

Meer rendement uit licht en CO₂ bij Ficus



Govert Trouwborst, Sander Hogewoning & Sander Pot
Juni 2013

Meer rendement uit licht en CO₂ bij Ficus

Juni 2013

Dr. ir. G. Trouwborst¹
Dr. ir. S.W. Hogewoning¹
Ing. C.S. Pot²

¹ Plant Lighting B.V.
Veilingweg 46
3981 PC Bunnik
+31 (0)30 7512069
+31 (0)6 14271525

www.plantlighting.nl
info@plantlighting.nl

² Plant Dynamics B.V.
Koningin Julianastraat 23
6668 AG Randwijk

Deze studie naar grenswaarden voor een energie-efficiënte belichtingsstrategie en CO₂-dosering bij het gewas Ficus is uitgevoerd in opdracht van het Productschap Tuinbouw en het ministerie van Economische zaken in het kader van het programma Kas als Energiebron. De studie is gebaseerd op fotosynthesemetingen in drie seizoenen uitgevoerd door Plant Dynamics BV en Plant Lighting BV. Voor een snelle indruk van de bevindingen volstaat Bijlage 1 Protocol. In hoofdstuk 1 wordt een korte uitleg over fotosynthese gegeven.

© 2013 Bunnik, Plant Lighting B.V. & Plant Dynamics B.V.

De resultaten van deze uitgave mogen vrij gebruikt worden, mits de bronnen worden vermeld. Plant Dynamics BV en Plant Lighting BV zijn niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen als gevolg van gebruik van gegevens uit deze uitgave.

Inhoudsopgave

1. Inleiding.....	4
1.1 Inleiding fotosynthese	4
1.2 Lichtrespons van de fotosynthese.....	6
1.3 CO ₂ -respons van de fotosynthese.....	7
2. Materiaal en methoden	9
2.1 Inleiding	9
2.2 Plantmateriaal per periode.....	9
2.3 Meten van de fotosynthese	9
3. Resultaten fotosynthesemetingen.....	11
3.1 Effect van cultivar op de fotosynthese?	11
3.2 Grenswaarden belichting per seizoen.....	11
3.3 Huidmondjes en VPD?.....	13
3.4 Anders belichten begin en einde dag?	14
3.5 Grenswaarden scherming bij hoge instraling	15
3.6 Grenswaarden CO ₂ -dosering.....	16
4. Conclusies en advies	18
Referenties.....	20
Bijlage 1. Protocol voor belichting en CO₂-dosering Ficus	i
Bijlage 2. Omrekeningstabel Lux, Watt, μmol.....	v

1. Inleiding

1.1 Inleiding fotosynthese

Planten nemen water en voedingsstoffen op via hun wortels en CO₂ via de huidmondjes in hun bladeren. Fotosynthese is het proces waarbij de plant met behulp van lichtenergie het opgenomen water en CO₂ omzet in suikers (assimilaten). De fotosynthese is dus de motor van de plant en CO₂ fungeert als brandstof. Door middel van fotosynthesemetingen kan worden vastgesteld in welke mate verschillende lichtintensiteiten benut worden voor de fotosynthese en dus de groei. Op basis hiervan kan er bepaald worden tot welke lichtintensiteit bijbelichten rendabel is en bij welke lichtintensiteit de belichting beter uitgeschakeld kan worden. Tevens kan worden bepaald bij welke intensiteit daglicht de plantstress te hoog wordt en er dus beter geschermd kan worden.

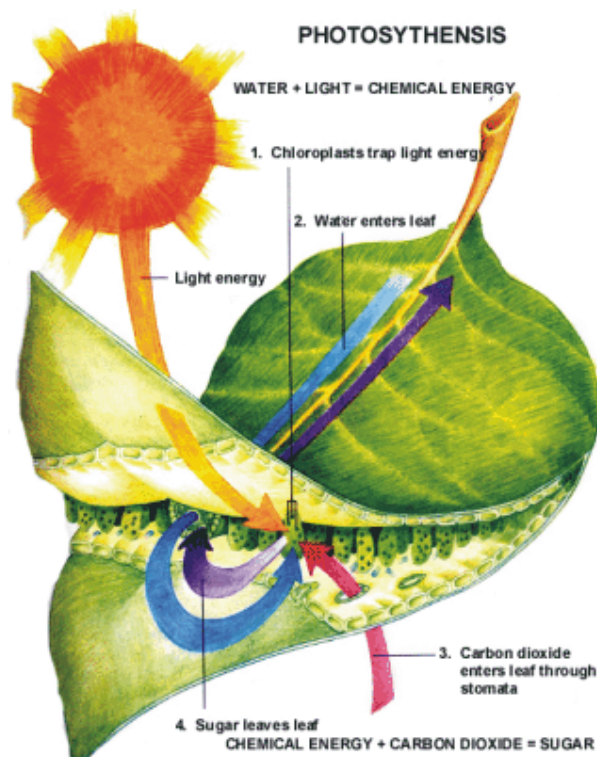


Fig. 1. Essentiële zaken rondom de fotosynthese: Lichtenergie wordt geabsorbeerd door het blad (1). Water komt binnen via de nerven (2). Tevens komt er CO₂ binnen via de huidmondjes (3). Met behulp van de lichtenergie worden er suikers gemaakt (4).

Fotosynthesemetingen bieden ook de mogelijkheid om de efficiëntie van de CO₂-opname bij verschillende CO₂-concentraties rondom het blad te meten. Uit deze metingen komt naar voren waar de grens ligt tot waar CO₂ doseren toegevoegde waarde heeft voor de fotosynthese. Uit de metingen kan tevens de geleidbaarheid van de huidmondjes berekend worden. Huidmondjes zijn poriën in het blad waardoor water kan verdampen en de CO₂ naar binnen kan gaan (zie nr. 3 in Fig. 1 en Fig. 2A). Bij een grotere geleidbaarheid van de huidmondjes komt het CO₂

gemakkelijker het blad binnen en verdampt de plant tegelijkertijd ook meer. De plant is in staat de openingsgrootte van deze poriën actief te reguleren. Als de verdamping te hard gaat, kan de plant de huidmondjesopening beperken (knijpende huidmondjes), zodat de plant minder water verliest. De keerzijde van deze beperking is dat de CO_2 minder goed naar binnen kan. Hierdoor kan het interne CO_2 -gehalte in het blad fors dalen ten opzichte van dat van de kaslucht. Als de huidmondjes open zijn ligt de interne CO_2 -concentratie op ongeveer 70% van de concentratie in de buitenlucht, maar dit kan bij knijpende huidmondjes dalen tot bijvoorbeeld 25% (Zie Fig. 2B). De consequentie is dat de fotosynthese bij knijpende huidmondjes fors lager ligt dan bij normaal geopende huidmondjes.

