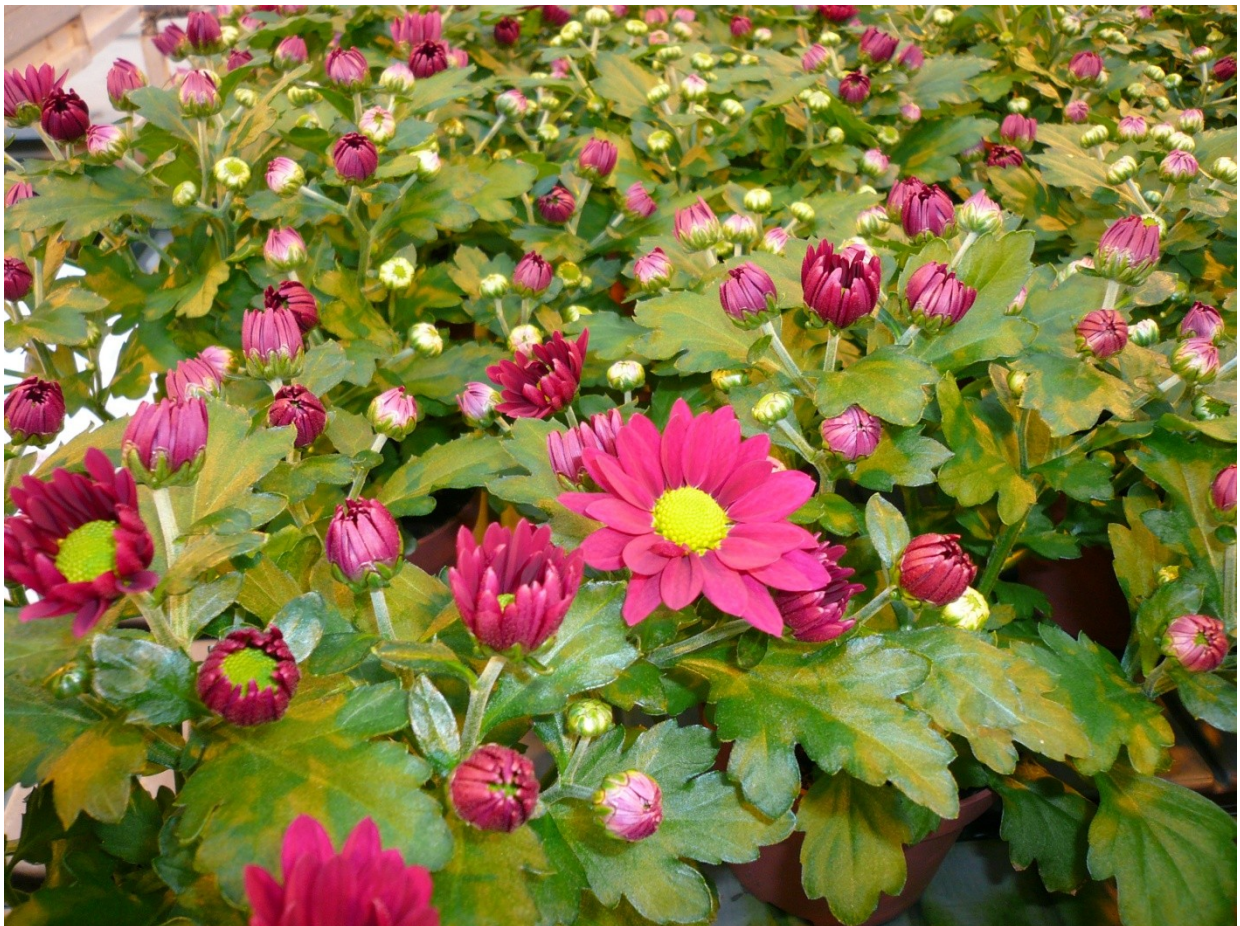


Meer rendement uit licht en CO₂ bij Potchrysant



Govert Trouwborst, Sander Hogewoning & Sander Pot
Juni 2013

Meer rendement uit licht en CO₂ bij Potchrysan

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 Potchrysan 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 en stadium op de fotosynthese?	11
3.2 Grenswaarden belichting per seizoen.....	12
3.3 Anders belichten begin en einde dag?	13
3.4 Grenswaarden scherming bij hoge instraling	14
3.5 Grenswaarden CO ₂ -dosering.....	14
4. Conclusies en advies	16
Referenties.....	18
Bijlage 1. Protocol voor belichting en CO₂-dosering potchrysan.....	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.

