



Fotosynthese-efficiency bij verschillende golflengten

Jan F. H. Snel, Esther Meinen, Margreet A. Bruins, Wim van Ieperen, Sander W. Hogewoning en Leo F. M. Marcelis



Referaat

LED verlichting heeft zijn intrede gedaan in de Nederlandse glastuinbouw. De LED ontwikkeling laat zien dat in de nabije toekomst LED's efficiënter zijn dan SON-T verlichting. Lichtonderschepping en fotosynthese efficiëntie zijn afhankelijk van de kleur van het licht. Voor optimale fotosynthese, groei en ontwikkeling zouden de beste LED kleuren uitgezocht moeten worden.

Wageningen UR heeft lichtonderschepping en fotosynthese bij verschillende lichtkleuren onderzocht bij tomaat, komkommer en roos. Protocollen en apparatuur werden ontwikkeld voor meting van bladfotosynthese en lichtonderschepping in het laboratorium en in de kas. Met een gewassimulatiemodel werd de bladfotosynthese vertaald naar gewasfotosynthese. Bij de vruchtgroenten was het spectrum van de fotosynthese gelijk aan het gangbare fotosynthese spectrum (plantgevoeligheidscurve). Rood licht is het meest efficiënt voor bladfotosynthese. Rood LED licht (ca. 645nm) was in groene bladeren maximaal 13% efficiënter dan SON-T licht. Bij de rode bladeren van de roos cultivar Prestige was het rode LED licht zelfs tot 35% efficiënter. Deze waarden gelden alleen voor de momentane bladfotosynthese bij een belichting met $100 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (PAR). De resultaten geven wel aan dat rood LED licht tot meer fotosynthese kan leiden, het meest bij roos cultivars met rode bladeren.

Summary

LED lighting has recently been introduced into Dutch horticulture. LED development so far indicates that in the near future LED's will be more energy efficient than high pressure sodium lamps. Crop light interception and photosynthesis efficiency are wavelength dependent. Therefore, LED colours for maximum crop photosynthesis, growth and development should be identified. Wageningen UR has investigated light interception and photosynthesis at different wavelengths for tomato, cucumber and rose. Measuring protocols and equipment were developed for leaf photosynthesis measurements in the laboratory and in greenhouses. A crop simulation model was used for up-scaling the leaf level results to crop level photosynthesis. For the vegetable crops the photosynthesis spectra are very similar to the generalised photosynthesis spectrum. Red light is most efficient for leaf photosynthesis. Light from red (ca. 645nm) LED's was maximally 13% more efficient than High Pressure Sodium light. For reddish leaves of the rose cultivar Prestige, red LED light was up to 35% more efficient. These figures apply to the momentary efficiency of leaf photosynthesis at $100 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (PAR) and suggest that use of red light can lead to higher photosynthesis, especially for certain rose cultivars.

© 2011 Wageningen, Wageningen UR Glastuinbouw.

Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Droevendaalsesteeg 1, 6708 PB Wageningen
: Postbus 16, 6700 AA Wageningen
Tel. : 0317 - 48 60 01
Fax : 0317 - 41 80 94
E-mail : glastuinbouw@wur.nl
Internet : www.glastuinbouw.wur.nl

Inhoudsopgave

	Voorwoord	5
	Begrippenlijst	7
	Samenvatting	9
1	Inleiding	13
2	Actiespectrum fotosynthese	15
3	Ontwikkeling apparatuur en protocollen	17
4	Resultaten laboratoriumexperimenten	23
5	Resultaten metingen in de kas	27
6	Schatting efficiëntie groeilicht	39
7	Conclusies en aanbevelingen	47
8	Referenties	49
Bijlage I	Materialen en methoden fase II	51
Bijlage II	Materialen en methoden fase III	53

Voorwoord

Dit complexe onderzoek vergt expertise vanuit verschillende disciplines: plantenfysiologie, biofysica, meet- en regeltechniek en optoelectronica. Het project kon dan ook alleen maar uitgevoerd worden door een groot aantal collega's met verschillende expertises en vaardigheden bij elkaar te brengen. Voor het praktijkonderzoek was ook samenwerking met praktijkbedrijven nodig. Het samenwerken van zoveel mensen in een dergelijk groot, vernieuwend en verdiepend onderzoek was niet altijd gemakkelijk, maar het heeft veel nieuwe kennis opgeleverd. Hiervoor willen we onderstaande personen bedanken.

Fase	Organisatie	Betrokkenen
I	WUR Glas	Henk Jalink, Rob van der Schoor, Johan Steenhuizen, Dick Uenk, Margreet Bruins, Esther Meinen, Jan Snel, Leo Marcelis, Silke Hemming.
	Wageningen Universiteit, Tupola	Sander Hogewoning, Govert Trouwborst, Jeremy Harbinson, Wim van Ieperen. Jan van Kreeel, Eltje Groenhuis, Ton van der Zalm.
II	WUR Glas	Margreet Bruins, Esther Meinen, Roberta Paradiso ¹ , Pieter de Visser, Jan Snel, Leo Marcelis
	Wageningen Universiteit	Sander Hogewoning, Wim van Ieperen.
	Tupola Unifarm	Jan van Kreeel, Eltje Groenhuis, Ton van der Zalm. Teade Stoker, André Maassen.
III	WUR Glas	Johan Steenhuizen, Dick Uenk, Steven Driever, Margreet Bruins, Roberta Paradiso ¹ , Pieter de Visser.
	Wageningen Universiteit	Menno Buurema, Gerhard Buck.
	Zuurbier & Van Kleef Improvement Center	Rosaline Zuurbier. Sjoerd Nieboer.

1 Gastmedewerkster. Department of Agricultural Engineering and Agronomy - University of Naples, Italy.

Het onderzoek is gefinancierd vanuit het energieprogramma Kas als Energiebron van het PT en met ministerie van Economische zaken, landbouw en innovatie. Een deel van het werk, uitgevoerd door Wageningen Universiteit, is mede gefinancierd door de stichting STW.

Begrippenlijst

Actiespectrum fotosynthese	Snelheid van de fotosynthese uitgezet tegen de golflengte van het opvallende licht.
Kwantumefficiëntie fotosynthese	Hoeveelheid fotosynthese gedeeld door de hoeveelheid geabsorbeerd licht. Vaak uitgedrukt in $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ per $\mu\text{mol fotonen} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.
Absorptiespectrum	Absorptie uitgezet tegen golflengte.
Verschilspectrum	Vershil tussen twee (absorptie)spectra uitgezet tegen de golflengte.

Samenvatting

LED belichting heeft zijn intrede in de Nederlandse Glastuinbouw gedaan. De verwachting is dat ze in de zeer nabije toekomst veel energiezuiniger zullen zijn dan de huidige SON-t lampen. LED belichting maakt het mogelijk om gebruik te maken van verschillende lichtkleuren en hiermee de fotosynthese, groei en ontwikkeling van tuinbouwgewassen te optimaliseren. In dit project heeft Wageningen UR de gevoeligheid van de fotosynthese voor verschillende kleuren onderzocht bij tomaat, komkommer en roos. Tevens is de absorptie en verdeling in het gewas van verschillende lichtkleuren onderzocht.

Eerst zijn meetprotocollen en meetapparatuur ontwikkeld om het actiespectrum van fotosynthese (de fotosynthese bij verschillende lichtkleuren) te kunnen meten. Vervolgens is in laboratorium onderzoek de gevoeligheid van de fotosynthese van bladeren voor verschillende lichtkleuren gemeten. Vervolgens is deze gevoeligheid ook in productiekassen gemeten. Alle metingen zijn verricht op bladniveau. Met een model is een inschatting gemaakt voor de gevolgen van de totale gewasfotosynthese.

Hoofdconclusies

Voor de vruchtgroenten tomaat en komkommer en voor roos met groen blad is het tot nu toe gehanteerde actiespectrum van de fotosynthese, ook wel plantgevoeligheidscurve genoemd, goed bruikbaar. Voor gewassen met roodgroen blad, zoals sommige rooscultivars, is groen en blauw licht veel minder efficiënt voor de fotosynthese dan op basis van het standaard actiespectrum mag worden aangenomen. Uit vergelijking van LED licht en SON-T licht blijkt dat licht van rode (645nm) LED's het meest efficiënt gebruikt wordt. De efficiëntie van de bladfotosynthese in groen blad is bij rood licht maximaal 13% hoger dan bij SON-T licht (m.a.w. $1 \mu\text{mol } 645\text{nm LED} = 1.13 \mu\text{mol SON-T}$). Bij roodgroene bladeren, b.v. roos cv Prestige, is hetzelfde rode licht tot 35% efficiënter dan SON-T licht (m.a.w. $1 \mu\text{mol } 645\text{nm LED} = 1.35 \mu\text{mol SON-T}$).

De genoemde verhoging van fotosynthese, zijn verhogingen die gemeten zijn wanneer planten gedurende korte tijd bij een bepaalde lichtkleur staan. Als de plant gedurende langere tijd bij bepaalde lichtkleuren geteeld wordt zou de plant zich zowel voor wat betreft fotosynthese-eigenschappen als morfologische eigenschappen kunnen aanpassen aan de lichtkleur, waardoor de uiteindelijke effecten kunnen afwijken van de hier gemeten effecten. De in dit project gemeten verhoging van de fotosynthese bij verschillende lichtkleuren geeft de potentiële verbetering van de fotosynthese aan. Of de productie in dezelfde mate zal stijgen hangt onder andere ervan af of ook de verwerking van de assimilaten door de plant en de morfologische ontwikkeling hier op afgestemd zijn. Het is de uitdaging om belichting zodanig te kiezen dat de verwerking van de assimilaten en de aanmaak van assimilaten in de fotosynthese optimaal op elkaar worden afgestemd.

Hieronder wordt nog een nadere samenvatting gegeven van de drie hoofdonderdelen van het onderzoek, te weten Meetapparatuur en protocollen, Laboratoriumonderzoek, en Praktijkonderzoek.

Meetapparatuur en protocollen

In Nederland was geen meetapparatuur voorhanden waarmee aan bladeren van intacte planten het actiespectrum van de fotosynthese gemeten kan worden. Daarom zijn in fase 1 van het project eerst opstellingen gebouwd voor het meten van lichtreflectie, -transmissie, -absorptie en efficiëntie van de fotosynthese bij verschillende kleuren licht. Tegelijkertijd zijn meetprotocollen ontwikkeld om deze parameters betrouwbaar aan intacte planten te meten.

Het project heeft nieuwe apparatuur en protocollen opgeleverd voor het meten van:

1. spectrum fotosynthese
2. reflectie, transmissie en absorptie blad
3. spectrale samenstelling licht

Voor alle meetopstellingen geldt dat er een vaste laboratoriumopstelling is voor nauwkeurige meting in het lab en een mobiele opstelling voor metingen in de kas. Figuur 3.5 toont de mobiele opstelling voor het meten van de fotosynthese bij verschillende lichtkleuren met een aangepaste Licor Li-6400 fotosynthesemeter.

Met de mobiele opstellingen kunnen deze belangrijke parameters, die de basis vormen voor het schatten van gewasfotosynthese, voor het eerst ook in een productiekas gemeten worden. Hierdoor kunnen belichtingssystemen nog beter op het gewas afgestemd worden.

Laboratoriumonderzoek fase 2

Er is onderzoek gedaan aan tomaat, komkommer en roos. In overeenstemming met wat eerder beschreven is verschilt het spectrum van de bladfotosynthese per gewas. De belangrijkste conclusies zijn:

Tomaat

- Het actiespectrum van de bladfotosynthese van tomaat lijkt sterk op het tot nu toe in de tuinbouw gehanteerde standaard actiespectrum.
- Bladeren van planten opgekweekt onder $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ hebben in het groene deel van het actiespectrum een lagere kwantumefficiëntie van de fotosynthese dan bladeren van planten opgekweekt onder $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$.
- Het verschil in actiespectrum tussen de twee behandelingen vertoont een piek rond 560 nm. Dat wijst op de betrokkenheid van anthocyaan.

Roos

- Groene bladeren hebben een actiespectrum dat vergelijkbaar is met het standaard actiespectrum.
- Roodgroen, jong blad heeft in het groene deel van het spectrum een veel lagere kwantumefficiëntie van de fotosynthese.
- Het verschil tussen roodgroen en groen blad is maximaal bij 560nm (groen licht) hetgeen wijst op de betrokkenheid van anthocyaan.

Komkommer

- Het actiespectrum komt grotendeels overeen met het standaard actiespectrum met uitzondering van het blauw, waar de kwantumefficiëntie wat lager is.

Praktijkonderzoek fase 3

Tomaat

- De kwantumefficiëntie van de bladfotosynthese van de cultivars Komeett en Capricia is in het blauwe en groene deel van het spectrum hoger dan het standaardspectrum van McCree (1972).
- Er is geen aantoonbaar verschil tussen de kwantumefficiëntie van de fotosynthese van bladeren van verschillende leeftijd (afkomstig uit verschillende bladlagen).
- Er is geen aantoonbaar verschil tussen winter- en zomergewas.
- Uit modelberekeningen blijkt dat de kwantumefficiëntie van de bladfotosynthese maximaal 13% hoger is bij belichting met rode LED's dan bij belichting met SON-T (d.w.z. $1 \mu\text{mol}$ 645nm LED = $1.13 \mu\text{mol}$ SON-T).
- Blad net onder de kop heeft een veel hogere ademhaling dan blad op dieper in het gewas. Groeilicht in de kop leidt daardoor tot een relatief lage netto fotosynthese.
- De lichtabsorptie door het gewas is nagenoeg constant tussen 400nm en 700nm. Daardoor is de blauw/rood verhouding in het gewas ook constant.
- De lichtabsorptie door het gewas tussen 700 en 800nm is lager dan in het zichtbare gebied. De rood/verrood verhouding is dieper in het gewas kleiner.

Roos

- Rood blad met anthocyaan heeft een duidelijk lagere kwantumefficiëntie van de bladfotosynthese dan het groene deel van het spectrum.
- Cultivars Akito en Prestige vertonen een duidelijk verschil in kwantumefficiëntie van de bladfotosynthese.
- De spectra van de bladfotosynthese van cultivar Prestige geteeld onder SON-T en LED zijn nagenoeg identiek.
- Bij cultivar Akito is er duidelijk verschil in optische eigenschappen van onder- en bovenzijde van het blad.
- De kwantumefficiëntie van de fotosynthese is bij belichting van de bovenzijde van het blad hoger dan bij belichting van de onderzijde.
- Berekeningen wijzen uit dat de kwantumefficiëntie van de bladfotosynthese bij cv Prestige maximaal 35% hoger is bij belichting met rode LED's dan bij belichting met SON-T (d.w.z. $1 \mu\text{mol}$ 645nm LED = $1.35 \mu\text{mol}$ SON-T).
- Uit modelberekeningen blijkt dat de kwantumefficiëntie van de (blad)fotosynthese op basis van geabsorbeerd licht de gewasfotosynthese het best benadert.

Tot slot

- Spectrum fotosynthese (plantgevoeligheidscurve).
 - o Geeft informatie over de lichtbenutting in de fotosynthese ten gevolge van een kortdurende belichting van een blad met verschillende kleuren niet verzadigend licht.
 - o Is de potentiële lichtbenutting van de bladfotosynthese bij verschillende kleuren licht.
- Relatie tussen spectrum fotosynthese en gewasfotosynthese
 - o Een toename in lichtbenutting bladfotosynthese leidt alleen tot een toename gewasfotosynthese als:
 - er geen andere beperkende factoren zijn,
 - de betreffende kleur licht geen negatieve effecten induceert (morfologie),
 - er geen verandering in (micro)klimaat optreedt (warmtestraling).
- Zijn alle kleuren licht nodig?
 - o De spectra van de fotosynthese op bladniveau geven aan hoe efficiënt groeilicht is op momentschaal en onder normale temperaturomstandigheden.
 - o Uit de spectra kan niet afgeleid worden welke lichtkleuren essentieel zijn voor groei en ontwikkeling van het totale gewas en welke lichtkleuren ongestraft weggelaten kunnen worden.
 - o Uit recent onderzoek in klimaatkamers (Project 'Groeilicht met zonlichtlampen', PT13847) blijkt dat licht met een kunstmatig zonlichtspectrum tot een grotere biomassa productie leidt dan SON-T of LED (70% rood / 30% blauw). Dat zou kunnen betekenen dat het weglaten van kleuren of een onbalans van het lightspectrum tot verlies van productie kan leiden ondanks het feit dat het spectrum van de bladfotosynthese aangeeft dat het licht efficiënt benut kan worden.
- Uit het spectrum van de fotosynthese van tomaat en komkommer blijkt dat licht van rode LED's maximaal 13% efficiënter is dan SON-T licht.
- Bij roos is op basis van het spectrum van de bladfotosynthese berekend dat bij cultivars met veel anthocyaan in het blad (rode bladeren) LED licht tot 35% efficiënter kan zijn dan SON-T licht voor de bladfotosynthese.
- Bij roos zijn er grote verschillen gevonden tussen cultivars in het spectrum van de bladfotosynthese. Bij het ontwerpen van belichtingsystemen verdient het aanbeveling om het spectrum van de fotosynthese te (laten) meten met de in dit project ontwikkelde mobiele meetopstelling.
- De optische eigenschappen van het blad zijn hoek- en kleurafhankelijk. Voor optimale inzet van tussenbelichting van vooral LED's is onderzoek nodig naar de hoekafhankelijkheid van bladreflectie, -transmissie en -fotosynthese nodig om onnodige verliezen te voorkomen.
- De netto bladfotosynthese is lager in de kop van het gewas. Mogelijk kan tussenbelichting lager in het gewas tot meer productie leiden. Nader onderzoek is gewenst om tussenbelichting optimaal te kunnen positioneren.
- LED's bieden kansen voor energiezuinig groeilicht. De vertaling van bladfotosynthese naar gewasproductie is echter niet eenvoudig. Strategisch onderzoek zou zich moeten richten op het vinden van de juiste combinatie van belichting, ras en teeltconditie.

1 Inleiding

Groeilicht, fotosynthese en energiebesparing

Bij de ontwikkeling van nieuwe lamptypes (bijvoorbeeld LED's) wordt altijd gebruik gemaakt van de zogenaamde plantgevoeligheidscurve voor de fotosynthese (fotosynthese-efficiency). De fotosynthese-efficiency van een plant, uitgedrukt in mol CO₂ per Joule licht, hangt sterk af van de golflengte van het gebruikte licht. Hierbij spelen reflectie en absorptie, efficiëntie van de fotosynthese en energie-inhoud van licht van verschillende golflengten een rol. In de jaren '70 is o.a. door McCree voor een flink aantal gewassen de gevoeligheid van de fotosynthese voor verschillende lichtkleuren (actiecentrum of plantgevoeligheidscurve) bepaald. Uit deze gegevens is een gemiddeld actiespectrum voor de fotosynthese afgeleid. Daarin werd vastgesteld dat de fotosynthese-efficiency bij blauw en rood licht het hoogste is. Op basis van deze spectra is berekend dat bijvoorbeeld belichting met alleen rood licht ongeveer 5% meer fotosynthese zou opleveren dan belichting met dezelfde lichtenergie van een SON-T lamp (De Ruijter *et al.* 2007).

Het gemiddelde actiespectrum voor de fotosynthese is echter niet gebaseerd op metingen aan moderne kasgewassen, maar op metingen van vooral veldgewassen (voornamelijk akkerbouwgewassen) en een beperkt aantal tuinbouwgewassen. Bovendien is de plantgevoeligheid alleen gemeten op bladniveau. De opschaling naar gewasniveau kan aanzienlijke veranderingen in het actiecentrum tot gevolg hebben. Er is weinig tot niets bekend over hoeveel variatie er bestaat in de plantgevoeligheid van huidige relevante kasgewassen. De plantgevoeligheid kan afhangen van de leeftijd van het blad, van de gewasarchitectuur, van groeilicht en van verschillende teeltomstandigheden (voeding, stress). Tenslotte is het belangrijk om de plantgevoeligheid van individuele bladeren door te vertalen een plantgevoeligheid van een heel gewas. Met deze basiskennis kunnen tuinders bestaande lampsystemen beter benutten en daarmee energie besparen. De kennis is essentieel voor toeleveranciers om nieuwe, energiebesparende lamptypes te kunnen ontwikkelen die qua efficiëntie en golflengte geoptimaliseerd zijn voor moderne kasgewassen.

Projectopzet

Het project bestaat uit drie fasen. In Fase 1 is meetapparatuur aangepast en zijn meet- en analyseprotocollen ontwikkeld. In Fase 2 zijn met deze opstellingen en protocollen laboratoriummetingen uitgevoerd aan planten die geteeld zijn in klimaatkamers onder goed gedefinieerde condities. In fase 3 is de mobiele meetapparatuur gebruikt om metingen te doen aan gewassen in praktijk- en onderzoekskassen. Hieronder volgt een gedetailleerdere beschrijving van de drie fasen.

Fase 1 Aanpassing meetapparatuur.

