

Softsensor voor energie-efficiënte plant monitoring

Licht: 67 (67%)



RV: 5 (5%)

Scherm: 12 (12%)

CO2: 16 (16%)

Sander Pot, Ad Schapendonk, Kees Rappoldt en Sander Hogewoning.
Augustus 2014

Softsensor voor energie-efficiënte plant monitoring

“Weten zonder meten en leren om te verbeteren”

Augustus 2014

Sander Pot¹
Ad Schapendonk²
Kees Rappoldt³
Sander Hogewoning⁴

¹Plant Dynamics B.V.
Koningin Julianastraat 23
6668 AG Randwijk
www.plant-dynamics.nl
06-12885226

²Photosyntax B.V.
Englaan 8
6703 EW Wageningen

³EcoCurves B.V.
Kamperfoelieweg 17
9753 ER Haren

⁴Plant Lighting B.V.
Veilingweg 46
3981 PC Bunnik

Deze studie is uitgevoerd in opdracht van het Productschap Tuinbouw en het ministerie van Economische zaken in het kader van het programma Kas als Energiebron.

© 2014 Randwijk, Plant Dynamics B.V. & Photosyntax B.V.

De resultaten van deze uitgave mogen vrij gebruikt worden, mits de bronnen worden vermeld. Plant Dynamics BV en Photosyntax BV zijn niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen als gevolg van gebruik van gegevens uit deze uitgave.

Inhoudsopgave

Samenvatting	3
Voorwoord	4
1. Inleiding.....	5
1.1 Probleemstelling.....	5
1.2 Doelstelling	5
1.3 Wat is de ‘Softsensor’?	6
2. Fotosynthese.....	7
2.1 Inleiding	7
2.2 Lichtrespons van de fotosynthese.....	8
2.3 CO ₂ -respons van de fotosynthese.....	9
2.4 Belang van huidmondjesgeleidbaarheid (Gs) voor de fotosynthese	10
2.5 Effect van temperatuur op de fotosynthese	12
3. Softsensor	13
3.1 Beschrijving van het model.....	13
3.2 Berekeningen.....	16
3.3 Data input voor Softsensor	17
3.4 Softsensor uitvoer.....	18
4. Resultaten.....	19
4.1 Spathiphyllum	19
4.2 Snij Chrysant.....	23
5. Conclusies en advies	28
Referenties.....	30

Samenvatting

In diverse projecten heeft Plant Dynamics BV zeer uitgebreide metingen gedaan aan de plantresponse op licht en CO₂. Het doel van dit project is deze kennis te bundelen en via een “Softsensor” te vertalen naar groeilijnen (assimilatielijnen). Op deze manier wordt de gewasresponse inzichtelijk gemaakt (zonder gebruik van dure sensoren) en tevens de mogelijkheid geboden tot directe sturing op gewasbehoefte.

In dit project wordt de “Softsensor” ontwikkelt voor de gewassen Chrysant en Spathiphyllum. Als input van het klimaat worden klimaatgegevens van kwekerij Zijdezicht (Chrysant) en van kwekerij Bestplant en Van der Voort Potplanten (Spathiphyllum) gebruikt. Voor de input van de plantresponse zijn gegevens gebruikt uit de database van Plant Dynamics + uit het project “Meer rendement uit Belichting en CO₂ dosering” (Plant Lighting en Plant Dynamics 2013 .

De Softsensor is een computerprogramma dat de actuele fotosynthese van een gewas berekent. Met de Softsensor wordt niet alleen de actuele productie berekend maar ook de productie die gerealiseerd had kunnen worden als andere maatregelen waren gehanteerd.

De berekeningen zijn in feite schattingen die zijn gebaseerd op de geregistreerde instraling, temperatuur en RV in de kas en de fotosynthese/huidmondjes eigenschappen zoals die in eerdere experimenten zijn bepaald. Op die manier wordt opgedane kennis gebruikt om de tuinder een inschatting te geven van de productie die er op dat moment plaatsvindt.

De assimilatie en verdamping (berekend met de gerealiseerde situatie) worden vergeleken met een situatie waarbij de instellingen voor assimilatiebelichting, CO₂ concentratie en VPD optimaal zouden zijn geweest. Het verschil geeft aan wat er te verbeteren is.

Onder normale omstandigheden komt de berekende fotosynthese van de Softsensor prima overeen met de gemeten fluorescentie waarden van bijvoorbeeld de Plantivity en met CO₂ opname metingen van de Licor6400.

Via een signalering geeft de Softsensor een beeld hoe efficiënt licht en CO₂ wordt benut voor de fotosynthese. Er wordt dus voldaan aan de doelstelling dat de kweker m.b.v. de Softsensor beter kan anticiperen op wat er gebeurt in de teelt en daarmee de inzet van belichting en CO₂ met een laag rendement kan voorkomen.

De rapportage van de Softsensor bestaat uit een grafische uitvoer en een overzicht met kwantitatieve gegevens. In de grafische uitvoer is te zien wanneer de productie afwijkt van de berekende optimale productie en de oorzaak daarvan. Verder is er een overzicht van de kasklimaatgegevens en de berekende verdamping. Softsensor is modulair opgebouwd en het is daardoor mogelijk om alle gewenste input parameters grafisch weer te geven. In overleg met de tuinder kan voor iedere gewenste combinatie gekozen worden.

Voorwoord

Vanuit het project “Meer rendement uit licht en CO₂” (Plant Lighting en Plant Dynamics 2013) is een protocol opgesteld met grenswaarden voor belichting en CO₂ dosering in relatie tot plantresponse en het klimaat. Uit discussies met betrokken kwekers blijkt dat het nog lastig is deze grenswaarden in het juiste perspectief te plaatsen. De grenswaarden hangen namelijk af van het klimaat en bij sommige gewassen ook van het seizoen en tijdstip van de dag. Er is behoefte om de plantresponse nog beter inzichtelijk te krijgen. Vanuit deze gedachte is het Softsensor project ontstaan, welke als ‘vertaalslag’ moet dienen van kennis over klimaat en plantresponse naar groeilijnen.

Onze dank gaat uit naar het Productschap Tuinbouw en het ministerie van Economische zaken die dit onderzoek mogelijk maakte.

Verder wil ik alle betrokkenen die deel hebben genomen aan dit project van harte bedanken voor hun inzet en input

In het bijzonder wil ik bedanken John Krijger (Kwekerij Zijdezicht), Laurens van Dijk (Kwekerij Bestplant) en Arjan Smits (Van der Voort Potplanten) voor het beschikbaar stellen van de klimaatgegevens en de mogelijkheid voor metingen op hun bedrijf; Peter Kamp en Patrick Dankers (Priva) voor hun input + het faciliteren van de BCO vergaderingen op hun bedrijf en Arthur van de Berg (LTO Glaskracht) voor het regelen van de vergaderingen

Ad Schapendonk en Kees Rappoldt hebben het noeste rekenwerk gedaan en alles aan elkaar weten te knopen tot een robuust rekenmodel. Heren, bedankt voor jullie inzet + doorzettingsvermogen!

Randwijk, augustus 2014

Sander Pot

1. Inleiding

1.1 Probleemstelling

In kassen worden klimaatfactoren, zoals temperatuur, licht, CO₂, en RV in het algemeen met (vaste) setpoints geregeld. De registratie van reacties van planten op veranderingen in de omgevingscondities berust veelal op visuele waarnemingen en op ervaringen, die achteraf geconstateerd zijn. De teelt van de meeste potplanten en ook van andere kasgewassen, kan veel energiezuiniger als de plantresponse onderdeel wordt in de teeltsturing. Echter in de praktijk heerst veel onzekerheid over hoe bijvoorbeeld variaties in lichtintensiteit en CO₂ voor verschillende cultivars doorwerken in de teelt en op de productie.

De fotosynthese is een belangrijke factor voor de groei. Er is een groot verschil in de gevoeligheid van de fotosynthese voor klimaatsfactoren (o.a. RV) tussen verschillende gewassen. Bovendien reageert het gewas vaak verschillend over de seizoenen (voorjaarsgewas / najaarsgewas).

Vragen daarbij zijn:

- Hoeveel moet belicht worden voor een optimaal teeltrendement?
- Wat is de maximaal toelaatbare lichtintensiteit?
- Hoe is de interactie met de CO₂ concentratie, kan ik daar nog winst maken?
- Hoe kan deze plantrespons inzichtelijk gemaakt worden en kan er vervolgens op gestuurd worden?

Toepassing van een plantsensor kan hierbij ondersteuning bieden, echter dit vergt vaak een grote investering van de ondernemer. Mede daardoor blijft toepassing beperkt tot een kleine groep bedrijven.

1.2 Doelstelling

In dit project wordt een alternatief geboden voor het continu monitoren van plantreacties met plant sensoren.

Dit alternatief bestaat uit twee delen:

1. Het nauwkeurig in kaart brengen van de reacties van een soort onder diverse omstandigheden en
2. de verworven kennis samenbrengen in een softsensor die samen met het gemeten klimaat de te verwachten plant response berekend.

In diverse projecten heeft Plant Dynamics BV zeer uitgebreide metingen gedaan aan de plantresponse op licht en CO₂. Het doel van dit project is deze kennis te bundelen en via een "Softsensor" te vertalen naar groeilijnen (assimilatielijnen). Op deze manier wordt de gewasresponse inzichtelijk gemaakt (zonder gebruik van dure sensoren) en tevens de mogelijkheid geboden tot directe sturing op gewasbehoefte.

In dit project wordt de “Softsensor” ontwikkelt voor de gewassen Chrysant en Spathiphyllum. Als input van het klimaat worden klimaatgegevens van kwekerij Zijdezicht (Chrysant) en van kwekerij Bestplant en Van der Voort Potplanten (Spathiphyllum) gebruikt. Voor de input van de plantresponse zijn gegevens gebruikt uit de database van Plant Dynamics + uit het project “Meer rendement uit Belichting en CO₂ dosering” (Trouwborst et al, 2013), waar intensieve metingen hebben plaatsgevonden o.a. aan Chrysant en Spathiphyllum. Op locatie Van der Voort Potplanten zijn tevens 2 GrowWatches ingezet in combinatie met plantsensoren voor de registratie van klimaat en plantresponse.

Het Softsensor model zal worden voorzien van een signalering hoe efficiënt licht en CO₂ wordt benut voor de fotosynthese. Op deze manier kan de kweker beter anticiperen op wat er gebeurt in de teelt en daarmee de inzet van belichting en CO₂ met een te laag rendement voorkomen. Door bewuster om te gaan met belichting en CO₂ kan dus energie bespaard worden. Deze besparing zal vooral bestaan uit een besparing op elektra voor assimilatielicht, door bijvoorbeeld het eerder afschakelen van licht als blijkt dat het rendement van lichtbenutting terugloopt.

Bij gebleken succes is het relatief eenvoudig om dit concept uit te breiden voor andere gewassen. Hiervoor hoeft de softsensor niet weer apart geschreven te worden, maar zal wel een aanpassing van de parameters nodig zijn voor wat betreft specifieke gewaseigenschappen.

1.3 Wat is de ‘Softsensor’?

Eindelijk inzicht in momentane productie.

Wat bedoelen we met softsensor?

