

Meer rendement uit licht en CO₂ bij Freesia



Govert Trouwborst, Sander Hogewoning & Sander Pot
Juli 2015

Meer rendement uit licht en CO₂ bij Freesia

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 Freesia 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.

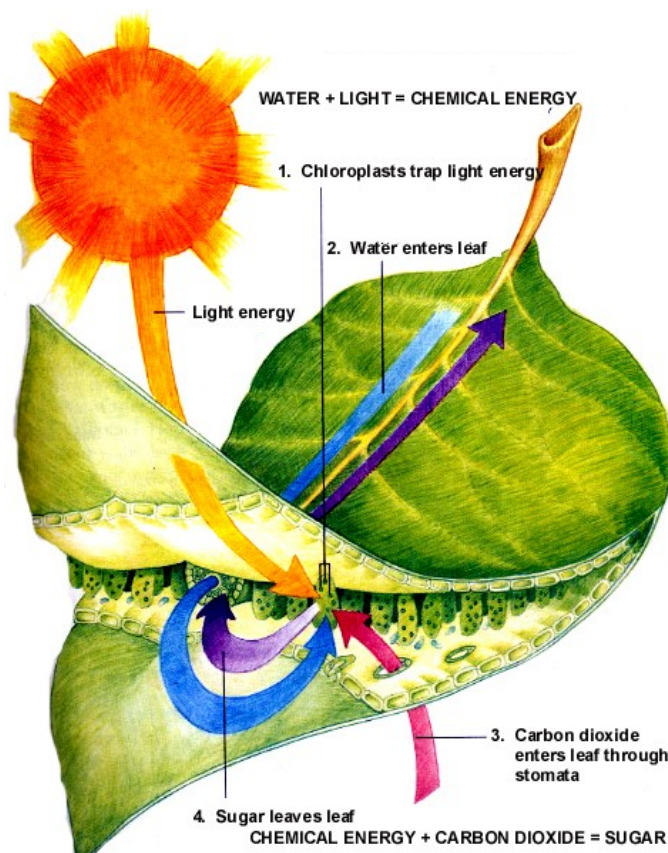
Inhoudsopgave

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 Anders belichten begin en einde dag?	12
3.4 Temperatuurseffect op de fotosynthese bij Freesia?	13
3.5 Boven- of onderkant blad?	15
3.6 Fotosynthese dieper in het gewas / net getopt?	15
3.7 Grenswaarden scherming bij hoge instraling	16
3.8 Grenswaarden CO ₂ -dosering.....	16
4. Conclusies en advies	18
Referenties.....	20
Bijlage 1. Protocol voor belichting en CO₂-dosering Freesia.....	i
Bijlage 2. Omrekeningstabel Lux, Watt, μmol.....	iv

1. Inleiding

1.1 Inleiding fotosynthese

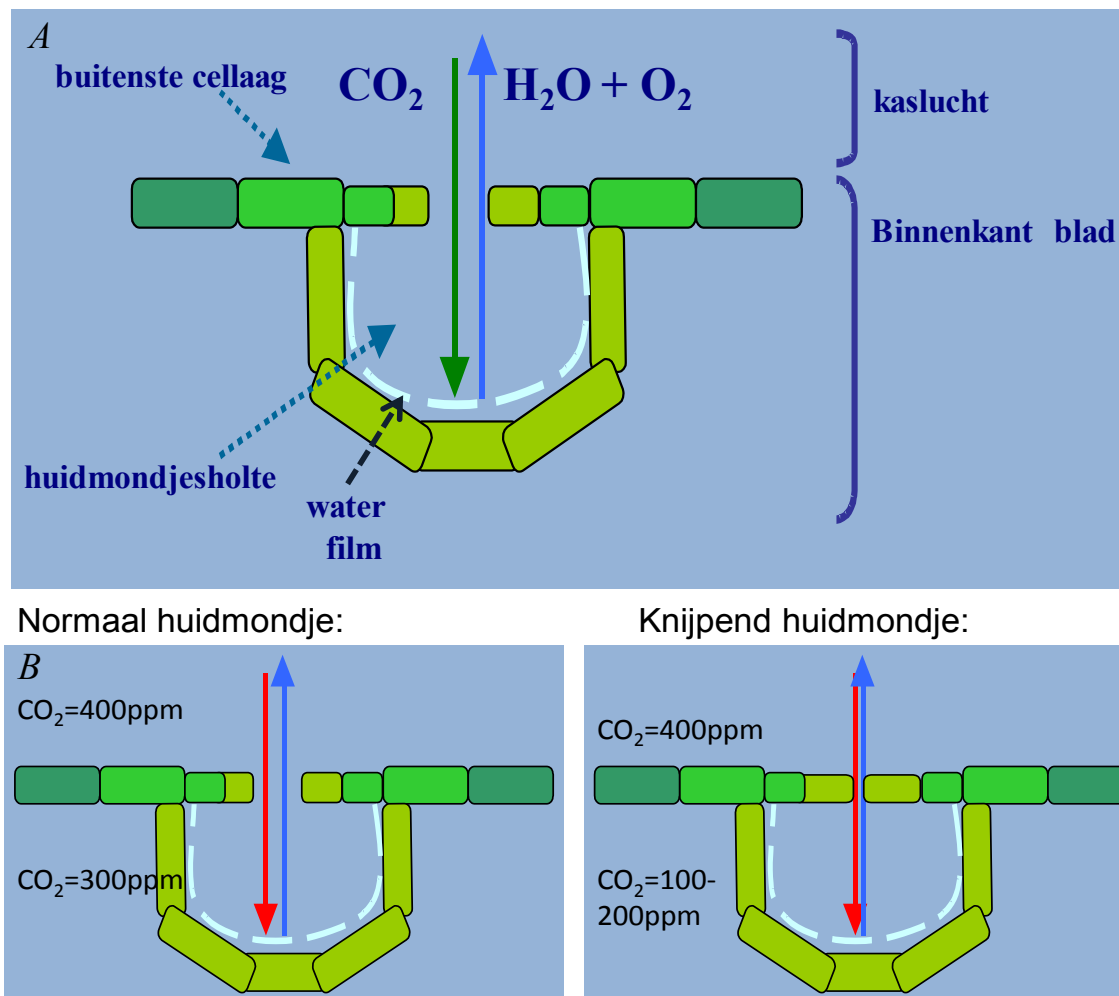
Planten nemen water en voedingsstoffen op via hun wortels en CO₂ via de huidmondjes in hun bladeren. Fotosynthese is het proces waarbij de plant met behulp van lichtenergie het opgenomen water en CO₂ omzet in suikers (assimilaten). De fotosynthese is dus de motor van de plant en CO₂ fungeert als brandstof. 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.



