



Hybride tussenbelichting met LEDs bij komkommer

Productie, lichtonderschepping, fotosynthese en ontwikkeling vergeleken met conventionele SON-T topbelichting

Wim van Ieperen, Govert Trouwborst en Joke Oosterkamp



Wageningen Universiteit, Leerstoelgroep Tuinbouwketen
Januari 2011



© 2011 Wageningen, Wageningen Universiteit, Leerstoelgroep Tuinbouwketens

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 de leerstoelgroep tuinbouwketens aan Wageningen Universiteit.

Tuinbouwketens

DATUM
20 januari 2011

AUTEUR
Dr.Ir. W. van Ieperen

VERSIE
1

STATUS
Final



Dit onderzoek is gefinancierd door Technologiestichting STW, die het gebied Technische Wetenschappen van NWO vertegenwoordigt, en het Technologie Programma van het Ministerie van Economische Zaken. Dit project is medegefinancierd is door het Productschap Tuinbouw, en het Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie in het kader van het programma Kas als Energiebron. Philips stelde de LED-modules kosteloos beschikbaar en Plant Dynamics assisteerde bij de lichtmetingen.



Inhoud

Samenvatting.....	2
Introductie.....	4
Materiaal en methoden.....	7
Resultaten en Discussie.....	11
Samenvattende Conclusies.....	19
Aanbevelingen voor vervolg onderzoek	21
Literatuur.....	22



Samenvatting

In de glastuinbouwsector is de belangstelling voor tussenbelichting met LEDs bij vruchtgroentegewassen groot. In zijn algemeenheid heeft assimilatiebelichting als doel de productie te verhogen via het effect van extra licht op de gewasfotosynthese. Assimilatiebelichting wordt gewoonlijk boven het gewas toegepast (*topbelichting*) m.b.v. hogedruk natrium lampen (SON-T). Eerdere experimenten in Finland en IJsland met SON-T lampen *tussen* in plaats van *boven* het gewas, gaven een positief resultaat te zien bij komkommer. Deze toepassing van SON-T is in de Nederlandse situatie niet mogelijk, door o.a. de veel smallere paden: SON-T produceert naast fotosynthetisch actieve straling (PAR) ook een aanzienlijke hoeveelheid warmtestraling. Bij te korte afstand tussen lampen en gewas leidt dit tot verbrandingsschade aan het gewas. LEDs daarentegen produceren nauwelijks stralingswarmte en zijn daardoor potentieel wel toepasbaar als tussenbelichting in de Nederlandse glastuinbouw. Door hun specifieke lichtoutput (kleuren) kunnen LEDs echter ook onverwachte neveneffecten veroorzaken, die op een complexe wijze de productie kunnen beïnvloeden. In dit onderzoek zijn de effecten van gedeeltelijke (hybride) tussenbelichting met LED's op de productie van komkommer (cv *Samona*) in een hoge draadteelt onderzocht. Er werden uitgebreide metingen gedaan aan mogelijke verklarende factoren voor deze productie verschillen, waaronder lichtonderschepping, bladfotosynthese, drogestof verdeling en ontwikkelingssnelheid van het gewas.

Het gewas werd geteeld in de winterperiode onder een totale bij-belichting van $220 \mu\text{mol.m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PAR gedurende 20 uur per etmaal, gegeven als hybride tussenbelichting of geheel als toplicht: bij de hybride tussenbelichting werd 38% van het assimilatielicht gedoseerd als tussenbelichting door rood-blauwe LED's en 62% als topbelichting met SON-T lampen. De toplicht behandeling bestond uit $220 \mu\text{mol.m}^{-2} \text{s}^{-1}$ topbelichting met SON-T lampen. De hybride tussenlicht behandeling werd gestart in een deel van een uniform gewas dat kort daarvoor de draad had bereikt en tot dat moment groeide onder $220 \mu\text{mol.m}^{-2} \text{s}^{-1}$ topbelichting. Na ca. 13 weken productie bleek er nauwelijks verschil in drogestof productie te zijn opgetreden tussen hybride tussenbelichting en 100% topbelichting, terwijl er grote verschillen werden aangetroffen in lichtonderschepping, droge-stof verdeling, ontwikkelingssnelheid en gewasstand. Met name bladvorm en -oriëntatie werden negatief beïnvloedt door de LED-belichting, met als gevolg een hogere verticale transmissie (lichtverlies onder het gewas) van het natuurlijke daglicht en het SON-T toplicht in de hybride tussenlicht behandeling. Dit negatieve effect compenseerde het positieve effect van tussenbelichting door lagere reflectieverliezen in de top van het gewas op de lichtonderschepping volledig. Fotosynthetische eigenschappen van bladeren dieper in het gewas werden positief beïnvloedt door de LED tussenbelichting. Dit leidde waarschijnlijk niet tot een veel hogere gewasfotosynthese omdat in deze donkerste periode van het jaar de totale lichtintensiteit van natuurlijk- en 100% toplicht in de top



van het gewas nog steeds zo laag was dat daar nauwelijks daling van de fotosynthetische licht-gebruiks-efficiëntie in de bladeren optrad. De bladafsplitsingssnelheid was een stuk lager, met als gevolg een lagere aantal geoogste vruchten. De uiteindelijke stengellengte was bij hybride tussenbelichting meer dan een meter korter. Streckingsgroei bleek echter niet beïnvloedt: individuele bladgrootte was gelijk en stengel internodiën waren bij hybride tussenbelichting met LEDs even lang als bij 100% topbelichting met SON-T. Gedurende de 13 weken productie ging meer droge-stof naar de bladeren ten koste van de vruchten, wat overigens niet werd omgezet in een hogere LAI of grotere bladeren, maar wel leidde tot een hoger bladgewicht per oppervlak.

Dit onderzoek laat zien dat tussenbelichting met LEDs grote consequenties kan hebben voor de groei en ontwikkeling van een gewas, met zowel positieve als negatieve effecten voor de productie van komkommers die gelijktijdig optreden. Het is aannemelijk dat het spectrum (kleurencombinatie) van de LEDs een belangrijke rol speelt bij het tot stand komen een aantal negatieve effecten, waaronder met name bladkrulling en een grotere droge-stof-verdeling naar de bladeren ten koste van de vruchten. Daarnaast zou de zijbelichting met LEDs ook een effect kunnen hebben op de bladafsplitsingssnelheid, maar het is ook mogelijk dat dit indirect werd veroorzaakt door de lagere warmtestraling van het 82% toplicht (van SON-T lampen) in de hybride tussenbelichting behandeling t.o.v. de 100% toplicht met SON-T lampen. Indicatieve metingen aan de groeipunt temperatuur lieten een iets lagere temperatuur bij hybride tussenbelichting zien. Dit onderzoek laat ook duidelijk zien dat om werkelijk stappen voorwaarts te kunnen maken in het omzetten van de *potentie* van LEDs in *echt realiseerbare* productie winst, alle relevante fysiologische gewasresponses integraal moeten worden meegenomen.



Introductie

Context

In de Nederlandse glastuinbouw is assimilatiebelichting nodig om jaar-rond komkommers te kunnen produceren. Gewoonlijk wordt voor daarvoor gebruik gemaakt van hogedruk natrium lampen (SON-T) die boven het gewas hangen (topbelichting). Deze positie is noodzakelijk omdat de hoge bedrijfstemperatuur van de lampen en de relatief dichte gewassen in de Nederlandse glastuinbouw plaatsing van deze lampen tussen het gewas onmogelijk maakt. Dit in tegenstelling tot enkele Scandinavische landen waar bredere paden tussen het gewas gewoon zijn en waar bij de toepassing van zogenaamde tussenbelichting (positionering van SON-T lampen tussen het gewas) interessante resultaten zijn behaald. (Gunnlaugsson and Adalsteinsson 2006, Hovi et al. 2004, Hovi-Pekkanen and Tahvonen 2008, Pettersen et al. 2008).