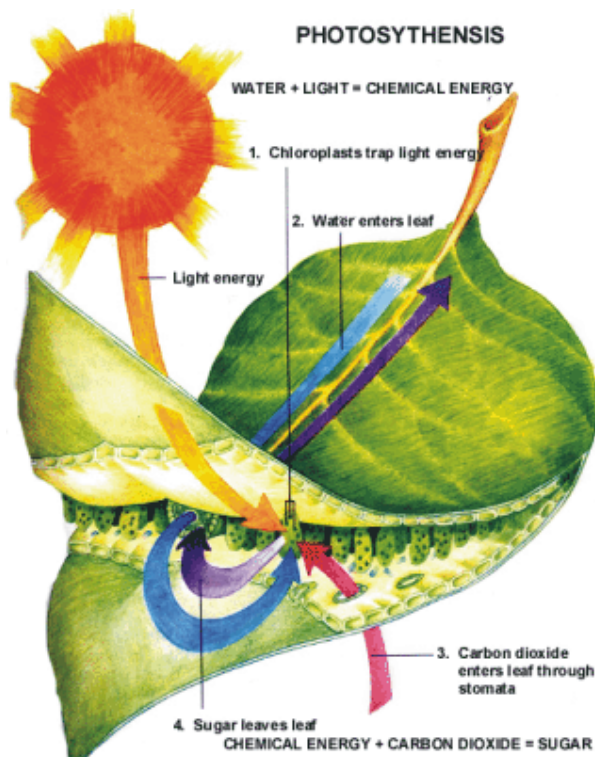


Fig. 1. Essentiële zaken rondom de fotosynthese: Lichtenergie wordt geabsorbeerd door het blad (1). Water komt binnen via de nerven (2). Tevens komt er CO₂ binnen via de huidmondjes (3). Met behulp van de lichtenergie worden er suikers gemaakt (4).

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.

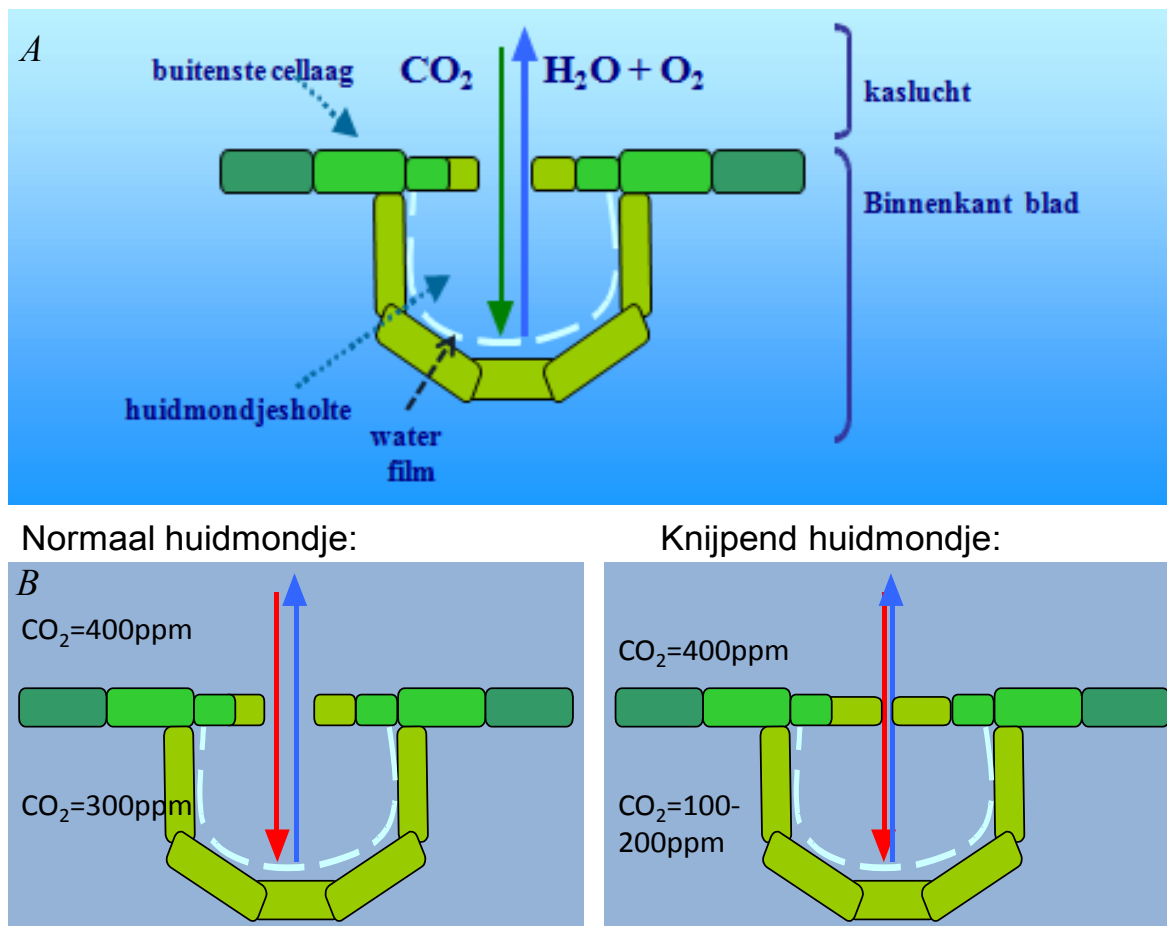


Fig. 2. Schematische tekening van een huidmondje (A) en het verschil tussen de CO_2 -concentratie in de kaslucht en in het blad door de mate van huidmondjesopening (B).

