

Meer rendement uit licht en CO₂ bij Kalanchoë



Govert Trouwborst, Sander Hogewoning & Sander Pot
Juni 2013

Meer rendement uit licht en CO₂ bij Kalanchoë

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 Kalanchoë is uitgevoerd in opdracht van het Productschap Tuinbouw en het ministerie van Economische zaken in het kader van het programma Kas als Energiebron. De studie is gebaseerd op fotosynthesemetingen in drie seizoenen uitgevoerd door Plant Dynamics BV en Plant Lighting BV. Voor een snelle indruk van de bevindingen volstaat Bijlage 1 Protocol. In hoofdstuk 1 wordt een korte uitleg over fotosynthese gegeven.

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

De resultaten 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.....	4
1.1 Inleiding fotosynthese	4
1.2 Fotosynthese bij CAM-planten	6
1.3 Lichtrespons van de fotosynthese.....	7
1.4 CO ₂ -respons van de fotosynthese.....	8
2. Materiaal en methoden	10
2.1 Inleiding	10
2.2 Plantmateriaal per periode.....	10
2.3 Meten van de fotosynthese	10
2.4 CAM-toets.....	11
3. Resultaten fotosynthesemetingen.....	13
3.1 CAM of C3?	13
3.2 Grenswaarden belichting per stadium	14
3.3 Grenswaarden belichting per seizoen bij 1 ^e stadium.....	15
3.4 Anders belichten aan het begin en einde van de dag (C3-stadium)?.....	16
3.5 Anders belichten aan het begin en einde van de dag (CAM-stadium)?	17
3.6 Grenswaarden scherming bij hoge instraling	18
3.7 Grenswaarden CO ₂ -dosering (C3-fotosynthese)	18
4. Conclusies en advies	20
Referenties.....	22
Bijlage 1. Protocol voor belichting en CO₂-dosering Kalanchoë.....	i
Bijlage 2. Omrekeningstabel Lux, Watt, μmol.....	iv

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 Kalanchoë, hebben het CAM-metabolisme (crassulacean acid metabolism). CAM wordt gekenmerkt door een nachtelijke CO₂-opname. De jonge bladeren van Kalanchoë, van tussen ongeveer nul en drie weken, hebben C3-fotosynthese (hoofdstuk 1.1), terwijl de (stugge) volgroeide bladeren CAM-fotosynthese hebben (hoofdstuk 1.2). Dit verslag focust vooral op het eerste stadium, C3-fotosynthese.

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.

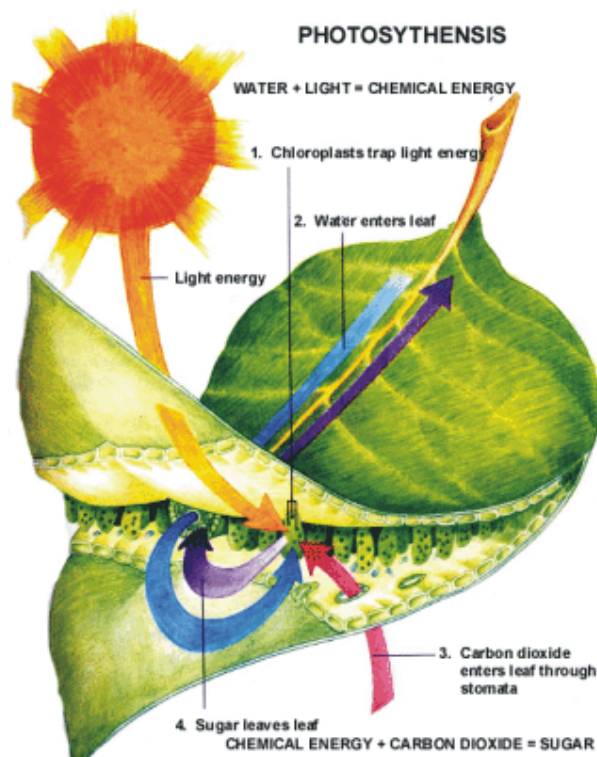


Fig. 1. Essentiële zaken rondom de fotosynthese: Lichtenergie wordt geabsorbeerd door het blad (1). Water komt binnen via de nerven (2). Tevens komt er CO₂ binnen via de huidmondjes (3). Met behulp van de lichtenergie worden er suikers gemaakt (4).

Fotosynthesemetingen bieden ook de mogelijkheid om de efficiëntie van de CO_2 -opname bij verschillende CO_2 -concentraties rondom het blad te meten. Uit deze metingen komt naar voren waar de grens ligt 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 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.