Figuur 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 te meten. Uit deze metingen komt naar voren 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 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.



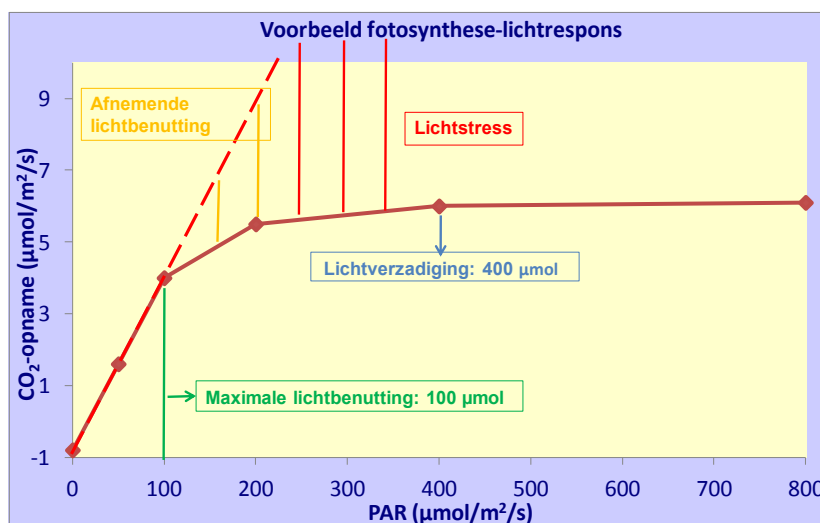
Figuur 2. Schematische tekening van een huidmondje (A) en het verschil tussen de CO_2 -concentratie in de kaslucht en in het blad door de mate van huidmondjesopening (B).

Freesia is, net als de meeste tuinbouwgewassen, een C3-plant. Bij de C3-planten vindt de opname van CO_2 in het licht plaats en ondervindt hinder van zuurstof. Voor een efficiënte fotosynthese bij C3-planten is het dus essentieel dat de huidmondjes goed openen. Bij slechte huidmondjesopening is de CO_2 concentratie in het blad laag en wordt O_2 te veel O_2 in

plaats van CO_2 gebonden aan Rubisco¹. 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)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 screenen 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.

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

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.

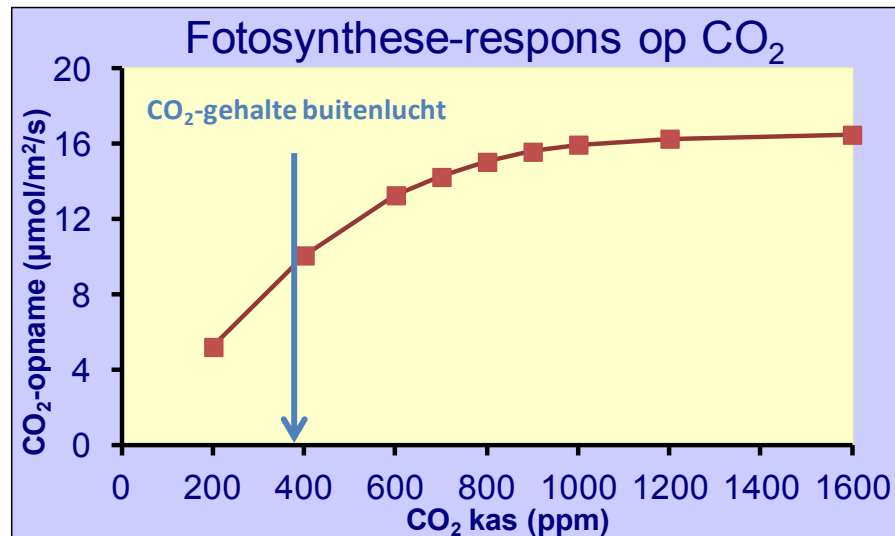
De VPD wordt als volgt bepaald:

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/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 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: Freesia

Cultivar: 'Soleil' en 'Ambiance'

Plantstadium / leeftijd: ongetopt gewas van 11 tot 14 weken oud (afhankelijk van seizoen)

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

Tabel 1. Teeltcondities tijdens en rond de meetperioden:

	augustus	november	Februari
Planting (Soleil/Ambiance)	Week 19/22	Week 34/33	Week 47/43
Belichting $\mu\text{mol SON-T}$	geen	50 $\mu\text{mol Soleil}$ 60 $\mu\text{mol Ambiance}$	50 $\mu\text{mol Soleil}$ 60 $\mu\text{mol Ambiance}$
Stralingssom (J/cm^2)	1600-1700	200-300	250-350
Daglengte	'natuurlijk'	16 uur	16 uur
T range (overdag)	18-26	12-14	10-12
RV op meetdagen	60-70% (dag)	circa 72% (dag)	circa 70% (dag)
Overige opmerkingen	Meetdagen zonnig scherm overdag af en toe dicht verneveling	Meetdagen bewolkt Scherm overdag open	Meetdagen bewolkt Scherm overdag open

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 of 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.