Potchrysant is, net als de meeste tuinbouwgewassen, van het type C_3 -plant, waarbij de opname van CO_2 overdag plaats vindt en hinder ondervindt van zuurstof. Voor een efficiënte fotosynthese bij C_3 -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.

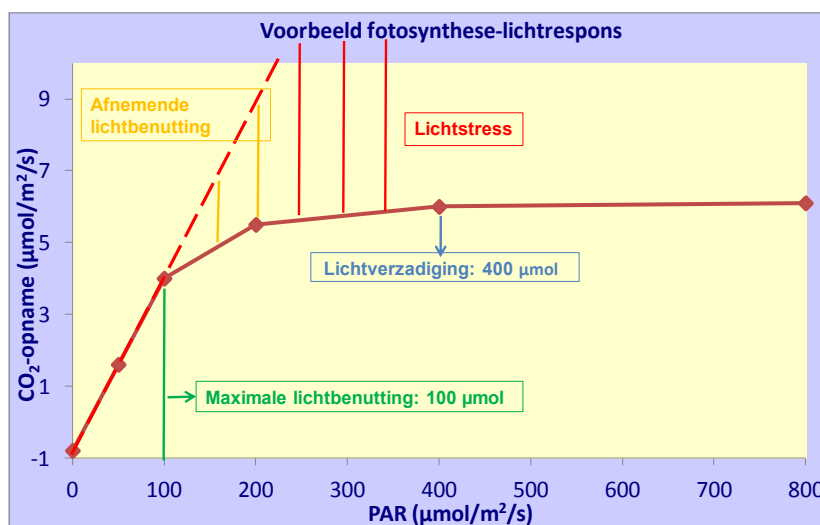


Fig. 3. Voorbeeld respons van de fotosynthese bij toenemende lichtintensiteit. Zolang als de fotosynthese meeloopt met de rood gestreepte lijn is de lichtrendement van de fotosynthese 100%. Het is vooral interessant om in dit gebied te belichten. Naarmate de 2 lijnen verder uit elkaar gaan lopen (weergegeven 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/m³)
- 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).

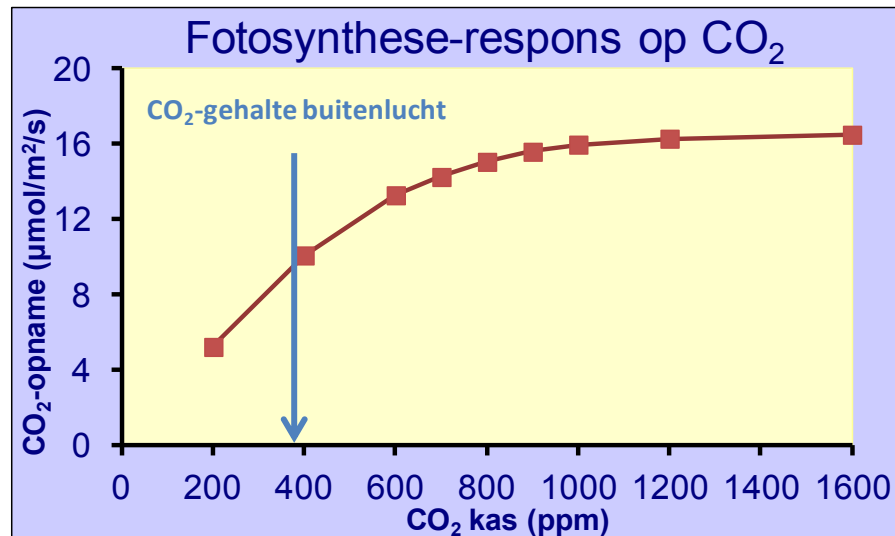


Fig. 4. Voorbeeld respons van de fotosynthese bij toenemend CO₂. Van lage naar hoge CO₂-concentraties in de kas neemt de fotosynthese eerst snel toe om vervolgens bij hoge concentraties sterk af te vlakken.

