

Meer rendement uit licht en CO₂ bij Bromelia



Govert Trouwborst, Sander Hogewoning & Sander Pot
Juni 2013

Meer rendement uit licht en CO₂ bij Bromelia

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 Bromelia 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 volstaan Bijlage 1 & 2 Protocol Bromelia. In hoofdstuk 1 wordt een korte uitleg over fotosynthese gegeven.

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

De resultaten uit deze uitgave mogen vrij worden gebruikt, 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.....	3
1.1 Inleiding fotosynthese	3
1.2 Fotosynthese bij CAM-planten	5
1.3 Lichtrespons van de fotosynthese.....	6
1.4 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
2.4 CAM-toets.....	10
3. Resultaten fotosynthesemetingen Guzmania en Vriesea.....	12
3.1 CAM of C3?.....	12
3.2 Grenswaarden belichting per seizoen.....	12
3.3 Anders belichten aan het begin en einde van de dag?	13
3.4 Effect van de huidmondjes op het lichtrendement voor de fotosynthese.....	14
3.5 Grenswaarden scherming bij hoge instraling	15
3.6 Grenswaarden CO ₂ -dosering (C3-fotosynthese).....	15
4. Resultaten fotosynthesemetingen Aechmea ‘Griffe’	17
4.1 Grenswaarden belichting per seizoen.....	17
4.2 Anders belichten aan het begin en einde van de dag?	18
4.3 Grenswaarden scherming bij hoge instraling	21
4.4 Grenswaarden CO ₂ -dosering overdag	21
5. Conclusies en advies	23
5.1 Guzmania ‘Jive’ en Vriesea ‘Style’ (C3-fotosynthese).....	23
5.2 Aechmea ‘Griffe’ (CAM-fotosynthese).....	23
Referenties.....	25
Bijlage 1. Protocol voor belichting en CO₂-dosering Bromelia: Vriesea ‘style’ en Guzmania ‘Jive’	i
Bijlage 2. Protocol voor belichting en CO₂-dosering Bromelia: Aechmea ‘Griffe’	iv
Bijlage 3. Omrekeningstabel Lux, Watt, μmol.....	vii

1. Inleiding

De meeste tuinbouwgewassen hebben het zogeheten C₃-metabolisme, waarbij overdag CO₂ wordt opgenomen door de bladeren en met behulp van energie uit licht vastgelegd in suikers. Een beperkte groep planten, waaronder sommige Bromelia's, hebben het CAM-metabolisme (crassulacean acid metabolism). CAM wordt gekenmerkt door een nachtelijke CO₂-opname. Bij Bromelia is van lang niet alle rassen bekend of er sprake is van C₃, CAM, of van de hybride vorm (facultatief CAM). De C₃-fotosynthese wordt kort toegelicht in hoofdstuk 1.1 en de CAM-fotosynthese in hoofdstuk 1.2.

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.

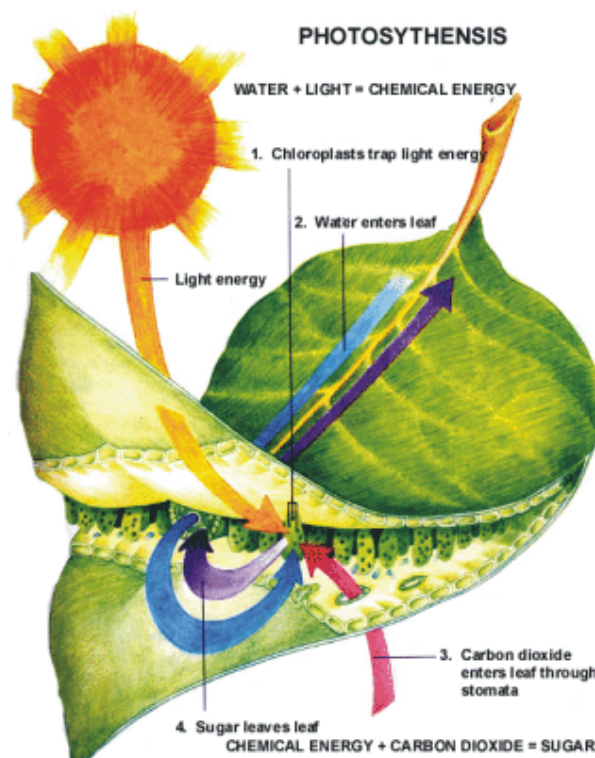


Fig. 1. Essentiële zaken rondom de fotosynthese: Lichtenergie wordt geabsorbeerd door het blad (1). Water komt binnen via de nerven (2). Tevens komt er CO₂ binnen via de huidmondjes (3). Met behulp van de lichtenergie worden er suikers gemaakt (4).

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 CO_2 naar binnen kan gaan (zie nr. 3 in Fig. 1 en Fig. 2A). Bij een grotere geleidbaarheid van de huidmondjes komt het 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.

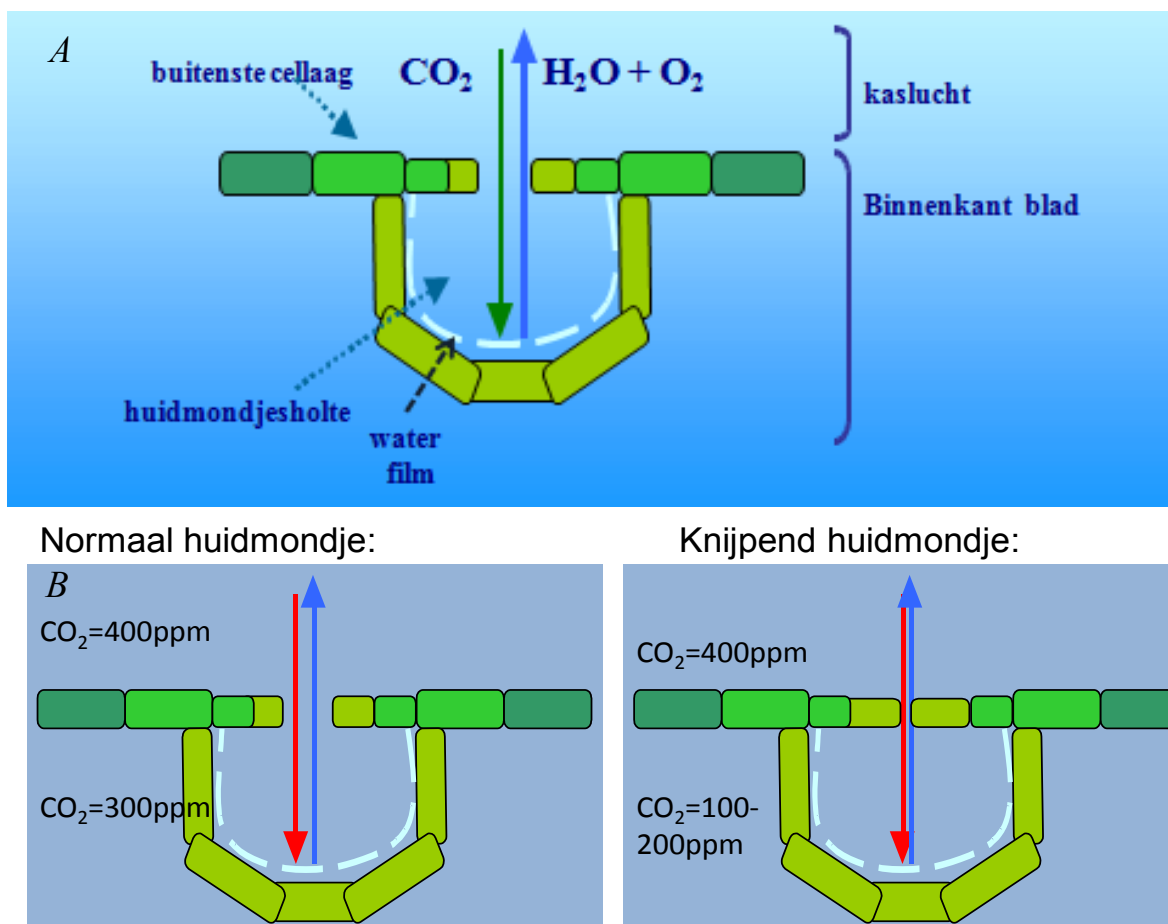


Fig. 2. Schematische tekening van een huidmondje (A) en het verschil tussen de CO_2 -concentratie in de kaslucht en in het blad door de mate van huidmondjesopening (B).

Voor een efficiënte fotosynthese bij C_3 -planten is het dus essentieel dat de huidmondjes goed openen. 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 scherpen soms meer netto resultaat op dan verloren wordt door het verlies aan licht. Bij CAM-planten (o.a. Phalaenopsis, sommige Bromelia-rassen en oudere plantstadië bij Kalanchoë) werkt de fotosynthese radicaal anders, dit wordt in hoofdstuk 1.2 toegelicht.

1.2 Fotosynthese bij CAM-planten

Bij CAM-planten zitten overdag de huidmondjes dicht en staan 's nachts open (Fig. 3). 's nachts wordt de CO₂ via het enzym PEPC (fosfo-enol-pyruvaat carboxylase) opgenomen en vervolgens vastgelegd als malaat (appelzuur) in de vacuole. Overdag wordt het malaat afgebroken en stijgt de CO₂ binnenin het blad tot zeer hoge waarden. De CO₂ wordt vervolgens met behulp van de lichtenergie via het enzym Rubisco vastgelegd als suiker.