Door de positie van de lampen boven het gewas dooft het assimilatielicht (toplicht) in het gewas net zo snel uit als het natuurlijk daglicht. Daarnaast wordt bij toplicht een gedeelte van het licht (ca. 6-7% bij de meeste planten) door de bovenste bladeren gereflecteerd en gaat verloren (Goudriaan and Van Laar 1994, Marcelis et al. 1998). Belichting tussen het gewas zou deze verlies post kunnen beperken, omdat gereflecteerd licht niet direct verloren gaat maar alsnog door de omliggende bladeren zal worden geabsorbeerd. Een tweede reden voor een betere omzetting van tussenlicht in biomassa is het realiseren van gelijkmatiger verticaal lichtprofiel in het gewas. Door een gedeelte van het licht niet boven het gewas toe te passen maar tussen het gewas neemt de kans op gedeeltelijke verzadiging van de fotosynthese in de bovenste bladlagen af, terwijl dit licht in het relatief donkere deel van het gewas, waar verzadiging van fotosynthese nog lang niet aan de orde is, optimaal kan worden gebruikt voor de fotosynthese. Het is evenwel ook mogelijk dat deze 'on' natuurlijke toepassing van licht in een gewas negatieve gevolgen heeft voor het functioneren van het gewas: bladstanden zouden bijvoorbeeld kunnen veranderen van horizontaal naar verticaal, waardoor natuurlijk zonlicht en het eventueel aanwezige top assimilatie licht minder goed wordt geabsorbeerd, de grond bereikt en verloren gaat.

Enkele jaren geleden zijn er light emitting diodes (LEDs) op de markt gekomen die voldoende energie efficiënt licht produceren in het golflengtegebied van de fotosynthetisch actieve straling (PAR; De Ruiters, 2004). Deze LEDs zijn daardoor potentiële lichtbronnen voor toepassing als assimilatiebelichting in de glastuinbouw (refs Acta Hort, onder glas). Met name door hun lage bedrijfstemperatuur (25–35°C), lage voltage en lange levensduur lijken ze uitermate geschikt voor toepassing in de glastuinbouw. Doordat de betreffende LEDs vrijwel geen warmtestraling uitzenden in het langgolelige stralingsgebied kunnen ze ook worden ingezet als



assimilatiebelichting tussen het gewas (tussenbelichting) in zeer dichte gewas situaties, zoals bij vruchtgroente gewassen in de Nederlandse glastuinbouw.

Fysiologische achtergrond

De actuele fotosynthesesnelheid in een blad hangt in hoge mate af van de positie van dat blad in het gewas. Dit komt enerzijds door lokale verschillen in lichtintensiteit (dieper in het gewas is minder licht) en anderzijds door aanpassingen van fysiologische factoren (huidmondjes, blad fotosynthese eigenschappen) aan het lokale lichtklimaat. In een normale situatie met licht dat een gewas binnendringt van boven (toplicht) daalt de lichtintensiteit exponentieel met gewasdiepte. Dit geldt voor zowel natuurlijk zonlicht als assimilatielicht. Het exacte verloop van de verticale lichtverdeling hangt o.a. af van de LAI, maar ook van de bladstand. Het verticale lichtintensiteitsprofiel in een gewas volgt een exponentieel verloop en kan beschreven worden door een aangepaste versie van de wet van Lambert-Beer:

$$I_d = I_0 e^{-k \cdot LAI}$$

(Monsi and Saeki 2005). In deze vergelijking is I_d de lichtintensiteit op gewasdiepte d bij een licht intensiteit boven het gewas van I_0 en een bovenliggend bladpakket LAI . De parameter k is de licht uitdovings coëfficiënt en hangt af van de verdeling van de bladeren in de ruimte en de blad positie en bladstand. Voor breed-type horizontale bladeren is k meestal tussen 0.7 en 1, voor grassen met een meer verticale bladstand is k meestal tussen 0.3 en 0.5. Bij verticaal georiënteerde bladeren dringt licht van boven dieper in het gewas door en kan het makkelijker de grond bereiken (Monsi and Saeki 2005, Thornley and France 2007).

Bladeren reageren sterk op het lichtklimaat (intensiteit en spectrum) in hun directe omgeving en passen zich continue fysiologisch aan aan veranderingen daarin. In een staand, gesloten gewas (zoals tomaat, komkommer, paprika) met een verticale exponentiële lichtuitdoving, zal de fotosynthese capaciteit (P_{max}) van bladeren daardoor sterk afnemen (Boonman et al. 2006, Xu et al. 1997) met gewasdiepte (gerekend vanaf de top). Daarnaast bepalen zeer waarschijnlijk ook de lichtomstandigheden tijdens de ontwikkeling van een jong blad wat de grenzen worden aan de fotosynthetische eigenschappen die dat blad later als volgroeid blad kan aannemen: een blad dat onder zeer lage lichtomstandigheden ontwikkeld zal vermoedelijk een lagere maximale fotosynthesesnelheid kunnen aannemen dan een blad dat onder een hogere lichtintensiteit ontwikkelt. Dit is mede het gevolg van de blad morfologie, die in een volwassen blad in zijn algemeen stabiel wordt verondersteld. Hiermee zal bij het toepassen van tussenbelichting rekening moeten worden gehouden, door in donkere perioden van het jaar niet alle assimilatielicht tussen het gewas aan te bieden. De hoeveelheid stikstof per bladoppervlak is sterk gecorreleerd aan de P_{max} . Stikstof in het blad wordt in belangrijke mate gebruikt voor fotosynthese capaciteit. Afnemende P_{max} met gewasdiepte (minder licht) kan dus



worden gezien als een normale nuttige aanpassing om de stikstof efficiëntie van een gewas te optimaliseren. (Hikosaka 2005, Hirose 2005, Hirose and Werger 1987, Terashima et al. 2005). Dit mechanisme kan bij het toepassen van tussenbelichting worden verstoord.

Doel van het onderzoek

Doelstelling van dit project was het effect van (gedeeltelijke) tussenbelichting met LEDs (*hybride tussenbelichting*) te onderzoeken op de productie van een komkommernewas, en zicht te krijgen op het belang van enkele achterliggende fysisch-fysiologische factoren bij het tot stand komen van eventuele productieverschillen.

Er is gekeken naar de effecten van het gedeeltelijk toepassen van LED assimilatiebelichting met rood (80%)/blauwe (20%) LEDs als tussenbelichting (32% tussenlicht; 68% SON-T toplicht) t.o.v. het toepassen van 100% conventionele assimilatiebelichting met SON-T boven het gewas (100% SON-T toplicht). Totale lichtintensiteit en duur werden gelijk gehouden tussen de behandelingen. Er is gekozen voor hybride belichting om complicaties te voorkomen t.g.v. te lage lichtintensiteit en belichtingsduur tijdens de ontwikkeling van bladeren boven in het gewas (Sims and Percy 1989, 1992). Het experiment werd uitgevoerd in de winter van 2008/2009 bij lage natuurlijke instraling en korte dagen.

Onderzocht zijn o.a.: effecten op productie, bladfotosynthese op verschillende gewasdiepten, de gewasontwikkeling, gewasgroei, en de lichtonderschepping. Metingen zijn gedaan over een periode van 3 maanden onder lage natuurlijke instraling en korte dagen (winter).

