

Een modelstudie naar het effect van tussenbelichting op assimilatie van tomaat

Deelrapport I in project "fundamentele kennisontwikkeling LED-belichting voor praktische
toepassing in de kas"



Juni 2021

G. Trouwborst, G. Sam-Sin, S.W. Hogewoning

Een modelstudie naar het effect van tussenbelichting op assimilatie van tomaat

Deelrapport I in project “fundamentele kennisontwikkeling LED-belichting voor praktische
toepassing in de kas”

Juni 2021

G. Trouwborst, G. Sam-Sin, S.W. Hogewoning

Plant Lighting B.V.

Doordraai 1

3981 PE Bunnik

info@plantlighting.nl

www.plantlighting.nl

REFERAAT

G. Trouwborst, G. Sam-Sin, S.W. Hogewoning. 2021. Een modelstudie naar het effect van tussenbelichting op assimilatie van tomaat. Deelrapport I project “fundamentele kennisontwikkeling LED-belichting voor praktische toepassing in de kas” Plant Lighting B.V., Bunnik. 32p.



Ministerie van Landbouw,
Natuur en Voedselkwaliteit



© 2021 Plant Lighting B.V.

Dit rapport is tot stand gekomen in samenwerking met het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit en Glastuinbouw Nederland in het kader van het programma Kas als Energiebron, ter stimulering van energiebesparende maatregelen in de tuinbouw. Het onderzoek is mede gesponsord door Signify. De resultaten mogen vrij gebruikt worden, mits de bronnen worden vermeld.

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

Inhoudsopgave

| | |
|---|----|
| DANKWOORD..... | 5 |
| SAMENVATTING..... | 6 |
| 1 ALGEMENE INTRODUCTIE..... | 8 |
| 2 ZIN EN ONZIN VAN TUSSENBELICHTING | 9 |
| 2.1 Theoretische overwegingen bij tussenbelichting..... | 9 |
| 3 MATERIAAL EN METHODEN..... | 12 |
| 3.1 Modelbeschrijving..... | 12 |
| 3.2 Dataset..... | 13 |
| 3.3 Fotosyntheseparameters..... | 14 |
| 3.4 Vraagstelling en gebruikte scenario's..... | 15 |
| 4 RESULTATEN | 17 |
| 4.1 Analyse lichtverliezen..... | 17 |
| 4.2 Effect tussenbelichting op gewasfotosynthese | 20 |
| 4.3 Simulaties voor de praktijk | 25 |
| 4.4 Is een tussenbelichtingsproef zinvol? | 28 |
| 5 CONCLUSIES..... | 30 |
| REFERENTIES..... | 32 |

Dankwoord

Dit rapport geeft de resultaten weer van een modelstudie naar de effecten van tussenbelichting vergeleken met topbelichting op de assimilatie van tomaat. In de afgelopen 10 jaar zijn er verschillende proeven met tussenbelichting uitgevoerd waar of een controle ontbrak, of er geen duidelijke meeropbrengst van tussenbelichting is aangetoond. Op basis van gewasfysiologische gronden verwachtten de auteurs dat tussenbelichting pas bij topbelichtingsniveaus $> 200\text{-}250 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ zinvol gaat worden. Daarom is modelmatig berekend wanneer tussenbelichting op het niveau van de assimilatenproductie zinvol is, of gaat worden, vergeleken met *eenzelfde intensiteit* belichting boven het gewas (topbelichting).

Dit onderzoek is een deelproject binnen het project “fundamentele kennisontwikkeling LED-belichting voor praktische toepassing in de kas” ondersteund door het programma ‘Kas als Energiebron’, gefinancierd door het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit en Glastuinbouw Nederland, en mede gesponsord door Signify.

We willen CombiVliet (o. a. Jorrit Hoveling, Roy van Vliet en Lars van Baar) hartelijk bedanken voor het aanleveren van enkele dataset en voor het spiegelen van de eerste resultaten. Esther de Beer, Piet Hein van Baar en Erik Stappers (Signify) dank voor de gevoerde discussie. Tevens willen we de onderzoekscoördinatoren Dennis Medema en Leo Oprel van het programma Kas als Energiebron bedanken voor hun steun bij de totstandkoming en de uitvoering van dit project.

Juni 2021,

Sander Hogewoning

Samenvatting

Introductie en doelstelling

Tot nu toe is nauwelijks of geen proef geweest die ondubbelzinnig heeft aangetoond dat tussenbelichting voordelen biedt ten opzichte van *eenzelfde* intensiteit extra topbelichting. Vaak was in proeven sprake van een hogere totale lichtintensiteit in de behandeling met tussenbelichting ten opzichte van de controle. Uit de resultaten komt dan dat tussenbelichting een hogere efficiency in gram/mol geeft, maar dit zou bij extra topbelichting wellicht ook het geval geweest zijn. Het nut van tussenbelichting voor het verhogen van de assimilatie door een gewas is modelmatig te berekenen, zodat vooraf kan worden nagegaan of een tussenbelichtingsproef zinvol is.

In deze studie is modelmatig berekend onder welke omstandigheden (intensiteit topbelichting en daglicht) tussenbelichting theoretisch gezien überhaupt zinvol kan zijn ten opzichte van eenzelfde intensiteit extra topbelichting bij tomaat. Er zijn geen effecten van verschillende belichtingsconfiguraties op warmte(verdeling) in de kas meegenomen.

Materiaal en methoden

Er is gerekend met een door Plant Lighting ontwikkeld gewasfotosynthesemodel, dat mede gebaseerd is op het Farquhar, Von Caemmerer & Berry-model. Hierbij wordt de fotosynthese mechanistisch berekend op bladniveau. Hierbij wordt rekening gehouden met het lichtniveau, de bladtemperatuur en het CO₂-niveau. Het model rekent met tijdstappen van 5 minuten: de standaard tijdseenheid van de meetbox. Door de bladfotosynthese van 10 bladlagen te sommeren wordt de gewasfotosynthese per 5 minuten berekend. Vervolgens kunnen deze 5-minutenwaarden worden gesommeerd tot dagwaarden. Het effect van tussenlicht is dus beoordeeld op het niveau van de gewasfotosynthese. Hierin zit de aanname dat de verdeelsleutel ('partitioning') voor de aangemaakte assimilaten niet verandert voor top- en tussenlicht. Dit hoeft niet persé het geval te zijn, maar dit is tot op heden nog niet onderzocht.

Resultaten en conclusie

Voordelen van tussenbelichting:

- De 'winst' van tussenbelichting zit voornamelijk in vermindering van lichtverliezen. Tussenlicht geeft namelijk volgens het model een 10% hogere lichtinterceptie ten opzichte van toplicht bij tussenbelichting ter hoogte van gewaslaag 5. NB directe verliezen door bladverbranding of vervuiling van de armatuur zijn hierin niet meegenomen.
- De 'winst' van tussenbelichting door verhoging van de fotosynthese-efficiency treedt in het belichtingsseizoen (dec/jan) op vanaf 200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ belichting.

Potentiële nadelen van tussenbelichting zijn niet meegenomen in de berekeningen. Deze nadelen zijn:

- Verslechterde horizontale lichtverdeling met als gevolg bladverbranding (lichtverlies) en lokaal hoge lichtintensiteiten (rendementsverlies fotosynthese).
- Het ontbreken van natuurlijke veroudering van onderste bladeren, waardoor er minder re-allocatie van drogestof is. Dit kostte bij komkommer 5-6% productie (Trouwborst *et al.* 2011). Dit verlies is sterker naarmate armaturen lager in het gewas hangen.
- Vervuiling van de armatuur wat lichtverlies (~1%) kan opleveren.

Is tussenbelichting zinvol, of kan er net zo goed meer topbelichting worden ophangen?

- Duidelijk is dat het voordeel van tussenbelichting bij een verdeling van 100/100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (top/tussen) te weinig toegevoegde waarde heeft opzichte van 200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ topbelichting.
- De modelstudie laat maximaal 3% toename in gewasfotosynthese zien bij een verdeling van 250/50 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (top/tussen) en 5% zien bij 200/100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (top/tussen), ten opzichte van 300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ topbelichting. Het potentiële voordeel van 3% is te beperkt om de drie bovengenoemde nadelen die er zijn op te vangen. Als er echter van de maximaal 5% voordeel er 2% opbrengstverhoging overblijft, kan dit wel degelijk interessant zijn.
 - Statistisch is de 2-3% opbrengstverhoging niet gemakkelijk aan te tonen. Terwijl als 2% meerproductie een vaststaand feit is, dit wel degelijk de moeite waard kan zijn om hiervoor te investeren.
 - Als de assimilatenverdeling dankzij tussenlicht (bijvoorbeeld doordat het werkt als een 30°C groeibuis) gunstiger wordt voor de vruchten, zou dit extra procenten productieverhoging kunnen opleveren.

Op dit moment luidt ons antwoord voor een gangbare Nederlandse kas “Nee tenzij”:

- De horizontale lichtverdeling van de tussenbelichting verbetert: verschroeide bladeren en lokale metingen ($>500 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) laten zien dat er lokaal lichtverzadiging optreedt in het gewas.
- Topbelichtingsniveaus gaan stijgen tot boven de 300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR. Bij belichtingsniveaus tot rond de 200-250 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR lijkt tussenbelichting op basis van deze modelstudie onvoldoende meerwaarde te bieden ten opzichte van topbelichting.
- De marktsituatie zo is dat in seizoenen met veel daglicht een meerproductie veel oplevert.

Het verdient aanbeveling om na te gaan of de verticale lichtverdeling ook verbeterd kan worden via het uitrusten van topbelichting met speciale lenzen die het lamplicht relatief diep de ‘V’ in laten schijnen.

1 Algemene introductie

Dit rapport is een onderdeel van het project “Fundamentele kennisontwikkeling LED-belichting voor praktische toepassing in de kas”. Dit project bestond uit 6 werkpakketten:

1. Strategie belichting in brede zin
2. Aubergine: effecten van lichtspectrum en fotoperiode op de fotosynthese
3. Paprika: effect van lichtspectrum en fotoperiode op strekking, fotosynthese en bladkwaliteit
4. Aardbei: effecten van stuurlicht op bloeiregulatie en strekking
5. Lisianthus: effecten van lichtspectrum op bloeisnelheid en takontwikkeling
6. Gerbera: effecten van stuurlicht en daglengte op bloeiregulatie

Voor de vijf gewassen verschijnen aparte deelrapporten. In werkpakket 1 is onderzocht waar kansen liggen voor jaarrond belichte teelten. De blinde vlekken in kennis die er op dit moment zijn, worden benoemd en waar mogelijk ingevuld. Hierbij is aandacht voor de volgende gebieden:

- a. Literatuuronderzoek interactie fotoperiode-lichtspectrum
- b. Overzicht stand van zaken techniek LED
- c. Overzicht van de (on)zin van tussenbelichting bij tomaat

In dit deelrapport staan de resultaten van werkpakket 1c. Tot nu toe is er namelijk nauwelijks of geen proef geweest die ondubbelzinnig heeft aangetoond dat tussenbelichting voordelen biedt ten opzichte van eenzelfde intensiteit extra topbelichting. Vaak was er in proeven sprake van een hogere totale lichtintensiteit in de behandeling met tussenbelichting ten opzichte van de controle. Uit de resultaten komt dan dat tussenbelichting een hogere efficiency in gram/mol geeft, maar dit zou bij extra topbelichting wellicht ook het geval geweest zijn. Het nut van tussenbelichting is modelmatig te berekenen zodat vooraf kan worden nagegaan of een tussenbelichtingsproef zinvol is. Overigens ontkomt een modelstudie niet aan aannames, deze worden benoemd.