Crassulacean Acid (Zuur) Metabolisme (CAM)

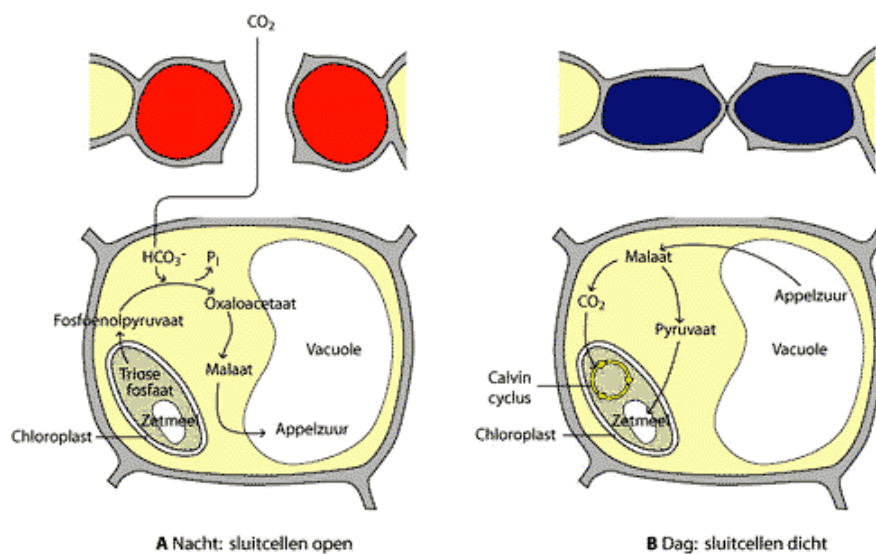


Fig. 3. Schematische tekening van de werking van CAM-fotosynthese. Overdag zijn de huidmondjes gesloten en 's nachts geopend.

De CAM-fotosynthese kan opgedeeld worden in 4 fasen:

1. *Fase I, Nacht:* Tijdens de nacht openen de huidmondjes en wordt CO₂ opgenomen. Door middel van het enzym PEPC wordt CO₂ vastgelegd als malaat (appelzuur) en opgeslagen in de vacuole.
2. *Fase II, Nacht-dagovergang:* Deze fase is kort en niet altijd duidelijk aanwezig. Hierbij zijn de huidmondjes (nog) open terwijl de dag begint. Op dat moment is er

¹ Het dampdruk-deficit tussen blad en kaslucht (VPD) is de drijvende kracht achter gewasverdamming. 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.

reeds een kleine hoeveelheid licht aanwezig. De plant zal op het einde van deze fase zijn huidmondjes sluiten.

3. *Fase III, Overdag*: De huidmondjes zijn gesloten. CO₂ wordt vrijgemaakt uit malaat, waarbij het interne CO₂-gehalte in het blad stijgt tot zeer hoge waarden. Met behulp van lichtenergie wordt deze CO₂ vastgelegd als suikers via het enzym Rubisco.
4. *Fase IV, Dag-nachtovergang*: De huidmondjes gaan open. In deze fase is het mogelijk dat er direct CO₂ wordt gebonden aan Rubisco (via C3-fotosynthese).

Voor meer achtergrondinformatie over CAM-fotosynthese bij Bromelia's, zie Marissen en Warmenhoven (2004).

1.3 Lichtrespons van de fotosynthese

Het is algemeen bekend dat een hogere lichtintensiteit leidt tot een hogere fotosynthesesnelheid (Fig. 4). 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.

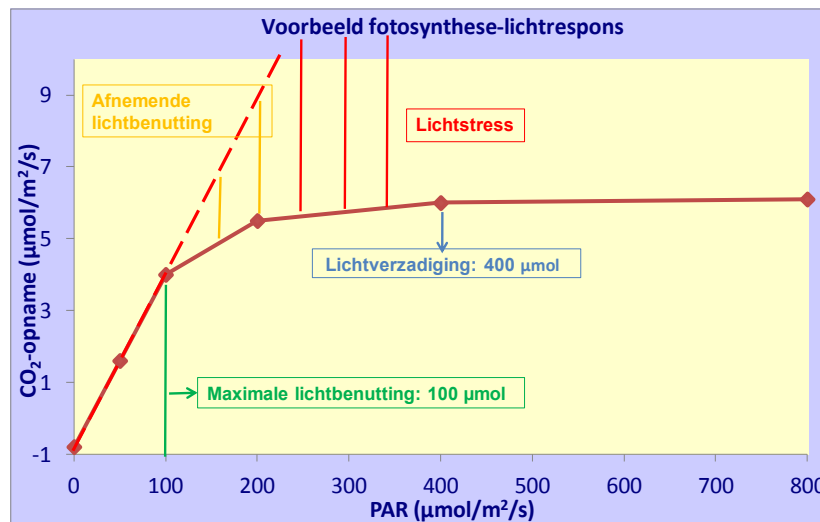


Fig. 4. Voorbeeld respons van de fotosynthese bij toenemende lichtintensiteit. Zolang als de fotosynthese meeloopt met de rood gestreepte lijn is de lichtrendement van de fotosynthese 100%. Het is vooral interessant om in dit gebied te belichten. Naarmate de 2 lijnen verder uit elkaar gaan lopen (weergegeven via de oranje en rode verticale lijnen) is er sprake van een steeds groter wordende lichtovermaat. Zo ontstaat er bij een hoge lichtintensiteit lichtstress.

Bij CAM-planten wordt de fotosynthese niet gemeten via de CO₂-opname maar via het elektrontransport (ETR). De huidmondjes zijn immers overdag gesloten, dus gasuitwisseling meten leidt dan nergens toe. De ETR kan via chlorofyl-fluorescentie wel gemeten worden en is een betrouwbare maat voor de efficiëntie waarmee licht wordt benut om CO₂ vast te leggen. Voor meer achtergrondinformatie over ETR en chlorofyl-fluorescentie, zie Pot *et al.* (2011).

1.4 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. 5).

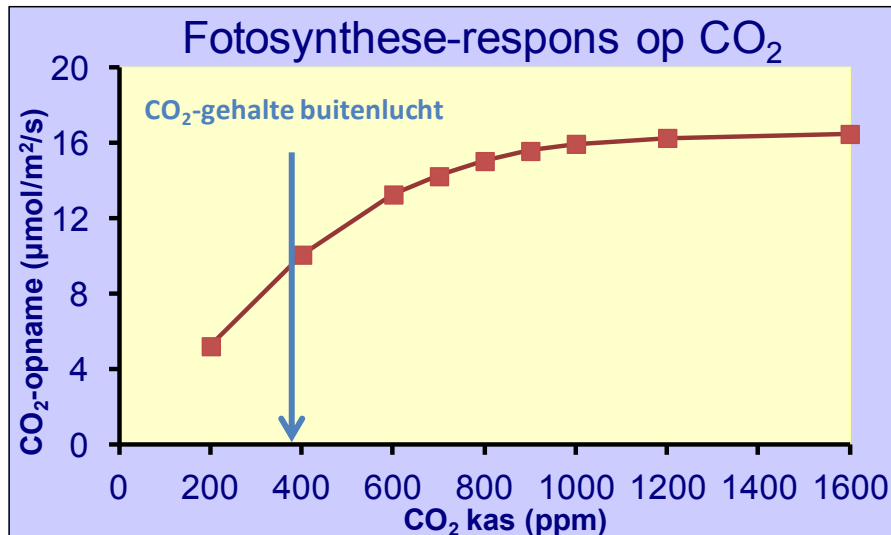


Fig. 5. Voorbeeld respons van de fotosynthese bij toenemend CO₂. Van lage naar hoge CO₂-concentraties in de kas neemt de fotosynthese eerst snel toe om vervolgens bij hoge concentraties sterk af te vlakken.

Waar CO₂-opname in C₃-bladeren overdag plaatsvindt via het enzym Rubisco, verloopt de opname bij CAM-planten dus voornamelijk 's nachts via het enzym PEPC. PEPC bindt zich veel efficiënter aan CO₂ dan Rubisco, waardoor CO₂-verzadiging al bij lagere concentraties optreedt. Aan het einde van de nacht is de opnamesnelheid lager omdat de malaatpool 'vol' raakt.

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 CO₂ bindt om suikers te maken): bij langdurige blootstelling aan verhoogd CO₂ kan de werking van Rubisco omlaag gaan, waardoor de productiviteit relatief sterk afneemt als de CO₂-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 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 per periode

Er is gemeten in de zomer (augustus), het late najaar (november) en het einde van de winter (februari) bij de cultivars *Guzmania 'Jive'*, *Vriesea 'Style'* en *Aechmea 'Griffe'*. De planten waren in het halfwasstadium, rond de 14 weken oud. Voor details, zie Tabel 1.

Tabel 1. Ras en plantstadia die gemeten zijn.

	Guzmania 'Jive'	Vriesea 'Style'	Aechmea 'Griffe'
Augustus	Halfwas	Halfwas	Halfwas
November	Halfwas	Halfwas	Halfwas Bloei
Februari	Halfwas	Halfwas	Halfwas

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 geschermd 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.

2.4 CAM-toets

Door Plant Dynamics is een test ontwikkeld waarmee aangetoond kan worden of bladeren CAM zijn of niet. De test is gebaseerd op de pH van een bladponsje die in een oplossing direct een kleuromslag laat zien. Het testresultaat is dus direct zichtbaar.