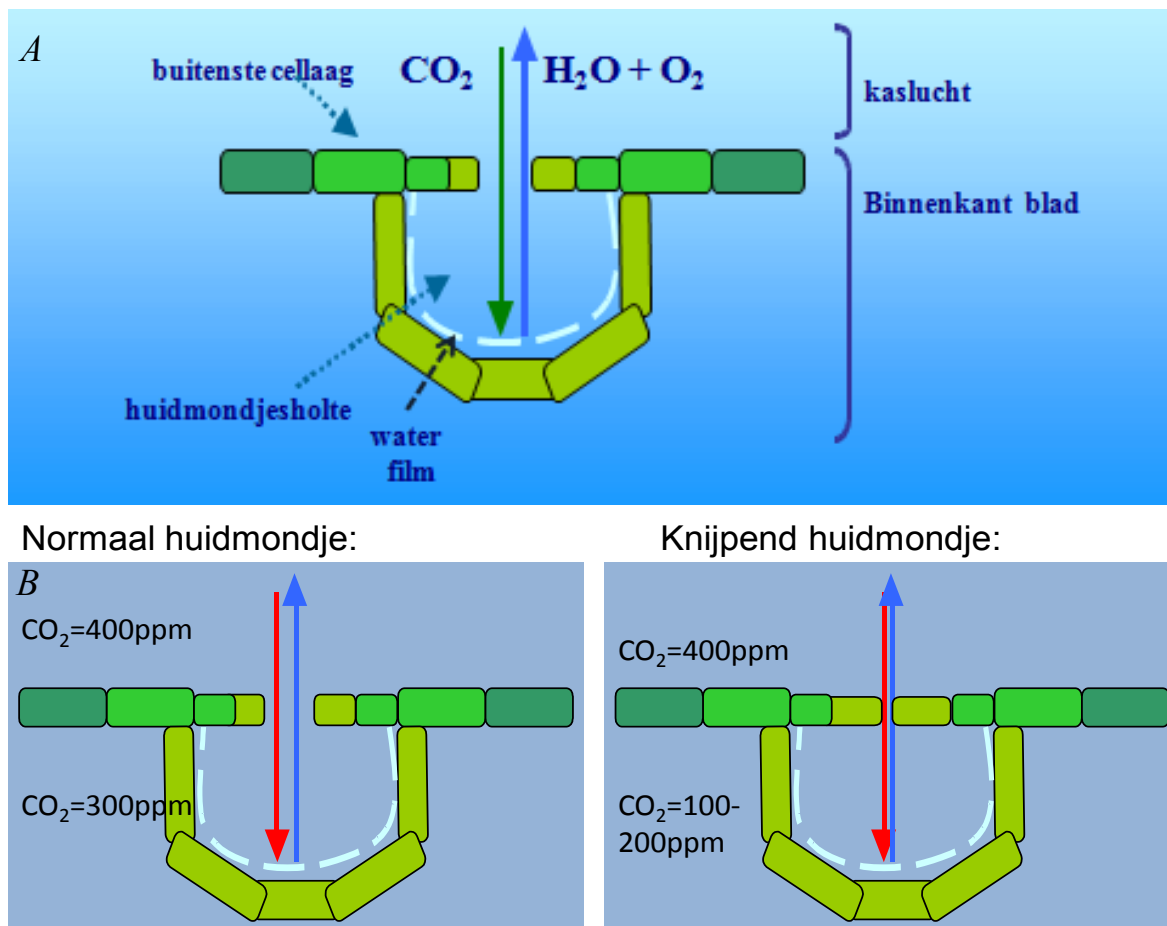


Fig. 2. Schematische tekening van een huidmondje (A) en het verschil tussen de CO_2 -concentratie in de kaslucht en in het blad door de mate van huidmondjesopening (B).

Ficus is, net als de meeste tuinbouwgewassen, van het type C3-plant, waarbij de opname van CO_2 overdag plaats vindt en hinder ondervindt van zuurstof. Voor een efficiënte fotosynthese bij C3-planten is het dus essentieel dat de huidmondjes goed openen. Bij slechte huidmondjesopening wordt namelijk teveel O_2 in plaats van CO_2 gebonden. Dat kost veel energie. Redenen dat een huidmondje dicht kan gaan zijn onder andere: een te hoog CO_2 -niveau in de kaslucht, een beperking in de wateropname of een te hoog dampdruk-deficit tussen

kaslucht en blad (VPD)¹. Als bij een hoge instraling een te hoge VPD ontstaat waardoor de huidmondjes sluiten, dan levert voorkomen van een te hoge VPD door op tijd te screenen soms meer netto resultaat op dan verloren wordt door het verlies aan licht.

1.2 Lichtrespons van de fotosynthese

Het is algemeen bekend dat een hogere lichtintensiteit leidt tot een hogere fotosynthesesnelheid (Fig. 3). Dit verband verloopt eerst lineair (1% meer licht = 1% meer fotosynthese), bij hogere lichtintensiteiten neemt de toegevoegde waarde van licht af (1% meer licht < 1% meer fotosynthese), en bij hele hoge lichtintensiteiten is de fotosynthese lichtverzadigd (1% meer licht = 0% meer fotosynthese) en ontstaat lichtstress.

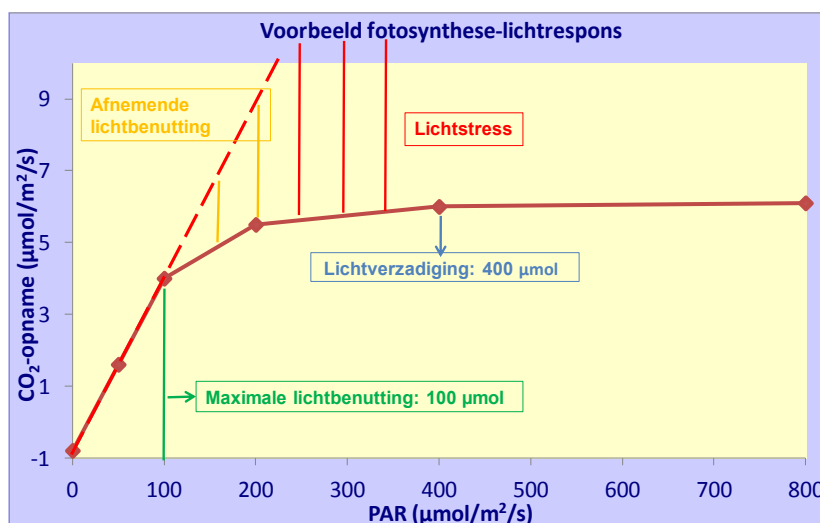


Fig. 3. Voorbeeld respons van de fotosynthese bij toenemende lichtintensiteit. Zolang als de fotosynthese meeloopt met de rood gestreepte lijn is de lichtrendement van de fotosynthese 100%. Het is vooral interessant om in dit gebied te belichten. Naarmate de 2 lijnen verder uit elkaar gaan lopen (weergegeven via de oranje en rode verticale lijnen) is er sprake van een steeds groter wordende lichtovermaat. Zo ontstaat er bij een hoge lichtintensiteit lichtstress.

¹ Het dampdruk-deficit tussen blad en kaslucht (VPD) is de drijvende kracht achter gewasverdamping. De mate van verdamping is een samenspel van de *drijvende kracht* (=VPD) en de *weerstand* (=huidmondjesgeleidbaarheid). Hetzelfde principe is aanwezig bij water uit de kraan. De waterstraal wordt bepaald door de *druk* in de waterleiding en de *openingsstand* van de kraan.

De VPD wordt als volgt bepaald:

1. Bepaling van de dampdruk in de kaslucht (berekend uit de temperatuur en de RV van de kaslucht)
 2. Bepaling van de dampdruk in de plant (berekend uit de planttemperatuur en 100% RV in het blad)
 3. Het verschil is de VPD (uitgedrukt in kPa, niet te verwarren met vochtdeficit ofwel VD, uitgedrukt in g/m^3)
- Over het algemeen is bij een hoge RV de VPD laag en bij een lage RV de VPD hoog. Echter, bij een gelijkblijvende temperatuur en RV van de kaslucht, kan de VPD toch toenemen door een stijgende planttemperatuur.

1.3 CO₂-respons van de fotosynthese

De respons van de fotosynthesesnelheid van C3-bladeren op CO₂ vergelijkbaar met de lichtrespons: van lage naar hoge CO₂-concentraties in de kas neemt de fotosynthese eerst snel toe om vervolgens bij hoge concentraties af te vlakken (Fig. 4).