Dit rapport is als volgt opgebouwd:

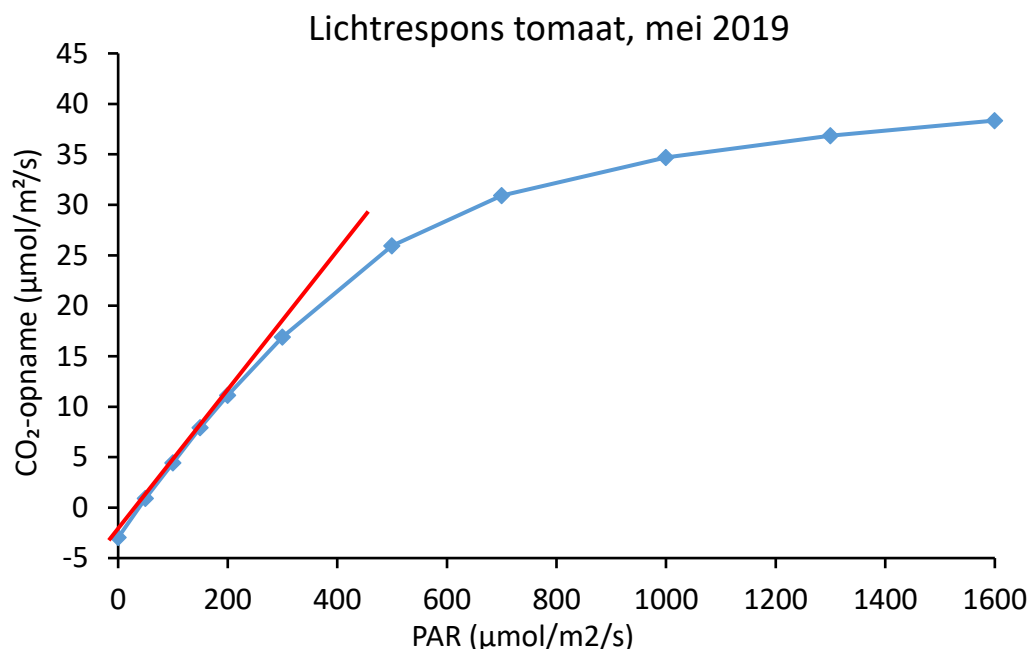
- Op basis van gewasfysiologische kennis wordt een overzicht gegeven van de voor- en nadelen van tussenbelichting (Hoofdstuk 2).
- Methoden modelberekeningen, scenario-analyses en beperkingen van het model (Hoofdstuk 3).
- Resultaten modelberekeningen onder welke omstandigheden (intensiteit topbelichting, daglicht) tussenbelichting theoretisch gezien überhaupt zinvol kan zijn ten opzichte van eenzelfde intensiteit extra topbelichting (Hoofdstuk 4).
- Er wordt een advies gegeven hoe verder te gaan met tussenbelichting (Hoofdstuk 5).

2 Zin en onzin van tussenbelichting

2.1 Theoretische overwegingen bij tussenbelichting

Er zijn twee hoofdredenen om over te gaan op tussenbelichting. In hogedraad teelten (tomaat, paprika, komkommer) resulteert topbelichting in zo'n 15% verlies aan licht door reflectie (~5%) en transmissie (~10%). Dit kan voorkomen worden door lampen in het gewas te hangen en zijwaarts te laten schijnen. Hierdoor is er in theorie een oneindige leaf area index (LAI in $\text{m}^2 \text{blad}/\text{m}^2 \text{grond}$) waardoor reflectie en transmissie van licht door andere bladeren wordt opgevangen. Bijkomend voordeel is dat er dan minder lampen bovenin de kas hangen, waardoor er minder blokkade is voor daglicht van buiten.

Als tweede, licht dooft exponentieel uit in een gewas, de verticale lichtverdeling is dus heel heterogeen: veel licht aan de top, weinig licht onderin het gewas (Figuur 5). Door toepassing van tussenbelichting kan het licht verticaal gelijkmatiger verdeeld worden. Hierdoor neemt de fotosynthese-efficiëntie toe: Bij lage lichtintensiteiten neemt namelijk de fotosynthese lineair toe met het licht, maar begint op den duur af te buigen (Figuur 1). Zo gauw bij de topbladeren de fotosynthese niet meer lineair stijgt met het lichtniveau (in Figuur 1 ligt die grens bij ongeveer $200 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$), heeft het nut om aan herverdeling van licht te denken.



Figuur 1. Lichtrespons van een onbeschaduwde topblad tomat. Te zien is dat de fotosynthese-lichtrespons tot ongeveer $200 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR lineair verloopt en vervolgens begint af te buigen. Herverdeling van licht heeft in dit geval pas zin bij intensiteiten boven de $200 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR (Bron: Trouwborst et al. 2019).

Hier zijn wel direct enige kanttekeningen bij te maken: Door tussenbelichting wordt de verticale lichtverdeling verbeterd, maar tegelijkertijd kan de horizontale lichtverdeling fors verslechteren als bladeren te dicht bij de lichtbron komen. Foto 1 geeft een impressie van bladverbranding, dit geeft directe lichtverliezen. Ook is door de auteurs van dit rapport meer dan eens gemeten dat lokaal bladeren blootgesteld worden aan $500 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR. Dit is al ver voorbij het lineaire traject van de fotosynthese (Figuur 1) waardoor het rendement van de fotosynthese daalt.



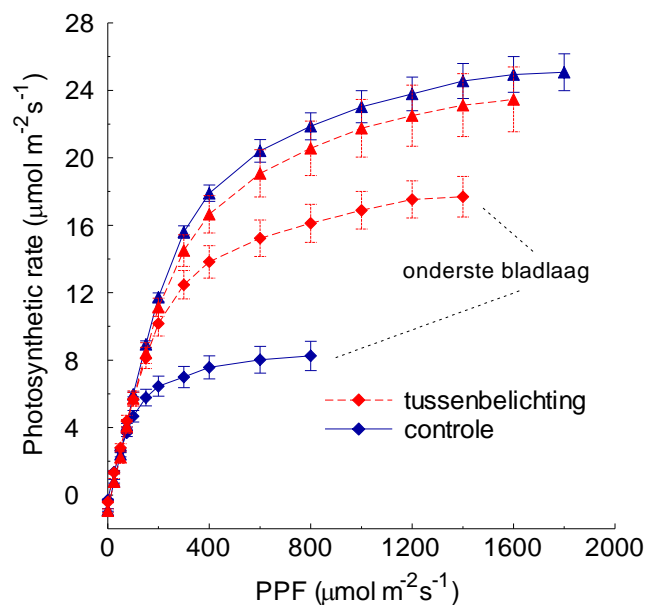
Foto 1. Verslechtering van de lichtverdeling door tussenbelichting op het horizontale vlak. Bronnen: Groenste komkommer Delphy: Marçal Balk et al. 2020 / Tussenbelichting roos: Trouwborst et al. 2010).

Tevens zorgt tussenbelichting ervoor dat de fotosynthese-capaciteit van bladeren dieper in het gewas behouden blijft (Figuur 2). Dat klinkt als een voordeel, maar kan ook een nadeel zijn. Normaliter daalt de fotosynthese-capaciteit door beschaduwning naarmate bladeren steeds dieper in het gewas terecht komen. Dit is in een situatie van alleen topbelichting een voordeel. Immers, het onderhouden van een hogere fotosynthese-capaciteit kost de plant ook energie. In de situatie van tussenbelichting is behoud van de fotosynthese-capaciteit waarschijnlijk noodzakelijk om efficiënt het licht te verwerken. Echter in een eerder onderzoek met tussenbelichting bij komkommer bleek dat er in de oudste bladeren, die geplukt werden, ook veel drogestof achterbleef. Terwijl dit niet het geval was bij natuurlijke veroudering onder topbelichting (Foto 2). Modelberekeningen wezen uit dat dit 5-6% aan productie kostte (Trouwborst et al. 2011).

Samenvattend de voor- en nadelen van tussenbelichting op een rij naast enkele andere gehoorde voor- en nadelen:

- Voordelen tussenbelichting:
 - Minder lichtverliezen (~15%) naar de lucht en naar de bodem.
 - Homogenere verticale lichtverdeling in het gewas wat resulteert in een toename van de fotosynthese-efficiëntie bij lichtintensiteiten $>200 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$.
 - Toepassing in lagere kassen als er geen extra topbelichting kan worden opgehangen.
 - Bij trostomaten lijkt de tros onder tussenbelichting sterker te zijn.

- Nadelen tussenbelichting:
 - Tussenbelichting mag niet te laag hangen om natuurlijke bladveroudering te bevorderen.
 - Kans op bladverbranding en lokaal zeer hoge intensiteiten ($>500 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) als bladeren dicht bij de lamp kunnen komen.
 - Bladkrulling onder tussenbelichting en daardoor verlies aan toplicht (komkommer).
 - Lichtverlies door vervuiling van de armatuur ($\sim 1\%$).
 - Hygiëne: wat er niet hangt, hoeft niet te worden schoongemaakt.



Figuur 2. Lichtrespons van komkommer gemeten op twee hoogtes met en zonder tussenbelichting. Te zien is dat in de situatie van de controle (alleen topbelichting) de fotosynthese-capaciteit fors terugloopt en dat dit door tussenbelichting voorkomen werd. In dit geval bleek dit geen voordeel te zijn. (Bron: Trouwborst et al. 2010 / Van Ieperen et al. 2011).



Foto 2. Foto van een blad blootgesteld aan tussenbelichting (links) en blad dat natuurlijk verouderd. In deze proef bleek dit naar schatting een 5-6%productienadeel te zijn (Bron: Trouwborst et al. 2011 / Van Ieperen et al. 2011).