- Licht. In deze fase zijn beschikbare spectrometers en protocollen aangepast om bij verschillende golflengtes de transmissie, reflectie en absorptie te bepalen van bladeren en gewas.
 - o Laboratoriumopstelling. De aanwezige apparatuur en protocollen zijn aangepast voor het meten aan bladeren.
 - o Mobiele opstelling. De aanwezige apparatuur is in een mobiele opstelling ingebouwd en er zijn meetprotocollen ontwikkeld worden om in het gewas te kunnen meten.
- Fotosynthese bij verschillende golflengten.
 - o Laboratoriumopstelling. Er is gebruik gemaakt van vaste lab meetapparatuur bij de leerstoelgroep Tuinbouwproductieketens. De apparatuur is uitgebreid zodat de fotosynthese-efficiency bij verschillende golflengtes over een breed lichtspectrum bepaald kan worden. Hiermee is de fotosynthese-efficiency bij verschillende golflengten van in klimaatkamers onder gedefinieerde omstandigheden opgekweekte planten nauwkeurig bepaald.
 - o Voor het vergelijken van de spectra onder LED belichting is een kunstzonlichtlamp ontwikkeld op basis van een zwavelplasmalamp aangevuld met halogeenlicht (Hogewoning *et al.* 2010).
 - o Mobiele opstelling. Mobiele meetapparatuur van Wageningen UR Glastuinbouw, welke geschikt is om aan gewassen opgekweekt in kassen te meten, is uitgebreid zodat de fotosynthese bij verschillende golflengtes over een breed lichtspectrum direct in de kas bepaald kan worden.

Gewenst resultaat van deze fase: meetprotocol en unieke meetapparatuur voor het bepalen van de fotosynthese-efficiency bij verschillende golflengtes als vaste opstelling in het lab en als mobiele opstelling om in kassen te meten.

go/no-go (het project wordt gecontinueerd als apparatuur en meetprotocol geschikt zijn om de beoogde metingen in fase 2 te kunnen doen)

Fase 2 Absorptie en Fotosynthese-efficiency onder goed gedefinieerde kweekcondities in het lab.

Om nauwkeurig de effecten van verschillende teeltomstandigheden op de absorptie, transmissie en reflectie en de fotosynthese-efficiency afhankelijk van de golflengte te kunnen bepalen, is het noodzakelijk planten onder precies gedefinieerde omstandigheden in klimaatkamers op te kweken. De proeven zijn uitgevoerd met jonge planten. De volgende behandelingen zijn onderzocht:

- invloed van gewassoort (kornkommer, tomaat, roos)
- invloed van het lichtniveau bij 1 gewassoort (opkweek bij twee lichtniveaus: 100 en 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
- invloed van de lichtkleur bij 1 gewassoort en bij 1 lichtintensiteit (opkweek bij kunstmatig daglicht Kunstmatig daglicht verrijkt met verrood en verschillend kleuren LED belichting: blauw, rood en een combinatie van blauw/rood).

Gewenst resultaat van deze fase: Diverse absorptiecurves en fotosynthese-efficiency curves afhankelijk van de golflengte voor gedefinieerde omstandigheden, welke een belangrijke basis vormen voor de optimalisatie van nieuwe (toekomstige) lamptypes.

Fase 3 Absorptie en Fotosynthese-efficiency onder praktijkomstandigheden

Om de absorptie, transmissie en reflectie en de fotosynthese-efficiency afhankelijk van de golflengte ook onder praktijkomstandigheden te kunnen bepalen, zijn ook metingen in kassen verricht. Dit om te inzicht te krijgen in hoeverre variërende teeltomstandigheden een invloed hebben. De volgende aspecten spelen hierbij een rol:

- invloed van gewassoort (tomaat, roos)
- invloed van het seizoen (winter met lage lichtintensiteiten, zomer met hoge lichtintensiteiten)
- invloed van belichte en onbelichte planten (natuurlijk licht / SON-T / LED)
- invloed van verschillende posities/leeftijden van bladeren in de plant (ca. 3-4 verschillende leeftijden variërend van jong volwassen blad tot oud blad)

Gewenst resultaat van deze fase: Validatie van de in fase 2 onder gedefinieerde (lab)omstandigheden verkregen absorptiecurves en fotosynthese-efficiency curves, zodat een inschatting kan worden gemaakt hoe stabiel deze curves zijn onder praktijkomstandigheden.

Leeswijzer

Het onderzoek is behoorlijk technisch van aard. De gemeten plantgevoeligheidscurves staan in de hoofdstukken 4 en 5. De voor de sector misschien nog wel belangrijker resultaten zijn de gevolgen daarvan voor de lichtbenutting van groeilicht

(Hoofdstuk 6). Hoofdstuk 7 tenslotte bevat de conclusies en aanbevelingen.

2 Actiespectrum fotosynthese

Inleiding

Bij de ontwikkeling van nieuwe lamptypes (bijvoorbeeld LEDs) wordt altijd gebruik gemaakt van de plantgevoeligheidscurve voor de fotosynthese. Deze plantgevoeligheidscurve, ook wel actiespectrum genoemd, bestaat uit de fotosynthese bij verschillende kleuren licht in het gebied tussen 400 nm (blauw licht) en 700 nm (rood licht). De fotosynthese wordt meestal uitgedrukt in opgenomen CO₂ (in $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$) per eenheid van geabsorbeerd licht ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$). Dit wordt ook wel de kwantumefficiëntie van de fotosynthese genoemd.

De kwantumefficiëntie van de bladfotosynthese hangt sterk af van de golflengte. Dit wordt veroorzaakt door verschillen in absorptie in het blad en verschillen in de efficiëntie van het fotosyntheseproces. In de jaren '70 zijn door Balegh en Biddulph (1970) en McCree (1972) spectra van de bladfotosynthese bepaald. Daarin werd vastgesteld dat de kwantumefficiëntie bij rood licht het hoogste is. Dat zou betekenen dat bijvoorbeeld belichting met alleen rood licht ongeveer 5% meer fotosynthese zou opleveren dan belichting met evenveel licht van een HPS-lamp (De Ruijter *et al.* 2007).

Deze actiespectra uit de jaren 70 worden nu nog steeds gebruikt door tuinders en toeleveranciers. De actiespectra van McCree en latere onderzoekers zijn echter niet gebaseerd op metingen aan moderne kasgewassen, maar op metingen van voornamelijk veldgewassen. Bovendien zijn alleen curven opgesteld op bladniveau, terwijl de fotosynthese op gewasniveau duidelijk een afwijkende respons kan vertonen. Er is nog weinig bekend over variatie in actiespectra van huidige kasgewassen en of het actiespectrum afhankelijk is van teeltomstandigheden (bv langdurige belichting met kunstlicht). Dat geldt ook voor de invloed van de leeftijd van een blad en hoe het actiespectrum van individuele bladeren doorvertaald kan worden naar een actiespectrum van een heel gewas. Deze basiskennis is essentieel om nieuwe lamptypes te kunnen ontwerpen die spectraal en energetisch goed afgestemd zijn op de huidige tuinbouwgewassen.

Inpassing

Het project sluit aan bij de aanbevelingen uit het Position paper licht. In het Position paper licht wordt een inschatting gemaakt dat door gericht gebruik te maken van verschillende lichtkleuren de belichtingsefficiëntie (gram oogstbaar product per Watt licht) minimaal 10-15% verbeterd kan worden. Binnen dit project wordt basiskennis verworven om de optimalisatie van (toekomstige) lichtbronnen golflengteafhankelijk te kunnen realiseren.

Binnen de leerstoelgroep Tuinbouwproductieketens van Wageningen Universiteit wordt fundamenteel onderzoek gedaan aan effecten van lichtkleuren op plantenfysiologische processen. Binnen het hier beschreven project wordt gebruik gemaakt van deze fundamentele kennis en wordt deze toepasbaar gemaakt voor de tuinbouwpraktijk.

De in dit project gegenereerde kennis zal binnen het project Modelleren ruimtelijke lichtverdeling in gewassen (PT-projectnummer: 13098) gebruikt worden voor de opschaling naar gewasniveau.

3 Ontwikkeling apparatuur en protocollen

Meting spectrum fotosynthese

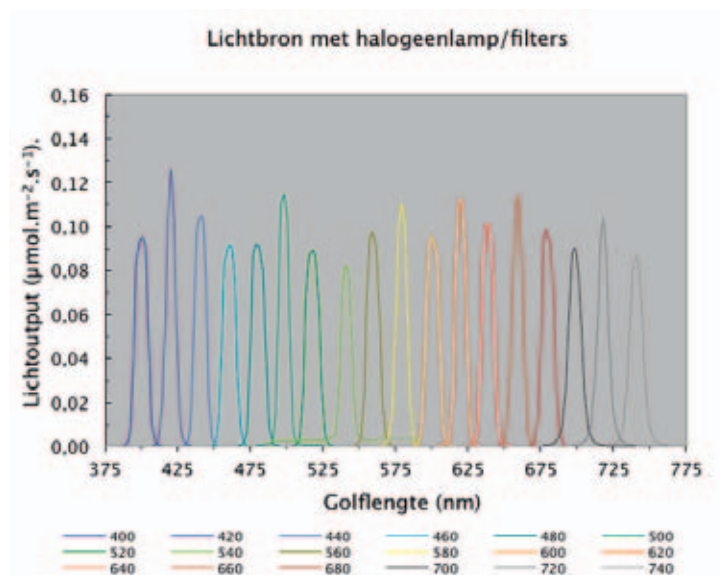
Laboratoriumopstelling

Er is een fotosyntheseopstelling gebouwd, waarbij een deel van het blad in een meetcuvet kon worden gebracht (4.52 cm^2) dat vervolgens belicht werd met licht van verschillende golflengten. Licht was afkomstig van 2 verschillende lichtbronnen welke samen werden gebracht en vervolgens viel dit gecombineerde licht op het blad. Het licht van de eerste lichtbron (250W halogeenlamp) werd gefilterd met een warmtefilter en een daglichtfilter (Lee no 201) en gaf wit achtergrond licht; voor tomaat en roos was dit $40 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Bij de metingen met komkommer werd achtergrond licht gegeven met dezelfde LED's als waarbij de planten waren opgekweekt. De tweede, identieke lichtbron was voorzien van een warmtefilter (Calflex X) en gaf wit licht waar vervolgens een interferentiefilter voor werd geplaatst waardoor de gewenste golflengte werd verkregen met een bandbreedte van 10 nm. De lichtbundels werden gecombineerd via een meerarmige lichtgeleider en het gezamenlijke uiteinde werd in de bladcuvet gebracht. In de bladcuvet is een splitter geplaatst en met een fotodiode werd de hoeveelheid licht gemeten. Deze fotodiode is gekalibreerd met een thermozuil; de juiste lichtintensiteit kon zo gemakkelijk worden ingesteld door het meten van de diodestroom. Door beide lichtbronnen te voorzien van sluiters konden beide lichtbronnen op de gewenste momenten worden in- en uitgeschakeld zonder last te hebben van opwarmeffecten.

Lucht werd in de gewenste verhouding gemengd (380 ppm CO_2 en $2\% \text{ O}_2$) en in de bladkamer gebracht met een flowsnelheid van 300 ml/min . De bladkamertemperatuur was 25°C . De bladtemperatuur in de bladkamer werd aan de onderzijde van het blad gemeten met een thermokoppel. CO_2 en H_2O werden gemeten in de ingaande lucht en de uitgaande lucht met een LI-7000. CO_2 opname en verdamping werden vervolgens berekend.

Meetprotocol

Fotosynthese is gemeten bij 18 verschillende golflengten tussen 406 en 740 nm met stappen van ca 20 nm: 406, 427, 445, 460, 480, 500, 520, 540, 560, 580, 600, 620, 640, 660, 680, 700, 720, 740 nm (zie Figuur 3.1.).



Figuur 3.1. Spectra van de gebruikte lichtkleuren voor het meten van het spectrum van de fotosynthese. De spectra zijn genormaliseerd op een output van $1 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

Voor de meting werd de meetplant uit de klimaatkamer gehaald en naar het fotosyntheselaboratorium gebracht. Een blad werd in de bladkamer gebracht gedurende in totaal 6 uur bij tomaat en roos. In deze tijd werd de fotosynthese gemeten bij alle 18 golflengten. Eerst werd gedurende ongeveer 30 minuten $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ wit licht gegeven tot de CO_2 opname stabiel was. Vervolgens werd de fotosynthese gemeten bij 18 verschillende golflengten waarbij de meetvolgorde van de golflengten gewaard was tussen de 4 herhalingen op een systematische manier. Herhaling 1 was volledig geloot; herhaling 2 had de omgekeerde volgorde van herhaling 1; de volgorde bij herhaling 3 was zo gekozen dat de gemiddelde meettijd (absolute tijd) vergeleken met herhaling 1 ongeveer gelijk was voor alle filters; herhaling 4 had de omgekeerde volgorde van herhaling 3.

Meting bij een bepaalde golflengte omvatte 4 meetstappen van 3 minuten per stap:

1. $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ wit licht
2. $40 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ wit licht + $60 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ smalband licht = $100 \mu\text{mol}$ totaal
3. $40 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ wit licht + $30 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ smalband licht = $70 \mu\text{mol}$ totaal
4. $40 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ wit licht

Stap 1 werd gedaan om het blad voor en na een meting te 'resetten' (ander woord en beter uitleggen). Stappen 1 en 4 werden gebruikt om de meetwaarden van stappen 2 en 3 te corrigeren voor variatie gedurende de meetdag veroorzaakt door zowel verandering van blad als van apparatuur. De relatieve fotosynthese per μmol opvallend licht van een bepaalde golflengte werd als volgt berekend:

$$\frac{((\text{Fotosynthese stap 2} - \text{stap 4}) / (\text{Fotosynthese stap 1} - \text{stap 4})) / \mu\text{mol opvallend licht voor } 60 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1} \text{ licht}}{((\text{Fotosynthese stap 3} - \text{stap 4}) / (\text{Fotosynthese stap 1} - \text{stap 4})) / \mu\text{mol opvallend licht voor } 30 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1} \text{ licht}}$$

De 2 waarden berekend voor 60 en voor 30 μmol opvallend licht (resp. stap 2 en 3) werden vervolgens gemiddeld voor een bepaalde golflengte. Vervolgens is de relatieve quantum efficiëntie berekend door de hoogste waarde van alle gemeten golflengten op 1 te stellen en de rest relatief te berekenen ten opzichte van deze hoogste waarde.

Fotosynthese is vervolgens ook berekend per geabsorbeerd foton bij de betreffende golflengte. Hiervoor is de berekende bladabsorptie gebruikt bij de betreffende golflengte (centrale golflengte interferentiefilter).

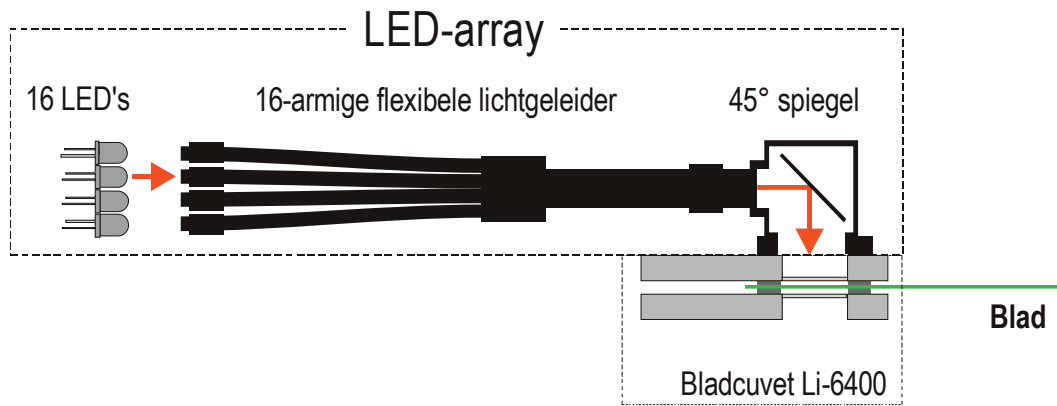
Bij komkommer werd een iets andere meetprocedure gevolgd. De fotosynthese werd gemeten bij 5 lichtintensiteiten i.p.v. 3 lichtintensiteiten en bij iets langere adaptatietijden. De meetprocedure was daardoor nauwkeuriger, maar duurde ook een stuk langer (ca. 18 uur). Daardoor waren voor het meten van een spectrum drie afzonderlijke bladeren nodig. Bij de metingen was het spectrum van het achtergrondlicht gelijk aan dat van het licht waaronder de planten opgekweekt waren. De efficiëntie van de fotosynthese werd bepaald via lineaire regressie uit de metingen bij de vijf lichtintensiteiten.

Kas-opstelling

De opstelling voor het meten van het spectrum van de fotosynthese in de kas bestaat uit een bestaande Licor Li-6400XT draagbare fotosynthesemeter uitgebreid met een in het project ontwikkelde meerkleuren LED-array.

Meerkleuren LED-array

De LED array bestaat uit 16 power-LED's gekoppeld aan een 16-armige lichtgeleider. De 16 armen zijn ieder vlak bij een LED gemonteerd; het gezamenlijke uiteinde belicht de bovenzijde van de bladcuve van de Li-6400 fotosynthesemeter via een onder een hoek van 45° geplaatste spiegel (zie Figuur 3.2.).



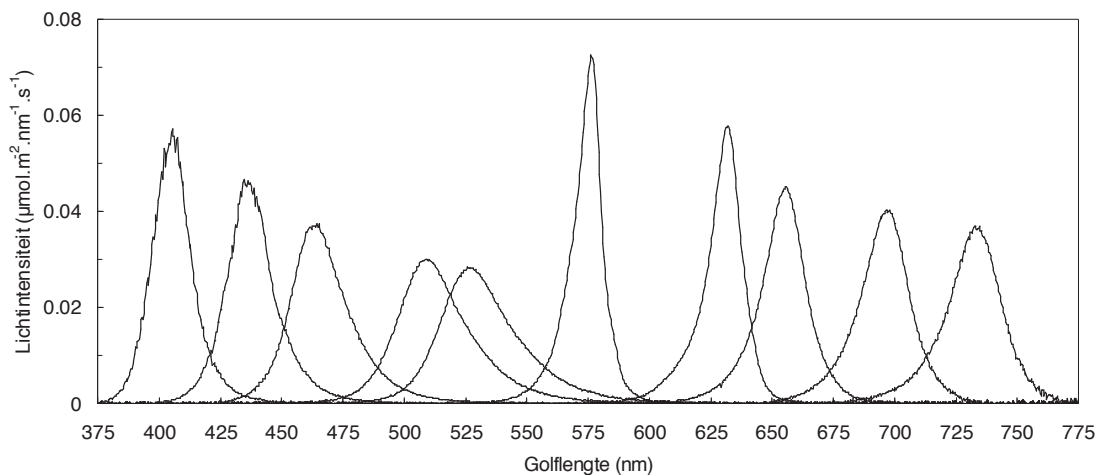
Figuur 3.2. Schematische weergave van de LED-array met de verschillende onderdelen benoemd.

De LED's worden ieder afzonderlijk gevoed uit een 16-kanaals, USB-gestuurde stroombron. Met deze stroombron kunnen één of meer LED's tegelijkertijd aangezet worden. Voor de LED's zijn power LED's gekozen die het gebied tussen 400nm en 740nm zo goed mogelijk bestrijken. Dat heeft geleid tot de volgende golflengten: 405, 435, 470, 505, 525, 570, 625, 660, 700, 740nm. Het lichtspectrum van de LED-array, gemeten aan het gezamenlijke uiteinde, is weergegeven in Figuur 3.3. Figuur 3.4. geeft een beeld van de complete LED-array gemonteerd op de meetkop van de Licor Li-6400 bladcuve.

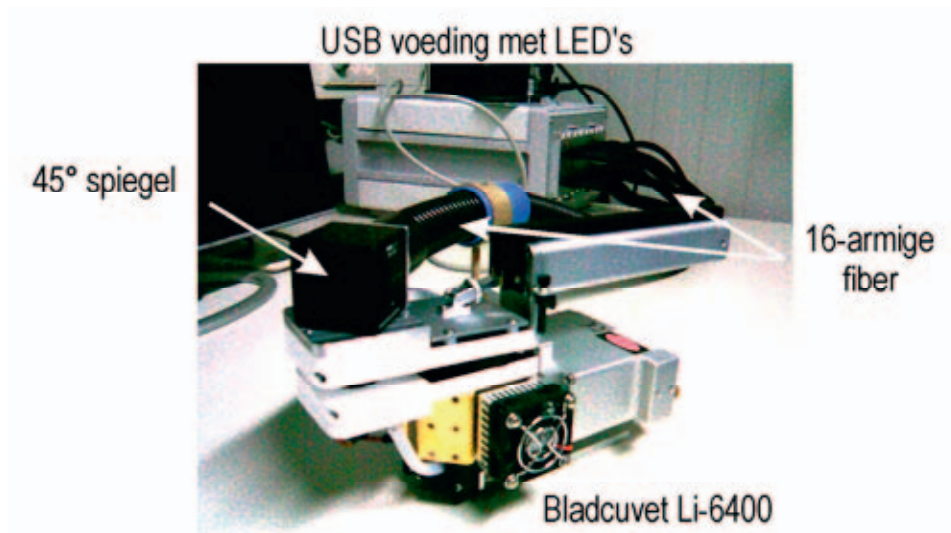
Kalibratie

De LED-array is afgeregeld op een output van $40 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ voor elke LED. Voor wit referentielicht zijn alle LED's ingeschakeld met uitzondering van de 570nm LED (te zwak). Voor achtergrondlicht was de intensiteit $30 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ en de intensiteit van het referentielicht was $70 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Eenmaal per meetsessie werd de LED-array gekalibreerd met een Li-190 PAR sensor (Licor) die gekalibreerd was tegen een FieldMax-II powermeter uitgerust met een PS10Q meetkop (Coherent). De LED-array werd gemonteerd in de bladcuve van de Licor Li-6400 fotosynthesemeter en de lichtintensiteit ter plekke van het blad werd gemeten met een Licor Li-190 quantumsensor.