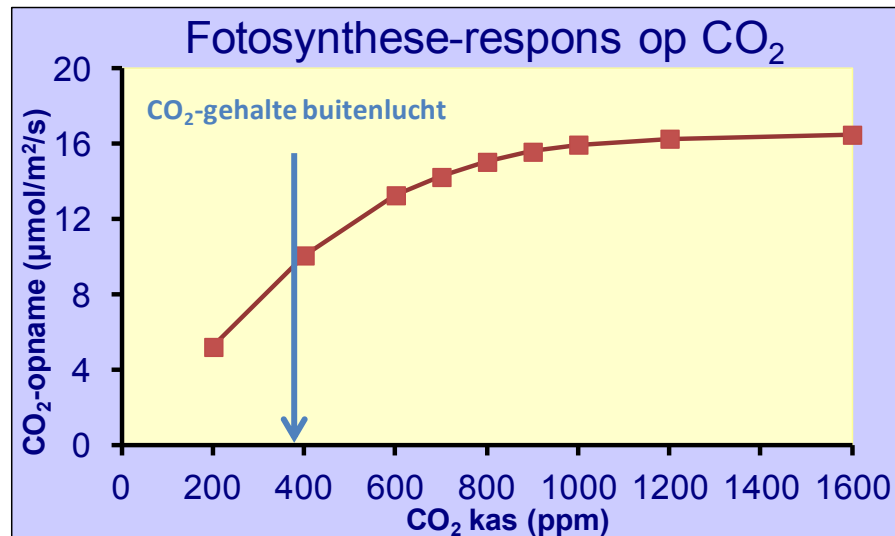


Fig. 4. Voorbeeld respons van de fotosynthese bij toenemend CO₂. Van lage naar hoge CO₂-concentraties in de kas neemt de fotosynthese eerst snel toe om vervolgens bij hoge concentraties sterk af te vlakken.

Wat betreft de grenzen aan CO₂-dosering wordt nogal eens uitgegaan van de gedachte 'baat het niet, dan schaadt het niet'. Echter, het is om een aantal redenen van belang dat de optimale CO₂-concentratie wordt bepaald en dat beter niet méér CO₂ gedoseerd wordt. Hoge CO₂-concentraties in de kas kunnen namelijk de volgende nadelen hebben:

- Rookgasverontreiniging: verhoogde concentraties NO_x en/of ethyleen in de kas → schade aan gewas / knopval
- Kosten: bij gebruik van zuivere CO₂ speelt het probleem van rookgasverontreiniging niet, maar leidt meer CO₂ doseren dan nodig is wel tot onnodige kosten
- Sluiting van de huidmondjes; hoog CO₂ kan als 'trigger' dienen voor huidmondjessluiting, waardoor de opname van CO₂ wordt bemoeilijkt. Sommige gewassen zijn hiervoor gevoeliger dan andere.
- Verwende bladeren:
 - Luie huidmondjes: Door langdurige blootstelling aan verhoogd CO₂ kunnen huidmondjes 'lui' worden (kleiner aantal per oppervlakte blad, kleinere afmeting per huidmondje, minder verre opening). Dit hoeft geen probleem te zijn zolang de CO₂ concentratie maar hoog genoeg is. Echter, als de CO₂-concentratie door het openen van de luchtramen wegzakt, dan wordt het wel aanwezige CO₂ slechter opgenomen, met als gevolg daling van de productie.

- Lui Rubisco: Hetzelfde geldt voor Rubisco (het enzym dat CO_2 bindt om suikers te maken): bij langdurige blootstelling aan verhoogd CO_2 kan de werking van Rubisco omlaag gaan, waardoor de productiviteit relatief sterk afneemt als de CO_2 -concentratie in de kas daalt.

2. Materiaal en methoden

2.1 Inleiding

Door middel van fotosynthesemetingen is bepaald waar de grenswaarden liggen voor het efficiënt inzetten van belichting en CO₂-dosering. Tevens zijn de grenswaarden van de lichtintensiteit bepaald waarboven beter beschermd kan worden omdat er anders lichtstress optreedt.

Deze grenswaarden kunnen afhankelijk zijn van het:

- Seizoen
- Tijdstip van de dag (voornamelijk nacht-dag en dag-nachtovergangen).
- Ras en/of stadium

2.2 Plantmateriaal per periode

Er is gemeten in de zomer (augustus), het late najaar (november) en het einde van de winter (februari) bij de cultivars Ficus ‘Danielle’ (groen) , ‘Danita’ (groen) en ‘Twilight’ (bont). Voor details, zie Tabel 1.

Tabel 1. Cultivars die gemeten zijn.

	‘Danielle’	‘Twilight’	‘Danita’
Augustus	Potmaat 21 cm	Potmaat 21 cm	Potmaat 21 cm
November	Potmaat 21 cm	Potmaat 21 cm	
Februari	Potmaat 21 cm	Potmaat 21 cm?	

2.3 Meten van de fotosynthese

Met een draagbare fotosynthesemeter (LI-COR 6400, Foto 1) zijn er twee typen metingen verricht:

- Lichtrespons metingen
- CO₂-respons metingen

Voor de metingen van de lichtrespons wordt een blad ingeklemd (zie Foto 1). Vervolgens wordt de fotosynthese-snelheid gemeten bij verschillende lichtintensiteiten. De diverse lichtintensiteiten worden gerealiseerd door een interne LED-lamp in de meetkop. Er is voor gekozen om te meten bij een oplopende reeks van lichtintensiteiten. Uit de metingen is berekend hoe efficiënt de bladeren de verschillende lichtintensiteiten benutten voor de fotosynthese. Hieruit kunnen twee dingen worden bepaald:

1. Bij welke lichtintensiteit het rendeert om het lamplicht aan te houden dan wel af te schakelen.
2. Bij welke lichtintensiteit er lichtstress aan het fotosynthesesysteem ontstaat zodat er beter beschermd kan worden.

De metingen zijn altijd verricht aan net volgroeide onbeschaduwde bladeren. Dat zijn de bladeren die het meeste licht opvangen en dus het meeste bijdragen aan de gewasproductiviteit. Voor alle type metingen zijn herhalingsmetingen uitgevoerd aan minimaal 5 verschillende bladeren.



Foto 1. LI-COR-6400 draagbare fotosynthesemeter voor het meten van de CO₂ opname (fotosynthese) in de praktijk. In het apparaat kunnen PAR, CO₂, temperatuur en vocht gevarieerd worden. Op deze manier is de fotosynthese-snelheid gemeten bij oplopend PAR of CO₂ aan een ingeklemd blad (rode pijl).

Voor de CO₂-respons metingen wordt eveneens een blad ingeklemd, maar dan wordt de lichtintensiteit constant gehouden en wordt de fotosynthese-afhankelijkheid van de CO₂-concentratie in kaart gebracht. Er is gemeten bij de volgende CO₂ concentraties: 200, 400, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200 en 1600 ppm. Op basis van deze metingen kan er een gericht advies worden gegeven aangaande het gewenste CO₂-niveau in de kas.

3. Resultaten fotosynthesemetingen

3.1 Effect van cultivar op de fotosynthese?

De fotosynthese-licht respons van de beide groene Ficus cultivars ‘Danielle’ en ‘Danita’ verschilde nauwelijks van elkaar (Fig. 5). De lichtrespons van de bonte Ficus ‘Twilight’ lag daarentegen een stuk lager. De metingen bij ‘Twilight’ zijn verricht op de groene gedeeltes van het blad. In Fig. 5 wordt ook de potentiële fotosynthese weergegeven voor beide groene cultivars (rode lijn). Deze lijn is bepaald door middel van chlorofyl-fluorescentie, (voor uitleg, zie Pot *et al.*, 2011). Of de gerealiseerde fotosynthese in de buurt komt van de rode lijn is onder andere afhankelijk van de beschikbaarheid van CO₂ en de mate van huidmondjesopening.

