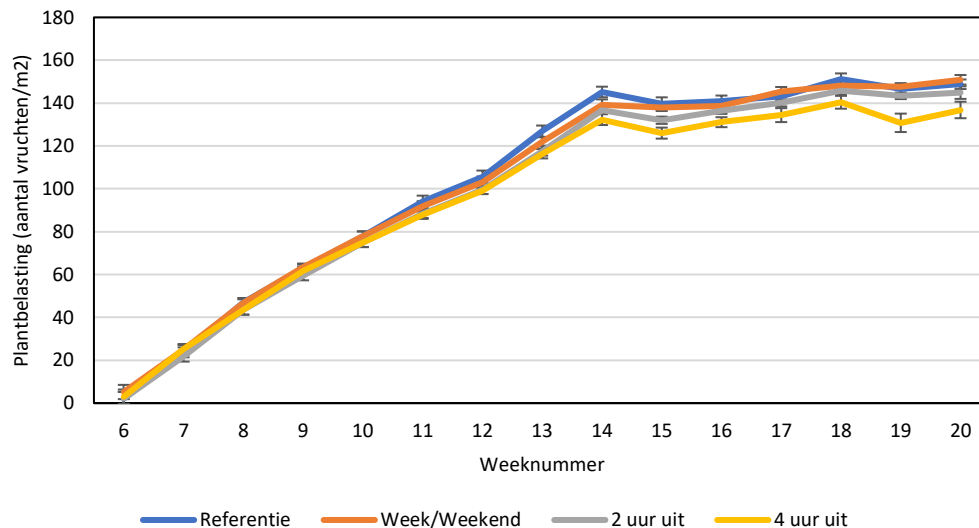


Figuur 3.13 Verloop van de bloeisnelheid tijdens de teelt voor de vier lichtbehandelingen. Data geven het gemiddelde aantal nieuwe bloeiende trossen per week per stengel $\pm$ standaardfout weer ($n=12$).



Figuur 3.14 Verloop van de zettingssnelheid tijdens de teelt voor de vier lichtbehandelingen. Data geven het gemiddelde aantal nieuw gezette trossen per week per stengel $\pm$ standaardfout weer ($n=12$).

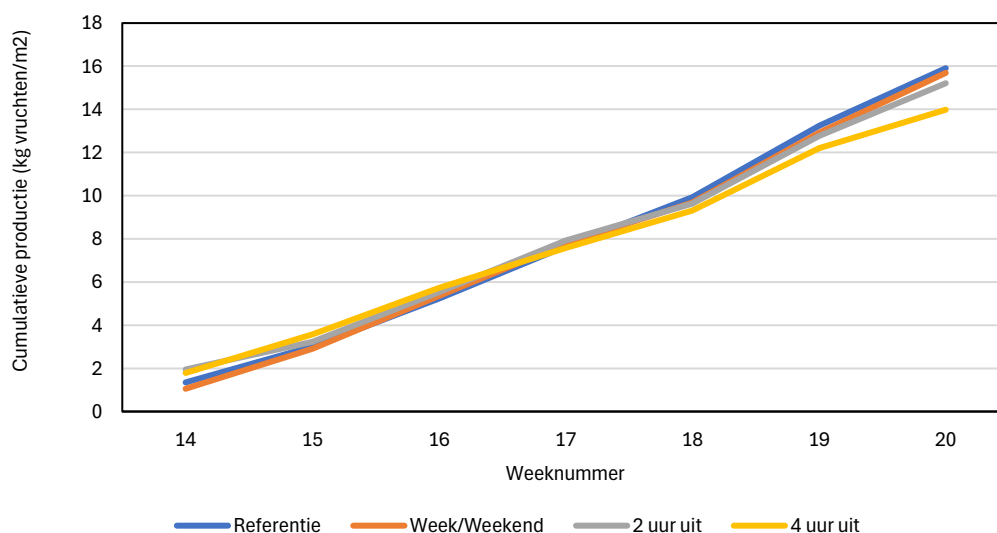
Wekelijks is ook de plantbelasting, uitgedrukt in het aantal vruchten per m^2 , voor iedere behandeling geregistreerd (Figuur 3.15). De plantbelasting werd berekend door het aantal vruchten per stengel te vermenigvuldigen met de stengeldichtheid ($3,6$ stengels per m^2). In de eerste weken van de proef was er nauwelijks verschil in plantbelasting tussen de verschillende behandelingen. Echter, vanaf week 11 nam de plantbelasting van de stengels in de '4 uur uit' behandeling gemiddeld minder hard toe dan die van de stengels in de andere behandelingen. Rond week 14 werd de maximale plantbelasting bereikt in alle behandelingen. Vanaf dat moment, tot en met het einde van de proef, was de plantbelasting in de '4 uur uit' behandeling steeds lager dan die in de andere behandelingen.



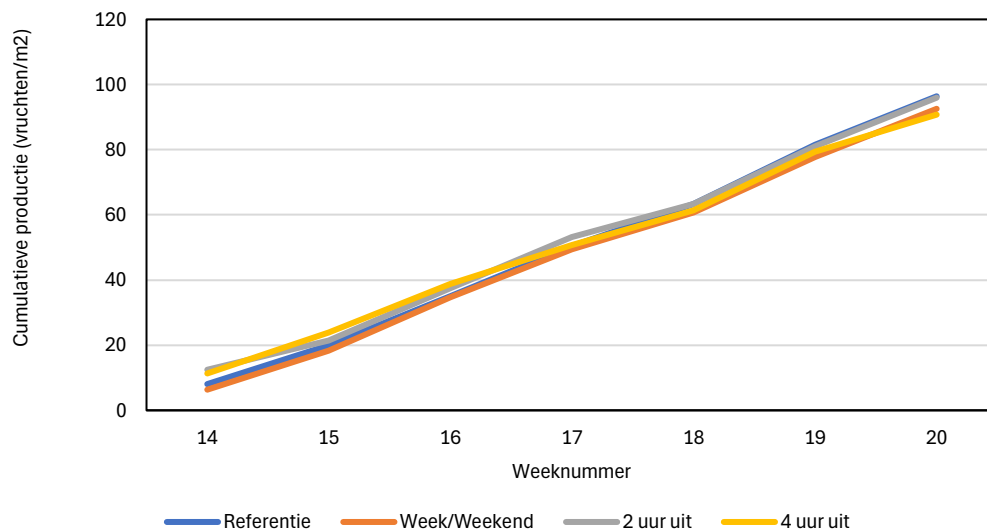
Figuur 3.15 Verloop van de plantbelasting tijdens de teelt voor de vier lichtbehandelingen. Data geven het gemiddeld aantal vruchten per $m^2 \pm$ standaardfout weer ($n=12$). Om plantbelasting te berekenen is het aantal gezette vruchten per stengel bepaald en vermenigvuldigd met de stengeldichtheid (3,6).

3.2.3 Productie

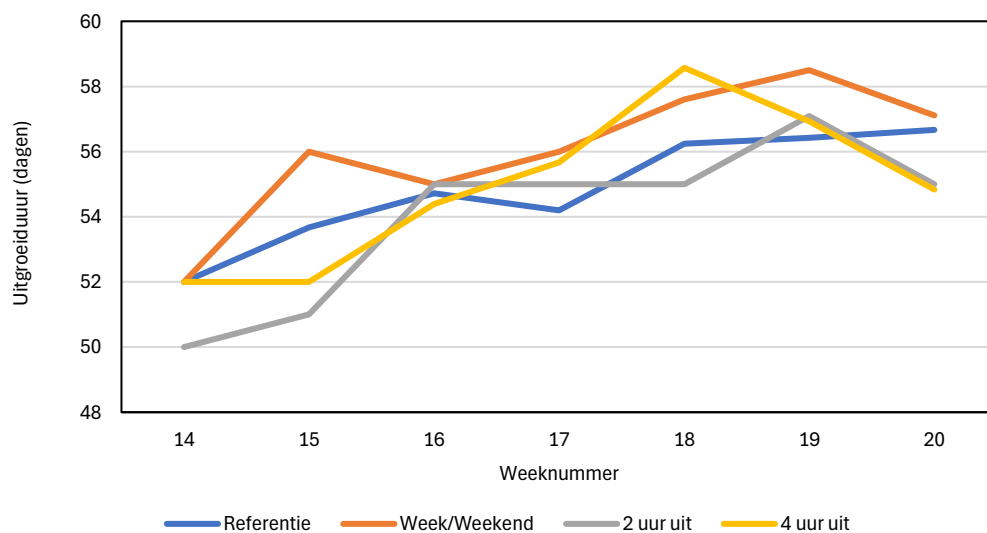
In week 14 werden er voor de eerste keer tomaten geoogst in alle afdelingen. Vanaf dat moment werd er één keer per week geoogst. De productiecijfers zijn gebaseerd op de hele afdeling, met uitzondering van de twee randrijen. In de eerste oogstweken was er weinig verschil in productie in kg vruchten per m^2 tussen de afdelingen (Figuur 3.16), maar vanaf week 18 blijft de productie in de '4 uur uit' behandeling achter ten opzichte van de andere afdelingen. Het aantal vruchten dat per behandeling geoogst werd, verschilde nauwelijks van elkaar (Figuur 3.17). Datzelfde gold ook voor de uitgroeiduur van de trossen (Figuur 3.18). Het gemiddeld vruchtgewicht was met name in de laatste weken van de proef lager voor de '4 uur uit' behandeling (Figuur 3.19), wat de lagere productie in kg per m^2 in deze afdeling verklaard. Het lagere vruchtgewicht is in lijn met de tragere groei van de vruchten in de '4 uur uit' afdeling (Figuur 3.20).