Zoals genoemd in hoofdstuk 1.2 nemen CAM-planten in de nacht CO₂ op dat vastgelegd wordt in malaat (appelzuur). Door de malaatopbouw in de nacht zakt de pH van de bladeren van ongeveer 6.5 aan het eind van de dag tot ongeveer 4 tot 4.5 aan het einde van de nacht. Door 's avonds (begin van de nacht) en 's ochtends (aan het einde van de nacht) de pH van bladponsjes te bepalen kan worden nagegaan of bladeren CO₂ vastleggen via het C3- of het CAM-metabolisme.

Werkwijze:

Vul met een pipet enkele gaten van de microwell-plaat met neutrale indicatorvloeistof (rood). Neem bladponsjes met de kurkboor en doe deze in de vloeistof. Plet de bladponsjes zodat het sap zich mengt met de vloeistof. Noteer direct het resultaat en/of neem een foto (als voorbeeld, zie Foto 2).

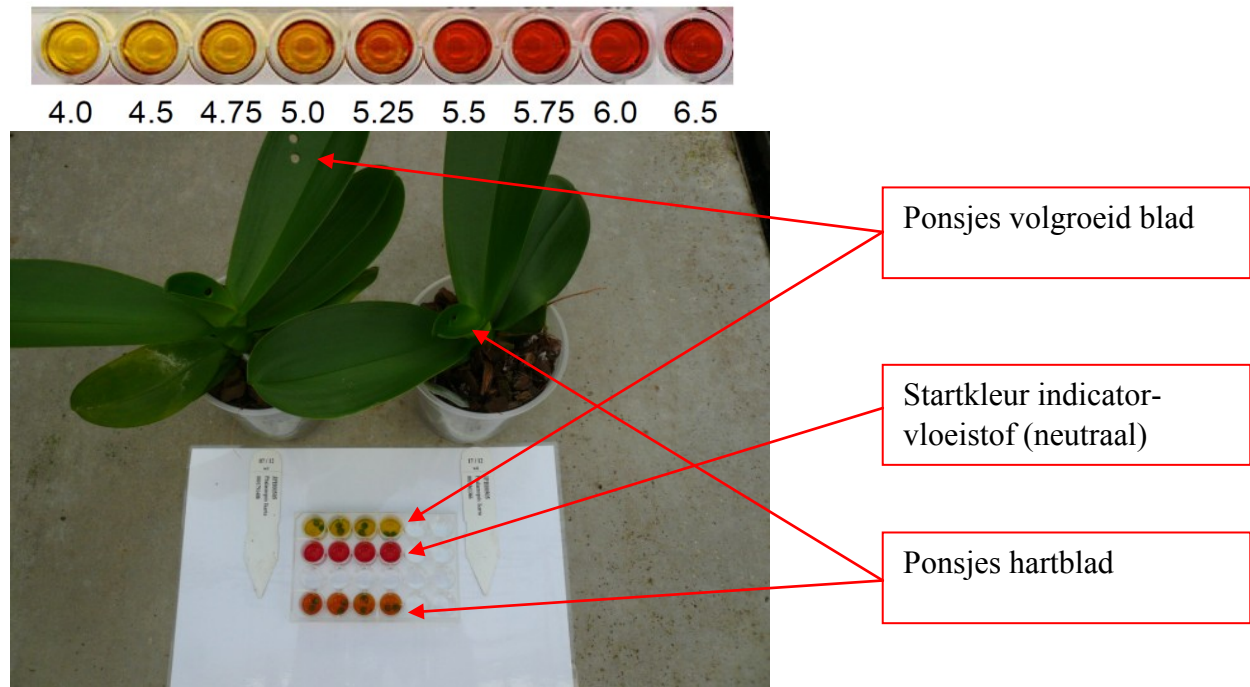


Foto 2. Kleurindicator met bijbehorende pH en toepassing van de CAM-toets bij Phalaenopsis 'Ikaria' vroeg in de ochtend. De volgroeide bladeren kleurden de rode neutrale vloeistof direct geel (zuur), conclusie: bladeren hebben CAM-fotosynthese. De hartbladeren kleurden de vloeistof oranje, conclusie: waarschijnlijk ook al CAM-fotosynthese met nog maar een kleine malaatopbouw in de nacht.

3. Resultaten fotosynthesemetingen Guzmania en Vriesea

3.1 CAM of C3?

Eerst moest worden vastgesteld of de fotosynthese via C3- of CAM verliep. Via de CAM-toets was snel te achterhalen dat Vriesea en Guzmaniaplanten C3-fotosynthese en Aechmea's CAM-fotosynthese hadden (Foto 3). In dit hoofdstuk worden de resultaten van de C3-planten Guzmania en Vriesea besproken en in hoofdstuk 4 de resultaten van de CAM-plant Aechmea.

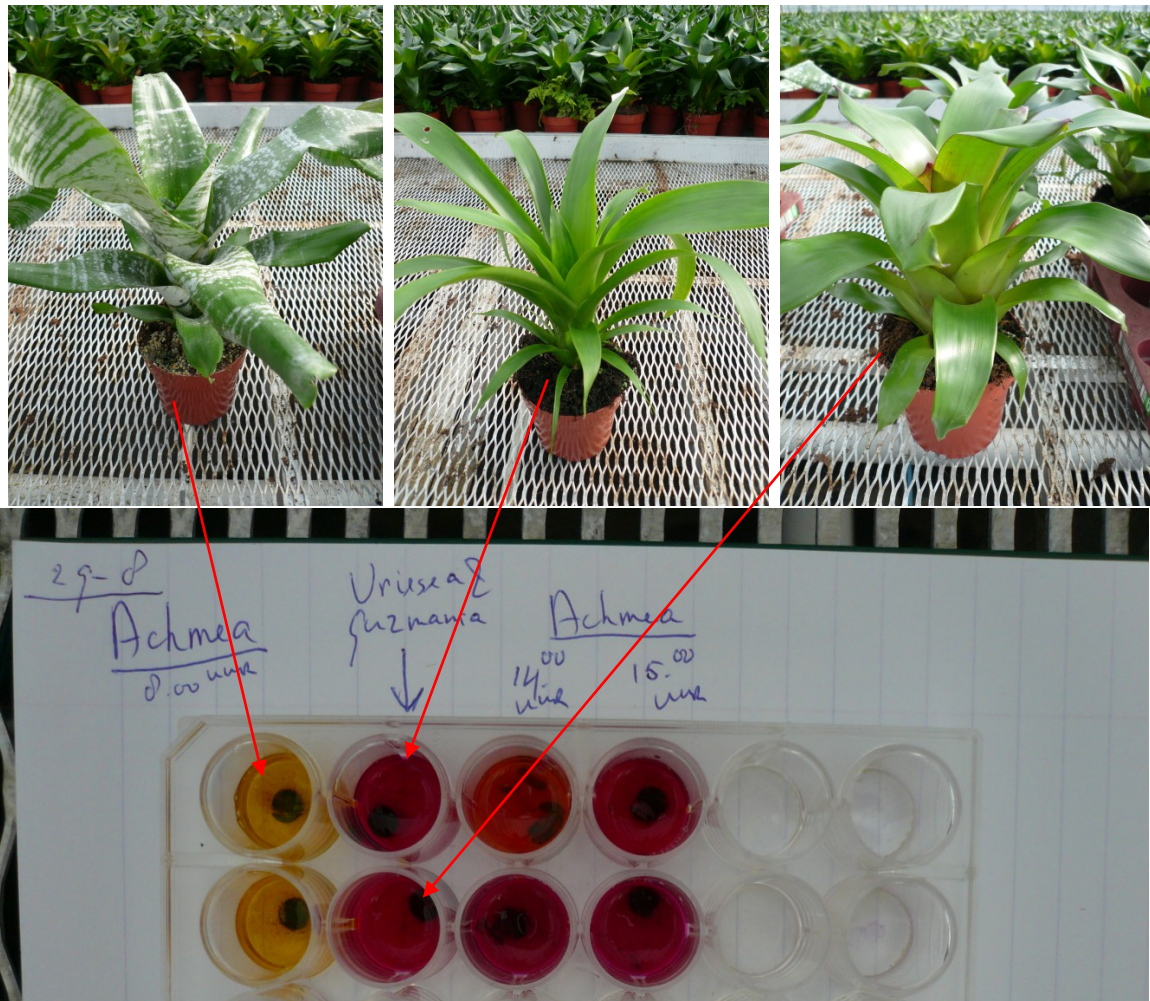


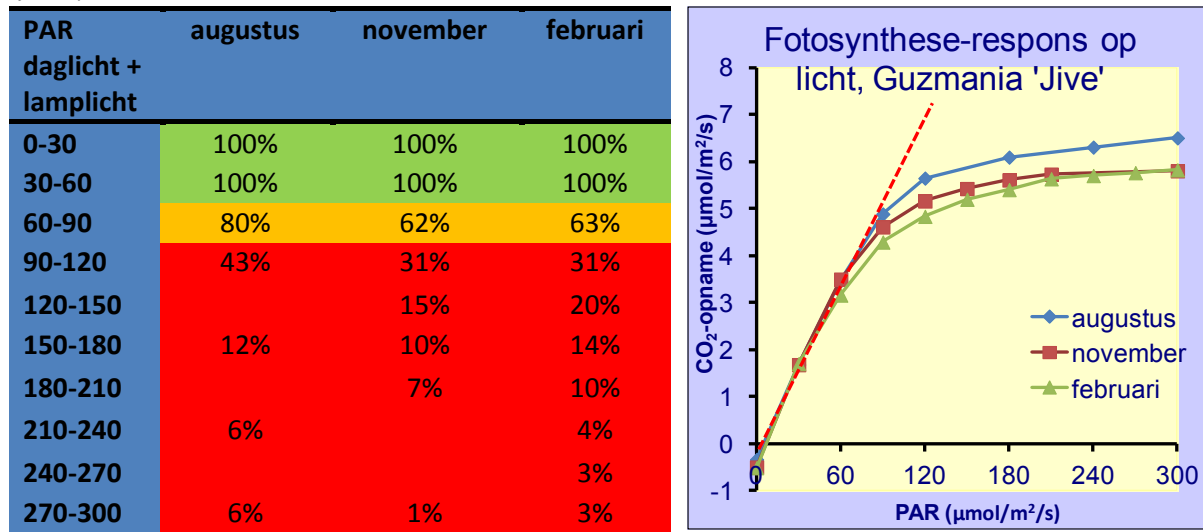
Foto 3. Gemeten planten (van links naar rechts: Aechmea 'Griffe', Guzmania 'Jive' en Vriesea 'Style') en bijbehorende CAM-toets. Aechmea kleurt 's ochtends direct geel en is dus CAM. Guzmania en Vriesea veranderen de kleur van de rode vloeistof niet en zijn dus C3. 's Middags raakt het malaat op bij Aechmea en is er bijna geen geel-kleuring meer (data augustus).