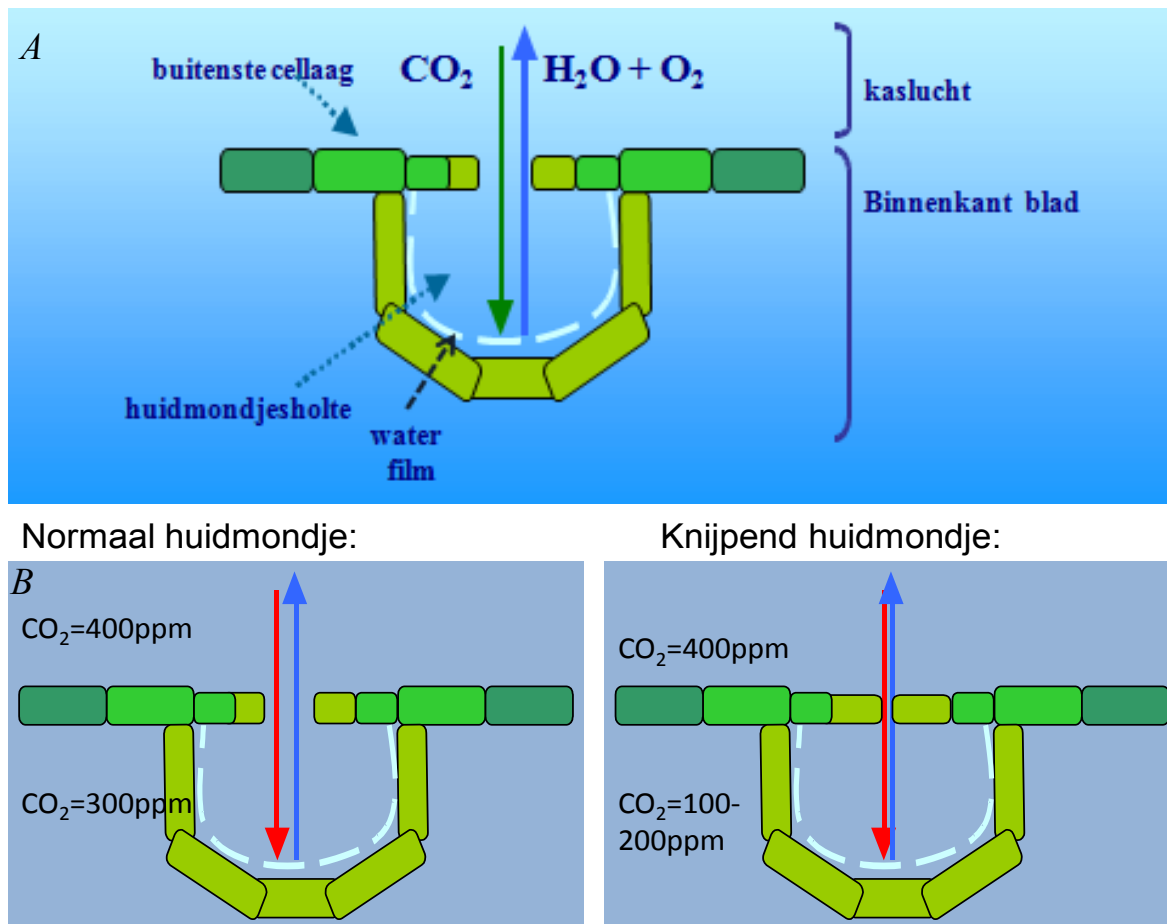


Fig. 2. Schematische tekening van een huidmondje (A) en het verschil tussen de CO_2 -concentratie in de kaslucht en in het blad door de mate van huidmondjesopening (B).

Voor een efficiënte fotosynthese bij C₃-planten is het dus essentieel dat de huidmondjes goed openen. Redenen dat een huidmondje dicht kan 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)¹. Als bij een hoge instraling een te hoge VPD ontstaat waardoor de huidmondjes sluiten, dan levert voorkomen van een te hoge VPD door op tijd te screenen soms meer netto resultaat op dan verloren wordt door het verlies aan licht. Bij CAM-planten (o.a. Phalaenopsis, sommige Bromelia-rassen en oudere plantstadia 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)

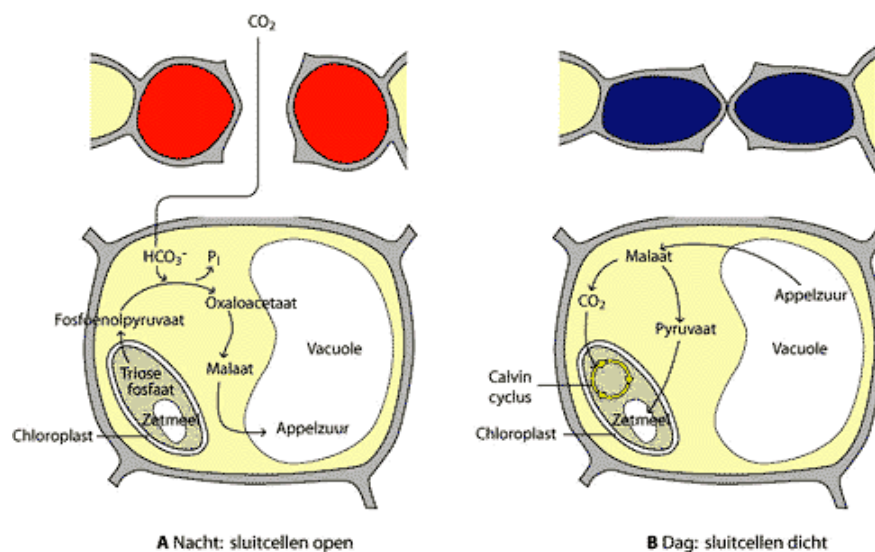


Fig. 3. Schematische tekening van de werking van CAM-fotosynthese. Overdag zijn de huidmondjes gesloten en 's nachts geopend.

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

De VPD wordt als volgt bepaald:

1. Bepaling van de dampdruk in de kaslucht (berekend uit de temperatuur en de RV van de kaslucht)
2. Bepaling van de dampdruk in de plant (berekend uit de planttemperatuur en 100% RV in het blad)
3. Het verschil is de VPD (uitgedrukt in kPa, niet te verwarren met vochtdeficit ofwel VD, uitgedrukt in g/m³)

Over het algemeen is bij een hoge RV de VPD laag en bij een lage RV de VPD hoog. Echter, bij een gelijkblijvende temperatuur en RV van de kaslucht, kan de VPD toch toenemen door een stijgende planttemperatuur.

De CAM-fotosynthese kan opgedeeld worden in 4 fasen:

1. *Fase I, Nacht*: Tijdens de nacht openen de huidmondjes en wordt CO_2 opgenomen. Door middel van het enzym PEPC wordt CO_2 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 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. CO_2 wordt vrijgemaakt uit malaat, waarbij het interne CO_2 -gehalte in het blad stijgt tot zeer hoge waarden. Met behulp van lichtenergie wordt deze CO_2 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 CO_2 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.

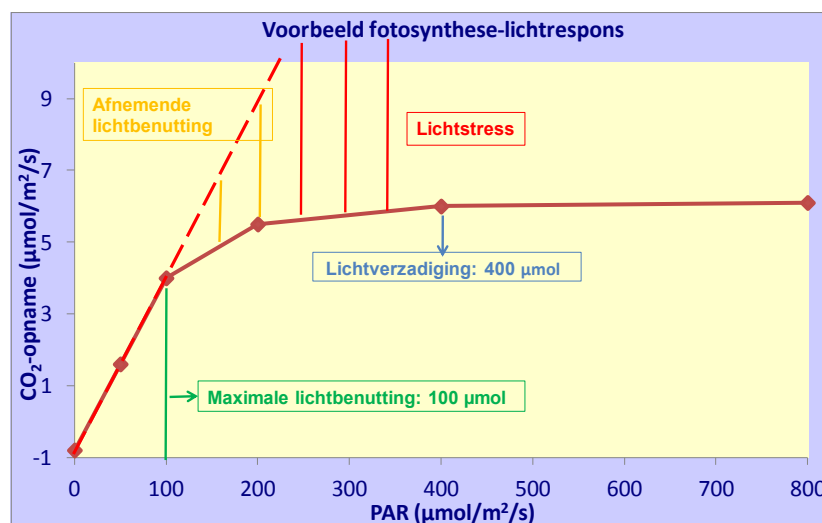


Fig. 4. Voorbeeld respons van de fotosynthese bij toenemende lichtintensiteit. Zolang als de fotosynthese meeloopt met de rood gestreepte lijn is de lichtrendement van de fotosynthese 100%. Het is vooral interessant om in dit gebied te belichten. Naarmate de 2 lijnen verder uit elkaar gaan lopen (weergegeven 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).