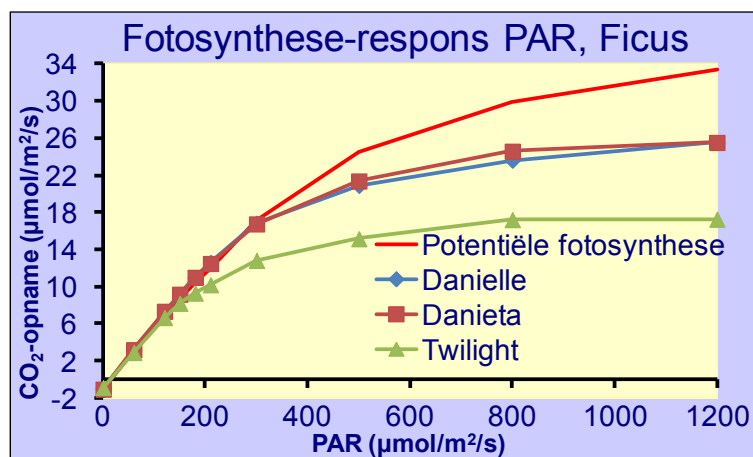


Fig. 5. Lichtrespons op de fotosynthese van Ficus ‘Danielle’, ‘Danita’ en Twilight gemeten bij 800 ppm CO₂ (data augustus). De rode lijn geeft aan wat potentieel haalbaar is voor de groene cultivars. Of de gerealiseerde fotosynthese in de buurt komt van de rode lijn is o.a. afhankelijk van de beschikbaarheid van CO₂ en de huidmondjesopening.

3.2 Grenswaarden belichting per seizoen

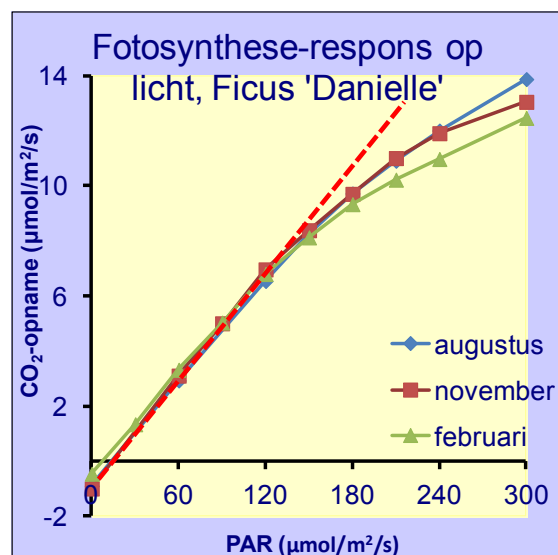
In Tabel 2A staat het lichtrendement van ‘Danielle’ weergegeven voor de verschillende seizoenen. Naarmate er minder licht is, daalt ook de fotosynthese-capaciteit in november en februari ten opzichte van augustus (Tabel 4). In augustus blijft tot een intensiteit daglicht plus lamplicht van 150 μmol het lichtrendement maximaal en in november en februari ligt dit op 120 μmol (Tabel 2A). Boven de 240-300 μmol daglicht plus lamplicht daalt het lichtrendement snel en wordt het snel onrendabel om door te gaan met belichten.

Bij ‘Twilight’ verschilde het lichtrendement nauwelijks tussen november en februari (Tabel 2B). Opvallend was dat hoewel het lichtrendement ook maximaal bleef tot 120 μmol, het rendement bij meer licht heel snel daalde. Dit kwam doordat bij ‘Twilight’ de huidmondjesgeleidbaarheid al snel beperkend werd voor de fotosynthese boven de 120 μmol.

Tabel 2. Verloop van het fotosyntheserendement van 'Danielle' en 'Twilight' bij toenemend lichtniveau. Zolang als de gemeten lijnen evenwijdig met de rode stippellijn lopen, is het fotosyntheserendement 100%.

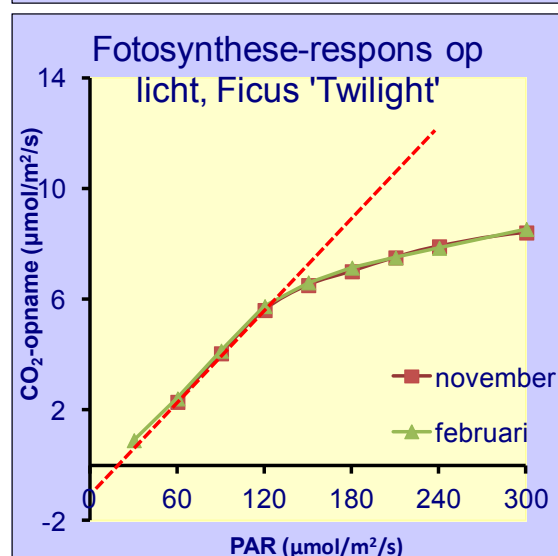
2A: 'Danielle'

PAR daglicht + lamplicht	augustus	november	februari
0-60	100%	100%	100%
60-90		100%	100%
90-120	100%	100%	100%
120-150	96%	81%	75%
150-180	84%	75%	68%
180-210	67%	74%	50%
210-240	62%	62%	43%
240-300	53%	32%	42%
300-500	31%	29%	17%
500-800	17%	9%	7%



2B: 'Twilight'

PAR daglicht + lamplicht	november	februari
0-60	100%	100%
60-90	100%	100%
90-120	97%	100%
120-150	56%	53%
150-180	31%	33%
180-210	31%	23%
210-240	25%	22%
240-300	16%	21%
300-500	7%	9%
500-800	5%	7%



Concreet betekent deze rendementstabel het volgende voor een aantal voorbeeldsituaties (voorbeeld voor 'Danielle'):

- *Situatie 1.* De lampen met een lichtintensiteit van $60 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ staan 's nachts aan → Het lamprendement op de fotosynthese is 100%.
- *Situatie 2.* De lampen met een lichtintensiteit van $60 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ staan om 10.00 's ochtends aan. Op een bewolkte dag in november is de zonlichtintensiteit in de kas zo'n $30 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$. → bij elkaar is er dan $90 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ licht in de kas → Het lamprendement op de fotosynthese is nog steeds 100%.
- *Situatie 3.* De lampen met een lichtintensiteit van $60 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ staan om 10.00 's ochtends aan. Op een heldere dag in maart is de zonlichtintensiteit in de kas al 150

$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ → bij elkaar is er dan $210 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ licht in de kas → rendement van de eerste $30 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ lamplicht op de fotosynthese zakt tot 68% en van de tweede $30 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ tot 50%. Het is dan zeker te overwegen om het lamplicht gedeeltelijk af te schakelen.

Een rendement van 100% lichtbenutting is geen vereiste; soms zijn de kwaliteitseisen en een strak teeltschema overwegingen om bij een lager rendement het licht toch aan te laten. De balans tussen de extra kosten van belichting tegenover de meeropbrengst door de hogere fotosynthese en/of andere kwaliteitsaspecten bepalen waar het economische optimum uiteindelijk ligt.

3.3 Huidmondjes en VPD?

De fotosynthese van *Ficus* was gedurende de metingen herhaaldelijk gelimiteerd door de huidmondjes. Fig. 6 laat een voorbeeld zien. Door de huidmondjeslimitatie ligt de fotosynthese bij hoge lichtintensiteiten fors lager (donkerrode lijn, Fig. 6A), maar zelfs ook onder een lagere lichtintensiteit is de beperking in fotosynthese vanaf $150 \mu\text{mol}$ duidelijk zichtbaar (donkerrode lijn, Fig. 6B).