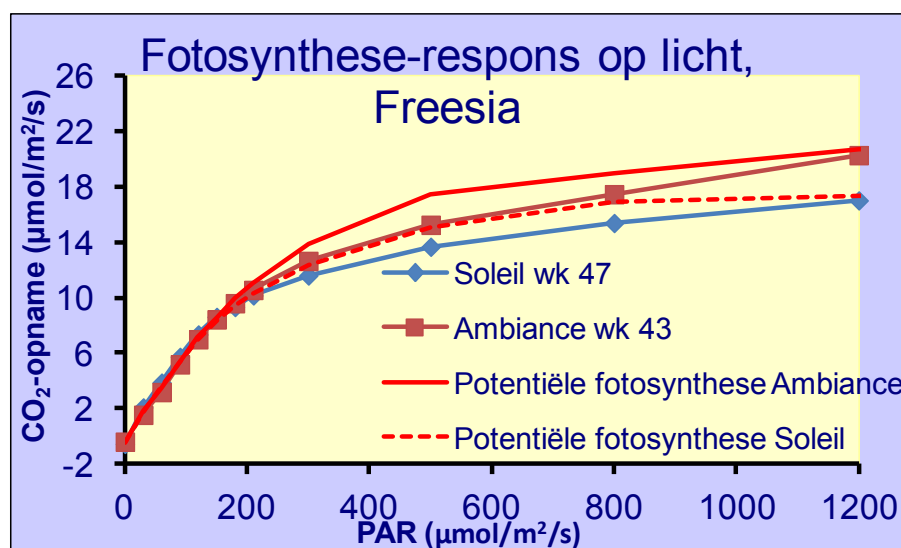
Foto 1. LI-COR-6400 draagbare fotosynthesemeter voor het meten van de CO₂ opname (fotosynthese) in de praktijk. In het apparaat kunnen PAR, CO₂, temperatuur en vocht gevarieerd worden. Op deze manier is de fotosynthese-snelheid gemeten bij oplopend PAR of CO₂ aan een ingeklemd blad (rode pijl).

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?

De fotosynthese-lichtrespons verschilde bij lichtintensiteiten van 210 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ en lager nauwelijks tussen de cultivars ‘Soleil’ en ‘Ambiance’ (Figuur 5). De fotosynthese onder hogere lichtniveaus lag bij ‘Soleil’ iets 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 lijnen is onder andere afhankelijk van de beschikbaarheid van CO_2 en de mate van huidmondjesopening. In alle drie de maanden waarin gemeten is, lag de gemeten fotosynthese dicht bij de potentiële fotosynthese. Er was dan ook nauwelijks sprake van limitatie op de fotosynthese door de huidmondjes: de huidmondjes stonden voldoende open om effectief CO_2 te kunnen opnemen.

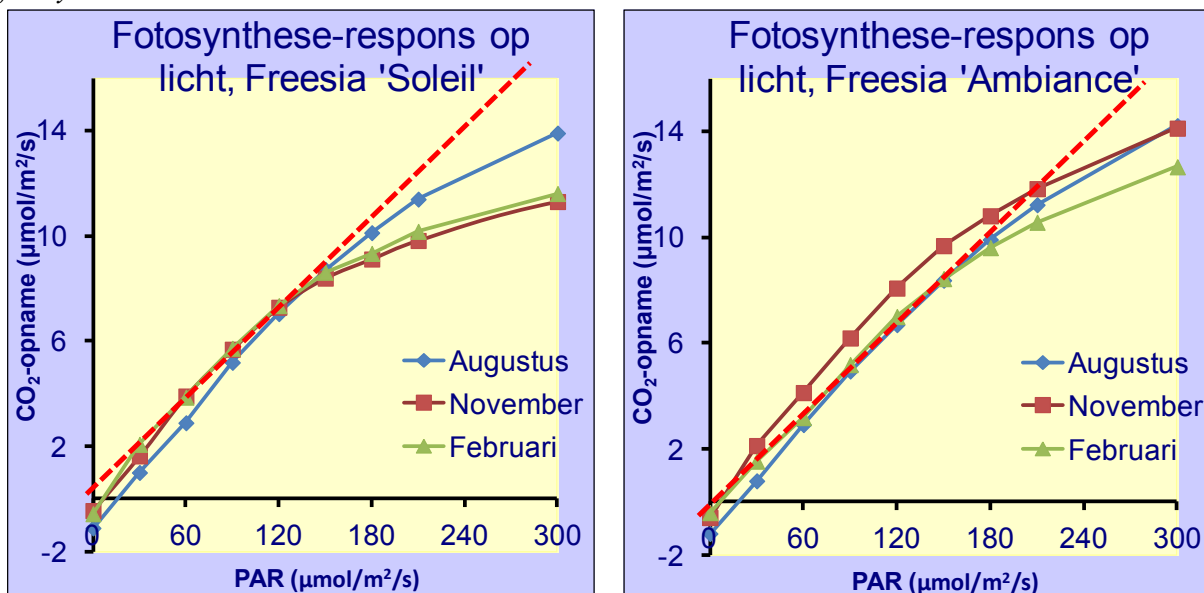


Figuur. 5. Lichtrespons op de fotosynthese van Freesia ‘Soleil’ en ‘Ambiance’. De rode lijnen geven aan wat potentieel haalbaar is. Of de gerealiseerde fotosynthese in de buurt komt van de rode lijn is o.a. afhankelijk van de beschikbaarheid van CO_2 en de huidmondjesopening. Alle lichtrespons-curves 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 μmol). Het lichtrendement nam bij ‘Soleil’ iets sneller af dan bij ‘Ambiance’. Doordat de fotosynthese-capaciteit (deze is gemeten bij lichtverzadiging) in november en februari wat lager ligt dan in augustus (zie lijn augustus in figuur bij tabel 3), neemt het lichtrendement in die twee perioden sneller af. In november en februari blijft het lichtrendement boven de 90% tot een intensiteit lamplicht plus daglicht van 120 μmol (150 μmol voor ‘Ambiance’ in november; Tabel 2). Boven deze lichtintensiteit daalt het lichtrendement snel en wordt het sneller onrendabel om door te gaan met belichten.

