

Meer rendement uit licht en CO₂ bij Alstroemeria



Govert Trouwborst, Sander Hogewoning & Sander Pot
Juli 2015

Meer rendement uit licht en CO₂ bij Alstroemeria

Juli 2015

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

www.plant-dynamics.nl
sander@plant-dynamics.nl

Deze studie naar grenswaarden voor een energie-efficiënte belichtingsstrategie en CO₂-dosering bij het gewas Alstroemeria 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.

© 2015 Bunnik, Plant Lighting B.V. & Randwijk, 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.

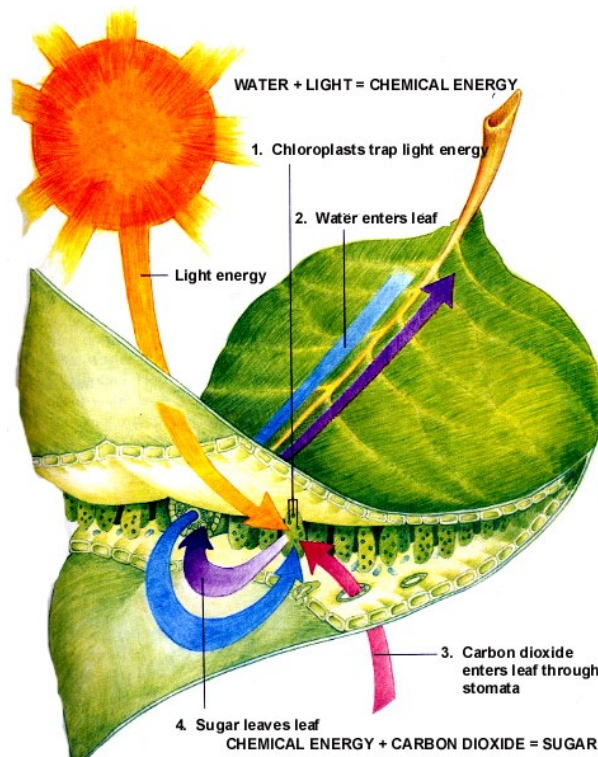
Inhoudsopgave

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	8
2.1 Inleiding	8
2.2 Plantmateriaal en meetcondities.....	8
2.3 Meten van de fotosynthese.....	8
3. Resultaten fotosynthesemetingen.....	10
3.1 Effect van cultivar op de fotosynthese?	10
3.2 Grenswaarden belichting per seizoen.....	10
3.3 Effect van de huidmondjes op de fotosynthese?	12
3.4 Anders belichten begin en einde dag?.....	13
3.5 Fotosynthese dieper in het gewas?	15
3.6 Grenswaarden scherming bij hoge instraling	16
3.7 Grenswaarden CO ₂ -dosering.....	17
4. Conclusies en advies	19
Referenties.....	21
Bijlage 1. Protocol voor belichting en CO₂-dosering Alstroemeria.....	i
Bijlage 2. Omrekeningstabel Lux, Watt, μmol.....	iv

1. Inleiding

1.1 Inleiding fotosynthese

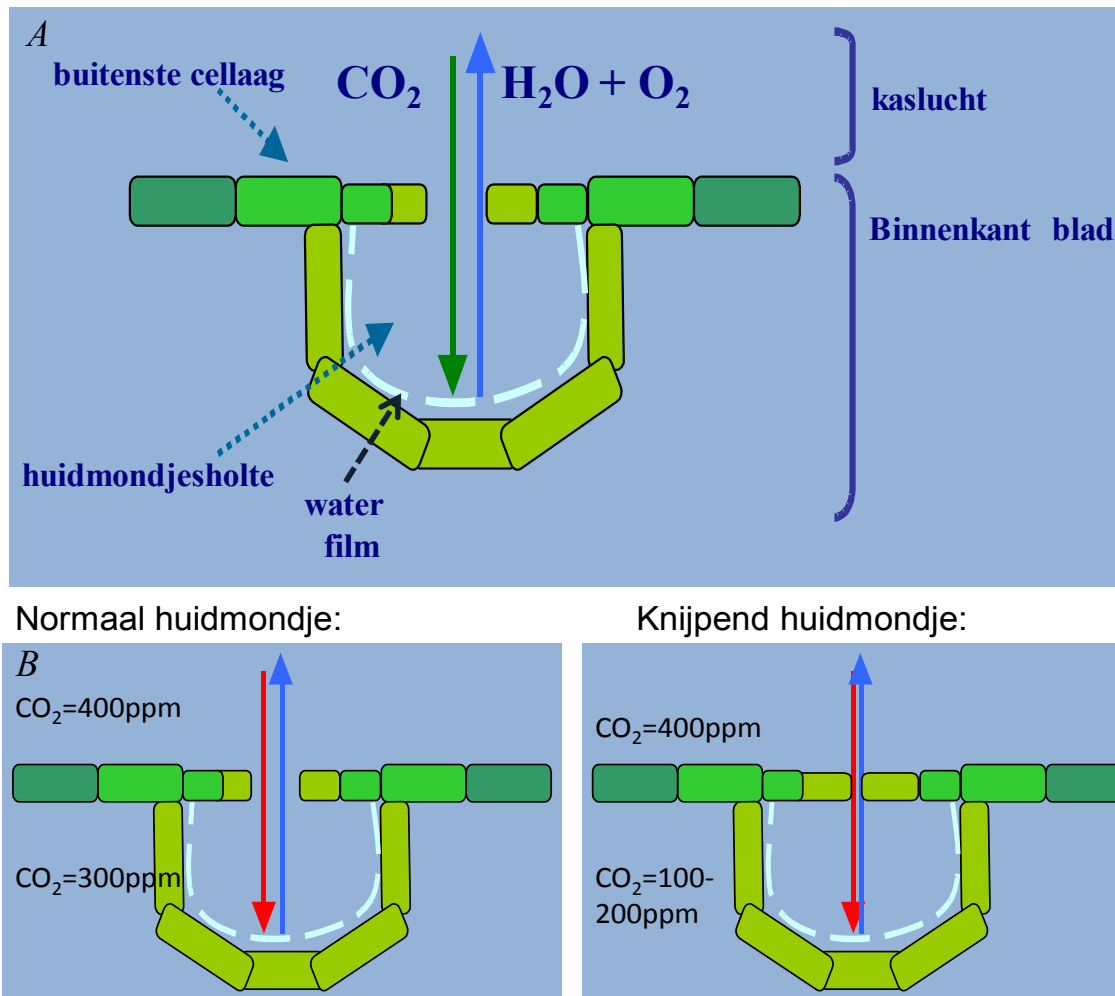
Planten nemen water en voedingsstoffen op via hun wortels en CO_2 via de huidmondjes in hun bladeren. Fotosynthese is het proces waarbij de plant met behulp van lichtenergie het opgenomen water en CO_2 omzet in suikers (assimilaten). De fotosynthese is dus de motor van de plant en CO_2 fungeert als brandstof. 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.