3.2 Grenswaarden belichting per seizoen

De resultaten van Guzmania 'Jive' en Vriesea 'Style' waren min of meer hetzelfde. Vandaar dat in onderstaand overzicht alleen de resultaten van Guzmania gegeven worden.

Tabel 3 laat het effect van de verschillende seizoenen zien op het lichtrendement gemeten gedurende de loop van de dag. Tot een intensiteit lamplicht plus daglicht van 60 μmol blijft het lichtrendement in alle seizoenen maximaal. Erboven waren de verschillen tussen de seizoenen beperkt: de zomer laat een iets hogere fotosynthese bij lichtverzadiging zien.

Tabel 3. Verloop van het fotosyntheserendement bij toenemend lichtniveau bij *Guzmania Jive* (overdag!). Zolang als de gemeten lijnen evenwijdig met de rode stippellijn lopen is het fotosyntheserendement 100%.



Concreet betekent dit het volgende voor een aantal voorbeeldsituaties:

- *Situatie 1.* De lampen met een lichtintensiteit van $30 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ staan in de winter om 7:00 'ochtends aan en de lichtintensiteit aan daglicht is verwaarloosbaar → Het lamprendement op de fotosynthese is 100%.
- *Situatie 2.* De lampen met een lichtintensiteit van $30 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ staan om 9.00 's ochtends aan. Op een bewolkte dag in februari is de zonlichtintensiteit in de kas zo'n $50 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. →bij elkaar is er dan $80 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ licht in de kas → Het lamprendement op de fotosynthese van de laatste $20 \mu\text{mol}$ is nog 63%.
- *Situatie 3.* De lampen met een lichtintensiteit van $30 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ staan om 9.00 '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 $150 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ licht in de kas → Het rendement van de lampen is dan slechts 20%. Met zo'n laag rendement kan het licht beter uitgeschakeld worden.

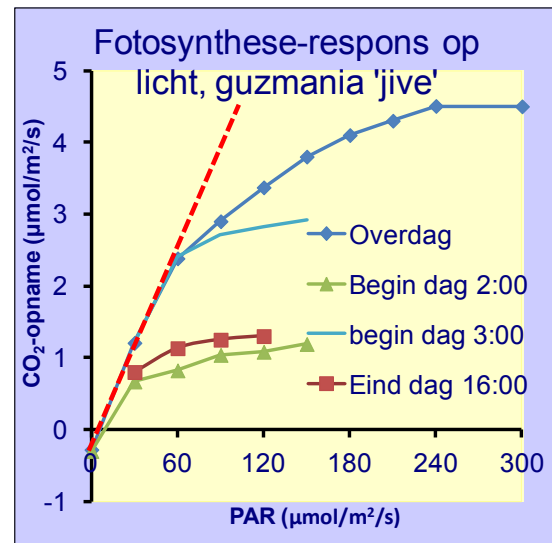
Een rendement van 100% lichtbenutting is geen vereiste; soms zijn de kwaliteitseisen en een strak teeltschema overwegingen om bij een lager rendement het licht toch aan te laten. De balans tussen de extra kosten van belichting tegenover de meeropbrengst door de hogere fotosynthese en/of andere kwaliteitsaspecten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

3.3 Anders belichten aan het begin en einde van de dag?

In de praktijk start belichting vroeg in de ochtend tussen de 24:00 en 4:00 en wordt beneden een zekere drempel voor daglicht-instraling doorbelicht tot ongeveer 12:00 uur 's middags. Aan het einde van de dag wordt er dus niet belicht. Tabel 4 (rechterfiguur) laat zien dat het meer dan een uur duurt voordat de planten maximaal functioneren. Dit komt voornamelijk doordat de huidmondjes gesloten zijn en maar langzaam open gaan. Tijdens de periode voor de natuurlijke dag is het raadzaam om niet meer dan $60 \mu\text{mol}$ te belichten (Tabel 4). Aan het einde van de dag daalt het rendement ook door huidmondjessluiting.

Tabel 4. Effect van tijdstip van de dag op het lichtrendement. De 'dag' startte 2:00 en eindigde met natuurlijk daglicht rond 18:00 (data februari).

PAR daglicht + lamplicht	Begin dag (3:00 uur, 1 uur licht)	Overdag	Eind dag
0-30	100%	100%	94%
30-60	100%	100%	28%
60-90	26%	63%	10%
90-120	9%	31%	4%
120-150	8%	20%	
150-180		14%	
180-210		10%	
210-240		4%	
240-270		3%	
240-300		3%	



3.4 Effect van de huidmondjes op het lichtrendement voor de fotosynthese

Zoals uitgelegd in hoofdstuk 1.1 is het heel belangrijk voor een goede fotosynthese dat de huidmondjes open staan. Bij *Guzmania* en *Vriesea* was dit met grote regelmaat niet het geval. Fig. 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 CO₂ en de mate van huidmondjesopening. Bij geopende huidmondjes (blauwe lijn) is het lichtrendement voor de fotosynthese veel hoger dan bij bijna gesloten huidmondjes (lichtgroene lijn).

Oorzaken voor huidmondjessluiting kunnen zijn:

- Te hoog CO₂
- Te hoge VPD
- Tekort aan water
- plantstadium ('uitontwikkelde' plant kan tekort aan sinks hebben)
- 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 van de huidmondjessluiting bij *Guzmania* en *Vriesea* is. Het voorkomen hiervan en dus op gang houden van het fotosynthese-rendement biedt potentie voor een grote productietoename.

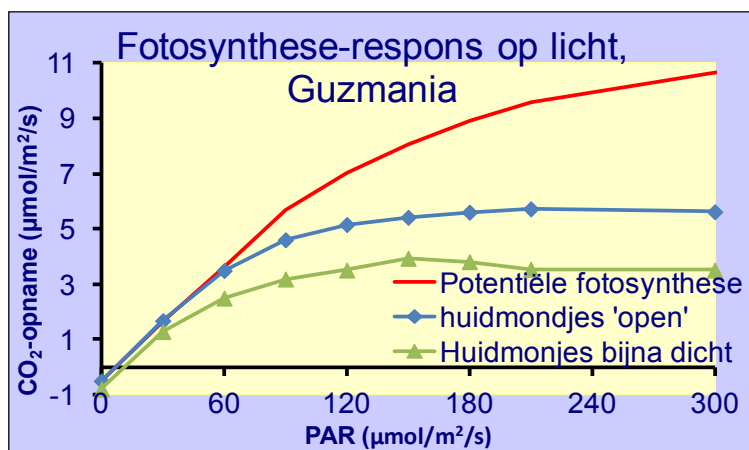


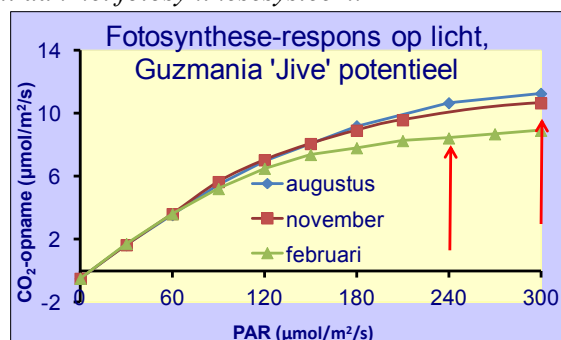
Fig. 6. Effect van de huidmondjes op de lichtrespons van de fotosynthese. De rode lijn geeft aan wat potentieel haalbaar is. Of de gerealiseerde fotosynthese in de buurt komt van de rode lijn is o.a. afhankelijk van de beschikbaarheid van CO₂ en de huidmondjesopening.

3.5 Grenswaarden scherming bij hoge instraling

Bij de getekende rode pijlen in de figuur bij Tabel 5 is het lichtrendement dermate laag dat langdurige blootstelling schade aan het fotosynthese-systeem in het blad kan geven. Bij deze lichtniveaus kan er beter geschermd worden.

Tabel 5. Lichtgrens waarboven er lichtstress ontstaat aan het fotosynthesesysteem.