De softsensor is een computerprogramma dat de actuele fotosynthese van een gewas berekent. De berekeningen zijn in feite schattingen die zijn gebaseerd op de geregistreerde instraling, temperatuur, CO₂ en RV in de kas en de fotosynthese/huidmondjes eigenschappen zoals die in eerdere experimenten zijn bepaald. Op die manier wordt opgedane kennis gebruikt om de tuinder een inschatting te geven van de productie die er op een bepaald moment en bij een gegeven klimaat plaatsvindt.

Wat heeft de tuinder daaraan?

Een tuinder heeft behoefte aan inzicht in het productieproces. Uit onderzoek en intensief contact met tuinders is steeds gebleken dat tuinders een kompas willen hebben om op te kunnen navigeren. Via het inzichtelijk maken van de plantresponse kan de ‘Softsensor’ als kompas gaan dienen in de teelt.

2. Fotosynthese

2.1 Inleiding

De basis van de groei van een plant wordt bepaald door het fotosyntheseproces in de bladgroenkorrels van de bladeren. Planten nemen water en voedingsstoffen op via hun wortels en CO_2 via de huidmondjes in hun bladeren. Fotosynthese is het proces waarbij de plant met behulp van lichtenergie het opgenomen water en CO_2 omzet in suikers (assimilaten). De fotosynthese is dus de motor van de plant en CO_2 fungeert als brandstof. Dit proces is een samenwerking van twee deelprocessen: de lichtreactie en de donkerreactie. In de lichtreactie wordt lichtenergie via elektronen transport (ETR) vastgelegd die in de donkerreactie gebruikt wordt voor het binden van CO_2 . Het enzym die de plant voor de binding van CO_2 gebruikt is Rubisco. Rubisco kan naast koolzuur (carboxylase) ook zuurstof binden (oxygenase), dan vindt juist de omgekeerde reactie plaats en komt er CO_2 vrij. Die omgekeerde reactie heet “fotorespiratie”. Fotorespiratie kan een zeer substantiële verliespost zijn voor de productiviteit van gewassen. Het doseren van CO_2 en het stimuleren van een voldoende grote opening van de huidmondjes beperken het productie remmende effect van fotorespiratie.

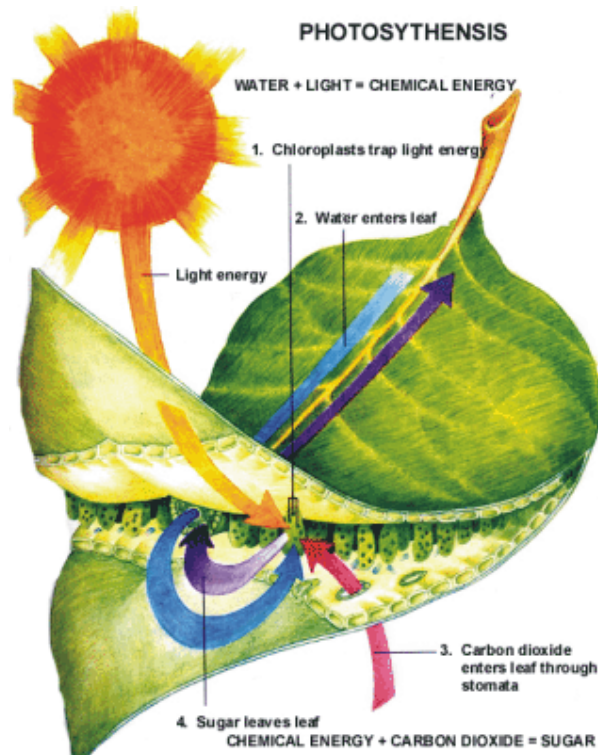


Fig. 1. Essentiële zaken rondom de fotosynthese: Lichtenergie wordt geabsorbeerd door het blad (1). Water komt binnen via de nerven (2). Tevens komt er CO_2 binnen via de huidmondjes (3). Met behulp van de lichtenergie en het enzym Rubisco worden er suikers gemaakt (4).

2.2 Lichtrespons van de fotosynthese

Het is algemeen bekend dat een hogere lichtintensiteit leidt tot een hogere fotosynthesesnelheid (Fig. 2). 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.

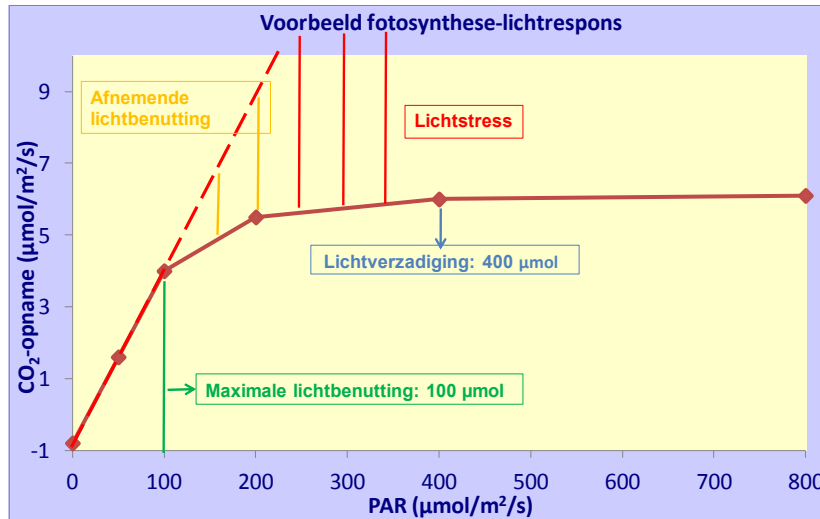


Fig. 2. Voorbeeld respons van de fotosynthese bij toenemende lichtintensiteit. Zolang als de fotosynthese meeloopt met de rood gestreepte lijn is de lichtrendement van de fotosynthese 100%. Het is vooral interessant om in dit gebied te belichten. Naarmate de 2 lijnen verder uit elkaar gaan lopen (weergegeven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

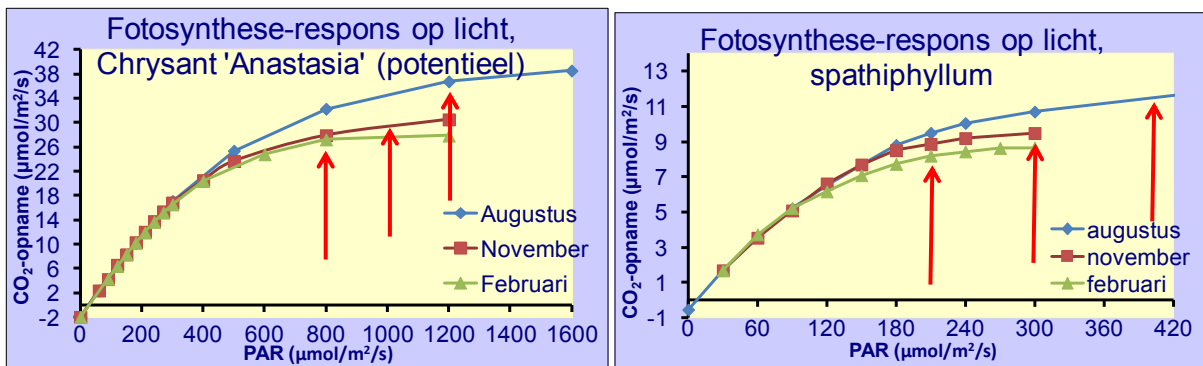


Fig. 3. Fotosynthese lichtresponse van Chrysant & Spathiphyllum. De rode pijlen geven de lichtgrens aan waarboven (bij langdurige blootstelling) lichtstress ontstaat aan het fotosynthesesysteem. In de praktijk worden bij Spathiphyllum vaak lagere grenswaarden aangehouden i.v.m. kwaliteit (bladkleur). (bron: "Meer rendement uit licht en CO₂"; Plant Lighting & Plant Dynamics; juni 2013).

Een belangrijke factor bij de bepaling van de productiviteit van een gewas is de lichtbenutting onder lichtbeperkende condities (Zieslin en Mor; Zieslin en Tsujita; 1990). Onder deze

condities is de efficiëntie waarmee het licht wordt benut voor de fotosynthese maximaal en is bepalend voor het verloop van de fotosynthesesnelheid in het lineaire stuk van de fotosynthese lichtrespons (zie figuur 2 & 3).

Bij hogere lichtintensiteit wordt de *verwerkingscapaciteit* van het licht de beperkende factor en neemt de efficiëntie van de lichtbenutting voor de fotosynthese af (zie afbuiging van de curven in figuur 2 & 3). Bij lichtverzadiging is de fotosynthesesnelheid maximaal. Dit maximum wordt bepaald door de maximale capaciteit van het elektronentransport (J_{max}) en de maximale capaciteit van de CO_2 binding (V_{cmax}). Plant Dynamics heeft in samenwerking met Wageningen-UR een methode ontwikkeld om de J_{max} en de V_{cmax} tegelijkertijd te kunnen meten (Yin, X, M. van Oijen & Ad H.C.M. Schapendonk, 2004).

De maximale efficiëntie van de lichtbenutting, de J_{max} en de V_{cmax} zijn in principe gewasspecifieke fotosynthese parameters, welke een belangrijk onderdeel vormen bij de ontwikkeling en invulling van de Softsensor.

2.3 CO_2 -respons van de fotosynthese

De respons van de fotosynthesesnelheid van C_3 -bladeren op CO_2 is vergelijkbaar met de lichtrespons: van lage naar hoge CO_2 -concentraties in de kas neemt de fotosynthese eerst snel toe om vervolgens bij hoge concentraties af te vlakken (Fig. 4).

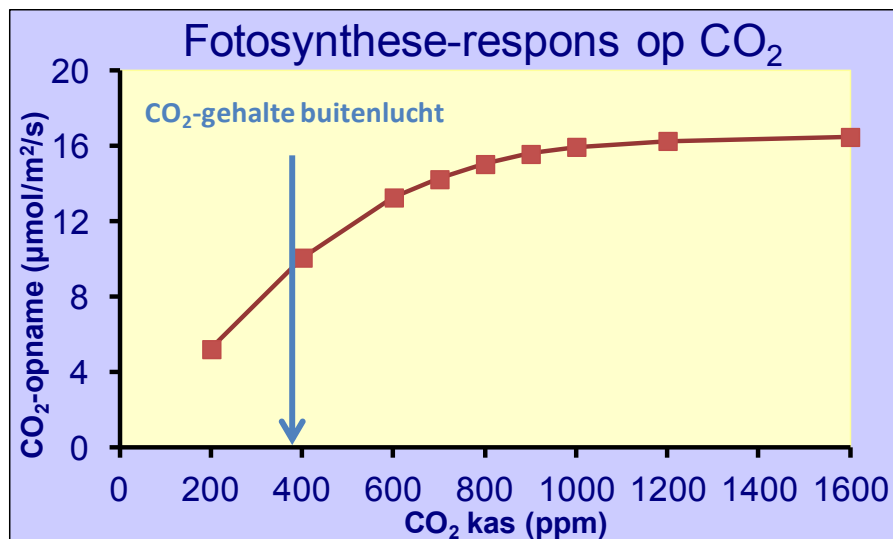


Fig. 4. Voorbeeld respons van de fotosynthese bij toenemend CO_2 . Van lage naar hoge CO_2 -concentraties in de kas neemt de fotosynthese eerst snel toe om vervolgens bij hoge concentraties sterk af te vlakken.