Figuur 1. Essentiële zaken rondom de fotosynthese: Lichtenergie wordt geabsorbeerd door het blad (1). Water komt binnen via de nerven (2). Tevens komt er CO_2 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 CO_2 -opname bij verschillende CO_2 -concentraties te meten. Uit deze metingen komt naar voren tot waar CO_2 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 CO_2 naar binnen kan gaan (zie nr. 3 in Fig. 1 en Fig. 2A). Bij een grotere geleidbaarheid van de huidmondjes komt de CO_2 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.



Figuur 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).

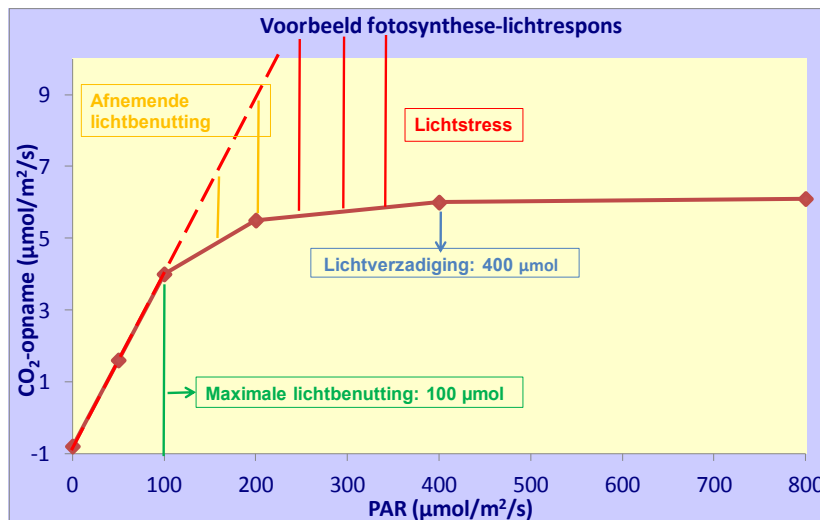
Alstroemeria is, net als de meeste tuinbouwgewassen, een C_3 -plant. Bij de C_3 -planten vindt de opname van CO_2 in het licht plaats en ondervindt hinder van zuurstof. Voor een efficiënte fotosynthese bij C_3 -planten is het dus essentieel dat de huidmondjes goed openen. Bij slechte huidmondjesopening is de CO_2 concentratie in het blad laag en wordt teveel O_2 in plaats van CO_2 gebonden aan Rubisco¹. Dat kost veel energie. Redenen dat een huidmondje dicht kan

¹ Dit proces wordt fotorespiratie genoemd. Voor meer uitleg over fotorespiratie, zie Pot *et al.* 2015.

gaan zijn onder andere: een te hoog CO₂-niveau in de kaslucht, een beperking in de wateropname, of een te hoog dampdruk-deficit tussen kaslucht en blad (VPD)². 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 schermen soms meer netto resultaat op dan wat het verlies aan licht kost.

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 nog hogere lichtintensiteiten is de fotosynthese lichtverzadigd (1% meer licht= 0% meer fotosynthese) en ontstaat lichtstress. Let op: alle lichtrespons-metingen volgens onderstaand voorbeeld zijn in dit onderzoek uitgevoerd aan bladeren bovenin het gewas. Het verval in rendement waarmee licht benut wordt bij toenemende lichtintensiteiten is voor een heel gewas minder steil dan voor een enkel blad.



Figuur 3. Voorbeeld respons van de fotosynthese bij toenemende lichtintensiteit. Zolang als de fotosynthese meeloopt met de rood gestreepte lijn is het lichtrendement voor de fotosynthese 100%. Naarmate de 2 lijnen verder uit elkaar gaan lopen (weergegeven via de oranje en rode verticale lijnen) is er sprake van een steeds lager lichtrendement. Bij een afnemend lichtrendement geeft belichten steeds minder toegevoegde waarde. Bij een te hoge lichtintensiteit ontstaat zelfs lichtstress.

² 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.

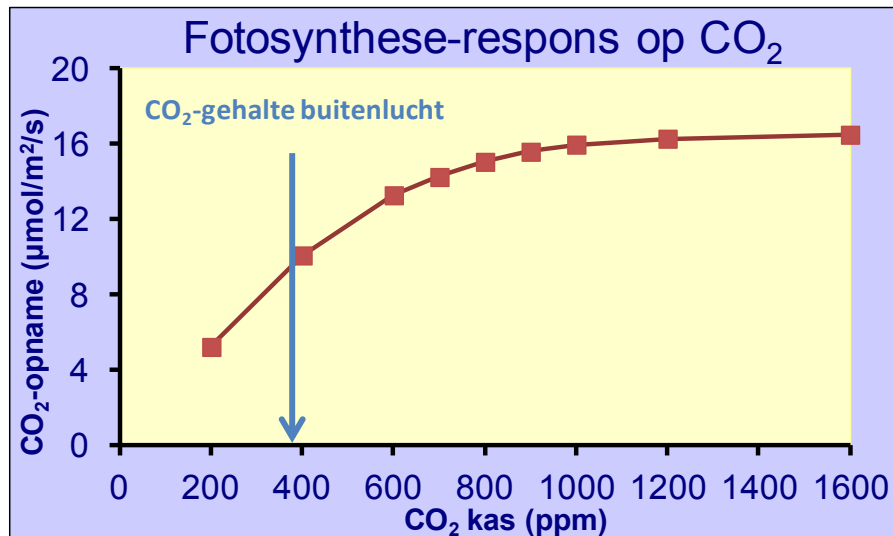
De VPD wordt als volgt bepaald:

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 is 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).



Figuur 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: Door langdurige blootstelling aan verhoogd CO₂ kan Rubisco (het enzym dat CO₂ bindt om suikers te maken) 'lui' worden. 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.

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 geschermd 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 en meetcondities

Gewas: Alstroemeria

Cultivar: 'Rome' en 'Virginia'

Plantstadium / leeftijd: planting 2012 (Rome in week 10 en Virginia in week 14)

Er is gemeten in de zomer (augustus 2014), het late najaar (november 2014) en het einde van de winter (februari 2015) aan jong volgroeide/onbeschaduwde bladeren. Voor details over de teeltcondities tijdens de meetperioden, zie Tabel 1.

Tabel 1. Teeltcondities tijdens de meetperioden.