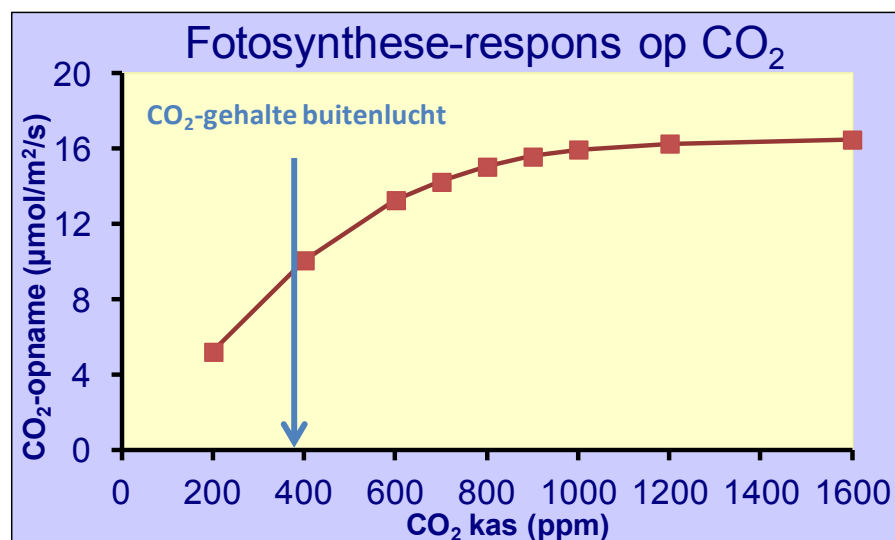


Fig. 5. Voorbeeld respons van de fotosynthese bij toenemend CO₂. Van lage naar hoge CO₂-concentraties in de kas neemt de fotosynthese eerst snel toe om vervolgens bij hoge concentraties sterk af te vlakken.

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 het ras Kalanchoe ‘Don Nando’ gedurende de korte dag in de stadia 0, 3 en 6 weken korte dag. Voor details, zie Tabel 1. De focus van de metingen lag op het eerste stadium.

Tabel 1. Ras en plantstadia die gemeten zijn.

Kalanchoë ‘Don Nando’	
Augustus	Stadium 1: 1 ^e week KD
	Stadium 2: 3 week KD
	Stadium 3: 6 week KD
November	Stadium 1: 1 ^e week KD
	Stadium 2: 3 week KD
	Stadium 3: 6 week KD
Februari	Stadium 1: 1 ^e week KD
	Stadium 2: 3 week KD

2.3 Meten van de fotosynthese

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

- Lichtrespons metingen
- CO₂-respons metingen

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

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

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



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

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

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).

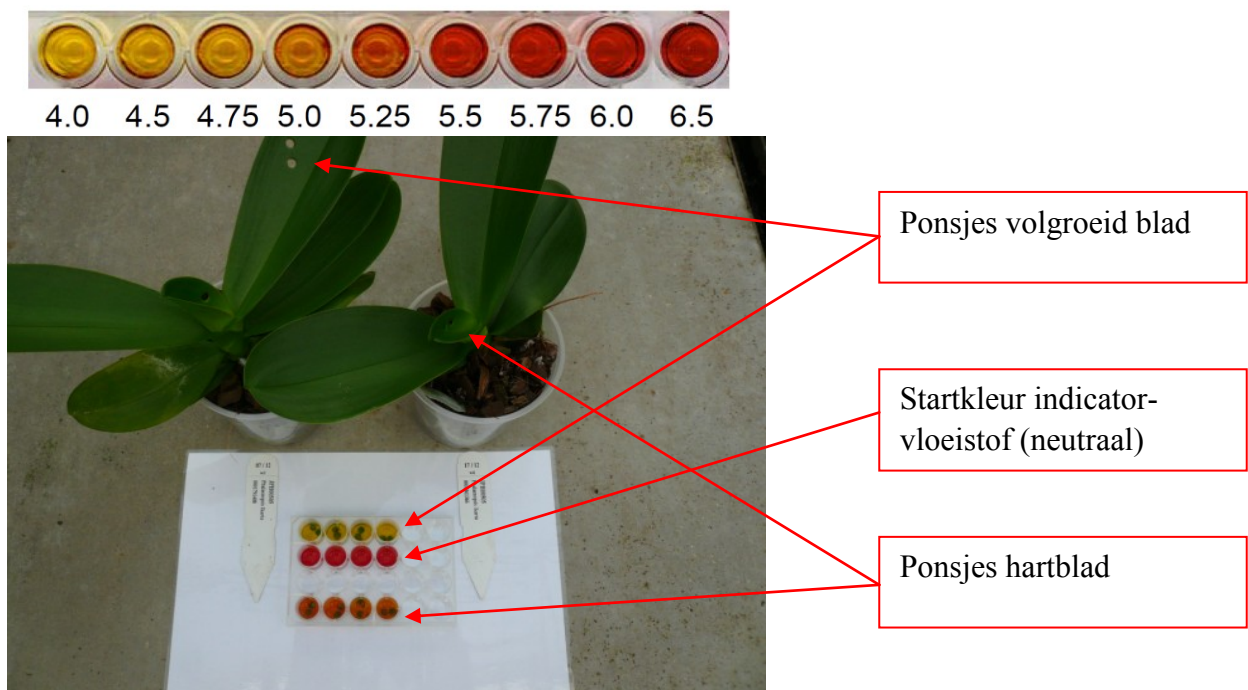


Foto 2. Kleurindicator met bijbehorende pH en toepassing van de CAM-toets bij Phalaenopsis 'Ikaria' vroeg in de ochtend. De volgroeide bladeren kleurden de rode neutrale vloeistof direct geel (zuur), conclusie: bladeren hebben CAM-fotosynthese. De hartbladeren kleurden de vloeistof oranje, conclusie: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

3. Resultaten fotosynthesemetingen

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 planten van het jongste stadium (1^e week korte dag) C3-fotosynthese hadden (Foto 3&4). Planten van het oudste stadium (6 week korte dag) hadden CAM-fotosynthese (Foto 3&4). Planten van stadium 2 hadden in de zomer CAM-fotosynthese (foto 3) en in november en februari C3-fotosynthese (foto 4). De hartbladeren van stadium 2 waren 's zomers ook nog C3 (foto 3).