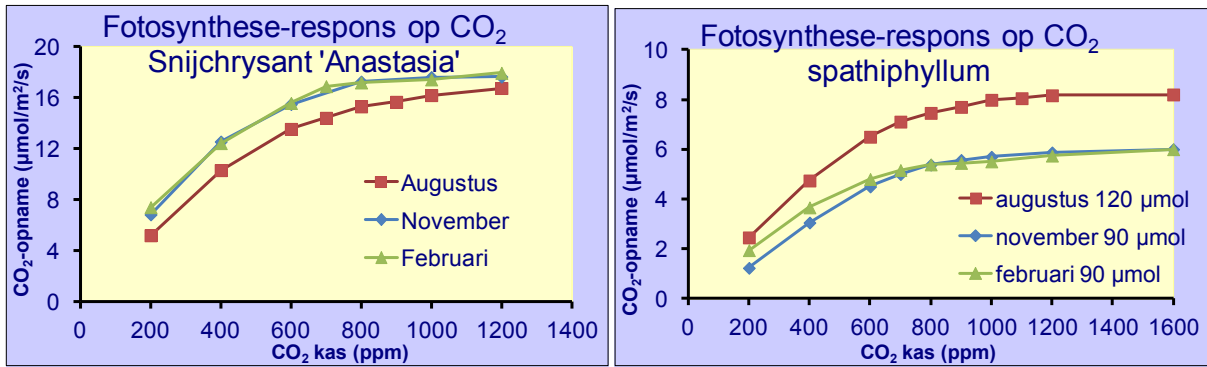


Fig. 5. Fotosyntheseresponse van Chrysant & Spathiphyllum op CO₂ (bron: "Meer rendement uit licht en CO₂; Plant Lighting & Plant Dynamics; juni 2013).

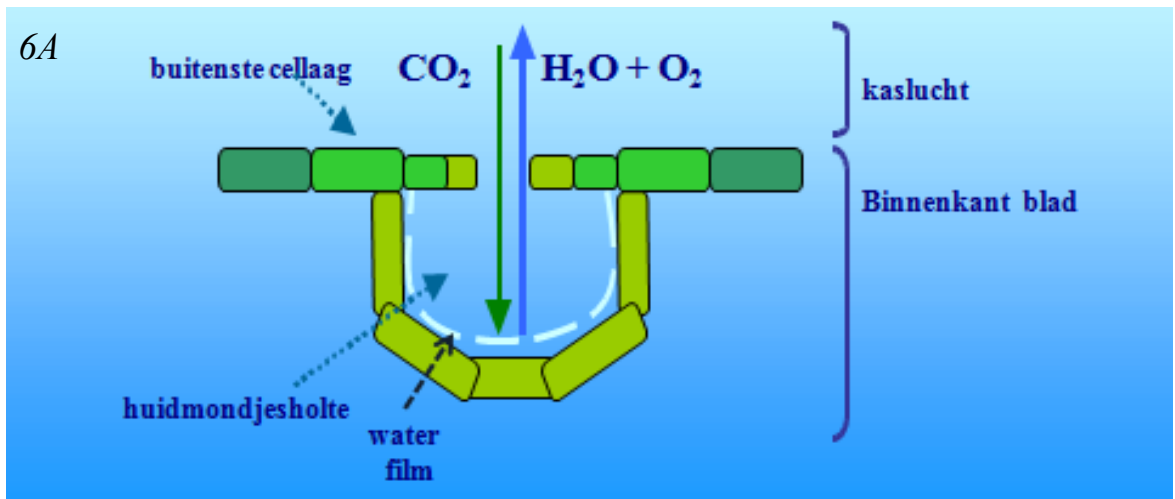
De maximale snelheid van CO₂ binding aan het enzym Rubisco (V_{cmax}) wordt bepaald door de initiële helling van de fotosynthese-CO₂ respons curve.

V_{cmax} is vooral bepalend voor de fotosynthese als de huidmondjes ver openstaan (hoge geleidbaarheid (G_s) voor CO₂) bij een hoge lichtintensiteit.

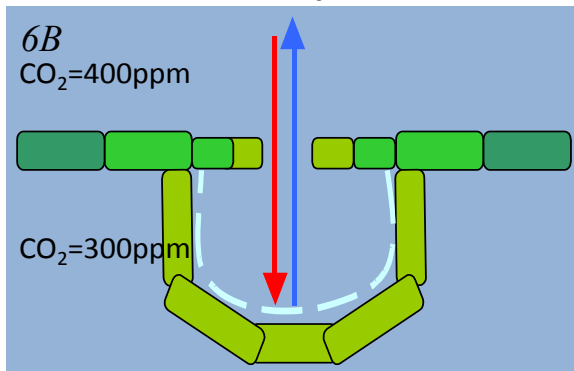
2.4 Belang van huidmondjesgeleidbaarheid (G_s) voor de fotosynthese

Licht is weliswaar de drijvende kracht voor de fotosynthese maar de grondstof voor de fotosynthese is CO₂, dat via de huidmondjes in het blad wordt opgenomen. Een hoge geleidbaarheid van de huidmondjes voor CO₂ is daarbij cruciaal voor een goede productiviteit. De geleidbaarheid voor CO₂ wordt bepaald door het aantal, de grootte en de openingstoestand van de huidmondjes. Gelukkig is de openingstoestand van de huidmondjes lichtafhankelijk. Als de lichtintensiteit toeneemt, gaan de huidmondjes verder open omdat in het blad sensoren waarnemen dat het koolzuurgehalte in het blad afneemt door de fotosynthese. Omgekeerd gaan ze dicht bij lagere lichtintensiteit en (soms bij) hoge VPDL¹

¹VPDL is het verschil in dampdruk tussen blad en de omgevingslucht. VPDL is afhankelijk van de heersende bladtemperatuur en de temperatuur en R.V. van de omgevingslucht. Als de kasttemperatuur oploopt of de hoeveelheid straling neemt toe dan zal VPDL toenemen. Het gevolg is een toename in verdamping waardoor het blad in staat is zich te koelen. Als de VPDL langere tijd hoog is kan de plant teveel water verdampen, waardoor de huidmondjes gaan sluiten.



Normaal huidmondje:



Knijpend huidmondje:

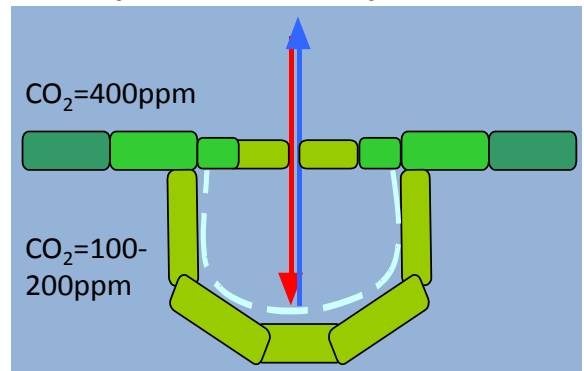


Fig. 6. Huidmondjes zijn poriën in het blad waardoor water kan verdampen en de CO_2 naar binnen kan gaan. Schematische tekening van een huidmondje (A) en het verschil tussen de CO_2 -concentratie in de kaslucht en in het blad door de mate van huidmondjesopening (B).

De plant is dus 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, maar dit kan bij knijpende huidmondjes dalen tot bijvoorbeeld 25% (Zie Fig. 6B). De consequentie is dat de fotosynthese bij knijpende huidmondjes fors lager ligt dan bij normaal geopende huidmondjes.

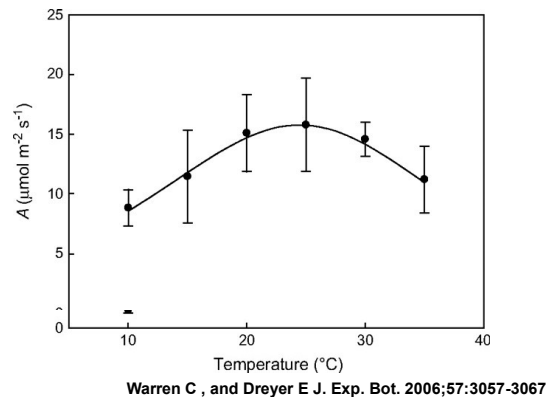
De belangrijkste factoren die de huidmondjesopening bepalen zijn de lichtintensiteit en de VPD. Deze (gewasspecifieke) factoren zijn meegenomen in het 'Softsensor' model.

2.5 Effect van temperatuur op de fotosynthese

Een belangrijk effect van de temperatuur op de fotosynthese is een indirect effect: namelijk het sluiten van de huidmondjes bij een te hoog oplopende VPDL door oplopende bladtemperatuur. Dit effect is beschreven in Hst. 2.4 en wordt meegenomen in de ‘Softsensor’.

Het directe effect van de temperatuur op de fotosynthese speelt vooral een rol bij niet beschermde teelten (buiten de kas). De temperatuurrange bij beschermde teelten (in de kas) ligt meestal in een gebied waarbij het effect op de fotosynthese relatief gering is (figuur 7). Het direct temperatuur effect is dan ook niet meegenomen in de ‘Softsensor’.

The temperature responses of the maximum rate of net photosynthesis (A_{max})



© The Author [2006]. Published by Oxford University Press [on behalf of the Society for Experimental Biology]. All rights reserved. For Permissions, please e-mail: journals.permissions@oxfordjournals.org

JOURNAL OF
Experimental Botany

Fig. 7. Temperatuurresponse van de fotosynthese (A_{max}) bij Eik.

3. Softsensor

3.1 Beschrijving van het model

De Softsensor is een module binnen het Explorer platform, ontwikkeld door Photosyntax BV en Ecocurves BV.

Het Explorer platform is een bibliotheek met rekenmodules die samen een virtuele kas vormen, waarmee interacties tussen kasklimaat en plantresponse continu worden berekend. Het is op die manier mogelijk om jaarrond producties en energiegebruik voor verschillende teeltsenario's door te rekenen. Ook kan voor kortere periodes doorgerekend worden hoe groot het verschil is tussen de assimilatie bij de gehanteerde klimaatinstellingen en de maximaal haalbare assimilatie.

De Softsensor is een computerprogramma dat de actuele fotosynthese van een gewas berekent. Met de Softsensor wordt niet alleen de actuele productie berekend maar ook de productie die gerealiseerd had kunnen worden als andere maatregelen waren gehanteerd.

De berekeningen zijn in feite schattingen die zijn gebaseerd op de geregistreerde instraling, temperatuur en RV in de kas en de fotosynthese/huidmondjes eigenschappen zoals die in eerdere experimenten zijn bepaald. Op die manier wordt opgedane kennis gebruikt om de tuinder een inschatting te geven van de productie die er op een zeker moment plaatsvindt.

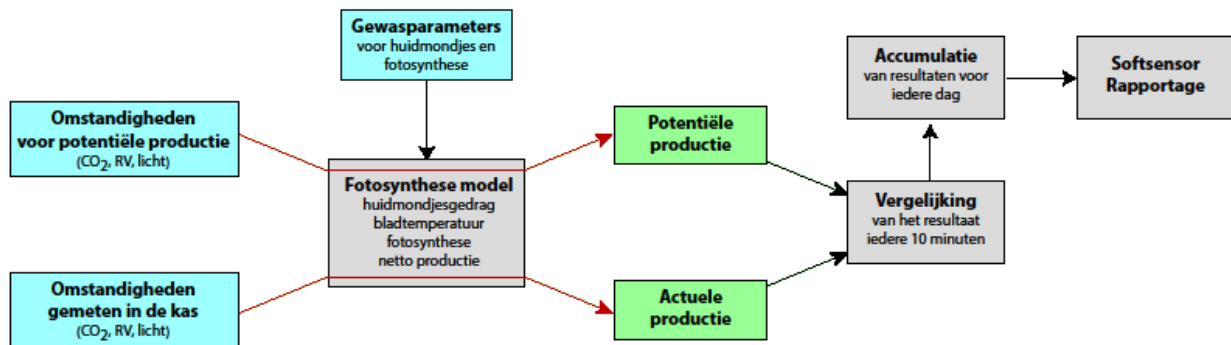


Fig. 8. Softsensor schema.