Materiaal en methoden

Plant materiaal en teeltcondities

Komkommer planten (*C. sativus* 'Samona') werden 30 september 2008 geplant op steenwol in twee kas compartimenten (144 m²) van Wageningen Universiteit in een dichtheid van 3.4 planten per m². Alle planten groeiden gedurende een periode van 18 weken op steenwol in een dubbele rij, hoge draad systeem onder normale teeltcondities en standaard voedingsoplossing (Janse et al. 2004, 2005; Sonneveld 1996). De gemiddelde dag- en nachttemperatuur, luchtvochtigheid en CO₂ concentratie in de kas waren respectievelijk, 20.7°C, 18.1°C, 81% en 915 ppm. De eerste 5 weken (groei tot aan de draad; plant lengte ca. 2.1 m) stonden alle planten onder dezelfde licht condities (natuurlijk licht + 221 $\mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$ top bij belichting van 0:00 tot 20:00 uur met SON-T (600 W, 400 V, Philips Master Greenpower CG, Philips, Eindhoven, The Netherlands)). Daarna werden de lichtbehandelingen gestart die constant zonder verdere aanpassingen werden aangehouden voor een experimentele periode van 13 weken.

Lichtbehandelingen

Nadat de planten de draad hadden bereikt werd in de helft van alle armaturen van de topbelichting in beide kascompartimenten de 600 W SON-T lampen vervangen voor 400 W SON-T lampen van hetzelfde type. Deze vervanging werd op dusdanige manier uitgevoerd dat elk van de twee kascompartimenten werd gesplitst in twee gelijke delen met een hoge en een lage intensiteit topbelichting met SON-T. In ieder van de vier zo ontstane deel compartimenten werden 2 plots geselecteerd: in de 2 deelcompartimenten met 600 W SON-T lampen (2x) 2 plots met een uniforme instraling van 221 $\mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$ toplicht, en in de 2 andere deel compartimenten met 400 W SON-T lampen (2x) 2 plots met een uniforme instraling van 139 $\mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$ toplicht. In de experimentele plots met lage intensiteit top licht werd 82 $\mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$ extra licht ingebracht m.b.v. LEDs om dezelfde totale lichtinput te verkrijgen als in de plots met hoge intensiteit toplicht (zie Bijlage I). De LED-arrays werden gepositioneerd in de paden tussen de gewasrijen en belichtten het gewas in de plots van opzij (zie foto).



Positionering van de LED-arrays voor tussenbelichting in de paden



The LED-arrays bestonden uit gelijke aantallen onafhankelijk regelbare rode (667nm) en blauwe (465nm) LED modules (Philips, Greenpower LED modules HF, Philips, Eindhoven), geassembleerd op een 2-m x 1-m aluminium frame met een op 35 cm afstand perfect gemixte rood/blauw ratio (20% blauw op foton basis). De LED-frames hingen in de paden tussen de plots, met de top van de frames op een hoogte van 70 cm onder de kop van de planten in de plots en op een horizontale afstand van minimaal 35 cm van de dichtstbijzijnde bladeren. Elke plot bestond uit 8 planten die in de plot aan de hoge draad circuleerden en werden omringt door een groot aantal randplanten. Lichtintensiteit en -uniformiteit werd in alle plots gecontroleerd met LI-191SA lichtsensoren (LiCor Inc., Lincoln, NE). Om exact $82 \mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$ absorptie te garanderen van de LED belichting in de tussenbelichting plots, werd de horizontale transmissie van het LED licht met de lijn quantum sensor tweewekelijks gecheckt, en zo nodig aangepast. Horizontale transmissie door de tussen-belichtings plots was $8 \pm 1\%$ en constant over de experimentele periode. Horizontaal reflectie verlies is éénmalig 's nachts gemeten ($1.7 \pm 0.2\%$) en niet voor gecorrigeerd. Dummy LED-arrays, gelijk aan de LED-arrays bij de tussenbelichting plots, maar zonder werkende LEDs, werden naast de controle plots gehangen.

De planten werden 2 maal per week op normale wijze verzorgd, en de afstand tussen de top van de planten (groeipunten) en de SON-T lampen gelijk gehouden door de planten, indien nodig te laten zakken. Oude bladeren (bij de grond) werden verwijderd en in iedere 2^e bladoksel werd 1 bloemknop verwijderd. In beide licht behandelingen werden 2 bladeren per vrucht aangehouden.

Lichtmetingen

Verticale lichtprofielen werden 's nachts gemeten bij afwezigheid van natuurlijk licht, maar aanwezigheid van top assimilatielicht met een lijn quantum sensor in verticale intervallen van 30 cm van de top van het gewas tot de grond. De metingen werden in iedere plot 3 maal herhaald. Horizontale lichtprofielen werden ook 's nachts gemeten, bij afwezigheid van toplicht. Deze metingen werden uitgevoerd op een gewashoogte evenwijdig aan het midden van de LED-arrays, net voor de 1^e plantenrij, precies midden tussen de 2 rijen en net achter de 2^e rij planten. Voor deze metingen werd een werkende LED-array tijdelijk naast de toplicht plots gehangen.

De licht som van de natuurlijke straling in de kas was gelijk in alle plots, en werd berekend uit metingen van de instraling op de kas gemeten m.b.v. een solarimeter (KIPP en zonen, Delft) volgens Trouwborst et al., 2010. De berekeningen werden gecontroleerd door een aantal dagen de lichtsom mee te meten met een quantum sensor (LI-190, LiCOR Inc).

Gewas metingen

Twee maal per week werden de vruchten geoogst en blad geplukt. Bladoppervlak (LI-3100, LiCOR Inc.) en vers- en drooggewichten (bladeren 24 uur en vruchten 48 uur



bij 105 °C) van de tussendoor geoogste plantdelen werden afzonderlijk bepaald. Aan het einde van het experiment werden alle planten van iedere plot geoogst, en vers en droog gewichten van alle bovengrondse delen bepaald. Totale droge-stof-productie over de experimentele periode werd bepaald uit tussentijdse oogsten en de eindoogst. De bladafsplittingsnelheid werd 3x per week gemeten aan 2 planten per plot. In elke plot werd de temperatuur van het groeipunt van een aantal planten gemeten met een infrarood thermometer (Raytek Raynger ST, Sata Cruz, CA) op een representatieve zonnige dag en een representatieve bewolkte dag.

Blad metingen

In het gewas werden vier lagen gedefinieerd: de eerste laag startte ter hoogte van het eerste volledig ontwikkelde blad: het 15^e blad (gemeten vanaf het eerste blad met een lengte > 2 cm) op ca. 70 cm hoogteverschil van het groeipunt. De volgende lagen startten ter hoogte van het 18^e, 21^{ste} en 25^{ste} blad op ca. 105, 140 en 185 cm hoogteverschil van de top van de plant. In december en januari werden in elke bladlaag aan één plant per plot de volgende zaken gemeten: een volledige fotosynthese licht response curve, bladrooggewicht per oppervlak (LMA; g DW m⁻²), organisch stikstof- en chlorofylgehalte. Per bladlaag werden alle metingen gelijktijdig gedaan in twee naast elkaar liggende plots: één toplicht en één tussenbelichting plot. Deze plots waren zo gepositioneerd in de noord en zuid zijde van de kascompartimenten dat paarswijze vergelijking statistisch mogelijk werd.

Bladfotosynthese en verdamping (CO₂ en H₂O gasuitwisseling) werd gemeten met een LI-6400 draagbaar fotosynthese meetsysteem voorzien van chlorofyl fluorescentie meetkop (Li-COR Inc.). Tijdens alle metingen werden de volgende meetcondities in de mee kop aangehouden: 1000 ppm [CO₂], luchttemperatuur en luchtvochtigheid (22°C en 80%, gelijk als in de kascompartimenten). Het percentage blauw licht in de meetkamer was tijdens alle metingen 10%. Fotosynthese-licht-response curves werden gemeten tussen 0 en verzadigende licht intensiteit (tot max ca. 2000 µmol PAR m⁻² s⁻¹), zodat ook de donker ademhaling van de bladeren kon worden bepaald. Bij iedere lichtstap werden ook enkele chlorofylfluorescentie parameters bepaald (F'_q / F'_m) waarmee de quantum-efficiëntie van PSII (een belangrijke fysiologische parameter die de efficiëntie waarmee licht wordt omgezet in elektronen transport t.b.v. de fotosynthese) kon worden bepaald (Baker *et al.*, 2007). Iedere fotosynthese-licht meetcyclus aan 1 blad duurde ongeveer 3 uur.