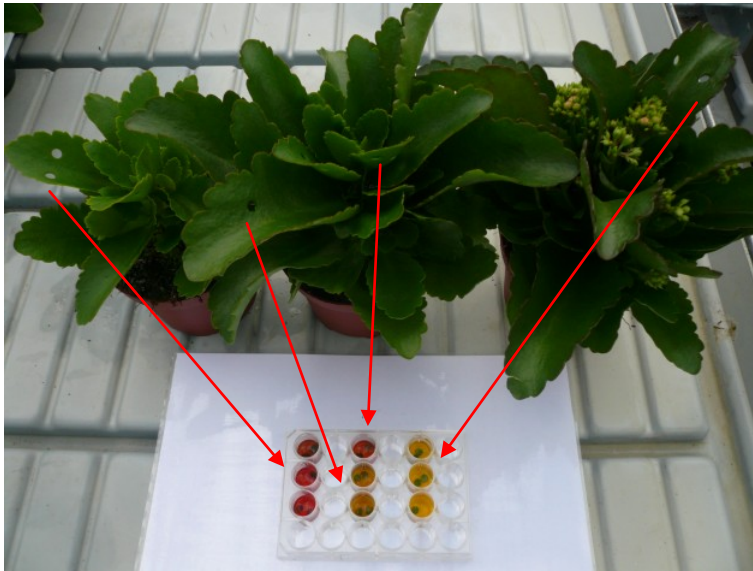


Foto 3. Plantstadia (1^e week, 3 week en 6 week korte dag) en bijbehorende CAM-toets (ochtends vroeg gemeten). Bij het eerste stadium blijft de vloeistof rood, dus C3, bij het tweede stadium kleurt de vloeistof bij de volgroeide bladeren oranje-geel dus CAM, de hartbladeren zijn nog C3. Bij het derde stadium kleurt de vloeistof geel, dus CAM (data augustus).



Foto 4. Plantstadia en bijbehorende CAM-toets (data februari),

3.2 Grenswaarden belichting per stadium

De ETR-lichtrespons verschilde nauwelijks tussen de stadia (Fig. 6B,D), terwijl de CO₂-opname fors verschilde (Fig. 6 A,C). Doordat het derde stadium CAM is, heeft het logischerwijze overdag geen CO₂-opname. Het tweede stadium functioneerde in de zomer als CAM (Foto 3) maar het opmerkelijke was dat rond de 200-300 μmol de huidmondjes langzaam open gingen en direct CO₂ opgenomen werd. In november en februari was dit stadium C3 maar was de huidmondjesopening beperkend voor de fotosynthese en laat deze ook een lagere CO₂-opname zien (Fig. 6C en Tabel 2).

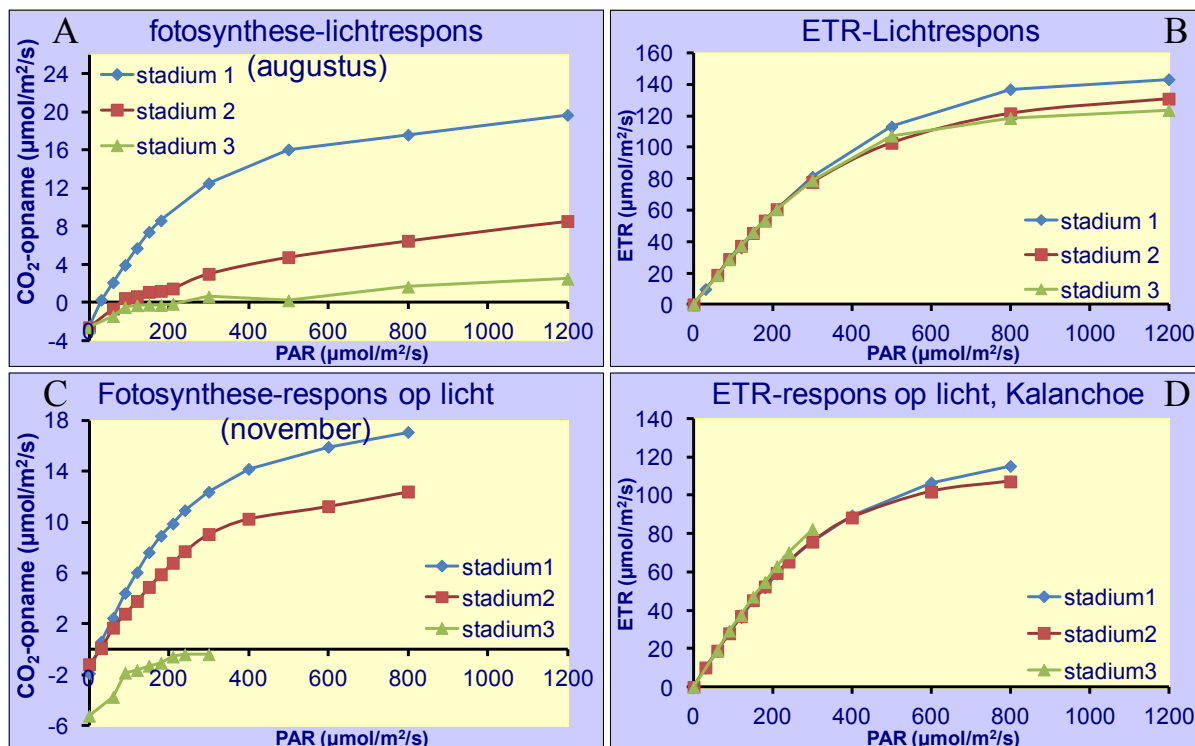
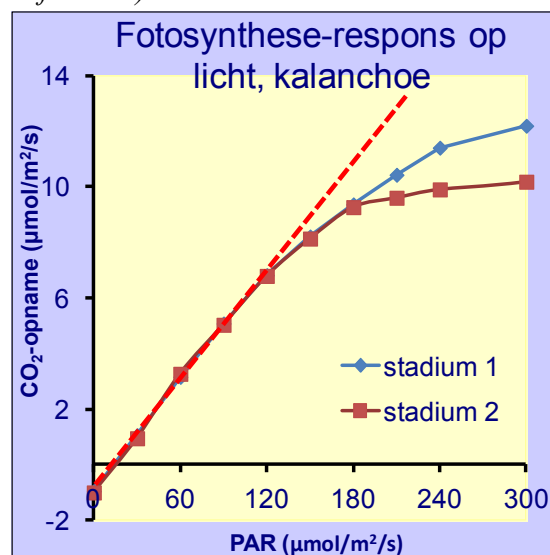


Fig. 6. Effect van het stadium op de lichtrespons van de fotosynthese van 'Don Nando'. A, C: CO₂-opname, B, D: ETR-respons, (A, B: augustus en C, D: november).