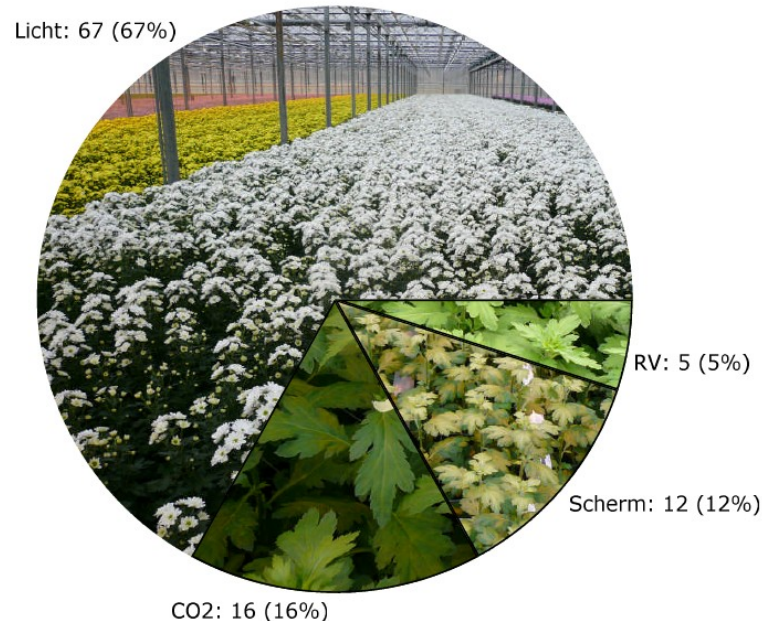
Centraal staat de berekening van de fotosynthese. Op basis van klimaat en specifieke gewasparameters wordt de actuele fotosynthese (productie) berekend en vergeleken met een situatie waarbij licht, CO₂ en RV optimaal zouden zijn geweest. In de rapportage wordt weergegeven op welke momenten het gerealiseerde licht, CO₂ en VPD afwijken van de berekende optimale situatie..

Softsensor berekent 5-minuten waarden voor fotosynthese en verdamping bij het werkelijk gerealiseerde kasklimaat. De procedure voorziet in een upload van klimaatdata naar een server, waarbij de periode in principe vrij te kiezen is. Uit navraag bij de kwekers is dit nuttig tot uiterlijk een periode van 2 weken. Dit is lang genoeg om verschillende weertypen te zien en ook weer niet dermate lang dat de berekende verbeterpunten niet meer relevant zijn omdat seizoensinvloeden een te grote rol gaan spelen.

Op de server dient van deelnemers bekend te zijn hoe de kas is geconfigureerd. Belangrijk daarbij is de samenstelling van eventueel voorhanden assimilatiebelichting, SON-T of LED, boven-belichting of hybride. Verder zijn de schermeigenschappen belangrijk voor de berekeningen, zoals schermtransmissies, volgorde en looprichting van schermen.

De assimilatie en verdamping worden berekend voor de gerealiseerde situatie en vergeleken met een situatie waarbij de instellingen voor assimilatiebelichting, CO₂ concentratie en VPD optimaal zouden zijn geweest. Het verschil geeft aan wat er te verbeteren is. Softsensor berekent niet alleen hoeveel er nog te verbeteren is, maar ook hoe dat gerealiseerd kan worden. In overzichtelijke rapportages wordt aangegeven op welke momenten en in welke mate de hoeveelheid licht, de CO₂ concentratie en de VPD afwijken van de berekende optimale instellingen. Voor belichting en CO₂ wordt dus aangegeven of er wel voldoende van is om een optimale productiviteit te realiseren, maar ook wat het rendement is waarmee deze bronnen door het gewas benut worden. Bij een te laag rendement zullen de kosten van met name belichting niet opwegen tegen de meerproductie en luidt het advies om lampen af te schakelen. Ook wordt aangegeven wanneer er een overschot aan licht is en in extreme gevallen de stress die dat oplevert.

Relatief effect van onderzochte parameters op opbrengstverhoging



Door in herhaalde berekeningen (simulaties) steeds één van de factoren (bijvoorbeeld alleen CO₂, of alleen de assimilatiebelichting) te optimaliseren, kan het belang van elk van de drie factoren voor de optimalisatie worden berekend. In bovenstaande figuur is een voorbeeld gegeven voor chrysant. Uit dit voorbeeld blijkt dat verhoging van lichtintensiteit tot minimaal het niveau van de maximale efficiëntie, de grootste opbrengstvermeerdering geeft, gevolgd door een verbeterde CO₂-regeling, scherminstelling en RV.

Naast deze kwantitatieve winstberekening wordt in grafieken weergegeven hoe de fotosynthese in de tijd verloopt + hoe deze wordt beïnvloedt door de factoren licht CO₂ en vocht. Op deze manier wordt dus op elk moment inzicht gegeven hoe de fotosynthese te optimaliseren + welke maatregel daarvoor nodig is.

De Softsensor vervangt de fysieke plantsensoren, daar waar die niet per se nodig zijn. Dit voorkomt enorm veel problemen, die nu eenmaal aan fysieke sensoren gekoppeld zijn.

Denk daarbij aan gebrek aan ijking, te weinig herhalingen, te veel variatie, problemen met inlezen, problemen met interpretatie. Dat wordt voorkomen met de Softsensor.

Uiteraard zijn de fysieke sensoren wel nodig als er nieuwe informatie gewenst is (denk aan een nieuw ras wat erg gevoelig is voor een bepaalde omgevingsfactor).

3.2 Berekeningen.

Centraal in het Softsensor model staat de berekening van de fotosynthese. Deze wordt berekend uit de licht- en de CO₂-afhankelijke componenten van de fotosynthese. Een derde belangrijke factor voor de fotosynthese berekening is de Gs (de huidmondjesgeleidbaarheid). Die wordt berekend in afhankelijkheid van VPD (afgeleid uit bladtemperatuur en RV).

Samen met de lichtintensiteit, bepaalt Gs ook in hoge mate de berekening van de geaccumuleerde stress. Dit is een belangrijk gegeven dat ook in de uitvoer beschikbaar komt. Het is echter wel belangrijk dat de resultaten in de loop van de tijd worden gekalibreerd tegen de werkelijk waargenomen schade. Door de registratie en de daaraan gekoppelde berekeningen is dit relatief eenvoudig te realiseren. Softsensor rekent niet alleen met een schade-inductie maar ook met een herstel. Het aantal uren dat sprake is van lichtschade wordt weergegeven in de samenvattende tabel .

Berekening van de optimale lichtintensiteit is natuurlijk soortafhankelijk. Voor assimilatiebelichting wordt de regel gehanteerd dat er economisch rendabel bij-belicht kan worden tot het niveau waar de licht-response curve gaat afbuigen van de raaklijn (figuur 2). Dat niveau is natuurlijk soortafhankelijk, maar ook CO₂ en RV afhankelijk. Om deze soortspecifieke eigenschappen te bepalen, zijn dus de eerder genoemde metingen nodig. Op die manier spelen de laatstgenoemde factoren intrinsiek mee bij de uiteindelijke optimalisatie. Bij hoog CO₂ zal de optimale lichtintensiteit dus wat hoger zijn dan bij laag CO₂ . Dit zou je kunnen zien als een secundair effect bij de optimalisatie.

Het primaire effect van CO₂ is een verhoging van de totale assimilatie. In de Softsensor wordt een eenvoudige aanname gemaakt, waarbij minimaal het niveau wordt gerealiseerd dat bij hoog licht nog tot een verhoging van de fotosynthese leidt. Dit is niet altijd realistisch, omdat het economisch niet haalbaar is om met open ventilatieramen CO₂ te doseren. Daarom is in Softsensor een module opgenomen die rekening houdt met de raamstand. De dosering wordt afhankelijk gemaakt van de raamstand (in overleg met de tuinder) en de windsnelheid (indien aangeleverd).

Berekening van de optimale RV is in Softsensor vooral afhankelijk van de VPD afhankelijke huidmondjesgeleidbaarheid (Gs). Als de Gs hoog genoeg is en dus geen verlaging van de interne CO₂ concentratie in het blad veroorzaakt tot een niveau dat de optimale fotosynthese niet meer kan worden gerealiseerd, dan mag RV in principe laag zijn. Is dat niet het geval, dan wordt de RV verhoogt totdat de interne CO₂ concentratie (C_i) het optimale niveau behaalt. Dit is ongeveer 70% van de CO₂ concentratie in de kas. Als C_i nog te laag is voor een optimale assimilatie, dan wordt CO₂ gedoseerd, binnen de gegeven randvoorwaarden, zoals de stand van de ventilatieramen en een eventueel opgegeven maximum waarboven CO₂ schadelijke effecten gaat krijgen.

3.3 Data input voor Softsensor

Onderstaande input gegevens zijn wenselijk maar niet allemaal ook dringend noodzakelijk. De noodzakelijke parameters zijn dikgedrukt weergegeven.

Gemeten buitenklimaat:

5 minuten waarden van

1. Buitentemperatuur
2. Buiten RV
- 3. Buitenstraling**
4. Windsnelheid
5. Uitstraling

Gemeten binnenklimaat:

5 minuten waarden van

- 1. Temperatuur (liefst op verschillende plekken)**
- 2. RV (liefst op verschillende plekken)**
- 3. CO₂ concentratie**
- 4. Belichting aan/uit + intensiteit**
5. Buistemperatuur.
- 6. Raamstanden (wind en lijzijde)**
- 7. Schermstanden; energiescherm en lichtschermen**
8. Luchtbehandelingkast (aan/uit of regeling)

Daarnaast zijn kasgegevens en setpoints van regelingen van belang.

- Kasdek transmissie + eigenschappen schermdoeken
- Voorbeeld setpoint sturing schermdoeken: scherm dicht bij delta T binnen-buiten = 10 C. Of; scherm dicht bij buis T boven 45 C.
- Ander voorbeeld: raam- lijzijde open bij RV > 85% en T kas > 28 C.
- Nog ander voorbeeld: assimilatielicht aan tussen 0:00 u en 16:00 u, behalve bij instraling boven 250 Watt en bij T-kas > 25 C.

Fotosynthese en huidmondjeskarakteristieken:

Met behulp van de LiCor6400 kunnen de fotosyntheseparameters op locatie worden bepaald.

Het verdient aanbeveling om dit over meerdere periodes van het jaar (bij voorkeur in het vroege voorjaar, zomer en late najaar) te doen

- 1. Huidmondjes geleidbaarheid in VPD afhankelijkheid**
- 2. Vcmax**
- 3. Jmax**

Plant Dynamics heeft een uitgebreide database voor de benodigde fotosynthese parameters van veel gewassen. Indien niet beschikbaar in deze database, dan kunnen de relevante parameters in een enkele meetsessie van 2 dagen worden bepaald.