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



PAR	augustus	november	februari	PAR	augustus	november	februari	Februari
daglicht + lamplicht				daglicht + lamplicht				
0-30	100%	100%	100%	0-30	100%	100%	100%	
30-60	100%	100%	100%	30-60	100%	100%	100%	
60-90	100%	100%	100%	60-90	100%	100%	100%	
90-120	100%	91%	93%	90-120	100%	100%	100%	
120-150	96%	63%	72%	120-150	96%	92%	82%	94%
150-180	79%	41%	48%	150-180	88%	64%	67%	93%
180-210	73%	40%	41%	180-210	75%	59%	55%	90%
210-300	48%	28%	27%	210-300	57%	43%	40%	59%
300-500	25%	17%	18%	300-500	32%	24%	22%	25%
500-800	12%	10%	10%	500-800	17%	14%	13%	15%

Concreet betekent dit het volgende voor een aantal voorbeeldsituaties:

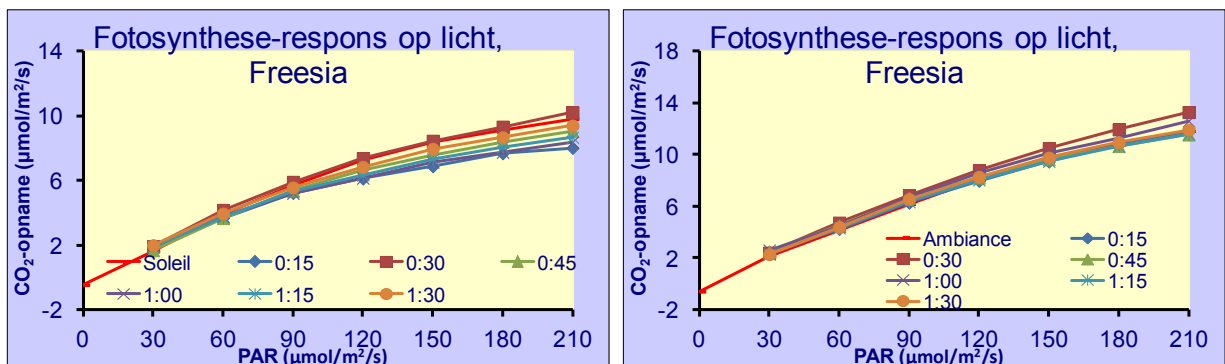
- *Situatie 1.* De lampen met een lichtintensiteit van 60 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ staan in de winter om 7:00 's ochtends aan en de lichtintensiteit aan daglicht is verwaarloosbaar. → Het rendement voor lamplicht op de fotosynthese is 100%.
- *Situatie 2.* De lampen met een lichtintensiteit van 60 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 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 120 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ licht in de kas → Het rendement voor lamplicht op de fotosynthese is bij 'Soleil' voor de eerste 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 100% en voor de laatste 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ is het rendement nog altijd 93%. Voor 'Ambiance' is het rendement van het lamplicht nog volledig 100%.

- *Situatie 3.* De lampen met een lichtintensiteit van $60 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ staan om 10.00 's ochtends aan. Op een heldere dag in februari is de zonlichtintensiteit in de kas al $120 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. → Bij elkaar is er dan $180 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ licht in de kas → Het rendement van het lamplicht op de fotosynthese zakt bij 'Soleil' voor de eerste $30 \mu\text{mol}$ naar 72% en voor de tweede $30 \mu\text{mol}$ naar 48%. Bij 'Ambiance' is dit respectievelijk 82% en 67%. Hier kan, zeker voor 'Soleil' de overweging gemaakt worden om, indien mogelijk, de helft van de belichting af te schakelen.

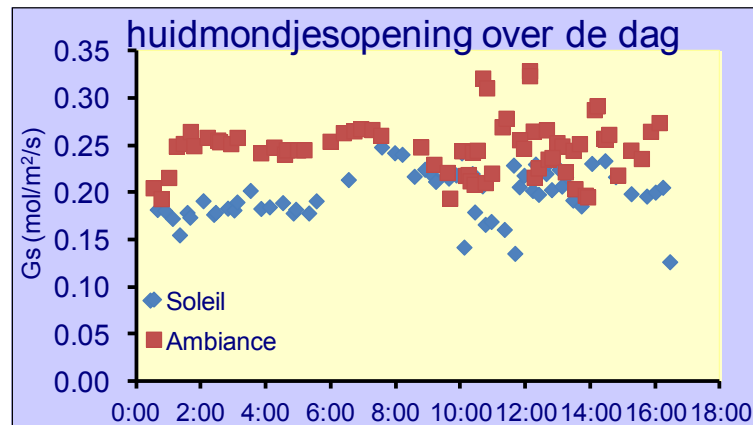
Een rendement van 100% lichtbenutting is geen vereiste; soms zijn de kwaliteitseisen en een strak teeltschema overwegingen om bij een lager rendement het licht toch aan te laten. De balans tussen de extra kosten van belichting tegenover de meeropbrengst door de hogere fotosynthese en/of andere kwaliteitsaspecten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

3.3 Anders belichten begin en einde dag?

Bij de gemeten cultivars is er nauwelijks sprake van een opstart-effect van de fotosynthese (Figuur 6). Gegeven de lichtintensiteit SON-T ($\sim 60 \mu\text{mol}$) in de kas, is er géén opstarteffect. Bij hogere lichtintensiteit heeft 'Soleil' een klein opstart-effect. De huidmondjes staan van beide cultivars direct ver genoeg open (Figuur 7). Gemiddeld stonden de huidmondjes bij 'Ambiance' iets verder open dan bij 'Soleil'.

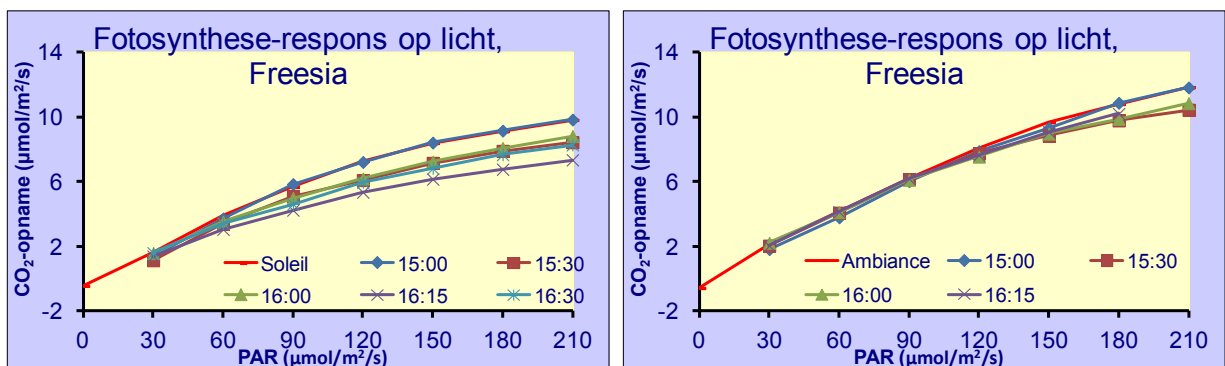


Figuur 6. Effect van het begin van de dag op de fotosynthese-lichtrespons van 'Soleil' en 'Ambiance' in november. De daglengte liep van 0:00-16:45. De rode lijn geeft de waarden van de fotosynthese van overdag weer.