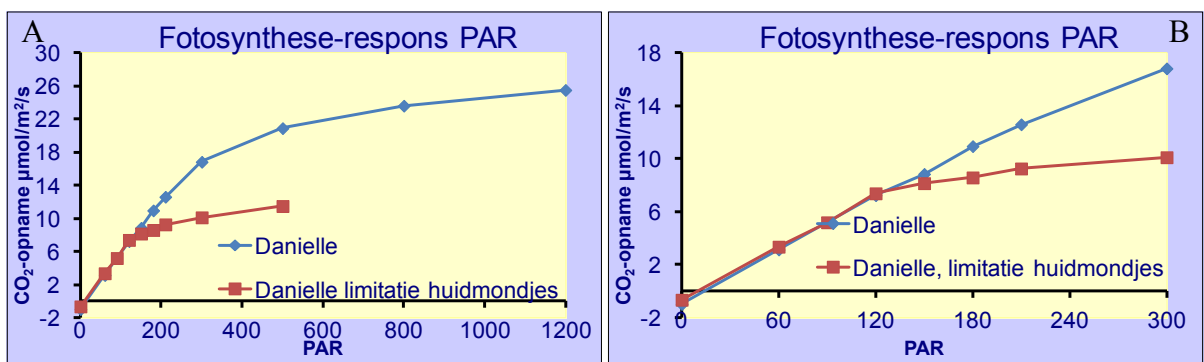


Fig. 6. Effect van huidmondjeslimitatie op de fotosynthese. A: Lichtrespons van een wel en niet gelimiteerd blad. B: zelfde als A maar dan ingezoomd op de lage lichtintensiteiten (data augustus).

Het bleek dat in augustus de huidmondjessluiting een verband laat zien met een toenemende VPD (Fig. 7). Tijdens de metingen in november en februari lag de VPD meestal onder de 1.0 kPa en kon er geen verband worden gelegd tussen de huidmondjesopening en de VPD. Maar ook toen kwam huidmondjeslimitatie voor, dus VPD is niet de enige oorzaak van huidmondjessluiting. Bij metingen in het Growsense-onderzoek (Dijkstra *et al.* 2010) werd er juist geen VPD-afhankelijkheid van de huidmondje waargenomen. Het verdient aanbeveling dit (mogelijke) verband nader te onderzoeken bij een reeks van wijd uiteenlopende VPD's onder gecontroleerde omstandigheden.

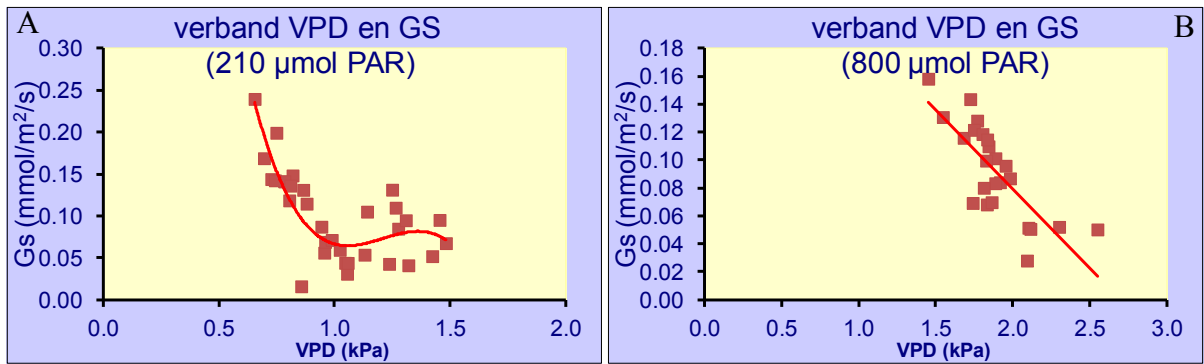


Fig. 7. Verband tussen de VPD en de huidmondjesopening bij laag (A) en hoog licht (B). De rode lijnen geven een ruwe trend weer (data augustus). Het valt op dat bij laag licht (A) de huidmondjes bij een lagere VPD dichtzitten dan bij hoog licht (B).

3.4 Anders belichten begin en einde dag?

Bij de belichte Ficusteelt wordt over het algemeen belicht van 3:00 uur 's ochtends en wordt beneden een zekere drempel voor daglicht-instraling doorbelicht tot ongeveer 10:00-12:00 uur. Aan het einde van de dag wordt er dus niet meer belicht. Als 's ochtends vroeg de lampen aangaan zijn de huidmondjes nog bijna dicht en is het lichtrendement zeer laag (blauwe lijn in fig. 8A). de huidmondjesopening is vrij traag (Fig. 8B) en pas 2.5 uur later treedt er geen rendementsverlies meer op. Het is dus aan te bevelen om 's ochtends met een lage lichtintensiteit te starten. Ook aan het einde van de dag treedt er rendementsverlies op, maar doorgaans wordt er dan in de praktijk niet meer belicht. In Tabel 3 wordt het fotosyntheserendement voor het begin en einde van de dag in getallen weergegeven.

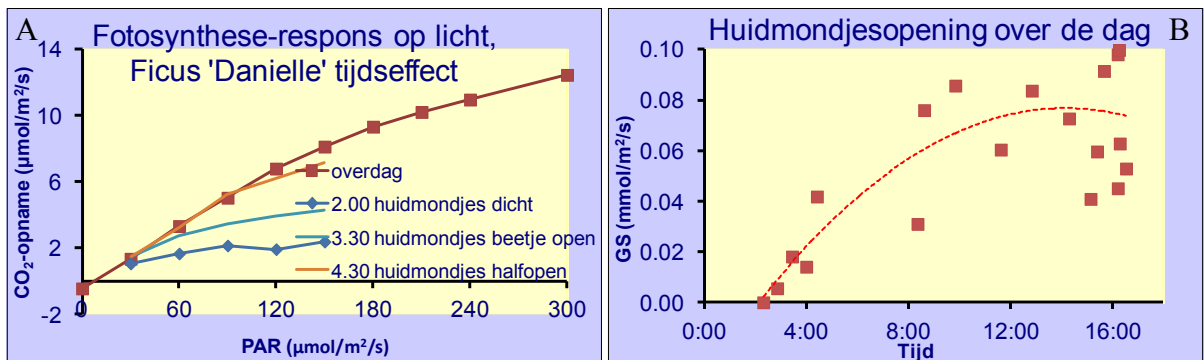
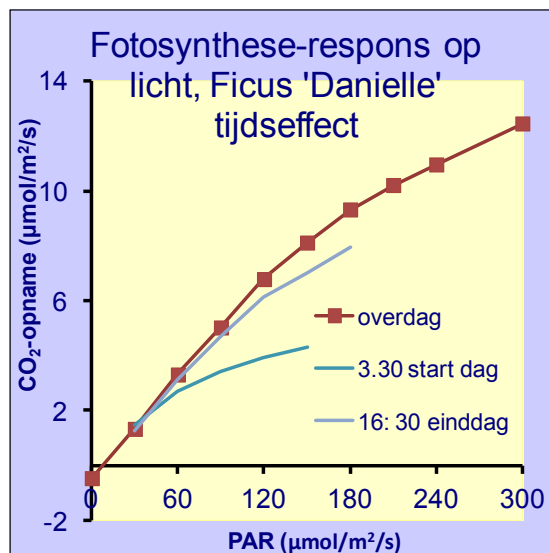


Fig. 8. Effect van het begin van de dag op de fotosynthese-lichtrespons (A). De CO_2 in de kas was ongeveer 600 ppm. B: Verloop van de huidmondjesopening over de dag. De rode lijn geeft een ruwe trend weer (belichting in proefkas stond aan van 2:00-17:00, zononder ongeveer 18:00; data februari).

Tabel 3. Verloop van het fotosyntheserendement van 'Daniëlle' bij toenemend lichtniveau aan het begin en einde van de dag. (De belichting stond aan van 2:00-17:00, zonsondergang ongeveer 18:00; data februari).