3 Materiaal en methoden

3.1 Modelbeschrijving

Er is gerekend met een gewasfotosynthesemodel ontwikkeld door Plant Lighting B.V. dat bestaat uit 2 modules:

- Module lichtverdeling in het gewas op basis van de zogenaamde Monsi-Saeki benadering (Monsi & Saeki, 2005). Hierbij wordt aangenomen dat het licht in het gewas exponentieel uitdooft volgens de formule $PAR_n = PAR_0 * e^{-k * LAI}$ (n =gewaslaag; k =uitdovingscoëfficiënt). Hiermee wordt het licht verdeeld over 10 gewaslagen.
 - De verdeling van het licht van de tussenbelichting verloopt ook via de Monsi-Saeki-vergelijking maar met een hogere extinctiecoëfficiënt (k) om de horizontaal ongelijke lichtverdeling te simuleren.
- Module bladfotosynthese op basis van het Farquhar, Von Caemmerer & Berry-model (FvCB; Farquhar, Von Caemmerer & Berry, 1980). Hierbij wordt de bladfotosynthese mechanistisch berekend. Er wordt rekening gehouden met het lichtniveau, de bladtemperatuur en het CO₂-niveau.

Het model rekent met tijdstappen van 5 minuten: de standaard tijdseenheid van de meetbox. Door de bladfotosynthese van 10 lagen te sommeren wordt de gewasfotosynthese per 5 minuten berekend. Vervolgens kunnen deze 5-minutenwaarden worden gesommeerd tot dagwaarden.

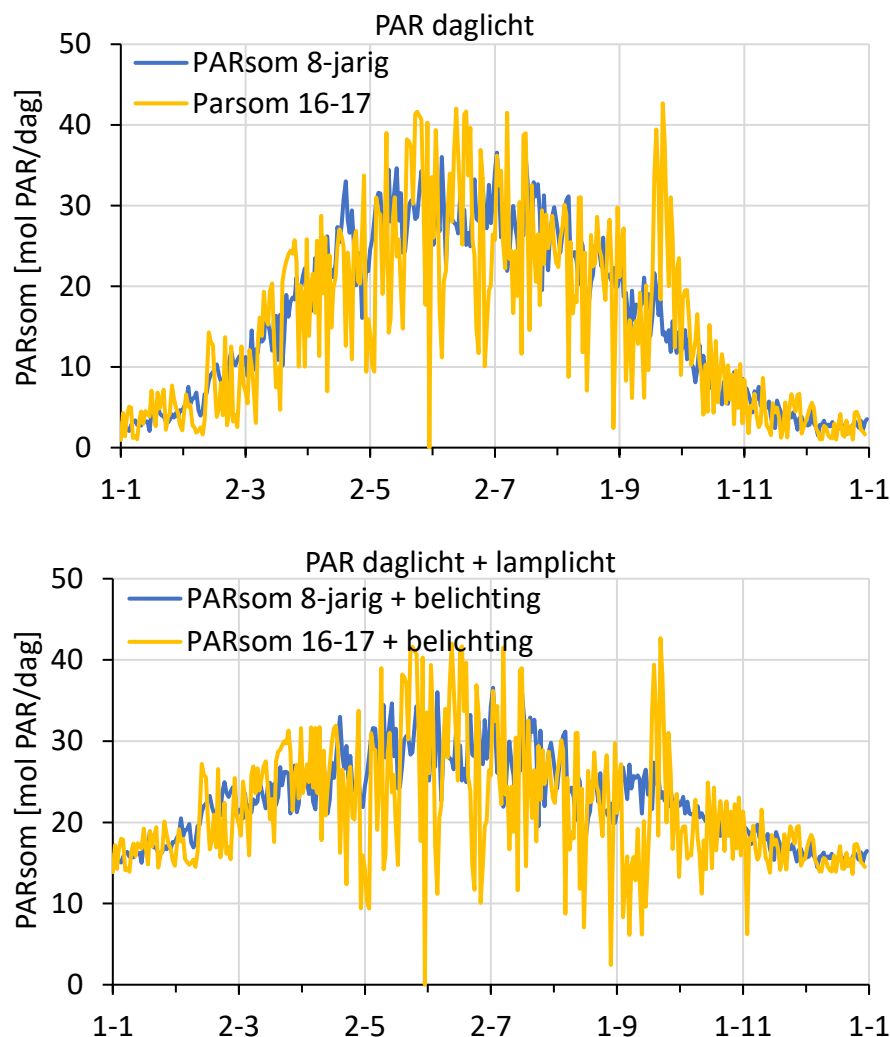
Op 5-minutenbasis wordt het model gevoed door de lichtintensiteit, het CO₂-gehalte en de temperatuur. Op dagbasis wordt het model gevoed door:

- De LAI
- De paramaters van het FvCB-model (J_{max} , V_{cmax} , α , θ), J_{max} en V_{cmax} verschuiven geleidelijk gedurende het seizoen ('s zomers hogere waarden dan 's winters) en zijn afhankelijk van gewaspositie: de laagste laag daalt naar $\sim 1/3$ van de fotosynthese-capaciteit ten opzichte van de toplaag (zie ook Hoofdstuk 3.3).

3.2 Dataset

Om conclusies niet afhankelijk te laten zijn van 1 teeltjaar zijn een aantal zaken gegeneraliseerd:

- 8-jarig gemiddelde daglicht via 5-minutenwaarden (aangeleverd door CombiVliet)
- CO₂=800 ppm
- LAI=3
- Tetmaal op 19°C door 20°C dag en 16°C nacht.
- 18 uur belichting aan: 100-400 μmol/m²/s PAR
- Om het effect van tussenbelichting te laten zien in maart/april is gesimuleerd met 'altijd 18 uur belichting aan'. Als praktijksimulatie is het volgende aangehouden (Figuur 3):
 - Belichting 200 μmol/m²/s 18 uur aan voor 1 maart, daarna daglichtdrempel 250W
 - bij 21 mol PAR van buiten hele dag geen belichting aan
 - tussen 1 mei en 1 september geen belichting aan

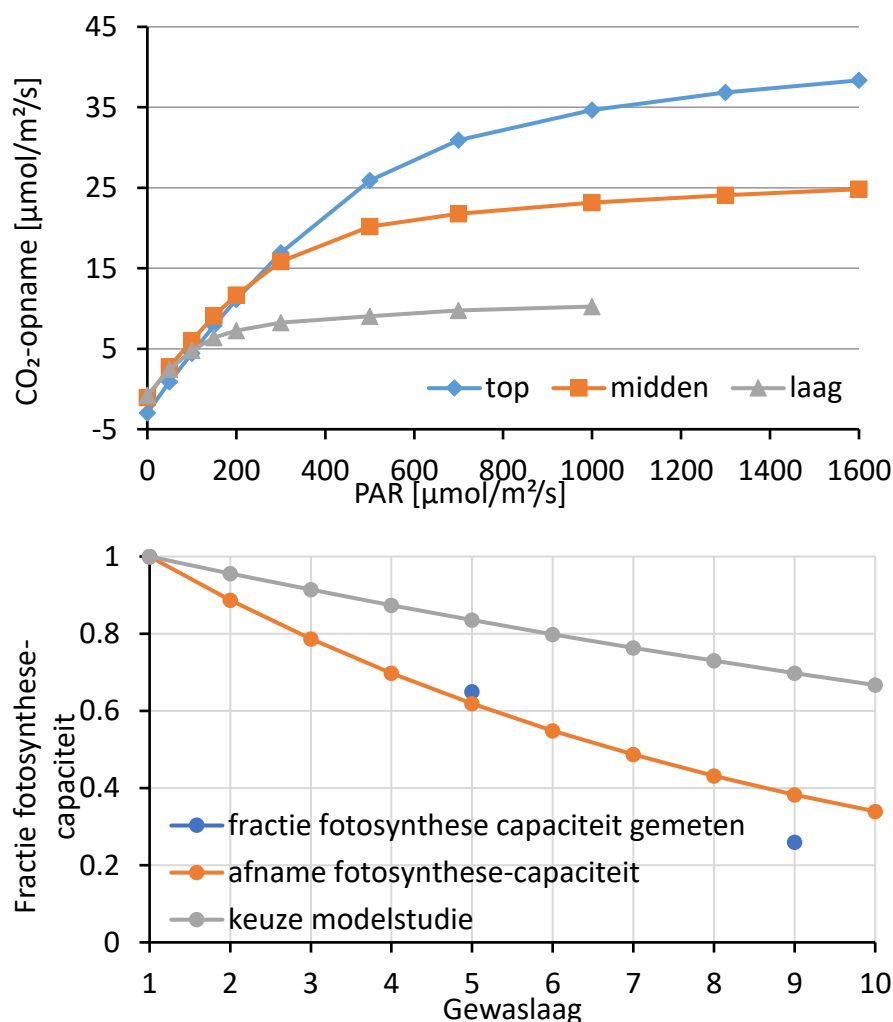


Figuur 3. Achtjarig gemiddelde van PAR daglicht (boven) en PAR daglicht+200 μmol/m²/s lamplicht (onder) ten opzichte van één teeltjaar. Uiteindelijk is er gerekend met de periode 1 januari tot en met 30 april. In de onderste grafiek is er voor de blauwe lijn gebruik gemaakt van de rekenregels die vermeld staan in Hoofdstuk 3.2.

3.3 Fotosyntheseparameters

Zoals in de inleiding aangegeven, verandert de fotosynthese-capaciteit door het toepassen van tussenbelichting.

- Zonder tussenbelichting daalt de fotosynthese-capaciteit van de onderste bladeren tot ongeveer 1/3 van de topbladeren (Figuur 4). Overigens is dit gebaseerd op de situatie bij 200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ topbelichting.
- Met tussenbelichting blijft de fotosynthese-capaciteit van de diepere bladlagen veel hoger. Op basis van eerder gedane metingen (komkommer, zie Figuur 2 en tomaat) die een daling tot aan 60-70% laten zien ten opzichte van het topblad, is de aanname gedaan dat deze afname maximaal 33% is en gradueel plaats vindt over de 10 gewaslagen (Figuur 4 onder, grijze lijn).



Figuur 4. Verlaging van de lichtrespons van de fotosynthese in een gewas met alleen toplicht (boven, Bron: Trouwborst et al. 2019), en onder de verlaging van de fotosynthese-capaciteit over de gewaslagen bij toplicht (oranje lijn) en tussenbelichting (grijze lijn).