3.4 Softsensor uitvoer

De vorm waarin de rapportage wordt gegoten is de uitkomst van overleg met de BCO. De data van 2-wekelijkse periodes wordt met de Softsensor geanalyseerd. De rapportage bestaat uit een grafische uitvoer en een overzicht met kwantitatieve gegevens. In de grafische uitvoer is te zien wanneer de productie afwijkt van de berekende optimale productie en de oorzaak daarvan. Verder is er een overzicht van de kasklimaatgegevens en de berekende verdamping. Softsensor is modulair opgebouwd en het is daardoor mogelijk om alle gewenste input parameters grafisch weer te geven. In overleg met de tuinder kan voor iedere gewenste combinatie gekozen worden. Ook de keuze van de tijdsresolutie is vrij, variërend van weergaves per uur, dag, week of maand. Hoe deze uitvoer er uit kan zien wordt weergegeven in het volgende hoofdstuk 'Resultaten'.

4. Resultaten

In onderstaande illustraties is gekozen voor weergave van periodes met een lengte van een week, met daarbij de opmerking dat tenminste data voor 2 weken beschikbaar dienen te zijn, om redenen die al eerder werden aangegeven.

Voor iedere week bestaat de rapportage uit:

- 1) **Weekgrafieken** met de gemeten klimaatgegevens van de berekende periode met (scherm)instellingen en momenten van belichting (indien sprake is van belichten).
- 2) **Samenvattende tabel** met de gemiddelde productie per dag + wat onder ideale omstandigheden potentieel haalbaar zou zijn. Daarnaast wordt weergegeven hoeveel van het gemeten licht (daglicht en/of assimilatiebelichting) er onder de heersende omstandigheden gemiddeld wordt gebruikt voor de fotosynthese en welk deel niet omdat de omstandigheden ongunstig zijn (bijvoorbeeld door laag CO₂ of gesloten huidmondjes).
- 3) **Weekgrafieken** met de gerealiseerde en potentiële groei (fotosynthese), verdamping en huidmondjesopening. Deze grafieken geven een detaillering van het verloop van de groeiparameters en wanneer de grootste verschillen optreden met het potentieel.
- 4) **Weekgrafieken** van de parameters RV, CO₂ en licht, waar aangegeven wordt op welk tijdstip er een suboptimale situatie was. Elk balkje correspondeert met een uur en de hoogte geeft aan gedurende welk deel van dat uur er een suboptimale situatie was. Deze figuren geven in principe de oorzaak weer van een eventueel verschil tussen de gerealiseerde en de potentieel haalbare productie. Zoals eerder opgemerkt moet hierbij wel benadrukt worden dat niet in alle situaties het mogelijk/realistisch is de potentiële productie te halen. Bijvoorbeeld: CO₂ doseren als de ramen wijd open staan heeft weinig zin en men zal genoeg moeten nemen met een lagere CO₂ concentratie in de kas dan ideaal voor de groei.

De voorbeelden die hieronder worden gepresenteerd zijn voor de onbelichte teelt van *Spathiphyllum*, met 3 schermen en de teelt van chrysant, met bijbelichting en een verduisteringsdoek als scherm-instelmogelijkheid.

4.1 Spathiphyllum

De gerealiseerde en potentiële productie van *Spathiphyllum* is doorgerekend met de klimaatgegevens van week 25 in 2013.

In figuur 9 worden de klimaatgegevens weergegeven, waarbij zowel sprake is van 'lichte' en 'donkere' dagen. Verder valt op dat de CO₂ concentratie op woensdag, donderdag en vrijdag overdag behoorlijk terugvalt.

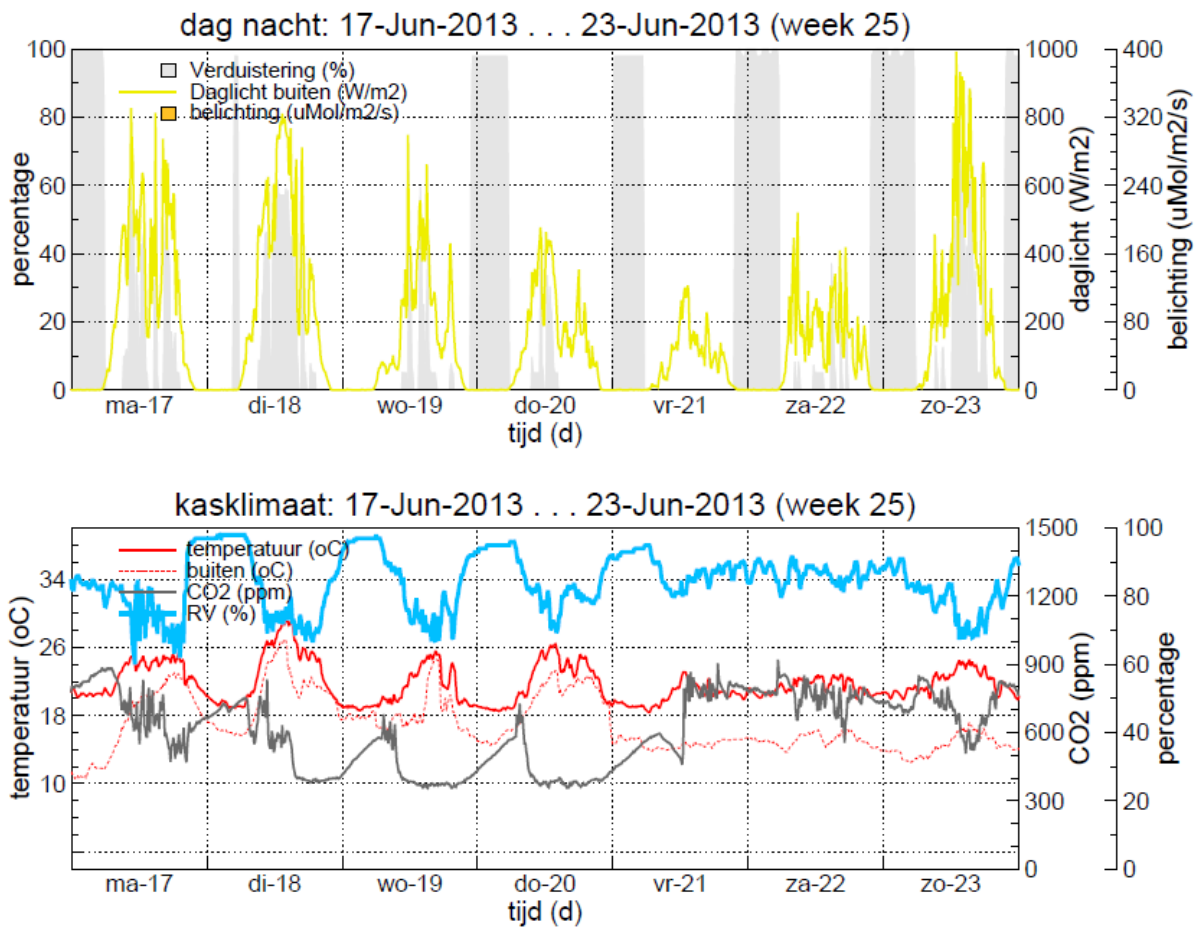


Fig.9 Klimaatgegevens van de berekende periode met (scherm)instellingen “ Spathiphyllum”. N.B. deze teelt was onbelicht!

Samenvatting

dagwaarde	ma 17-jun	di 18-jun	wo 19-jun	do 20-jun	vr 21-jun	za 22-jun	zo 23-jun
productie (gr/m2)	12.0	11.0	8.8	9.2	8.2	11.1	10.7
potentieel	15.0	14.7	14.4	14.5	13.9	14.9	14.8
totaal PAR (mol)	11.7	11.4	9.1	9.5	6.5	9.5	10.2
ongebruikt (dag)licht	4.0	3.6	2.4	2.6	1.4	2.8	3.4

Fig.10 Samenvattende tabel met de berekende gerealiseerde productie en het potentieel. Het verschil in gerealiseerde productie t.o.v. het potentieel is het grootst op woensdag, donderdag en vrijdag. Op alle dagen wordt een deel van het licht niet gebruikt voor de fotosynthese.

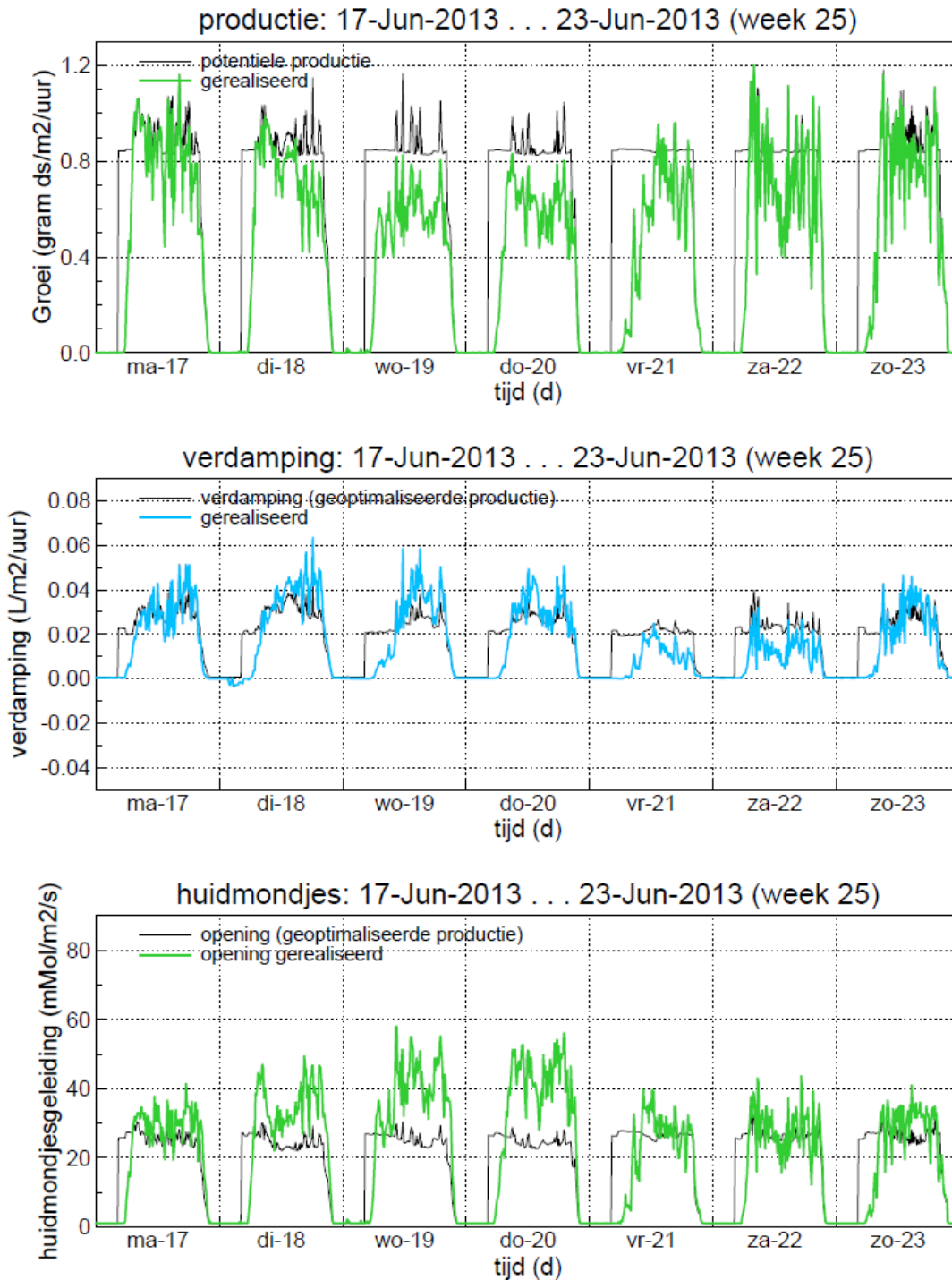


Fig.11 Weekgrafiek met gerealiseerde en potentiële groei, verdamping en huidmondjesopening.
 Het meest opvallend zijn de verschillen aan het begin van elke dag en op woensdag en donderdag.