PAR daglicht + lamplicht	start dag 3:30 uur 1.5 uur licht	overdag	eind dag 16:30 uur
0-30	100%	100%	100%
30-60	71%	100%	100%
60-90	40%	100%	88%
90-120	29%	100%	82%
120-150	21%	75%	53%
150-180		68%	48%
180-210		50%	
210-240		43%	
240-300		42%	

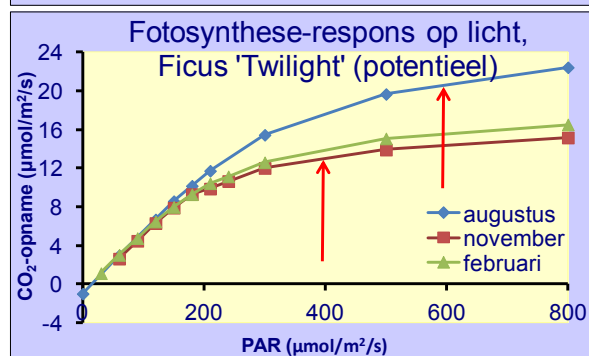
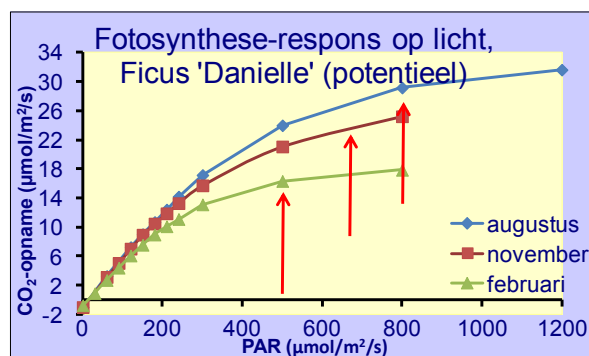


3.5 Grenswaarden scherming bij hoge instraling

Bij de getekende rode pijlen in de figuur bij Tabel 4 is het lichtrendement dermate laag dat langdurige blootstelling schade aan het fotosynthese-systeem in de bladeren kan geven (lichtstress). Bij Ficus-rassen die gevoelig zijn voor bladschade wordt schermen aangeraden.

Tabel 4. Lichtgrens waarboven er lichtstress ontstaat aan het fotosynthesesysteem bij 'Daniëlle' en 'Twilight'.

	PAR binnen ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)	Straling buiten (Watt/m^2)
Augustus		
Daniëlle	800	~530
Twilight	600	~400
November		
Daniëlle	700	~470
Twilight	400	~270
Februari		
Daniëlle	600	~400
Twilight	400	~270



3.6 Grenswaarden CO₂-dosering

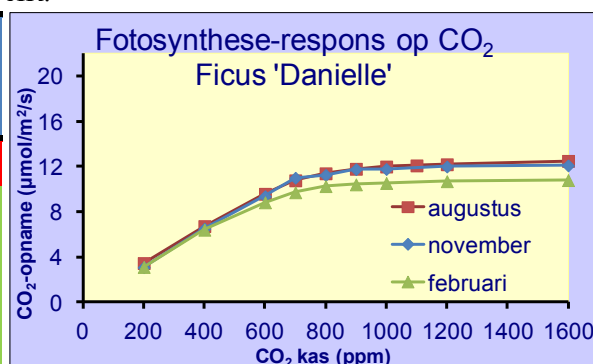
Net als de fotosynthese-respons op toenemend licht laat de fotosynthese-respons op toenemend CO₂ een verzadiging zien: Naarmate er meer CO₂ gedoseerd wordt, wordt de toename in CO₂-opname (fotosynthese) steeds kleiner. Uit Tabel 5 blijkt dat rond de 800-900 ppm het verzadigingsniveau wordt bereikt. Vanaf 1000 ppm neemt de huidmondjesopening af.

In absolute zin heeft CO₂ steeds meer effect naarmate er meer licht is. Een getallenvoorbeeld maakt dit duidelijk:

- Lichtintensiteit in de kas is 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$: bij 400 ppm is de fotosynthese 5.0 en bij 800 ppm 7.5 → toename van 2.5 door verhoogd CO₂.
- Lichtintensiteit in de kas is 500 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$: bij 400 ppm is de fotosynthese 15.0 en bij 800 ppm 22.5 → toename van 7.5 door verhoogd CO₂.

Tabel 5. Rendement CO₂-dosering bij 180 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR.

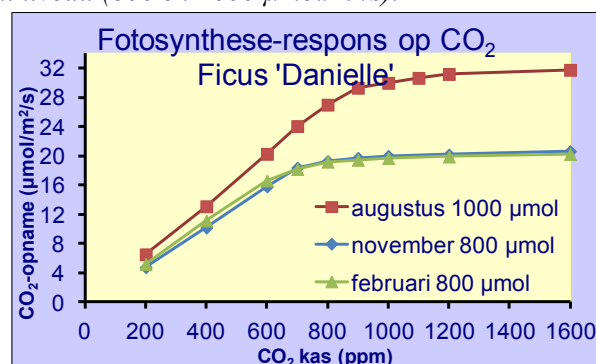
CO ₂ kas	Augustus % t.o.v. 400ppm	November	Februari
200	51%	47%	49%
400	100%	100%	100%
600	143%	144%	138%
700	160%	169%	152%
800	170%	173%	160%
900	175%	181%	163%
1000	178%	181%	165%
1200	180%		
1600	181%	185%	167%



Bij hoge lichtintensiteit stijgt de procentuele toename van de fotosynthese, het verzadigingsniveau ligt nog steeds op de 800-900 ppm (Tabel 6).

Tabel 6. Rendement CO₂-dosering bij verzadigend lichtniveau (800 en 1000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$).

CO ₂ kas	Augustus % t.o.v. 400ppm	November	Februari
200	50%	47%	47%
400	100%	100%	100%
600	155%	155%	149%
700	184%	181%	163%
800	206%	190%	172%
900	224%	194%	174%
1000	229%	197%	177%
1200	234%		
1600	238%	198%	178%



4. Conclusies en advies

In Tabel 7 staan de grenzen voor maximale lichtbenutting voor de fotosynthese, het CO₂-verzadigingsniveau en het lichtniveau waarboven lichtstress kan optreden. De verschillen tussen de cultivars ‘Danielle’ en ‘Twilight’ zijn groot: In november en februari is bij zowel ‘Danielle’ als ‘Twilight’ de lichtbenutting 100% tot 120 µmol daglicht + lamplicht. Maar let op: boven de 120 µmol daglicht + lamplicht daalt het rendement van ‘Twilight’ veel sneller dan bij ‘Danielle’ (Tabel 2). Opvallend is ook het grote verschil in lichtniveau waarbij lichtverzadiging en lichtstress optreedt tussen beide cultivars. Het is aan te raden beide cultivars zodanig te groeperen zodat er voor beide cultivars een andere belichtings- en schermstrategie kan worden aangehouden.

Tabel 7. Grenswaarde lichtintensiteit die nog voor 100% benut wordt en adviezen CO₂-dosering en lichtscherming bij ‘Danielle’ en ‘Twilight’.