3.4 Vraagstelling en gebruikte scenario's

In de virtuele zoektocht naar het effect van tussenbelichting is het effect van de ophanghoogte getest op drie gewaslagen: tussenbelichtings-armaturen ter hoogte van gewaslaag 3, 5, en 7 (1=top, 10=onderste laag). De optimale ophanghoogte kan afhankelijk zijn van het seizoen: januari (1-2 mol PAR daglicht) versus april (16-30 mol PAR daglicht). Ook zijn er verschillende verhoudingen top- en tussenbelichting virtueel getoetst (Tabel 1). Deze analyse is uitgevoerd door te toetsen op gewasfotosynthese in de periode januari tot eind april. Hierbij is de belichting altijd 18 uur aangezet (Hoofdstuk 4.1). Vervolgens is er geanalyseerd wat de gewasfotosynthese zou doen in een aantal scenario's top- en tussenlicht als de lampen min of meer volgens de praktijk worden afgeschakeld in maart/april (Hoofdstuk 4.2). Als laatste is er specifiek gerekend aan het nut van een tussenbelichtingsproef (Hoofdstuk 4.3). Ook in dit geval is het lamplicht in de periode maart/april afgeschakeld (zie voorwaarden in Hoofdstuk 3.2).

Tabel 1. Getoetste intensiteiten top- en tussenbelichting.

| Totaal PAR [$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$] | Top [$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$] | Tussen [$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$] |
|---|--|---|
| 200 | 200 | 0 |
| 200 | 150 | 50 |
| 200 | 100 | 100 |
| 300 | 300 | 0 |
| 300 | 250 | 50 |
| 300 | 200 | 100 |
| 400 | 400 | 0 |
| 400 | 300 | 100 |

3.5 Aannames bij modelberekeningen

Effecten van de verschillende verhoudingen top- en tussenbelichting en de ophanghoogte van de armaturen worden getoetst op het niveau van de assimilatiesom per dag. Hierbij moet worden opgemerkt dat een modelmatige benadering, zoals in deze studie, altijd beperkingen kent, waardoor de werkelijkheid kan afwijken van de berekende uitkomsten. Hieronder worden een aantal beperkingen en aannames genoemd waardoor de berekende voordelen van tussenbelichting voor assimilatie in werkelijkheid lager of anders kunnen zijn:

- Verliezen in lichtopbrengst door vervuiling van armaturen zijn niet meegerekend
- Verliezen in lichtbenutting door bladverbranding of lokale hoge lichtintensiteiten door een te korte afstand tussen bladeren en tussenbelichting zijn niet meegerekend.
- Er is gerekend met twee typen afname in fotosynthese-capaciteit over gewashoogte: wel of geen tussenbelichting (Hoofdstuk 3.3). Er is dus geen verder onderscheid gemaakt naar effect van intensiteit tussenbelichting en ophanghoogte op de afname in fotosynthese-capaciteit. Ook ontbreekt parametrisatie voor de situaties van 300-400 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ topbelichting.

Uiteindelijk is de tuinder geïnteresseerd in de productie. Bij de interpretatie van de berekende effecten op assimilatie zijn de volgende aannames gedaan:

- Dat de verdeelsleutel van de assimilaten tussen vegetatieve of generatieve delen niet verandert door verschillende verhoudingen top- en tussenbelichting.
- Dat tussenbelichting geen extra verliezen van assimilaten geeft doordat bladeren onderin het gewas meer drogestof bevatten die met bladpluk verloren gaat.

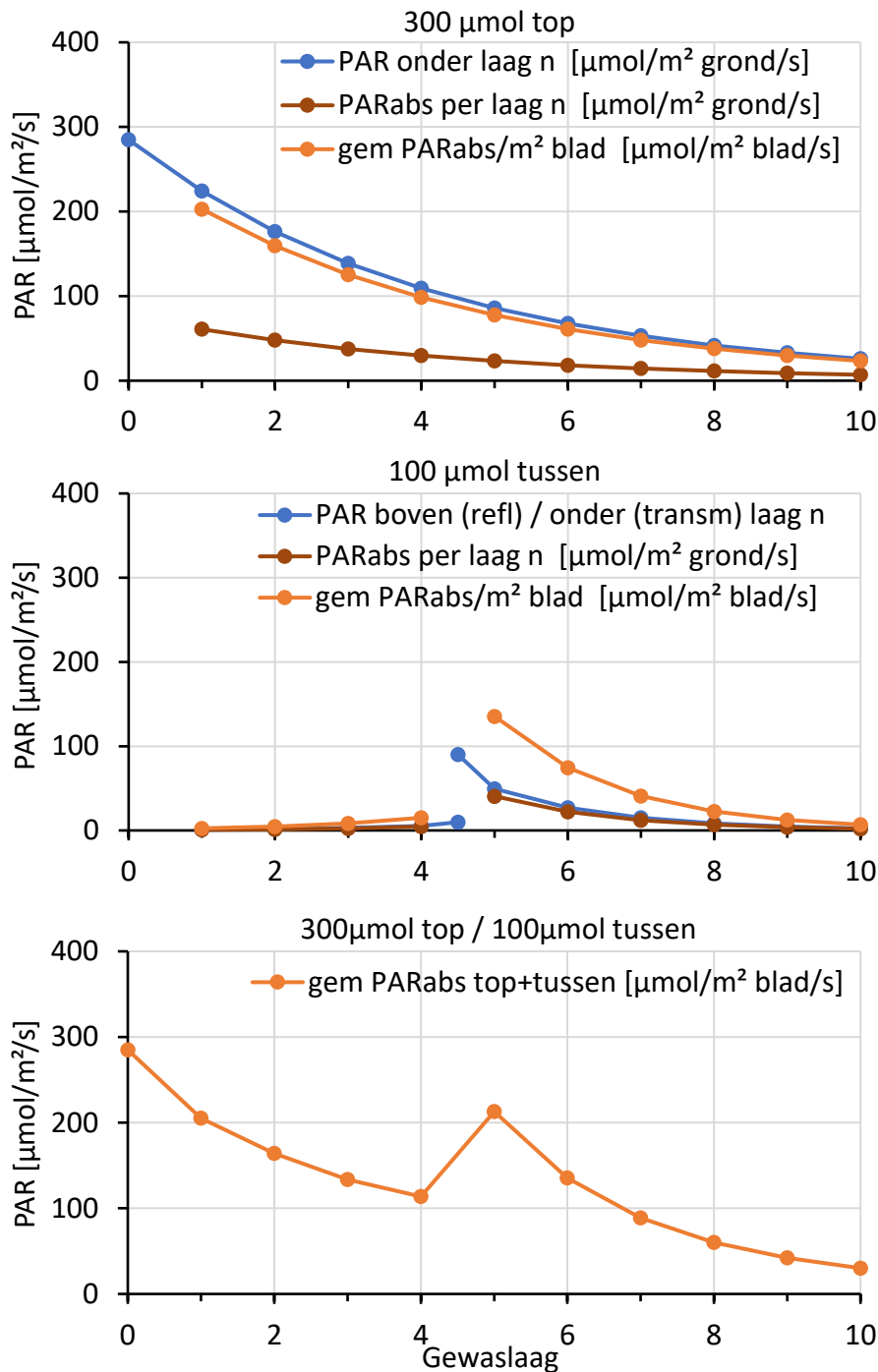
4 Resultaten

4.1 Analyse lichtverliezen

Tussenbelichtingsmodules van verschillende ontwerpen kunnen verschillen in optiek. Er bestaan modules die in twee 'lobben' schuin naar beneden stralen, en ook modules die met een hoek van 120° zijwaarts stralen. In het eerste geval wordt het meeste licht geabsorbeerd door de bladeren *onder* de lampen en in het tweede geval door bladeren *rondom* de lampen. Er is gekozen om dit modelmatig op 1 manier op te lossen door aan te nemen dat het eerste type lampen bijvoorbeeld tussen de gewaslagen 4 en 5 in hangt en dus primair schijnt op gewaslaag 5 en het andere type lamp op gewaslaag 5 hangt en dus ook primair op gewaslaag 5 schijnt. Er is aangenomen dat de tussenbelichting twee dimensionaal gezien 10% omhoog schijnt en 90% naar beneden. De scherpe uitdoving van het tussenlicht is nagebootst door gebruik te maken van een hoge extinctie-coëfficiënt. Hierdoor is de ervaren lichtintensiteit van bladeren hoger vlakbij het armatuur hoger dan de geïnstalleerde lichtintensiteit, maar niet zo hoog als praktijkmetingen hebben laten zien (lokale intensiteiten tot 500 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR). Dit wordt hieronder toegelicht.

Zoals vermeld in de modelbeschrijving (Hoofdstuk 3.1), wordt de lichtuitdoving in het gewas gemodelleerd via een exponentiele uitdoving van het licht (Monsi-Saeki benadering) over 10 gewaslagen. Figuur 5 geeft dit weer in een situatie van 300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ toplicht en 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ tussenbelichting en een LAI van 3 m^2/m^2 , dus 0.3 m^2 blad per m^2 grond per gewaslaag:

- De blauwe lijn geeft de lichtintensiteit aan. In geval van toplicht (boven) is hier 5% reflectie vanaf gehaald. In de 1^e gewaslaag wordt ~ 60 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR geabsorbeerd op 0.3 m^2 blad (bruine lijn). De gemiddelde hoeveelheid geabsorbeerd licht is dan ~ 200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR op bovenste gewaslaag van 0.3 m^2 blad/ m^2 grond (oranje lijn). Deze oranje lijn geeft dus indruk van gemiddeld 'ervaren' lichtintensiteit. Bij toplicht ligt deze lager dan de intensiteit van de lampen.
- Bij tussenlicht gepositioneerd tussen gewaslaag 4 en 5 (midden) is aangenomen dat 90% naar beneden en 10% omhoog straalt (blauwe lijn). Omdat het tussenlicht niet gelijkmatig verdeeld wordt, wordt er al ~ 40 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ geabsorbeerd in de 5^e gewaslaag (bruine lijn), daarom ligt de 'ervaren' lichtintensiteit (oranje lijn) op ~ 135 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Dit is hoger dan het geïnstalleerde niveau tussenlicht per m^2 .
- In de onderste grafiek wordt de 'ervaren' lichtintensiteit van top+tussenbelichting getoond. Deze laat dus een relatief forse toename in intensiteit zien ter hoogte van de tussenbelichting, maar is nog niet zo hoog dat het zware rendementsverliezen oplevert.
- Metingen door Plant Lighting in gewassen met tussenbelichting lieten incidenteel lichtintensiteiten > 500 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR zien op de positie van bladeren in het gewas. Lokaal kunnen hele hoge intensiteiten bladverbranding en rendementsverlies van de fotosynthese opleveren. Dit soort effecten zijn niet meegenomen in de berekening.