	Augustus 2014	November 2014	Februari 2015
Straling (piek)	400-500 W (meteo) zonnig	< 60 W (meteo) bewolkt	300-400 W (meteo) overwegend zonnig
Belichting $\mu\text{mol SON-T}$	50 μmol (> 200W uit)	100 μmol 1:00 – 17:00 uur	100 μmol 0:00 – 17:00 (> 300W uit)
CO ₂	\pm 550-700 ppm	\pm 700-800 ppm	\pm 700-800 ppm
T range dag	18-26	17-20	18-23
RV range dag	50-60%	60-70%	50-75%
Overige opmerkingen	600-700 Watt schermen	Alleen 's nachts licht (energie) doek dicht	Alleen 's nachts licht (energie) doek dicht

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 bij een vast niveau van 600 ppm CO₂. 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 bepaald wordt hoe 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.



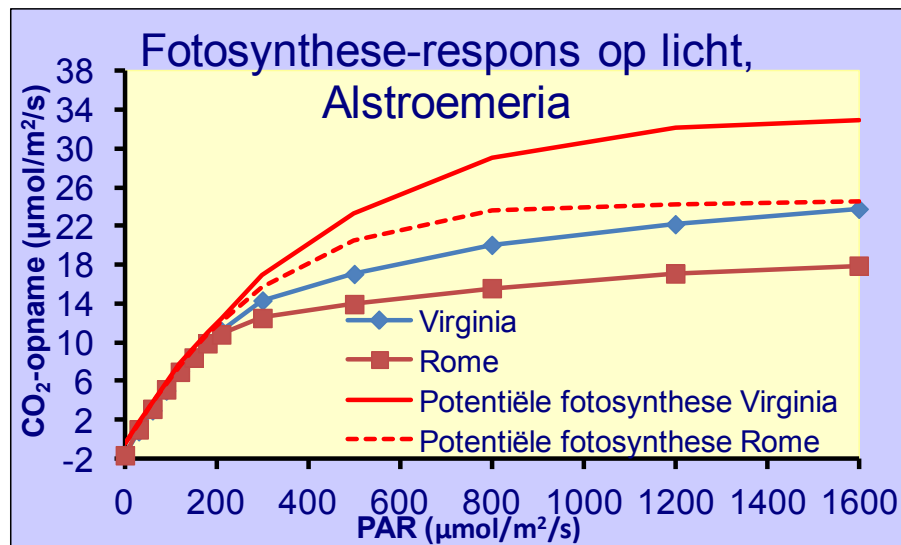
Foto 1. LI-COR-6400 draagbare fotosynthesemeter voor het meten van de CO₂ opname (fotosynthese) in de praktijk. In het apparaat kunnen PAR, CO₂, temperatuur en vocht gevarieerd worden. Op deze manier is de fotosynthese-snelheid gemeten bij oplopend PAR of CO₂ aan een ingeklemd blad (rode pijl).

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, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, en 1200 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?

Bij lichtintensiteiten tot $210 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ verschilde de fotosynthese-lichtrespons nauwelijks tussen de cultivars ‘Virginia’ en ‘Rome’ (Figuur 5). De fotosynthese onder hogere lichtniveaus lag bij ‘Rome’ wat lager. In figuur 5 wordt ook de potentiële fotosynthese weergegeven (rode lijnen). Deze lijnen zijn 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 CO_2 en de mate van huidmondjesopening. Bij de wat hogere lichtniveaus ligt de potentiële fotosynthese beduidend hoger dan de gerealiseerde fotosynthese vanwege knijpende huidmondjes. Behalve voor de november-metingen, was onder hogere lichtniveaus de potentiële fotosynthese van ‘Virginia’ hoger dan van ‘Rome’.



Figuur. 5. Lichtrespons op de fotosynthese van Alstroemeria ‘Virginia’ en ‘Rome’. De rode lijnen geven 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 CO_2 en de huidmondjesopening. Alle lichtrespons-curves zijn gemeten bij 600 ppm CO_2 (data februari).

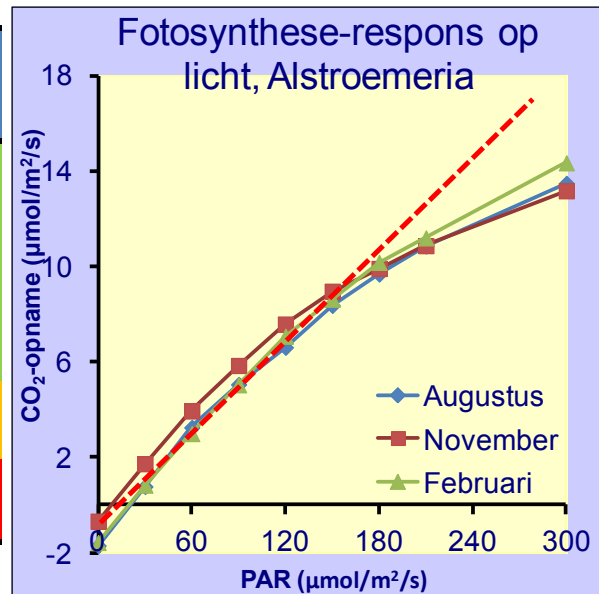
3.2 Grenswaarden belichting per seizoen

In onderstaande figuur (behorend bij tabel 2) staat de gemiddelde lichtrespons weergegeven per seizoen. De lijnen zijn ‘ingezoomd’ op lage lichtintensiteiten (tot $300 \mu\text{mol}$). Het lichtrendement tussen ‘Virginia’ en ‘Rome’ verschilde nauwelijks en wordt niet apart weergegeven. In november en februari blijft het lichtrendement boven 95% tot een intensiteit lamplicht plus daglicht van $120 \mu\text{mol}$ (Tabel 2). Boven deze lichtintensiteit daalt het lichtrendement snel en wordt het sneller onrendabel om door te gaan met belichten. Doordat de fotosynthese-capaciteit (deze is gemeten bij lichtverzadiging) in november wat lager ligt dan in de maanden augustus en februari (figuren in tabel 3), neemt het lichtrendement in die periode sneller af. Opvallend is het hoge rendement in de range van $150\text{-}180 \mu\text{mol}$ van de februari-

meting. Waarschijnlijk heeft dit te maken met de gunstige klimaatcondities (vocht en CO₂) ten opzichte van een vaak schraler klimaat in de zomer.

Tabel 2. Verloop van het fotosyntheserendement bij toenemend lichtniveau voor *Alstroemeria* 'Virginia' en 'Rome'. Zolang als de gemeten lijnen evenwijdig met de rode stippellijn lopen is het fotosyntheserendement 100%.