	100% lichtbenutting (daglicht+lamplicht) tot aan:	CO ₂ -maximum	Lichtverzadiging (lichtstress), schermen bij:
Augustus			
Danielle	150 µmol	800-900 ppm	800 µmol
Twilight			600 µmol
November			
Danielle	120 µmol	800-900 ppm	700 µmol
Twilight	120 µmol		400 µmol
Februari			
Danielle	120 µmol	800-900 ppm	600 µmol
Twilight	120 µmol		400 µmol

Een belangrijk aandachtspunt voor efficiënte fotosynthese bij Ficus is de openingsstand van de huidmondjes. Het is niet geheel duidelijk waardoor deze vaak maar halfopen waren en zo dus beperkend waren voor de fotosynthese bij hogere lichtniveaus. In de zomer leek er een verband te zijn tussen de huidmondjessluiting en een verhoogde VPD. Echter gedurende de metingen in november en februari werd er ook huidmondjeslimitatie waargenomen terwijl de VPD onder de 1.0 kPa lag. Het verdient aanbeveling dit (mogelijke) verband nader te onderzoeken bij een reeks van wijd uiteenlopende VPD's onder gecontroleerde omstandigheden. Verder kwam tijdens de metingen naar voren dat de huidmondjes van Ficus sluiten bij ruwe bewegingen.

Een ander aandachtspunt is de huidmondjesopening aan het begin van de dag. Het is dus aan te bevelen om 's ochtends met een lage lichtintensiteit te starten. Huidmondjeslimitatie kan ten dele voorkomen worden door een verhoogde CO₂-concentratie. Het is dus aan te bevelen om de CO₂ gedurende die uren hoog (600-800 ppm) te houden om een verlaging in het lichtrendement te voorkomen. Maar let op: doseer zeker niet meer dan 1000 ppm, want dan ontstaat er juist weer een sluitingsrespons van de huidmondjes door het hoge CO₂.

Overige opmerkingen:

- Maximale lichtbenutting hoeft niet gelijk op te lopen met het economisch optimum.
 - Zoek balans tussen extra kosten belichting en meeropbrengst door hogere fotosynthese en/of kwaliteit.
- Lange termijn effecten van CO₂ doseren op de huidmondjes zijn onbekend.
 - Zorg voor de zekerheid dat de concentratie niet hoger is dan het punt waar het optimale rendement bereikt wordt!
 - Herkomst CO₂:
 - Doseren zuiver CO₂ is duur.
 - Hoge concentratie rookgassen geeft risico op verontreiniging (NO_x, ethyleen, etc.)
 - ‘Verwende’ bladeren (lagere CO₂-benutting bij continue blootstelling aan hoog CO₂).
 - Optimaal voor de plant is niet altijd economisch rendabel!
 - afhankelijk van de CO₂-kosten (raamstand / ventilatievoud)

Referenties

Dijkstra T, Van Marwijk D, De Rooij E, Verberkt H, Blaakmeer A, Schapendonk A, Pot CS, Voogt J. 2010. Make sense, Growsense. Wageningen: DLV, Grow@science, Plant Dynamics, Hoogendoorn automatisering, 175 blz.

Pot CS, Trouwborst G, Schapendonk AHCM. 2011. Handleiding gebruik van plantsensoren voor de fotosynthese in de praktijk. Wageningen: Plant Dynamics B.V., 28 blz.

Bijlage 1. Protocol voor belichting en CO₂-dosering Ficus

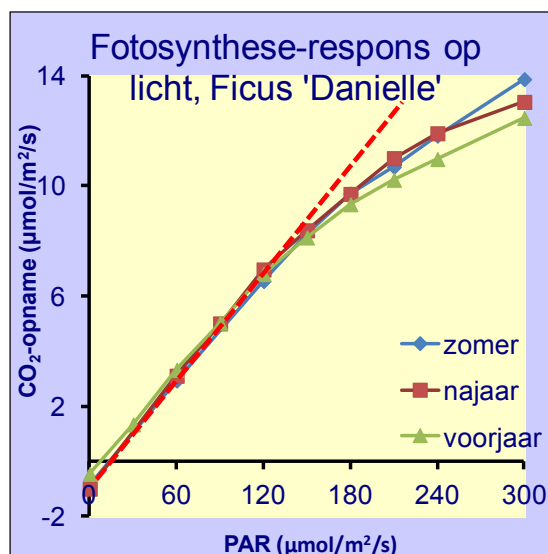
Grenswaarden belichting per seizoen

- Grenswaarde voor 100% lichtrendement (Tabel 1): 150 μmol in augustus en 120 μmol in november en februari.
- Fors verschil in rendement tussen de rassen 'Danielle' en 'Twilight' boven 120 μmol : apart sturen op beide cultivars!
- Teruglopend lichtrendement van augustus naar februari.

Tabel 1. Verloop van het fotosyntheserendement van 'Danielle' en 'Twilight' bij toenemend lichtniveau (daglicht+lamplicht). Zolang als de gemeten lijn evenwijdig met de rode stippellijn loopt is het fotosyntheserendement 100%.

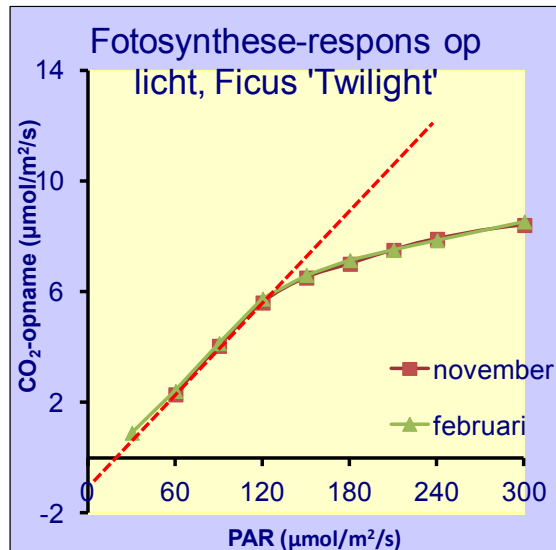
'Danielle':

PAR daglicht + lamplicht	augustus	november	februari
0-60	100%	100%	100%
60-90		100%	100%
90-120	100%	100%	100%
120-150	96%	81%	75%
150-180	84%	75%	68%
180-210	67%	74%	50%
210-240	62%	62%	43%
240-300	53%	32%	42%
300-500	31%	29%	17%
500-800	17%	9%	7%



'Twilight':

PAR daglicht + lamplicht	november	februari
0-60	100%	100%
60-90	100%	100%
90-120	97%	100%
120-150	56%	53%
150-180	31%	33%
180-210	31%	23%
210-240	25%	22%
240-300	16%	21%
300-500	7%	9%
500-800	5%	7%

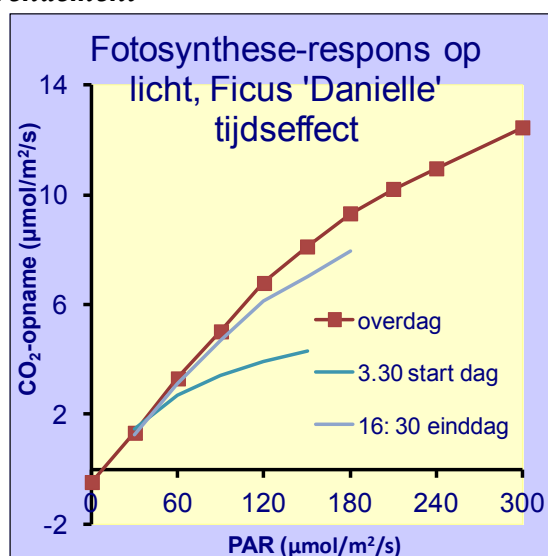


Anders belichten begin en einde dag?

- Fors rendementsverlies gedurende de eerste uren van de dag. Indien mogelijk het eerste uur de helft van de belichting aan. Bij een belichting lager dan 40 μmol is getrapt opschakelen niet nodig.
- Doordat de huidmondjes op die momenten limiterend voor de fotosynthese waren, is het aan te raden om op die momenten de CO_2 rond de 600-800ppm te houden (maar niet meer!) om verlies aan lichtrendement te beperken
- Ook rendementsverlies in het laatste uur van de dag: op tijd terugschakelen met de belichting of niet belichten aan het einde van de dag.