Figuur 7. Verloop van de huidmondjesopening (G_s) over de dag van Freesia 'Soleil' en 'Ambiance' (data november).

Na 15:00 zakte de fotosynthese van 'Soleil' boven 60 μmol iets in. Echter, de lampen stonden al vanaf 12:00 uit. De fotosynthese van 'Ambiance' ging ongehinderd door tot het einde van de dag (andere afdeling gemeten waar om 15:00 lampen uitgingen en schermdoek dicht om 16:15 uur). De oorzaak dat de fotosynthese bij Soleil iets inzakte, ligt niet bij de huidmondjesopening, maar bij een iets verlaagde ETR³.

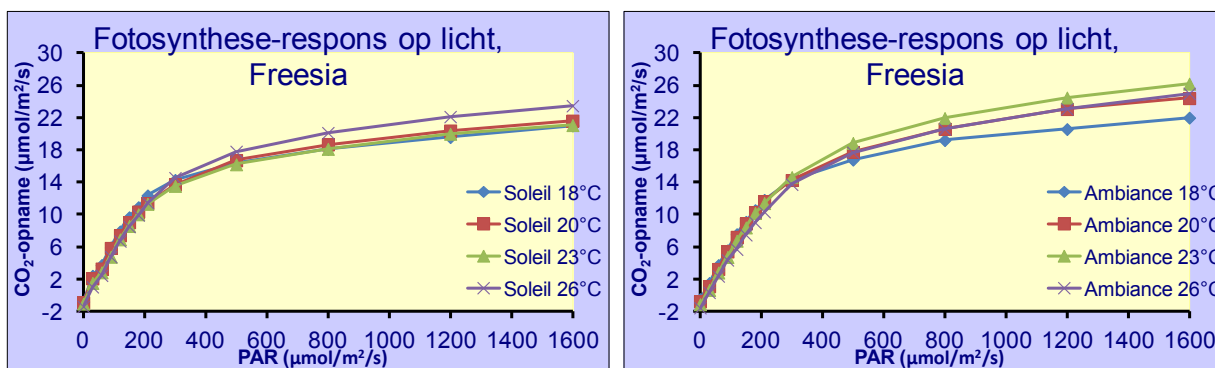


Figuur 8. Effect van het einde van de dag op de fotosynthese-lichtrespons van 'Soleil' en 'Ambiance'. De rode lijn geeft de waarden van de fotosynthese van overdag weer (data november).

3.4 Temperatuurseffect op de fotosynthese bij Freesia?

Figuur 9 geeft het effect van temperatuur in de kas op de lichtrespons van de fotosynthese weer (gemeten in augustus). Te zien is dat een hogere temperatuur de fotosynthese per bladoppervlak een klein beetje verhoogt bij de hogere lichtintensiteiten. Er is dus een klein positief temperatuur-effect op de maximale CO_2 opname. Dit komt omdat de ETR onder hogere temperaturen iets hoger is.

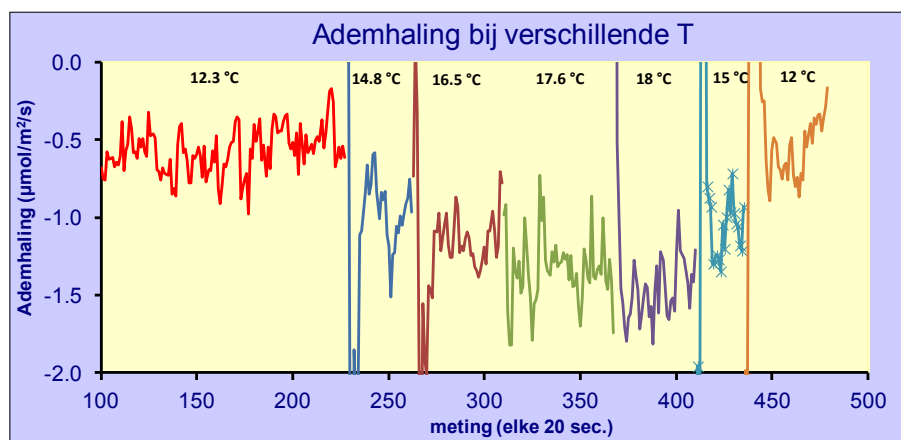
³ ETR staat voor elektronentransport, de snelheid van de lichtreactie van de fotosynthese. Voor details, zie Pot *et al.* 2011.



Figuur 9. Lichtrespons van 'Soleil' en 'Ambiance' uitgesplitst naar temperatuur (data augustus).

De temperatuurverschillen tussen de drie meetperiodes zijn heel groot; circa 22 °C in augustus versus 12-13 graden in november en februari. Dit verklaart mogelijk voor een deel het verschil in de maximale fotosynthese die in augustus hoger is dan in november en februari (zie figuur bij tabel 3). Opmerkelijk is wel, ondanks het grote temperatuurverschil, dat de fotosynthese snelheid tot zo'n 150-180 μmol in alle periodes vrijwel gelijk is bij eenzelfde lichtintensiteit (zie figuur bij tabel 2). Dit geldt voor beide cultivars en laat zien dat Freesia prima in staat is CO_2 vast te leggen in een temperatuursrange van 12 tot 26°C.