Tabel 2 laat zien dat in februari het lichtrendement van lamplicht plus daglicht bij de stadia 1 en 2 tot 120 μmol 100% blijft. Boven de 180 μmol neemt het lichtrendement van stadium 2 fors af ten opzichte van stadium 1.

Tabel 2. Verloop van het fotosyntheserendement bij toenemend lichtniveau na drie week korte dag vergeleken met de eerste week korte dag. Zolang als de gemeten lijnen evenwijdig aan de rode stippellijn lopen, is het fotosyntheserendement 100% (data februari).

PAR daglicht + lamplicht	Stadium 1 1 ^e week korte dag	Stadium 2 3 week korte dag
0-30	100%	100%
30-60	100%	100%
60-90	100%	100%
90-120	100%	100%
120-150	80%	77%
150-180	66%	65%
180-210	61%	19%
210-240	56%	17%
240-300	23%	12%
300-500	19%	8%
500-800	12%	8%

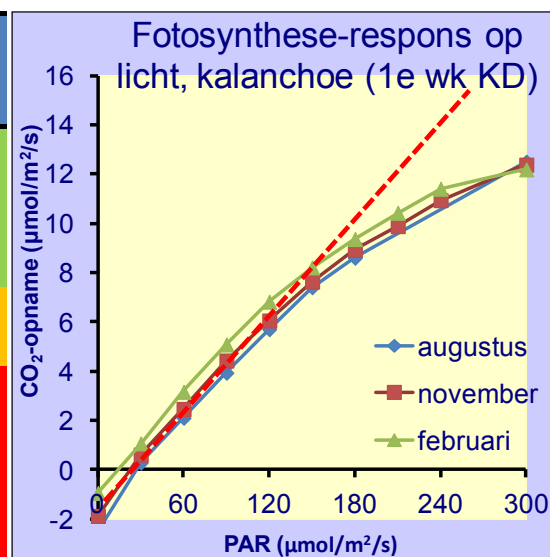


3.3 Grenswaarden belichting per seizoen bij 1^e stadium

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 120 µmol blijft het lichtrendement in alle seizoenen maximaal. Erboven waren de verschillen tussen de seizoenen beperkt.

Tabel 3. Verloop van het fotosyntheserendement bij toenemend lichtniveau bij planten uit de eerste week korte dag. 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%	92%	98%
120-150	96%	89%	79%
150-180	68%	73%	65%
180-210	-	54%	60%
210-240	-	60%	55%
240-300	55%	41%	22%
300-500	30%	31%	19%
500-800	9%	15%	12%



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 'ochtends aan en de lichtintensiteit aan daglicht is verwaarloosbaar → Het lamprendement op de fotosynthese is 100%.
- *Situatie 2.* De lampen met een lichtintensiteit van $90 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 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 $140 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ licht in de kas → Het lamprendement op de fotosynthese van de laatste $20 \mu\text{mol}$ is nog 79%.
- *Situatie 3.* De lampen met een lichtintensiteit van $90 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 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 $210 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ licht in de kas → rendement van de eerste $30 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ licht van de lampen is dan 79% en van de 2^e en 3^e $30 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ is dat respectievelijk 65% en 60%. Het is te overwegen om een gedeelte van de belichting eerder 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.

3.4 Anders belichten aan het begin en einde van de dag (C3-stadium)?

Gedurende het korte dag stadium vindt de belichting plaats binnen de ongeveer 10 uur durende korte dag. Bij het C3-stadium (ongeveer eerste drie weken korte dag) is het vooral van belang dat de huidmondjes 's ochtends snel ver genoeg open gaan en 's avonds lang genoeg open blijven om niet limiterend te zijn voor de fotosynthese. Fig. 7 laat zien dat aan het begin van de dag de fotosynthese niet gelimiteerd werd. Aan het einde van de dag was er een kleine limitatie bij stadium 1 (wel in februari maar niet in november). In het tweede stadium waren de huidmondjes aan het einde van de dag bijna dicht en werd de fotosynthese fors gelimiteerd (Fig. 7B en Tabel 4).

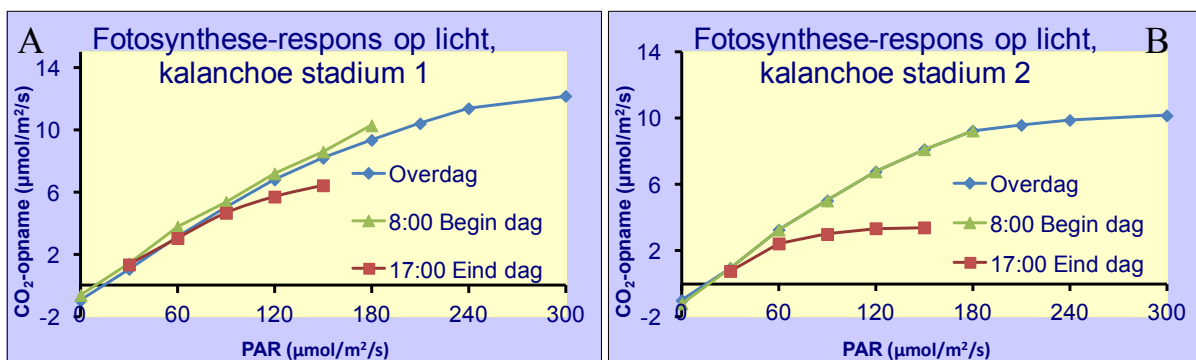
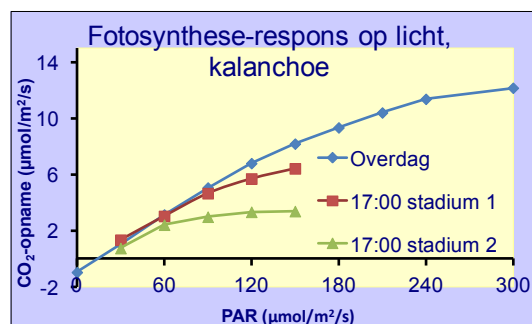


Fig. 7. Effect op het lichtrendement aan begin en het einde van de dag. A: stadium 1. B: stadium 2. De daglengte was 8:00-18:00 uur en de lampen gingen 17:00 uit (data februari).