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:

1. Rookgasverontreiniging: verhoogde concentraties NO_x en/of ethyleen in de kas → schade aan gewas / knopval
2. Kosten: bij gebruik van zuivere CO₂ speelt het probleem van rookgasverontreiniging niet, maar leidt meer CO₂ doseren dan nodig is wel tot onnodige kosten
3. 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.
4. 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 potchrysant cultivars ‘Ramires’, ‘Robinho’ en ‘Fabiano’ in de stadia jong (ongetopt; ±14 dagen na stekken) en bloei (bloemkleur net zichtbaar; ±65 dagen na stekken). Beide stadia kregen korte dag behandeling (11 uur licht). Voor details, zie Tabel 1.

Tabel 1. Plantstadia en cultivars die gemeten zijn.

	potchrysant ‘Ramires’	‘Robinho’	‘Fabiano’
Augustus	Jong (ongetopt)	Jong (ongetopt)	Jong (ongetopt)
November	Jong (ongetopt)		
	bloei		
Februari	Jong (ongetopt)		
	bloei		

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 en stadium op de fotosynthese?

De fotosynthese-lichtrespons verschilde niet tussen de cultivars 'Fabiano', 'Robinho' en 'Ramires' (Fig. 5). In fig. 5 wordt ook de potentiële fotosynthese weergegeven (rode lijn). Deze lijn is bepaald door middel van chlorofyl-fluorescentie, (voor uitleg chlorofyl fluorescentie 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.

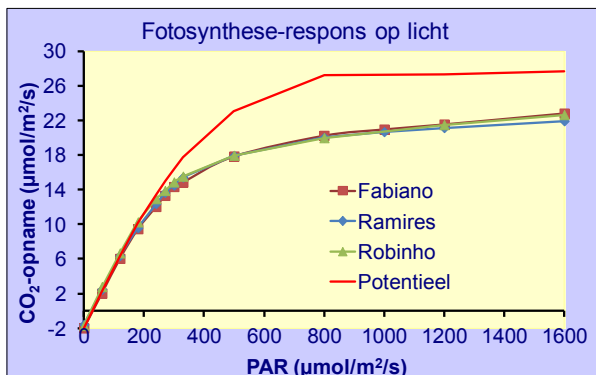


Fig. 5. Lichtrespons op de fotosynthese van drie potchrysant cultivars. De rode lijn geeft aan wat potentieel haalbaar is. Of de gerealiseerde fotosynthese in de buurt komt van de rode lijn is o.a. afhankelijk van de beschikbaarheid van CO₂ en de huidmondjesopening.

De fotosynthese-lichtrespons van jonge bladeren verschilde tot een intensiteit lamplicht plus daglicht van 180 μmol/m²/s nauwelijks van bladeren van planten in het bloei-stadium (Fig. 6). Boven dit lichtniveau neemt de fotosynthese van bladeren in het bloeistadium nog fors toe terwijl de jonge bladeren sneller lichtverzadigd zijn en een lagere fotosynthese-capaciteit hebben. De oudere bladeren (bloeistadium) waren donkergroen en dikker terwijl de jonge bladeren dun en lichtgroen waren.