LED-array: genormaliseerde spectra individuele LED's



Figuur 3.3. Lichtspectrum van de LED's uit het LED-array. De spectra gemeten met een gekalibreerde Ocean Optics Jaz spectrometer. De spectra van iedere LED zijn voor deze Figuur genormaliseerd op een totale PAR straling van $1 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$.



Figuur 3.4. De complete LED-array (inclusief fiber en voeding) gemonteerd op de bladcuvet van de Licor Li-6400 draagbare fotosynthesemeter.

Meetprotocol

Het meetprotocol is afgeleid van het protocol dat in fase 2 is gebruikt. Meten in een productiekas stelt speciale eisen aan de protocollen. Op basis van het beschikbare budget, gewenste aantal herhalingen en behandelingen is besloten om het protocol zodanig aan te passen dat een spectrum in minder dan één uur gemeten moet kunnen worden. Nadere analyse van de data uit fase 2 leerde dat de meettijd bekort kan worden door i) 2 i.p.v. 3 lichtintensiteiten voor iedere kleur te nemen, ii) niet voor elke kleur een wit licht referentiemeting te nemen en iii) minder adaptatietijd per meting te gebruiken. Samen met het feit dat er nu slechts 10 i.p.v. 18 kleuren gemeten worden, resulteert dat in een meettijd van 50-60 minuten voor een compleet spectrum.

Fotosynthese wordt gemeten bij 10 verschillende golflengten tussen 400 en 740 nm: 405, 435, 470, 505, 525, 570, 625, 660, 700 en 740nm. Het meetprotocol ziet er als volgt uit:

- Zoek een geschikt blad en klem dat in de bladkamer.
- Adapteer het blad gedurende ongeveer 5-10 minuten aan $70 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ wit referentielicht tot de CO_2 opname stabiel is en meet de fotosynthese bij $70 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ wit referentielicht.
- Vervolgens wordt de fotosynthese gemeten bij 10 verschillende golflengten op een achtergrond van $30 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ wit licht. De meetvolgorde van de verschillende golflengten wordt van te voren manier geward.
- Halverwege, d.w.z. nadat 5 golflengtes gemeten zijn, en aan het eind van de metingen wordt nogmaals de fotosynthese bij $70 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ wit referentielicht gemeten.
- Daarna wordt de fotosynthese bij $30 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ wit achtergrondlicht gemeten waarna vervolgens de ademhaling werd gemeten na 5 minuten donkeradaptatie.

Samengevat:

1. Aanpassing blad gedurende 5-10 min $70 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ wit referentielicht,
2. Meting fotosynthese bij $70 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ wit referentielicht gedurende 3 min.,
3. Meting (5x) bij $30 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ wit achtergrondlicht + $40 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ LED licht gedurende 3 min.,
4. Meting fotosynthese bij $70 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ wit referentielicht gedurende 3 min.,
5. Meting (5x) bij $30 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ wit achtergrondlicht + $40 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ LED licht gedurende 3 min.,
6. Meting fotosynthese bij $70 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ wit referentielicht gedurende 3 min.,
7. Meting fotosynthese bij $30 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ wit achtergrondlicht gedurende 3 min.,
8. Meting ademhaling gedurende 5 min.

De relatieve kwantumefficiëntie van de fotosynthese per μmol opvallend licht van een bepaalde golflengte werd als volgt berekend:

$$\text{Kwantumefficiëntie}_{\text{LED-licht}} = (P_{\text{LED-licht}} - P_{\text{achtergrondlicht}}) / (P_{\text{referentiëlelicht}} - P_{\text{achtergrondlicht}}) / \mu\text{mol opvallend LED-licht}$$

Vervolgens werd de kwantumefficiëntie genormaliseerd door de hoogste waarde van alle gemeten golflengten op 1 te stellen en de rest relatief te berekenen ten opzichte van deze hoogste waarde.

De kwantumefficiëntie per geabsorbeerd foton is berekend door de kwantumefficiëntie te delen door de met de Perkin Elmer bepaalde bladabsorptie bij de betreffende golflengte.

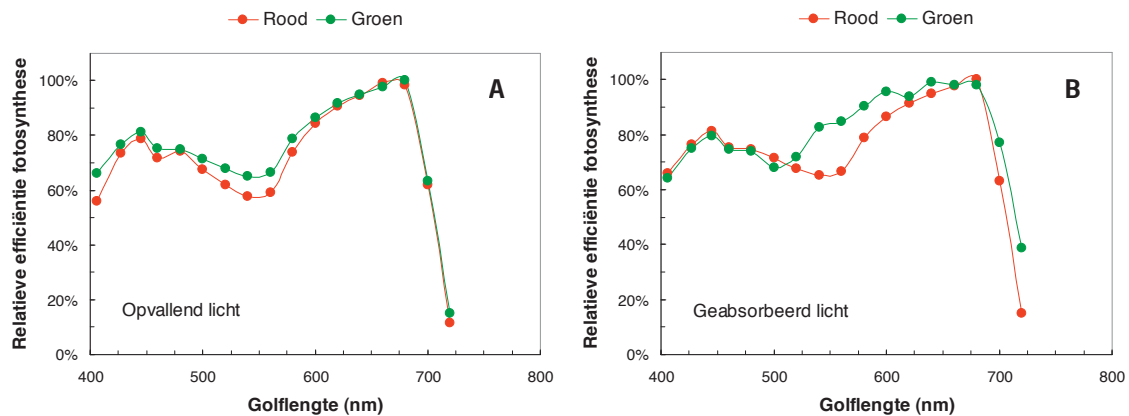


Figuur 3.5. Opstelling voor het meten van het spectrum van de fotosynthese in de kas. Foto genomen gedurende de meetcapagne bij Zuurbier Rozen.

Spectrale lichtverdeling in gewas

Voor een beschrijving van het protocol: zie bijlage III.

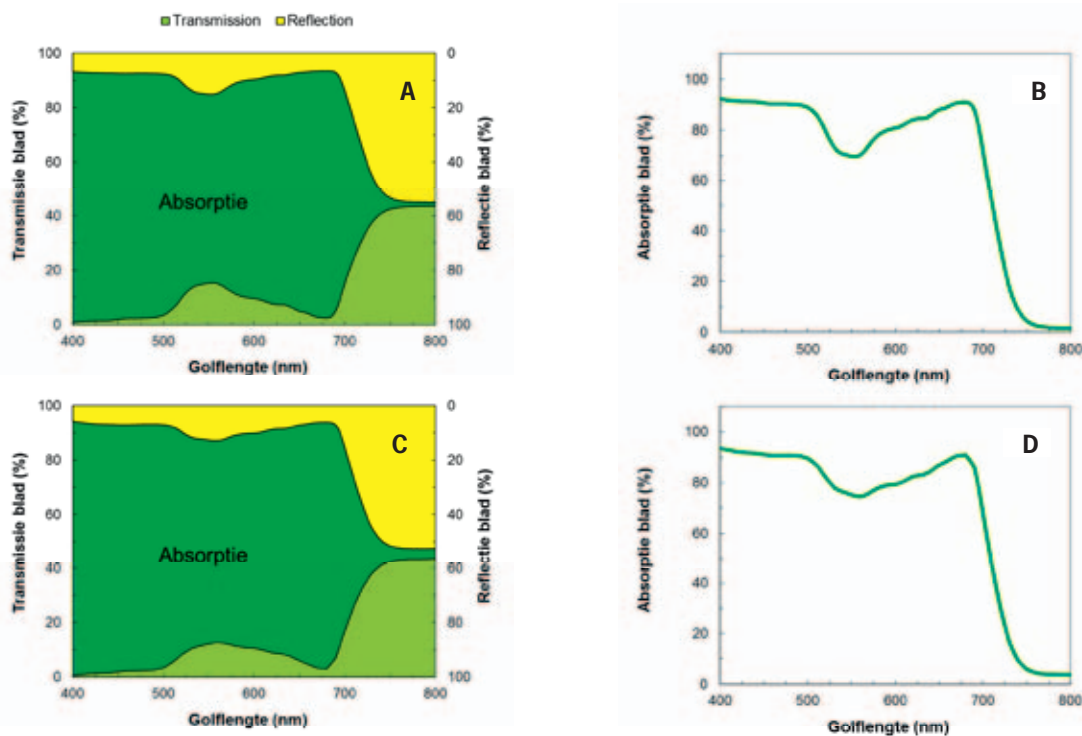
4 Resultaten laboratoriumexperimenten



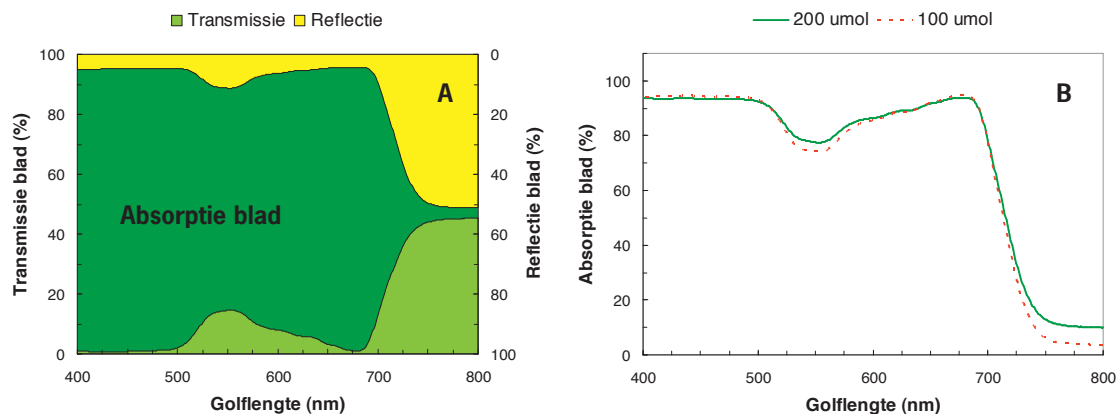
Figuur 4.1. Relatieve efficiëntie van de fotosynthese van een uitontwikkeld, groen 5-blad van roos (cv Akito) gebaseerd op opvallend licht (A) en geabsorbeerd licht (B).

Roos

Bij roos (cv Akito) is een duidelijk effect van bladleeftijd (ontwikkelingsstadium) te zien. Bij de fotosynthese op basis van invallend licht zijn de verschillen nog relatief klein (Figuur 4.1A.). De groene bladeren doen het beter dan de rode bladeren in het groene gebied. Bij de fotosynthese gebaseerd op geabsorbeerd licht zijn de verschillen nog duidelijker (Figuur 4.1B.). Bij 560nm is de relatieve kwantumefficiëntie in het 'rode' blad 67% tegen 85% in het groene blad. Bladeren laag aan de stengel zijn vrij groen, terwijl jonge bladeren een rode kleur hebben als gevolg van anthocyanen. De aanwezigheid van anthocyanen leidt tot een hogere bladabsorptie rond 520-590nm (vergelijk Figuur 4.2B. en Figuur 4.2D.). Bij de kwantumefficiëntie van de fotosynthese zien we juist een lagere waarde bij 520-590nm.



Figuur 4.2. A, C Transmissie, reflectie en absorptie (donkergroene gebied) van uitontwikkeld blad van roos (cv Akito) opgekweekt in een proefkas in Wageningen. B, D Berekende bladabsorptie. A, B licht rood blad. C, D groen blad.



Figuur 4.3. A Transmissie, reflectie en absorptie (donkergroene gebied) van uitontwikkeld blad van tomaat (cv Elegance) opgekweekt onder $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ TL licht. B Absorptie van bladeren van planten opgekweekt onder 100 of $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ TL licht.

Dit is te verklaren uit het feit dat de energie van het licht dat door de anthocyanen geabsorbeerd wordt niet gebruikt kan worden voor fotosynthese. Beide typen bladeren absorberen evenveel licht in het gebied 400-700 nm, maar bij de rode bladeren is een deel van die lichtenergie niet beschikbaar voor fotosynthese. Dat is met name belangrijk voor het vertalen van bladfotosynthese naar gewasfotosynthese. De anthocyanen zorgen er voor dat er minder groen licht doorgelaten wordt naar lagere bladlagen. Fotosynthese op basis van geabsorbeerd licht is dus een betere maat voor gewasfotosynthese dan fotosynthese op basis van opvallend licht.

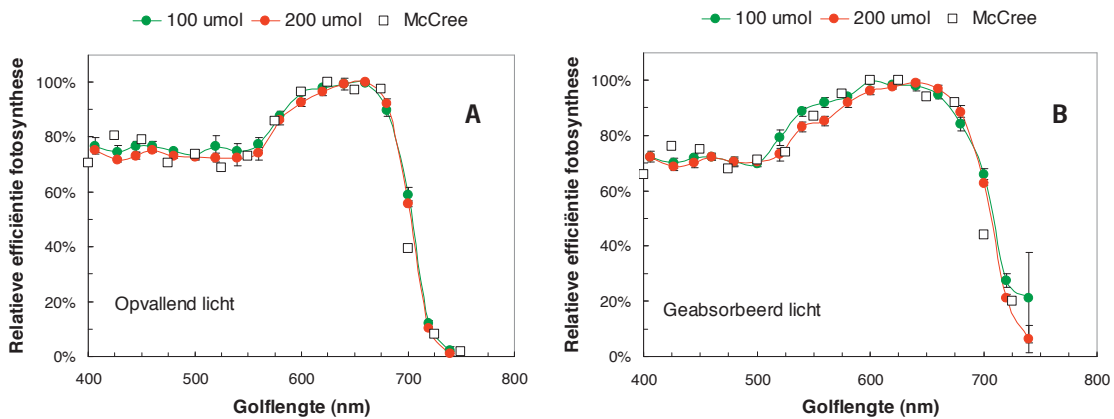
Conclusies roos

- Groene bladeren hebben een actiespectrum dat vergelijkbaar is met dat van o.a. McCree (1972).
- In het groene deel van het spectrum absorbeert jonge, roodgroen blad meer licht dan ouder groen blad van dezelfde plant.
- In het groene deel van het spectrum heeft jong, roodgroen blad een veel lagere kwantumefficiëntie van de fotosynthese dan groen blad.
- Het verschil tussen de spectra van rood en groen blad vertoont een piek rond 560 nm. Dat wijst op de betrokkenheid van anthocyaan.

Tomaat

De gemeten transmissie- en reflectiespectra en de daaruit berekende bladabsorptie voor blad van planten gekweekt onder $100 \mu\text{mol PAR.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ staan weergegeven in Figuur 4.3A. In Figuur 4.3B. staat de bladabsorptie voor blad van planten onder 100 en $200 \mu\text{mol PAR.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. De bladabsorptie van de planten onder 100 en $200 \mu\text{mol PAR.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ is nagenoeg gelijk, behalve in het groengele gebied (520-580nm). De twee spectra lijken sterk op elkaar, behalve in het groengele gebied. Daar ligt de efficiëntie op basis van geabsorbeerd licht hoger, omdat het blad daar door hogere reflectie en transmissie (zie Figuur 4.3A.) minder licht absorbeert (Figuur 4.3B.). Het spectrum van de efficiëntie van de fotosynthese van tomaat is uitgezet in Figuur 4.4. Figuur 4.4A. geeft de fotosynthese berekend op basis van het opvallende licht. Omdat vooral in het groengele deel van het lichtspectrum bladeren licht doorlaten, is ook berekend wat de bladfotosynthese is gecorrigeerd voor dat deel van het licht dat ook werkelijk door het blad geabsorbeerd is (Figuur 4.4B.). Deze correctie is gebaseerd op gemeten spectra van reflectie en transmissie en de daaruit berekende absorptie (Fig.4.3B.). De efficiëntie op basis van geabsorbeerd licht is hoger in het gebied tussen 520 en 580nm, omdat het blad daar door hogere reflectie en transmissie (zie Figuur 4.3A.) iets minder licht absorbeert (Figuur 4.3B.).

De resultaten voor tomaat lijken ook sterk op het standaardspectrum voor in klimaatkamer geteelde planten (McCree, 1972). Er is een klein, maar significant effect van de opkweekcondities. De planten opgekweekt onder $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ hebben in het groen een vergelijkbare fotosynthese (Figuur 4.4A.), maar absorberen iets meer licht (Figuur 4.3B.). Daardoor hebben de planten onder hoog licht een iets lagere efficiëntie van de fotosynthese (Figuur 4.4B.).



Figuur 4.4. Relatieve efficiëntie van de fotosynthese gebaseerd op opvallend (A) en geabsorbeerd licht (B) voor bladeren van tomatenplanten opgekweekt bij 100 of 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Trostomaat cv Elegance).

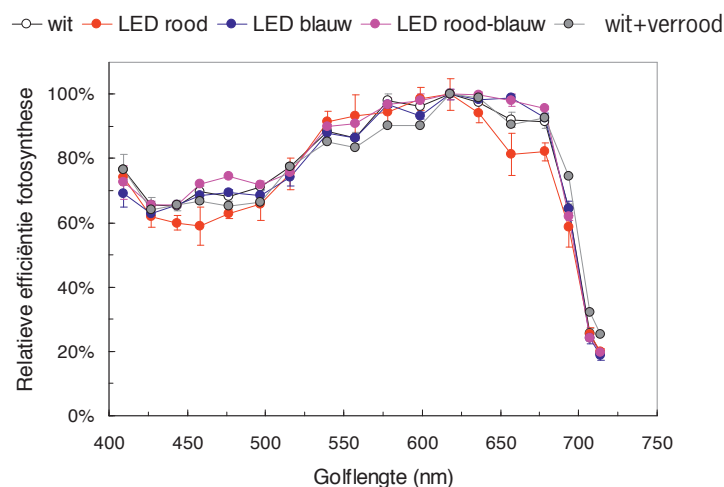
Conclusies tomaat

- Het actiespectrum van de fotosynthese van tomaat lijkt sterk op de eerder gepubliceerde spectra van McCree
- In het groene deel van het spectrum absorberen bladeren van planten opgekweekt onder 200 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ meer licht dan van planten opgekweekt onder 100 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (PAR).
- In het groene deel van het spectrum hebben bladeren van planten opgekweekt onder 200 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ een lagere kwantumefficiëntie van de fotosynthese dan bladeren van planten opgekweekt onder 100 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$.
- Het verschilspectrum vertoont een piek rond 560 nm. Dat wijst op de betrokkenheid van anthocyaan.

Komkommer

Bij komkommer is gemeten aan planten die onder verschillende lichtomstandigheden zijn opgekweekt. Het gaat om planten die in een klimaatkamer onder rode LED's, blauwe LED's en een combinatie van rode en blauwe LED's zijn opgekweekt (Hogewoning, 2010).

Als controle zijn planten opgekweekt onder kunstmatig daglicht en onder kunstmatig daglicht verrijkt met verrood. Figuur 4.5. laat zien dat de behandelingen niet veel invloed hebben op het spectrum van de fotosynthese en dat het spectrum grotendeels overeenkomt met de standaard McCree curve. In het blauw zijn er wel een paar verschillen. Tussen 400 en 475 nm liggen de metingen bij komkommer lager dan bij McCree.



Figuur 4.5. Relatieve kwantumefficiëntie van de fotosynthese per geabsorbeerd foton voor komkommer opgekweekt onder wit licht, wit licht + verrood, rode LED's, blauwe LED's en een combinatie van blauwe en rode LED's (30%/70%).

De waarde bij 740 nm is weggelaten omdat die waarschijnlijk te hoog is omdat i) de absorptie door het blad erg laag is (een heel kleine fout in de absorptiemeting heeft een groot effect op de kwantumefficiëntie van de fotosynthese) en ii) het Emerson-Enhancement¹ effect zorgt voor een efficiënter gebruik van het rood/blauwe achtergrond licht tijdens de meting. Tussen 420 nm en 475 nm en tussen 620 nm en 680 nm ligt de efficiëntie van de fotosynthese van planten opgekweekt onder rode LED's lager dan de andere behandelingen.