Tabel 4. Effect van het tijdstip van de dag op het lichtrendement. De dag verliep van 8.00-18.00, assimilatielicht stond aan tot 17.00 uur (data februari).

PAR daglicht + lamplicht	Overdag	1 ^e week korte dag (stadium 1) 17:00	3 ^e week korte dag (stadium 2) 17:00
0-30	100%	100%	100%
30-60	100%	96%	94%
60-90	100%	92%	32%
90-120	98%	59%	20%
120-150	79%	41%	3%
150-180	65%		
180-210	60%		
210-240	55%		



3.5 Anders belichten aan het begin en einde van de dag (CAM-stadium)?

Voor het CAM-stadium (stadium 3) moet voor het lichtrendement rekening worden gehouden met de grootte van de malaatpool.

De volgende twee principes zijn van belang om in gedachten te houden

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. 8 laat zien dat het lichtrendement aan het einde van de dag vooral bij de hogere lichtintensiteiten fors daalt terwijl het rendement tot 180 μmol intact blijft. Boven 250 μmol daalt het rendement aan het einde van de dag scherp, maar rond 18:00 gaat de belichting toch uit vanwege de korte dag.

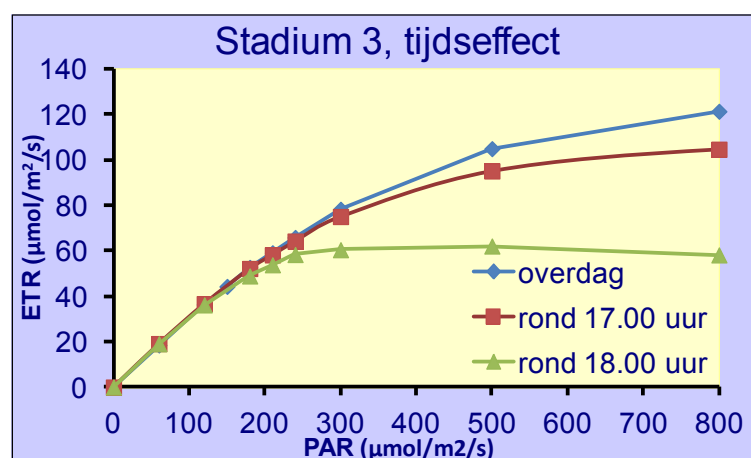


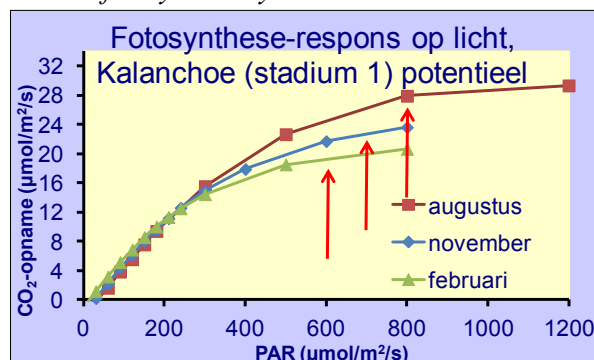
Fig. 8. Effect van het einde van de dag op de ETR-respons bij stadium 3 (CAM; data augustus). In de andere twee seizoenen zijn er bij dit stadium geen metingen verricht aan het einde van de dag.

3.6 Grenswaarden scherming bij hoge instraling

Bij de getekende rode pijl in de figuur bij Tabel 5 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. Omdat er nauwelijks verschillen waren in ETR-respons tussen de stadia (Fig. 6B,D) geldt deze lichtgrens voor alle drie de stadia.

Tabel 5. 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	~533
November	700	~467
Februari	600	~400



3.7 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 en 7 blijkt dat rond de 700-800 ppm het verzadigingsniveau wordt bereikt. Een belangrijke constatering was dat de huidmondjes bij concentraties boven de 700 ppm snel sluiten (Fig. 9). De fotosynthese nam gedurende de metingen (nog) niet af omdat de stijgende CO₂-concentratie de huidmondjessluiting min of meer compenseerde. Deze compensatie was in november niet groot genoeg zodat daar wel een daling in de fotosynthese is te zien (blauwe lijn, Tabel 6).

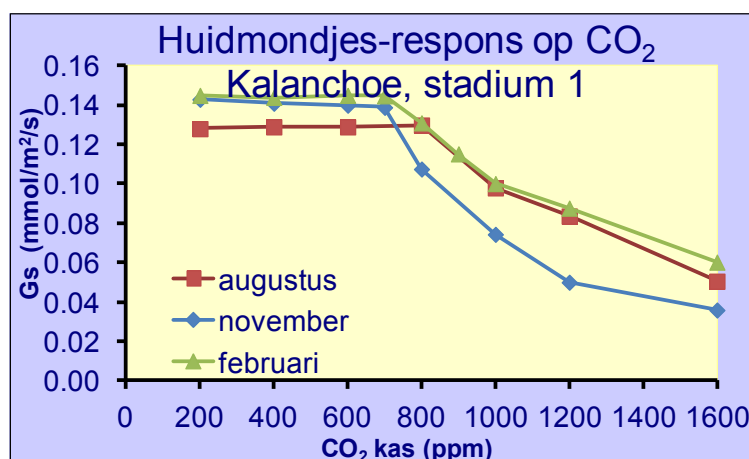
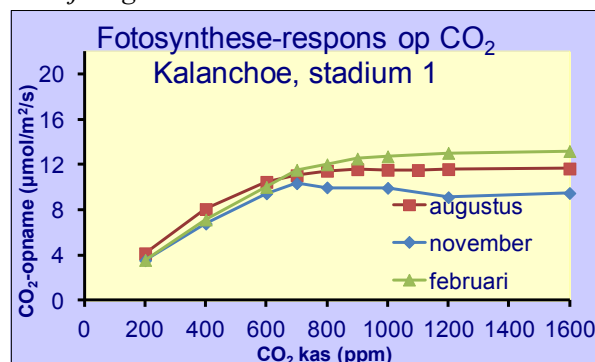


Fig. 9. Afname van de huidmondjesgeleidbaarheid (G_s) bij hogere concentraties CO₂. Gemeten bij 800 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR.