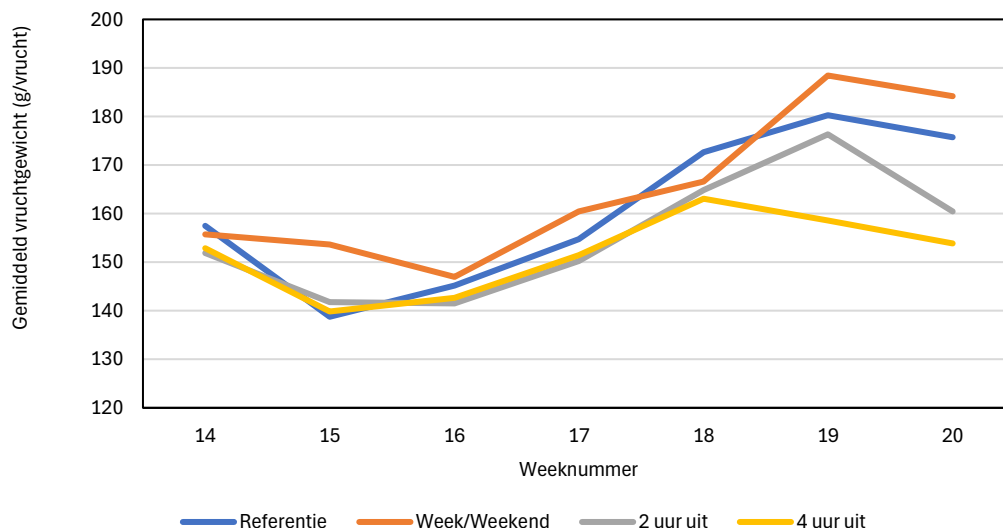
Figuur 3.16 Verloop van de cumulatieve productie in kg per m^2 tijdens de teelt voor de vier lichtbehandelingen. Data geven het cumulatieve gewicht van de geoogste vruchten per m^2 weer, waarbij de oogst van de randrijen buiten beschouwing werd gelaten.



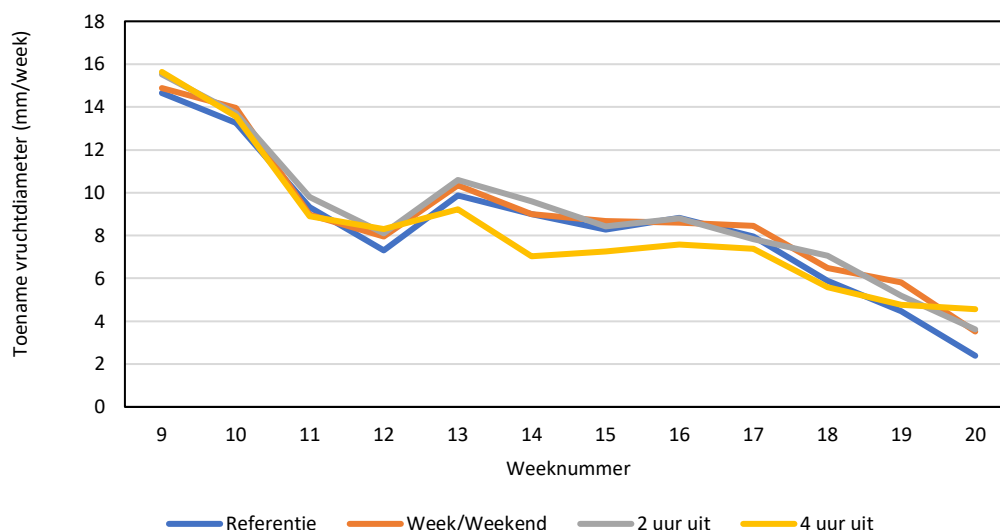
Figuur 3.17 Verloop van de cumulatieve productie in aantal vruchten per m^2 tijdens de teelt voor de vier lichtbehandelingen. Data geven het cumulatieve aantal geoogste vruchten per m^2 weer, waarbij de oogst van de randrijen buiten beschouwing werd gelaten.



Figuur 3.18 Verloop van de gemiddelde uitgroeiduur tijdens de teelt voor de vier lichtbehandelingen. Data geven het gemiddeld aantal dagen tussen zetting en oogst van de wekelijks geoogste trossen weer. De randrijen van de verschillende afdelingen zijn buiten beschouwing gelaten.

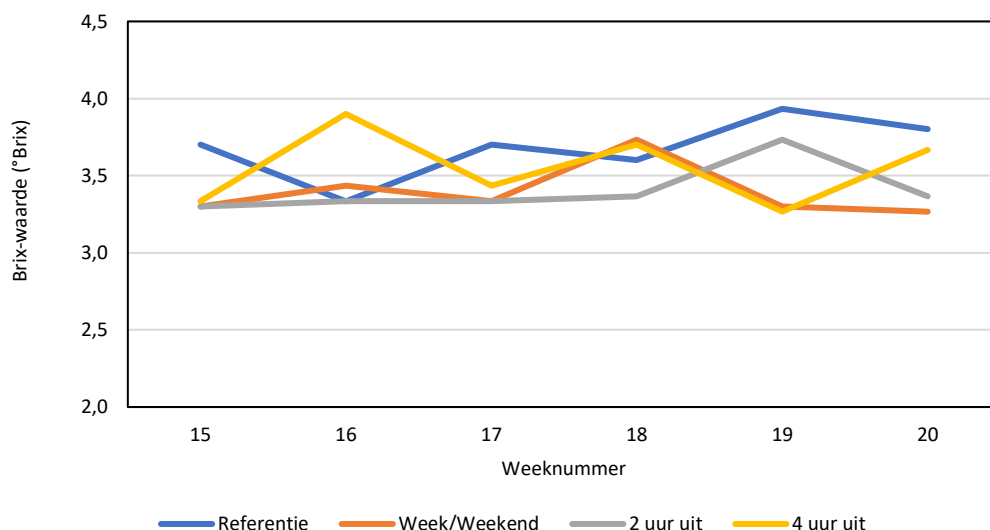


Figuur 3.19 Verloop van het gemiddeld vruchtgewicht per week tijdens de teelt voor de vier lichtbehandelingen. Data geven het gemiddelde versgewicht van de wekelijkse geoogste vruchten weer, waarbij de productie van de randrijen buiten beschouwing werd gelaten.



Figuur 3.20 Verloop van de vruchtgroei per week tijdens de teelt voor de vier lichtbehandelingen. Data geven de gemiddelde wekelijkse toename in vruchtdiameter van de eerste vrucht van alle trossen die op het moment van meten aan de stengels hingen weer. De randrijen van de verschillende afdelingen zijn buiten beschouwing gelaten.

Vanaf week 15 werd van een aantal geoogste vruchten per behandeling de Brix-waarde bepaald (Figuur 3.21). De Brix van de geoogste vruchten schommelde voor alle behandelingen rond de 3,5, maar er was geen duidelijk effect te zien van de dynamische lichtbehandelingen op de Brix.



Figuur 3.21 Verloop van de Brix waarden van de geoogste vruchten tijdens de teelt voor de vier lichtbehandelingen. Data geven de wekelijkse Brix-waarden gemeten van een mengsel van 15 geoogste vruchten. De randrijen van de verschillende afdelingen zijn buiten beschouwing gelaten.

3.2.4 Destructieve eindmetingen

Aan het einde van de proef zijn alle meetplanten destructief geoogst. Van alle 6 planten (12 stengels) per behandeling werden vers- en drooggewichten bepaald van de stengels, bladeren en (groene) vruchten aan de plant. Tijdens de teelt waren al de gewichten bepaald van het geplukte blad en de geoogste vruchten. Dat betekent dat door deze op te tellen, de totale biomassa die per behandeling gevormd is, bepaald kan worden (Tabel 3.1).

Het totale plantgewicht dat gevormd werd, was het hoogste voor de referentiebehandeling en de behandeling 'week/weekend'. Dit stemt overeen met de waarnemingen dat deze behandelingen er goed bij stonden. Het totale plantgewicht van de behandeling '2 uur uit' is 7.5% lager, hetgeen vooral verklaard wordt doordat er 10% minder rode vruchten werden geoogst in die behandeling. Het totale plantgewicht in de behandeling '4 uur uit' is 17% lager dan de referentie. Dit wordt veroorzaakt door een lager gewicht van zowel bladeren, stengels en (rode en groene) vruchten (Tabel 3.1).

Tabel 3.1 Effect van de lichtbehandelingen op de totale biomassa die tijdens de teelt is gevormd in gram drooggewicht per plant. Data zijn gemiddelden $\pm$ standaardfout ($n=6$).

	Blad	Stengel	Groene vruchten	Rode vruchten	Totaal
Referentie	457,8 $\pm$ 7,1	143,0 $\pm$ 0,2	268,3 $\pm$ 9,0	427,5 $\pm$ 24,9	1295,7 $\pm$ 35,4
Week/Weekend	453,4 $\pm$ 4,6	146,4 $\pm$ 0,4	293,5 $\pm$ 14,1	416,4 $\pm$ 34,6	1309,8 $\pm$ 48,5
2 uur uit	433,7 $\pm$ 4,8	136,4 $\pm$ 0,5	251,3 $\pm$ 9,1	384,0 $\pm$ 12,3	1205,3 $\pm$ 23,0
4 uur uit	365,2 $\pm$ 10,3	123,5 $\pm$ 1,4	217,5 $\pm$ 19,1	365,0 $\pm$ 36,5	1071,2 $\pm$ 61,8

De verdeling van de gevormde assimilaten over de verschillende organen (bladeren, stengel, rode en groene vruchten) verschilt niet aantoonbaar tussen de behandelingen (Tabel 3.2). De verschillen die te zien zijn, vallen over het algemeen weg in de standaard fouten van de behandelingen. Dat betekent dat de lichtbehandelingen niet de verdeling van de assimilaten over de vegetatieve (bladeren en stengel) of generatieve (vruchten) delen beïnvloedt. Er is ook geen effect van de lichtbehandelingen op de droge stof gehalten van bladeren, stengels, rijpe (rode) en onrijpe (groene) vruchten (Tabel 3.3).