PAR daglicht + lamplicht	augustus	november	februari
0-30	100%	100%	100%
30-60	100%	100%	100%
60-90	100%	100%	100%
90-120	100%	99%	100%
120-150	100%	78%	88%
150-180	75%	54%	88%
180-210	67%	55%	60%
210-300	50%	44%	58%
300-500	23%	9%	23%
500-800	8%	7%	17%



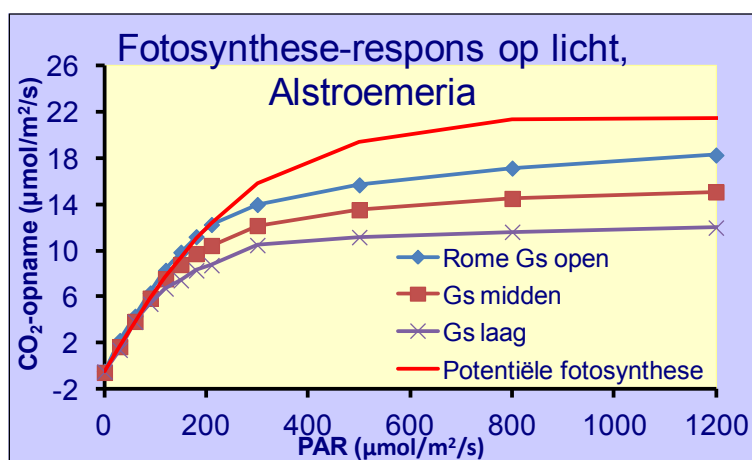
Concreet betekent dit het volgende voor een aantal voorbeeldsituaties:

- *Situatie 1.* De lampen met een lichtintensiteit van 90 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ staan in de winter om 7:00 's ochtends aan en de lichtintensiteit aan daglicht is verwaarloosbaar. → Het rendement voor lamplicht op de fotosynthese is 100%.
- *Situatie 2.* De lampen met een lichtintensiteit van 90 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ staan om 10.00 's ochtends aan. Op een bewolkte dag in februari is de zonlichtintensiteit in de kas zo'n 60 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. → Bij elkaar is er dan 150 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ licht in de kas → Het rendement voor lamplicht op de fotosynthese is voor de eerste 60 μmol 100% en voor de laatste 30 μmol 88%.
- *Situatie 3.* De lampen met een lichtintensiteit van 90 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 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 240 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ licht in de kas → rendement van het lamplicht op de fotosynthese zakt voor de eerste 30 μmol naar 88%, voor de tweede 30 μmol naar 60% en voor de laatste 30 μmol naar 58%. Hier kan de overweging gemaakt worden om, indien mogelijk, een gedeelte van de belichting 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 Effect van de huidmondjes op de fotosynthese?

Zoals uitgelegd in hoofdstuk 1.1 is het heel belangrijk voor een goede fotosynthese dat de huidmondjes ver genoeg open staan. Bij *Alstroemeria* was dit zeker boven de 200 $\mu\text{mol PAR}$ met grote regelmaat niet het geval. Figuur 6 laat zien dat het lichtrendement fors daalt als de huidmondjes bijna dicht zijn. Ook wordt in de figuur de potentiële fotosynthese weergegeven (rode lijn). Deze lijn is bepaald door middel van chlorofyl-fluorescentie (zie uitleg in Pot *et al.*, 2011). Of de gerealiseerde fotosynthese in de buurt komt van de rode lijn is onder andere afhankelijk van de beschikbaarheid van CO_2 in de kas en de mate van huidmondjesopening. Bij geopende huidmondjes (blauwe lijn) is de gerealiseerde fotosynthese en daarmee het lichtrendement veel hoger dan bij knijpende huidmondjes (rode en paarse lijn).



Figuur 6. Effect van de huidmondjes (*Gs open*, *Gs midden* en *Gs laag*) op de lichtrespons van de fotosynthese bij 'Rome'. 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 het CO_2 -gehalte in de kas en de huidmondjesopening (data november).

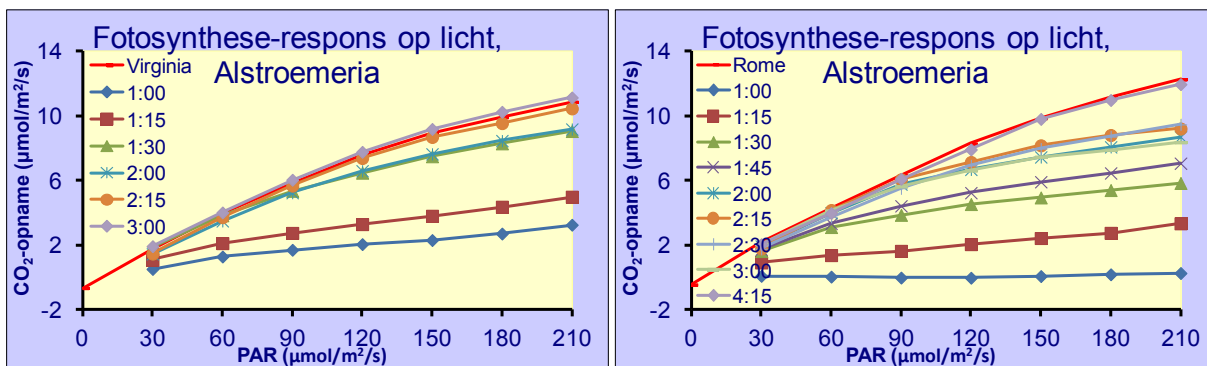
Oorzaken voor huidmondjessluiting kunnen zijn:

- Te hoog CO_2
- Te hoge VPD
- Tekort aan water
- plantstadium ('uitontwikkelde' plant kan tekort aan sinks hebben, zodat er een verminderde vraag naar suikers is)
- Blad raakt aan het einde van de dag vol met zetmeel, dus koppeling aan dagsom licht

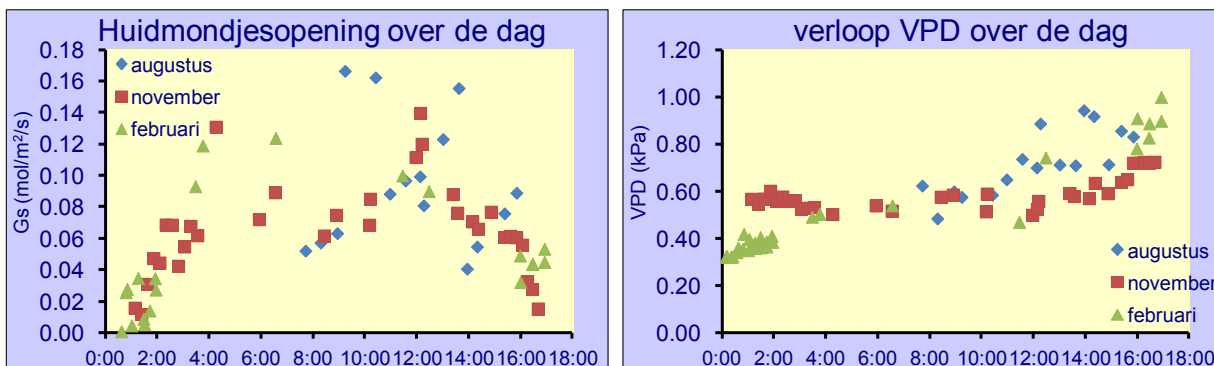
Het verdient de aanbeveling om te achterhalen wat de oorzaak is van de huidmondjessluiting bij *Alstroemeria*. Het voorkomen hiervan en dus het op gang houden van het fotosyntheserendement biedt mogelijkheden voor productietoename.