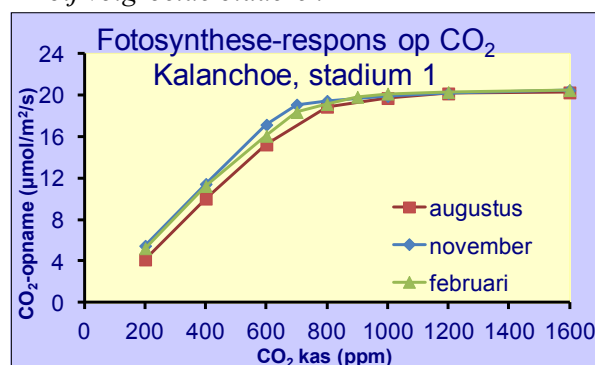
Tabel 6. Rendement CO_2 -dosering bij $180 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ PAR bij volgroeide bladeren

CO_2 kas	Augustus % t.o.v. 400ppm	November	Februari
200	51%	52%	50%
400	100%	100%	100%
600	130%	139%	140%
700	137%	153%	162%
800	142%	147%	168%
900	144%		176%
1000	143%	147%	178%
1100	143%		
1200	144%	135%	183%
1600	144%	140%	185%



Tabel 7. Rendement CO_2 -dosering bij $800 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ PAR bij volgroeide bladeren

CO_2 kas	Augustus % t.o.v. 400ppm	November	Februari
200	41%	48%	47%
400	100%	100%	100%
600	152%	150%	143%
700		167%	164%
800	189%	170%	171%
900			177%
1000	197%	174%	180%
1200	201%	177%	181%
1600	202%	179%	183%



In absolute zin heeft CO_2 steeds meer effect naarmate er meer licht is. Een getallenvoorbeeld maakt dit duidelijk:

- Lichtintensiteit in de kas is $100 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$: bij 400 ppm is de fotosynthese 5.0 en bij 800 ppm 7.5 → toename van 2.5 door verhoogd CO_2 .
- Lichtintensiteit in de kas is $500 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$: bij 400 ppm is de fotosynthese 15.0 en bij 800 ppm 22.5 → toename van 7.5 door verhoogd CO_2 .

4. Conclusies en advies

In Tabel 7 staan de grenzen voor maximale lichtbenutting voor de fotosynthese tijdens de opkweek, het CO₂-verzadigingsniveau en het lichtniveau waarboven lichtstress kan optreden. In deze tabel is de daling van het rendement aan het einde van de dag niet meegenomen (Tabel 4).

Tabel 7. Grenswaarde lichtintensiteit die nog voor 100% benut wordt en adviezen CO₂-dosering en lichtscherming (NB daling van het rendement gedurende het einde van de dag in Tabel 4).

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

Opvallend was dat hoewel de fotosynthese positief reageert op verhoogd CO₂, dat de huidmondjes boven de 700 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 bij Kalanchoë. Daarom is het van belang dat de CO₂ gelijkmatig wordt gedoseerd zodat plekken in de kas met bijvoorbeeld 400 en 1000 ppm vermeden worden.

Voor Kalanchoë is het belangrijk te weten wanneer de overgang van C3 naar CAM plaats vindt. Deze overgang ligt ergens tussen de derde en de vierde week korte dag. In de augustus was deze overgang eerder dan in november/februari. De bloei-inductie vindt rond de 20^e dag plaats. Mogelijk houden deze twee zaken verband met elkaar. Van facultatieve CAM-planten is bekend dat de overgang van C3 naar CAM beïnvloed wordt door de teeltfactoren zoals veel licht en vooral waterstress. Door overmatige stress te vermijden, kan mogelijk de overgang van C3 naar CAM uitgesteld worden. Dit zou kunnen resulteren in een flinke toename in assimilaten, hetgeen waarschijnlijk de productkwaliteit verbetert en mogelijk de teeltduur verkort. Als de overgang van C3 naar CAM samenhangt met de bloei-inductie is een uitstel van de CAM-fase echter niet gewenst.

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 in principe 's nachts 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 Kalanchoë '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)

Referenties

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

Schapendonk, A.C.H.M., 2005. Belichting Phalaenopsis. Plant Dynamics. 21 blz.

Warmenhoven, M., N. Marissen en F. van Noort, 2003. CO₂ opname bij Kalanchoë. PPO-Glastuinbouw rapport GT33092

Warmenhoven, M., N. Marissen & F. van Noort, 2005. Crassulaceën-metabolisme in Kalanchoë. PPO rapport 41313009. 27 blz.

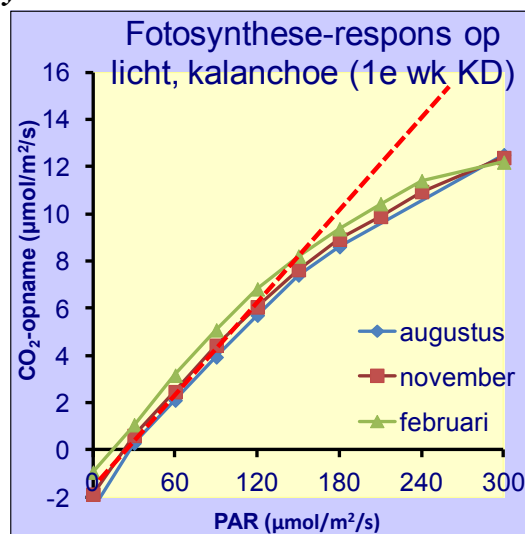
Bijlage 1. Protocol voor belichting en CO₂-dosering Kalanchoë

Grenswaarden belichting per seizoen en stadium

- Eerste weken korte dag zijn planten C3. In de vierde week vindt waarschijnlijk omslag naar CAM plaats. 6^e week korte dag is CAM.
- Grenswaarde voor 100% lichtrendement (Tabel 1AB): 120 μmol .
- Beperkt seizoenseffect op de fotosynthese onder de 300 μmol PAR.
- Bij 3^e week korte dag daalt rendement eerder door huidmondjesbeperking (Tabel 1B).