Tabel 3.2 Effect van de lichtbehandelingen op de drogestofverdeling over bladeren, stengels en rijpe (rode) en onrijpe (groene) vruchten. Data zijn gemiddelde percentages van de totale biomassa tijdens de proef $\pm$ standaardfout ($n=6$).

	Blad	Stengel	Groene vruchten	Rode vruchten
Referentie	35,3 $\pm$ 0,9	11,0 $\pm$ 0,2	20,7 $\pm$ 0,6	32,9 $\pm$ 1,2
Week/Weekend	34,7 $\pm$ 1,1	11,2 $\pm$ 0,4	22,4 $\pm$ 0,7	31,6 $\pm$ 1,5
2 uur uit	36,0 $\pm$ 0,4	11,3 $\pm$ 0,2	20,8 $\pm$ 0,5	31,8 $\pm$ 0,6
4 uur uit	34,4 $\pm$ 1,3	11,6 $\pm$ 0,3	20,2 $\pm$ 1,0	33,8 $\pm$ 1,8

Tabel 3.3 Effect van de lichtbehandelingen op het drogestofgehalte van de bladeren, stengels, rijpe (rode) en onrijpe (groene) vruchten. Data zijn gemiddelde percentages (drooggewicht gedeeld door versgewicht $\times$ 100%) $\pm$ standaardfout ($n=6$).

	Blad	Stengel	Groene vruchten	Rode vruchten	Totaal
Referentie	9,15 $\pm$ 0,1	10,9 $\pm$ 0,2	5,0 $\pm$ 0,1	4,4 $\pm$ 0,1	6,0 $\pm$ 0,1
Week/Weekend	8,86 $\pm$ 0,1	11,3 $\pm$ 0,1	5,2 $\pm$ 0,1	4,3 $\pm$ 0,1	6,0 $\pm$ 0,1
2 uur uit	9,11 $\pm$ 0,1	11,0 $\pm$ 0,1	5,1 $\pm$ 0,1	4,3 $\pm$ 0,1	6,0 $\pm$ 0,0
4 uur uit	8,86 $\pm$ 0,0	11,1 $\pm$ 0,2	5,1 $\pm$ 0,1	4,3 $\pm$ 0,1	6,0 $\pm$ 0,1

Het totaal aantal rode vruchten (aan de plant op het moment van de eind oogst en eerder geoogst) per stengel was het hoogst voor de referentiebehandeling. In alle andere behandelingen waren ongeveer 2.5 vruchten per stengel minder geoogst. Het verschil in aantal groene vruchten aan de plant was groter (Tabel 3.4). Daar is te zien dat de plantbelasting (aantal vruchten aan de plant) in extreme lichtbehandelingen lager is, wat vooral verklaard wordt door miszetting in de behandeling '4 uur uit'. Die behandeling liep ook iets achter in aantal trossen. Waar in de referentiebehandeling tros 15 al grotendeels gezet was, was dit in de andere behandelingen minder, en in de behandeling '4 uur uit' nog helemaal niet, wat ook een verklaring is voor het lagere aantal (groene) vruchten in die behandelingen.

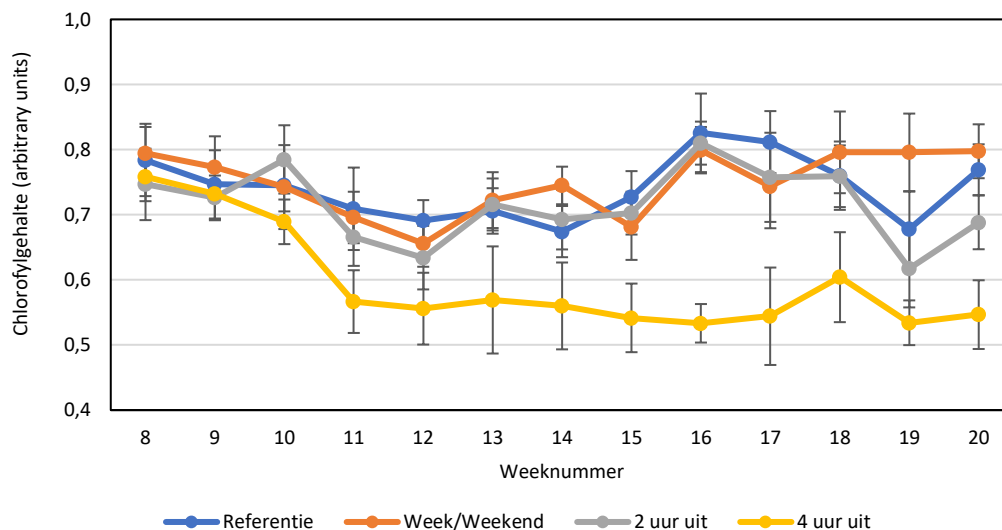
Tabel 3.4 Effect van de lichtbehandelingen op het totaal aantal geoogste rijpe (rode) en onrijpe (groene) vruchten per stengel. Data zijn gemiddelden $\pm$ standaardfout ($n=12$).

	Aantal rode vruchten	Aantal groene vruchten
Referentie	31,8 $\pm$ 1,0	35,8 $\pm$ 0,6
Week/Weekend	29,3 $\pm$ 0,9	34,7 $\pm$ 1,0
2 uur uit	29,1 $\pm$ 0,7	32,9 $\pm$ 0,5
4 uur uit	29,3 $\pm$ 1,8	30,8 $\pm$ 1,0

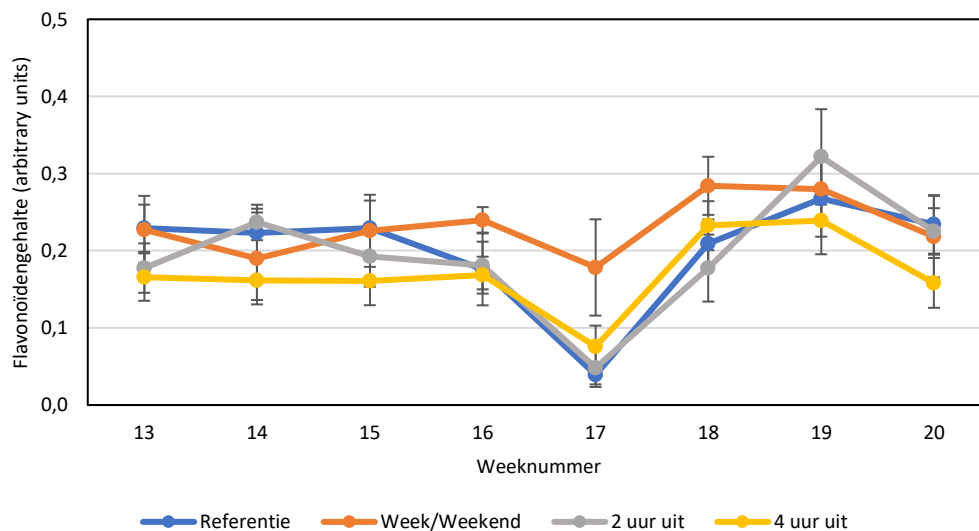
3.3 Sensormetingen

Naast wekelijkse plant- en productiemetingen zijn er tijdens de proef metingen gedaan met verschillende plantsensoren.

Enmaal per week zijn met een 'hand-held' multi-pigment meter de gehalten van chlorofyl, flavonoiden en anthocyanen in het blad gemeten. De metingen zijn steeds gedaan aan blad nummer 5 of 6 (geteld vanaf de top). De '4 uur uit' behandeling, in vergelijking met de andere behandelingen, vanaf week 10 resulteerde in lagere chlorofylgehalten in het blad (Figuur 3.22). Dit komt overeen met de bladvergelijking die in deze behandeling te zien was (zie foto's in paragraaf 3.2.1). Flavonoiden konden pas vanaf week 13 voor het eerst gemeten worden met de sensor (Figuur 3.23). Voor die tijd lagen de gehalten waarschijnlijk lager dan de detectielimiet van de gebruikte sensor. Er was geen duidelijk verschil tussen de behandelingen te zien. Het anthocyaangehalte in het blad was gedurende de hele proef lager dan de detectielimiet van de sensor, ongeacht de behandeling (data niet getoond).



Figuur 3.22 Verloop van het chlorofylgehalte van het jongste volgroeide blad voor de vier lichtbehandelingen. Data geven het gemiddelde chlorofylgehalte in blad nummer 5 of 6 (geteld vanaf de top) van de meetstengels $\pm$ standaardfout weer ($n=12$).

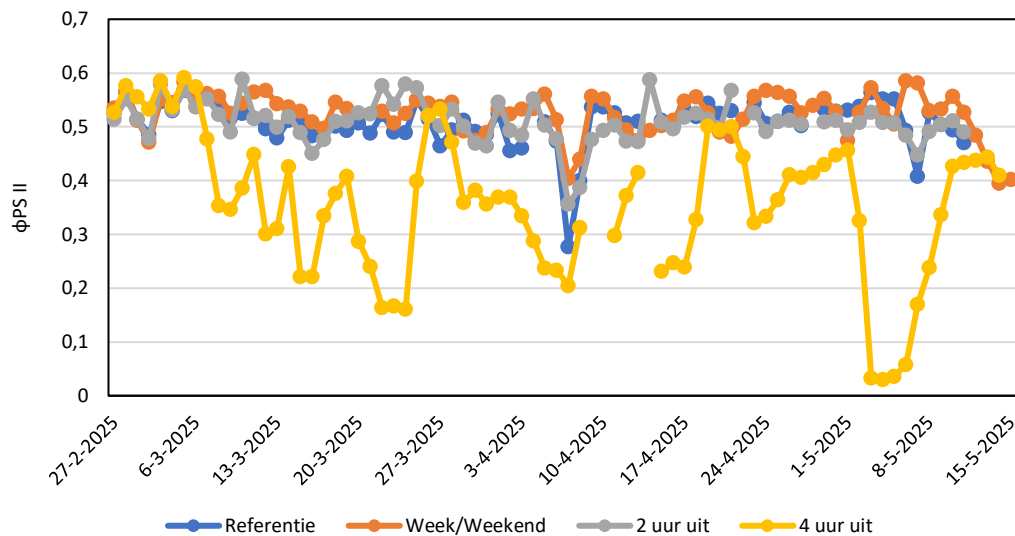


Figuur 3.23 Verloop van het gehalte aan flavonoiden gemeten aan het jongste volgroeide blad voor de vier lichtbehandelingen. Data geven het gemiddelde flavonoidengehalte in blad nummer 5 of 6 (geteld vanaf de top) van de meetstengels $\pm$ standaardfout weer ($n=12$).