Aan het eind van iedere meetdag werden 12 bladmonsters (ponsjes van 1 cm doorsnede) verzameld per gemeten blad en LMA werd bepaald na vriesdrogen. Organisch stikstof gehalte, werd bepaald met een element C/N analyzer (na correctie voor gemeten nitraat).

Berekeningen en statistiek

De gemeten fotosynthese licht response gegevens werden gefit met een “non-rectangular hyperbola” in SAS (SAS institute Inc. 9.1, Cary, NC) volgens Thornley (1976) en de volgende parameters bepaald: de donker ademhaling (R_D), de maximale



bruto fotosynthese (P_{\max}), de initiële licht benuttings efficiëntie (α). Dit werd gedaan voor alle 4 gedefinieerde bladlagen in beide behandelingen en alle herhalingen.

De licht-uitdovings-coëfficiënt (k in vergelijking 1) werd berekend via een non-lineaire fit procedure in SAS door de gemeten verticale lichtmetingen te combineren met de gemeten LAI verdeling over gewashoogte bij de eind oogst.

De overall licht-benuttings-efficiëntie werd gedefinieerd als de ratio tussen totale droge-stof-productie en de totale som aan geabsorbeerd licht over de experimentele periode. Alle gegevens worden gepresenteerd als gemiddelden van vier plots per behandeling, iedere plot is gebaseerd op een gemiddelde van 8 planten. Behandelingsverschillen tussen de belichtingsbehandelingen werden getoetst op statistische significantie d.m.v. gepaarde tweezijdige t-toetsen. P-waarden < 0.05 werden beschouwd als statistisch significant.

Resultaten en Discussie

Productie en droge-stof-verdeling

De totale droge-stof-productie over de hele experimentele periode verschilde niet tussen de *hybride tussenbelichting* en de *topbelichting* behandelingen (tabel 1). Van de totale geproduceerde droge-stof kwam bij de *hybride tussenbelichting* iets meer in de bladeren terecht ten koste van de vruchten. Het ging hierbij om een verschuiving van ca. 2% over de hele experimentele periode.

Tabel 1. Droge-stof-productie en verdeling over de bovengrondse delen in een komkommernewas bij hybride tussenbelichting en topbelichting (getallen zijn gemiddelden van 4 herhalingen \pm SE; *P*-waarde < 0.05 geeft statistische significantie aan).

		Topbelichting	Hybride tussenbelichting	<i>P</i>
Bladeren	g m ⁻²	723 \pm 9	769 \pm 7	0.004
Vruchten	g m ⁻²	795 \pm 19	763 \pm 18	n.s.
Stengel	g m ⁻²	216 \pm 1	226 \pm 4	n.s.
Totaal	g m ⁻²	1734 \pm 20	1758 \pm 14	n.s.
<i>Verdeling</i>				
Bladeren	%	41.7 \pm 0.6	43.8 \pm 0.5	0.016
Vruchten	%	45.8 \pm 0.7	43.4 \pm 0.8	0.017
Stengel	%	12.4 \pm 0.1	12.9 \pm 0.3	n.s.

De LAI bij de eindogst was niet verschillend tussen de behandelingen, maar het totale geproduceerde bladoppervlak (inclusief de geplukte bladeren) was lager bij *hybride tussenbelichting* (tabel 2). Dit kwam niet door een verschil in bladgrootte (was gelijk) maar door een groot verschil in het aantal afgesplitste bladeren over de experimentele periode: bij de *hybride tussenbelichting* werd bladeren veel minder snel afgesplitst dan bij de *topbelichting*. De extra droge-stof naar de bladeren bij *hybride tussenbelichting* ging dan ook niet in een groter aantal en/of grotere bladeren zitten, maar in een hogere LMA; meer drooggewicht per oppervlak. De verschillen in bladafplitsingssnelheid zijn mogelijk veroorzaakt door verschillen in temperatuur van het groeipunt: op bewolkte dagen werd een statistisch significant verschil in groeipunt temperatuur waargenomen van ca. 1.1°C (21.1 \pm 0.4 bij *topbelichting* t.o.v. 20.0 \pm 0.4 bij *hybride tussenbelichting*). Op zonnige dagen werden geen significante verschillen in groeipunt temperatuur waargenomen. Het is echter niet uit te sluiten dat ook andere oorzaken (zoals de afwijkende lichtspectra t.g.v. het gebruik van LEDs) hierbij een rol hebben gespeeld.



Tabel 2. Bladoppervlak en stengel- en blad karakteristieken in een komkommengewas bij hybride tussenbelichting en topbelichting (getallen zijn gemiddelden van 4 herhalingen \pm SE; P -waarde < 0.05 geeft statistische significantie aan).

	Topbelichting	Hybride tussenbelichting	P
LAI (eind oogst; $m^2 m^{-2}$)	4.44 ± 0.05	4.66 ± 0.23	n.s.
Totale bladoppervlak ($m^2 m^{-2}$)	25.3 ± 0.3	21.8 ± 0.3	0.005
LMA ($g m^{-2}$)	27.8 ± 0.4	34.3 ± 0.2	0.001
Gem. blad grootte ($cm^2 leaf^{-1}$)	785 ± 7	750 ± 10	n.s.
Bladafplitsingsnelheid (d^{-1})	0.90 ± 0.02	0.78 ± 0.01	0.021
Aantal bladeren per plant	94.2 ± 1.9	84.8 ± 0.6	0.03
Plant lengte (eind oogst; m)	11.9 ± 0.1	10.7 ± 0.1	0.005
Gem. Internode lengte (cm)	11.6 ± 0.2	11.5 ± 0.1	n.s.

De lagere bladafplitsingsnelheid bij *hybride tussenbelichting* leidde wel tot een lager aantal geogoste vruchten (tabel 3) over de experimentele periode.

Tabel 3. Totale vruchtproductie, onderverdeeld in oogstbare en geaborteerde vruchten over een 13 weken productie periode in een komkommengewas bij *hybride tussenbelichting* en *topbelichting* (getallen zijn gemiddelden van 4 herhalingen \pm SE; P -waarde < 0.05 geeft statistische significantie aan).

	Topbelichting	Hybride tussenbelichting	P
<i>Oogstbare vruchten</i>			
Vers gewicht ($kg m^{-2}$)	26.3 ± 0.6	24.9 ± 0.5	0.030
Droog gewicht ($g m^{-2}$)	688 ± 16	680 ± 18	n.s.
Droge-stof-gehalte (%)	2.61 ± 0.01	2.73 ± 0.02	0.024
Aantal (m^{-2})	79.6 ± 2.8	74.3 ± 2.6	0.032
<i>Geaborteerde vruchten</i>			
Vers gewicht ($kg m^{-2}$)	1.26 ± 0.05	1.13 ± 0.05	0.041
Droog gewicht ($g m^{-2}$)	47.0 ± 2.4	44.8 ± 2.2	n.s.
Droge-stof-gehalte (%)	3.72 ± 0.07	3.98 ± 0.16	n.s.
Aantal (m^{-2})	50.9 ± 0.9	50.8 ± 1.5	n.s.

Deze vruchten hadden een vergelijkbaar vers gewicht met vruchten uit de *topbelichting* maar een duidelijk hoger droge-stof-gehalte. De smaak van deze vruchten werd door een smaakpanel in een klein pilot experiment unaniem beter beoordeeld en de vruchten waren duidelijk groener van kleur (zie foto). Vergelijkbare kleurverschillen werden ook waargenomen aan bladeren die werden geplukt aan de onderkant (na laag 4) van het gewas.