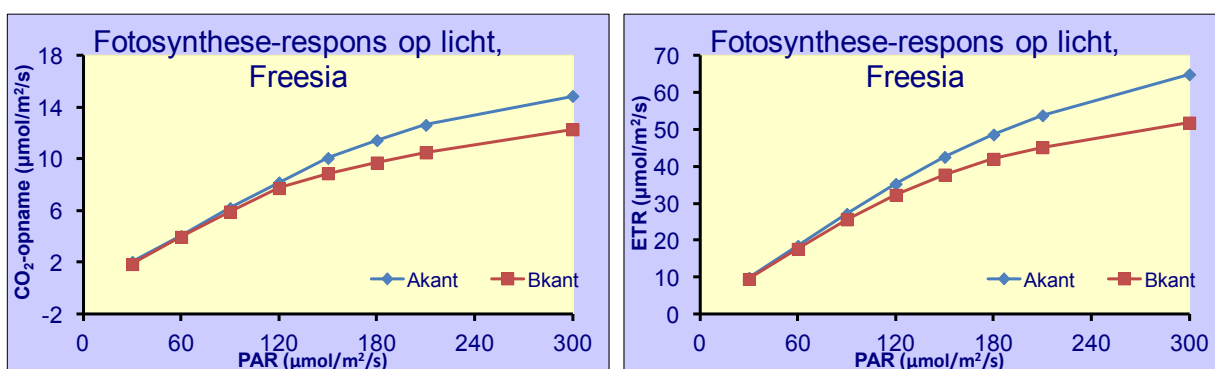
In februari is de ademhaling van een blad (afgifte van CO_2 in het donker) bepaald bij verschillende temperaturen. De ademhaling liep op van 0.5 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ bij 12°C naar 1.5 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ bij 18°C. Deze korte termijn-meting moet als indicatief worden beschouwd, maar komen redelijk overeen met de donkerademhaling in augustus en november en februari, namelijk 1.1 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ bij 22°C in augustus ten opzichte van 0.5-0.6 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ bij 12-13°C in november en februari. De korte-termijn meting overschat dus mogelijk het effect van temperatuur op donkerademhaling iets.



Figuur 10. Korte termijn effect van bladtemperatuur in de meetkop van de fotosynthesemeter op de ademhaling (afgifte van CO_2 in het donker). Hierbij komt CO_2 vrij. Te zien is dat bij een hogere bladtemperatuur de ademhaling toeneemt en er meer CO_2 vrijkomt.

3.5 Boven- of onderkant blad?

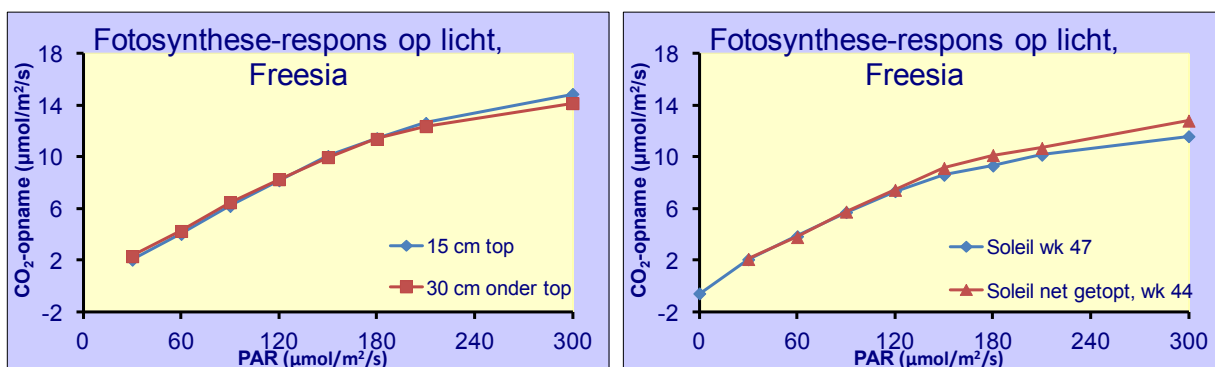
De bladstand van Freesia is net als bij grassen verticaal. Visueel gezien is er niet of nauwelijks verschil tussen beide zijden van de bladeren van Freesia. De indruk bestaat dat één kant van het blad soms wat doffer oogt dan de andere kant. Er zijn metingen verricht aan beide zijden van de bladeren om te achterhalen of de fotosynthese-lichtrespons verschilt vanaf welke kant het licht wordt aangeboden. De op het oog meest groene kant is benoemd als A-kant en de iets doffere kant is benoemd als B-kant. Vanaf zo'n 120 μmol ontstaan er verschillen in de lichtrespons (Figuur 11): De B-kant laat een iets lagere CO_2 -opname zien. Deze lagere opname wordt veroorzaakt door een iets lagere ETR aan de B-kant van het blad. Hierbij moet worden opgemerkt dat het praktische nut om dit te weten niet hoog is. Er kan hier namelijk niet op gestuurd worden en door de verticale bladstand komt het licht toch van beide kanten.



Figuur 11. De lichtrespons van bladeren die vanaf de A-kant (meest groene kant) of de B-kant (iets doffere kant) werden belicht (data november). Links: CO_2 opname. Rechts: ETR.

3.6 Fotosynthese dieper in het gewas / net getopt?

De lichtrespons van bladeren dieper in het gewas verschilde niet ten opzichte van de bladeren bovenin het gewas (Figuur 12 links). Hierbij moet opgemerkt worden dat het gewas vrij open was (gewas in november). Metingen op dezelfde hoogte bij net getopte planten lieten ook geen verlaging van de fotosynthese zien (Figuur 12 rechts).