Figuur 5. Exponentiële lichtuitdoving over 10 gewaslagen met een LAI van 3 bij 300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ toplicht en 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ tussenbelichting gepositioneerd tussen de 4^e en 5^e gewaslaag. De blauwe lijn geeft de lichtintensiteit aan in geval van toplicht (boven; hier is 5% reflectie vanaf gehaald). In de 1^e gewaslaag wordt $\sim 60 \mu\text{mol}$ PAR geabsorbeerd op 0.3m^2 blad (bruine lijn). De gemiddelde hoeveelheid geabsorbeerd licht is dan $\sim 200 \mu\text{mol}$ PAR ($60/0.3$) op de bovenste gewaslaag (oranje lijn). Deze geeft dus een indruk van gemiddeld 'ervaren' lichtintensiteit per gewaslaag. Bij tussenlicht gepositioneerd tussen laag 4 en 5 is aangenomen dat 90% naar beneden en 10% omhoog straalt. Omdat het tussenlicht niet gelijkmatig verdeeld wordt, wordt er al ~ 40 van de 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ geabsorbeerd in de 5^e gewaslaag (bruine lijn), daarom ligt de 'ervaren' lichtintensiteit (oranje lijn) hoger dan het geïnstalleerde niveau tussenlicht per m^2 . De onderste grafiek laat de 'ervaren' lichtintensiteit per gewaslaag van top+tussenbelichting zien.

Op basis van Figuur 5 kan ook het lichtverlies van toplicht en tussenlicht worden berekend. Dit blijkt voor toplicht 13.6% te zijn en voor tussenlicht 3.4% bij tussenlicht ter hoogte van gewaslaag 5. Door tussenbelichting wordt er dus 10% lichtwinst geboekt ten opzichte van topbelichting. De overige regels van de tabel laten zien dat hoe meer toplicht er hangt, hoe meer het effect van de lichtwinst door een aandeel tussenbelichting verdund wordt. Dit is een open deur, en maakt alert op het feit dat het relatieve effect van de lichtwinst van tussenlicht bij stijgende lichtniveaus in maart en april steeds kleiner wordt. Hier staat tegenover dat hoe meer toplicht er is, hoe nuttiger het wordt om licht te herverdelen vanuit het oogpunt van fotosynthese-efficiëntie. Overigens levert positionering van tussenlicht op andere gewashoogtes andere verliesposten op: Als de tussenbelichting gepositioneerd wordt op gewaslaag 7 dan neemt het lichtverlies toe naar ~8% en is de lichtwinst nog maar ~5%.

Tabel 2. Analyse lichtverliezen van toplicht en tussenbelichting gepositioneerd ter hoogte van gewaslaag 5. Andere gewashoogtes leveren andere verliesposten op. Als de tussenbelichting gepositioneerd wordt op gewaslaag 7 dan neemt het lichtverlies toe naar ~8% en is de lichtwinst nog maar ~5%.

| totaal PAR | PAR top [$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$] | PAR tussen [$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$] | totaal abs [$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$] | verlies PAR [$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$] | % verlies PAR | % winst top-tussen |
|------------|---|--|--|---|---------------|--------------------|
| 100 | 100 | 0 | 86.4 | 13.6 | 13.6% | |
| 100 | 0 | 100 | 96.6 | 3.4 | 3.4% | 10.3% |
| 200 | 100 | 100 | 183.0 | 17.0 | 8.5% | 5.1% |
| 300 | 200 | 100 | 269.4 | 30.6 | 10.2% | 3.4% |
| 400 | 300 | 100 | 355.8 | 44.2 | 11.1% | 2.6% |

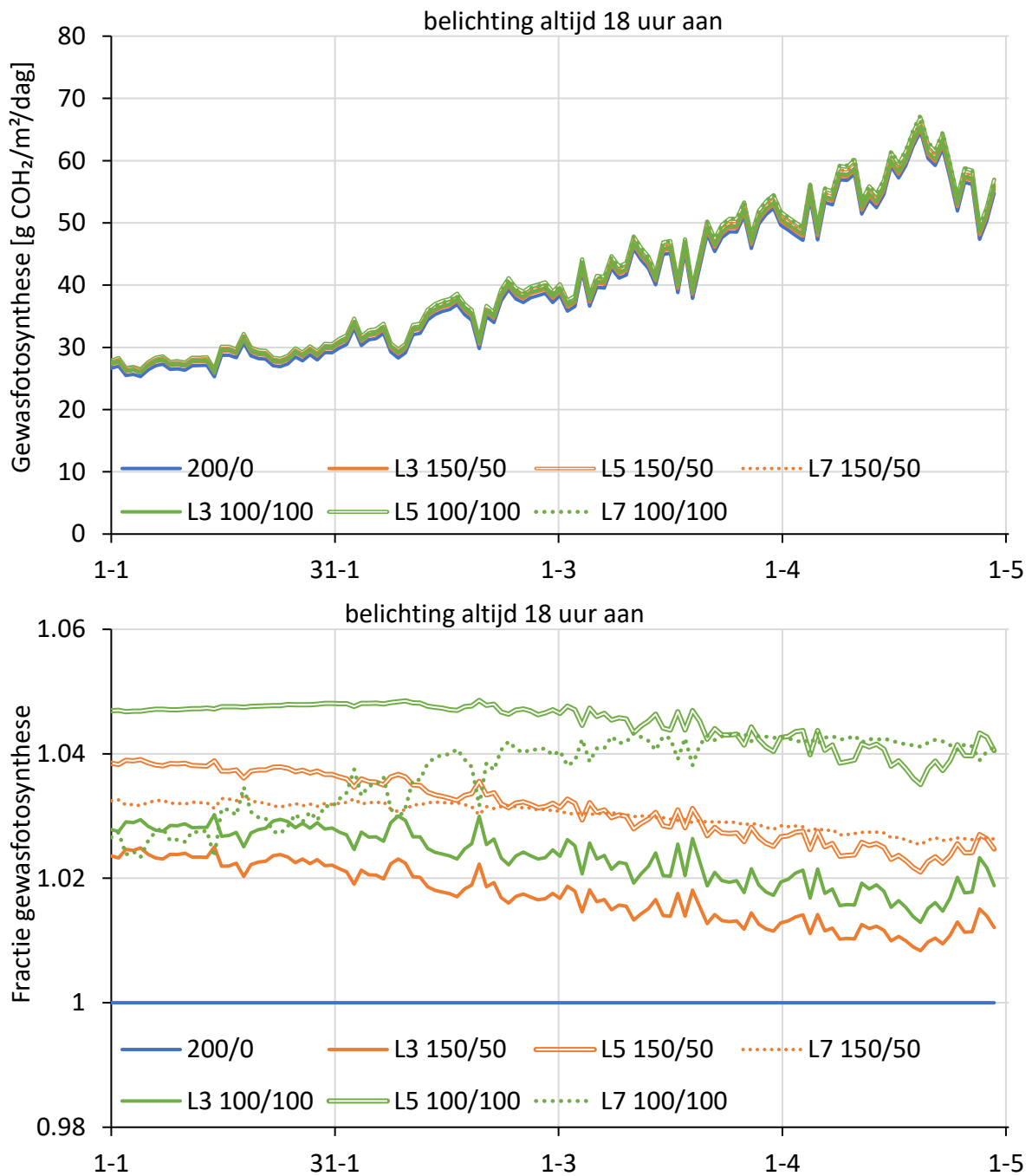
4.2 Effect tussenbelichting op gewasfotosynthese

In dit hoofdstuk is nagegaan wat de effecten zijn van diverse varianten tussenbelichting zoals weergegeven in Tabel 1. Doordat fotosynthese-parametrisatie ontbreekt bij 300-400 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ topbelichting is ervoor gekozen om de gehele analyse met de fotosynthese-parameters behorend bij tussenbelichting (Figuur 4 onder, grijze lijn) uit te voeren. Figuur 6 geeft de resultaten weer van de berekende gewasfotosynthese over de tijd bij verschillende verhoudingen top- en tussenbelichting met in totaal 200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR. De belichting stond altijd 18 uur per dag aan. De volgende zaken vallen op:

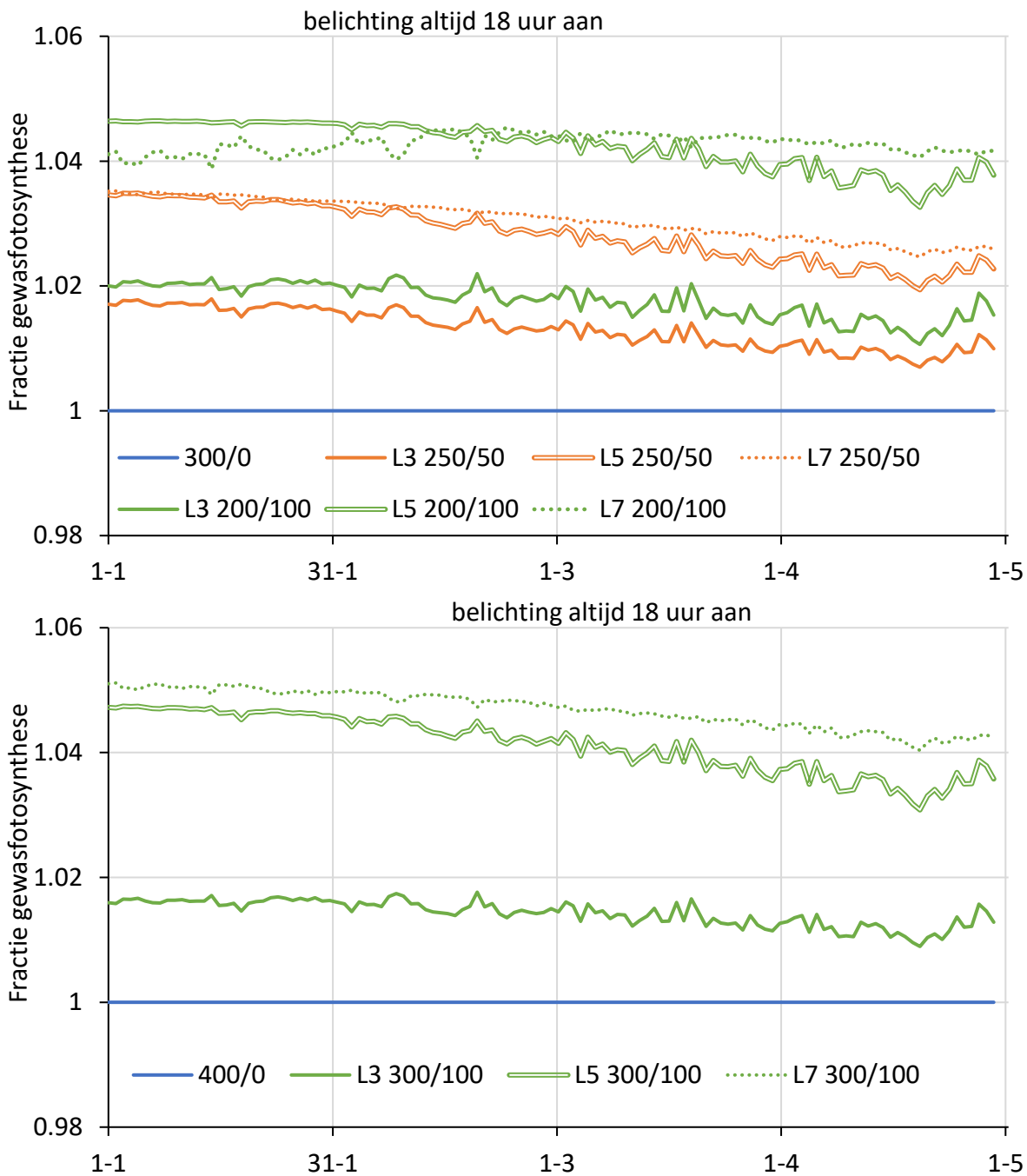
- De gewasfotosynthese verdubbelt tussen 1 januari en 1 mei. In werkelijkheid zal dit minder zijn doordat in deze modelstudie het CO_2 -gehalte op 800 ppm is gezet en de belichting 18 uur per dag aan blijft, terwijl in de praktijk de CO_2 concentratie lager is als er gelucht wordt, en de belichting bij hoge instraling wordt afgeschakeld.
- De uitgangssituatie van 200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ topbelichting is als fractie 1 weergegeven (blauw). Door 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ tussenbelichting op gewaslaag 5 stijgt de gewasfotosynthese met maximaal 5%. Naarmate het seizoen vordert, wordt ook het effect van tussenbelichting ter hoogte van gewaslaag 7 gunstiger.
- Het relatieve effect van tussenbelichting neemt tot 1 mei gering af. Dit wordt veroorzaakt doordat de dagsom aan assimilaten in die periode verdubbelt: het relatieve effect van het herverdelen van licht neemt af. Als er zou worden afgeschakeld zoals in de praktijk, zou de procentuele winst zelfs marginaliseren (Figuur 9).