3.4 Anders belichten begin en einde dag?

Bij beide cultivars is er een fors opstart-effect van de fotosynthese (Figuur 7). De eerst gemeten curves van 'Rome' en 'Virginia' nadat de SON-T lampen om 1:00 zijn aangegaan laten zien dat de fotosynthese zwaar gelimiteerd is: Er is nauwelijks toename in fotosynthese bij toenemend licht (blauwe lijnen). Bij 'Virginia' is er bij 60-90 μmol licht een opstarteffect van ongeveer een half uur. Bij 'Rome' is dit ongeveer een uur. Voor hogere lichtintensiteiten duur dit zeker bij 'Rome' nog veel langer. Dit lage rendement aan het begin van de dag kan verklaard worden door zeer langzaam openende huidmondjes (Figuur 8).



Figuur 7. Effect van het begin van de dag op de fotosynthese-lichtrespons van 'Virginia' (links) en 'Rome' (rechts). De daglengte liep van 1:00-16:45. De rode lijn geeft de waarden van de fotosynthese van overdag weer (data november).

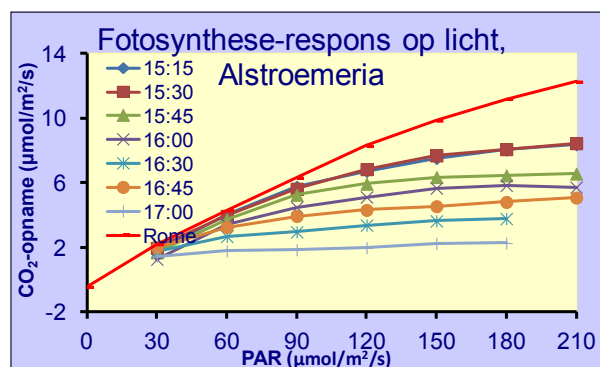
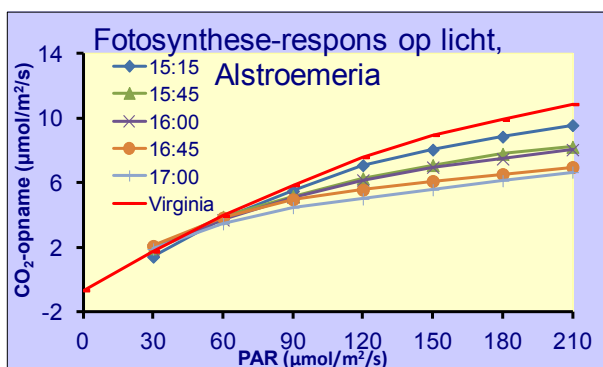
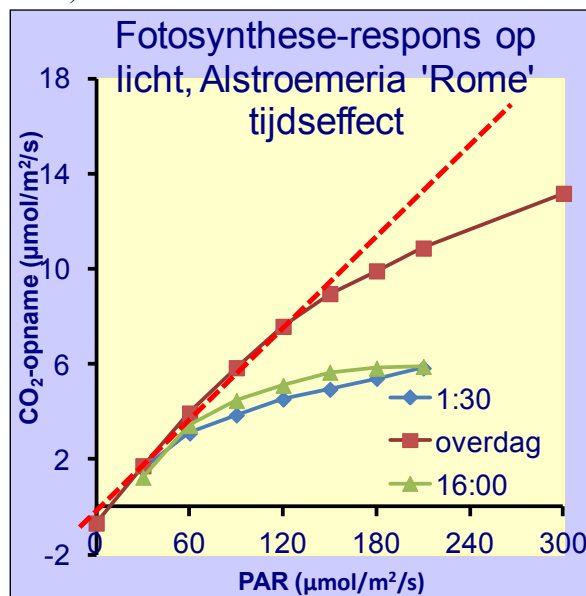


Figuur 8. Verloop van de huidmondjesopening (G_s) en de VPD over de dag in de maanden augustus, november en februari van *Alstroemeria* 'Rome'. Aan het begin en einde van de dag is de G_s dermate laag dat de fotosynthese hierdoor beperkt wordt. Aan het einde van de dag valt een lage G_s samen met een verhoogde VPD.

Na 15:00 uur (einde dag) werd er vanaf 90 μmol en hoger, vooral bij 'Rome', een daling van het lichtrendement waargenomen (Figuur 9). Dit werd veroorzaakt door dichtlopende huidmondjes. Het lijkt dus verstandig om de laatste uren van de middag de lampen gedeeltelijk of geheel af te schakelen (afhankelijk van de hoeveelheid daglicht), want het rendement van het lamplicht dat toegevoegd wordt aan het dan nog aanwezige daglicht in de kas is laag (Tabel 3). Aan het einde van de meetdagen liep de VPD op tot zo'n 1 kPa. Mogelijk is dit een oorzaak van de huidmondjessluiting aan het einde van de dag. De range van VPD's tussen 0.4 en 1 kPa is echter te klein om een goede correlatie tussen G_s en VPD te kunnen laten zien.

Tabel 3. Verloop van het fotosyntheserendement bij toenemend lichtniveau voor *Alstroemeria* 'Rome' aan het begin en einde van de dag. Zolang als de gemeten lijnen evenwijdig met de rode stippellijn lopen is het fotosyntheserendement 100% (data november).

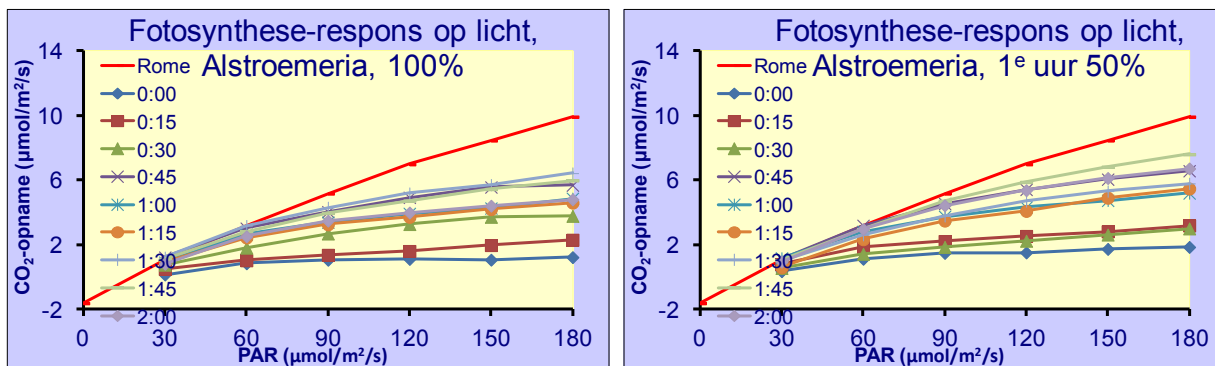
PAR daglicht + lamplicht	Begin dag 1:30	Overdag	Eind dag 16:00
0-30	100%	100%	100%
30-60	85%	100%	100%
60-90	43%	100%	60%
90-120	38%	99%	36%
120-150	23%	78%	32%
150-180	26%	54%	10%
180-210	25%	55%	4%
210-300		44%	