*Hybride
tussenbelichting*

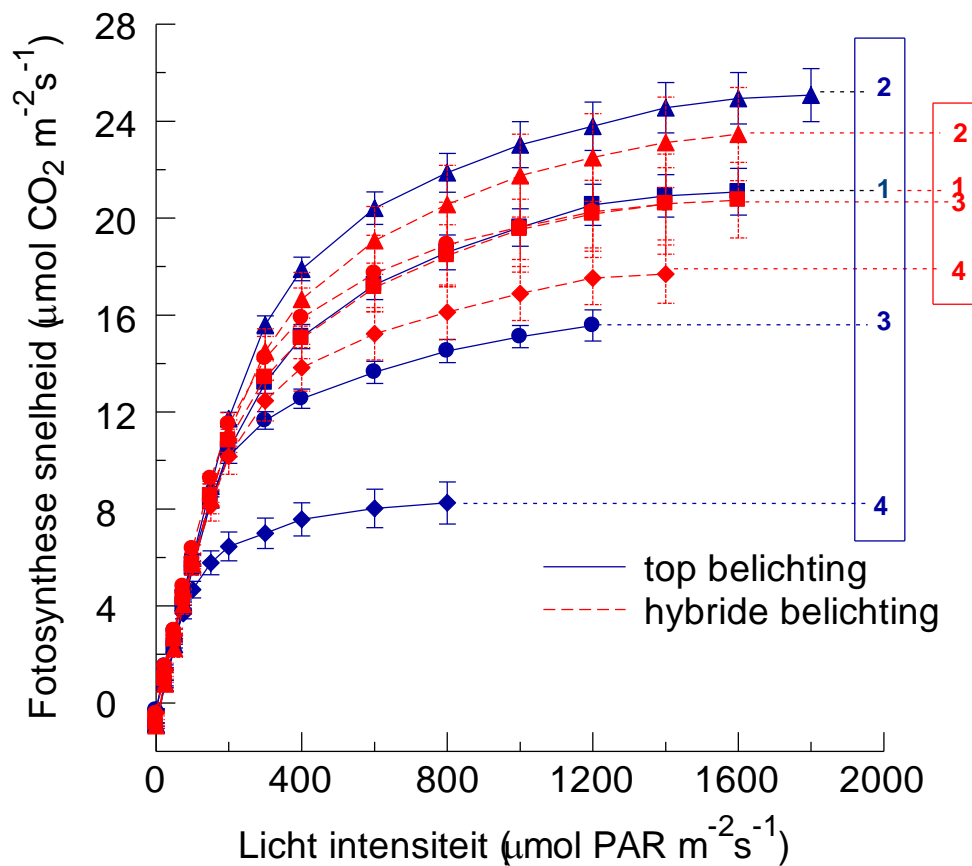
*Top
belichting*

*Hybride
tussenbelichting*

*Top
belichting*

Bladfotosynthese

De bladfotosynthese (fotosynthesesnelheid en -eigenschappen per m^2 bladoppervlak) werd gemeten in 4 steeds dieper liggende lagen in het gewas. De gemeten relatie tussen lichtintensiteit en fotosynthesesnelheid levert belangrijke informatie over de karakteristieken van de fotosynthese op bladniveau (Fig. 2): belangrijke eigenschappen zijn de fotosynthese capaciteit (P_{\max} ; de maximale fotosynthesesnelheid bij hoge, verzadigende, lichtintensiteit), α , de efficiëntie van de fotosynthese bij lage licht intensiteit en R_D , de donker ademhaling (Tabel 4).



Figuur 2: Het effect van *hybride tussenbelichting* op de fotosynthese licht response relatie van bladeren bij toenemende gewasdiepte (1: hoog, – 4: laag in het gewas) vergeleken met *topbelichting*. Elk punt is het gemiddelde van 4 herhalingen \pm SE.

Tabel 4. Het effect van *hybride tussenbelichting* en *topbelichting* op de fotosynthese-capaciteit (P_{\max}), initiële licht efficiëntie (α) en de donker ademhaling (R_D) van bladeren op toenemende diepte in een komkommer gewas (1: hoog – 4: laag in het gewas; getallen zijn gemiddelden van 4 herhalingen \pm SE; P -waarde < 0.05 geeft significantie aan).

Blad laag	P_{\max} ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)			α ($\mu\text{mol CO}_2 \mu\text{mol}^{-1} \text{PAR}$)			R_d ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)		
	Top belichting	Tussen belichting	P	Top belichting	Tussen belichting	P	Top belichting	Tussen belichting	P
1	24.8 \pm 1.4	24.1 \pm 1.8	ns	0.084 \pm 0.004	0.085 \pm 0.003	ns	1.28 \pm 0.08	1.08 \pm 0.15	ns
2	27.7 \pm 1.6	27.0 \pm 1.9	ns	0.084 \pm 0.001	0.087 \pm 0.005	ns	1.21 \pm 0.11	1.35 \pm 0.18	ns
3	16.9 \pm 0.5	23.0 \pm 1.4	0.018	0.081 \pm 0.003	0.085 \pm 0.002	ns	0.44 \pm 0.08	0.66 \pm 0.05	ns
4	9.3 \pm 0.9	19.7 \pm 0.7	0.005	0.077 \pm 0.002	0.076 \pm 0.005	ns	0.33 \pm 0.08	0.63 \pm 0.05	0.039

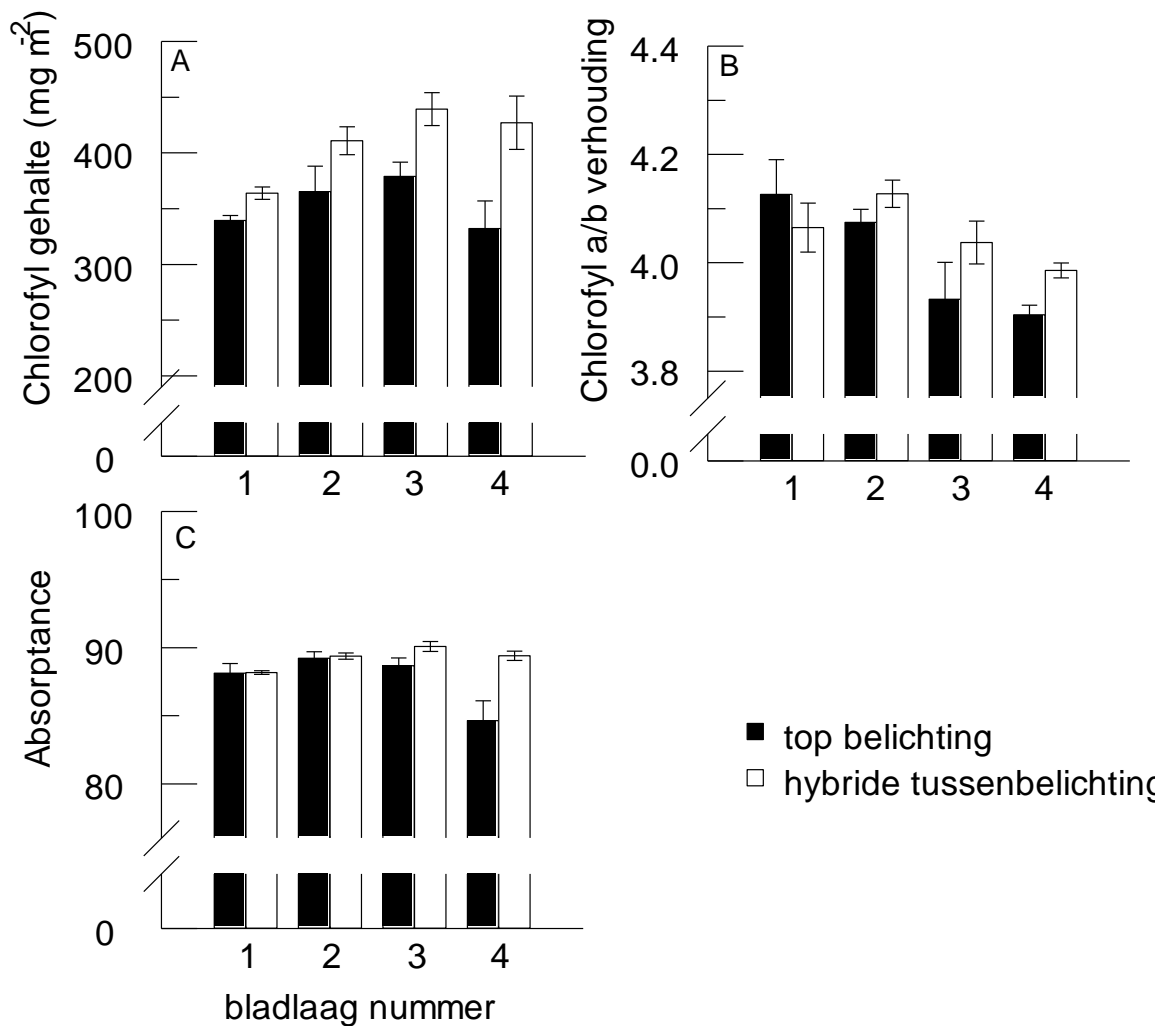
Met name het verloop van de fotosynthese capaciteit met gewasdiepte bleek sterk beïnvloedt door toepassing van *hybride tussenbelichting* (Fig. 2). Tussen laag 1 en 2 nam bij beide typen belichting de fotosynthesecapaciteit nog toe, waarschijnlijk doordat de bladeren in laag 1 nog niet volledig uitontwikkeld waren. Bij beide behandelingen liep de fotosynthesecapaciteit vanaf laag 2 terug met toenemende gewasdiepte. Deze afname was veel sterker bij *topbelichting* dan bij *hybride tussenbelichting* (tabel 4): bij *hybride tussenbelichting* bleef de fotosynthese capaciteit veel langer hoog dan bij *topbelichting*, op ca. 1,85 m diepte (vanaf de top gemeten) was bij *topbelichting* slechts 37% van de maximale fotosynthese capaciteit over terwijl dit bij *hybride tussenbelichting* nog 82% was. Teruglopen van de fotosynthesecapaciteit bij afnemende lichtintensiteit is normaal en deze resultaten laten zien goed dat deze afname bij *hybride tussenbelichting* vertraagd wordt.