	PAR binnen (µmol/m ² /s)	Straling buiten (Watt/m ²)
Augustus	300	~200
November	300	~200
Februari	240	~160

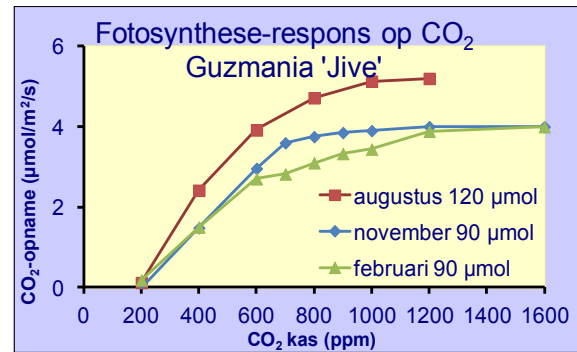


3.6 Grenswaarden CO₂-dosering (C3-fotosynthese)

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 6 blijkt dat rond de 900 ppm het verzadigingsniveau wordt bereikt. Boven de 1000 ppm sluiten de huidmondjes langzaam. Het verzadigingsniveau ligt vrij hoog. Dit wordt veroorzaakt doordat de mate van huidmondjesopening zwaar limiterend is voor de fotosynthese. Bij een grote weerstand bij de huidmondjes, zoals hier het geval is, heeft het verhogen van de CO₂ een relatief groot effect. Bij gewassen met een grote huidmondjesopening, zoals chrysan, leidt een verhoging in CO₂ dosering van 400 naar 800 ppm tot hooguit 50%-60% meer fotosynthese. In Tabel 6 is te zien dat CO₂ doseren tot wel 150% meer fotosynthese kan geven bij Guzmania en Vriesea. Ook is in de tabel te zien dat van uit het oogpunt van rendement is het aan te bevelen om niet hoger te doseren dan 900 ppm.

Tabel 6. Rendement CO₂-dosering bij 90-120 μmol/m²/s PAR

CO ₂ kas	Augustus % t.o.v. 400ppm	November	Februari
200	5%	0%	12%
400	100%	100%	100%
600	162%	200%	180%
700		243%	188%
800	195%	253%	207%
900		260%	222%
1000	213%	264%	229%
1200	215%	270%	259%
1600		270%	267%

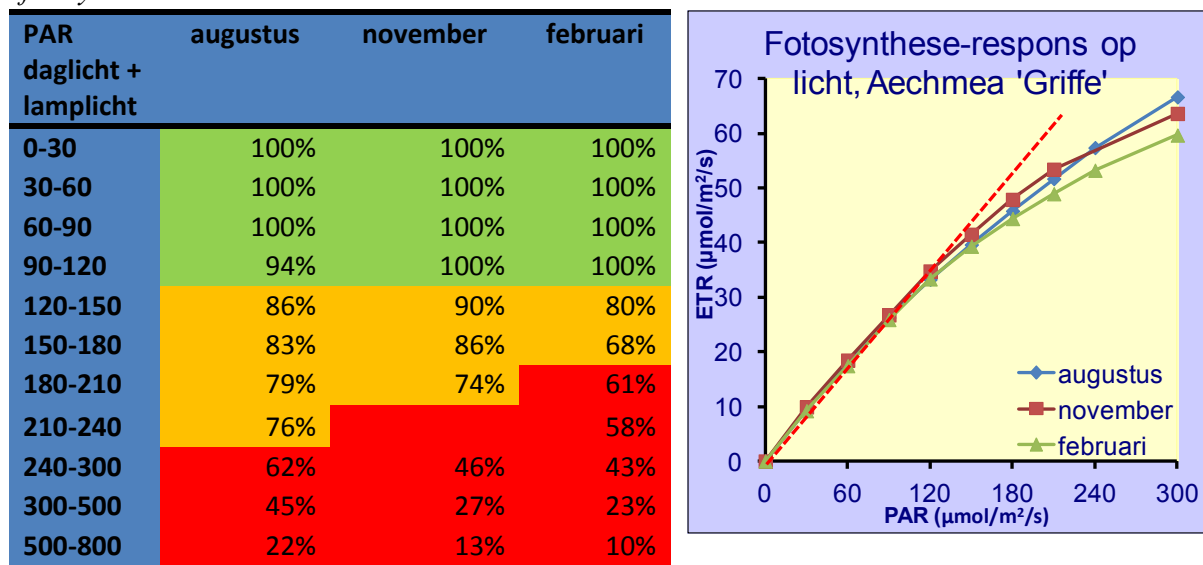


4. Resultaten fotosynthesemetingen Aechmea 'Griffe'

4.1 Grenswaarden belichting per seizoen

Tabel 7 laat het effect van de verschillende seizoenen zien op het lichtrendement. Tot 120 μmol blijft het lichtrendement in alle seizoenen maximaal. Erboven waren de verschillen tussen de seizoenen beperkt. In het najaar is tevens het bloeistadium gemeten en dat verschilde niet van het halfwas stadium

Tabel 7. Verloop van het fotosyntheserendement bij toenemend lichtniveau bij Aechmea 'Griffe' (overdag!). Zolang als de gemeten lijnen evenwijdig met de rode stippellijn lopen is het fotosyntheserendement 100%.



Concreet betekent dit het volgende voor een aantal voorbeeldsituaties:

- *Situatie 1.* De lampen met een lichtintensiteit van 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ staan in de winter om 7:00 'ochtends aan en de lichtintensiteit aan daglicht is verwaarloosbaar → Het lamprendement op de fotosynthese is 100%.
- *Situatie 2.* De lampen met een lichtintensiteit van 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ staan om 9.00 's ochtends aan. Op een bewolkte dag in februari is de zonlichtintensiteit in de kas zo'n 50 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. →bij elkaar is er dan 80 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ licht in de kas → Het lamprendement op de fotosynthese is nog steeds 100%.
- *Situatie 3.* De lampen met een lichtintensiteit van 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ staan om 9.00 '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 150 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ licht in de kas → Het rendement van de lampen is dan 80%.

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 bepalen waar het economische optimum uiteindelijk ligt.

4.2 Anders belichten aan het begin en einde van de dag?

In de praktijk start belichting vroeg in de ochtend tussen de 4:00 en 8:00 en wordt beneden een zekere drempel voor daglicht-instraling doorbelicht tot ongeveer 12:00 uur 's middags. Aan het einde van de dag wordt er dus niet belicht.

De volgende twee principes zijn van belang om in gedachten te houden m.b.t. de resultaten:

1. Gedurende de overgangsfase van donker naar licht gaan de huidmondjes dicht en wordt gestart met de afbraak van malaat zodat de CO₂-concentratie in het blad stijgt.
2. Ruim voor de overgang van licht naar donker kan de malaatpool al uitgeput zijn, hierdoor daalt het lichtrendement.

Fig. 7 brengt de opstartfase van *Aechmea* in beeld in februari. De belichting ging aan om 2:00 uur 's nachts. Het rendement was bij start van de belichting erg laag (Fig. 7A; rode lijn). en er werd nog een CO₂-opname gemeten die vrijwel onafhankelijk was van de lichtintensiteit (Fig. 7B). Dat geeft aan dat het blad nog bezig is met het opslaan van malaat. In Fig. 7A is te zien dat ook de ETR langzaam stijgt gedurende de ochtend. Pas enige uren nadat de belichting startte was het lichtrendement maximaal (lichtblauwe lijn). De metingen in november lieten een vergelijkbaar patroon zien vanaf de start van de belichting, het maximale rendement werd toen in twee uur bereikt. Het is dus van belang om bij *Aechmea* de lichtintensiteit langzaam op te schakelen, bijvoorbeeld in stappen van 30 μmol met ruime tussentijden. Overigens is op dit moment in de praktijk vaak niet meer dan 30-40 μmol geïnstalleerd. Tabel 8 laat zien dat het rendementsverlies groot is als er gedurende de eerste twee uur met meer dan 60 μmol belicht wordt. Meer licht levert dan alleen maar lichtstress op.

Opvallend is ook het grote 'lek' aan CO₂ dat gemeten wordt bij 0 μmol licht (Fig. 7B). Hierbij moet worden opgemerkt dat dit 'lek' alleen een verlies is als er geen licht aanwezig is. Doordat de huidmondjesopening ook gereguleerd wordt door dagritme, is het van belang dat het begin van de dag niet zomaar verschoven wordt. Als de dag namelijk opeens later begint, zullen de huidmondjes op de oorspronkelijke tijd opengaan en zal er veel CO₂ verloren gaan.

