



Plantmonitoring op basis van fotosynthese sensoren

Praktijktesten in de teelt van tomaat en gerbera

Elias Kaiser¹, Esteban Baeza Romero¹, Marcel Raaphorst¹, Frank Kempkes¹, Sander Pot², Vincent Jalink³, Jan Voogt⁴ en Anja Dieleman¹

¹ Wageningen UR Glastuinbouw, ² Plant Dynamics, ³ PhenoVation, ⁴ Hoogendoorn growth management

Rapport WPR-712

Referaat

Wageningen University & Research, Business Unit Glastuinbouw heeft samen met PhenoVation en PlantDynamics in opdracht van 'Kas als Energiebron' twee methodes om de gewasfotosynthese te monitoren onderzocht: de gewasfotosynthesemonitor en de CropObserver. De data van de gewasfotosynthesemonitor werden vergeleken met de fotosynthesemodule van het gewasgroeimodel INTKAM. Verder werd het dagverloop van de huidmondjesopening bepaald met de Stomatasensor. Uit de metingen bleek dat de gewasfotosynthesemonitor te gevoelig is voor veranderingen in raamstanden en wisselingen in CO₂ dosering om de gewasfotosynthese nauwkeurig te kunnen bepalen. De CropObserver bleek een goed beeld te geven van de relatieve lichtbenutting door het gewas. De beste manieren om de gewasfotosynthese nauwkeurig en betrouwbaar te bepalen, zouden de volgende kunnen zijn: 1. Via een fotosynthesemodel (zoals INTKAM) waarmee de gewasfotosynthese berekend kan worden, gekoppeld aan een sensor die de status van het gewas monitort zodat geregistreerd wordt wanneer de reactie van het gewas afwijkt van wat te verwachten zou zijn, of 2. Via de CropObserver, aangevuld met een sensor voor de huidmondjesopening en een meting van tenminste de CO₂ concentratie, waarmee het signaal van de CropObserver vertaald kan worden naar CO₂ opname door het gewas.

Abstract

Wageningen University & Research, Business Unit Glastuinbouw has investigated two methods of monitoring crop photosynthesis that might be used in greenhouse horticulture: the crop photosynthesis monitor and the CropObserver. This project was funded by 'Kas als Energiebron' and executed together with PhenoVation and PlantDynamics. The data of the crop photosynthesis monitor were compared to those of the photosynthesis module of the crop growth model INTKAM. Furthermore, the pattern of stomatal opening during the day was calculated with the Stomata sensor. Measurements showed that the crop photosynthesis monitor was too sensitive to changes in window opening and in CO₂ supply to determine the crop photosynthesis accurately. The CropObserver was useful in determining the relative light use efficiency of the crop. The best methods to accurately and reliably determine crop photosynthesis might be the following: 1. By a photosynthesis model (as in INTKAM) to calculate the crop photosynthesis, coupled to a sensor that monitors the crop status to register when the performance of the crop deviates from what might be expected, or 2. Via the CropObserver to which a module is added that determines the stomatal conductance and a measurement of the CO₂ concentration which is necessary to translate the signal of the CropObserver to CO₂ uptake by the crop.

Rapportgegevens

Rapport WPR-712

Projectnummer: 3742198000

DOI nummer: <https://doi.org/10.18174/428601>

Disclaimer

© 2017 Wageningen Plant Research (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Wageningen Research), Postbus 20, 2665 MV Bleiswijk, Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk, T 0317 48 56 06, F 010 522 51 93, E glastuinbouw@wur.nl, www.wur.nl/plant-research. Wageningen Plant Research.

Wageningen University & Research, BU Glastuinbouw aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Adresgegevens