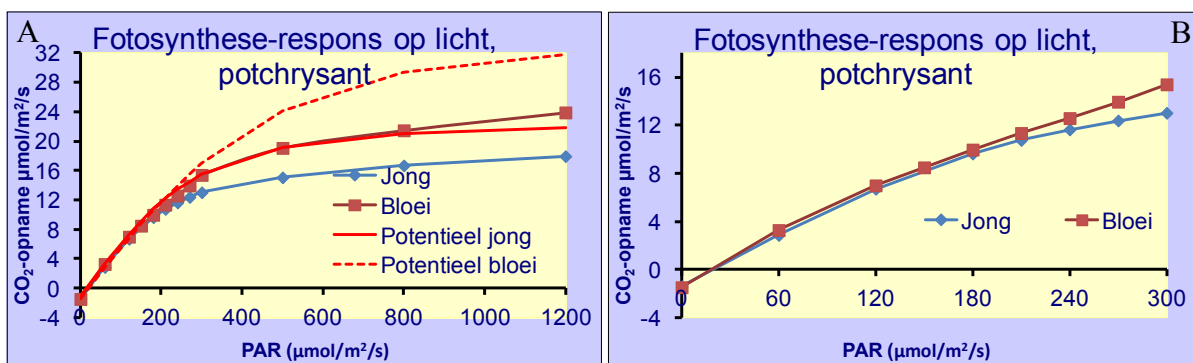


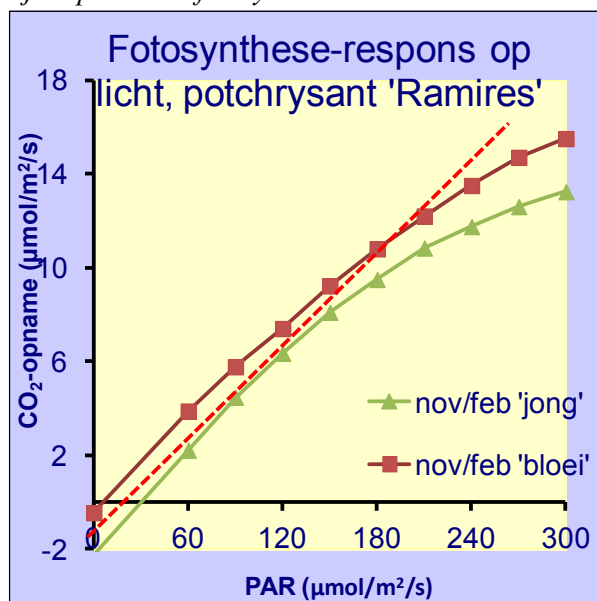
Fig. 6. A: Lichtrespons op de fotosynthese van 'Ramires' in de stadia jong (ongetopt) en bloei. De rode lijn geeft aan wat potentieel haalbaar is (data zomer). B: Zelfde als A maar ingezoomd op lage lichtintensiteiten.

3.2 Grenswaarden belichting per seizoen

Door de lagere fotosynthese-capaciteit van de jonge bladeren neemt het lichtrendement voor deze bladeren sneller af dan voor bladeren in het bloeistadium. In het bloeistadium blijft tot een intensiteit lamplicht plus daglicht 180 μmol het lichtrendement maximaal (Tabel 2). Pas boven de 270 μmol daglicht plus lamplicht daalt het lichtrendement snel en wordt het sneller onrendabel om door te gaan met belichten. Bij de jonge bladeren blijft het lichtrendement tot een intensiteit lamplicht plus daglicht van 150 μmol maximaal en begint het lichtrendement vanaf 210 μmol rap te dalen (Tabel 2). De verschillen tussen de seizoenen waren gering.

Tabel 2. Verloop van het fotosyntheserendement bij toenemend lichtniveau in het bloeistadium. Zolang als de gemeten lijnen evenwijdig met de rode stippellijn lopen is het fotosyntheserendement 100%.

PAR daglicht + lamplicht	Jong november & februari	Bloei november & februari
0-60	100%	100%
60-90	100%	100%
90-120	100%	100%
120-150	100%	100%
150-180	88%	99%
180-210	84%	88%
210-240	57%	82%
240-270	54%	75%
270-300	40%	50%
300-500	21%	26%
500-800	11%	13%
800-1200	6%	8%



Concreet betekent dit het volgende voor een aantal voorbeeldsituaties:

- *Situatie 1.* De lampen met een lichtintensiteit van 80 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ staan in de winter om 7:00 's ochtends aan en de lichtintensiteit aan daglicht is verwaarloosbaar → Het lamprendement op de fotosynthese is 100%.
- *Situatie 2.* De lampen met een lichtintensiteit van 80 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ staan om 10.00 's ochtends aan. Op een bewolkte dag in februari is de zonlichtintensiteit in de kas zo'n 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. → bij elkaar is er dan 110 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ licht in de kas → Het lamprendement op de fotosynthese is voor beide stadia nog 100%.
- *Situatie 3.* De lampen met een lichtintensiteit van 80 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ staan om 10.00 's ochtends aan. Op een heldere dag in februari is de zonlichtintensiteit in de kas al 150 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ → bij elkaar is er dan 230 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ licht in de kas → rendement van het lamplicht op de fotosynthese zakt voor het bloeistadium tot ~82-88% en voor het jonge stadium tot gedeeltelijk ~84% en voor de laatste 20 μmol 57%. Het is dan zeker voor het jonge stadium 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 Anders belichten begin en einde dag?

Potchrysan laat tot 180 μmol daglicht plus lamplicht geen verlies aan rendement zien aan het begin en einde van de dag (Fig. 7A). De huidmondjesgeleidbaarheid is op die momenten niet hoog (Fig. 7B), maar dus net niet limiterend voor de fotosynthese. Op die momenten was het CO_2 in de kas 600 ppm. Als er geen CO_2 gedoseerd zou zijn, dan zou de fotosynthese wel gelimiteerd zijn geweest. In februari werden dezelfde patronen gemeten. Opvallend is dat de huidmondjes in het jonge stadium verder open staan dan in het bloeistadium (Fig. 7B). In februari werden de praktijkmetingen verricht aan jonge planten die net een dag onder het plastic vandaan waren. Deze bladeren hadden een zeer hoge huidmondjesgeleidbaarheid die ongeveer twee keer zo hoog lag als de maximaal gemeten geleidbaarheid van planten in het bloeistadium.