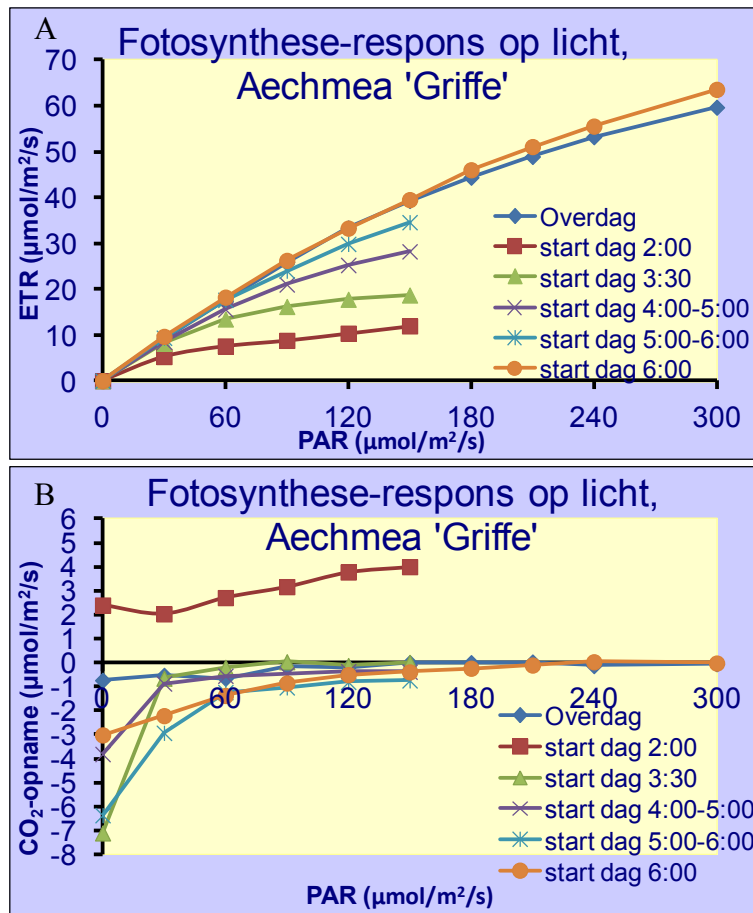


Fig. 7. Effect op het lichtrendement aan het begin van de dag in november (A,B) en februari (C,D). A: ETR-respons. B: Opgenomen CO₂. De belichting stond in februari aan van 2:00-17:00 uur, zonder rond 18:00.

Al vroeg in de middag begint het lichtrendement al weer te dalen doordat de malaat opraakt (Fig. 8A; rode lijn). Op dat moment zijn de huidmondjes nog vrijwel dicht en is er nog nauwelijks CO₂-opname (Fig. 8B, rode lijn). Rond 15:00 uur is het rendement gestegen ten opzichte van 13:00 uur doordat de huidmondjes open zijn gegaan en er C3-fotosynthese plaats vindt. Dit is ook te zien aan de lichtafhankelijke CO₂-opname om 15:00 uur (Fig. 8B). Echter het lichtrendement blijft fors lager dan het rendement 'overdag' (Tabel 8).

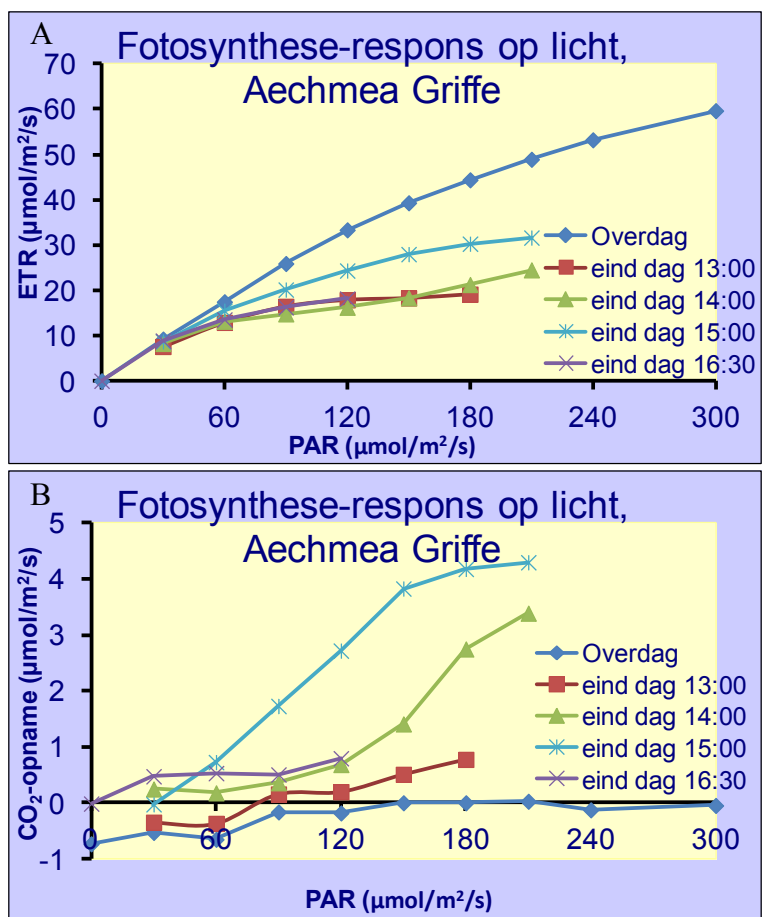
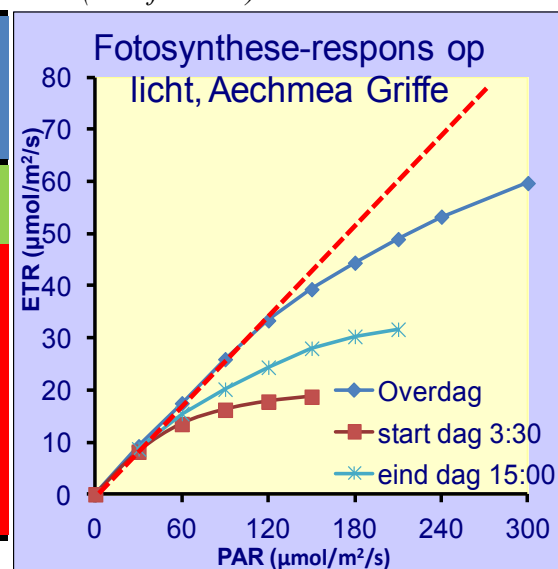


Fig. 8. Effect op het lichtrendement van Aechmea aan het eind van de dag. A: ETR-respons. B: Opgenomen CO₂. De belichting stond aan van 2.00 tot uiterlijk 17.00 uur, zonder rond 18:00 (data februari).

Tabel 8. Effect van tijdstip van de dag op het lichtrendement (data februari)

PAR daglicht + lamplicht	Begin dag (3:30 uur na 1.5 uur licht,)	Overdag	Eind dag (15:00)
0-30	100%	100%	100%
30-60	71%	100%	91%
60-90	37%	100%	63%
90-120	21%	100%	57%
120-150	13%	80%	49%
150-180		68%	31%
180-210		61%	18%
210-240		58%	
240-300		43%	



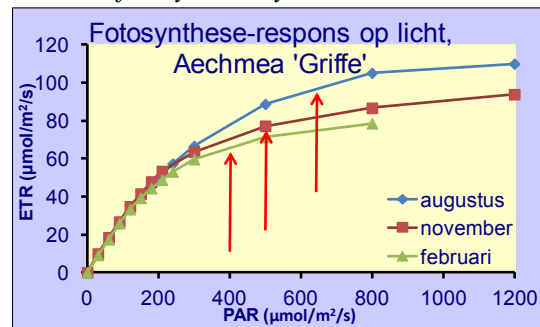
* De dag begon 2:00 's ochtends en eindigde met natuurlijk daglicht rond 18:00 (assimilatielicht tot 17:00).

4.3 Grenswaarden scherming bij hoge instraling

Bij de getekende rode pijlen in de figuur bij Tabel 9 is het lichtrendement dermate laag dat langdurige blootstelling schade aan het fotosynthese-systeem in de bladeren kan geven. Bij deze lichtniveaus kan er beter geschermd worden. Uit de tabel blijkt dat Aechmea voor een bromelia relatief hoge lichtniveau's kan verdragen (zie ook hoofdstuk 3.5 voor vergelijk met Guzmania en Vriesea).

Tabel 9. Lichtgrens waarboven er lichtstress ontstaat aan het fotosynthesesysteem.

	PAR binnen ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)	Straling buiten (Watt/m^2)
Augustus (opweek)	650	~430
November (opweek)	500	~330
Februari (opweek)	400	~270



4.4 Grenswaarden CO₂-dosering middag

Bij C3-bladeren laat de fotosynthese-respons op toenemend CO₂ evenals de fotosynthese-respons op toenemend licht een verzadiging zien: Naarmate er meer CO₂ gedoseerd wordt, wordt de toename in CO₂-opname (fotosynthese) steeds kleiner (zie ook hoofdstuk 3.6). Bij de CAM-bladeren van Aechmea ligt dit iets complexer. Bij hogere concentratie dan 600 ppm lopen de huidmondjes dicht (Fig. 9). Hierdoor neemt in augustus en februari de fotosynthese bij hogere CO₂-niveaus zelfs af (zie figuur bij Tabel 10). Uit Tabel 10 blijkt dat rond de 600 ppm het verzadigingsniveau wordt bereikt. Voor adviezen over CO₂-dosering in de nacht zie het rapport 'Meer rendement uit licht en CO₂ bij Phalaenopsis'.