Wageningen University & Research, BU Glastuinbouw

Postbus 20, 2665 ZG Bleiswijk

Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk

T +31 (0)317 48 56 06

F +31 (0)10 522 51 93

Inhoud

	Samenvatting	5
1	Inleiding	7
	1.1 Fotosynthesesensoren	7
	1.2 Doelstelling	8
2	Beschrijving van meet- en monitoringsmethoden	9
	2.1 Teelt en meetopstelling in verschillende kassen	9
	2.2 Metingen van fotosynthese in praktijkkassen	9
	2.3 Gewasfotosynthesemonitor	9
	2.4 Berekeningen van de fotosynthese met het gewasgroeimodel	10
	2.5 CropObserver	11
	2.6 Stomata sensor	11
	2.7 Berekening van gemiddelde afwijking	11
3	Resultaten	13
	3.1 Gerbera	13
	3.1.1 Geschatte gewasfotosynthese	13
	3.1.2 Geschatte verdamping	16
	3.1.3 Metingen van de CropObserver	17
	3.2 Tomaat	19
	3.2.1 Metingen van gasuitwisseling en chlorofyl fluorescentie van enkele bladeren in de praktijk	19
	3.2.1.1 Lichtrespons in een belicht en onbelicht gewas	19
	3.2.1.2 CO ₂ -respons in afhankelijkheid van lichtintensiteit en O ₂ concentratie	21
	3.2.1.3 Ademhaling en stomataire geleidbaarheid	23
	3.2.2 Geschatte gewasfotosynthese op praktijkproef 1	24
	3.2.3 Vergelijking tussen berekende waarden praktijkproef 1 en Wageningen University & Research Glastuinbouw	30
	3.2.4 CropObserver op praktijkproef 1	31
	3.2.5 Stomata sensor op praktijkproef 1	32
	3.2.6 Gewasfotosynthesemonitor in praktijkproef 2	34
4	Discussie	35
	4.1 Gewasfotosynthesemonitor	35
	4.2 CropObserver	36
	4.3 Stomata sensor	37
	4.4 Meting van gasuitwisseling en chlorofyl fluorescentie	37
	4.5 Modelberekening van fotosynthese en groei (INTKAM)	37

5	Aanbevelingen en conclusies	39
5.1	Mogelijkheden om met de CropObserver de gewasfotosynthese te bepalen	39
5.2	Mogelijkheden om met de gewasfotosynthesemonitor de gewasfotosynthese te bepalen	39
5.3	Mogelijkheden om op andere wijzen de gewasfotosynthese te bepalen	40
	Literatuur	41
	Bijlage 1 Gevoeligheidsanalyse van de gewasfotosynthesemonitor	43

Samenvatting

In de glastuinbouw wordt in de wintermaanden veel belicht om jaarrond kwalitatief goede producten te kunnen leveren, waarbij veel energie gebruikt wordt. Om na te gaan of deze energie voor belichting, verwarming of CO₂ effectief ingezet wordt, zou de momentane fotosynthesesnelheid van het gewas gemeten moeten worden. Echter, tot nu toe ontbreekt er nog een goed instrument om de gewasfotosynthese snel en nauwkeurig te monitoren.

Wageningen University & Research, Business Unit Glastuinbouw heeft samen met PhenoVation en PlantDynamics twee methoden onderzocht om de gewasfotosynthese of deelprocessen daarvan te monitoren: de gewasfotosynthesemonitor, die de opname van CO₂ door het gewas door de CO₂ balans van de kas berekent en de CropObserver, die de elektronentransportsnelheid (ETR) met behulp van chlorofyl fluorescentie bepaalt.

De sensoren zijn getest op twee praktijkbedrijven met belichte en onbelichte tomaten, en in een gerbera experiment waarbij belicht werd met LEDs, SON-T en een hybride systeem. Uit de resultaten bleek dat de gewasfotosynthesemonitor niet in staat is om de CO₂ opname van het gewas in de praktijk continu te meten met de gewenste nauwkeurigheid. De gewasfotosynthesemonitor bleek erg gevoelig voor veranderingen in ventilatie (raamstand) die grote verstoringen in de bepaling van de CO₂ opname door het gewas tot gevolg had. Verder is de gewasfotosynthese veel lager dan het verlies aan CO₂ door de ramen, waardoor het niet mogelijk was tot een nauwkeurige bepaling van de gewasfotosynthese te komen. De CropObserver was in staat om de lichtbenutting in de fotosynthese door het gewas snel, nauwkeurig en continu te bepalen. Echter, omdat dat de meting van lichtintensiteit in willekeurige eenheden gebeurt en er nog andere stappen in de fotosynthese van belang zijn, is de CropObserver niet geschikt om de fotosynthese van het gewas (in $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) te bepalen.