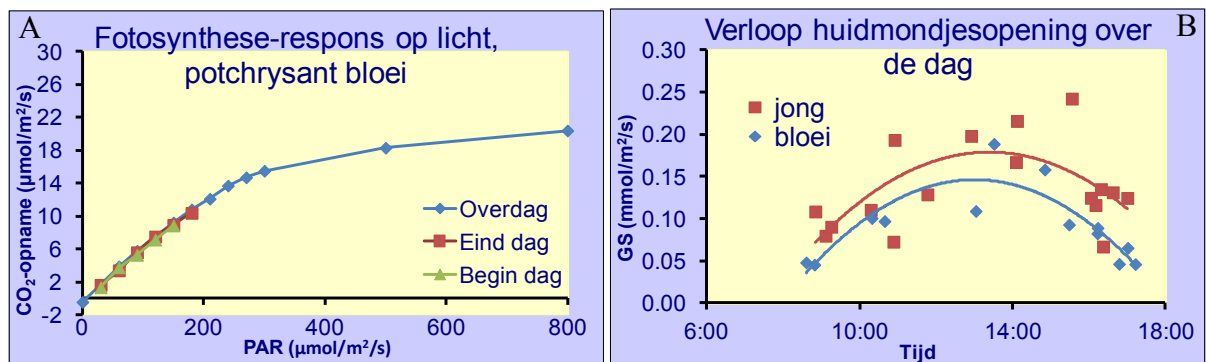


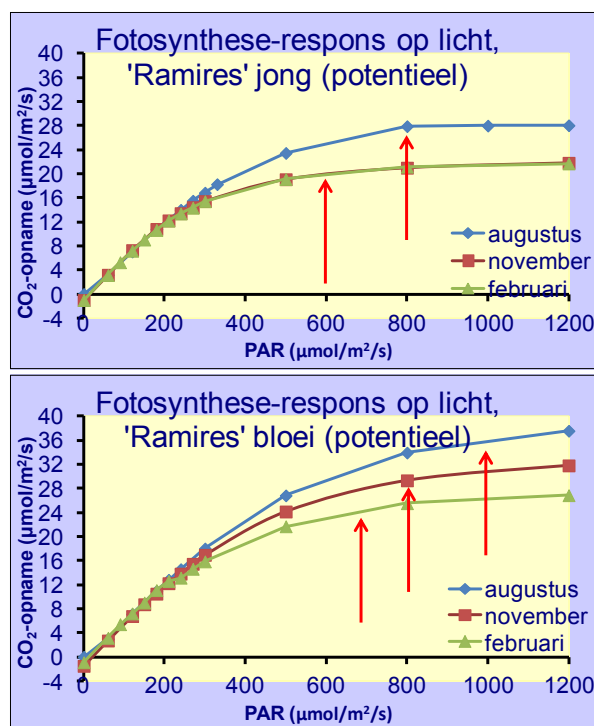
Fig. 7. A: Geen effect van het begin en einde van de dag op de fotosynthese-lichtrespons in november en februari, de CO_2 in de kas was ongeveer 600 ppm. B: Verloop van de huidmondjesopening over de dag. De lijnen geven een ruwe trend weer (data november, de data van februari lieten hetzelfde patroon zien).

3.4 Grenswaarden scherming bij hoge instraling

Bij de getekende rode pijlen in de figuur bij Tabel 3 is het lichtrendement dermate laag dat langdurige blootstelling schade aan het fotosynthese-systeem in het blad kan geven (lichtstress). Bij rassen die gevoelig zijn voor bladschade wordt screenen aangeraden. Dit lichtniveau ligt voor de jonge planten 100-200 μmol lager dan voor planten in het bloeistadium.

Tabel 3. Lichtgrens waarboven er lichtstress ontstaat aan het fotosynthesesysteem (jong en bloeistadium).

	PAR binnen ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)	Straling buiten (Watt/m^2)
Augustus		
Jong	800	~530
Bloei	1000	~670
November		
Jong	600	~400
Bloei	800	~530
Februari		
Jong	600	~400
Bloei	700	~470



3.5 Grenswaarden CO₂-dosering

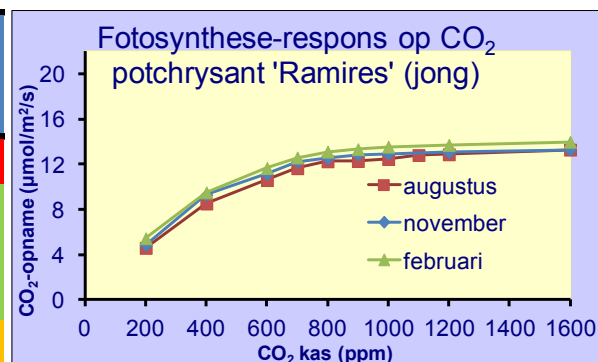
Net als de fotosynthese-respons op toenemend licht laat de fotosynthese-respons op toenemend CO₂ een verzadiging zien: Naarmate er meer CO₂ gedoseerd wordt, wordt de toename in CO₂-opname (fotosynthese) steeds kleiner. Uit Tabel 4 blijkt dat rond de 700-800 ppm het verzadigingsniveau wordt bereikt.