Figuur 7 geeft hetzelfde weer voor de situatie van 300 en 400 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ bijbelichting. Opvallend is dat ook hier de relatieve winst door tussenbelichting blijft steken op ~5%. Dit wordt alleen bereikt bij 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ tussenlicht gepositioneerd op gewaslaag 5, en op gewaslaag 7 bij de hogere intensiteit toplicht (Figuur 7 onder). Zoals Tabel 2 heeft laten zien, wordt naarmate het toplichtniveau stijgt (door hogere intensiteit topbelichting en hogere intensiteit daglicht in april) de relatieve lichtwinst door tussenbelichting kleiner. Hier staat tegenover dat de fotosynthese-efficiëntie van het aandeel tussenbelichting dan wel verbetert. Echter, door de hogere totale gewasfotosynthese bij hogere lichtintensiteiten boven het gewas, is de toename in gewasfotosynthese door een klein aandeel licht tussen het gewas relatief klein.

Uit het geheel kan de conclusie getrokken worden dat 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ tussenbelichting meer doet dan 50 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ tussenbelichting. Tussenbelichting ter hoogte van gewaslaag 5 blijkt altijd gunstiger dan ter hoogte van gewaslaag 3. Naarmate het toplichtniveau (lamplicht en daglicht) stijgt, kan het tussenlicht in een diepere gewaslaag worden opgehangen. Doordat tussenbelichting ter hoogte van gewaslaag 7 betrekkelijk weinig toevoegt ten opzichte van gewaslaag 5 zijn verdere analyses alleen op laag 5 uitgevoerd.



Figuur 6. Gewasfotosynthese (boven) en fractie gewasfotosynthese (onder) bij diverse verhoudingen topbelichting en tussenbelichting met in totaal $200 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR bijbelichting op drie verschillende gewaslagen (L3, L5, L7). De uitgangssituatie van $200 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ topbelichting is als fractie=1 weergegeven (blauw). Door tussenbelichting op laag 5 stijgt de berekende gewasfotosynthese in deze situatie met maximaal 5%. Naarmate het seizoen vordert, wordt het effect van tussenbelichting ter hoogte van gewaslaag 7 gunstiger.

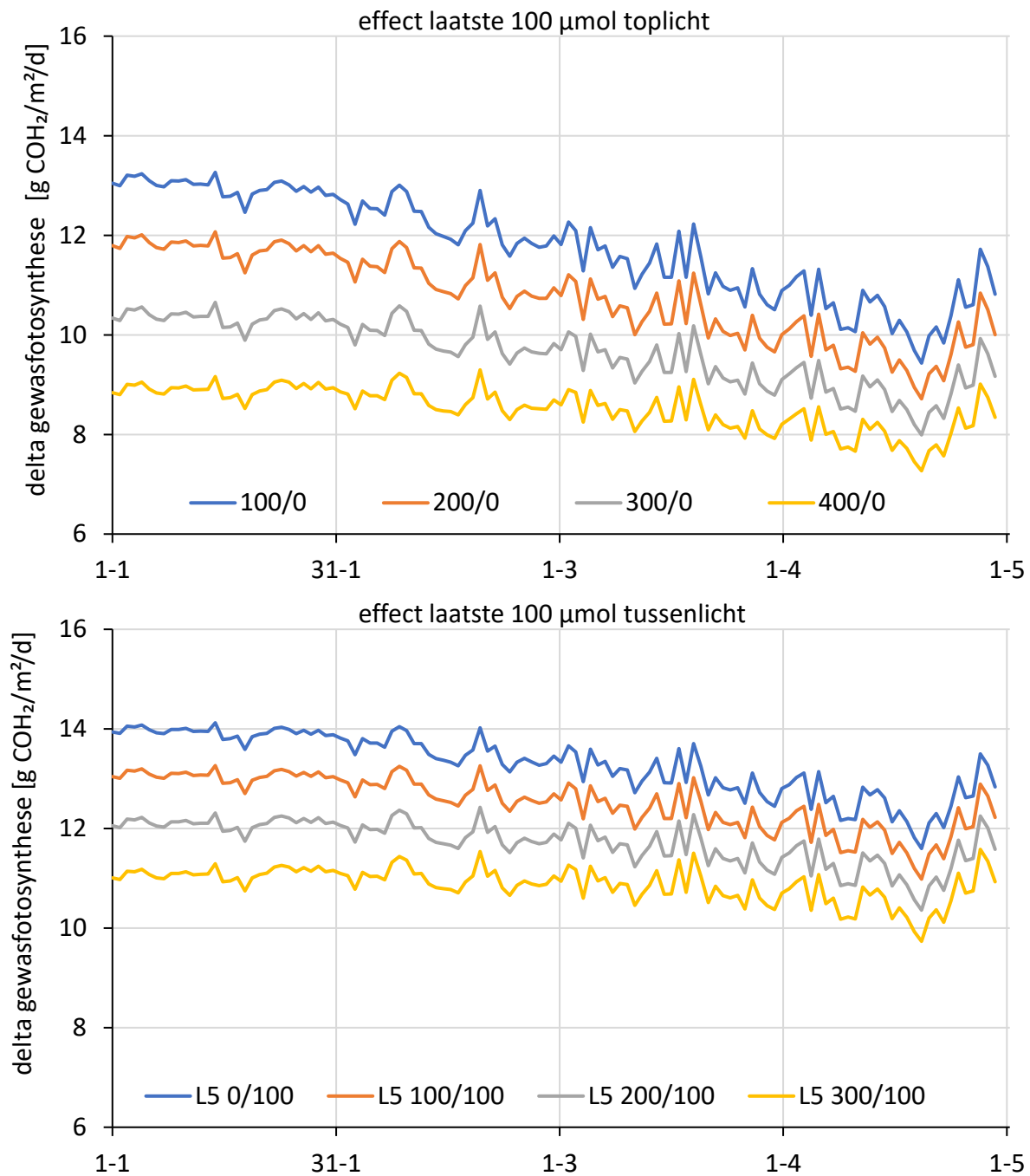


Figuur 7. Relatief effect van tussenbelichting bij diverse verhoudingen topbelichting en tussenbelichting met in totaal 300 (boven) en 400 (onder) $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR bijbelichting op drie verschillende gewaslagen (L3, L5, L7). De uitgangssituatie van 300 of 400 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ topbelichting is als fractie 1 weergegeven (blauw).

De vraag kan gesteld worden hoeveel toename aan gewasfotosynthese de laatste 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ toplicht of tussenlicht geeft bij verschillende intensiteiten belichting. Figuur 8 geeft het effect weer:

- In absolute zin levert de laatste 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR voor top- en tussenbelichting bij toenemende toplichtniveaus steeds minder op. Tussenbelichting levert altijd zo'n 1-2.5 g/m² suikers meer op dan topbelichting. Zoals eerder gezien is dit maximaal 5% van de totale gewasfotosynthese.

- Naarmate het seizoen vordert, neemt de toename aan gewasfotosynthese door de laatste 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ af. De toename rond eind april die in Figuur 8 te zien is, is toe te schrijven aan gemiddeld genomen donkerdere dagen (ondanks het 8-jarige gemiddelde, zie Figuur 3).
- In januari ligt in relatieve zin het effect van deze laatste 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR bij een verdeling van 100/100 (top/tussen) ten opzichte van 200/0 op ongeveer 10% (13/11.8). Dit is dus volledig toe te schrijven aan de 10% hogere lichtabsorptie (Tabel 2). Bij een verdeling van 200/100 ten opzichte van 300/0 stijgt dit naar 16% (12/10.3), dus pas bij een verdeling van 200/100 (top/tussen) komt de verbeterde fotosynthese-efficiëntie tot uiting. Een toename van 16% klinkt hoog, echter, op een gewasfotosynthese van ~ 37 gram suikers/ m^2/dag bij 300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ belichting in januari is 1.7 gram extra nog altijd een toename van slecht 5% op het geheel.



Figuur 8. Effect van de laatste 100 µmol/m²/s toplicht (boven) of tussenlicht (onder) op de toename in gewasfotosynthese bij verschillende intensiteiten topbelichting (boven) of verschillende verhoudingen top- en tussenbelichting (onder). De simulatie met tussenbelichting (onder) is uitgevoerd met de tussenbelichting ter hoogte van gewaslaag 5.

4.3 Simulaties voor de praktijk

Gemiddeld genomen heeft een belichtende tomatenteler in Nederland 190-200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR topbelichting. Als zulke belichtende telers in intensiteit willen groeien naar 300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR is de vraag waar deze laatste 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR zal moeten worden opgehangen. We analyseren drie opties:

- Alleen topbelichting: 300/0 (top/tussen)
- 100 μmol tussenbelichting: 200/100 (top/tussen)
- 250 μmol top- en 50 μmol tussenbelichting: 250/50 (top/tussen)

In de analyse zijn geen warmte-effecten van verschillende belichtingsconfiguraties meegenomen.