Naast de bovengenoemde twee methoden, is ook gekeken naar de bruikbaarheid van twee andere methoden, 1) de Stomata sensor, die de stomataire geleidbaarheid van een gewas met behulp van het gemeten kasklimaat en de gewastemperatuur berekent en 2) INTKAM, een groeiemodel, dat de gewasfotosynthese, -verdamping en -groei op basis van gewasparameters en het kasklimaat berekent. De Stomata sensor registreert afwijkingen in de huidmondjesgeleidbaarheid en is bruikbaar om vroegtijdig afwijkingen te signaleren. Die hebben zich in de teelten die gemonitord zijn niet voorgedaan. De berekeningen die gedaan zijn met de fotosynthesemodule van INTKAM blijken voor wat betreft de orde van grootte goed overeen te stemmen met de gewasfotosynthesemonitor.

Uit bovenstaande blijkt dat het niet eenvoudig is een sensor te ontwikkelen die momentaan een betrouwbaar beeld geeft van de fotosynthese van een gewas. Er zijn twee mogelijke methoden om de fotosynthese van het gewas zo realistisch en nauwkeurig mogelijk te bepalen: 1. Via een fotosynthesemodel (zoals INTKAM) waarmee de gewasfotosynthese berekend kan worden, gekoppeld aan een sensor die de status van het gewas monitort zodat geregistreerd wordt wanneer de reactie van het gewas afwijkt van wat te verwachten zou zijn, of 2. Via de CropObserver, aangevuld met een sensor voor de huidmondjesopening en een meting van tenminste de CO₂ concentratie, waarmee het signaal van de CropObserver vertaald kan worden naar CO₂ opname door het gewas.

Het project is gefinancierd door Kas als Energiebron, het innovatie- en actieprogramma voor energiebesparing en het gebruik van duurzame energie in de glastuinbouw, van het ministerie van Economische Zaken en LTO Glaskracht Nederland.

1 Inleiding

1.1 Fotosynthesesensoren

In de glastuinbouw wordt in de wintermaanden veel belicht om jaarrond producten van een goede kwaliteit te kunnen leveren. Deze belichting levert een grote bijdrage aan het totale energiegebruik in bijvoorbeeld de teelt van tomaten of gerbera. Het optimaal monitoren van gewasprocessen die bepalen of de belichting gedurende de hele dag effectief is, kan bijdragen aan een aanzienlijke besparing op energie. Omdat fotosynthese het basisproces is voor de groei en momentaan reageert op veranderingen in het kasklimaat, is de gewasfotosynthese zeer geschikt als plantproces om te monitoren om op basis daarvan het kasklimaat te sturen. Daarvoor is het echter noodzakelijk om een monitoringsmethode te hebben, die veranderingen in de momentane fotosynthese wel kan aantonen, zonder te gevoelig voor fluctuaties in de inputgegevens te zijn.

Er zijn nog geen goede instrumenten commercieel beschikbaar waarmee een teler van een groot oppervlakte gewas kan monitoren wat de gewasfotosynthese is. In een vorig project (Dieleman *et al.* 2016) zijn twee sensoren (verder) ontwikkeld waarmee de gewasfotosynthese en de efficiëntie van lichtbenutting in de fotosynthese gemeten kunnen worden. Deze zijn getest in kleine onderzoekskassen. Een logische volgende stap was deze sensoren te beproeven op praktijkbedrijven.

De twee sensoren die ontwikkeld zijn, zijn:

1. De gewasfotosynthesemonitor. Dit is een softsensor, die de CO₂ opname van een hele kas berekent. Dat doet deze monitor op basis van de CO₂ balans van een kas. Aan de ene kant is er de aanvoer van CO₂ in de kas, namelijk de CO₂ dosering. Aan de andere zijde is er het verlies van CO₂ door ventilatie, veranderingen in de CO₂ concentratie en de opname voor de gewasfotosynthese. Door de CO₂ dosering en de CO₂ concentratie te meten en het ventilatieverlies te bepalen, kan de gewasfotosynthese berekend worden.
2. De CropObserver. Dit is een sensor die met behulp van de chlorofyl fluorescentie een beeld geeft van de efficiëntie van de fotosynthese van een groot (ca. 9 m²) oppervlakte gewas. Met deze sensor wordt het gewas belicht met korte lichtpulsjes van boven uit de kas. De sensor meet het terugkomende fluorescentiesignaal, en is zo geprogrammeerd dat er op een groot aantal plaatsen in het werkgebied van de sensor wordt gemeten. Na ongeveer vijf minuten is één complete meetcyclus afgerond waarna op de zelfde punten weer een meting wordt verricht. Omdat het snelle metingen zijn, ontstaat er in korte tijd een goed beeld van de fotosynthese van het hele gewas.