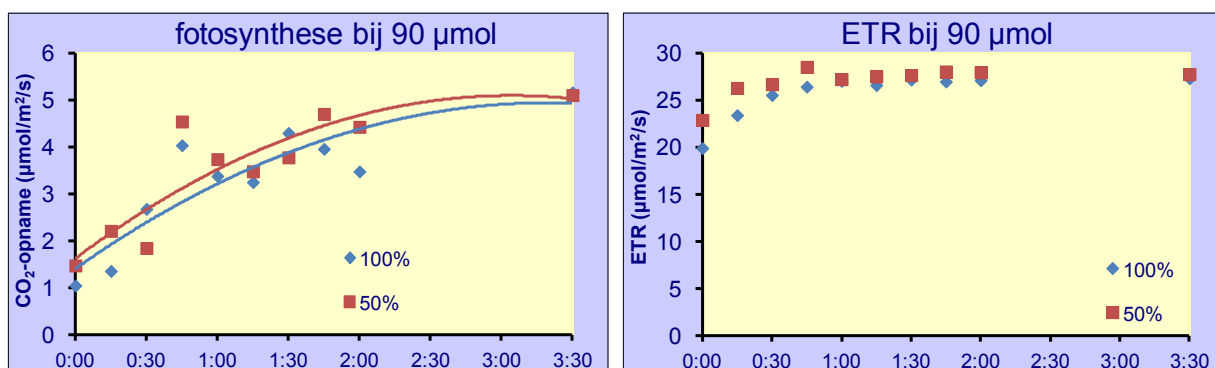
Figuur 9. Effect van het einde van de dag op de fotosynthese-lichtrespons van 'Virginia' en 'Rome' in november (16:45 lampen uit en scherm dicht). De rode lijn geeft de waarden van de fotosynthese van overdag weer (data november; in februari werden er soortgelijke patronen gemeten).

Door het grote opstart-effect aan het begin van de dag en de aanbeveling om het eerste uur met maximaal 50% te belichten omdat het rendement erg laag is (Tabel 3), werd de vraag gesteld of juist 50% belichting het opstart-effect niet zou vergroten. Voor de februari-metingen is een proef uitgevoerd waarbij een afdeling voor enige weken het eerste uur met 50% werd belicht ten opzichte van een referentie-afdeling die direct 100% (100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) werd belicht. Net als bij de metingen uit november, is er de eerste uren van de dag een fors opstart-effect van de fotosynthese waargenomen (Figuur 10). Tussen de behandelingen met 50 en 100 % belichting in het eerste uur werden nauwelijks verschillen in de fotosynthese bij 90 μmol gemeten (Figuur 11 links). Bij beide behandelingen duurde het zo'n 2 uur voordat 90 μmol vrijwel even goed

werd benut als later op de dag (Figuur 11 links). De ETR³ bij 90 μmol was zelfs licht hoger bij 50% belichting (Figuur 11 rechts). Hieruit kan de conclusie getrokken worden dat opstarten met 50% belichting het opstart-effect niet vertraagt ten opzichte van 100% belichting. Het is dus efficiënter om gedurende de opstart-uren 50% van de belichting uit te laten.



Figuur 10. Effect van het begin van de dag op de fotosynthese-lichtrespons van 'Rome' in februari waarbij gedurende het eerste uur 50% (rechts) of 100% (links) belichting werd aangeboden. De daglengte liep van 0:00-17:00. De rode lijn geeft de waarden van de fotosynthese van overdag weer.

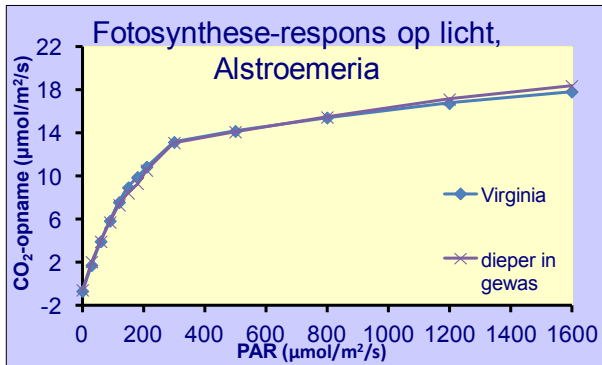


Figuur 11. Effect van het begin van de dag op de fotosynthese en ETR bij 90 μmol licht van 'Rome', waarbij gedurende het eerste uur 50% (rood) of 100% (blauw) belichting in de kas werd aangeboden. Het duurde ongeveer 2 uur voordat 90 μmol maximaal werd benut (data februari).

3.5 Fotosynthese dieper in het gewas?

Omdat telers geïnteresseerd waren in de respons van bladeren dieper in het gewas, zijn hier een aantal metingen aan gedaan. De lichtrespons van deze bladeren verschilde niet ten opzichte van bladeren bovenin het gewas (Figuur 12). Hierbij moet opgemerkt worden dat het gewas vrij open was, zie foto bij figuur 12.

³ ETR staat voor elektronentransport, de snelheid van de lichtreactie van de fotosynthese. Voor details, zie Pot *et al.* 2011.



Figuur 12. De lichtrespons van bladeren dieper in het gewas (paarse lijn) verschilde niet ten opzichte van bovenin het gewas (blauwe lijn). NB het gewas was vrij open (data november).

3.6 Grenswaarden scherming bij hoge instraling

Bij de getekende rode pijlen in de figuren bij Tabel 4 is het lichtrendement dermate laag dat langdurige blootstelling schade aan het fotosynthese-systeem in het blad kan geven. Bij Alstroemeria cultivars die gevoelig zijn voor bladschade, wordt schermen aangeraden. Verrassend was dat deze drempelwaarde voor 'Virginia' van (eind) februari vergelijkbaar was met de drempelwaarde van augustus.