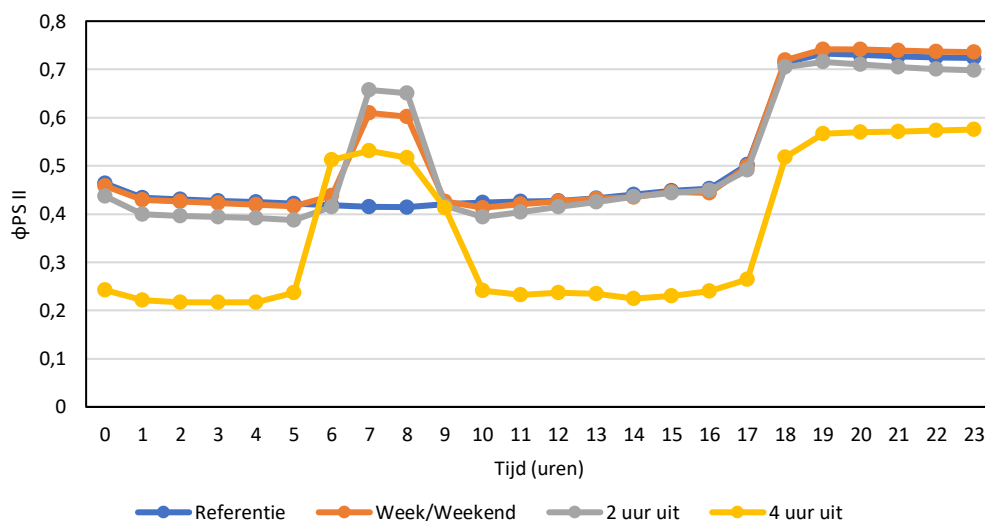
Naast de pigmentgehalten zijn er tijdens de proef ook ieder half uur chlorofylfluorescentiemetingen gedaan aan het blad. Net als de pigmentmetingen zijn deze metingen gedaan aan blad nummer 5 of 6 (geteld vanaf de top). De metingen zijn uitgevoerd met het Micro MoniPAM systeem. Per afdeling was er één sensor beschikbaar. Met behulp van de fluorescentiemetingen werd de ϕ PSII bepaald. Deze waarde is een indicatie voor efficiëntie van fotosysteem II (PSII) en voor het eventueel optreden van foto-inhibitie. Uit de metingen bleek dat de '4 uur uit' behandeling, vanaf 7 maart 2025 (29 dagen na de start van de behandeling) resulteerde in een lagere ϕ PSII ten opzichte van de andere behandelingen (Figuur 3.24). De afname in ϕ PSII in de '4 uur uit' behandeling komt overeen met de afname in chlorofylgehalte van het blad in dezelfde periode en is een indicatie dat de bladeren in de '4 uur uit' behandeling de fotosystemen het licht niet efficiënt meer kunnen verwerken.

Het op en neer gaan van de ϕ PSII waarde in de '4 uur uit' behandeling kan verklaard worden door het wisselen van de sensor van het ene naar het andere blad (dit gebeurde 3 maal per week). Omdat er een sterke variatie was in chlorofylgehalte (vergelijking) van het blad, was ook de waarde van de ϕ PSII sterk verschillend tussen planten in dezelfde behandeling.

Figuur 3.25 toont het 24-uurs cyclisch gemiddelde van de ϕ PSII per behandeling. De grafiek laat duidelijk zien dat de ϕ PSII in alle afdelingen afneemt in het licht, maar dat deze zowel in het licht als in het donker lager is in de '4 uur uit' afdeling dan in de andere afdelingen.

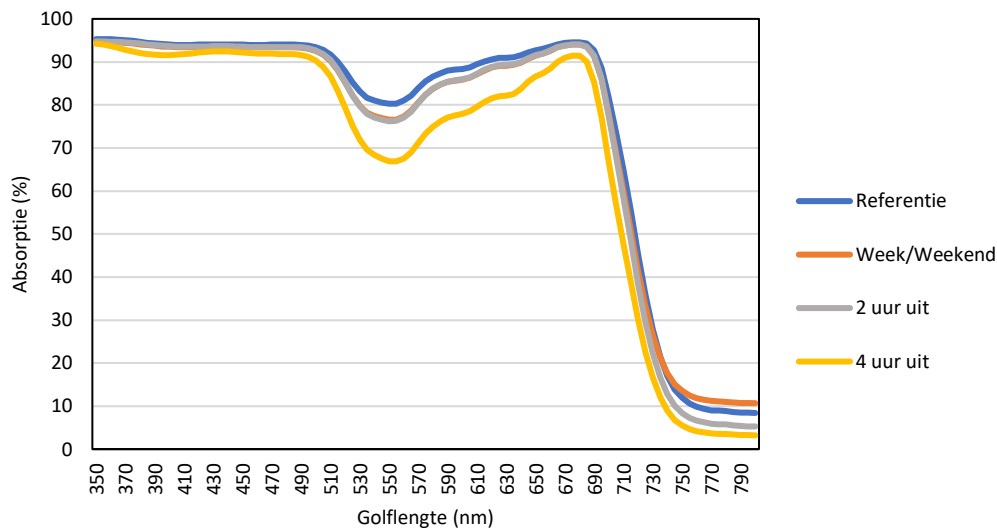


Figuur 3.24 Verloop van de efficiëntie van fotosysteem II (ϕ PSII, gemeten via chlorofylfluorescentie) in jong volgroeid blad voor de vier lichtbehandelingen. Data geven de gemiddelde ϕ PSII van blad nummer 4, 5 of 6 (van boven geteld) per dag weer en zijn gemiddelden van 48 metingen (twee metingen per uur, gedurende 24 uur per dag) aan één blad per behandeling.

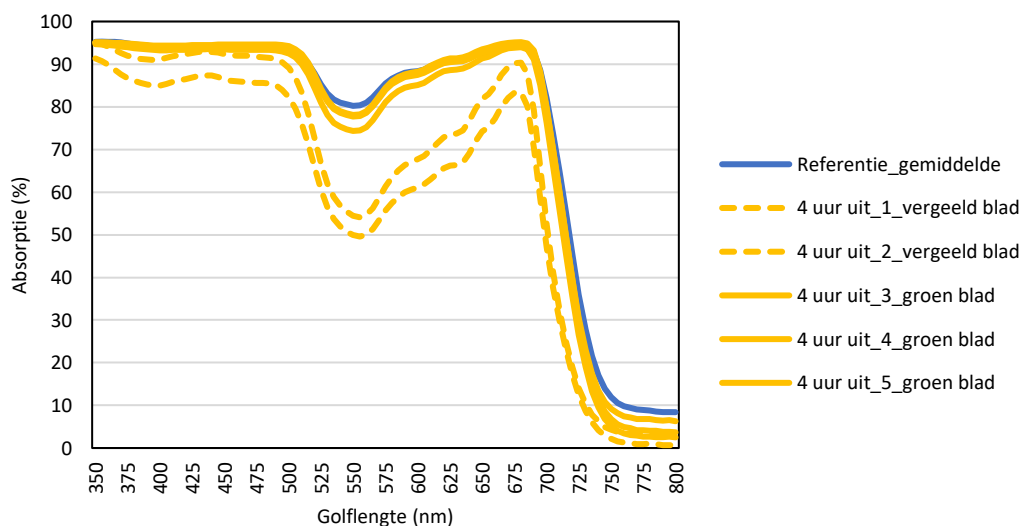


Figuur 3.25 24-uurs cyclisch gemiddelde van de efficiëntie van fotosysteem II (ϕ PSII, gemeten via chlorofylfluorescentie) in jong volgroeid blad gedurende de teelt. Data geven het cyclisch gemiddelde van de ϕ PSII van blad nummer 4, 5 of 6 (van boven geteld) weer.

Door de ϕ PSII te vermenigvuldigen met onder andere de hoeveelheid door het blad geabsorbeerde PAR licht kan de ETR (relatieve elektronentransportsnelheid, electron transport rate) worden berekend. Om de hoeveelheid door het blad geabsorbeerd PAR licht te bepalen, is voor alle behandelingen de reflectie en transmissie van 5 willekeurig gekozen bladeren per afdeling gemeten tussen 350 en 800 nm. De absorptie werd daarna berekend als 1-transmissie-reflectie (Figuur 3.26). Vooral de absorptie van licht met een golflengte tussen de 525 en 675 nm was een stuk lager voor bladeren ontwikkeld onder de '4 uur uit' behandeling dan voor bladeren ontwikkeld onder de andere behandelingen. Daarbij moet worden opgemerkt dat er veel variatie zat tussen de gemeten bladeren: sommige bladeren in de '4 uur uit' afdeling waren sterk vergeeld en absorbeerden daardoor aanzienlijk minder licht dan de groene bladeren uit dezelfde afdeling (zie Figuur 3.27 en 3.28).