Komkommer

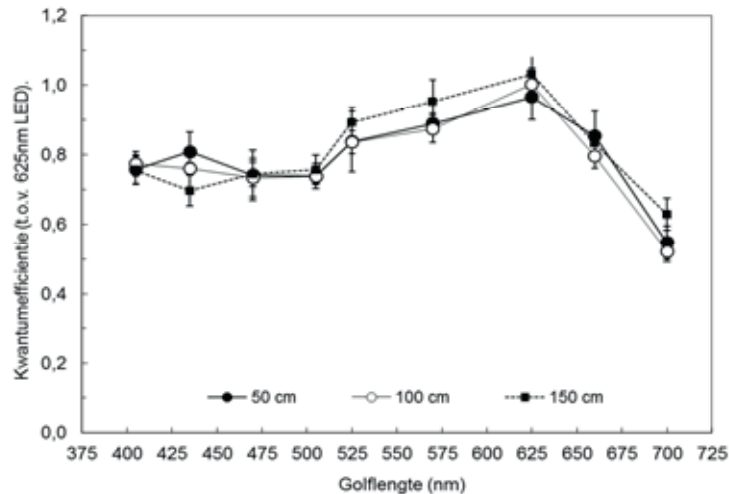
- Het actiespectrum van komkommer opgekweekt in een klimaatkamer onder kunstlicht komt grotendeels overeen met de curve beschreven door McCree.
- Uitzondering is het spectrum van komkommer gekweekt onder rode LED belichting. Deze vertoont een lagere kwantumefficiëntie rond de 460nm en rond de 660nm.

¹ Het Emerson-Enhancement effect is het verschijnsel dat belichting met langgolvig licht (golflengtes hoger dan 680 nm) efficiënter werkt als er al licht aanwezig is dat specifiek door fotosysteem II ingevangen wordt. In de metingen met komkommer was rood/blauw achtergrondlicht aanwezig dat bij voorkeur fotosysteem II aanslaat.

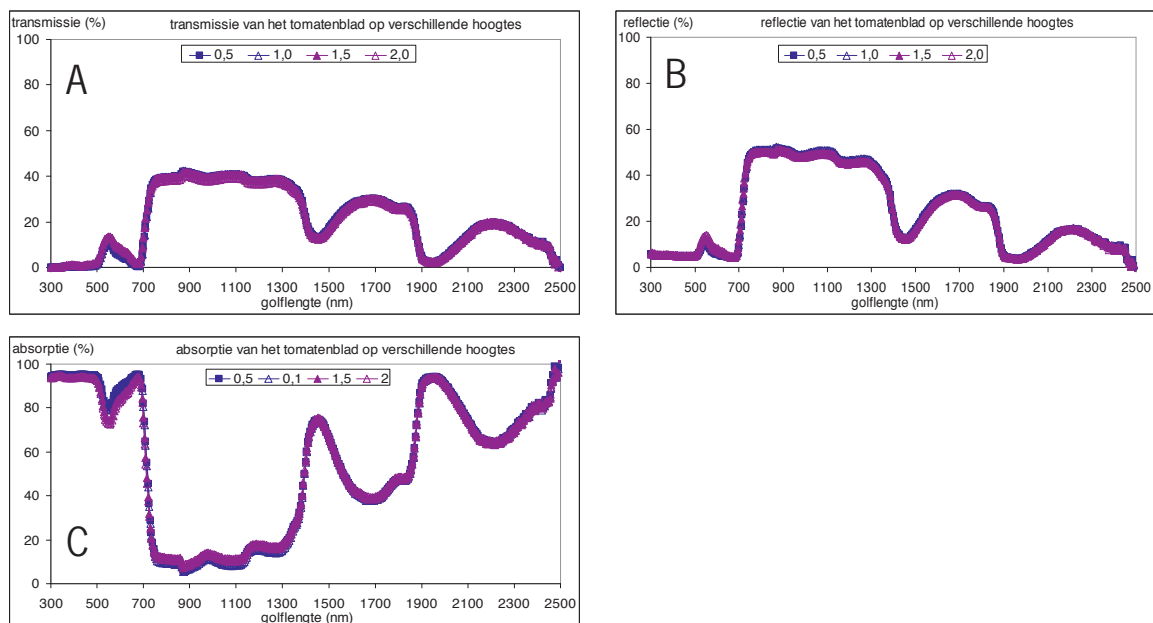
5 Resultaten metingen in de kas

Met de in fase 1 ontwikkelde apparatuur is in een aantal (semi)productiekassen het spectrum van de bladfotosynthese, de bladreflectie, de -transmissie en de -absorptie en de lichtverdeling in het gewas gemeten. De metingen zijn uitgevoerd aan tomaat en roos.

Wintertomaat onder SON-T belichting



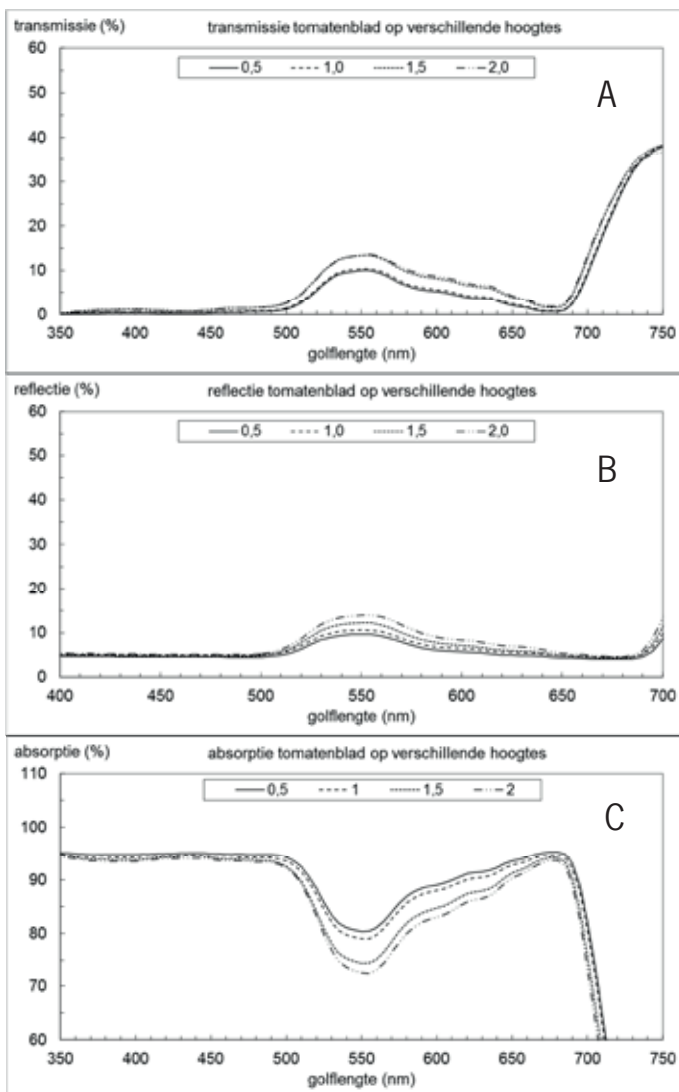
Figuur 5.1. Het spectrum van de kwantumefficiëntie van de fotosynthese van tomaat (cv Komeett) op drie verschillende gewashoogtes 50, 100 en 150 cm onder de kop van het gewas. Metingen aan gewas geteeld onder SON-T belichting in Improvement Centre op 9 en 10 februari 2009.



Figuur 5.2. Gemeten transmissie (A), reflectie (B) en berekende absorptie (C) van tomatenbladeren (cv Komeett) geplukt op verschillende hoogtes in het gewas. Getallen in grafieken geven de afstand (in m) onder de kop van het gewas. Metingen aan gewas geteeld onder SON-T belichting in Improvement Centre op 9 en 10 februari 2009.

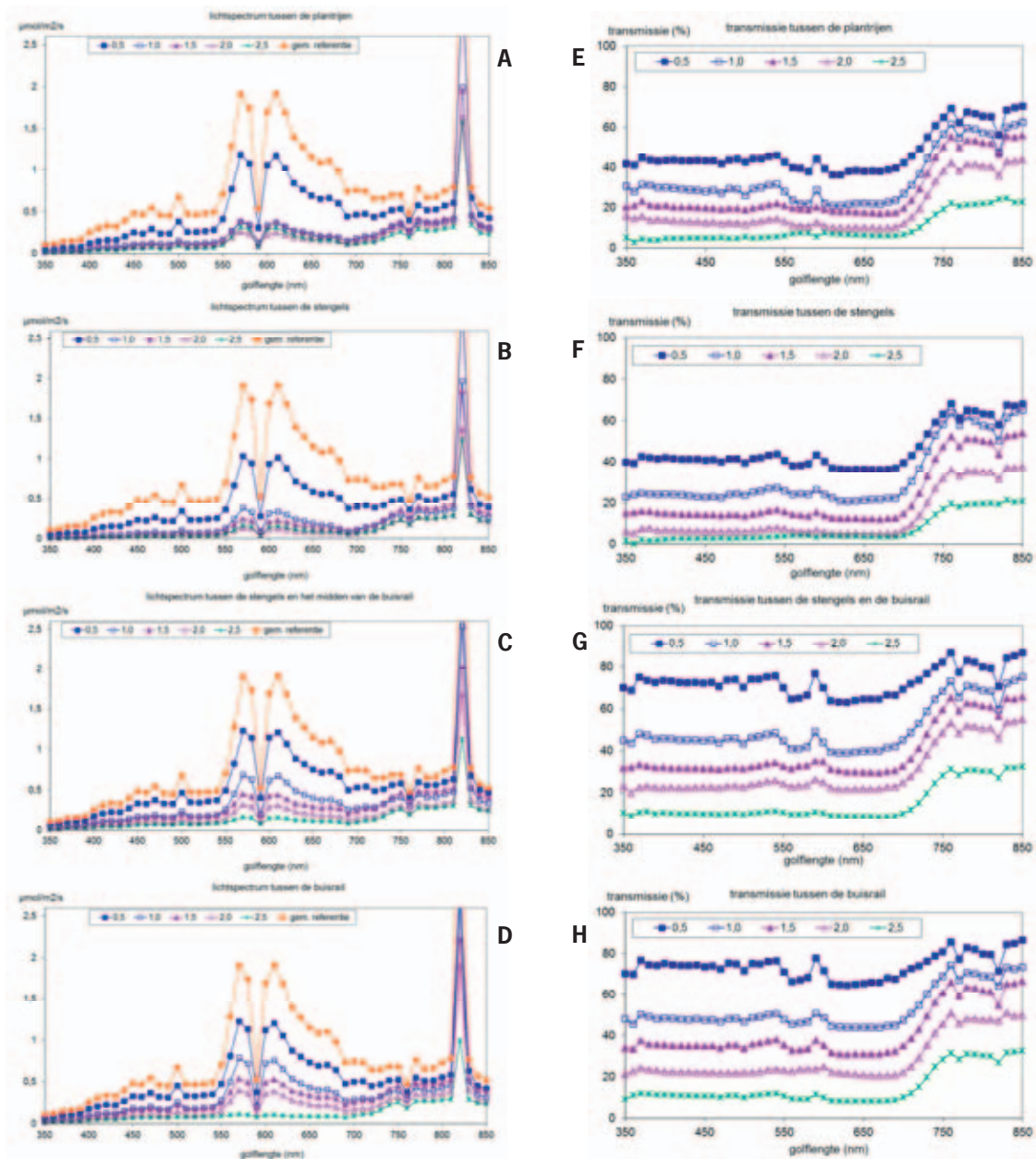
Figuur 5.1. laat zien dat het spectrum van de efficiëntie van de fotosynthese vergelijkbaar is met de eerder in fase 2 gemeten spectra voor tomaat. In het gebied tussen 470nm en 550nm ligt de efficiëntie echter duidelijk hoger dan in de tomaat gemeten in fase 2. Er is geen aantoonbaar verschil in spectrum tussen de bladeren van verschillende leeftijd (bladlaag). Mogelijk zou bij een groter aantal herhalingen wel een klein verschil zichtbaar zijn.

Figuur 5.2. toont de reflectie, transmissie en absorptie van bladeren in het spectrale gebied van 300-2500nm. De resultaten geven aan dat er in het zichtbare gebied verschillen zijn in bladtransmissie, -reflectie en -absorptie (zie ook Figuur 5.3.). Deze gegevens zijn verwerkt bij het berekenen van de kwantumefficiëntie van de fotosynthese op basis van geabsorbeerd licht. In het NIR en IR hebben de bladeren uit de verschillende bladlagen nagenoeg dezelfde optische reflectie, transmissie en absorptie.



Figuur 5.3. De transmissie (A), reflectie (B) en berekende absorptie (C) van Figuur 5.2 maar nu uitgezet van 400-700nm.

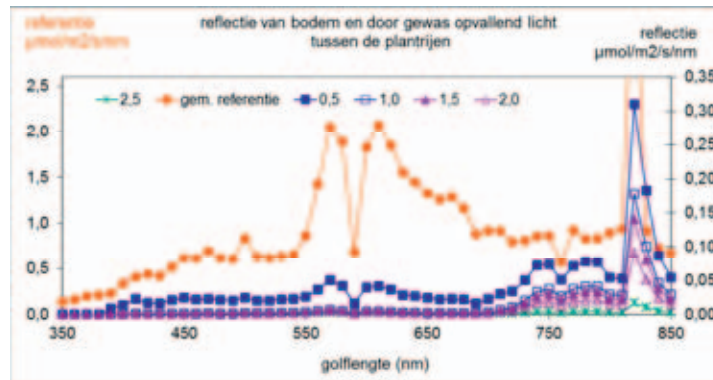
Figuur 5.4. geeft een beeld van de lichtverdeling in het gewas en de daaruit berekende transmissie van de verschillende bladlagen. Het lichtspectrum (links) is opgebouwd uit 2 onderdelen: i) het heel brede spectrum van de zon (350 - 850nm) en ii) het karakteristieke spectrum van de SON-T lamp met 2 pieken in het geel-oranje gebied en een sterke piek in het NIR (820nm). Uit de berekende transmissies valt af te leiden dat in het gebied tussen 400nm en 700nm het licht gelijkmatig doorgelaten wordt. In het midden van de goot en tussen de stengels absorbeert het gewas het sterkst en neemt de lichtintensiteit het sterkst af dieper in het gewas. In het midden van het pad tussen de buisrails is de afname van de lichtintensiteit minder en dringt het licht dieper door in het gewas.



Figuur 5.4. Het lichtspectrum (A t/m D) gemeten op vier verschillende gewashoogtes 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 en 2.5m onder de kop van het gewas. De sensor stond tussen de plantrijen (A), tussen de stengels (B), tussen de stengels en de buisrail (C) en midden boven het pad (D). Rechts (E t/m H) staan de uit de lichtspectra berekende transmissies van de gewaslagen 0-0.5, 0-1.0, 0-1.5, 0-2.0 en 0-2.5m. Metingen uitgevoerd aan tomaat (cv Komeett) gewas onder SON-T belichting in het Improvement Centre op 28 en 29 januari 2009.

Tussen de stengels (Figuur 5.4F.) laat de bovenste 50cm van het gewas ongeveer 40% van het licht door. In het midden van het pad (Figuur 5.4H.), midden tussen de buisrails is 50cm onder de kop nog ruim 70% van het licht over. Op 2,5m onder de kop van het gewas is midden in het pad nog ongeveer 10% van het licht over. Tussen de stengels is dat minder dan 5%. Boven de 700nm neemt de transmissie van het gewas sterk toe. Dat uit zich in de lichtspectra die onder in het gewas een toenemende hoeveelheid verrood licht bevatten. Dat betekent dat dieper in het gewas de rood/verrood verhouding afneemt (zie ook Figuur 5.11.).

Het gewas reflecteert weinig licht. Figuur 5.5. laat zien dat tussen de plantrijen op 50 centimeter onder de kop het er weinig licht omhoog gereflecteerd wordt (let op verschil in schaal van de twee y-assen). Ten opzichte van het boven het gewas opvallende licht (referentie) bedraagt de reflectie 2-4% in het zichtbare gebied. Dit is lager dan de gemeten bladreflectie (Figuur 5.2. en Figuur 5.3B.). In het NIR (750nm) is de reflectie aanzienlijk hoger, maar nog steeds laag. Dat heeft te maken met het feit dat de referentiesensor op een vaste positie boven het pad staat en onder de lamp. Dat leidt tot een overschatting van het opvallende licht en daardoor tot een onderschatting van het procentueel gereflecteerde licht.



Figuur 5.5. Het spectrum van het door gewas en bodem gereflecteerde licht gemeten op vier verschillende . gewashoogtes 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 en 2.5m onder de kop van het gewas. De sensor stond tussen de plantrijen. Metingen uitgevoerd aan tomaat (cv Komeett) gewas onder SON-T belichting in het Improvement Centre op 28 en 29 januari 2009.

Conclusies tomaat wintergewas

Spectrum fotosynthese

- Spectrum fotosynthese is grotendeels vergelijkbaar met spectrum uit fase 2 behalve tussen 470nm en 550nm. Daar liggen de waarden hoger dan in fase 2.
- Er zijn geen aantoonbare verschillen in spectrum tussen bladeren op 0.5, 1.0 en 1.5m van de kop van het gewas (Figuur 5.1.).

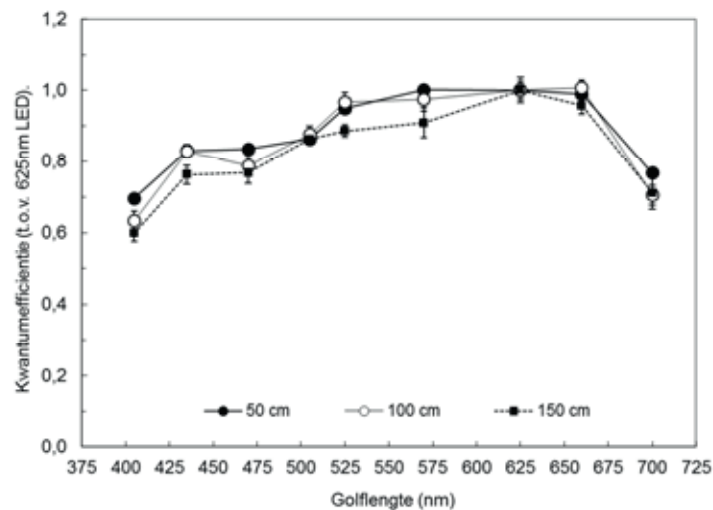
Bladreflectie, -transmissie en -absorptie

- In het zichtbare gebied zijn er significante verschillen tussen bladeren afkomstig van verschillende lagen in het gewas (Figuur 5.2C. en 5.3C.). Dat wijst op een lager chlorofylgehalte bij oudere bladeren (minder lichtabsorptie).
- In het NIR en IR zijn er geen significante verschillen tussen bladeren afkomstig van verschillende lagen in het gewas (Figuur 5.3C.).

Lichtverdeling in het gewas

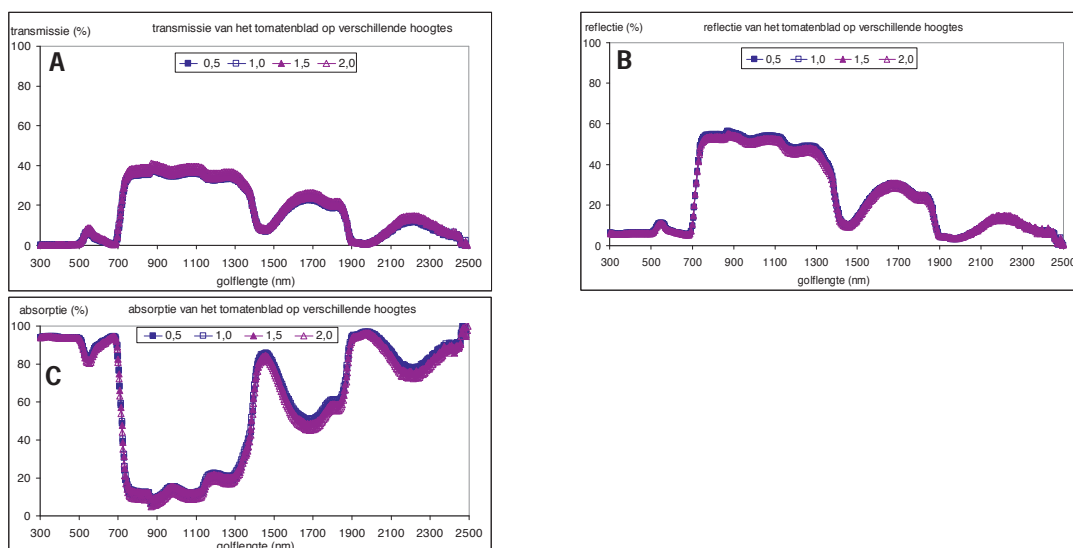
- In het PAR gebied (400 - 700nm) neemt de intensiteit wel af dieper in het gewas, maar verandert het lightspectrum niet (Figuur 5.4.).
- Boven de 700nm absorbeert het gewas minder en neemt het aandeel van het licht boven de 700nm toe.
- De reflectie van het gewas is laag (Figuur 5.5.).