Er is gesimuleerd met een afschakelingsregime voor de belichting zoals de praktijk ongeveer zou doen (Figuur 3). De ophanghoogte van de tussenbelichting is gezet op gewaslaag 5. Tevens is er bij de situatie van alleen topbelichting gesimuleerd met de bijbehorende fotosynthese-parameters van topbelichting, terwijl bij de twee tussenbelichtingssituaties de fotosyntheseparameters behorend bij tussenbelichting zijn genomen zoals weergegeven in Figuur 4.

Figuur 9 laat zien dat er in de winterperiode (december-eind februari) in potentie 5% meer gewasfotosynthese is bij een verdeling 200/100 (top/tussen). In maart/april daalt dit snel door het toenemende zonlicht en het afschakelingsregime. Te zien is dat dan in april de assimilatiesom in absolute zin zelfs iets daalt ten opzichte van de voorgaande maanden. Dit zal geen realiteit worden omdat er waarschijnlijk automatisch meer uren belicht zal worden in april om deze terugval op te vangen. Met andere woorden: de lichtsom waarop gestuurd wordt, zal mogelijk over de hele periode hoger gaan liggen. Overigens speelt bij de belichtingsstrategie in geval van een hogere intensiteit belichting de financiële opbrengst van een kg tomaat ook een rol. Dit wordt verder buiten beschouwing gelaten.

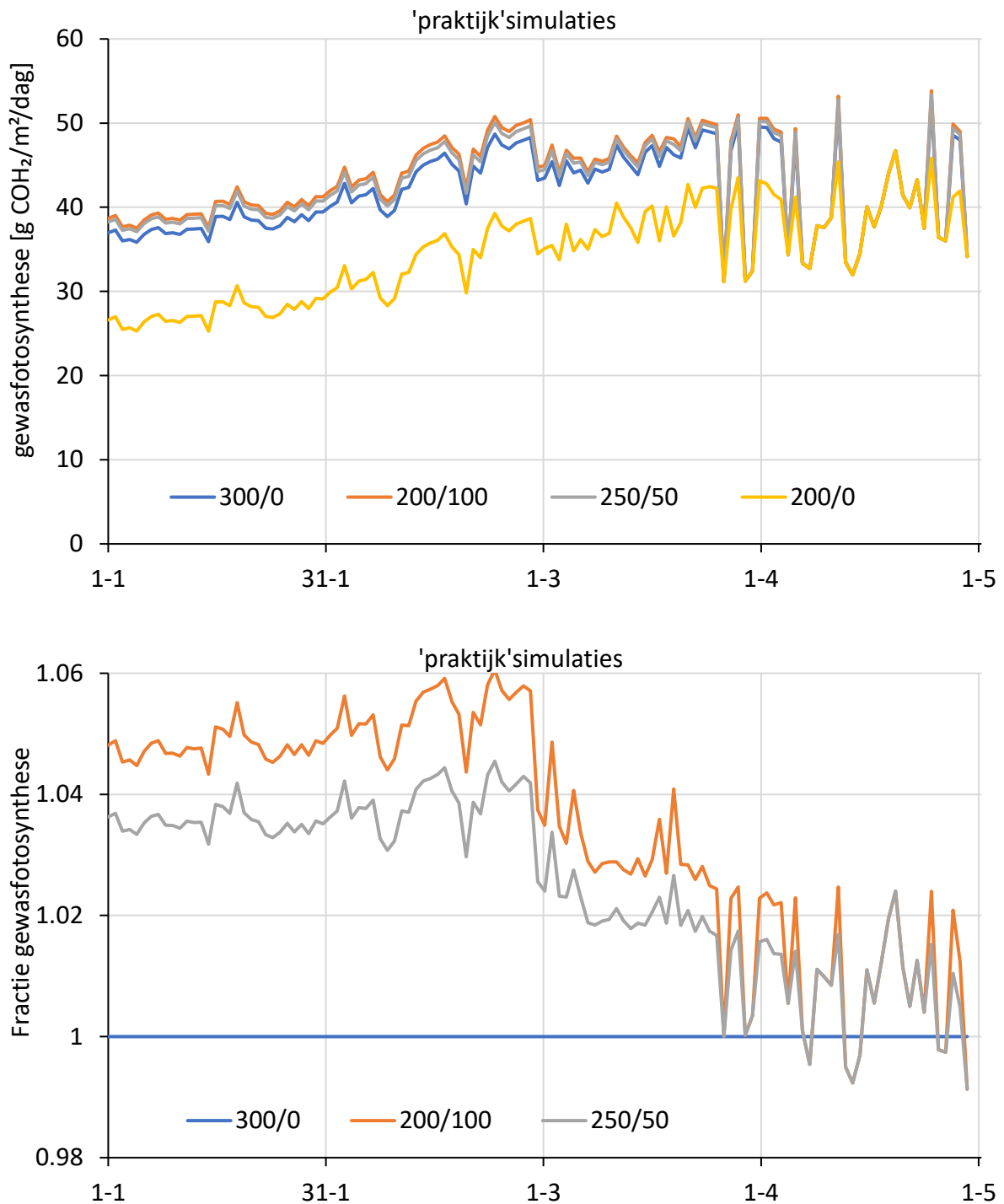
Zeker is dat tussenbelichting niet alleen winst, maar ook enige procenten verlies oplevert (verslechterde horizontale lichtverdeling / vervuiling van de lampen / verminderde natuurlijke veroudering van bladeren). Vanwege deze lastig te kwantificeren nadelen levert de verdeling 250/50 (top/tussen) naar verwachting te weinig winst op. De verdeling 200/100 (top/tussen) lijkt kansrijker. Wel zal moeten worden opgemerkt dat bij een groter aandeel tussenlicht niet alleen de potentiële winst hoger is, maar alle genoemde nadelen ook groter kunnen zijn.

Gesteld dat de genoemde nadelen 2-3% productie kosten, dan blijft er dus 2-3% voordeel over. Dit percentage is dermate laag dat dit zeer moeilijk is om aan te tonen. Verschillen tussen telpaden in de praktijk bij eenzelfde teeltregime kunnen al zomaar meer dan 5% zijn. Dit levert dus een spanningsveld op: Statistisch is de meerproductie waarschijnlijk niet aan te tonen. Terwijl als 2% meerproductie een vaststaand feit is, dit wel degelijk de moeite waard kan zijn om hiervoor te investeren.

Er zijn hiernaast nog twee aandachtspunten:

- De lamp-efficiency. In theorie zou deze voor LED top- en tussenbelichting hetzelfde moeten zijn. Op het moment van schrijven van dit rapport ligt de efficiëntie van tussenbelichtingsmodules echter wat lager dan die van topbelichting. Hierdoor kan de potentiële winst van een aandeel tussenbelichting economisch gezien lager uitvallen.
- Op het moment van schrijven van dit rapport is een tussenbelichtingslamp ook in aanschaf omgerekend per $\mu\text{mol PAR}$ duurder dan een topbelichtingslamp. In dat geval zou een teler ook enige procenten meer toplicht kunnen ophangen tegen dezelfde investeringskosten.

Een veelgehoord argument is dat tussenbelichting naarmate het seizoen vordert langer aangezet kan worden. Dus waar topbelichting afgeschakeld wordt, kan men met tussenbelichting nog doorgaan met belichten. Waar dit gaat om het voorkomen van een te hoge opwarming van de kas door de belichting, geldt dit argument vooral voor de situatie dat toplicht uit SON-T bestaat en tussenlicht uit LEDs en minder voor de situatie dat toplicht ook al LED-belichting is. Hoe zit het dan voor een situatie met alleen LED-belichting (top en tussen)? Deze studie draaide specifiek om de vraag over het relatieve effect van tussenbelichting ten opzichte van topbelichting. Een (deel van het) antwoord kan gevonden worden in Figuur 8. Deze laat zien dat er in de maand april (als normaliter in de praktijk de lampen al vaak afgeschakeld zijn), er door $100 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ PAR topbelichting (blauwe lijnen) zo'n 10 gram suikers/ m^2/dag bijkomt en door $100 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ PAR tussenbelichting rond de 12 gram suikers/ m^2/dag (beide 18 uur/dag aan). Rond die periode ligt de suikerproductie op basis van natuurlijk daglicht rond de 40 gram/ m^2/dag (Figuur 9). Dit betekent dat door in die tijd $100 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ PAR bij te belichten er in het geval van topbelichting $40+10=50\text{g/m}^2/\text{dag}$ en in het geval van tussenbelichting er $52\text{g/m}^2/\text{s}$ wordt geproduceerd (4% extra). In het geval dat er alleen wordt doorgegaan met tussenbelichting, stijgt de gewasfotosynthese dus in potentie met 30% ($12/40$). Overigens kunnen genoemde assimilatiewaarden (gram suikers/ m^2/dag) gegeven een bepaalde lichtintensiteit in de praktijk lager uitvallen als CO_2 -concentratie lager is dan de 800 ppm waarmee in deze studie gerekend is.



Figuur 9. Absoluut (boven) en relatief (onder) effect van tussenbelichting bij diverse verhoudingen topbelichting en tussenbelichting met totaal 300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR bijbelichting (de gele lijn geeft de situatie weer bij 200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$). De situatie van 300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ topbelichting is als fractie=1 weergegeven (blauw in grafiek onder). De tussenbelichting is gesimuleerd ter hoogte van gewaslaag 5. De belichting is hier in de maanden maart/april min of meer volgens de praktijk afgeschakeld behorend bij een teeltplan met 200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR (Hoofdstuk 3.2).

4.4 Is een tussenbelichtingsproef zinvol?

We hebben geanalyseerd onder welke omstandigheden een proef naar de effecten van topbelichting versus tussenbelichting zinvol lijkt of niet. Dit vanuit de gedachte dat enige procenten extra productie voor een teler wellicht interessant zijn, maar te kleine verschillen in een proefsituatie heel moeilijk hard aan te tonen zijn. Een proef is allen zinvol indien harde conclusies te trekken zijn.

Ook hier is gesimuleerd met een afschakelregime zoals de praktijk ongeveer zou doen (hoofdstuk 3.2) met de ophanghoogte van de tussenbelichting wederom bij gewaslaag 5. In de situatie van alleen topbelichting of met tussenbelichting is gesimuleerd met bijbehorend verval in fotosynthese-capaciteit (Figuur 4).

De volgende situaties zijn berekend:

- 0/100 versus 100/0 (top/tussen)
- 100/100 versus 200/0 (top/tussen)
- 200/100 versus 300/0 (top/tussen)
- 300/100 versus 400/0 (top/tussen)

De eerste simulatie is alleen theoretisch interessant, de laatste ligt nu nog buiten het blikveld van de praktijk, maar is voor de volledigheid opgenomen.