De licht gebruiks efficiëntie voor fotosynthese (μmol opgenomen CO_2 per μmol PAR) nam niet af met gewasdiepte tussen laag 1 en 3 en was niet verschillend tussen *top*- en *hybride* tussenbelichting. Onder toenemende lichtintensiteit nam fotosynthetische licht efficiëntie (μmol opgenomen CO_2 per μmol PAR) bij *hybride tussenbelichting* later af dan bij *topbelichting* (Fig. 2 en tabel 4; de afbuiging van de curve in figuur 2 zet bij *hybride tussen belichting* later in dan bij *top belichting*). De donker ademhaling van de bladeren leek nauwelijks te verschillen tussen de behandelingen: alleen in de onderste gewas laag werd er een klein statistisch significant verschil gemeten: daar was de donker ademhaling hoger bij de *hybride tussenbelichting* dan bij de *topbelichting*.

Lichtabsorptie op bladniveau

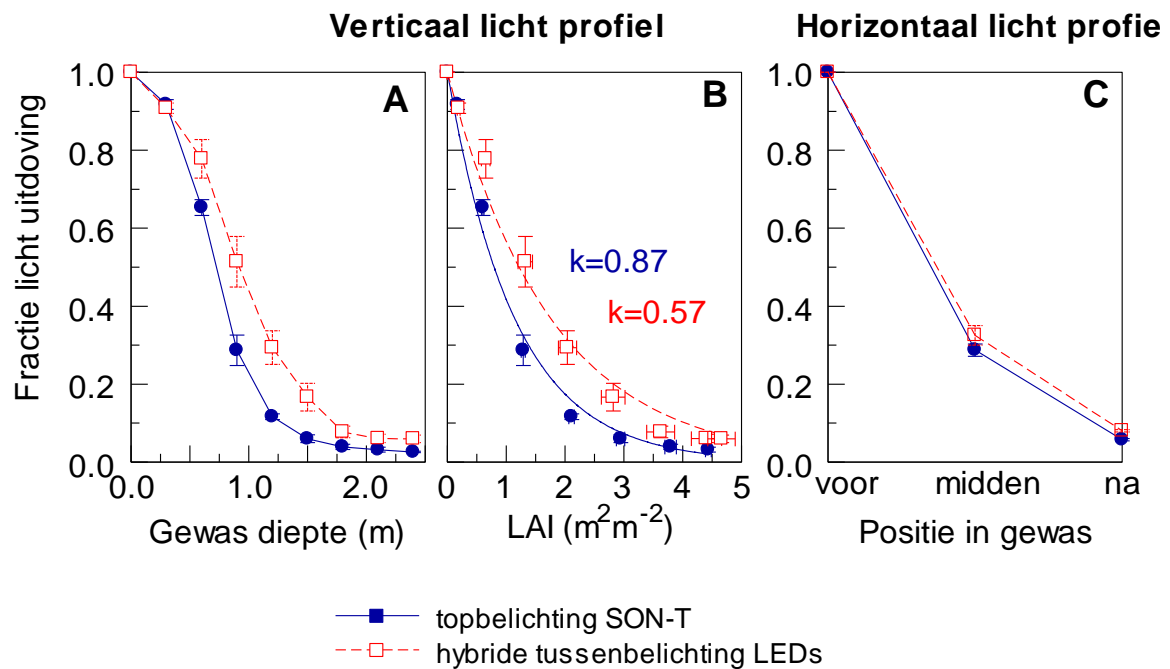
Voor de gewasfotosynthese is de totale lichtabsorptie van een gewas van belang. Deze is opgebouwd uit de lichtabsorptie op bladniveau (bladkarakteristiek) en de lichtonderschepping op gewasniveau (gewaskarakteristiek), die wordt beïnvloedt door het totale bladoppervlak, de bladvorm en de bladstand. In dit experiment is

lichtabsorptie gemeten op zowel blad- als gewas niveau. De lichtabsorptie op bladniveau (absorptance) bleek nauwelijks te verschillen tussen top- en hybride tussenbelichting: bladeren in de bovenste 3 lagen absorbeerden 88-89% van het opvallende licht (Fig. 3C). Alleen in de laagst gemeten blad laag was de absorptance bij *topbelichting* ca. 4% lager dan bij *hybride tussenbelichting*. Chlorofylgehalte en Chlorofyl a/b verhouding waren iets hoger bij *hybride tussenbelichting* (Fig. 3A&B).



Figuur 3: Het effect van *hybride tussenbelichting* op chlorofyl gehalte (A), chlorofyl a/b ratio (B) en gemeten blad absorptance (C) bij toenemende gewasdiepte (1: hoog, – 4: laag in het gewas) vergeleken met *topbelichting* (gesloten staven). Elk punt is het gemiddelde van 4 herhalingen ± SE.

Lichtabsorptie op gewasniveau vertoonde opmerkelijke verschillen tussen de behandelingen (Fig. 4): ondanks het hogere reflectieverlies bij *topbelichting* van de hoogste blad laag werd er over de totale experimentele periode een gelijke hoeveelheid licht door het gewas geabsorbeerd (tabel 5). Dit kan alleen als tegelijkertijd het percentage van het *van boven* opvallende licht (*natuurlijk licht + top assimilatiebelichting*) dat de bodem bereikte bij *topbelichting* lager was dan bij *hybride tussenbelichting*. Dit was inderdaad het geval en is duidelijk zichtbaar in de gemeten verticale licht profielen.



Figuur 4: Het effect van *hybride tussenbelichting* met LEDs en *topbelichting* met SON-T op de verticale (A en B) en horizontale (C) licht-onderscheppings profielen in een komkommernewas. Elk punt is het gemiddelde van 4 herhalingen \pm SE.