Zomertomaat onbelicht

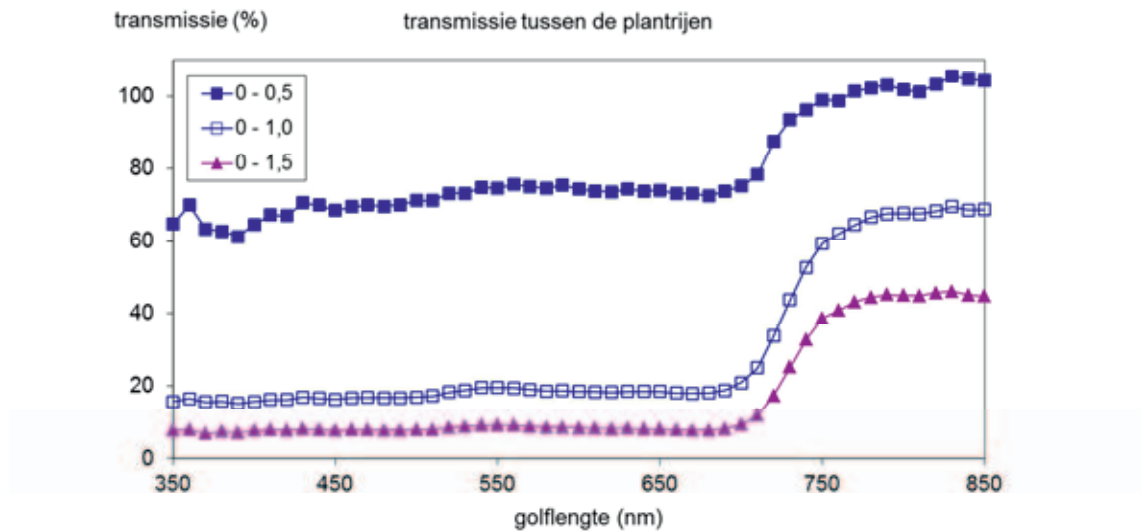


Figuur 5.6. Het spectrum van de kwantumefficiëntie van de fotosynthese van onbelichte tomaat (cv Capricia) op drie verschillende gewashoogtes 50, 100 en 150 cm onder de kop van het gewas. Metingen aan gewas in Improvement Centre op 11 en 12 juni 2009.

De metingen van de belichte tomaat in het Improvement Centre in januari zijn in juni herhaald. Op dat moment was de SON-T belichting 6 weken gestopt. Figuur 5.6. laat zien dat er bij cultivar Capricia geen verschil is tussen het spectrum van de fotosynthese bij bladeren die zich op 50cm en 100cm van de kop bevinden. Bij de oude bladeren, op 150cm van de kop, is de efficiëntie van de fotosynthese iets lager in het groengele deel van het lichtspectrum. Figuur 5.7. geeft de transmissie, reflectie en absorptie van bladeren van verschillende leeftijd geplukt op verschillende hoogtes in het gewas (cv Capricia). Er is geen noemenswaardig effect van bladleeftijd op transmissie, reflectie en absorptie in het gebied tussen 300 en 2500nm. Figuur 5.8. geeft de transmissie van het gewas, gemeten tussen de plantrijen. Ook hier zien we dat het gewas tussen 400nm en 700nm dezelfde absorptie vertoont en boven de 700nm minder absorbeert.



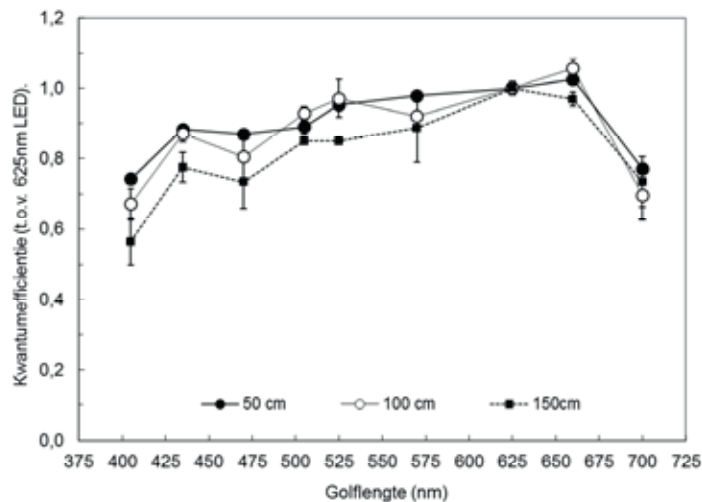
Figuur 5.7. Gemeten transmissie (A), reflectie (B) en de berekende absorptie (C) van de bladeren (tomaat cv Capricia) verzameld op verschillende hoogtes in het gewas (Figuur 5.6.). Getallen in grafieken geven de positie in het gewas (in m) onder de kop van het gewas.



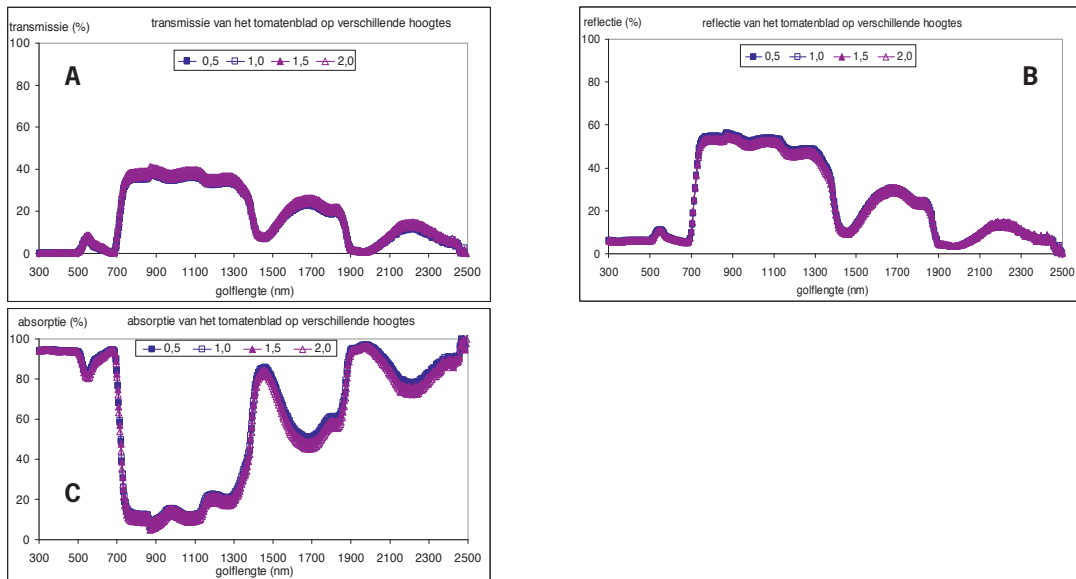
Figuur 5.8. Berekende transmissies van de gewaslagen 0-50, 0-100 en 0-150cm. Berekeningen uitgevoerd aan metingen lichtspectrum (niet getoond) aan onbelichte tomaat (cv Capricia) in het Improvement Centre van 8 - 11 juni 2009.

Figuur 5.9., 5.10. en 5.11. geven de metingen aan cultivar Komeett. Het spectrum van de fotosynthese lijkt sterk op dat van Capricia. Bij Komeett lijken de oudste bladeren een iets lagere efficiëntie te hebben. Bladreflectie, bladtransmissie en bladabsorptie zijn vergelijkbaar met die bij Capricia. Beide spectra lijken sterk op die van Komeett in januari.

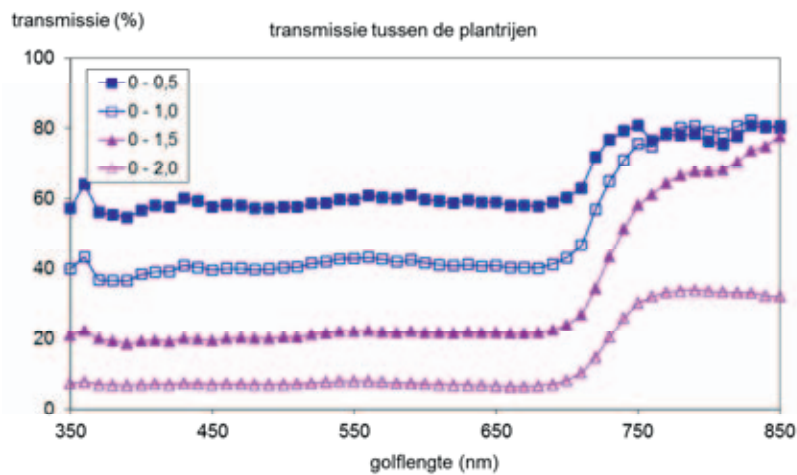
Figuur 5.12. geeft de blauw-rood en de rood-verrood verhoudingen gemeten in het gewas als functie van de lichtintensiteit (PAR) op dezelfde plek in het gewas. De lichtintensiteit hangt af van zowel de plek in het gewas als de intensiteit van het opvallend licht. Toch is duidelijk te zien de blauw-rood verhouding in het gewas tamelijk constant is en rond de 0.8 schommelt. De rood-verrood verhouding neemt sterk af bij lage PAR (dieper in het gewas).



Figuur 5.9. Het spectrum van de kwantumefficiëntie van de fotosynthese van onbelichte tomaat (cv Komeett) op drie verschillende gewashoogtes 50, 100 en 150 cm onder de kop van het gewas. Metingen aan gewas in Improvement Centre op 11 en 12 juni 2009. Het gewas was tot 6 weken voor de meting belicht met SON-T.



Figuur 5.10. Gemeten transmissie (A), reflectie (B) en de berekende absorptie (C) van de bladeren (tomaat cv Komeett) verzameld op verschillende hoogtes in het gewas (fig.5.9). Getallen in grafieken geven de positie in het gewas (in m) onder de kop van het gewas.



Figuur 5.11. Berekende transmissies van de gewaslagen 0-50, 0-100 en 0-150cm. Berekeningen uitgevoerd aan metingen lichtspectrum (niet getoond) aan onbelichte tomaat (cv Komeett) in het Improvement Centre van 8 - 11 juni 2009.

Conclusies tomaat zomergewas

Spectrum fotosynthese

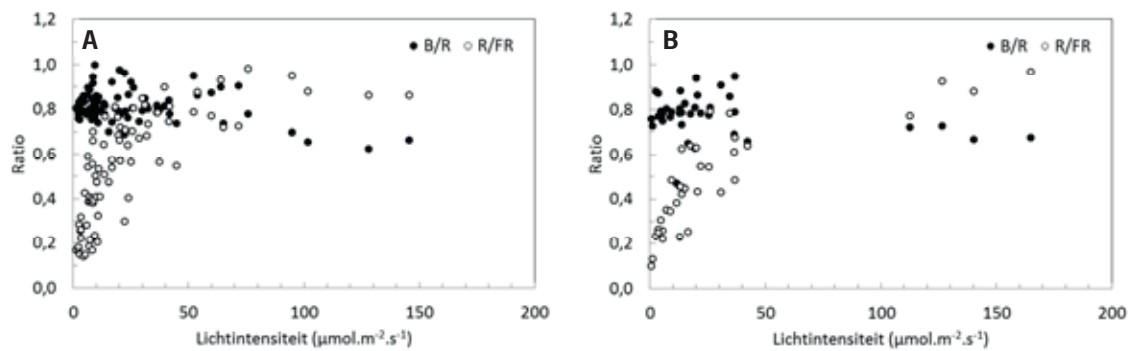
- Het spectrum van de fotosynthese in Capricia en Komeett in juni is vergelijkbaar met het spectrum van Komeett in januari (Figuren 5.6, 5.9 en 5.1).

Lichtreflectie, -transmissie en -absorptie van bladeren (Figuren. 5.2, 5.7 en 5.10)

- In het zichtbare gebied zijn er kleine verschillen tussen bladeren afkomstig van verschillende lagen in het gewas.
- In het NIR zijn er geen significante verschillen tussen bladeren afkomstig van verschillende lagen in het gewas.

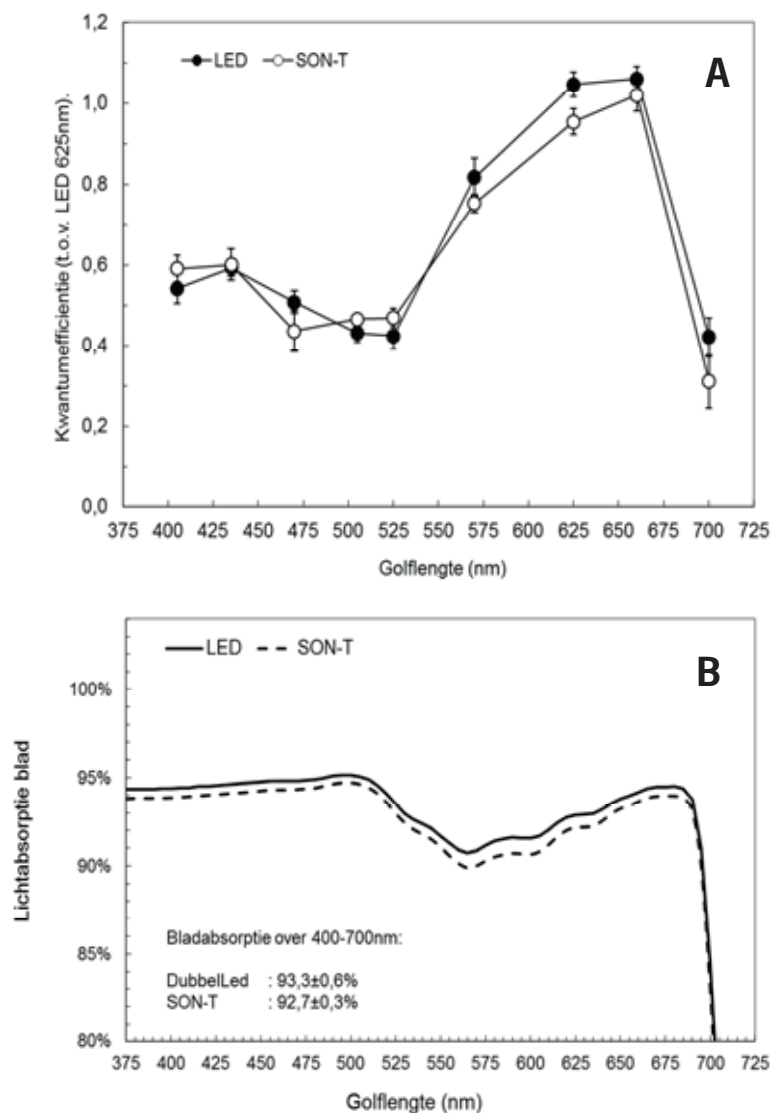
Lichtverdeling in het gewas

- In het PAR gebied (400 - 700nm) absorbeert het gewas bij elke golflengte ongeveer evenveel licht (Figuren 5.8 en 5.11).
- Boven de 700nm absorbeert het gewas minder en neemt het aandeel van het licht boven de 700nm toe (Figuren 5.8, 5.11 en 5.12).
- De rood-verrood verhouding in het gewas neemt daardoor af (Figuur 5.12.).
- De blauw-rood verhouding in het gewas is constant (Figuur 5.12.).



Figuur 5.12. Blauw/rood (dichte symbolen) en rood/verrood (open symbolen) verhouding als functie van de lichtintensiteit in het gewas. A Komeett; B Capricia. Van de spectrale metingen tussen de stengels en in het midden van het pad zijn de rood-verrood en de blauw-rood verhouding zijn bepaald en uitgedrukt als fractie.

Roos onder SON-T en LED belichting



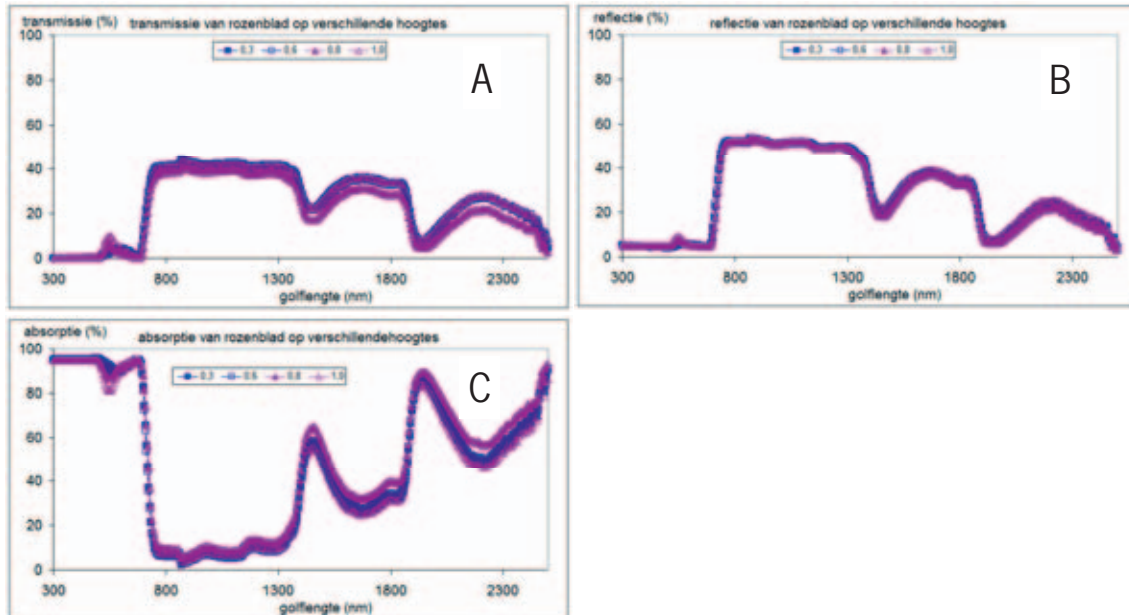
Figuur 5.13. Spectrum van de kwantumefficiëntie van de fotosynthese (A) en de lichtabsorptie door het blad (B) van roos cv Prestige onder LED en onder SON-T belichting. Metingen in april uitgevoerd bij LED proef Zuurbier Rozen.

Bij roos zijn metingen uitgevoerd aan cultivar Prestige die onder SON-T en onder LED werd geteeld.

Figuur 5.13. geeft de spectra van de bladfotosynthese en de bladabsorptie van de twee behandelingen. De efficiëntie van de bladfotosynthese is in het rode gebied iets hoger bij de LED belichting dan bij de SON-T belichting. Verder zijn de spectra nagenoeg gelijk. De bladabsorptie bij de LED behandeling lijkt ook iets hoger te zijn, maar het verschil is niet significant.

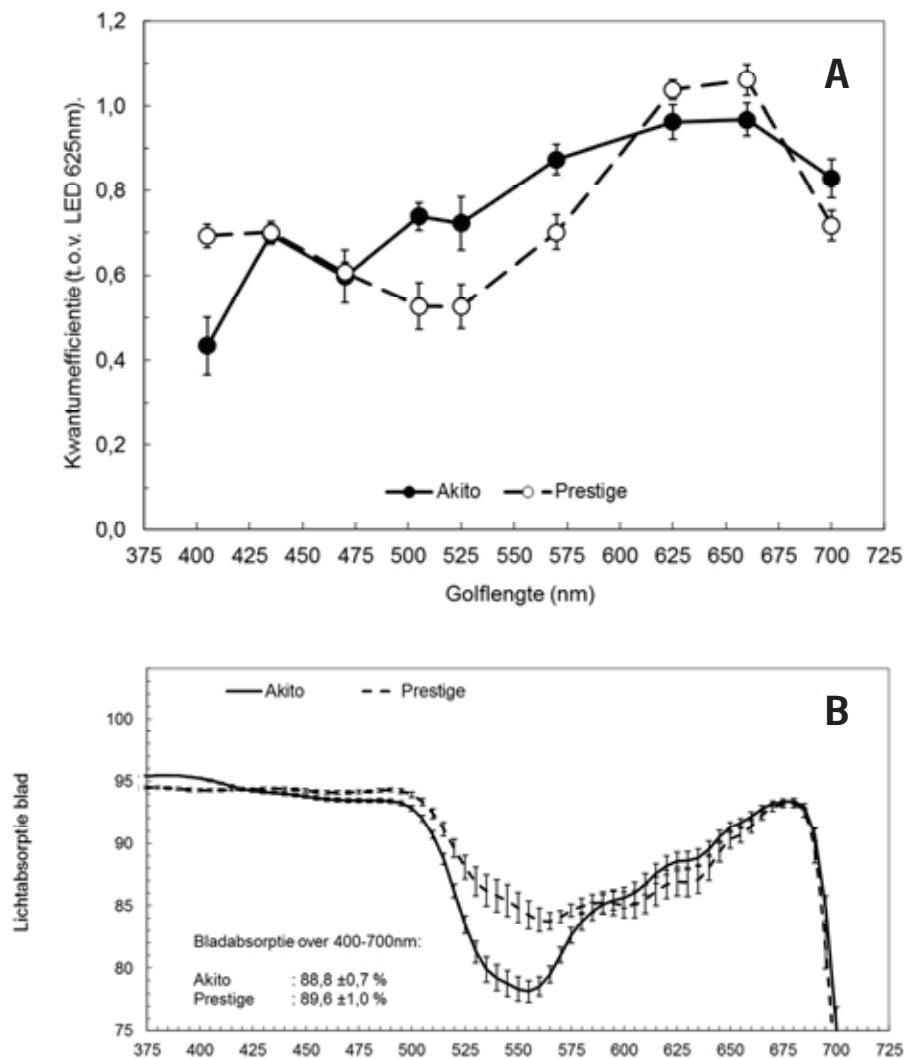
Figuur 5.14. toont transmissie, reflectie en absorptie van bladeren geplukt op verschillende hoogten in het gewas. Jonge bladeren hebben lagere transmissie en reflectie tussen 500 en 600nm en daardoor een hogere lichtabsorptie dan oude bladeren. In het NIR zijn er verschillen, maar er is geen duidelijke correlatie met de leeftijd van het blad.