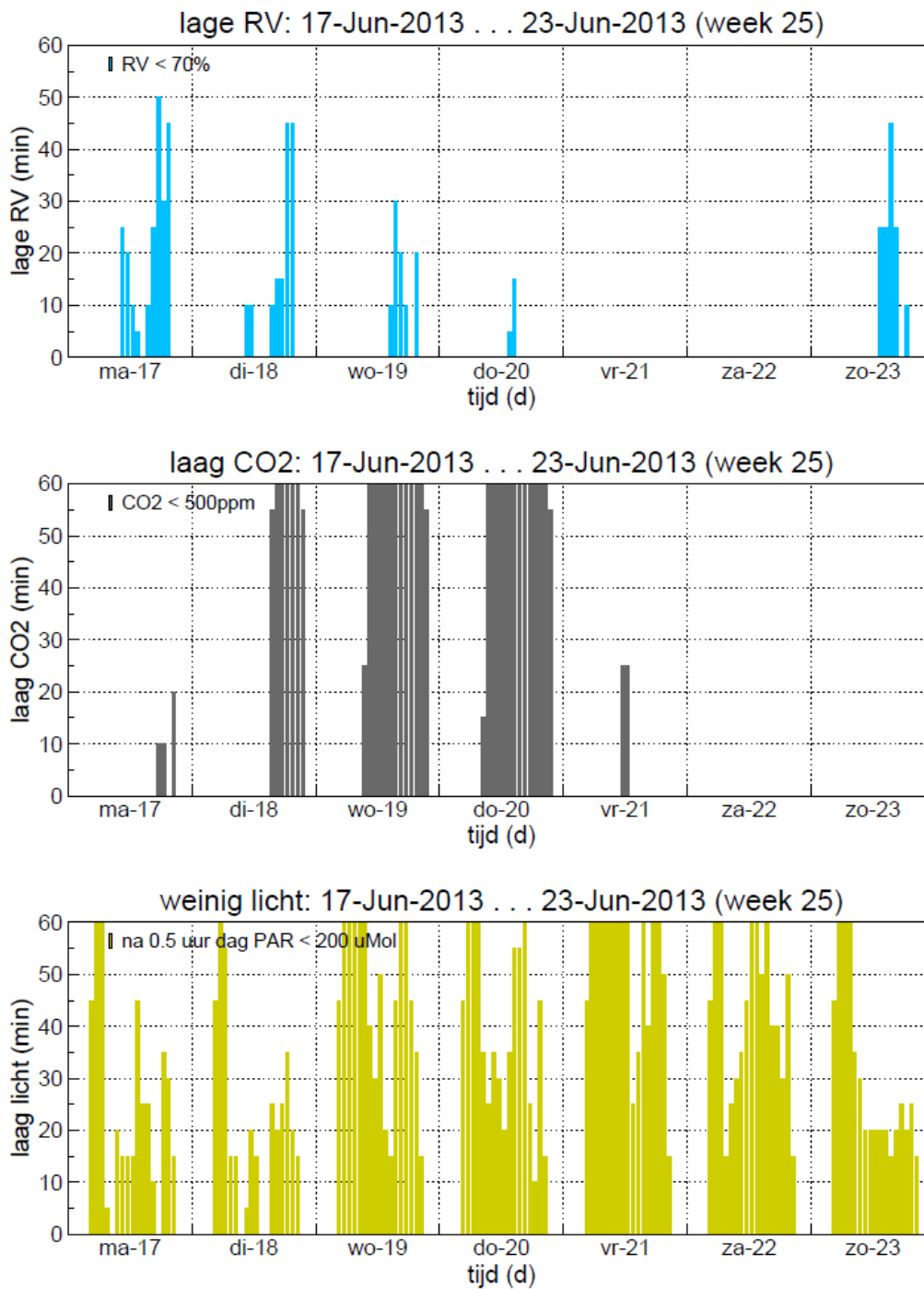


Fig.12 Weekgrafieken van de parameters RV, CO₂ en licht, waar aangegeven wordt op welk tijdstip er een suboptimale situatie was. Duidelijk is dat vooral op maandag, dinsdag en zondag productie is blijven liggen door laag RV en op dinsdag, woensdag en donderdag door laag CO₂. Op woensdag t/m zaterdag was er (te) weinig licht, wat deels opgevangen had kunnen worden door minder te schermen.

De gerealiseerde productie bij *Spathiphyllum* is in de aangegeven periode op de meeste dagen iets lager en op woensdag, donderdag en vrijdag beduidend lager dan de potentiële productie. (figuur 10). Duidelijke verschillen in productie zijn te zien aan het begin van de dag (figuur 11). Hier zou met bijbelichting nog wat extra geproduceerd kunnen worden. De verdamping is aan het begin van de dag dan ook hoger onder de optimale omstandigheden (het gewas wordt eerder ‘geactiveerd’). Gedurende de rest van de dag is de berekende optimale verdamping juist lager dan de actuele (vooral op dinsdag, woensdag en donderdag). Dat lijkt tegenstrijdig maar het wordt veroorzaakt door de hogere CO₂ concentraties die op die dagen worden gehanteerd voor de geoptimaliseerde productie. Daardoor sluiten de huidmondjes zich een beetje zoals te zien is in het verloop van huidmondjesgeleidbaarheid (figuur 11).

Op woensdag en donderdag is het verschil tussen gerealiseerde productie en het potentieel vooral veroorzaakt door de suboptimale CO₂ concentratie in de kas (figuur 12). Vrijdag was een donkere dag, waar zonder bijbelichting potentieel eigenlijk geen hogere productie kan worden gerealiseerd.

4.2 Snij Chrysant

Analoog aan de berekeningen voor *Spathiphyllum*, is in onderstaande figuren een weekrapport van Softsensor voor Chrysant weergegeven. De gerealiseerde en potentiële productie is doorgerekend met de klimaatgegevens van week 40 in 2012. Voor deze periode is gekozen omdat volop werd belicht, de sterk wisselende CO₂ concentraties en dat in deze week sprake was van zowel bewolkte als redelijk zonnige dagen. (figuur 13).

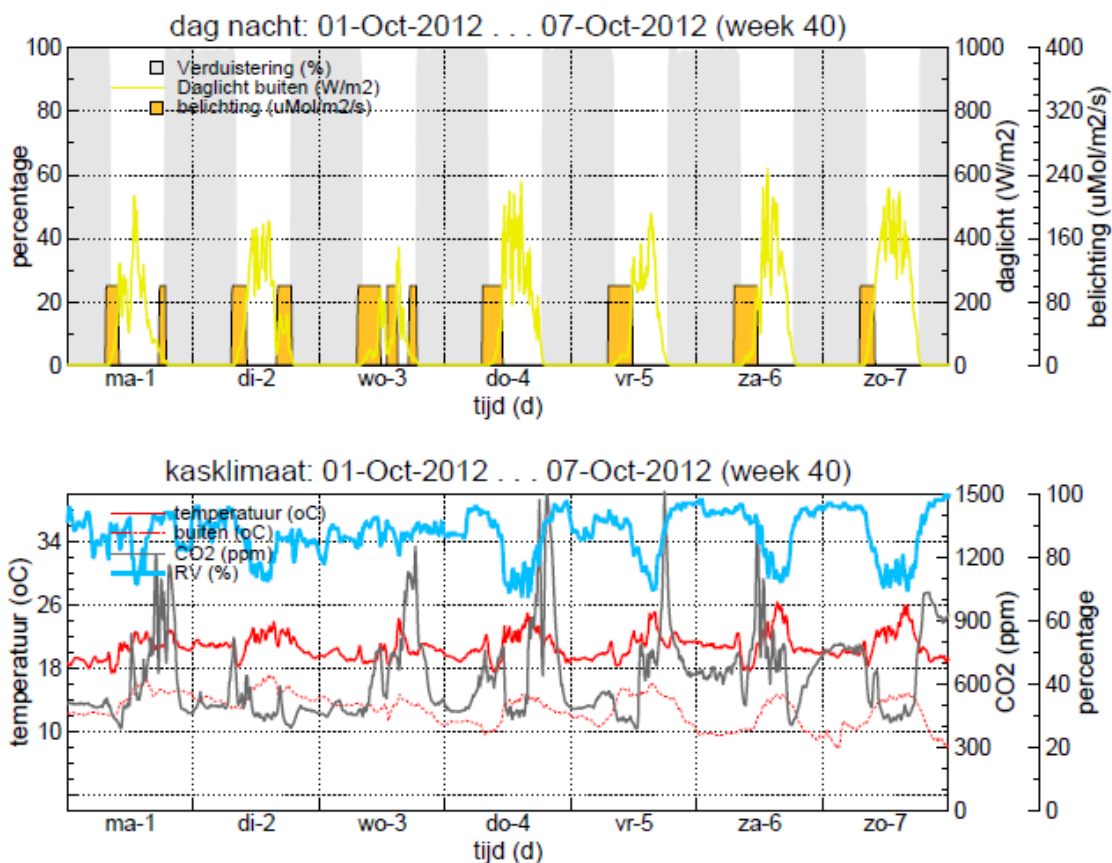


Fig.13 Klimaatgegevens van de berekende periode met (scherm)instellingen en momenten van belichting "Chryasant". Deels 'donkere' en deels dagen met hogere instraling. Opvallend zijn de sterk wisselende CO₂ concentraties en de RV die terugvalt op het eind van de dag op donderdag t/m zondag.

Samenvatting

dagwaarde	ma 1-okt	di 2-okt	wo 3-okt	do 4-okt	vr 5-okt	za 6-okt	zo 7-okt
productie (gr/m ²)	15.7	18.1	12.4	18.9	15.8	19.2	21.3
potentieel	19.3	22.5	15.8	22.6	19.2	21.5	25.6
totaal PAR (mol)	11.8	15.0	8.2	15.6	12.1	14.7	19.2
ongebruikt (dag)licht	2.1	3.0	0.9	3.7	2.3	3.5	5.0
belichting (mol)	1.38	2.04	2.81	1.38	1.68	1.62	1.02
mogelijke besparing	0.18	0.49	0.37	0.06	0.12	0.18	0.30
lichtschade (uur)	1.7	3.0	0.3	3.7	2.0	3.2	5.8
in procent	6.9	12.5	1.4	15.3	8.3	13.2	24.3
cumulatief	6.9	16.7	11.5	22.3	21.8	26.4	40.3

Fig.14 Samenvattende tabel met de berekende gerealiseerde productie en het potentieel. Een deel van het licht (zowel daglicht als assimilatiebelichting) wordt niet gebruikt voor de fotosynthese. Hieruit concluderen wij dat lichtschade kan optreden, welke aan het eind van de week toeneemt.