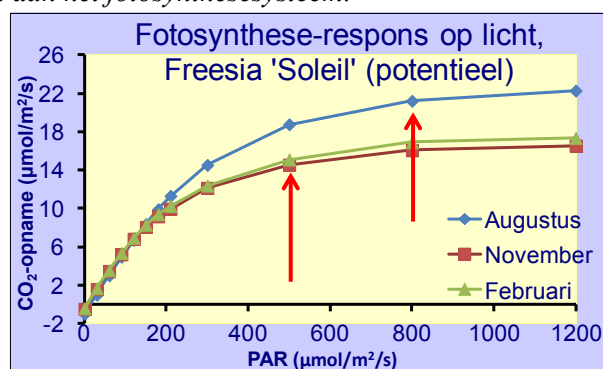
Figuur 12. De lichtrespons van bladeren dieper in het gewas (rode lijn) verschilde niet ten opzichte van die bovenin het gewas (blauwe lijn). In november is dit gemeten bij dezelfde planten (links). In februari is een vergelijkingsmeting gedaan aan een gewas met net getopte bladeren versus een ongetopt gewas (rechts).

3.7 Grenswaarden scherming bij hoge instraling

Bij de getekende rode pijlen in de figuren bij Tabel 3 is het lichtrendement dermate laag dat langdurige blootstelling schade aan het fotosynthese-systeem in het blad kan geven. Bij Freesia cultivars die gevoelig zijn voor bladschade, wordt schermen aangeraden. De lichtgrens ligt in november en februari vrij laag. Waarschijnlijk heeft dit mede te maken met de lage planttemperatuur van zo'n 12-13°C in november en februari ten opzichte van 22°C in augustus.

Tabel 3. Lichtgrens waarboven er lichtstress ontstaat aan het fotosynthesesysteem.

	PAR binnen ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)	Straling buiten (Watt/m^2)
Augustus	800	~530
November	500	~330
Februari	500	~330

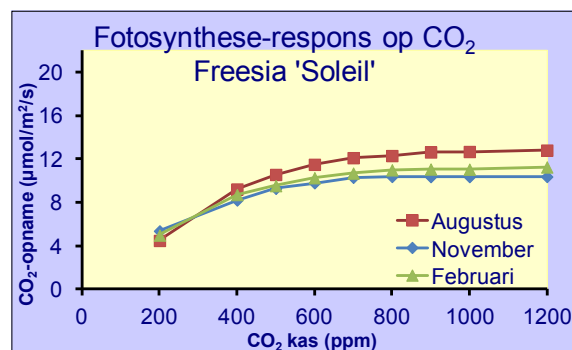


3.8 Grenswaarden CO₂-dosering

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 het verzadigingsniveau voor CO₂ rond de 700 ppm wordt bereikt (gemeten bij 210 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR). Bij een hoog lichtniveau (1200 μmol) stijgt de procentuele toename in fotosynthese door CO₂ dosering en ligt het verzadigingsniveau voor CO₂ op 800-900 ppm (Tabel 5). Tijdens de (kortstondige) metingen werd er geen reactie van de huidmondjes op hoog CO₂ waargenomen.

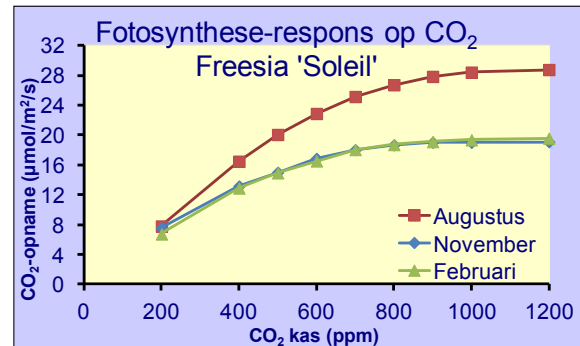
Tabel 4. Rendement CO₂-dosering bij een lichtniveau van 210 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR van Freesia 'Soleil'. 'Ambiance' liet eenzelfde soort patroon zien.

CO ₂ in kas (ppm)	augustus % t.o.v. 400ppm	november	februari
200	49%	65%	57%
400	100%	100%	100%
500	115%	113%	109%
600	125%	119%	118%
700	131%	125%	123%
800	133%	126%	126%
900	135%	126%	127%
1000	137%	126%	127%
1200	139%	126%	129%



Tabel 5. Rendement CO₂-dosering bij verzadigend lichtniveau (1200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR) van Freesia 'Soleil'. 'Ambiance' liet eenzelfde soort patroon zien.

CO ₂ in kas (ppm)	augustus % t.o.v. 400ppm	november	februari
200	47%	58%	52%
400	100%	100%	100%
500	122%	114%	116%
600	139%	128%	128%
700	153%	137%	140%
800	162%	142%	145%
900	169%	145%	148%
1000	172%	144%	150%
1200	175%	145%	152%



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

Freesia 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	700-800 ppm	800 µmol
November	120 µmol	700-800 ppm	500 µmol
Februari	120 µmol	700-800 ppm	500 µmol

Freesia is een gemakkelijk verdampend gewas waarbij de huidmondjes de hele dag open staan. Hierdoor wordt de fotosynthese niet of nauwelijks beperkt. Een aandachtspunt is de vrij lage teelttemperatuur in de maanden november tot februari. Teelten als Freesia worden tegenwoordig flink belicht (50-70 µmol met maxima tot 100 µmol), maar in de winter nog altijd geteeld bij een temperatuur die veelal rond de 11°C etmaal ligt. Bij deze lage temperaturen gaat de plantontwikkeling langzaam en de vraag is dan ook of deze temperaturen wel zo laag moeten zijn. De reden dat de temperatuur zo laag wordt gehouden is om de plantontwikkeling te remmen uit angst voor “slappen takken” en verdrogen van de aangelegde haken. In het voorjaar (vanaf april) is de teelt vele weken sneller dan in de winter, zonder kwaliteitsproblemen. Het ligt voor de hand dat dit komt door de hogere temperaturen in combinatie met het hogere lichtaanbod. Gezien de (inmiddels) vrij hoge lichtintensiteiten SON-T die vandaag de dag gebruikt worden in de freesiateelt in combinatie verdere verhoging van de assimilatenaanmaak door CO₂ dosering, is het de vraag of de teelttemperatuur niet nog teveel is gebaseerd op oude teeltkennis uit een periode dat er nog niet belicht werd, de kassen donker waren, en er nog geen CO₂ werd gedoseerd. Hoe ver de teelttemperatuur in de winter omhoog zou kunnen zonder kwaliteitsverlies is nog een te onderzoeken punt.