In fase 2 is bij komkommer gevonden dat opkweek in een klimaatkamer onder rode LED belichting tot een afwijkend spectrum van de fotosynthese leidt, maar een combinatie van rood/blauw (70%/30%) niet. In de proef met LED belichting bij Zuurbier is gewerkt met een veel lager aandeel blauw. Toch is dat aandeel blauw waarschijnlijk voldoende geweest, omdat er geen sprake is van een lagere efficiëntie van de fotosynthese bij 660nm.



Figuur 5.14. Gemeten transmissie (A), reflectie (B) en de berekende absorptie (C) van de bladeren (roos cv Prestige) verzameld op verschillende hoogtes in het gewas. Getallen in grafieken geven de positie in het gewas (in m) onder de kop van het gewas.

Vergelijking cultivars Akito en Prestige



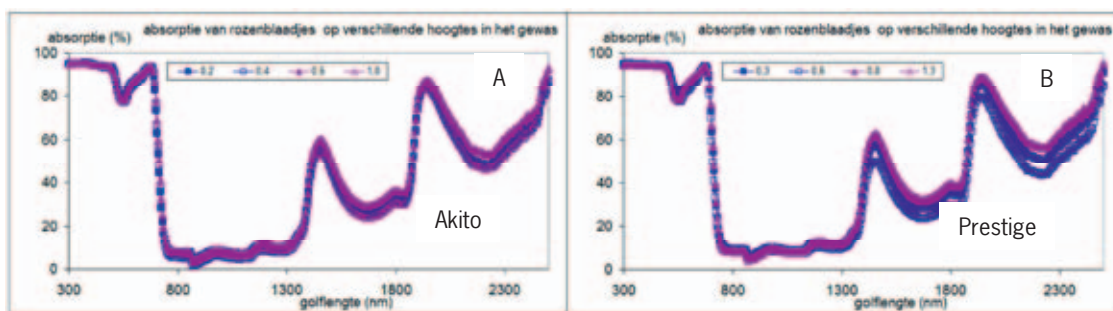
Figuur 5.15. Spectrum van de kwantumefficiëntie van de fotosynthese (A) en de lichtabsorptie door het blad (B) van roos cv Prestige en cv Akito opgevoed bij Van Kleef Roses zonder groeilicht.

Figuur 5.15. geeft het spectrum van de bladfotosynthese en de bladabsorptie van de cultivars Prestige en Akito. Het roedere blad van cultivar Prestige vertoont een duidelijk lagere efficiëntie in het groengele gebied dan het wat groenere blad van Akito. Ondanks de verschillen in kleur is de bladabsorptie van de twee cultivars niet significant verschillend. De bladeren absorberen dus evenveel licht. De anthocyanen absorberen wel licht, maar dat resulteert niet in fotosynthese.

Aan cultivars Akito en Prestige zijn ook reflectie en transmissie (300 – 2500nm) gemeten aan bladeren op verschillende hoogten in het gewas. Hieruit is de bladabsorptie bepaald (Figuur 5.16.). Bij Akito zijn er geen duidelijke verschillen tussen bladeren van verschillende fysiologische leeftijd. Bij Prestige absorberen de oudere bladeren meer licht in het NIR gebied. Dit wordt veroorzaakt doordat de oudere bladeren minder licht reflecteren dan de jongere bladeren.

Lichtverdeling in het gewas

De lichtverdeling in het gewas bleek lastig te meten bij roos. Dat heeft te maken met de complexere gewasarchitectuur en de kleine afstand tussen de rijen waardoor er veel beschaduwing optrad en veel variatie in de meetresultaten. Bovendien viel tijdens de metingen de referentiesensor boven het gewas regelmatig uit. Dat betekent dat er geen betrouwbare resultaten zijn over lichttransmissie en lichtonderschepping in het gewas bij roos.



Figuur 5.16. Gemeten transmissie (A), reflectie (B) en de berekende absorptie (C) van de bladeren (roos cv Prestige) verzameld op verschillende hoogtes in het gewas. Getallen in grafieken geven de positie in het gewas (in m) onder de kop van het gewas.

Toch valt er wel iets te zeggen over de lichtverdeling bij roos. Figuur 5.17A. laat een meting van het lichtspectrum in het gewas zien voor cultivar Akito. De spectra bij de knop (0m) en op 20cm onder de knop (0,2m) zien er vergelijkbaar uit. Op 1m onder de knop is het spectrum volledig anders. In het PAR deel van het spectrum (400-700 nm) wordt veel meer licht geabsorbeerd dan in het NIR (>700 nm). Dat uit zich ook in de transmissie van de verschillende lagen (Figuur 5.17B.): boven de 700 nm neemt de transmissie van het gewas sterk toe. Ook hier is er weinig verschil in transmissie tussen 550 nm (groen), 650 nm (rood) en 450 nm (blauw).

Conclusies Roos

Spectrum fotosynthese

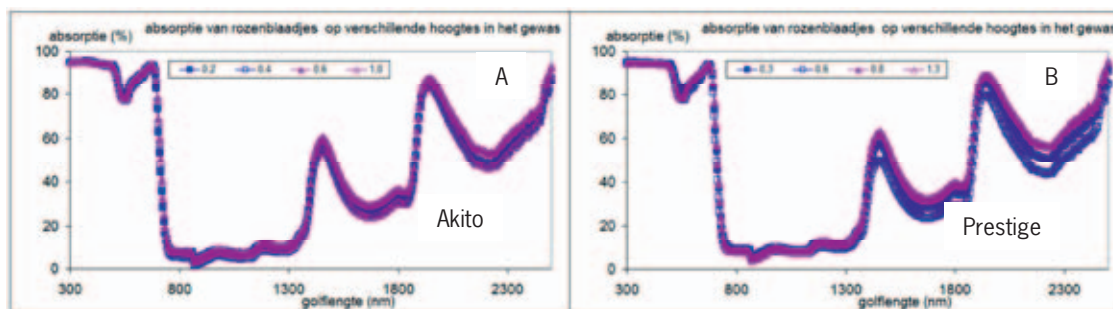
- De efficiëntie van de bladfotosynthese is bij cultivar Prestige iets hoger onder LED belichting ten opzichte van SON-T (Figuur 5.13.).
- Cultivar Akito heeft in het groengele gebied een hogere en in het rode gebied een lagere efficiëntie dan cultivar Prestige (Figuur 5.15.).

Bladreflectie, -transmissie en -absorptie

- Er is een effect van de leeftijd van het blad. In maart absorberen jonge Prestige bladeren onder LED belichting meer PAR licht dan oude bladeren (Figuur 5.14C.). In mei, bij een onbelichte teelt, is er geen verschil tussen jonge en oude bladeren bij zowel Akito als bij Prestige (Figuur 5.16.).
- Akito en Prestige geteeld zonder groeilicht vertonen in mei duidelijke verschillen in lichtabsorptie in het groengele (500-600nm) deel van het spectrum. De lichtabsorptie over het PAR gebied (400-700nm) is echter gelijk bij de twee cultivars (Fig.5.15B.).

Lichtverdeling in het gewas

- De lichtverdeling in het gewas bij roos is complexer dan bij tomaat. Mede door uitval meetapparatuur is geen betrouwbare uitspraak te doen over spectrale lichtverdeling bij roos. Eén van de gelukte metingen (Figuur 5.17.) laat zien dat ook bij roos de spectrale lichtverdeling en de lichtabsorptie in het PAR niet erg variëren midden tussen de buisrails.



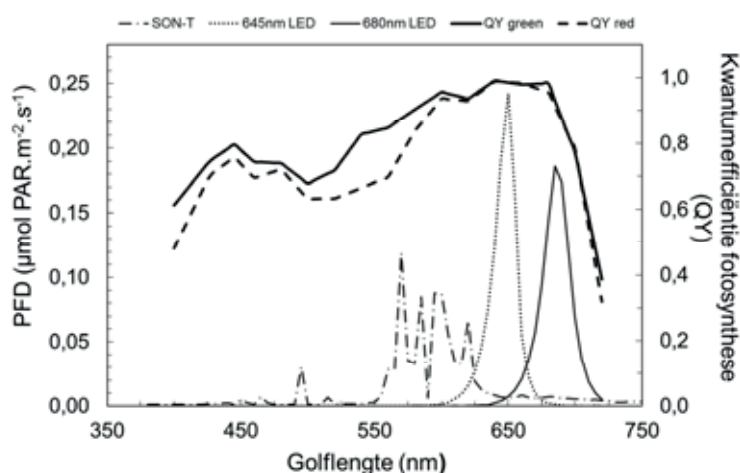
Figuur 5.17. Lichtspectrum in het pad midden tussen de buisrails (A) en de lichttransmissie van het gewas (B) van cv Akito opgekweekt in de demokas bij Van Kleef Roses in mei 2009. In A geven de cijfers in de legende de afstand tot de kop van het gewas weer in meters; in B geven de cijfers de betreffende laagdikte weer.

6 Schatting efficiëntie groeilicht

Op basis van de gemeten spectra van de efficiëntie van de fotosynthese kunnen we de efficiëntie van belichting van verschillende kleuren groeilicht schatten. Daarvoor moet het spectrum van het uitgezonden licht bekend zijn. Van een 400W SON-T lamp en twee typen LED (645nm en 680nm) zijn de spectra bepaald. In het volgende zullen voor roos en tomaat een aantal rekenvoorbeelden uitgewerkt worden.

Roos

Akito uit fase 2



Figuur 6.1. Genormaliseerde spectra van de gebruikte SON-T en LED lichtbronnen en het spectrum van de kwantumefficiëntie van de bladfotosynthese van groen en rood blad van de metingen aan cultivar Akito uit fase 2.

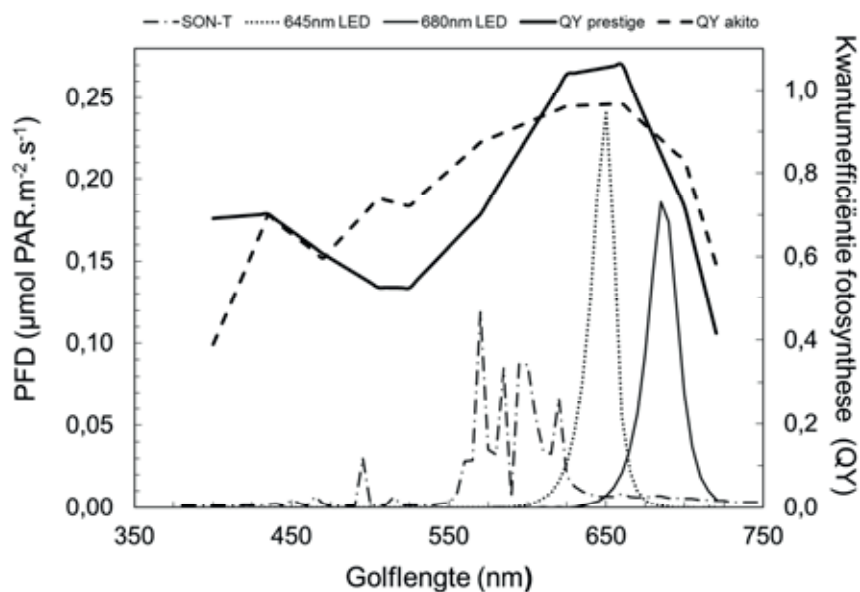
Figuur 6.1. toont de spectra van de efficiëntie van de fotosynthese (QY) van de twee bladtypen van Akito uit fase 2 en de spectra van de betreffende lampen. Uit de spectra van de efficiëntie van de fotosynthese en de spectrale samenstelling van het lamplicht is de potentiële bladfotosynthese van de verschillende blad type/belichtingstype combinaties berekend. Tabel 6.1. geeft het resultaat.

Tabel 6.1. Toename in potentiële bladfotosynthese voor twee typen LED ten opzichte van SON-T. Potentiële bladfotosynthese is berekend uit de gemeten spectra QY Akito fase 2 en de spectrale verdeling van het lamplicht. Voor elk type blad is de waarde bij SON-T als referentie genomen. Het verschil tussen LED en SON-T is berekend als $100 \times (LED - SON-T)/SON-T$.

Spectrum lichtbron:	SON-T		645nm LED		680nm LED	
Type blad:	Groen	Rood	Groen	Rood	Groen	Rood
PFD x QY (400-720nm)	0,84	0,80	0,98	0,98	0,89	0,88
Toename t.o.v. groen blad met SON-T (%)	0		16,1		5,7	
Toename t.o.v. rood blad met SON-T (%)		0		22,6		10,2

Het valt op dat onder SON-T licht rood blad minder fotosynthese heeft dan groen blad. Bij de LED belichting is dat verschil verdwenen. De 645nm LED leidt potentieel tot de grootste toename in bladfotosynthese.

Bovenstaande getallen geven potentiële toenames. Of de plant deze hogere fotosynthese ook kan realiseren is nog maar de vraag. De bladtemperatuur is waarschijnlijk wat lager onder LED belichting. Dat kan tot limitaties in zowel source als sink leiden. Negatieve terugkoppeling kan dan de toename in bladfotosynthese onderdrukken.



Figuur 6.2. Genormaliseerde spectra van de gebruikte SON-T en LED lichtbronnen en het spectrum van de kwantumefficiëntie (QY) van de bladfotosynthese van cultivars Akito en Prestige uit fase 3.

Opschaling naar gewasniveau

Paradiso *et al.* (2011) hebben modelberekeningen uitgevoerd om, op basis van de gemeten spectra van de bladfotosynthese (Figuur 4.1.), het spectrum van de gewasfotosynthese te kunnen schatten. Zij kwamen tot de conclusie dat het spectrum van de gewasfotosynthese op basis van opvallend licht sterk lijkt op het spectrum van de bladfotosynthese op basis van geabsorbeerd licht. Dat wordt veroorzaakt door het feit dat bij fotosynthese op basis van opvallend licht het licht dat niet door het blad geabsorbeerd niet meetelt. Op gewasniveau wordt het doorgelaten licht wel geabsorbeerd dieper in het gewas.

Conclusie

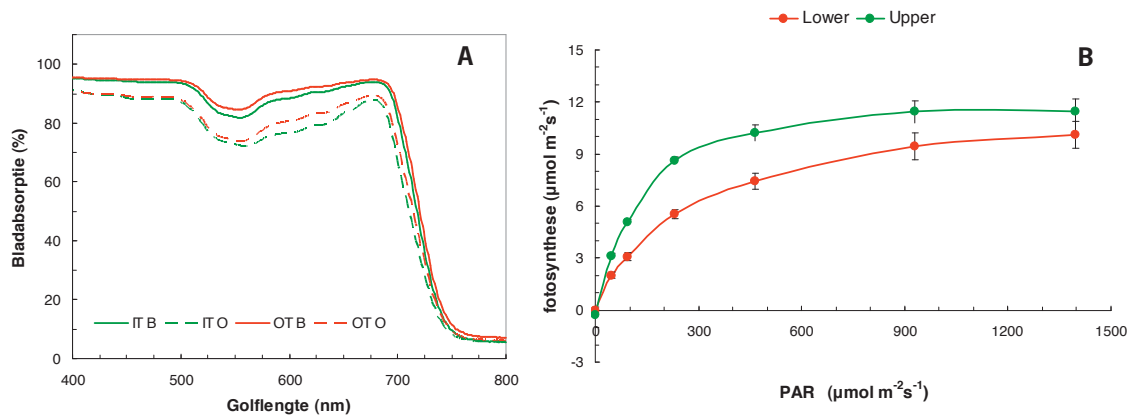
- Bij groen Akito blad levert 1 µmol licht 645nm LED licht 16% meer bladfotosynthese op dan 1 µmol SON-T licht.
- Bij het iets rodere Akito blad is de toename in potentiële bladfotosynthese met ruim 22% zelfs nog groter.
- Licht van de 680nm LED doet het iets beter dan SON-T licht, maar duidelijk minder goed dan het licht van de 645nm LED.

Cultivars Akito en Prestige uit fase 3

Tabel 6.2. Berekende bladfotosynthese uit gemeten QY van cultivars Prestige en Akito uit fase 3 en de spectrale verdeling van SON-T en twee typen LED groeilicht.

Spectrum lichtbron:	SON-T		645nm LED		680nm LED	
Cultivar:	Akito	Prestige	Akito	Prestige	Akito	Prestige
PFD x QY (400-720nm)	0,83	0,77	0,96	1,05	0,87	0,84
Toename t.o.v. Akito (%)	0	-7,2	15,8	25,8	5,1	0,9
Toename t.o.v. Prestige (%)	7,8	0	24,8	35,6	13,3	8,7

Onder SON-T licht heeft het rodere blad van Prestige een lagere fotosynthese dan het groenere blad van Akito. Bij de 645 nm LED is het rodere Prestige blad juist iets efficiënter dan het groenere Akito blad.



Figuur 6.3. A Bladabsorptie van ingebogen (IT) en opgaande tak (OT) gemeten aan boven- (IT B resp. OT B) en onderzijde (IT O resp. OT O) blad. B Lichtafhankelijkheid van de fotosynthese voor een rood 5-blad van een opgaande tak (middelste bladlaag) van roos (cv Akito). Het licht tijdens de fotosynthesemeting in B was LED-licht van 660nm (>90%) en 470nm (<10%). De data zijn het gemiddelde van 4 bladeren van verschillende planten.

Conclusie Roos

- Bij Akito levert 1 µmol licht van de 645nm LED 16% meer fotosynthese op dan 1 µmol SON-T licht. Dit resultaat is vergelijkbaar met het resultaat van Akito uit fase 2.
- Bij Prestige (veel roder dan "rood" blad van Akito) levert 1 µmol licht van de 645nm LED 35% meer fotosynthese op dan 1 µmol SON-T licht.
- Licht van de 680nm LED doet het iets beter dan SON-T licht, maar duidelijk minder dan het licht van de 645nm LED.
- Het spectrum van de kwantumefficiëntie bladfotosynthese op basis van geabsorbeerd licht is een goede maat voor het spectrum van de kwantumefficiëntie van de gewasfotosynthese.

Vergelijking onder- en bovenzijde blad bij Akito

In fase 2 zijn verschillen gevonden tussen bladeren van verschillende leeftijd. Bij die metingen is echter telkens alleen gekeken naar belichting van bovenaf. Op het oog is al duidelijk te zien dat de boven- en onderzijde van eenzelfde blad duidelijk verschillen in reflectie. Dit is kwantitatief gemaakt door reflectie- en transmissiemetingen. Figuur 6.3A. laat zien dat de bovenzijde van het blad een groter percentage van het opvallende licht absorbeert dan de onderzijde. Dat geldt voor zowel bladeren van de ingebogen tak als van de opgaande stengel.

Om na te gaan of dat ook resulteert in verschillen in fotosynthese, zijn lichtresponsecurves van de fotosynthese gemeten. Hierbij is het blad of van de bovenzijde of van de onderzijde belicht met rood (en een beetje blauw²) licht. In alle gevallen is er meer fotosynthese als er van bovenaf belicht wordt. Bij de bladeren van de opgaande tak zijn verschillen het grootst. De initiële helling van de fotosynthese lichtresponsecurve wordt grotendeels bepaald door de lichtabsorptie. In Figuur 6.3B. is duidelijk te zien dat bij de van de onderzijde belichte bladeren de helling lager ligt. Dat is volgens verwachting gezien de lagere absorptie van de onderzijde van het blad bij 660nm in Figuur 6.3A.

Bij hoge lichtintensiteiten zijn de verschillen in fotosynthese tussen onder- en bovenzijde kleiner. De verschillen zijn tussen 100 en 800 µmol m⁻² s⁻¹ groter dan op basis van de verschillen in lichtabsorptie verwacht mag worden. Dit grote verschil in fotosynthese is mogelijk deels toe te schrijven aan een ongunstige verdeling van de fotosynthese binnen het blad die bij lage lichtintensiteit leidt tot een verlaging van de fotosynthese, maar niet bij verzadigend licht.