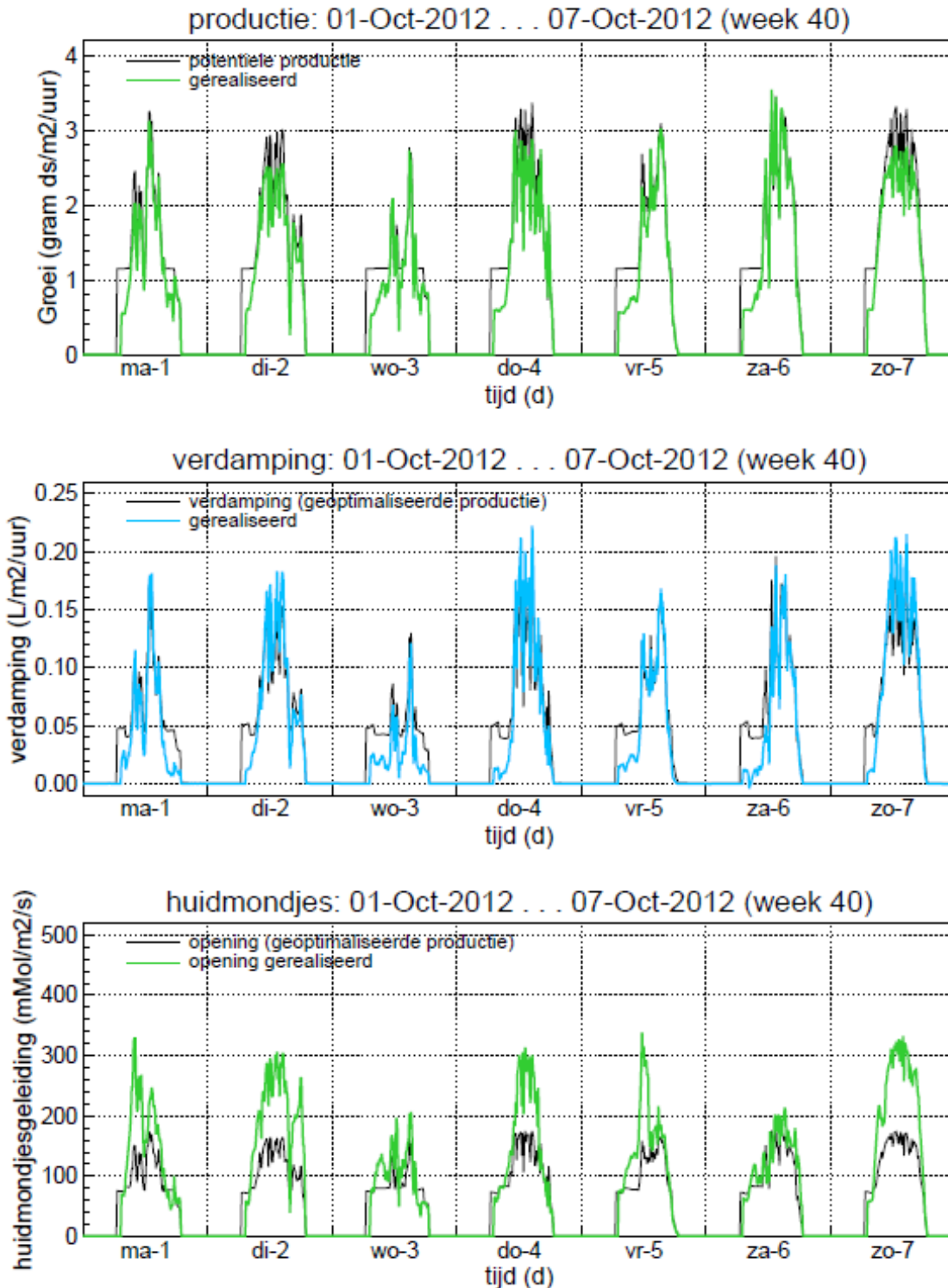
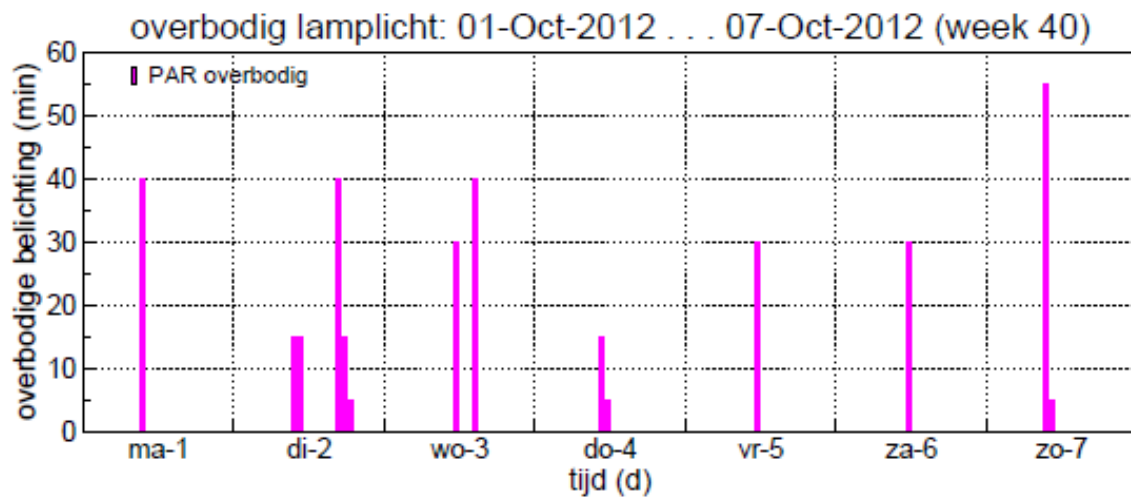
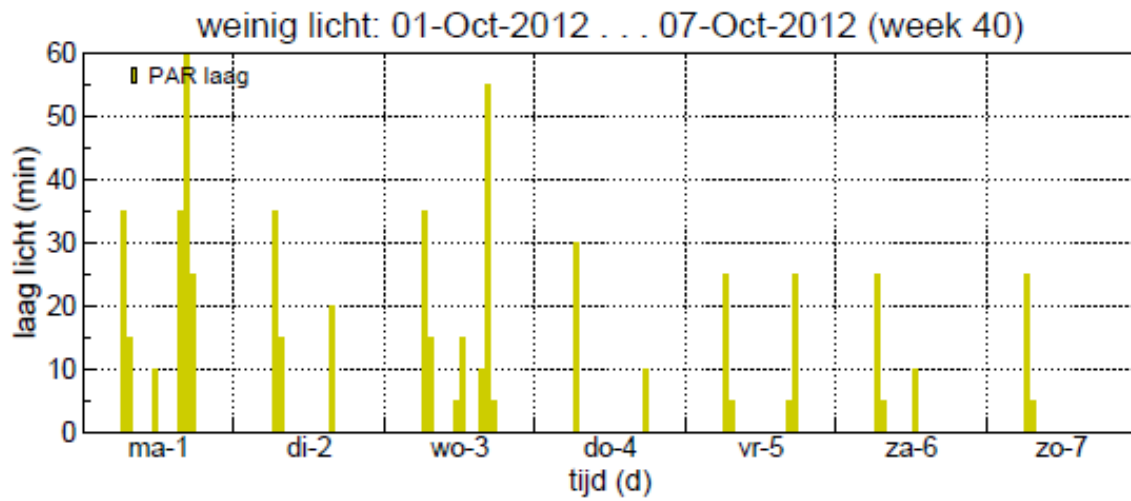
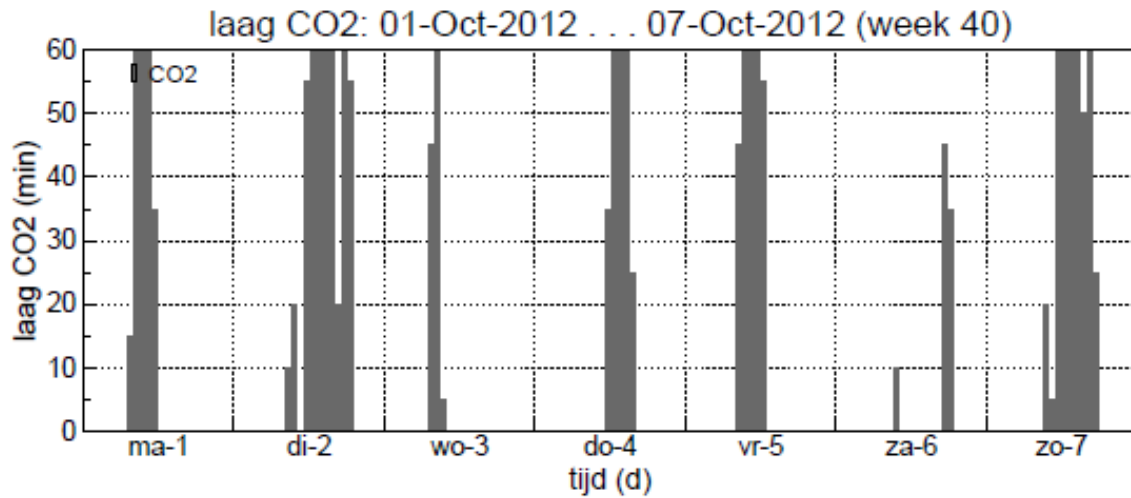


Fig.15 Weekgrafiek met gerealiseerde en potentiële groei, verdamping en huidmondjesopening. Aan het begin van de dag en overdag (vooral op dinsdag, donderdag en zondag) ligt de gerealiseerde productie onder het potentieel.



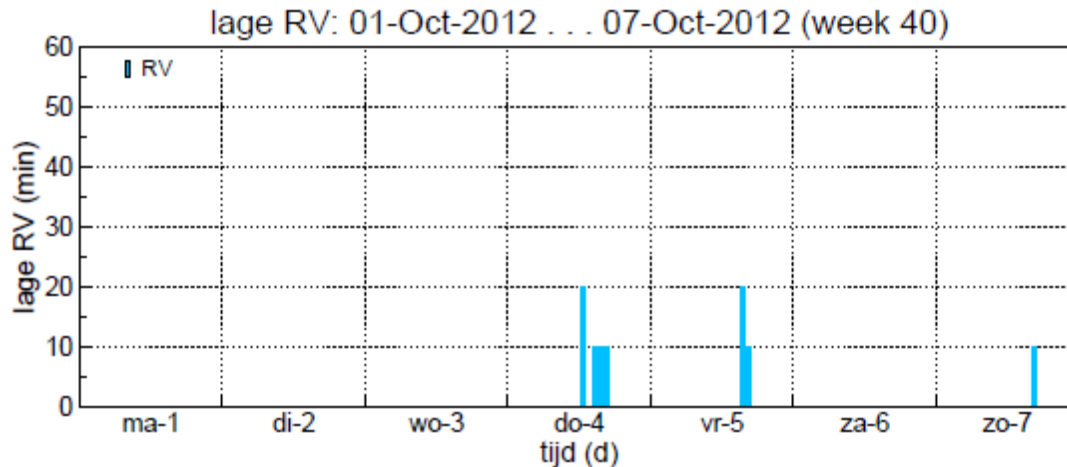


Fig.16 Weekgrafieken van de parameters CO_2 , licht en RV, waar aangegeven wordt op welk tijdstip er een suboptimale situatie was. Duidelijk is dat vooral op maandag, dinsdag, donderdag, vrijdag en zondag productie is blijven liggen door laag CO_2 . Voor maximaal haalbare productie lijkt er vooral aan het begin van de dag wat weinig licht, terwijl juist overdag sprake is van momenten met teveel licht. Momenten van te lage RV komt bijna niet voor.