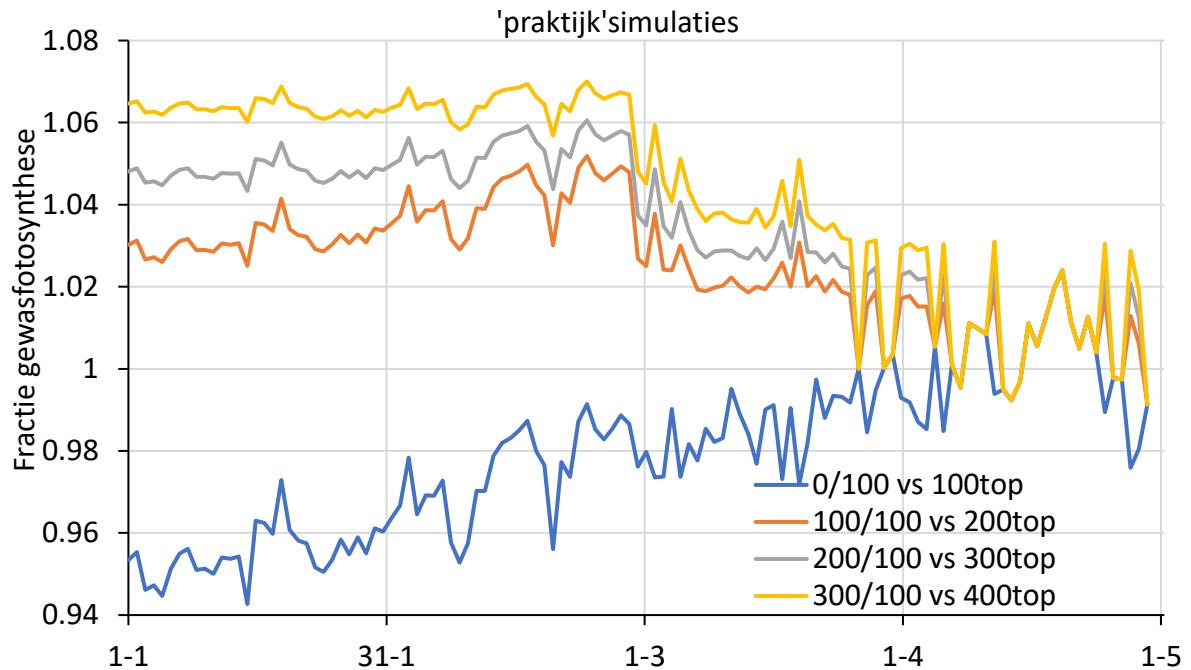
Figuur 10 laat zien dat een lage intensiteit topbelichting zelfs gunstiger is dan tussenbelichting (blauwe lijn). Dit komt doordat bij tussenbelichting de onderhoudsademhaling van het gewas hoger ligt. Bij 100/100 (top/tussen) versus 200/0 (top/tussen; oranje lijn) stijgt het potentiële effect naar 3-4%. Dit ligt iets lager dan de getoonde simulaties in Figuur 6 omdat bij Figuur 10 ook een verschillende fotosynthese-parametrisatie is meegenomen (toplichtparameters versus tussenlichtparameters). Bij 200/100 (top/tussen) versus 300/0 (top/tussen) ligt de potentiële winst op ruim 5%. Pas bij een verdeling van 300/100 (top/tussen) versus 400/0 (top/tussen) ligt de potentiële productiewinst op 6-7%.

In het algemeen kan gesteld worden dat een proef waar het potentiële effect <5% bedraagt, niet zinvol is. Dit zou in de winter bijvoorbeeld maximaal een oogst van 1050g versus 1000g oogst/week opleveren. Gegeven de kans op variatie is dit te klein om een significant effect op te leveren.

Belangrijker is dat het vaststaat dat tussenbelichting niet alleen winst, maar ook enige procenten verlies oplevert:

- Verslechterde horizontale lichtverdeling met als gevolg bladverbranding en lokaal hoge lichtintensiteiten
- Vuil worden van de lampen (kan ~1% lichtverlies opleveren)
- Verminderde natuurlijke veroudering van onderste bladeren (hogere fotosynthese-capaciteit) kostte bij komkommer 5-6% productie (Trouwborst *et al.* 2011), dus het licht mag niet te laag hangen.

Vanwege deze lastig te kwantificeren nadelen levert dus 100/100 (top/tussen) in potentie te weinig winst op om het voordeel in een teeltproef hard te kunnen maken. De combinatie 200/100 (top/tussen) levert potentieel 5% winst op, maar als hier enige procenten verlies afgaan, wordt de basis voor een proef erg smal. Dus een proef lijkt alleen zinvol vanaf verdeling 300/100 (top/tussen).



Figuur 10. Relatief effect van diverse varianten tussenbelichting ten opzichte van topbelichting met een gelijke intensiteit (fractie=1). De tussenbelichting is gesimuleerd ter hoogte van gewaslaag 5. De belichting is hier in de maanden maart/april praktijkconform afgeschakeld (Hoofdstuk 3.2).

5 Conclusies

In onderstaand overzicht worden de belangrijkste conclusies puntsgewijze weergegeven.

Voordelen van tussenbelichting:

- De 'winst' van tussenbelichting zit voornamelijk in vermindering van lichtverliezen. Tussenlicht geeft modelmatig namelijk 10.3% hogere lichtinterceptie ten opzichte van toplicht. NB hier zijn directe verliezen door bladverbranding of vervuiling van de armatuur niet in meegenomen.
- De 'winst' van een aandeel tussenbelichting door verhoging fotosynthese-efficiency treedt in het belichtingsseizoen (dec/jan) pas op vanaf 300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ belichting.
- Tussenbelichting gepositioneerd ter hoogte van gewaslaag 5 geeft een beter resultaat dan ter hoogte van gewaslaag 3. Bij hogere lichtniveaus wordt positionering ter hoogte van laag 7 ook interessant.

Potentiële nadelen van tussenbelichting zijn:

- Verslechterde horizontale lichtverdeling met als gevolg bladverbranding (lichtverlies) en lokaal hoge lichtintensiteiten (rendementsverlies fotosynthese).
- Het ontbreken van natuurlijke veroudering van onderste bladeren, waardoor er minder re-allocatie van drogestof is. Dit kostte bij komkommer 5-6% productie (Trouwborst *et al.* 2011). Dit verlies is sterker naarmate armaturen lager in het gewas hangen.
- Bladkrulling wat een verlies aan toplicht kan opleveren (komkommer).
- Vervuiling van de armatuur wat ~1% lichtverlies kan opleveren.

De grootste onzekerheden van de simulaties zijn:

- Wat doet de fotosynthese-capaciteit op diepere gewaslagen onder diverse varianten toplicht en tussenlicht.
- Wat doet de verdeelsleutel van de assimilaten tussen vegetatieve of generatieve delen bij diverse verhoudingen toplicht en tussenlicht. Deze verdeelsleutel heeft gevolgen voor de omzetting van assimilaten in kg's geoogst product. Nu is de aanname gedaan dat deze niet verandert door verschillende verhoudingen tussenbelichting.
- Bovengenoemde vier potentiële nadelen van tussenbelichting zijn niet meegenomen in de berekeningen.
- Als de lichtverliezen van het tussenlicht groter zijn dan nu ingeschat, dan wordt pas bij relatief hoge intensiteiten toplicht de tussenbelichting interessant.

Is tussenbelichting zinvol of kun je net zo goed meer topbelichting ophangen?

- Duidelijk is dat het voordeel van tussenbelichting bij een verdeling van 100/100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (top/tussen) te weinig toegevoegde waarde heeft opzichte van 200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ topbelichting.
- De modelstudie laat maximaal 3% toename in gewasfotosynthese zien bij 250/50 (top/tussen) en 5% zien bij 200/100 (top/tussen), ten opzichte van 300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ topbelichting. Het potentiële voordeel van 3% is waarschijnlijk te beperkt om de vier genoemde nadelen die er zijn op te vangen. Als er van de maximaal 5% voordeel er 2% opbrengstverhoging overblijft, kan dit wel degelijk interessant zijn.
- Statistisch is een 2-3% opbrengstverhoging waarschijnlijk niet gemakkelijk aan te tonen. Terwijl als 2% meerproductie een vaststaand feit is, dit wel degelijk de moeite waard kan zijn om hiervoor te investeren.

Op dit moment is ons antwoord een “Nee tenzij”:

- De horizontale lichtverdeling van de tussenbelichting verbetert: verschroeide bladeren en lokale metingen ($>500 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) laten zien dat er lokaal lichtverzadiging optreedt in het gewas.
- Topbelichtingsniveaus gaan stijgen tot boven de 300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR. Bij belichtingsniveaus tot rond de 200-250 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR lijkt tussenbelichting op basis van deze modelstudie onvoldoende meerwaarde te bieden ten opzichte van topbelichting.
- De marktsituatie zo is dat in seizoenen met veel daglicht een meerproductie veel oplevert.

Het dient aanbeveling om na te gaan of de verticale lichtverdeling ook verbeterd kan worden via het uitrusten van topbelichting met speciale lenzen die het lamplicht relatief diep de ‘V’ in laten schijnen.

Referenties

Farquhar, GD, Caemmerer SV, Berry JA, 1980. A biochemical-model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C-3 species. *Planta* 149, 78–90.

Marçal Balk T, Helmus-Schuddebeurs L, Smith R, Raaphorst M, 2020. De groenste komkommer Jaarrond duurzame komkommers telen. Delphy-improvement Centre Bleiswijk 75p.

Monsi M, Saeki T, 2005. On the factor light in plant communities and its importance for matter production. *Ann. Bot.* 95, 549–567.

Trouwborst G, Pot CS, Schapendonk AHCM, 2010. Haalbaarheid van LED-tussenbelichting bij roos: praktijkonderzoek op Marjoland. Plant Dynamics B.V., Wageningen. 35p.

Trouwborst G, Oosterkamp J, Hogewoning SW, Harbinson J, Van Ieperen W (2010) The responses of light interception, photosynthesis and fruit yield of cucumber to LED-lighting within the canopy. *Physiologia Plantarum*, 138: 289–300.

Trouwborst, G., Schapendonk, A. H., Rappoldt, K., Pot, S., Hogewoning, S. W., & van Ieperen, W. (2011). The effect of intracanopy lighting on cucumber fruit yield – model analysis. *Scientia Horticulturae*, 129(2), 273-278.

Trouwborst G, Hogewoning SW. 2019. Hortisensor: Ontwikkeling en toetsing van een sensor voor continue monitoring van het lichtrendement. Plant Lighting B.V., Bunnik. 28p.

Van Ieperen W, Trouwborst G, Oosterkamp J, 2011 Hybride tussenbelichting met LEDs bij komkommer: Productie, lichtonderschepping, fotosynthese en ontwikkeling vergeleken met conventionele SON-T topbelichting. Wageningen Universiteit, Leerstoelgroep Tuinbouwketen.