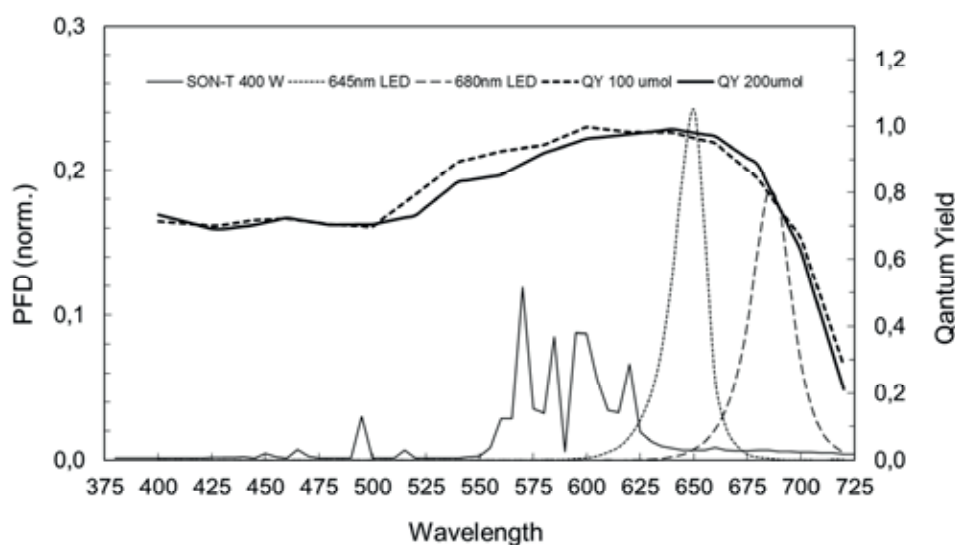
2 Blauw licht is tijdens de meting nodig om de huidmondjes open te houden.

Het verschil in eigenschappen tussen boven- en onderzijde van het blad is belangrijk voor het ontwerpen van systemen voor tussenbelichting en onderbelichting. Bij tussenbelichting zal er in verhouding meer licht bij de onderzijde van het blad terecht komen dan bij de huidige belichting van bovenaf. In hoeverre de onderzijde van het blad zich kan aanpassen aan meer licht is op dit moment nog niet bekend; de verwachting is dat er waarschijnlijk enige aanpassing is. Verschil tussen boven- en onderzijde kan ook een (kleine) rol spelen in een relatief open gewas als synchroon geteelde roos, waar meer opwaartse, gereflecteerde straling is dan bij bv. tomaat. In modelberekeningen zal met deze verschillen in eigenschappen van onder- en bovenzijde van het gewas rekening gehouden moeten worden.

Tomaat

Voor tomaat is de berekening uitgevoerd voor spectra gemeten in fase 2 en in fase 3. Figuur 6.4. laat de spectra zien van de lampen en de fotosynthesemetingen in fase 2. De resultaten van de berekeningen van de bladfotosynthese staan in Tabel 6.3. Ook bij tomaat geeft de 645nm LED met een toename van ruim 15% het beste resultaat. Deze toename is echter wel lager dan bij roos. De 680nm LED doet het bij tomaat slechter dan SON-T. Bij 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ groeilicht zijn de verschillen tussen LED en SON-T groter dan bij 100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Het spectrum van de fotosynthese van tomaat cv Komeett in het Improvement Centre in fase 3 lag vooral in het blauwgroene deel hoger dan in de meting van fase 2. De metingen aan in de kas in fase 3 is daardoor wat vlakker dan in fase 2 en de verwachting is dat het verschil tussen LED en SON-T kleiner wordt. Figuur 6.5. geeft de spectra die voor de berekening van de bladfotosynthese gebruikt zijn en Tabel 6.4 geeft de berekende toename in bladfotosynthese t.o.v. SON-T licht. Zoals verwacht valt de toename van LED licht ten opzichte van SON-T licht lager uit dan in fase 3.



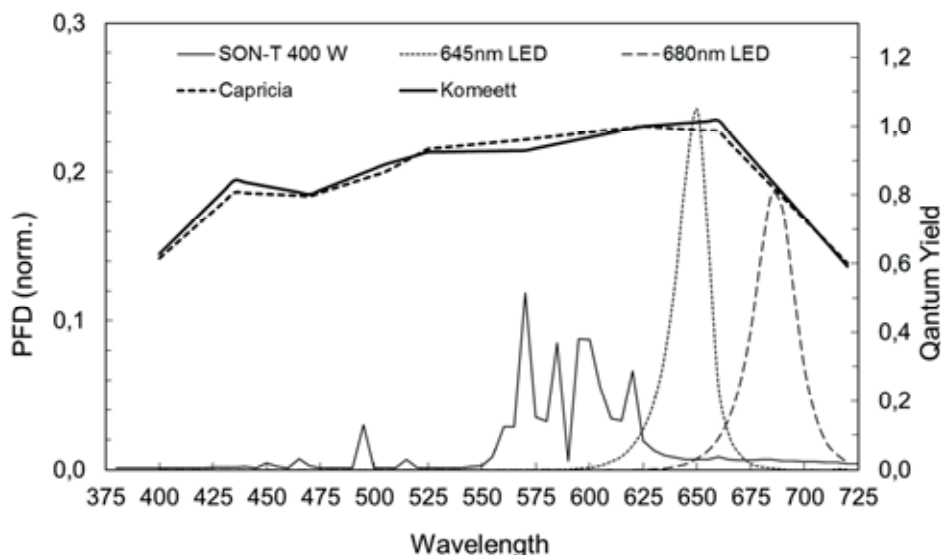
Figuur 6.4. Genormaliseerde spectra van de gebruikte SON-T en LED lichtbronnen en het spectrum van de kwantumefficiëntie (QY) van de bladfotosynthese van tomaat (Trostomaat cv Elegance) uit fase 2 bij 100 (onderbroken lijn) en 200 (doorgetrokken lijn) $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Tabel 6.3 Berekende bladfotosynthese uit gemeten QY van tomaat cultivar Elegance uit fase 2 en de spectrale verdeling van SON-T licht en twee typen LED groeilicht.

Lamp type:	SON-T		645nm LED		680nm LED	
	100 umol	200 umol	100 umol	200 umol	100 umol	200 umol
PFD*QY (400-720nm)	0,87	0,85	0,97	0,98	0,78	0,79
Toename t.o.v. 100umol (%)	0,0%		10,9%		-10,6%	
Toename t.o.v. 200umol (%)		0,0%		15,6%		-7,0%

Tabel 6.4 Berekende bladfotosynthese uit gemeten QY van tomaat cultivars Komeett en Capricia uit fase 3 en de spectrale verdeling van SON-T licht en twee typen LED groeilicht.

Lamp type:	SON-T		645nm LED		680nm LED	
cultivar:	Capricia	Komeett	Capricia	Komeett	Capricia	Komeett
PFD*QY (400-720nm)	0,90	0,88	0,99	1,01	0,82	0,84
Toename t.o.v. SON-T (%)	-	-	10,3%	13,9%	-8,2%	-5,4%



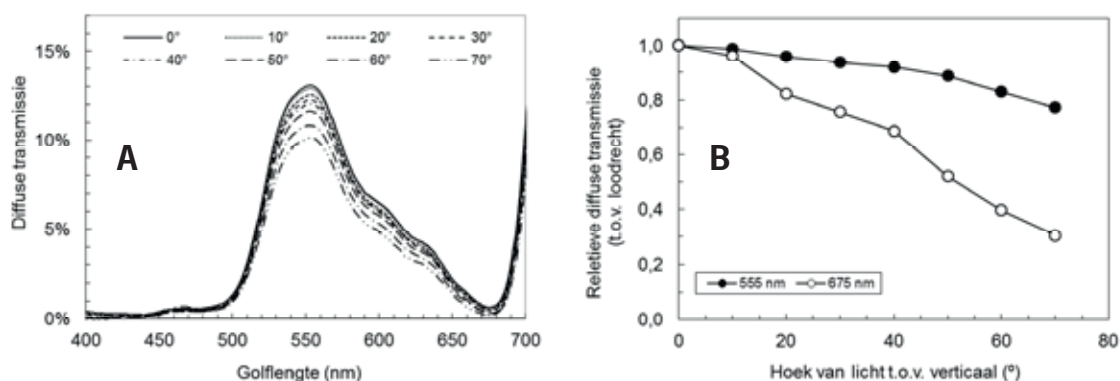
Figuur 6.5. Genormaliseerde spectra van de gebruikte SON-T en LED lichtbronnen en het spectrum van de kwantumefficiëntie (QY) van de bladfotosynthese van zomertomaat (cv's Komeett en Capricia) uit fase 3.

Komkommer

De tot nu toe beschreven spectra van bladreflectie, -transmissie en -fotosynthese zijn gebaseerd op licht dat loodrecht op het blad valt. Reflectie en transmissie van een blad zijn echter afhankelijk van de hoek van inval van het licht. Bovendien is deze hoekafhankelijkheid op zijn beurt weer afhankelijk van de golflengte van het opvallende licht.

Bij een normale teelt met belichting van bovenaf spelen deze eigenschappen waarschijnlijk geen grote rol, maar bij tussenbelichting kan de invalshoek van het groeilicht totaal anders zijn dan die van het zonlicht. Daarom is een verkennend experiment gedaan naar de hoekafhankelijkheid bij komkommer.

Figuur 6.6A. laat zien hoeveel licht er door een blad valt als de hoek van inval gevarieerd wordt. Op het eerste gezicht lijkt het grootste effect op te treden bij groen (555nm) licht. In Figuur 6.6B. is de relatieve verandering in diffuse transmissie uitgezet als functie van de hoek van inval. Dan blijkt bij rood licht de grootste verandering op te treden. Nu is diffuse transmissie niet hetzelfde als fotosynthese. Als de verlaging van de diffuse transmissie bij hoge invalshoeken veroorzaakt zou worden door een toename in reflectie, dan betekent dat ook de fotosynthese evenredig minder zou worden. Mogelijk is de reflectie van het gewas dus hoger dan uit standaard reflectiemetingen afgeleid kan worden. Als deze extra reflectie boven in het gewas plaats vindt, kan een deel daarvan naar buiten verdwijnen en tot minder efficiënte belichting leiden.

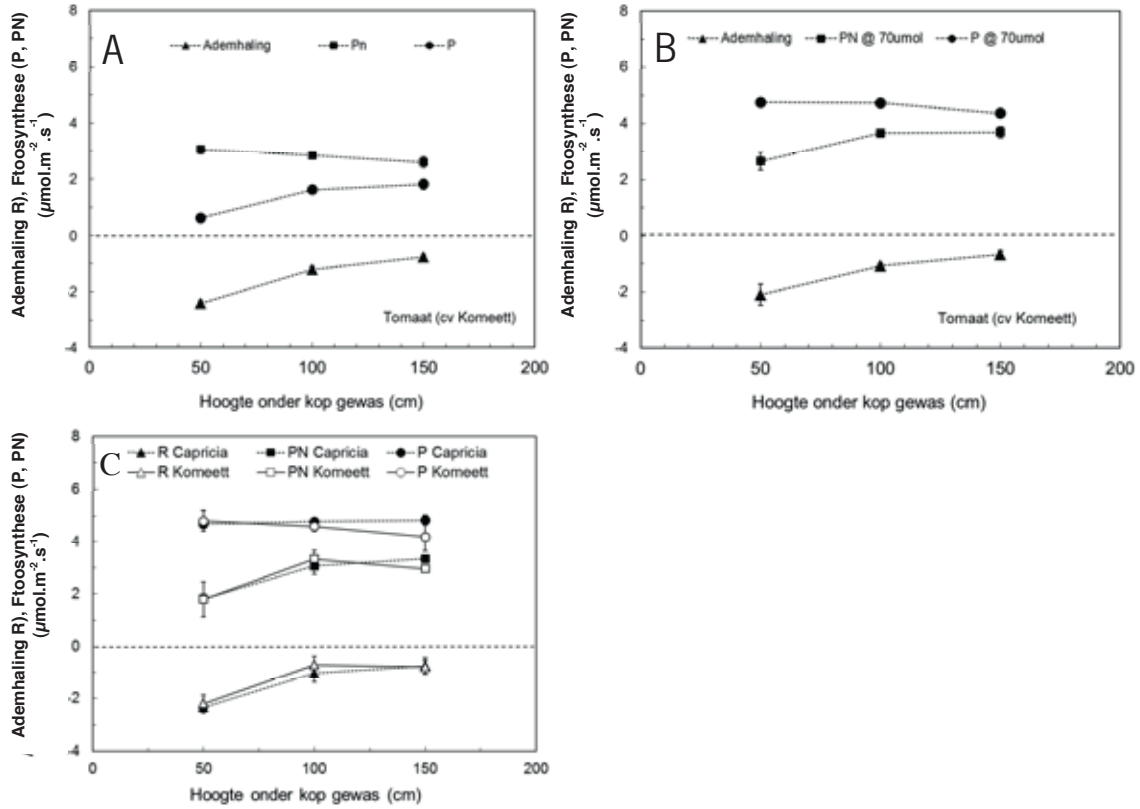


Figuur 6.6. Effect van de hoek van inval van opvallend licht op de diffuse transmissie van een komkommerblad. A Spectra van diffuse transmissie blad bij verschillende invalshoeken (t.o.v. lijn loodrecht op blad) van opvallend licht. B hoekafhankelijkheid diffuse transmissie blad bij groen (555nm) en bij rood (675nm) licht.

Tot slot

Bij de meting van de kwantumefficiëntie van de fotosynthese is naast de controlemeting bij wit licht ook altijd de ademhaling gemeten. Figuur 6.7. geeft de bruto fotosynthese, de ademhaling en de netto fotosynthese (=fotosynthese – ademhaling) van tomatenbladeren van Komeett. De getoonde metingen zijn gedaan in fase 3 in het Improvement Centre in februari, maart en juni. De ademhaling is vergelijkbaar in winter, voorjaar en zomer. De bruto fotosynthese is in de winter laag. In februari is de netto fotosynthese van oudere bladeren daardoor een stuk hoger dan die van jongere bladeren. In juni zijn de metingen uitgevoerd aan cultivar Capricia (Figuur 6.7C.). Uit Figuur 6.7C. blijkt dat de netto fotosynthese, dat wil zeggen de opgenomen CO₂, in beide rassen meer dan 30% lager is in jonge bladeren in de kop van het gewas.

Het is nog niet duidelijk wat dit betekent voor de efficiëntie van groeilicht. Betekent dit dat het beter is om groeilicht niet op de bladeren in de kop van het gewas te richten, maar op de bladeren daaronder? Dan zou de source (assimilaten gevormd in blad) en sink (rijpende tomaat) dicht bij elkaar zitten wat het transport gemakkelijker zou maken. Een nadeel zou kunnen zijn dat bladeren boven in het gewas dan mogelijk te weinig assimilaten aanmaken om een goede groei en ontwikkeling te waarborgen. Experimenteel onderzoek zal dit moeten uitwijzen.



Figuur 6.7. Bruto (P) en netto (PN) bladfotosynthese en -ademhaling (R) van tomaat als functie van de positie van het blad in het gewas. De gegevens komen uit de metingen in de winter (A), het voorjaars (B) en in de zomer (C). In de zomermeting is aan de cultivars Komeett en Capricia gemeten. Alle metingen vonden plaats in het Improvement Centre.

7 Conclusies en aanbevelingen

Laboratoriumexperimenten fase 2

Tomaat

- Het actiespectrum van de fotosynthese van tomaat lijkt sterk op de eerder gepubliceerde spectra van McCree
- In het groene deel van het spectrum absorberen bladeren van planten opgekweekt onder $200 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ meer licht dan van planten opgekweekt onder $100 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (PAR).
- In het groene deel van het spectrum hebben bladeren van planten opgekweekt onder $200 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ een lagere kwantumefficiëntie van de fotosynthese dan bladeren van planten opgekweekt onder $100 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$.
- Het verschilspectrum vertoont een piek rond 560 nm. Dat wijst op de betrokkenheid van anthocyaan.
-

Roos

- Groene bladeren hebben een actiespectrum dat vergelijkbaar is met dat van o.a. McCree (1972).
- In het groene deel van het spectrum absorbeert jonge, roodgroen blad meer licht dan ouder groen blad van dezelfde plant.
- In het groene deel van het spectrum heeft jong, roodgroen blad een veel lagere kwantumefficiëntie van de fotosynthese dan groen blad.
- Het verschilspectrum vertoont ook hier een piek rond 560 nm. Dat wijst op de betrokkenheid van anthocyaan.

Komkommer

- Het actiespectrum komt grotendeels overeen met de curve van McCree met uitzondering van het blauw, waar de kwantumefficiëntie lager uitvalt dan bij McCree.

Praktijkonderzoek fase 3

Tomaat

- De kwantumefficiëntie van de bladfotosynthese gemeten in het Improvement Centre is in het blauwe en groene deel van het spectrum hoger dan gemeten in fase 2 in het laboratorium.
- Er is geen aantoonbaar verschil tussen de kwantumefficiëntie van de fotosynthese van bladeren van verschillende leeftijd (afkomstig uit verschillende bladlagen).
- Er is geen aantoonbaar verschil tussen winter- en zomergewas.
- Er is geen aantoonbaar verschil tussen onbelichte cultivars Komeett en Capricia gemeten in juni.
- Blad op 50cm onder de kop heeft een veel hogere ademhaling dan blad op 100cm of 150cm onder de kop.
- De netto bladfotosynthese t.g.v. een bepaalde hoeveelheid groeilicht is in bladeren in de kop beduidend lager dan in bladeren lager in het gewas.
- Meting van de spectrale lichtverdeling in het gewas laten zien dat de lichtabsorptie door het gewas constant is in het gebied tussen 400nm en 700nm.
- De blauw/rood verhouding in het gewas is op verschillende hoogtes in het gewas gelijk.
- De lichtabsorptie door het gewas tussen 700 en 800nm is lager dan in het zichtbare gebied.
- De rood/verrood verhouding verandert neemt af dieper in het gewas.
- Uit modelberekeningen blijkt dat de kwantumefficiëntie van de bladfotosynthese maximaal 13% hoger is bij belichting met rode LED's dan bij belichting met SON-T ($1 \mu\text{mol } 645\text{nm LED} = 1.13 \mu\text{mol SON-T}$).

Roos

- Rood blad met anthocyaan heeft een duidelijk lagere kwantumefficiëntie van de bladfotosynthese groene deel van het spectrum.
- Cultivars Akito en Prestige vertonen een duidelijk verschil in kwantumefficiëntie van de bladfotosynthese.
- De spectra van de bladfotosynthese van Prestige geteeld onder SON-T en LED zijn nagenoeg identiek.
- Bij cv Akito is er duidelijk verschil in optische eigenschappen van onder- en bovenzijde van het blad.
- De kwantumefficiëntie van de fotosynthese is bij belichting van de bovenzijde van het blad hoger dan bij belichting van de onderzijde.
- Uit modelberekeningen blijkt dat de kwantumefficiëntie van de bladfotosynthese bij cv Prestige maximaal 35% hoger is bij belichting met rode LED's dan bij belichting met SON-T ($1 \mu\text{mol } 645\text{nm LED} = 1.35 \mu\text{mol SON-T}$).
- In maart absorberen jonge Prestige bladeren onder LED belichting meer PAR licht dan oude bladeren.
- In mei is bij een onbelichte teelt geen verschil tussen jonge en oude bladeren bij zowel Akito als bij Prestige.

Aanbevelingen

- Bij tomaat en komkommer is licht van rode LED's maximaal ongeveer 13% efficiënter dan licht van SON-T. Eenzelfde fotosynthese bereiken met minder LED licht is met de huidige cultivars waarschijnlijk gemakkelijker dan met dezelfde hoeveelheid licht meer fotosynthese te realiseren. Of dit op gewasniveau gerealiseerd kan worden hangt af van de juiste cultivar en van optimale afstemming met andere teeltcondities (CO_2 , temperatuur, VPD). Strategisch onderzoek zou zich moeten richten op het vinden van de juiste combinatie van ras en teeltconditie.
- Bij roos zijn er grote verschillen in het spectrum van de efficiëntie van de bladfotosynthese gevonden tussen cultivars. Bij het ontwerpen van belichtingssystemen verdient het aanbeveling om het spectrum van de efficiëntie van de fotosynthese te (laten) meten met de in dit project ontwikkelde mobiele meetopstelling.
- De optische eigenschappen van het blad zijn hoek- en kleurafhankelijk (Figuur 6.6.). Voor optimale inzet van tussenbelichting van vooral LED's is onderzoek nodig naar de hoekafhankelijkheid van bladreflectie, -transmissie en -fotosynthese nodig om onnodige verliezen te voorkomen.
- De efficiëntie van de netto bladfotosynthese is lager in de kop van het gewas (Figuur 6.7.). Dit wordt veroorzaakt is door een hogere ademhaling. Lokaal, d.w.z. ter plekke van het groeilicht, worden in blad in de kop van het gewas dus minder assimilaten per μmol licht gevormd. Het is niet duidelijk of lagere positionering van groeilicht ook tot meer productie leidt. Nader onderzoek is gewenst om tussenbelichting optimaal te kunnen positioneren.
- De meting van de spectrale lichtverdeling in het gewas met de in deze studie gebruikte Licor Li-1800 spectroradiometer is moeizaam. Meting van spectrale lichtverdeling in kassen kan veel beter met moderne, meerkanaals real-time CCD spectroradiometers uitgevoerd worden.