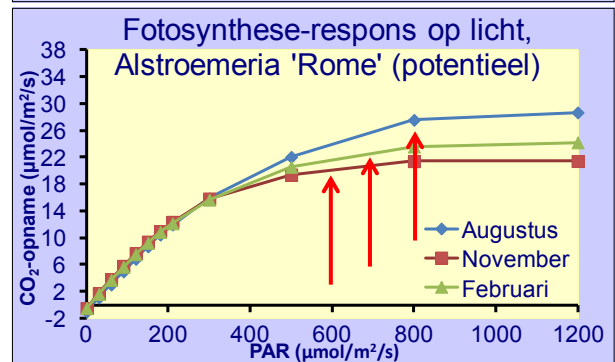
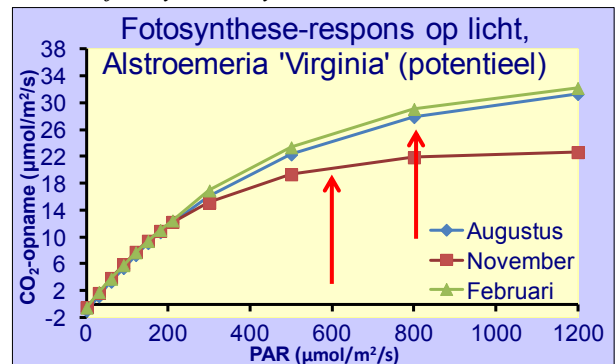
Tabel 4. Lichtgrens waarboven er lichtstress ontstaat aan het fotosynthesesysteem.

'Virginia'

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

'Rome'

	PAR binnen ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)	Straling buiten (Watt/m^2)
Augustus	800	~530
November	600	~400
Februari	700	~460

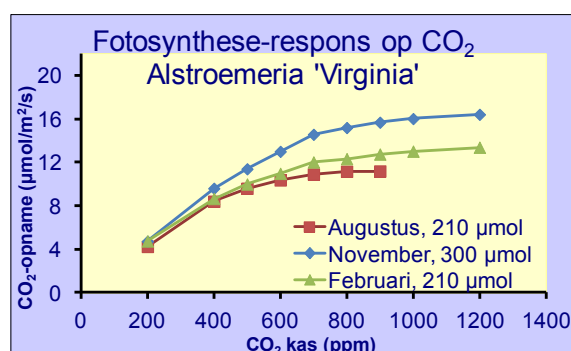


3.7 Grenswaarden CO₂-dosering

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 en 6 blijkt dat zowel bij een lichtniveau van 300 μmol als bij een lichtniveau van 1200 μmol het verzadigingsniveau voor CO₂ rond de 800-900 ppm wordt bereikt. Bij een hoog lichtniveau stijgt de procentuele toename in fotosynthese door CO₂ dosering (Tabel 6). Tijdens de (kortstondige) metingen nam onder een hoog lichtniveau de huidmondjesopening vanaf 1200 ppm enigszins af. Bij een lager lichtniveau nam dit al vanaf 900-1000 ppm af. Deze CO₂-niveaus kunnen dus beter vermeden worden!

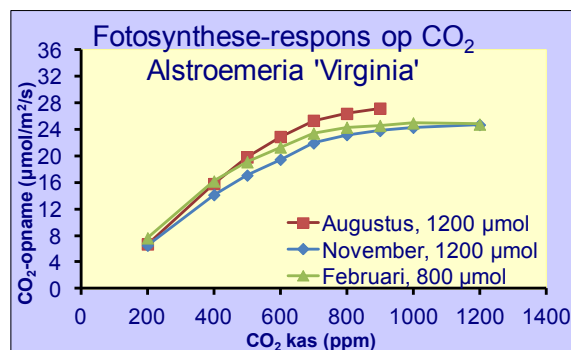
Tabel 5. Rendement CO₂-dosering bij een lichtniveau van 210 en 300 μmol/m²/s PAR van *Alstroemeria* 'Virginia'. 'Rome' liet eenzelfde soort patroon zien.

CO ₂ in kas (ppm)	augustus % t.o.v. 400ppm	november	februari
200	50%	49%	55%
400	100%	100%	100%
500	114%	119%	115%
600	123%	135%	127%
700	130%	152%	139%
800	133%	158%	142%
900	133%	163%	147%
1000		167%	150%
1200		171%	155%



Tabel 5. Rendement CO₂-dosering bij verzadigend lichtniveau (1200 μmol/m²/s PAR) van *Alstroemeria* 'Virginia'. 'Rome' liet eenzelfde soort patroon zien.

CO ₂ in kas (ppm)	augustus % t.o.v. 400ppm	november	februari
200	42%	46%	47%
400	100%	100%	100%
500	125%	121%	118%
600	145%	138%	132%
700	160%	155%	145%
800	167%	164%	150%
900	172%	169%	152%
1000	173%	172%	154%
1200	174%	175%	153%



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 neemt de fotosynthese 50% toe → Dit geeft een toename van 2.5 naar 7.5.
- 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 neemt de fotosynthese weer 50% toe → Dit geeft een toename van 7.5 naar 22.5.

4. Conclusies en advies

Alstroemeria kan—fotosynthetisch gezien—redelijk veel licht aan, maar duidelijk minder dan bijvoorbeeld een tomatengewas. Gezien het feit dat er in de zomer een milde lichtscherming nodig is, is ook voor dit gewas het gebruik van een (diffuus) coating of scherm het overwegen waard. In Tabel 7 staan de grenzen voor maximale lichtbenutting voor de fotosynthese, het CO₂-verzadigingsniveau en het lichtniveau waarboven lichtstress kan optreden.

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	150 µmol	800-900 ppm	800 µmol
November	120 µmol	800-900 ppm	600 µmol
Februari	120 µmol	800-900 ppm	700-800 µmol

Een aandachtspunt voor de teelt is de huidmondjesopening van beide gewassen. Ondanks dat Alstroemeria vrij veel licht aan kan, is de huidmondjesopening relatief laag. Ter vergelijking: het lichtniveau waar lichtverzadiging optreedt is vergelijkbaar met Bouvardia, terwijl de huidmondjesopening van Bouvardia ten minste twee keer zo hoog is (Trouwborst *et al.* 2015). Hierdoor ligt de gerealiseerde fotosynthese van Alstroemeria bij lichtintensiteiten boven de 200 µmol verder van de potentieel haalbare fotosynthese af (zie figuur 5 en 6) dan bij een Bouvardia. Dit suggereert dat als de huidmondjesopening van Alstroemeria vergroot kan worden, de fotosynthese en dus de productie zal stijgen. De reden waarom de huidmondjesopening achterblijft is niet duidelijk geworden. Het is niet uit te sluiten dat de bodemkoeling hier een negatieve rol in speelt.

De huidmondjesopening aan het begin en einde van de dag is van ‘Rome’ meer limiterend voor de fotosynthese dan voor ‘Virginia’. Mogelijk hangt de sluiting van de huidmondjes in de middag samen met een oplopende VPD. De VPD is dus een aandachtspunt.