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 4. Rendement CO₂-dosering bij 240 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR.

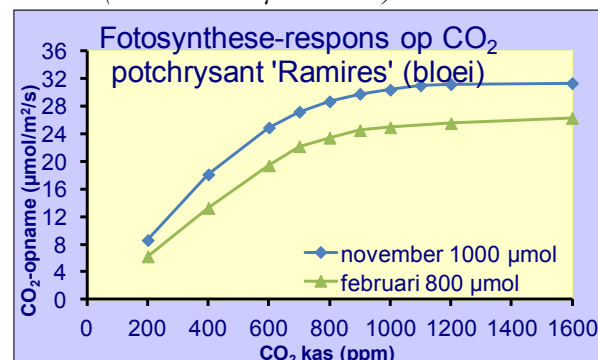
CO ₂ kas	Augustus % t.o.v. 400ppm	November	Februari
200	54%	52%	57%
400	100%	100%	100%
600	124%	120%	123%
700	137%	132%	133%
800	144%	135%	138%
900	144%	138%	140%
1000	146%	139%	143%
1100	150%		
1200	151%	141%	144%
1600	156%	143%	147%



Bij hoge lichtintensiteit stijgt de procentuele toename van de fotosynthese, en wordt het verzadigingsniveau ook bij een hoger niveau CO₂ (900 ppm) bereikt (Tabel 5).

Tabel 5. Rendement CO₂-dosering bij verzadigend lichtniveau (800 en 1000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$).

CO ₂ kas	November % t.o.v. 400ppm	Februari
200	47%	47%
400	100%	100%
600	137%	146%
700	150%	167%
800	159%	177%
900	165%	185%
1000	168%	188%
1200	172%	193%
1600	173%	198%



4. Conclusies en advies

Potchrysan is fotosynthetisch gezien een redelijk makkelijk gewas dat redelijk veel licht aankan. Het jonge stadium is wat gevoeliger voor lichtstress dan het bloeistadium en hier zal iets eerder geschermd moeten worden. In Tabel 7 staan de grenzen voor maximale lichtbenutting voor de fotosynthese, het CO₂-verzadigingsniveau en het lichtniveau waarboven lichtstress kan optreden.

Een aandachtspunt is de huidmondjesopening aan het begin en einde van de dag. De geleidbaarheid van vooral de planten in het bloeistadium was niet hoog. Doordat er 600 ppm CO₂ in de kas aanwezig was, waren de huidmondjes niet limiterend voor de fotosynthese. Dit zou wel het geval kunnen zijn als er niet gedoseerd wordt. Het is dus aan te bevelen om het CO₂ op die momenten op peil te houden om het lichtrendement te behouden.

Tabel 7. Grenswaarde lichtintensiteit die nog voor 100% benut wordt en adviezen CO₂-dosering en lichtscherming.

		100% lichtbenutting (daglicht+lamplicht) tot aan:	CO ₂ -maximum	Lichtverzadiging (lichtstress), schermen bij:
Augustus	Jong	180 µmol	700 ppm	800 µmol
	Bloei	180 µmol	700-900 ppm	1000 µmol
November	Jong	150 µmol	700 ppm	600 µmol
	Bloei	180 µmol	700-900 ppm	800 µmol
Februari	Jong	150 µmol	700 ppm	600 µmol
	Bloei	180 µmol	700-900 ppm	700 µmol

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

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

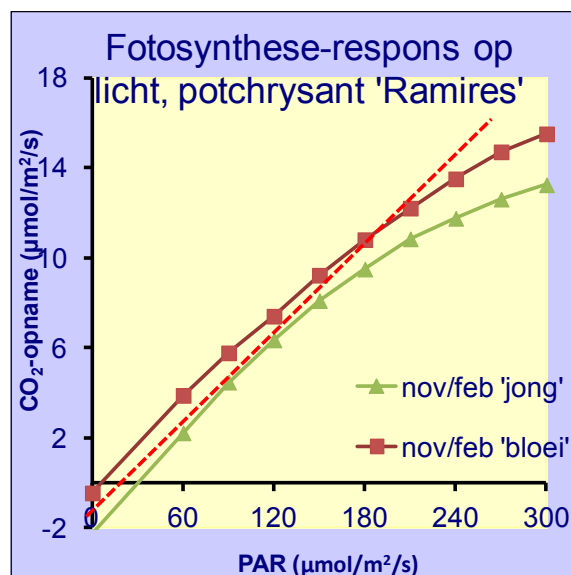
Bijlage 1. Protocol voor belichting en CO₂-dosering potchryasant

Grenswaarden belichting per seizoen

- Geen noemenswaardig verschil tussen de cultivars 'Ramires', 'Robinho' en 'Fabiano'.
- Geen verschil in lichtrendement tussen november en februari bij de stadia jong of bloei.
- Grenswaarde voor 100% lichtrendement (Tabel 1) jong: 150 μmol en bloei: 180 μmol .