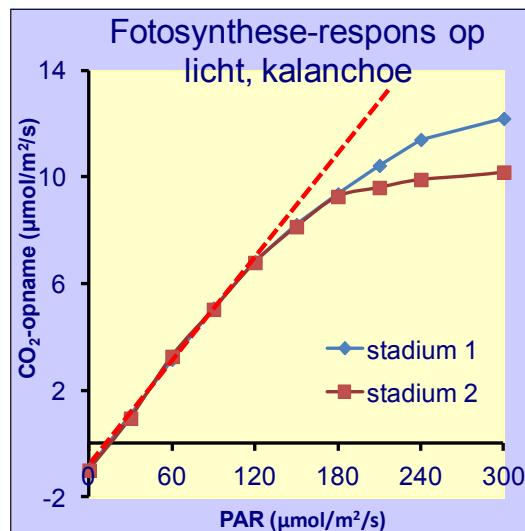
Tabel 1. Verloop van het fotosyntheserendement bij toenemend lichtniveau (daglicht+lamplicht) bij 1^e week korte dag (jonge bladeren). Zolang als de gemeten lijn evenwijdig met de rode stippellijn loopt, is het fotosyntheserendement 100%.

PAR daglicht + lamplicht	augustus	november	februari
0-30	100%	100%	100%
30-60	100%	100%	100%
60-90	100%	100%	100%
90-120	100%	92%	98%
120-150	96%	89%	79%
150-180	68%	73%	65%
180-210		61%	60%
210-240		53%	55%
240-300	55%	41%	22%
300-500	30%	31%	19%



Tabel 1B. Verloop van het fotosyntheserendement bij toenemend lichtniveau (daglicht + lamplicht) bij drie weken korte dag.

PAR daglicht + lamplicht	1 ^e week korte dag (stadium 1)	3 week korte dag (stadium 2)
0-30	100%	100%
30-60	100%	100%
60-90	100%	100%
90-120	100%	100%
120-150	80%	77%
150-180	66%	65%
180-210	61%	19%
210-240	56%	17%
240-300	23%	12%
300-500	19%	8%

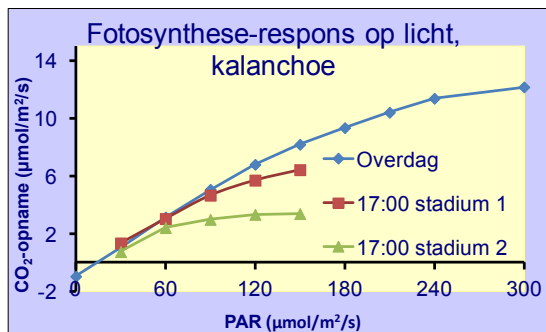


Anders belichten begin en einde dag?

- Het C3-stadium heeft geen last van opstarteffect.
- In het laatste uur van de dag gaan de huidmondjes langzaam dicht, bij stadium 2 is dit al snel beperkend (Tabel 2). Indien mogelijk belichting gedeeltelijk afschakelen.

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

PAR daglicht + lamplicht	Overdag	1 ^e week korte dag (stadium 1) 17:00	3 ^e week korte dag (stadium 2) 17:00
0-30	100%	100%	100%
30-60	100%	96%	94%
60-90	100%	92%	32%
90-120	98%	59%	20%
120-150	79%	41%	3%
150-180	65%		
180-210	60%		
210-240	55%		



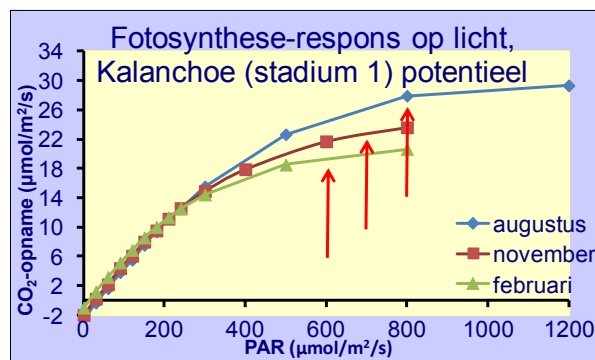
*De dag begon 8.00 's ochtends en eindigde met natuurlijk daglicht rond 18.00.

Grenswaarden scherming bij hoge instraling

- Langdurig hoge instraling geeft schade aan het fotosynthese-apparaat
- 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 ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)	Straling buiten (Watt/m^2)
Augustus	800	~533
November	700	~467
Februari	600	~400

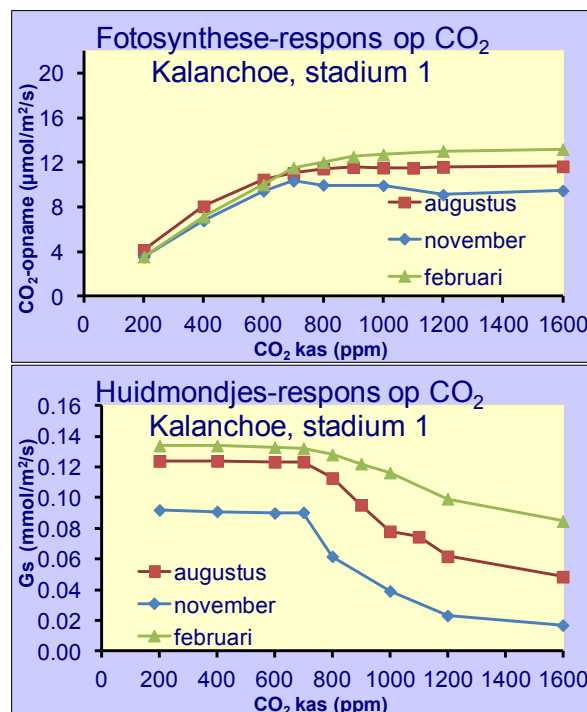


Grenswaarden CO₂-dosering gedurende het C3-stadium

- Rond de 700 ppm wordt het verzadigingsniveau bereikt (Tabel 4).
- Boven de 700 ppm gaan de huidmondjes snel knijpen, dus maximaal tot 700 ppm doseren.

Tabel 4. Rendement CO₂-dosering gedurende het C3-stadium.

CO ₂ kas	Augustus % t.o.v. 400ppm	November	Februari
200	51%	52%	50%
400	100%	100%	100%
600	130%	139%	140%
700	137%	153%	162%
800	142%	147%	168%
900	144%		176%
1000	143%	147%	178%
1100	143%		
1200	144%	135%	183%
1600	144%	140%	185%



Overige opmerkingen

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

Bijlage 2. Omrekeningstabel Lux, Watt, μmol

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

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

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