8 Referenties

Balegh, S.E. and Biddulph, O. (1970).

The photosynthetic action spectrum of the bean plant. *Plant Physiology* 46, 1-5.

De Ruijter, J.A.F, Marcelis, L.F.M. and Schreurs, M. (2007).

Position Paper Licht. Ingrediënten voor een energieneutrale belichte glastuinbouw in 2020. Kema rapport no 59762332-TOS/MEC 07-9022, 110pp.

Farquhar, G.D., von Caemmerer, S., Berry, J.A., 1980.

A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C3 species. *Planta* 149, 78–90.

Hogewoning, S.W. (2010).

On the photosynthetic and developmental responses of leaves to the spectral composition of light. Proefschrift Wageningen UR, ISBN 9789085857990.

Hogewoning, S.W., Douwstra, P., Trouwborst G., van Ieperen, W. and Harbinson J. (2010).

An artificial solar spectrum substantially alters plant development compared with usual climate room irradiance spectra. *Journal of Experimental Botany* 61, 1267-1276.

McCree, K.J. (1972).

The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agricultural Meteorology* 9, 191-216.

Monsi, M., Saeki, T., 2005.

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

Paradiso, R., Meinen E., Snel J.F.H., De Visser, P.H.B., Van Ieperen, W., Hogewoning, S.W. and Marcelis, L.F.M. (2011).

Spectral dependence of photosynthesis and light absorptance in single leaves and canopy in rose *Scientia Horticulturae* 127, 548-554.

Bijlage I Materialen en methoden fase II

Plantmateriaal

Tomaat

Trostomaat 'Elegance' werd gezaaid en opgepot in de kas. Na 1 week werden de potten overgebracht naar een klimaatkamer met 2 lichtintensiteiten: $100 \mu\text{mol PAR.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ en $200 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (TL lampen Philips TLD 50 W 840 HF). Daglengte was 16 uur, de temperatuur was 20/18 °C dag/nacht en de RV was 65%.

Fotosynthesemetingen zijn uitgevoerd na een duur van 25 tot 35 dagen bij deze lichtcondities. Op dat moment hadden de planten 10 tot 14 bladeren en 1 zichtbare tot bloeiende tros. Fotosynthese werd gemeten aan het topblad van het 5e blad geteld vanuit het groeipunt. Dit was een redelijk volgroeid blad dat gevormd en uitgegroeid was bij de betreffende lichtcondities.

Roos

Rozenstekken 'Akito' van 'Anton Verbeek New Roses International' uit Amstelveen werden opgekweekt in de kas voor het STW project 'Virtual Roses'. Een aantal planten van dit experiment kon gebruikt worden voor het uitvoeren van fotosynthesemetingen. Deze planten stonden op een doorgesneden steenwolmat zodat ze getransporteerd konden worden naar het fotosyntheselaboratorium. Op het moment van meten stonden de planten 4,5 tot 5 maanden in de kas. Minstens 4 dagen voor de fotosynthesemetingen werden de ingebogen takken weggeknipt om transport van de plant mogelijk te maken. Eén tot hooguit 2 dagen voor de fotosynthesemetingen werden de planten overgebracht naar een klimaatkamer en bij $100 \mu\text{mol PAR.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ geplaatst en een daglengte van 16 uur, een temperatuur van 20/18°C dag/nacht en een RV van 65%. Op dat moment hadden de scheuten alle bladeren gevormd (13 tot 16) en was de bloemknop zichtbaar en gesloten. Fotosynthese werd gemeten aan het topblad van een volgroeid 5-blad. Voor 'rood' blad was dit het 2e tot 5e blad geteld vanaf het groeipunt; voor 'groen' blad was dit het 5e tot 8e blad geteld vanaf het groeipunt.

Komkommer

Komkommerzaden (Hoffmann's Giganta) werden uitgezaaid in steenwol blokjes omgeven door vermiculite om de zaden vochtig te houden. Kieming vond plaats onder wit TL licht ($100 \pm 10 \mu\text{mol PAR.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$). Eén week na het zaaien, op het moment dat de cotylen beginnen op te komen, werden tien planten per behandeling overgezet naar een klimaatkamer voor opkweek gedurende 14-18 dagen op een hydroponics systeem gebaseerd op een continu circulatiesysteem. Planten werden in een witte polystreenplaat met gaten geplaatst en ondersteund door stukjes steenwol. The voedingsoplossing bevond zich in 60 liter vatens en werd naar de planten gepompt met een kleine vijverpomp (Cascade 450, Hozelock Cyprio, Haddendam, UK). De lichtintensiteit tijdens de opkweek was $100 \pm 10 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Op het moment van verschijnen van het tweede echte blad werd er voor gezorgd dat het tweede blad niet overschaduwd werd door andere planten. De behandeling bestond drie verschillende belichtingen: rode LED, blauwe LED en een combinatie van 30% blauw en 70% rood, kunstmatig zonlicht en zonlicht met extra verrood.

Behandelingen

Fotosynthese is gemeten aan tomatenbladeren die gevormd en uitgegroeid zijn bij 2 lichtintensiteiten; 100 en $200 \mu\text{mol PAR.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Fotosynthese van rozenblad is gemeten aan blad dat duidelijk rode pigmenten had en blad dat volledig groen was. Bladkleur is gerelateerd aan bladleeftijd; rood blad was altijd jonger dan groen blad. Bij komkommer is gemeten aan de eerste twee echte bladeren. In totaal is aan 9 behandelingen gemeten:

Nr	Gewas	Behandeling
1	Tomaat	100 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ opkweek
2	Tomaat	200 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ opkweek
3	Roos	Rood blad
4	Roos	Groen blad
5	Komkommer	LED rood
6	Komkommer	LED blauw
7	Komkommer	LED blauw/rood
8	Komkommer	Kunstzonlicht
9	Komkommer	Kunstzonlicht met extra verrood
De proef is uitgevoerd in 4 herhalingen.		

Bladabsorptiemetingen

Na de fotosynthesemeting werd van de gemeten bladeren de reflectie en de transmissie tussen 350 en 850nm gemeten met een spectroradiometer (Perkin Elmer Lambda 950, uitgerust met een integrerende bol). De transmissie wordt gemeten door het blad voor de ingangspoort van de bol te plaatsen (bovenkant blad gericht naar lichtbron). De reflectie van de bovenkant van het blad wordt gemeten door de bovenkant van het blad tegen de uitgangspoort van de integrerende bol te plaatsen. De reflectie is gekalibreerd tegen een referentie van spectralon. Uit de reflectie en de transmissie wordt bij elke golflengte berekend hoeveel licht door het blad wordt geabsorbeerd. Er werd gebruik gemaakt van een gebied op het topblad, zoveel mogelijk buiten de hoofdnerf.

Bijlage II Materialen en methoden fase III

Meting lichtverdeling in het gewas

De lichtmetingen in de praktijk werden uitgevoerd in een tomaten- en een rozengewas gedurende de periode januari - juni 2009 (Figuur I.1). De onderzochte tomatengewassen waren respectievelijk een onbelicht gewas, een met SON T belicht gewas en een combinatie van SONT en LED belicht gewas gemeten. Het rozengewas Akito werd zowel bij een LED belicht gewas als een onbelicht gewas onderzocht. De metingen in het tomatengewas werden in afdelingen van het Improvement Centre in Bleiswijk uitgevoerd. De afdelingen waarin gemeten werd, waren ca.1000m². Bij de tomaten werd in één afdeling (nr. 11) een gedeelte van de planten met SONT belicht. In een ander gedeelte van de afdeling waren er behalve SON T lampen ook LED lampen gemonteerd. In het laatstgenoemde gedeelte werden de combinatie SONT met LED-metingen uitgevoerd. In afdeling 9 stond het onbelichte tomatengewas.

Bij de firma Zuurbier in Heerhugowaard werden de lichtspectra gemeten in Akito-rozen die met SON-T en met LED-belichting groeiden. Van onbelichte rozen, respectievelijk Akito en Prestige, werden de lichtspectra gemeten in de showkas van de firma van Kleef in Kudelstaart. Beide rassen groeiden in dezelfde kas.

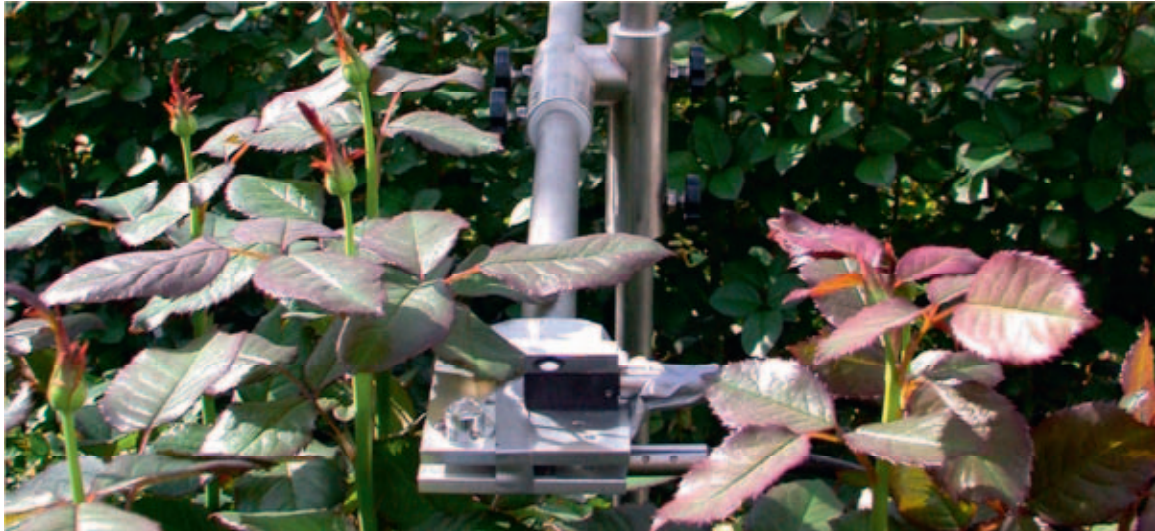
Tabel I.1. Plaats, belichtingsomstandigheden, ras, plant- en meetdatum van spectrale lichtmetingen in tomaten- en rozengewassen.

Gewas	Plaats	Belichting	Ras	Plantdatum	Datum meting
Tomaat	Improvement Center	Onbelicht	Capricia	Week1 2009	8-10 juni
	Bleiswijk	SON T	Komeett	Okt 2009	27-29 Januari, 8-10 juni
		Combinatie SON T en LED	Komeett	Okt 2009	9-11 maart
Roos	Zuurbier, Heerhugowaard	LED	Prestige		9-11 maart
		SON-T	Prestige		9-11 maart
	Van Kleef, demonstratiekas	Onbelicht	Akito	Dec 2008	11-13 mei
	Kudelstaart	Onbelicht	Prestige	Juli 2006	11-13 mei

Spectrale lichtmetingen

Per meting werd gelijktijdig op drie punten het lichtspectrum bepaald met drie LICOR-1800 apparaten. Per meting stond één apparaat op een vaste plaats boven het gewas en onder een lamp, als referentie. Om in het gewas te kunnen meten, waren twee LICOR-1800 apparaten uitgerust met een zgn. R-cosine receptor. Dit is een kleine detector die via een glasvezelkabel verbonden is met de LICOR. De twee detectors waren tegen elkaar aan gemonteerd zodat één detector, de straling van bovenaf kon meten en de andere detector de reflectie van de bodem. Het lichtspectrum werd gemeten in het gebied van 330-850nm. Eén complete herhaling is samengesteld uit 20 gelijktijdige metingen van de referentie LICOR, de LICOR die in het gewas naar boven wees en de LICOR die de reflectie van de grond registreerde. Gedurende een meetweek werden de 20 metingen drie keer herhaald.

De 20 metingen waren opgebouwd uit vier metingen in het horizontale vlak: midden tussen de plantrijen, tussen de stengels, in het midden van 'tussen de stengels' en het midden van de buisrail en midden tussen de buisrail. In Figuur I.2a. is schematisch weergegeven waar de meetpunten waren, dwars op de rij. In het verticale vlak werden de twee horizontale metingen op vijf hoogtes herhaald. Om de meetapparatuur op de goede hoogte in te stellen werd gebruik gemaakt van een buis-railwagen. Bij tomaat werd voor de referentiemeting, boven het gewas, een technische kar gebruikt. Hierop werd een LICOR-1800 geplaatst en via een RS232-kabel verbonden was met een laptop die op de buisrailwagen stond, bij de andere twee LICOR-1800 apparaten. In Tabel I.2. is in een schema gegeven op welke hoogtes bij tomaat respectievelijk roos werd gemeten en op welke plaatsen in de rij.

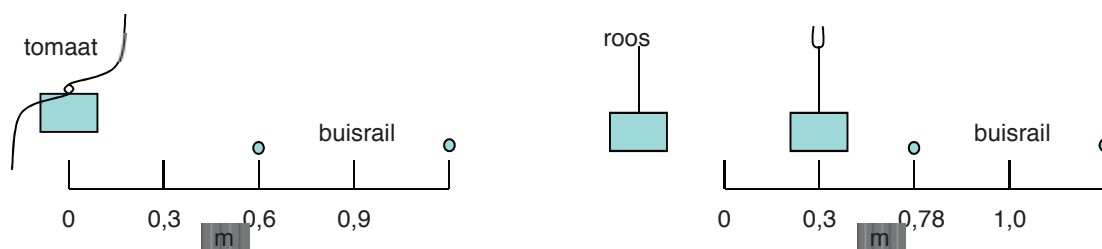


Figuur I.1 Meetkop voor de spectrale lichtmeting tijdens proefmetingen aan Akito rozen in de Unifarm kas in Wageningen. De meetkop bestaat uit twee identieke Licor Cosinus-gecorrigeerde sensoren die elk met hun eigen optische fiber verbonden zijn aan een Li-1800 spectroradiometer. Eén sensor is omhoog gericht en één sensor omlaag.

Tabel I.2. meetpunten verticaal en horizontaal in het tomaten- respectievelijk rozengewas.

Meetpunten verticaal		Meetpunten horizontaal, loodrecht op de rij
Roos	Tomaat	Tomaat
Boven het gewas	Boven het gewas	Loodrecht onder de lamp boven een plantblokje
Tussen de bloemknoppen	0,5m onder top van het gewas	Tussen de stengels, aan een kant van de rij
Op 2/3 van de bloemsteel	1m onder top van het gewas	Midden tussen stengels en het midden van de buisrail; ca. grens met bladeren
Op 1/3 van de bloemsteel	1,5m onder top van het gewas	
Direct boven ingebogen bladpakket	2m onder top van het gewas	Midden tussen de buisrail
Op de mat/onder bladpakket	Bovenkant blokje/goothoogte	

Figuur I.2 metingen dwars op de rij in een tomatengewas en een rozengewas.



Van twee uiterste meetpunten werden de lichtspectra voor alle metingen uitgewerkt

- A) in Figuur I.2. aangegeven als 0; dit is bij tomaat boven het plantblokje en onder een lamp en bij roos tussen twee plantrijen (blokjes) in en
- B) zowel bij tomaat (0,9) als roos (1,0), midden tussen de buisrail.

Uit het referentiespectrum gemeten boven het gewas en het spectrum gemeten op een bepaalde hoogte onder de kop van het gewas werd de transmissie (in %) van de betreffende gewaslaag berekend. Omdat de meting van de referentie en de meting in het gewas (nagenoeg) gelijktijdig zijn, wordt de storende werking van veranderingen in het spectrum van het opvallende licht zoveel mogelijk onderdrukt.

Blauw-rood en rood-verrood verhouding in het gewas

Uit de gemeten lichtspectra in het gewas zijn de blauw/rood (B/R) en de rood-verrood (F/FR) verhoudingen als volgt berekend.

$$\frac{B}{R} = \frac{\sum_{\lambda=400}^{500} PFD(\lambda)}{\sum_{\lambda=600}^{700} PFD(\lambda)}$$

$$\frac{R}{FR} = \frac{\sum_{\lambda=600}^{700} PFD(\lambda)}{\sum_{\lambda=700}^{800} PFD(\lambda)}$$

met $PFD(\lambda)$ = lichtintensiteit bij golflengte λ .

Transmissie- en reflectiemetingen aan afgeplukte bladeren

Op verschillende hoogtes onder de top van het tomatengewas nl. 0,5; 1,0; 1,5; 2,0m werden, meerdere bladeren geplukt en zo spoedig mogelijk, naar het Lichtlab in Wageningen gebracht. Dit gebeurde ook bij het rozengekas. Daar was de top van het gewas de rozenknop en verder naar beneden op 1/3 stengellengte onder de rozen knop, 2/3 stengellengte onder de rozen knop, direct boven het bladpakket en onderkant van het ingebogen bladpakket. Van de top van de bladeren, maar zoveel mogelijk zonder hoofdnerf, werd van de bladeren de transmissie en reflectie bepaald. Dit gebeurde met een spectrofotometer (Perkin Elmer) in het lichtlab van Wageningen UR. Van de bladeren werd het spectrum van 300-2500nm bepaald.

Schatting belichtingsefficiëntie SON-T en LED

De belichtingsefficiëntie van SON-T licht en LED licht kunnen geschat worden op basis van de spectrale verdeling van het lamplicht en het spectrum van de bladfotosynthese. De belichtingsefficiëntie van een lamp type wordt hier gedefinieerd als $\mu\text{mol CO}_2$ per μmol geabsorbeerd lamplicht (PAR). De schatting is gebaseerd op bekende spectra van SON-T (Philips SON-T Green Power 400W) en spectrale lichtverdeling van 2 typen LED's (645nm LED: Roithner LED type 645-66-60; 680nm LED: Roithner LED type 680-66-60) en de gemeten actiespectra van de fotosynthese. Eerst zijn het actiespectrum van de fotosynthese en de lampspectra door lineaire interpolatie naar arrays met gelijke golflengtes geconverteerd. Vervolgens zijn de lampspectra genormaliseerd op een output van $1 \mu\text{mol (PAR).m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Tenslotte is het genormaliseerde lampspectra vermenigvuldigd met het actiespectrum. Dat levert voor elke lamp-gewas combinatie een hoeveelheid vastgelegde CO_2 op. Voor het gemak wordt de waarde voor SON-T als referentie genomen en op 100% gesteld. Dit hele proces is uitgevoerd met het mathematisch pakket MathCad 14.

Opschaling naar gewasniveau (roos) Lichtverdeling in het gewas is berekend voor een homogeen gewas op basis van een uniforme extinctie. Dit leidt tot een lichtintensiteit I in gewaslaag n (Monsi and Saeki, 2005):

$$I_n = I_0 e^{-kLAI_n}$$

Met I_0 : lichtintensiteit boven het gewas, k : extinctiecoëfficiënt en LAI_n : m^2 bladopp. per m^2 grondopp.

Het model berekent de lichtabsorptie, de lichtintensiteit en de resulterende fotosynthese op basis van een 5-punts Gaussische distributie in de bladlagen. Deze werden vervolgens geïntegreerd naar gewasniveau. Het opvallend licht werd volledig diffuus verondersteld. De extinctiecoëfficiënt voor het gewas (k_{crop}) werd als volgt berekend:

$$k_{crop} = k_{bl} \sqrt{1 - \sigma}$$

Met k_{bl} (0.84) : extinctiecoëfficiënt voor gewas met sferische bladhoekverdeling en σ : strooiingscoëfficiënt.

De golflengteafhankelijke verstrooiingscoëfficiënt ρ is gelijk aan de som van de reflectie en de transmissie en is berekend uit de spectrometer data. Op basis van ρ kan bovendien de gewasreflectiecoëfficiënt ρ_c gesimuleerd worden met de formule:

$$\rho_c = \frac{1 - \sqrt{1 - \sigma}}{1 + \sqrt{1 - \sigma}}$$

In het model wordt deze reflectie afgetrokken van het opvallende diffuus licht. De gebruikte methoden zijn eerder beschreven door Goudriaan and van Laar (1993). De relatieve gewasfotosynthese ten gevolge van de 18 golflengtes is geschat met een mechanistisch fotosynthesemodel gebaseerd op Farquhar *et al.* (1980). Daarbij is een maximale elektronentransportsnelheid (J_{max}) van $110 \mu\text{mol electrons.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (bij 25°C), een carboxylatiesnelheid (V_{Cmax}) van $\frac{1}{2} \times J_{max}$ (in $\mu\text{mol CO}_2.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) en een curvatuurparameter α van 0.75.

Alle parameters zijn gecalibreerd aan de gemeten lichtverzadigingscurven op basis van een kleinste kwadraten methode. De parameter value α (kwantumefficiëntie in $\mu\text{mol elektronen per } \mu\text{mol photonen}$) werd overgenomen uit de fotosynthesemeting bij laag licht. Alle metingen voor de bepaling van α zijn gedaan onder condities waarin geen fotorespiratie mogelijk was (2% zuurstof). De bruto fotosynthese bij een golflengte is berekend voor roos met LAI=3 en $30 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (PAR) diffuus opvallend licht, een CO_2 concentratie van 350ppm en een luchttemperatuur van 22°C .