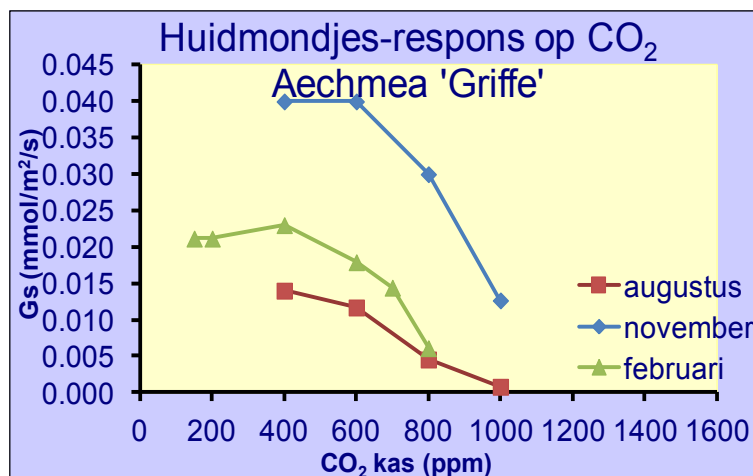
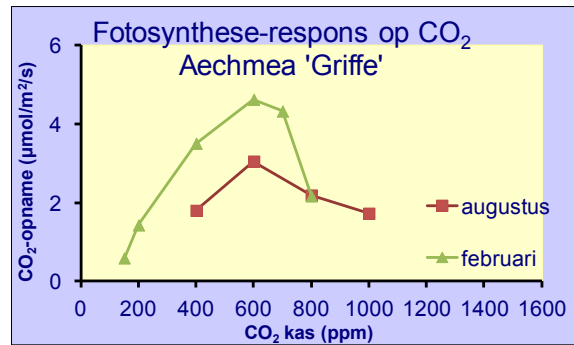


Fig. 9. Afname van de huidmondjesgeleidbaarheid (G_s) bij hogere concentraties CO₂.

Tabel 10. Rendement CO₂-dosering bij 120 μmol/m²/s PAR

CO ₂ kas	Augustus % t.o.v. 400ppm	Februari
200		41%
400	100%	100%
600	170%	132%
700		123%
800	122%	62%
1000	96%	



5. Conclusies en advies

5.1 Guzmania ‘Jive’ en Vriesea ‘Style’ (C3-fotosynthese)

In Tabel 11 staan de grenzen voor maximale lichtbenutting voor de fotosynthese, het CO₂-verzadigingsniveau en het lichtniveau waarboven lichtstress kan optreden. In deze tabel is de daling van het rendement aan het begin en einde van de dag niet meegenomen (zie Tabel 4).

Tabel 11. Grenswaarde lichtintensiteit die nog voor 100% benut wordt en adviezen CO₂-dosering en lichtscherming bij Guzmania en Vriesea (NB daling van het rendement gedurende het begin en het einde van de dag in Tabel 4).

	100% lichtbenutting (daglicht+lamplicht) tot aan:	CO₂-maximum	Lichtverzadiging (lichtstress), schermen bij:
Augustus	60 µmol	900 ppm	300 µmol
November	60 µmol	900 ppm	300 µmol
Februari	60 µmol	900 ppm	240 µmol

Een belangrijk aandachtspunt voor een efficiënte fotosynthese bij Guzmania en Vriesea is de openingsstand van de huidmondjes. In dit onderzoek is naar voren gekomen dat de opening al snel beperkend kan zijn voor de fotosynthese. De reden hiervoor is niet duidelijk. Het is belangrijk om die reden te achterhalen, want door deze beperking van de fotosynthese blijft veel productie-potentieel liggen. De sleutel tot verhoging van de productie ligt dus bij het open krijgen en open houden van de huidmondjes. De VPD bij dit type planten onder de 1.0 houden is zeker aan te bevelen.

5.2 Aechmea ‘Griffe’ (CAM-fotosynthese)

Aechmea kan ruwweg twee keer zoveel licht aan als Guzmania en Vriesea. In Tabel 12 staan de grenzen voor maximale lichtbenutting voor de fotosynthese, het CO₂-verzadigingsniveau en het lichtniveau waarboven lichtstress kan optreden. In deze tabel is de daling van het rendement aan begin en het einde van de dag niet meegenomen (zie Tabel 8).

Tabel 12. Grenswaarde lichtintensiteit die nog voor 100% benut wordt en adviezen CO₂-dosering en lichtscherming bij Aechmea (NB daling van het rendement gedurende het begin en het einde in Tabel 8).

	100% lichtbenutting (daglicht+lamplicht) tot aan:	CO₂-maximum (middag)	Lichtverzadiging (lichtstress), schermen bij:
Augustus	120 µmol	600 ppm	650 µmol
November	120 µmol	600 ppm	500 µmol
Februari	120 µmol	600 ppm	400 µmol

De verschillen in lichtbenutting, CO₂-benutting en lichtstressniveau's zijn erg groot tussen enerzijds Aechmea en anderzijds Guzmania en Vriesea (zie voor vergelijk Tabel 11 en 12). Het is dus aan te bevelen om voor Aechmea's een ruimer schermregime aan te houden dan voor Guzmania's en deze eventueel in verschillende kasafdelingen op te kweken.

Opvallend was dat hoewel de fotosynthese positief reageert op verhoogd CO₂, dat de huidmondjes boven de 600 ppm heel snel sluiten, en dan zelfs een negatief effect op de fotosynthese kunnen hebben. Het is dus van belang niet te hoog te doseren. Ook is van belang dat de CO₂ gelijkmatig wordt gedoseerd zodat plekken in de kas met bijvoorbeeld 400 en 800 ppm vermeden worden.

Van het enzym PEPC (zorgt voor CO₂-binding in de CAM-fase) is bekend dat bij geopende huidmondjes de normale buitenlucht-concentratie van CO₂ al verzadigend is. Dit suggereert dat er voor de CAM-fase 's nachts in principe geen CO₂ gedoseerd zou hoeven te worden. Verhoging van de CO₂-concentratie in de nacht kan echter wel degelijk zin hebben als de huidmondjes maar heel beperkt open gaan. Of de huidmondjesopening bij Aechmea's nachts beperkend is voor de CO₂-opname is niet bekend en zal nader onderzocht moeten worden.

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)
- De verschillen tussen Aechmea ten opzichte van Guzmania/Vriesea zijn groot: Aechmea kan relatief veel licht verwerken en profiteert 's nachts van verhoogd CO₂. Guzmania en Vriesea laten al bij veel lagere lichtintensiteiten een daling in het rendement zien en profiteren juist overdag van verhoogd CO₂. Groeperen van verschillende bromelia-variëteiten op basis van hun fotosynthese-eigenschappen en in een aparte ruimte met eigen aanstuurbaar klimaat kweken valt aan te bevelen.

Referenties

Marissen, N. Warmenhoven, M.G., 2004. Literatuuronderzoek CAM-fotosynthese en CO₂ bemesting bij Bromelia's. Aalsmeer: PPO-Glastuinbouw rapport 41780157. 26 blz.

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

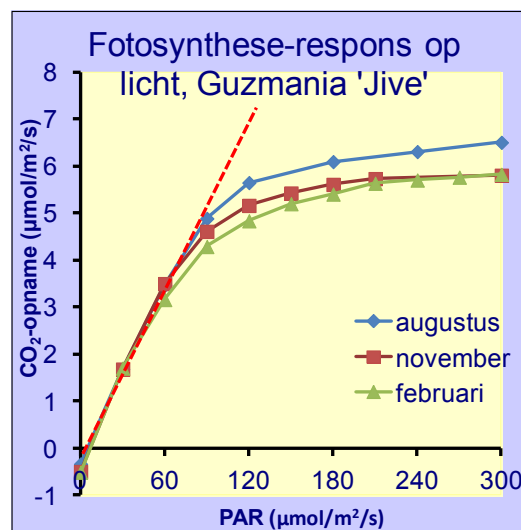
Bijlage 1. Protocol voor belichting en CO₂-dosering Bromelia: Vriesea 'style' en Guzmania 'Jive'

Grenswaarden belichting per seizoen

- Geen verschil in lichtbenutting tussen Guzmania 'Jive' en Vriesea 'Style'
- Grenswaarde voor 100% lichtrendement (Tabel 1): 60 μmol .
- Beperkt seizoenseffect op de fotosynthese.

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	80%	62%	63%
90-120	43%	31%	31%
120-150		15%	20%
150-180	12%	10%	14%
180-210		7%	10%
210-240	6%		4%
240-270			3%
270-300	6%	1%	3%

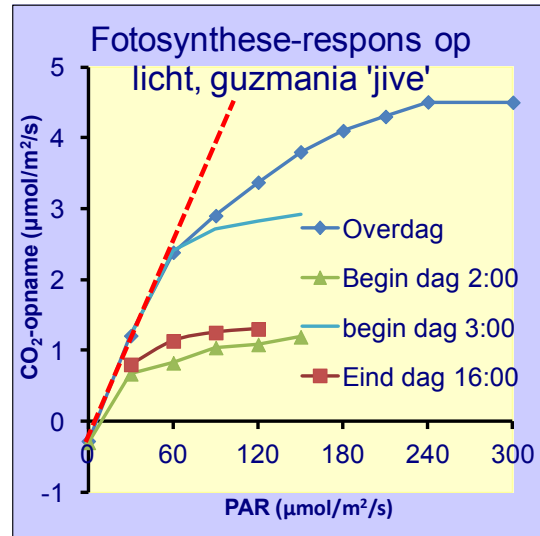


Anders belichten aan het begin en einde dag?

- Het duurt langer dan een uur voordat de huidmondjes open zijn, gedurende die tijd is het fotosynthese-rendement laag (Tabel 2). Indien mogelijk het eerste uur de helft van de belichting aan. Bij een belichting lager dan 40 μmol is getrapt opschakelen niet nodig.
- Twee uur voor het einde van de dag gaan de huidmondjes langzaam dicht, dit resulteert in daling van het fotosynthese-rendement (Tabel 2).