Figuur 3.26 Licht absorptiespectra van jonge volgroeide bladeren. De figuur toont voor de vier behandelingen het gemiddelde licht absorptiespectrum van blad nummer 5 (van boven geteld), geoogst op 30 april 2025. Data zijn gemiddelden van 5 willekeurig gekozen bladeren per behandeling.

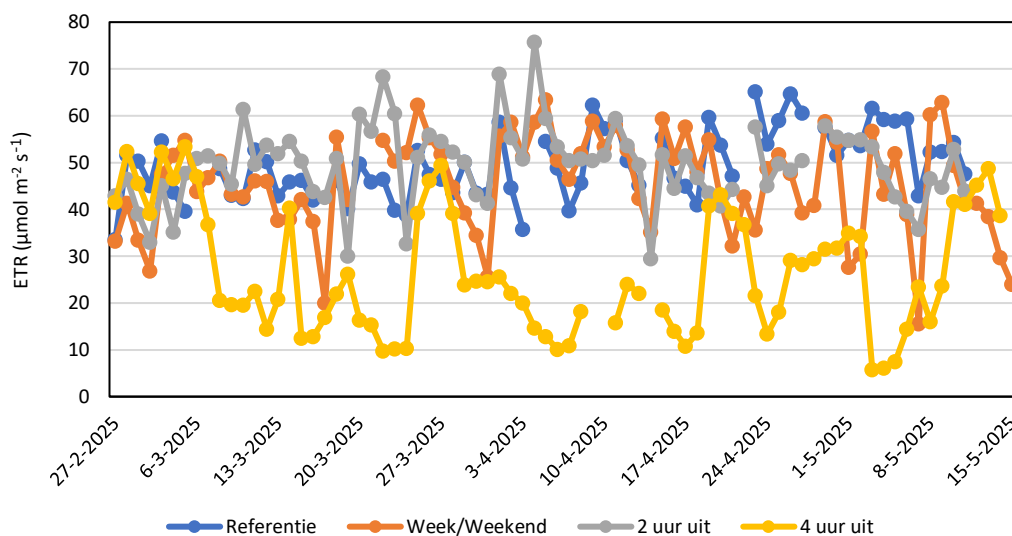


Figuur 3.27 Variatie in licht absorptiespectra van jonge volgroeide bladeren van '4 uur uit' planten. De figuur toont voor de 'Referentie' behandeling het gemiddelde licht absorptiespectrum zoals te zien in Figuur 3.25 en toont voor de '4 uur uit' behandeling de licht absorptiespectra van de individuele bladeren. Van die laatsten waren sommige vergeeld (onderbroken lijnen).



Figuur 3.28 Voorbeelden van bladeren van '4 uur uit' planten waarvan de licht absorptiespectra zijn bepaald. Links een voorbeeld van een vergeeld blad; rechts een voorbeeld van een groen blad.

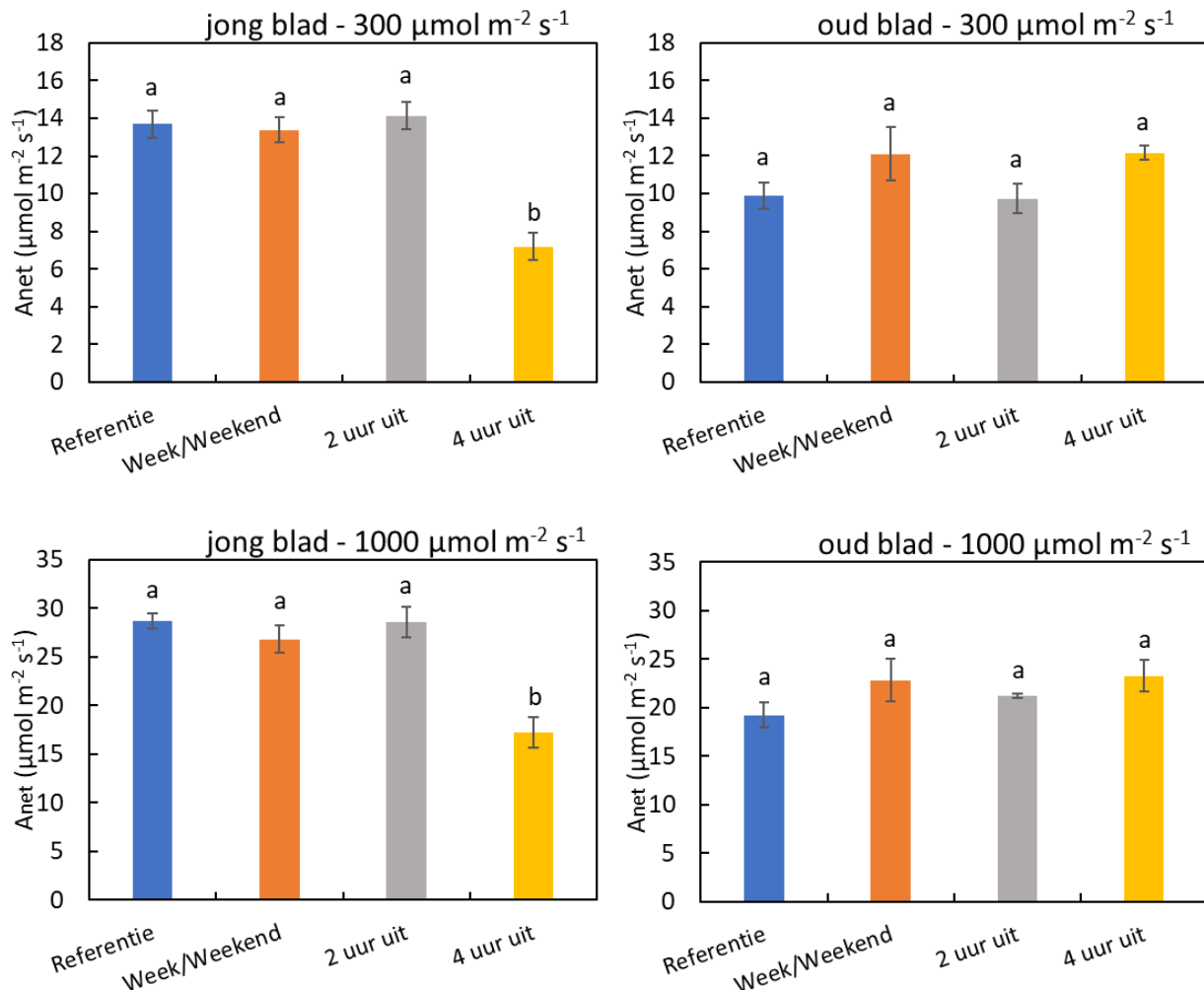
De lagere ϕ PSII in de '4 uur uit' behandeling gaat samen met een lagere berekende ETR (Figuur 3.29).



Figuur 3.29 Verloop van het daggemiddelde van de electronentransportsnelheid (Electron Transport Rate, ETR) tijdens de lichtperiode van blad nummer 4, 5 of 6 (van boven geteld) in jong volgroeid blad voor vier behandelingen. De ETR is berekend door de ϕ PSII waarden, gemeten gedurende de lichtperiode, te vermenigvuldigen met de PAR intensiteit, de gemeten lichtabsorptie van het blad (zoals te zien in Figuur 3.25), en een correctiewaarde van 0,5 (Maxwell & Johnson, 2000).

De ETR waarden duiden mogelijk op een lagere fotosynthese van het blad dat de '4 uur uit' behandeling ontving. Om dit te bevestigen zijn op één moment tijdens de proef fotosynthesemetingen gedaan aan jong volgroeid blad (vergelijkbaar met het blad waaraan pigment- en chlorofylfluorescentiemetingen zijn gedaan) en ouder blad, bij 300 en bij 1000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ licht in de bladkamer van de fotosynthesemeter. Tijdens de metingen werd een significant lagere fotosynthese gemeten in de jonge volgroeide bladeren die de '4 uur uit' behandeling, zowel bij lage als hoge lichtintensiteit (Figuur 3.30). Deze behandeling had dus een negatief effect op de fotosynthesecapaciteit van de jonge volgroeide bladeren.

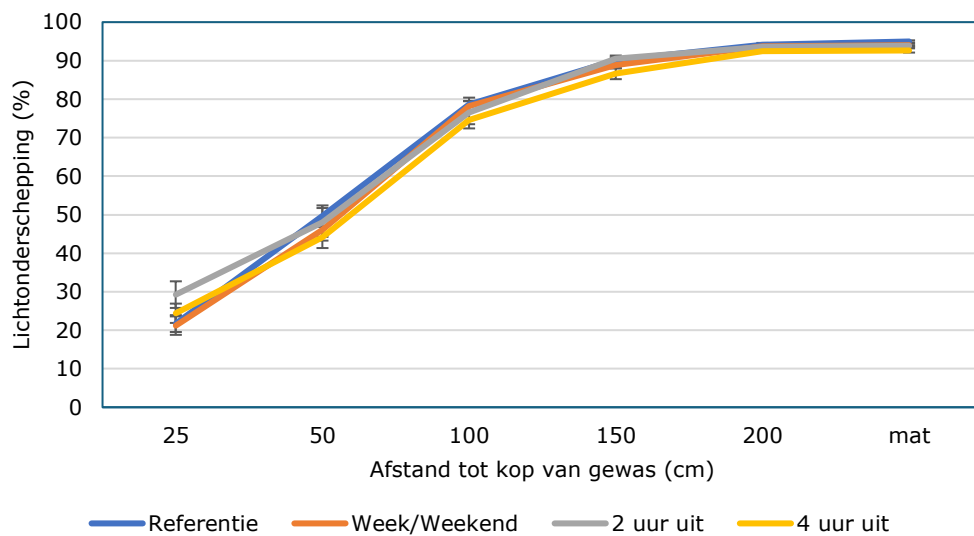
Dit bleek niet te gelden voor de oudere bladeren: er werd geen significant effect gevonden van de behandelingen op de fotosynthese van het oudere blad. Dat de '4 uur uit' behandeling geen negatief effect op de fotosynthese in oudere bladeren heeft komt mogelijk doordat oudere bladeren beter bestand zijn tegen hoge lichtintensiteiten, waardoor geen (tijdelijke) schade aan fotosysteem II optreedt (het blad kan zich beter hebben aangepast). Een andere mogelijke verklaring is dat het oudere blad minder schade oploopt doordat het minder licht opvangt dan het jongere blad, dat hoger gepositioneerd is in het gewas.