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

PAR daglicht + lamplicht	Jong november & februari	Bloei november & februari
0-60	100%	100%
60-90	100%	100%
90-120	100%	100%
120-150	100%	100%
150-180	88%	99%
180-210	84%	88%
210-240	57%	82%
240-270	54%	75%
270-300	40%	50%
300-500	21%	26%
500-800	11%	13%
800-1200	6%	8%



Anders belichten begin en einde dag?

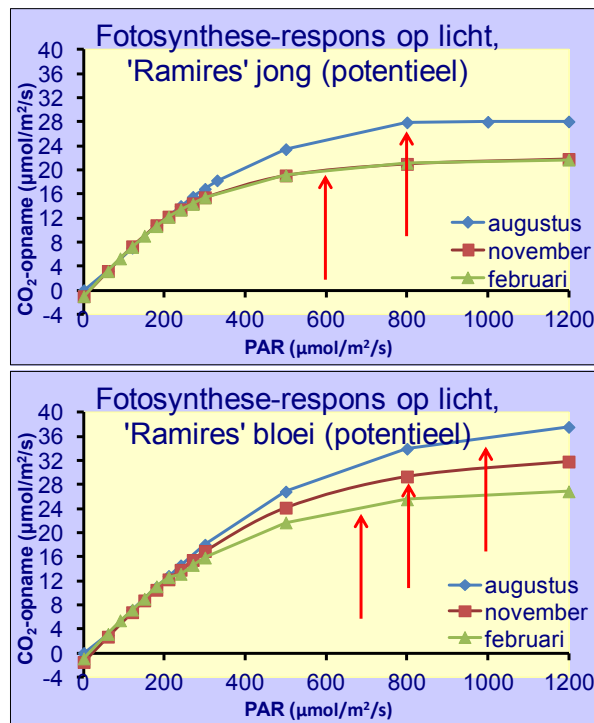
- Geen rendementsverlies gedurende het eerste en laatste uur van de dag waargenomen.
- De huidmondjes waren op die momenten net ver genoeg open om niet beperkend te zijn. Het is aan te raden om op die momenten de CO₂ rond de 600-700ppm te houden om verlies aan lichtrendement te voorkomen.

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 2 ontstaat er lichtstress.
- Bij rassen die gevoelig zijn voor bladschade wordt schermen bij deze niveaus aangeraden.
- Dit lichtniveau ligt voor de jonge planten 100-200 μmol lager dan voor planten in het bloeistadium.

Tabel 2. Lichtgrens waarboven er lichtstress ontstaat.

	PAR binnen ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)	Straling buiten (Watt/m^2)
Augustus		
Jong	800	~530
Bloei	1000	~670
November		
Jong	600	~400
Bloei	800	~530
Februari		
Jong	600	~400
Bloei	700	~470

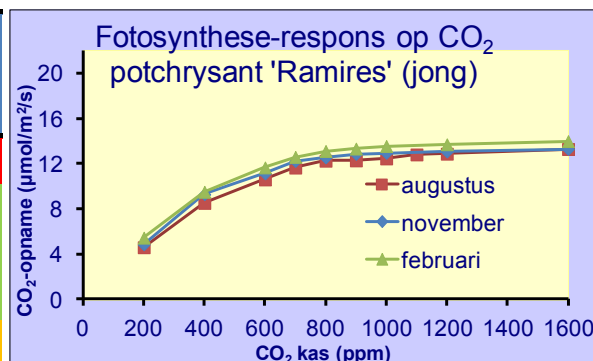


Grenswaarden CO₂-dosering

- Bij lichtniveaus rond de 240 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR wordt bij 700-800 ppm het verzadigingsniveau voor CO₂ bereikt (Tabel 3). Bij deze lichtniveaus en daaronder voegt meer doseren dan 700 ppm al weinig meer toe!
- Bij hoge lichtniveaus (800 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR) ligt de CO₂-verzadiging op 900 ppm, dus maximaal tot 900 ppm doseren.

Tabel 3. Rendement CO₂-dosering.

CO ₂ kas	Augustus % t.o.v. 400ppm	November	Februari
200	54%	52%	57%
400	100%	100%	100%
600	124%	120%	123%
700	137%	132%	133%
800	144%	135%	138%
900	144%	138%	140%
1000	146%	139%	143%
1100	150%		
1200	151%	141%	144%
1600	156%	143%	147%



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.