Op alle dagen is er een verschil tussen de berekende potentiële productie en de gerealiseerde productie (figuur 14). Dit verschil laat zich vooral zien aan het begin van de dag (figuur 15). Uit figuur 16 blijkt dat voor de potentieel haalbare productie de hoeveelheid licht steeds aan het begin van de dag suboptimaal is. Dit kan worden opgevangen door extra te belichten, waarbij de kanttekening geplaatst moet worden of de kosten niet hoger zullen zijn dan de baten. Immers, vooral aan het begin van de dag is meerproductie te realiseren door meer licht, terwijl overdag juist sprake is van momenten met teveel licht. Verder blijkt uit figuur 15 dat op dinsdag, donderdag en zondag, de gerealiseerde productie overdag beduidend lager is dan het potentieel. Op deze dagen is vooral de CO_2 concentratie suboptimaal (figuur 16). Voor optimale productie zal de CO_2 concentratie dus moeten worden verhoogd. Als gevolg van de hogere CO_2 concentratie zal de huidmondjesgeleidbaarheid dan wel iets dalen (figuur 15), maar wordt naar verwachting niet limiterend voor de fotosynthese. Chrysant is namelijk – fotosynthetisch gezien – een makkelijk gewas. De huidmondjes staan bijna altijd ver genoeg open om niet limiterend te zijn voor de fotosynthese. Zie ook verslag “Meer rendement uit licht en CO_2 bij Snijchrysant”.

5. Conclusies en advies

Onder normale omstandigheden komt de berekende fotosynthese van de Softsensor prima overeen met de gemeten fluorescentie waarden van bijvoorbeeld de Plantivity en fotosynthese metingen van de Licor6400.

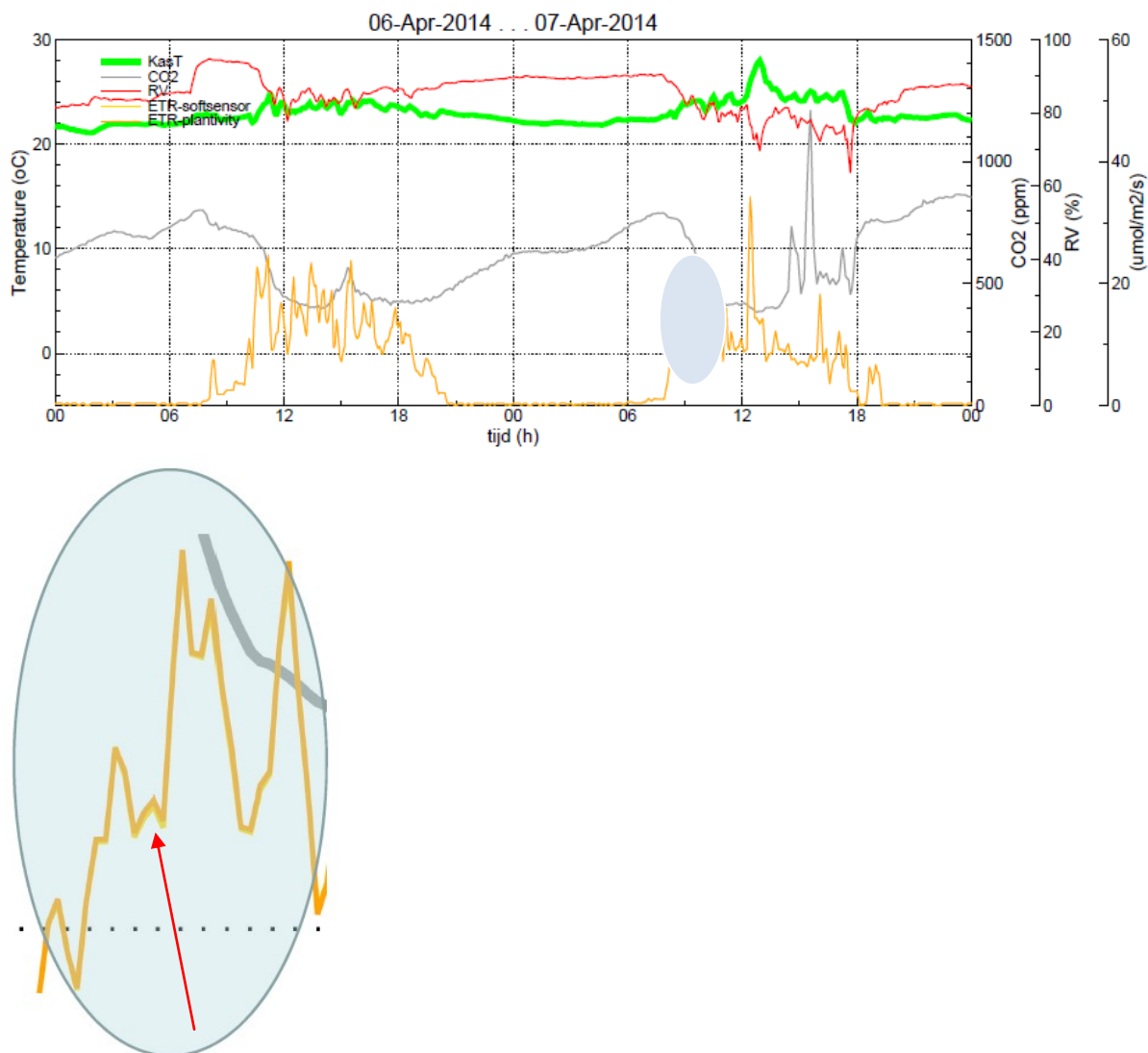


Fig. 17. Berekende ETR van de Softsensor vergeleken met de gemeten ETR van een Plantivity (locatie Van der Voort Potplanten). De berekende (lichtgele lijn) en gemeten (bruine lijn) waarden komen dermate goed overeen dat een uitvergroting nodig is om kleine verschillen te zien (zie rode pijl). Hierbij dient wel de kanttekening gemaakt te worden dat tijdens deze meetperiode geen stress is opgetreden.

Via een signalering geeft de Softsensor een beeld hoe efficiënt licht en CO₂ wordt benut voor de fotosynthese. Er wordt dus voldaan aan de doelstelling dat de kweker m.b.v. de Softsensor beter kan anticiperen op wat er gebeurt in de teelt en daarmee de inzet van belichting en CO₂ met een laag rendement kan voorkomen.

De berekeningen zullen in absolute termen betrouwbaar zijn binnen een marge van 10-15%, maar dat is niet eens nodig. Het gaat de tuinder vaak om relatieve effecten want die zijn bepalend voor de richting van een bepaalde maatregel. Op dat gebied zal de Softsensor, naar verwachting, erg goed presteren. Uit de resultaten zal ook duidelijk worden of eventueel nog extra informatie nodig mocht zijn. Dit kan bijvoorbeeld een extra klimaatregistratie op een bepaalde positie in de kas zijn. Door de tuinder steeds mee te laten denken, zal het ook makkelijker worden om de benodigde extra registraties daadwerkelijk verricht te krijgen. Ook de klimaatcomputers zullen op basis van het leertraject verbeterd kunnen worden. Hierbij denken we aan het zichtbaar maken van het momentane energieverbruik en het zichtbaar maken van het optionele verbruik, t.o.v. de daaraan gekoppelde meerproductie, bij besparende maatregelen. Ook hier zullen we ons in eerste instantie tot CO₂, luchtvochtigheid en licht beperken omdat temperatuur voorsnog teveel ontwikkelingseffecten en langere termijn aanpassingen met zich meebrengt.

We concluderen dat:

- Berekeningen met Softsensor onder optimale omstandigheden even goed zijn als metingen met de Plantivity.
- Onder stress omstandigheden is dat echter niet het geval omdat de softsensor “niet weet” wanneer een plant daarop reageert en in welke mate.
- De Plantivity en andere meetinstrumenten zoals de LiCor zijn bij uitstek geschikt om de plantreactie onder stress omstandigheden experimenteel te kwantificeren gedurende korte maar zeer gedetailleerde meetsessies en vervolgens die gevonden wetmatigheden in de softsensor in te bouwen.

Referenties

- Dijkstra T, Van Marwijk D, De Rooij E, Verberkt H, Blaakmeer A, Schapendonk A, Pot CS, Voogt J.** 2010. Make sense, Growsense. Wageningen: DLV, Grow@science, Plant Dynamics, Hoogendoorn automatisering, 175 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.
- Trouwborst G, Hogewoning SW, Pot CS.** 2013. Meer rendement uit licht en CO₂ bij Chrysant. Bunnik: Plant Lighting B.V. & Plant Dynamics B.V., 25 blz.
- Trouwborst G, Hogewoning SW, Pot CS.** 2013. Meer rendement uit licht en CO₂ bij Spathiphyllum. Bunnik: Plant Lighting B.V. & Plant Dynamics B.V., 25 blz.
- Bakker JC.** 1991. Effects of humidity on stomatal density and its relation to leaf conductance. *Scientia Horticulturae* 48, 205-212.
- Dankers P, De Rooij E, Verberkt, H, Blaakmeer A, Roovers-Huijben T, Pot CS, Trouwborst G.** 2011. Growsense II, Energiebesparing door optimalisatie van de teeltfactoren temperatuur, CO₂, licht en VPD op basis van plantreacties. Wageningen: DLV plant, 71p.
- Trouwborst G, Pot CS, Schapendonk AHCM, Fanourakis D.** 2010c. Huidmondjes in ontwikkeling: Invloed van omgevingsfactoren op de huidmondjesanatomie van bladeren, een literatuurstudie. Wageningen: Plant Dynamics B.V., 29p
- Trouwborst G, Pot CS, Schapendonk AHCM, Zenasni N.** 2011. Stimuleren van de huidmondjesontwikkeling bij diverse potplanten. Wageningen: Plant Dynamics B.V., 27p.
- Schapendonk AHCM, Pot CS, Rappoldt C, Nederhoff E.** 2009. Assimilatiebelichting Paprika ; Scenario analyse LED en SON-t, Plant-Dynamics B.V. en EcoCurves, Wageningen. 38p.
- Schapendonk AHCM, Pot SC, Rappoldt C.** 2010a. Plantenpaspoort roos: Sleutel voor optimale productie. Wageningen: Plant Dynamics B.V., 109p.
- Schapendonk AHCM, Pot CS, Trouwborst G, Rappoldt C.** 2010b. Optimale hybride belichting bij tomaat: Perspectieven voor het nieuwe telen. Plant-Dynamics B.V. en EcoCurves, Wageningen. 39p.
- Kramer, D., G. Johnson, et al.** (2004). "New Fluorescence Parameters for the Determination of QA Redox State and Excitation Energy Fluxes." *Photosynthesis Research* 79(2): 209-218.
- Klughammer, C. and U. Schreiber (2008).** "Complementary PSII quantum yields calculated from simple fluorescence parameters measured by PAM fluorometry and the saturation pulse method." *PAM application notes* 1: 27-35.
- Hendrickson, L., R. T. Furbank, et al.** (2004). "A simple alternative approach to assessing the fate of absorbed light energy using chlorophyll fluorescence." *Photosynthesis Research* 82(1): 73-81.
- Hendrickson, L., B. Forster, et al.** (2005). "A simple chlorophyll fluorescence parameter that correlates with the rate coefficient of photoinactivation of Photosystem II." *Photosynthesis Research* 84(1-3): 43-49.