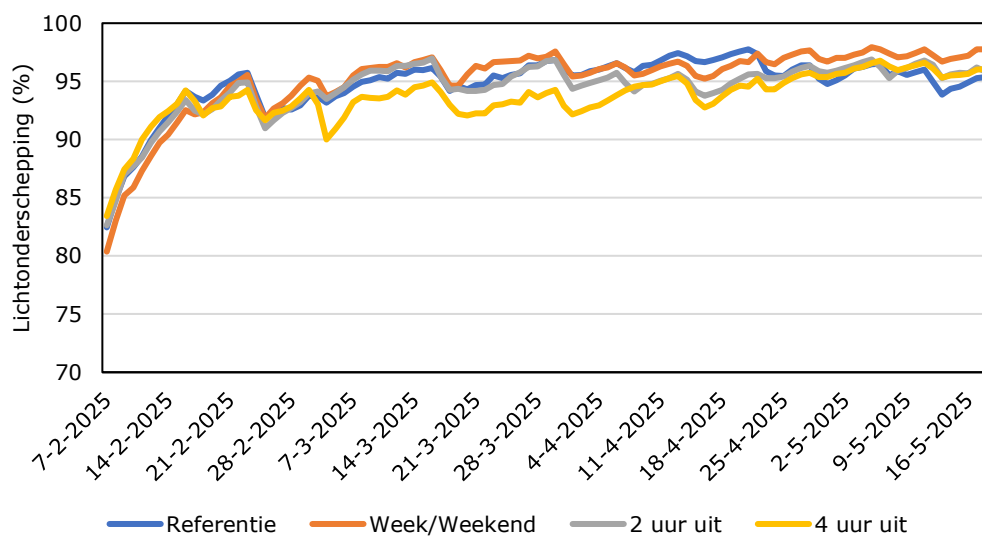
Figuur 3.30 Effect van de lichtbehandelingen op de netto fotosynthesesnelheid van jong en oud blad. Linker diagrammen tonen voor de vier behandelingen de fotosynthese gemeten in jong volgroeid blad (blad nummer 4, 5 of 6 van boven geteld) bij een PAR lichtintensiteit van $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (links boven) en bij $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (links onder). Rechter diagrammen tonen fotosynthese in ouder blad (blad nummer 8, 9 of 10 van boven geteld) bij $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (rechts boven) en bij $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (rechts onder). Metingen zijn uitgevoerd op 16 en 17 april 2025, tussen 11:22 en 15:26 (altijd ten minste 2 uur na aanschakelen van de LEDs). Data zijn gemiddelde A_{net} in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \pm \text{standaardfout}$ ($n=4$ bladeren). Verschillende letters staan voor statistisch significant verschil ($P < 0.05$).

Fotosynthese van het gewas wordt niet alleen bepaald door de fotosynthesecapaciteit van het blad, maar ook door de hoeveelheid licht dat door het gewas wordt onderschept. Gedurende de proef is eenmaal de lichtonderschepping door het gewas gemeten op verschillende hoogtes. Uit deze metingen bleek dat de lichtonderschepping van het gewas gemiddeld iets lager was in de afdeling van de '4 uur uit' behandeling (Figuur 3.31). Echter, het ging hier om zeer kleine verschillen (niet statistisch significant) van enkele procenten. Lichtonderschepping werd ook dagelijks gemeten met behulp van vaste lijnsensoren in iedere afdeling die ter hoogte van de mat waren gemonteerd.

De resultaten van deze metingen laten eenzelfde beeld zien als de eerder beschreven eenmalige uitgebreide meting: de lichtonderschepping door het gewas lag enkele procenten lager in de '4 uur uit' afdeling (Figuur 3.32).



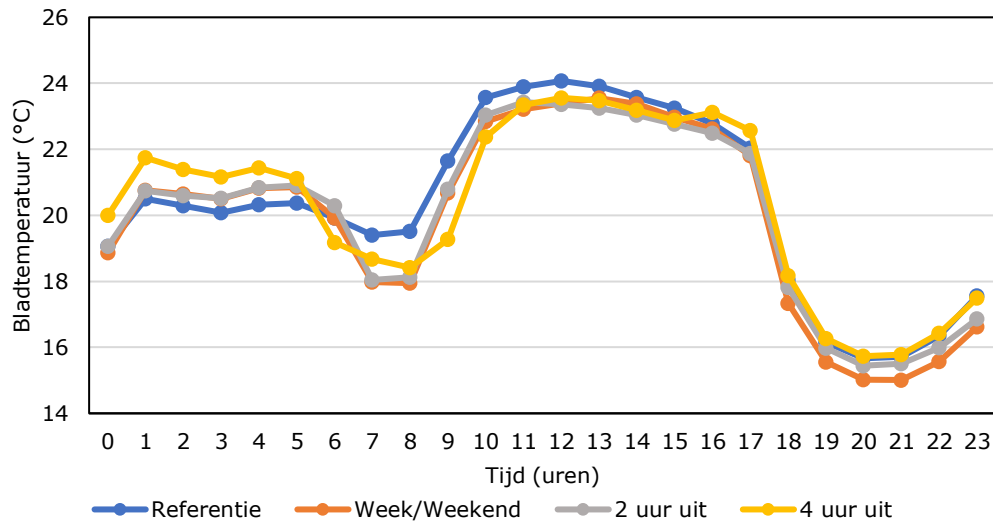
Figuur 3.31 Lichtonderschepping door het gewas op verschillende hoogtes. De figuur toont voor de vier behandelingen het % PAR licht dat door het gewas wordt onderschept op verschillende hoogtes. In iedere afdeling zijn op 6 plaatsen metingen uitgevoerd op 21 maart 2025. Data zijn gemiddelde lichtonderschepping (%) $\pm$ standaardfout ($n=6$).



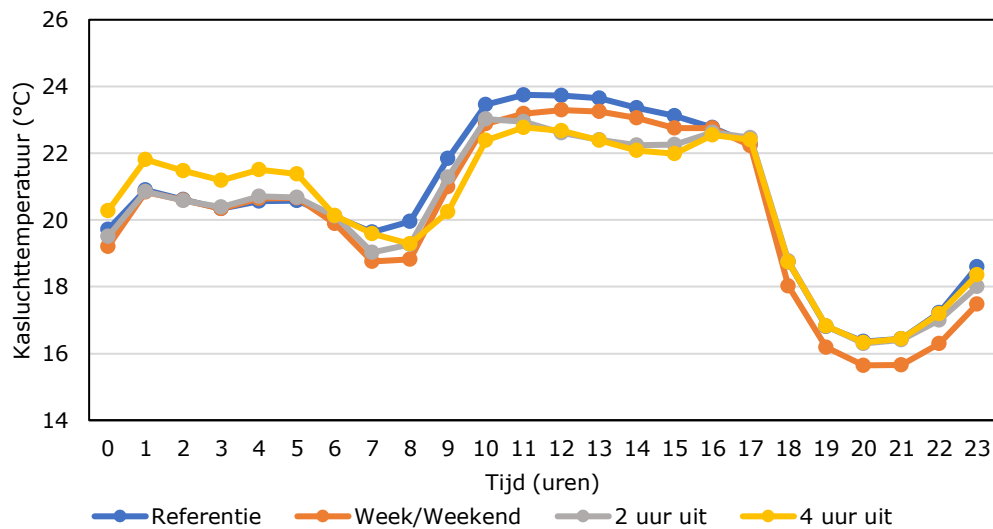
Figuur 3.32 Lichtonderschepping van het gewas gedurende de proef, gemeten op één vaste hoogte. De figuur toont voor de vier behandelingen per dag het % PAR licht dat door het gewas wordt onderschept, gemeten ter hoogte van de mat met een vaste lijnsensor die iedere 5 minuten een meting uitvoerde. Data zijn gemiddelden van alle metingen gedurende de fotoperiode.

Tot slot zijn er metingen gedaan aan het effect van de verschillende dynamische lichtbehandelingen op de temperatuur van het blad en de lucht in de buurt van het blad. Figuur 3.33 en 3.34 tonen het 24-uurs cyclisch gemiddelde van de bladtemperatuur en kasluchttemperatuur, respectievelijk, gemeten gedurende drie dagen tijdens de proef. Figuur 3.35 toont het cyclisch gemiddelde van het verschil tussen de kaslucht- en bladtemperatuur, gebaseerd op de data in Figuur 3.33 en 3.34.