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

PAR daglicht + lamplicht	Begin dag (3:00 uur, 1 uur dag)	Overdag	Eind dag
0-30	100%	100%	94%
30-60	100%	100%	28%
60-90	26%	63%	10%
90-120	9%	31%	4%
120-150	8%	20%	
150-180		14%	
180-210		10%	
210-240		4%	
240-270		3%	
240-300		3%	



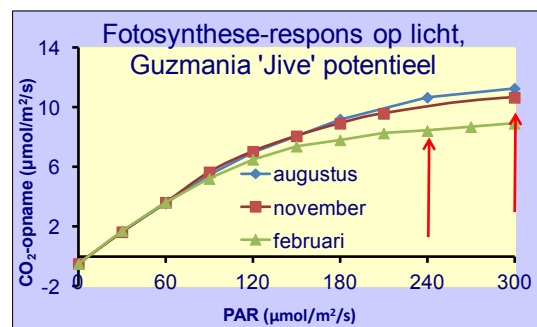
*De dag begon 2.00 's ochtends en eindigde met natuurlijk daglicht rond 18.00

Grenswaarden scherming bij hoge instraling

- Langdurig hoge instraling geeft schade aan het fotosynthese-systeem in het blad
- Bij lichtniveaus hoger dan de rode pijlen in de figuur bij Tabel 3 kan er beter geschermd worden.

Tabel 3. Lichtgrens waarboven er lichtstress ontstaat.

	PAR binnen (µmol/m²/s)	Straling buiten (Watt/m²)
Augustus	300	~200
November	300	~200
Februari	240	~160

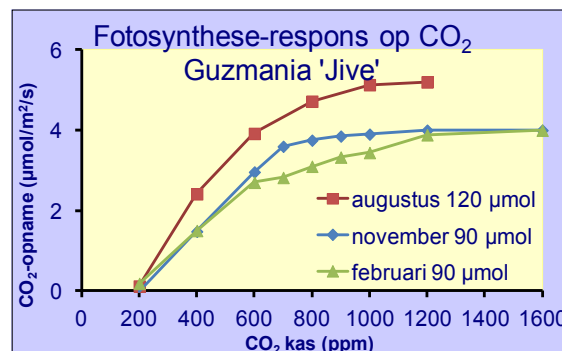


Grenswaarden CO₂-dosering

- Bij 900 ppm wordt het verzadigingsniveau bereikt (Tabel 4), dus maximaal tot 900 ppm doseren.
- Boven de 1000 ppm beginnen de huidmondjes te knijpen.

Tabel 4. Rendement CO₂-dosering

CO ₂ kas	Augustus % t.o.v. 400ppm	November	Februari
200	5%	0%	12%
400	100%	100%	100%
600	162%	200%	180%
700		243%	188%
800	195%	253%	207%
900		260%	222%
1000	213%	264%	229%
1200	215%	270%	259%
1600		270%	267%



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)

Verschillen tussen Aechmea ten opzichte van Guzmania/Vriesea

- Aechmea kan relatief veel licht verwerken en profiteert 's nachts van verhoogd CO₂. Guzmania en Vriesea laten al bij veel lagere lichtintensiteiten een daling in het rendement zien en profiteren juist overdag van verhoogd CO₂. Groeperen van verschillende bromelia-varieteiten op basis van hun fotosynthese-eigenschappen en in een aparte ruimte met eigen aanstuurbaar klimaat kweken valt aan te bevelen.

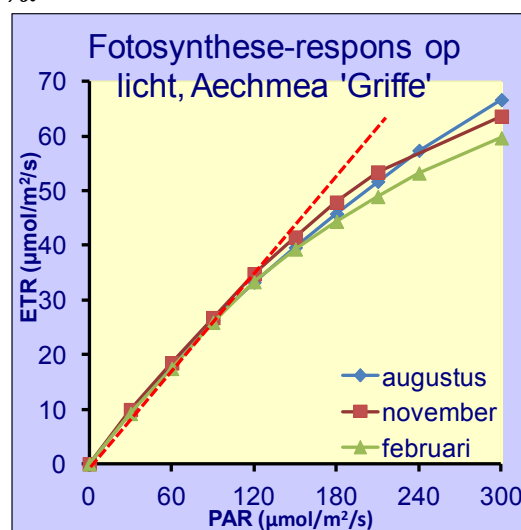
Bijlage 2. Protocol voor belichting en CO₂-dosering Bromelia: Aechmea 'Griffe'

Grenswaarden belichting per seizoen

- Geen verschil in lichtbenutting tussen de stadia halfwas en bloei
- Grenswaarde voor 100% lichtrendement (Tabel 1): 120 μmol
- Beperkt seizoenseffect op de fotosynthese.

Tabel 1. Verloop van het fotosyntheserendement bij toenemend lichtniveau (daglicht+lamplicht) bij Aechmea. 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	94%	100%	100%
120-150	86%	90%	80%
150-180	83%	86%	68%
180-210	79%	74%	61%
210-240	76%		58%
240-300	62%	46%	43%
300-500	45%	27%	23%
500-800	22%	13%	10%

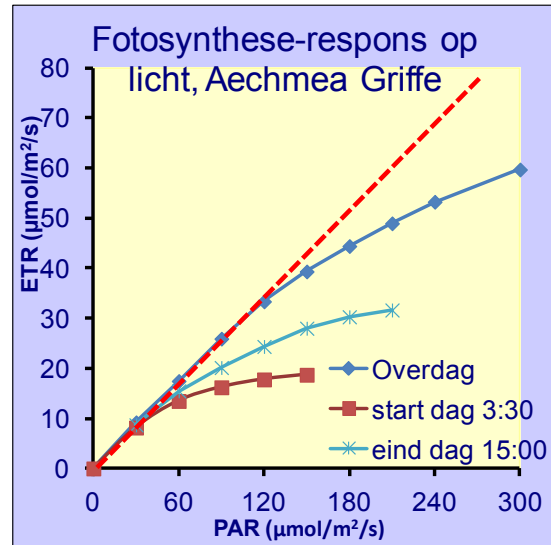


Anders belichten begin en einde dag?

- Aechmea laat een sterk rendementsverlies zien bij start en einde van de dag.
- De tijd om tot maximaal rendement te komen duurde 's ochtends circa 2-4 uur. Indien mogelijk getrapt de belichting opschakelen. Bij een belichting lager dan 40 μmol is getrapt opschakelen niet nodig.
- Na 13.00 uur 's middags begon het rendement weer te dalen.

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

PAR daglicht + lamplicht	Begin dag (3:00)	Overdag	Eind dag (15:00)
0-30	100%	100%	100%
30-60	71%	100%	91%
60-90	37%	100%	63%
90-120	21%	100%	57%
120-150	13%	80%	49%
150-180		68%	31%
180-210		61%	18%
210-240		58%	
240-300		43%	
300-500		23%	
500-800		10%	



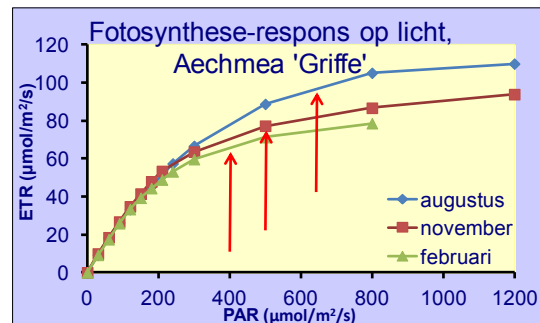
* De dag begon 2:00 's ochtends en eindigde met natuurlijk daglicht rond 18:00.

Grenswaarden scherming bij hoge instraling

- Langdurig hoge instraling geeft schade aan het fotosynthese-systeem in de bladeren.
- Bij lichtniveaus hoger dan de rode pijlen in de figuur bij Tabel 3 kan er beter geschermd worden.

Tabel 3. Lichtgrens waarboven er lichtstress ontstaat.

	PAR binnen (µmol/m²/s)	Straling buiten (Watt/m²)
Augustus	650	~430
November	500	~330
Februari	400	~270

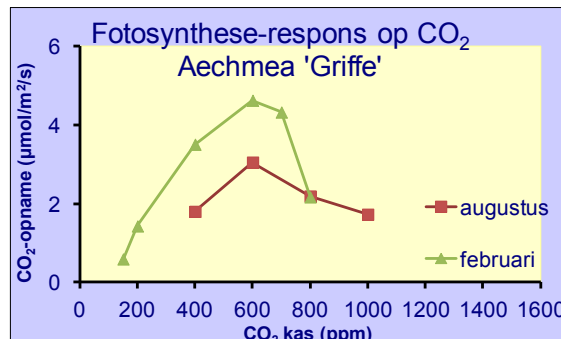


Grenswaarden CO₂-dosering middag (CAM)

- Rond de 600 ppm wordt het verzadigingsniveau bereikt (Tabel 4).
- Boven de 600 ppm gaan de huidmondjes snel knijpen.

Tabel 4. Rendement CO₂-dosering (CAM)

CO ₂ kas	Augustus % t.o.v. 400ppm	Februari
200		41%
400	100%	100%
600	170%	132%
700		123%
800	122%	62%
1000	96%	



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)

Verschillen tussen Aechmea ten opzichte van Guzmania/Vriesea

- Aechmea kan relatief veel licht verwerken en profiteert 's nachts van verhoogd CO₂. Guzmania en Vriesea laten al bij veel lagere lichtintensiteiten een daling in het rendement zien en profiteren juist overdag van verhoogd CO₂. Groeperen van verschillende bromelia-varieteiten op basis van hun fotosynthese-eigenschappen en in een aparte ruimte met eigen aanstuurbaar klimaat kweken valt aan te bevelen.

Bijlage 3. 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.