Tabel 5: PAR-sommen (opvallend en geabsorbeerd) over de experimentele periode (mol fotonen per m²) voor de *topbelichting* en *hybride tussenbelichting* behandelingen.

	Topbelichting		Hybride tussenbelichting	
	<i>Opvallend</i>	<i>Geabsorbeerd</i>	<i>Opvallend</i>	<i>Geabsorbeerd</i>
Natuurlijk licht (Zon)	312	286	312	275
Topbelichting (SON-T)	1433	1314	904	798
Tussenbelichting (LEDs)			529	520
Total	1745	1600	1745	1593

Opmerkelijk is ook dat bij *hybride tussenbelichting* het van boven opvallend natuurlijk licht en SON-T licht makkelijker dieper in het gewas doordringt dan bij *toplicht* (Fig. 4A): op 1 m gewas diepte is bij *hybride tussenbelichting* ca. 50% van het opvallende licht geabsorbeerd door de bovenliggende bladeren, terwijl dit bij de *topbelichting* behandeling op dezelfde diepte al 70% is. Omdat dit verschil ook geldt voor het lichtprofiel uitgezet tegen het de bovenliggend bladoppervlakindex (LAI; Fig. 3B), kan dit niet het resultaat zijn van een andere verdeling van bladoppervlak over gewasdiepte bij *hybride tussenbelichting*. Ook in horizontale richting bleek de lichtdoordringing in het was groter bij *hybride tussenbelichting* dan bij *topbelichting* (Fig. 3C), wat er op wijst dat het hierbij niet gaat om een veranderde blad oriëntatie als gevolg van zijbelichting, maar om een lager effectief licht onderscheppend oppervlak. Omdat LAI en gemiddelde bladgrootte niet verschilde tussen de behandelingen is de enige mogelijke verklaring hiervoor het optreden van bladkrulling en deformaties. Deze bladkrulling bleek inderdaad in de plots met *hybride tussenbelichting* op grote schaal voor te komen (zie onderstaande foto). Opmerkelijk was ook dat bij de randplanten direct naast de plots met *hybride tussenbelichting*, dus bij lagere totale lichtinput, deze krulling al niet meer optrad. Het lijkt dus aannemelijk dat deze bladkrulling te maken heeft met de specifieke zijbelichting door LEDs. Het lichtniveau was echter dusdanig laag dat het onwaarschijnlijk is dat de krulling wordt veroorzaakt door een teveel aan assimilaten t.g.v. de lichtintensiteit. Het spectrum van het licht zou mogelijk wel een rol kunnen spelen.



Door de korte dagen tijdens het experiment (februari) was het aandeel natuurlijk licht in de totale licht som over de experimentele periode slechts 18%. Assimilatie-belichting was dus veruit de belangrijkste lichtbron voor fotosynthese en productie. Opvallend was dat, tegen de verwachting in, ook de geabsorbeerde hoeveelheid licht niet verschilde. In beide behandelingen werd ca. 92% van het opvallende licht daadwerkelijk geabsorbeerd (tabel 5). Dit kwam doordat de initiële licht absorptie winst van *hybride tussenbelichting* (door gereduceerde reflectie van de bovenste gewas laag) volledig teniet werd gedaan door de toegenomen verticale transmissie door het gewas naar de bodem als gevolg van het optreden van bladkrulling.



*Bladkrulling bij
LED tussenbelichting*



Hybride tussenbelichting

Top belichting



Samenvattende Conclusies

1. Hybride tussenbelichting met LEDs bij een snelgroeïend gewas als komkommer leidt tot een veelheid aan fysiologische reacties, die gelijktijdig optreden en die zowel positieve als negatieve effecten hebben op de uiteindelijke productie.
2. Onder de omstandigheden van het uitgevoerde experiment leidde het gebruik van hybride tussenbelichting tot een nul effect op de totale droge-stof-productie en een iets lagere komkommer productie.
3. De fotosynthetische eigenschappen van bladeren dieper in het gewas werden positief beïnvloedt door de toegepaste tussenbelichting met LEDs. Het positieve effect hiervan op de gewasfotosynthese was beperkt in dit experiment door de relatief lage lichtintensiteit boven het gewas die nauwelijks een daling van de fotosynthetische licht efficiëntie veroorzaakte in de bovenste bladeren: herverdelen van (geabsorbeerd) licht van boven naar tussen het gewas had daardoor nauwelijks zin.
4. De in dit experiment toegepaste LED tussenbelichting veroorzaakte sterkte bladkrulling ter plekke van de toepassing. Deze bladkrulling beïnvloedde de lichtonderschepping negatief.
5. De netto lichtonderschepping werd in dit experiment niet beïnvloed. Dit kwam doordat de winst bij het toepassen van tussenbelichting t.g.v. minder reflectie van de bovenste bladeren volledig teniet werd gedaan door een hoger lichtverlies aan de onderkant van het gewas (toegenomen transmissie) t.g.v. bladkrulling.
6. De gemeten verdeling van droge-stof naar de bladeren was hoger bij de hybride tussenbelichting. Dit kan het gevolg zijn van een direct effect van de belichting op droge-stof-verdeling, maar ook van een indirect effect gerelateerd aan het plukken van fotosynthetisch actievere bladeren t.g.v. de hybride tussenbelichting.
7. De gemeten bladafplitsingssnelheid was lager bij hybride tussenbelichting. Het is aannemelijk dat een lagere temperatuur van het groeipunt t.g.v. de lagere warmtestraling van SON-T-lampen bij hybride tussenbelichting een rol speelt. Een eventuele rol van het lichtspectrum kan ook niet worden uitgesloten.



Aanbevelingen voor vervolg onderzoek

1. Een belangrijk deel van het uitblijven van een positief effect van tussenbelichting werd veroorzaakt door bladkrulling. Hierbij lijkt het lichtspectrum een rol te spelen. Oplossen van dit probleem zal direct bijdragen aan een hogere lichtinterceptie, gewasfotosynthese en droge-stof-productie.
2. Een andere belangrijke factor die negatief uitwerkte op de productie was de lagere bladafsplitsingssnelheid. Dit is met name van belang omdat, met de lagere bladafsplitsingssnelheid, ook het aantal geogste komkommers afnam. Dit is complexer dan het lijkt omdat ook na de vruchtsnoei bij beide belichtingsbehandelingen er in aanvang veel meer vruchten werden gevormd waarvan een aanzienlijk deel aborteerde. Indicatieve metingen aan de groeipunt temperatuur gaven kleine temperatuurverschillen aan die een mogelijke verklaring zouden kunnen zijn. Directe spectrale effecten of andere indirecte effecten, b.v. door de langzamere achteruitgang in fotosynthese capaciteit van oudere bladeren) zouden ook een rol kunnen spelen bij het tot stand komen van de lagere bladafsplitsingssnelheid. Dit dient nader onderzocht te worden.
3. De veranderingen in droge-stof-verdeling (in dit onderzoek: meer naar de bladeren, ten koste van de vruchten) zijn complex en niet eenduidig uit te leggen. Het is mogelijk dat het hier gaat om directe spectrale effecten, maar het zou ook kunnen dat de levensduur van de bladeren aan de planten, in combinatie met herverdeling van oude naar jonge bladeren, de hoogte van tussenbelichting en het plukmoment van de bladeren een rol heeft gespeeld. Omdat het resultaat (meer droge-stof naar de bladeren die niet groter worden) niet positief is voor productie verdient ook dit stuk nader onderzoek.