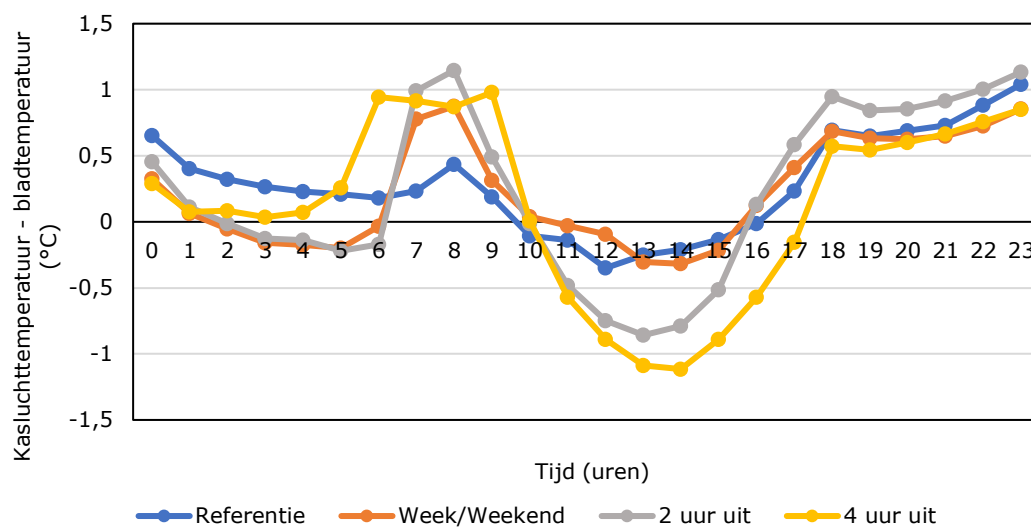
De resultaten laten duidelijk zien is dat tijdens de periode in de ochtend dat de LEDs voor de eerste keer uitgeschakeld worden in de 'Week/Weekend', '2 uur uit' en '4 uur uit' behandelingen de planttemperatuur sterker daalt dan de kasluchttemperatuur. De bladtemperatuur komt daarmee in deze periode ongeveer 1°C lager te liggen dan de kasluchttemperatuur. Wanneer de LEDs vervolgens weer worden aangeschakeld neemt de bladtemperatuur sterker toe dan de kasluchttemperatuur, waardoor de bladtemperatuur juist boven de kasluchttemperatuur komt te liggen in deze periode.



Figuur 3.33 24-uurs cyclisch gemiddelde van de bladtemperatuur. De figuur toont voor de vier behandelingen het cyclisch gemiddelde van de bladtemperatuur, gemeten aan jonge volgroeid bladeren (nummer 4, 5 of 6 van boven geteld) van 17 t/m 20 maart 2025 (n=2-4 bladeren).



Figuur 3.34 24-uurs cyclisch gemiddelde van de kasluchttemperatuur. De figuur toont voor de vier behandelingen het cyclisch gemiddelde van de kasluchttemperatuur, gemeten op dezelfde posities als waar de bladtemperatuur is gemeten (zie Figuur 3.33).



Figuur 3.35 24-uurs cyclisch gemiddelde van het verschil tussen de kaslucht- en bladtemperatuur. De figuur toont voor de vier behandelingen het cyclisch gemiddelde van het verschil tussen de kaslucht- en bladtemperatuur. Waarden van boven de '0' = kasluchttemperatuur>bladtemperatuur; waarden onder de '0' = kasluchttemperatuur<bladtemperatuur. Beide metingen zijn verricht op dezelfde posities op jonge volgroeide bladeren (nummer 4, 5 of 6 geteld van boven) van 17 t/m 20 maart 2025 (n=2-4 bladeren).

4 Discussie & conclusies

In het project "DYNAMIEK: Dynamisch belichten op basis van plantsensoren en modellen: wanneer mag het licht uit?" is onderzoek gedaan naar de grenzen en mogelijkheden van dynamisch belichten. In het eerste deel van het project (beschreven in het rapport "Dynamic lighting in dwarf tomatoes: limitations and opportunities", Dieleman et al., 2025b) zijn experimenten uitgevoerd met lichtwisselingen met dwergtomaten, die hebben aangetoond dat er geen effect was op plantgewicht, productie en onderliggende processen als er tenminste een lichtintensiteit van $60 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ werd aangehouden. Als de lichten aan- en uit werden geschakeld, was de bloei, zetting en oogst minder. Er is echter nog (nagenoeg) geen kennis van de effecten van dynamisch belichten op een producerend hoge draad tomatengewas. Daarom is in werkpakket 4 van het project "DYNAMIEK" een experiment gedaan waarin dat onderzocht is. De onderzoeksvragen hierbij waren:

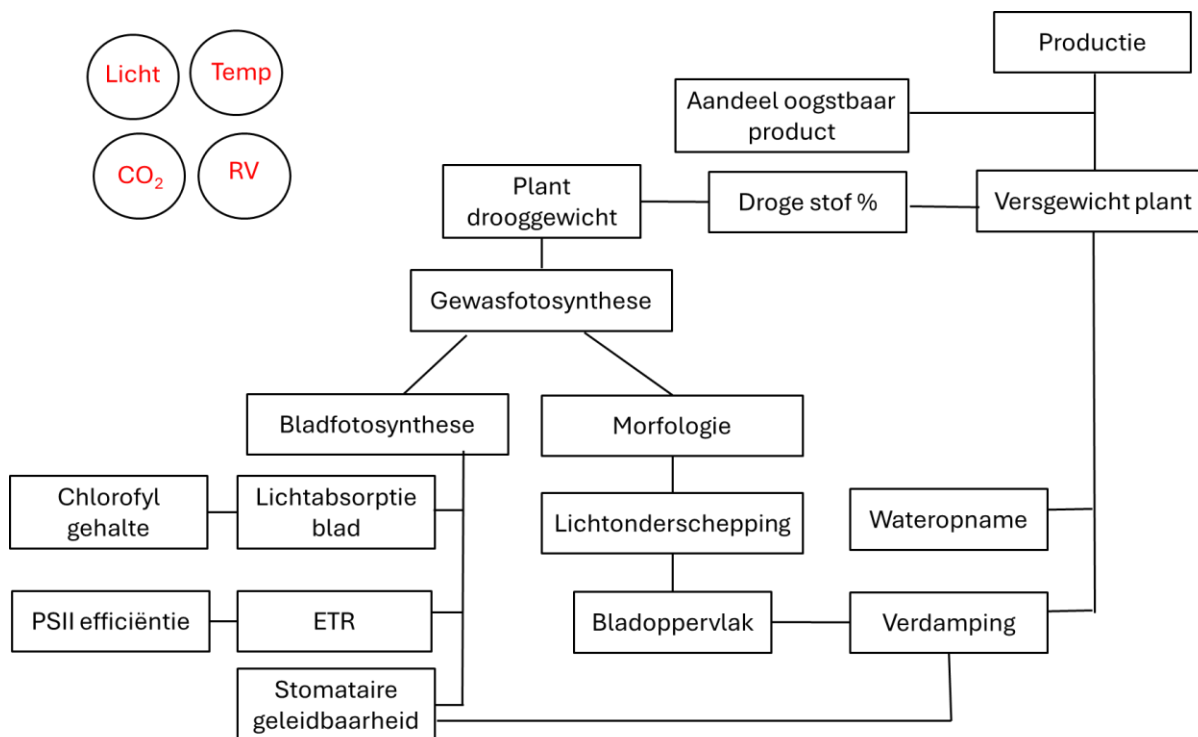
- Is het mogelijk tomaten te telen onder een dynamische belichtingsstrategie waarbij in de ochtend, gedurende een periode waarin de stroomprijzen hoog zijn, de belichting enkele uren afgeschakeld wordt?
- Wat zijn de grenzen van deze periode waarin de belichting uitgeschakeld wordt voor het gewas?
- Wat zijn de effecten van een dynamische belichtingsstrategie op de groei en productie van een tomatengewas, en wat zijn de onderliggende processen?
- Wat is een van de eerste plantprocessen die (zichtbaar) beïnvloed wordt door wisselende lichtomstandigheden, en is dit bruikbaar als een vroege indicatie van mogelijk negatieve effecten?
- Is dit plantproces goed vroegtijdig en geautomatiseerd te meten met een sensor, en zo ja, welke?

4.1 Effecten van dynamische belichtingsstrategieën op groei en productie

De eerste onderzoeksvraag die gesteld werd bij het opzetten van dit onderzoek was "Is het mogelijk tomaten te telen onder een dynamische belichtingsstrategie waarbij in de ochtend, gedurende een periode waarin de stroomprijzen hoog zijn, de belichting enkele uren afgeschakeld wordt?". Uit de resultaten van dit onderzoek blijkt dat het inderdaad goed mogelijk is om tomaten te telen onder dynamische belichtingsstrategieën waarbij de (LED) belichting in de ochtend, gedurende een periode waarin de stroomprijzen hoog zijn, tijdelijk uitgeschakeld wordt. Uit de resultaten bleek dat, ten opzichte van de 'Referentie' lichtbehandeling, waarbij er iedere dag gedurende 18 uur ononderbroken werd belicht, er nauwelijks effect was van het uitschakelen van de LEDs gedurende twee uur in de ochtend op de groei en ontwikkeling van het gewas. Daarbij deed het gewas in de 'Week/Weekend' behandeling, waarbij de LEDs alleen op doordeweekse dagen 2 uur werden uitgeschakeld, het wat betreft productie wel iets beter dan het gewas in de '2 uur uit' afdeling. Echter, deze verschillen zijn zeer klein. De '4 uur uit' behandeling, waarbij de LEDs iedere ochtend 4 uur werden uitgeschakeld, had wel een duidelijk negatief effect op het gewas en de productie. Dat betekent dat de grens van de periode waarin LED belichting in de ochtend kan worden uitgeschakeld voor dit gewas dus ergens tussen de 2 en 4 uur ligt.

4.2 Effecten van dynamische belichtingsstrategieën op processen die groei en productie bepalen

In het eerste deel van het project DYNAMIEK is een conceptueel kader beschreven van plantprocessen die de uiteindelijke effecten van dynamische belichtingsstrategieën op groei en productie kunnen beïnvloeden (Dieleman et al., 2025b). Een aantal relevante processen zijn chlorofylgehalte, fotosynthese kenmerken en lichtonderschepping door het gewas.