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

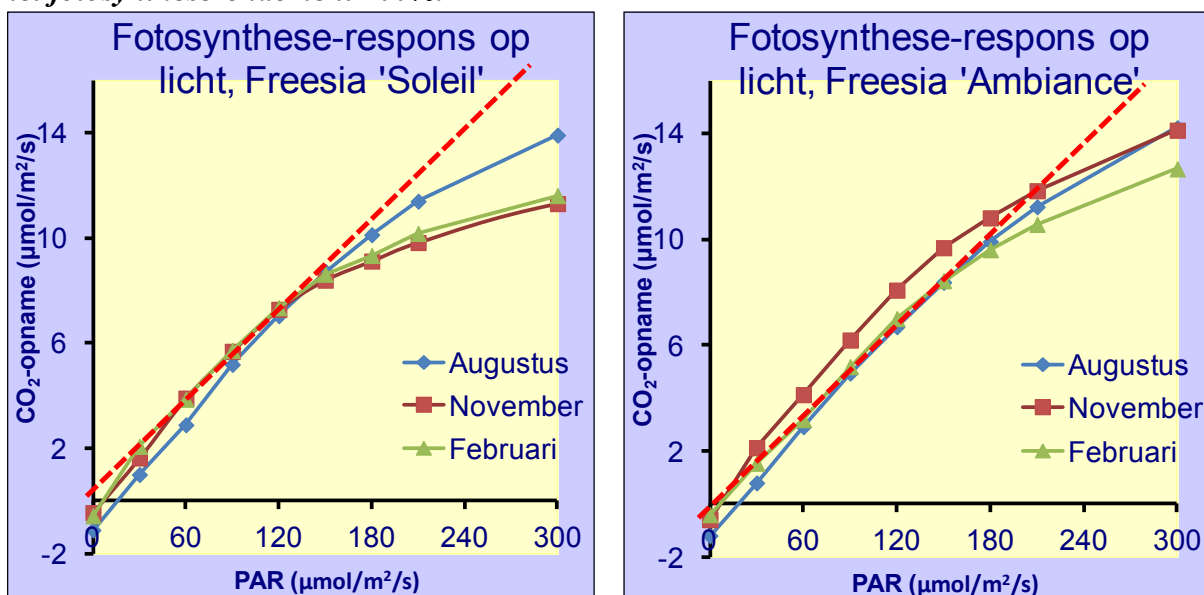
- Pot CS, Trouwborst G, Schapendonk AHCM.** 2011. Handleiding gebruik van plantsensoren voor de fotosynthese in de praktijk. Wageningen: Plant Dynamics B.V., 28p.
- Pot CS, de Vreede SJM, Trouwborst G, Hogewoning SW.** 2015. Activeren van de fotosynthese door sturing op huidmondjesopening. Plant Dynamics B.V. & Plant Lighting B.V., Randwijk. 53p.

Bijlage 1. Protocol voor belichting en CO₂-dosering Freesia

Grenswaarden belichting per seizoen

- Klein verschil tussen de cultivars 'Soleil' en 'Ambiance'.
- Nauwelijks verschil in lichtrendement tussen november en februari.
- Grenswaarde >90% lichtrendement in november en in februari 120 à 150 ('Ambiance') 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%.



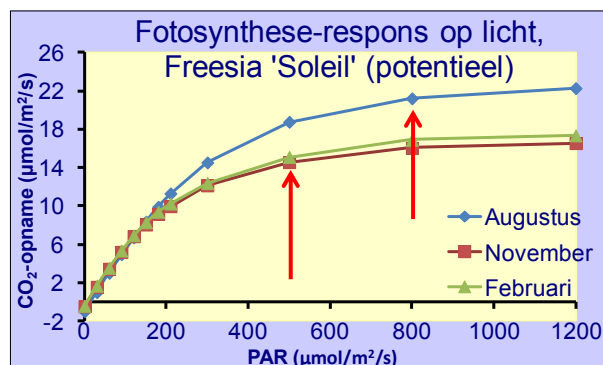
PAR	augustus	november	februari	PAR	augustus	november	februari	Februari
daglicht + lamplicht				daglicht + lamplicht				
0-30	100%	100%	100%	0-30	100%	100%	100%	
30-60	100%	100%	100%	30-60	100%	100%	100%	
60-90	100%	100%	100%	60-90	100%	100%	100%	
90-120	100%	91%	93%	90-120	100%	100%	100%	
120-150	96%	63%	72%	120-150	96%	92%	82%	94%
150-180	79%	41%	48%	150-180	88%	64%	67%	93%
180-210	73%	40%	41%	180-210	75%	59%	55%	90%
210-300	48%	28%	27%	210-300	57%	43%	40%	59%
300-500	25%	17%	18%	300-500	32%	24%	22%	25%
500-800	12%	10%	10%	500-800	17%	14%	13%	15%

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.

Tabel 2. Lichtgrens waarboven er lichtstress ontstaat.

	PAR binnen ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)	Straling buiten (Watt/m^2)
Augustus	800	~530
November	500	~330
Februari	500	~330

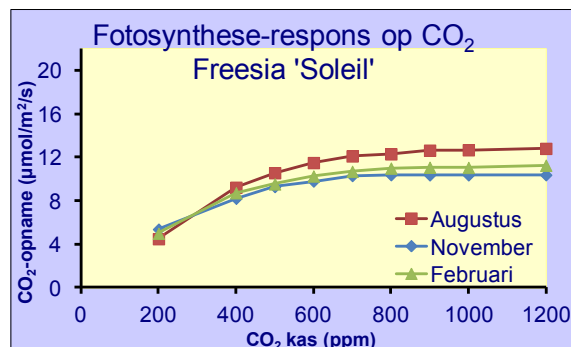


Grenswaarden CO₂-dosering

- Bij lichtniveaus rond de 210 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR wordt bij 700 ppm 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	49%	65%	57%
400	100%	100%	100%
500	115%	113%	109%
600	125%	119%	118%
700	131%	125%	123%
800	133%	126%	126%
900	135%	126%	127%
1000	137%	126%	127%
1200	139%	126%	129%



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 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 (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 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.