De proef met het eerste uur 50% of 100% van de SON-T aangeschakeld liet zien dat de huidmondjes in beide gevallen even traag open gingen. Vanuit energetisch oogpunt is het aan te bevelen het eerste uur niet meer dan zo’n 40-50 µmol licht te geven en pas daarna meer licht te geven. Ook de laatste uren van de middag levert voluit belichten bovenop het in de kas aanwezige daglicht al snel weinig rendement meer op (afhankelijk van de hoeveelheid daglicht).

Overige opmerkingen:

- Maximale lichtbenutting hoeft niet gelijk op te lopen met het economisch optimum.
 - Zoek een balans tussen extra kosten van 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 van 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., 28p.
- Pot CS, de Vreede SJM, Trouwborst G, Hogewoning SW.** 2015. Activeren van de fotosynthese door sturing op huidmondjesopening. Plant Dynamics B.V. & Plant Lighting B.V., Randwijk. 53p.
- Trouwborst G, Hogewoning SW, Pot CS.** 2015. Meer rendement uit licht en CO₂ bij Bouvardia. Bunnik: Plant Lighting B.V. & Plant Dynamics B.V., 25p.

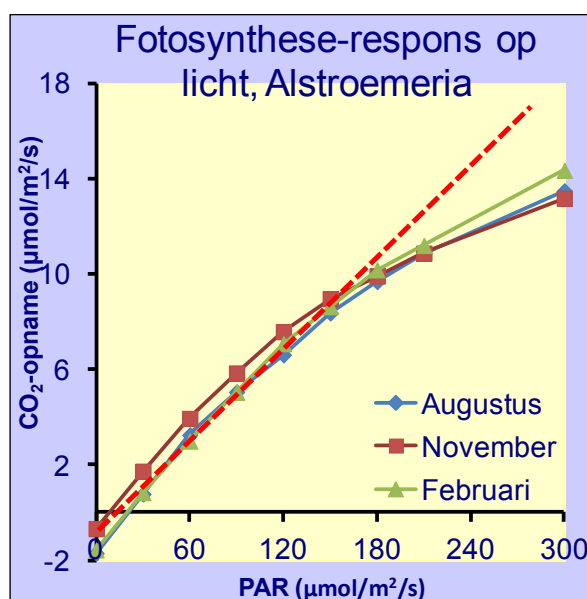
Bijlage 1. Protocol voor belichting en CO₂-dosering Alstroemeria

Grenswaarden belichting per seizoen

- Overdag geen noemenswaardig verschil tussen de cultivars ‘Virginia’ en ‘Rome’.
- Klein verschil in lichtrendement tussen november en februari.
- Grenswaarde ~90% lichtrendement in november en in februari 120-150 μmol (Tabel 1).

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	augustus	november	februari
0-30	100%	100%	100%
30-60	100%	100%	100%
60-90	100%	100%	100%
90-120	100%	99%	100%
120-150	100%	78%	88%
150-180	75%	54%	88%
180-210	67%	55%	60%
210-300	50%	44%	58%
300-500	23%	9%	23%
500-800	8%	7%	17%



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.

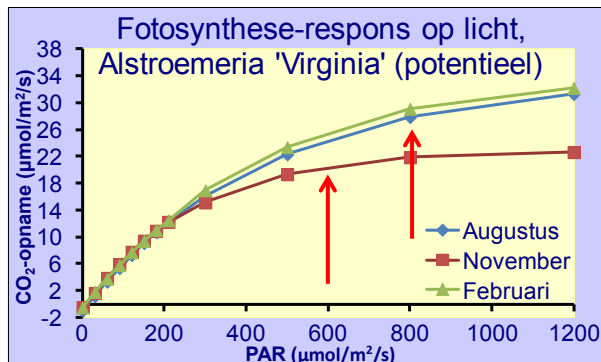
Anders belichten begin en einde dag?

- Er wordt een fors rendementsverlies waargenomen gedurende het eerste en laatste uur van de dag doordat de huidmondjesopening beperkend is voor de fotosynthese.
- Gedurende het eerste uur/ de eerste 1 à 2 uren kan worden volstaan met 50% belichting ($\approx 45 \mu\text{mol}$).
- Het is aan te raden om op die momenten CO₂ rond de 800 ppm te houden om verder verlies aan lichtrendement te voorkomen.

Tabel 2. Lichtgrens waarboven er lichtstress ontstaat.

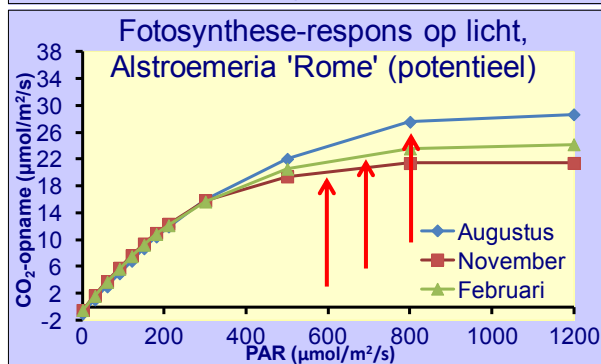
‘Virginia’

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



‘Rome’

	PAR binnen ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)	Straling buiten (Watt/m^2)
Augustus	800	~530
November	600	~400
Februari	700	~460

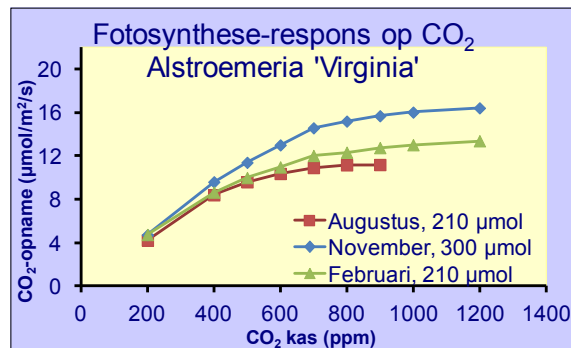


Grenswaarden CO₂-dosering

- Bij 800-900 ppm wordt het verzadigingsniveau voor CO₂ bereikt (Tabel 3).

Tabel 3. Rendement CO₂-dosering.

CO ₂ in kas (ppm)	augustus % t.o.v. 400ppm	november	februari
200	50%	49%	55%
400	100%	100%	100%
500	114%	119%	115%
600	123%	135%	127%
700	130%	152%	139%
800	133%	158%	142%
900	133%	163%	147%
1000		167%	150%
1200		171%	155%



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 neemt de fotosynthese 50% toe → dit geeft een toename van 2.5 naar 7.5.
- 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 neemt de fotosynthese 50% toe → dit geeft een toename van 7.5 naar 22.5

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 PPF (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.