Literatuur

Baker NR, Harbinson J, Kramer DM (2007) Determining the limitations and regulation of photosynthetic energy transduction in leaves. *Plant Cell Environ* 30: 1107–1125

Boonman A, Anten NPR, Dueck TA, Jordi W, Van Der Werf A, Voeselek L, Pons TL (2006) Functional significance of shade-induced leaf senescence in dense canopies: an experimental test using transgenic tobacco. *Am Nat* 168: 597–607

Goudriaan J, Van Laar HH (1994) Modelling potential crop growth processes: textbook with exercises. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, p 238

Gunnlaugsson B, Adalsteinsson S (2006) Interlight and plant density in year-round production of tomato at northern latitudes. *Acta Hortic* 711: 71–75

Hikosaka K (2005) Leaf canopy as a dynamic system: Ecophysiology and optimality in leaf turnover. *Ann Bot* 95: 521–533

Hirose T, Werger MJA (1987) Nitrogen use efficiency in instantaneous and daily photosynthesis of leaves in the canopy of a *Solidago-Altissima* stand. *Physiol Plant* 70: 215–222

Hirose T (2005) Development of the Monsi-Saeki theory on canopy structure and function. *Ann Bot* 95: 483–494

Hovi T, Nakkila J, Tahvonen R (2004) Interlighting improves production of year-round cucumber. *Sci Hortic* 102: 283–294

Hovi-Pekkanen T, Tahvonen R (2008) Effects of interlighting on yield and external fruit quality in year-round cultivated cucumber. *Sci Hortic* 116: 152–161

Ieperen, van W, Trouwborst G (2008) The application of leds as assimilation light source in greenhouse horticulture: a simulation study. *Acta Hort. (ISHS)* 801:1407-1414

Janse J, Van Paassen R, Berkhout B (2004) Optimalisering belichting bij komkommer: onderzoek 2003–2004. *Praktijkonderzoek Plant & Omgeving, Sector Glastuinbouw, Naaldwijk*



- Janse J, Van Paassen R, Doorduyn J (2005) Verdere optimalisering belichting bij komkommer: onderzoek 2004–2005. Praktijkonderzoek Plant & Omgeving, Business Unit Glastuinbouw, Naaldwijk
- Marcelis LFM, Heuvelink E, Goudriaan J (1998) Modelling biomass production and yield of horticultural crops: a review. *Sci Hortic* 74: 83–111
- Monsi M, Saeki T (2005) On the factor light in plant communities and its importance for matter production. *Ann Bot* 95: 549–567
- Pettersen RI, Moe R, Gislerod HR (2008) Effects of intracanalopy lighting on photosynthetic characteristics of cucumber. In: Pettersen RI (ed) *The role of supplemental light duration in production of cucumber and roses (Thesis)*. ISBN: 978-82-575-0802-9, Norwegian University of Life Sciences, Ås, Norway, pp 1–19
- Ruijter, de JAF (2004) Verkenning van het perspectief van LED's voor gewasbelichting in de glastuinbouw, rapportnummer 50361787-KPS/TCM 04-2059, KEMA, juli 2004
- Sims DA, Pearcy RW (1989) Photosynthetic characteristics of a tropical forest understory herb *Alocasia-Macrorrhiza*, and a related crop species, *Colocasia-Esculenta* grown in contrasting light environments. *Oecologia* 79: 53–59
- Sims DA, Pearcy RW (1992) Response of leaf anatomy and photosynthetic capacity in *Alocasia-Macrorrhiza* (Araceae) to a transfer from low to high light. *Am J Bot* 79: 449–455
- Sonneveld C (1996) Nutrienten in beschermde teelten. Proefstation voor Bloemisterij en Glasgroente, Naaldwijk, The Netherlands, p 27
- Terashima I, Araya T, Miyazawa S, Sone K, Yano S (2005) Construction and maintenance of the optimal photosynthetic systems of the leaf, herbaceous plant and tree: an eco-developmental treatise. *Annals of Botany* 95: 507–519
- Thornley JHM, France J (2007) *Mathematical Models in Agriculture: Quantitative Methods for the Plant, Animal and Ecological Sciences*. CABI Pub., Wallingford, UK; Cambridge
- 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.

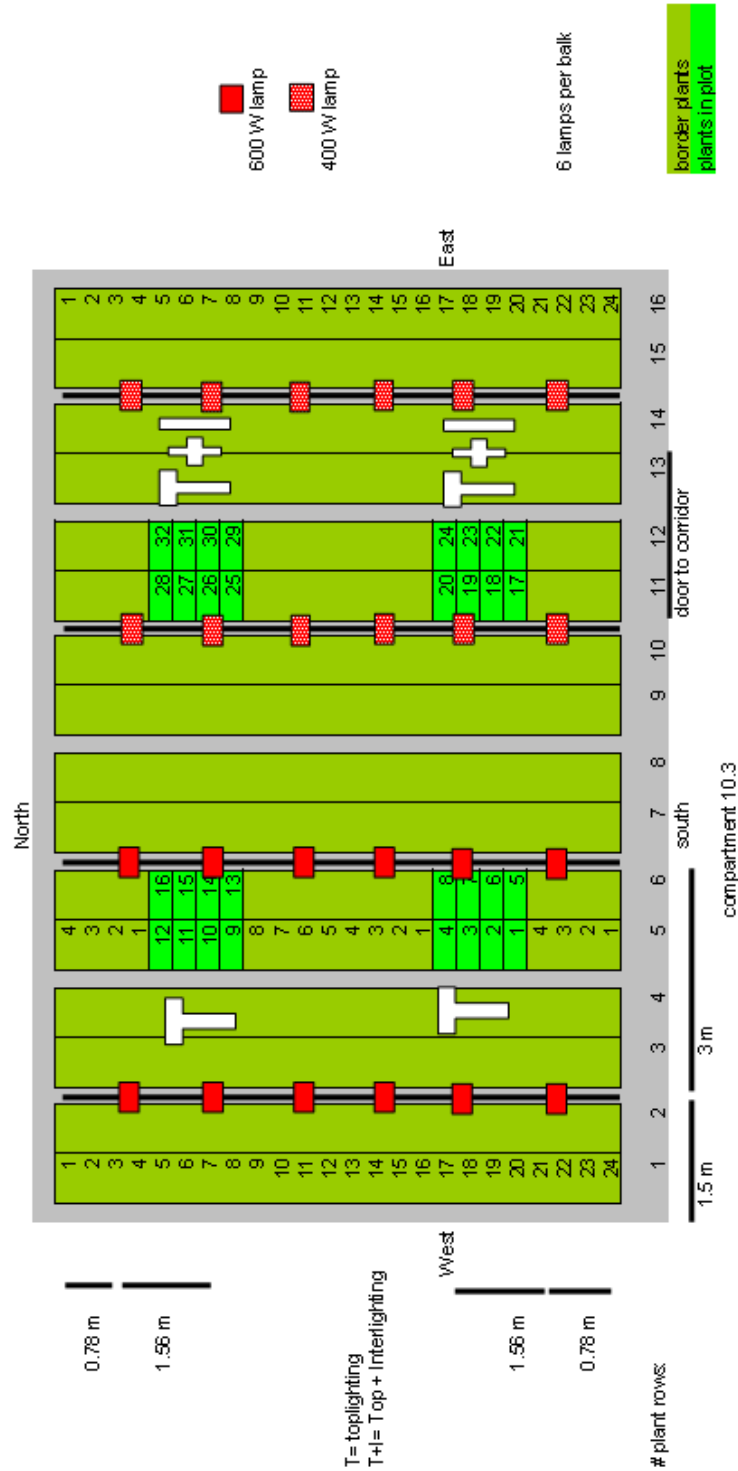


van Ieperen W, Trouwborst G (2008) The application of leds as assimilation light source in greenhouse horticulture: a simulation study. *Acta Hort. (ISHS)* 801:1407-1414

Xu HL, Gauthier L, Desjardins Y, Gosselin A (1997) Photosynthesis in leaves, fruits, stem and petioles of greenhouse-grown tomato plants. *Photosynthetica* 33: 113–123



BIJLAGE I: Plattegrond kas compartiment en belichtingsplan toplicht





WAGENINGEN UNIVERSITY
WAGENINGEN **UR**

For quality of life



WIN
WIN



of life