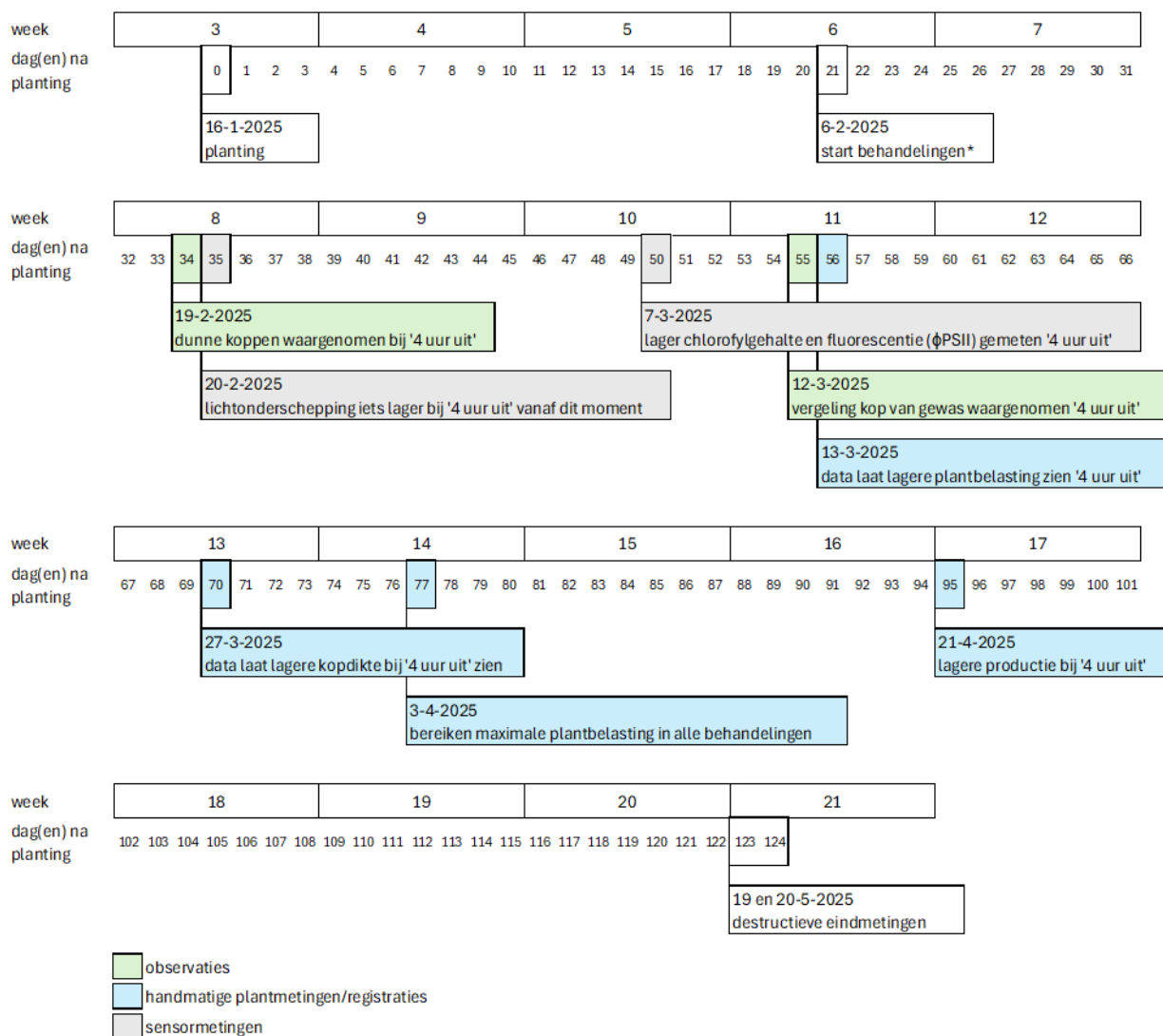
Figuur 4.1 Schematisch overzicht van plantprocessen die de basis vormen voor groei en productie.

Een groot deel van de planten in de '4 uur uit' behandeling had sterk vergeelde en op het oog dunne koppen. Ook resulteerde de '4 uur uit' behandeling in vergelijking met de andere behandelingen in minder groei (toename in biomassa) van het gewas. Daarnaast resulteerde de behandeling in een lagere plantbelasting (het aantal vruchten per m²). Dit was vooral duidelijk vanaf het moment dat de maximale plantbelasting werd bereikt in alle afdelingen, in week 14. De productie van dit gewas lag ook duidelijk lager. Dat was het resultaat van een lager vruchtgewicht. Echter, uit de destructieve metingen aan het einde van de proef bleek dat het gewas in de '4 uur uit' afdeling gemiddeld ook een tros minder had aangelegd en er minder vruchten waren gezet.

In dit onderzoek zijn verschillende plantmetingen uitgevoerd om inzicht te krijgen in de effecten van de toegepaste dynamische belichtingsstrategieën op fysiologische processen die verschillen in gewasgroei en productie mogelijk kunnen verklaren. Hieruit bleek dat, in vergelijking met de andere behandelingen, de '4 uur uit' behandeling al vroeg tijdens de proef resulteerde in lagere chlorofylgehaltes, een lagere efficiëntie van fotosysteem II (Φ PSII; bepaald op basis van chlorofylfluorescentiemeting) en een lagere ETR. De lagere chlorofylgehaltes verklaren waarom er in de '4 uur uit' afdeling veel stengels met sterk vergeelde koppen werden waargenomen. Fotosynthesemetingen lieten zien dat de '4 uur uit' behandeling resulteerde in een lagere fotosynthesecapaciteit van jong volgroeid blad. Deze resultaten duiden erop dat het 4 uur lang uitschakelen van de LED belichting aan het einde van de ochtend schade veroorzaakt aan het fotosynthesesysteem, met name in het jongere blad van het tomatengewas, terwijl dit niet lijkt te gebeuren wanneer de belichting 2 uur wordt uitgeschakeld. Dit verklaart waarschijnlijk de negatieve effecten van de '4 uur uit' behandeling op de groei van gewas en de productie.

Een van de vragen in dit project was "Wat een van de eerste plantprocessen is die (zichtbaar) beïnvloed wordt door wisselende lichtomstandigheden, en is dit bruikbaar als een vroege indicatie van mogelijk negatieve effecten?". Om deze vraag te kunnen beantwoorden, is een tijdlijn van de teelt gemaakt (Figuur 4.2), waarin is aangegeven op welke momenten er effecten van de '4 uur uit' behandeling meetbaar waren (al dan niet met een sensor) of met het oog waargenomen konden worden. Een week voordat er voor het eerst een lagere plantbelasting werd gemeten in de '4 uur uit' afdeling, lieten de pigmentmetingen al een daling in het chlorofylgehalte zien en de chlorofylfluorescentie metingen al een daling in de Φ PSII (efficiëntie van fotosysteem II). Twee weken eerder lieten de lijnsensoren al een daling in de verticale lichtonderschepping zien, wat overeenkwam met de geobserveerde 'dunnere koppen' in het gewas in de '4 uur uit' afdeling.

Deze sensormetingen kunnen dus mogelijk als 'early warning' signalen dienen die al in een vroeg stadium aangeven dat het gewas negatieve gevolgen ondervindt van bijvoorbeeld een dynamische belichtingsstrategie. Op basis hiervan zou een teler vervolgens kunnen besluiten de belichtingsstrategie aan te passen en mogelijk negatieve lange-termijn effecten van de belichtingsstrategie, zoals een lagere productie, te voorkomen.



Figuur 4.2 Tijdslijn van de proef met belangrijkste observaties en (sensor) meetresultaten.

Literatuur

- Bhuiyan, R., & Van Iersel, M. W. (2021). Only extreme fluctuations in light levels reduce lettuce growth under sole source lighting. *Frontiers in Plant Science* 12, 619973.
- Dieleman, J.A., Van Steekelenburg, G., Carpineti, C., Weerheim, K., Noordam, M., Leiss, K., 2024. Dynamisch belichten in jonge tomatenplanten: grenzen en mogelijkheden. Deelrapport IV van project LED licht met de zon mee Rapport WPR-1187
- Dieleman, J.A., Paul, J., De Graaf, E., 2024b. Dynamisch belichten van dwergtomaten: grenzen en mogelijkheden. Deelrapport V van het project LED met de zon mee. Rapport WPR-1359, 40 pp.
- Dieleman, J.A., G. van Steekelenburg, C. Weerheim, E. Kaiser, E. Meinen, M. van Hoogdalem, 2025a. Frequency of light fluctuations affects tomato morphology and physiology only at extreme amplitudes. *Frontiers in Plant Science* 16. DOI=10.3389/fpls.2025.1500197.
- Dieleman, A., Kleijweg, C., Meinen, E., Van der Meer, M., Van Tongerlo, E., Weerheim, K., 2025b. Dynamic lighting in dwarf tomatoes: limitations and opportunities. Report 1: Results of the work packages 1, 2 and 3 of the project "DYNAMIEK. Dynamic lighting based on sensors and models: when can the lights be switched off? Report WPR-1454.
- Kaiser, E., Matsubara, S., Harbinson, J., Heuvelink, E., Marcelis, L. F. M. (2018). Acclimation of photosynthesis to lightflecks in tomato leaves: interaction with progressive shading in a growing canopy. *Physiologia Plantarum*, 162(4), 506-517. <https://doi.org/10.1111/ppl.12668>
- Maxwell, K., & Johnson, G. N. (2000). Chlorophyll fluorescence—a practical guide. *Journal of Experimental Botany*, 51(345), 659-668.
- Violet-Chabrand, S., Matthews, J. S. A., Simkin, A. J., Raines, C. A., & Lawson, T. (2017). Importance of fluctuations in light on plant photosynthetic acclimation. *Plant Physiology*, 173(4), 2163-2179. <https://doi.org/10.1104/pp.16.01767>.
- Zhang, Y., Kaiser, E., Marcelis, L.F.M., Yang, Q, Li, T. (2020). Salt stress and fluctuating light have separate effects on photosynthetic acclimation, but interactively affect biomass. *Plant Cell and Environment* 43: 2192-2206. <https://doi.org/10.1111/pce.13810>

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-1460



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.