Tabel 2. Effect van tijdstip van de dag op het lichtrendement

PAR	start dag	overdag	eind dag
daglicht + lamplicht	3:30 uur		16:30 uur
	1.5 uur licht		
0-30	100%	100%	100%
30-60	71%	100%	100%
60-90	40%	100%	88%
90-120	29%	100%	82%
120-150	21%	75%	53%
150-180		68%	48%
180-210		50%	
210-240		43%	
240-300		42%	



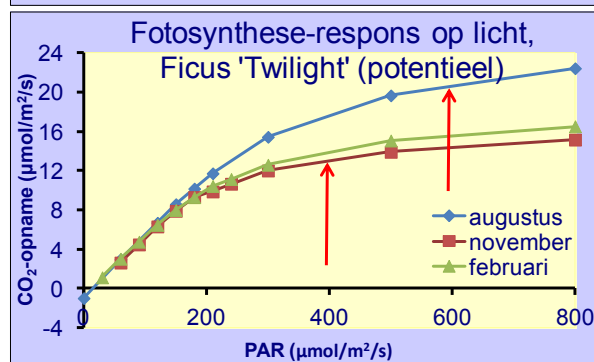
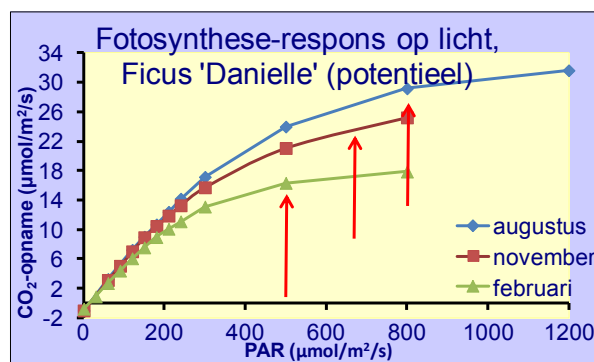
*De belichting stond aan van 2:00-17:00, zonsondergang ongeveer 18:00.

Grenswaarden scherming bij hoge instraling

- Langdurig hoge instraling geeft schade aan het fotosynthese-systeem in het blad.
- Bij lichtniveaus hoger dan de rode pijlen in de figuur bij Tabel 3 ontstaat er lichtstress.
- Bij Ficus-rassen die gevoelig zijn voor bladschade wordt schermen bij deze lichtniveaus aangeraden.

Tabel 3. Lichtgrens waarboven er lichtstress ontstaat.

	PAR binnen ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)	Straling buiten (Watt/m^2)
Augustus		
Danielle	800	~530
Twilight	600	~400
November		
Danielle	700	~470
Twilight	400	~270
Februari		
Danielle	600	~400
Twilight	400	~270

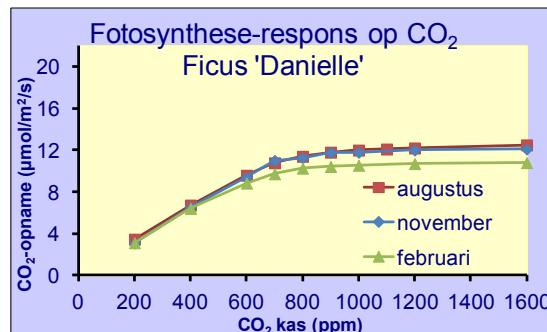


Grenswaarden CO₂-dosering

- Rond de 800-900 ppm wordt het verzadigingsniveau bereikt (Tabel 4).
- Bij hoge CO₂-concentraties (vanaf 1000 ppm) neemt de huidmondjesopening af! Dus maximaal tot 900 ppm doseren.

Tabel 4. Rendement CO₂-dosering.

CO ₂ kas	Augustus % t.o.v. 400ppm	November	Februari
200	51%	47%	49%
400	100%	100%	100%
600	143%	144%	138%
700	160%	169%	152%
800	170%	173%	160%
900	175%	181%	163%
1000	178%	181%	165%
1200	180%		
1600	181%	185%	167%



In absolute zin heeft CO₂ steeds meer effect naarmate er meer licht is. Een getallenvoorbeeld maakt dit duidelijk:

- Lichtintensiteit in de kas is 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$: bij 400 ppm is de fotosynthese 5.0 en bij 800 ppm 7.5 → toename van 2.5 door verhoogd CO₂.
- Lichtintensiteit in de kas is 500 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$: bij 400 ppm is de fotosynthese 15.0 en bij 800 ppm 22.5 → toename van 7.5 door verhoogd CO₂.

Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat bij een hoge instraling de ramen vaak (ver) open staan. Behoud van een hoge CO₂-concentratie in de kas vergt dan een hoge dosering en is daardoor wellicht niet rendabel.

Overige opmerkingen

- Maximale lichtbenutting hoeft niet gelijk op te lopen met het economisch optimum.
 - Zoek balans tussen extra kosten belichting en meeropbrengst door hogere fotosynthese en/of kwaliteit.
- Lange termijn effecten van CO₂ doseren op de huidmondjes zijn onbekend.
 - Zorg voor de zekerheid dat de concentratie niet hoger is dan het punt waar het optimale rendement bereikt wordt!
 - Herkomst CO₂:
 - Doseren zuiver CO₂ is duur.
 - Hoge concentratie rookgassen geeft risico op verontreiniging (NO_x, ethyleen, etc.)
 - ‘Verwende’ bladeren (lagere CO₂-benutting bij continue blootstelling aan hoog CO₂).
 - Optimaal voor de plant is niet altijd economisch rendabel!
 - afhankelijk van de CO₂-kosten (raamstand / ventilatievoud)

Bijlage 2. Omrekeningstabel Lux, Watt, μmol

PAR-licht is licht dat beschikbaar is voor de fotosynthese en heeft een bereik van 400-700 nm. PAR-licht wordt uitgedrukt in aantal deeltjes ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) en niet in energie (W/m^2). PAR staat voor photosynthetically active radiation (=fotosynthetisch actieve straling). Soms wordt ook PPFD (photosynthetic photon flux density) gebruikt. In de tabel wordt een omrekening gegeven.

Als er geen PAR-sensor in de kas beschikbaar is, dan kan op basis van de buitenstraling een schatting worden gemaakt van de lichtintensiteit in de kas:

- Buitenstraling (Kip solarimeter) meet globale straling (energie) in W/m^2 ($=\text{J}/\text{m}^2/\text{s}$)
- $1 \text{ W}/\text{m}^2$ globale straling $\approx 2.15 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR
- Kassen hebben een transmissie variërend tussen de 70-80%
- Omrekeningsfactor voor Watt buiten naar $\mu\text{mol}/\text{s}$ binnen: 1W buiten $= 2.15 * 0.7 = 1.5 \mu\text{mol}$ PAR binnen. Het getal 0.7 staat voor de kasdektransmissie.

Omrekeningstabel van Lux en Watt naar μmol PAR

PAR ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) (in de kas)	Lux SON-T*	Solarimeter (Watt/m^2) (buiten de kas)**
30	2300	20
60	4600	40
90	6900	60
120	9200	80
150	11500	100
180	13800	120
210	16200	140
240	18500	160
270	20800	180
300	23100	200
400		270
500		330
800		530
1200		800
1600		1060

*Omrekeningsfactor voor lux naar $\mu\text{mol}/\text{s}$: $1000 \text{ lux SON-T} = 13 \mu\text{mol}/\text{s}$

**Omrekeningsfactor voor Watt buiten naar $\mu\text{mol}/\text{s}$ binnen: 1W buiten $= 2.15 * 0.7 = 1.5 \mu\text{mol}$ PAR binnen. De factor 0.7 is een gemiddelde kastransmissie.