Uit het voorgaande project is gebleken dat de CropObserver een betrouwbaar beeld geeft van de efficiëntie waarmee het licht gebruikt wordt. Het voordeel van de CropObserver is dat het een groot oppervlakte gewas meet en op afstand kan meten, zodat het niet in de weg hangt bij gewaswerkzaamheden en eventueel mobiel te maken zou zijn. Het nadeel is dat de lichtintensiteit gemeten wordt via reflectie, en in arbitraire eenheden wordt weergegeven. Ook is het niet mogelijk de intensiteit van licht te meten dat geen vergelijkbaar spectrum heeft als zonlicht (bijvoorbeeld rode LEDs). Dit zou op termijn aangepast kunnen worden.

Uit het voorgaande project bleek verder dat de gewasfotosynthesemonitor in staat is het verloop van de gewasfotosynthese over de dag redelijk in te schatten, uitgaande van de instraling en CO₂ concentratie. Er zitten in dit patroon echter scherpe pieken en dalen die niet te verklaren zijn door veranderingen in instraling of CO₂ concentratie. Wil de gewasfotosynthesemonitor toepassing in de praktijk vinden, dan zal dit zeker nog verbeterd moeten worden.

In dit project worden de gegevens van de gewasfotosynthesemonitor vergeleken met waarden voor de gewasfotosynthese zoals berekend met de fotosynthesemodule van het gewasgroeimodel INTKAM. Verder werd op het praktijkbedrijf waar de sensoren getoetst werden, gerekend met de Stomatasensor. Dit is een softsensor ontwikkeld door Hoogendoorn, die de afgifte van waterdamp uit de huidmondjes (of stomata) kan berekenen. De Stomatasensor gebruikt de gemeten kasomstandigheden en de planttemperatuur en brengt deze samen in een globale energiebalans die geldig is voor enkele m² gewasoppervlak. Hieruit wordt vervolgens een gemiddelde gewasverdamping en huidmondjes geleidbaarheid berekend.

1.2 Doelstelling

Het doel van dit project was het verder ontwikkelen en testen van de gewasfotosynthesesensor en het testen van de CropObserver om deze een stap verder richting de praktijk te brengen. Dit hebben we gedaan in twee gewassen (gerbera en tomaat), in verschillende kassen bij WUR Glastuinbouw (gerbera) en op twee praktijkbedrijven (belichte en onbelichte teelt van tomaat).

In dit project hebben we samen gewerkt met:

- PhenoVation, een spin-off bedrijf van WUR gespecialiseerd in het ontwikkelen van camerasystemen om fluorescentie van planten te meten. Zij hebben de CropObserver gebouwd, en hebben in dit project een verbeterde versie van de CropObserver geïmplementeerd, zowel in hardware als in software.
- PlantDynamics, een bedrijf met veel ervaring met het meten van fotosynthese en fluorescentie en het vertalen van deze meetresultaten naar aanbevelingen ten aanzien van de regeling van het kasklimaat. Zij hebben in dit project fotosynthese- en fluorescentiemetingen gedaan op de twee praktijkbedrijven tomaat.
- Hoogendoorn, de ontwikkelaar van de Stomata sensor, die de rekenregels om de huidmondjesgeleidbaarheid te berekenen operationeel heeft gemaakt op de betreffende bedrijven en de resultaten beschikbaar heeft gesteld.

2 Beschrijving van meet- en monitoringsmethoden

2.1 Teelt en meetopstelling in verschillende kassen

Gerbera

- *Kassen 8.01-8.03, WUR Glastuinbouw in Bleiswijk*: Het betreft een proef met meerdere cultivars onder drie verschillende belichtingsstrategieën (respectievelijk LED, SON-T en hybride (LED+SON-T), allen 90-100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Alle kassen hebben een bruto oppervlak van 144 m² en zijn ingericht met zowel een verduisteringsdoek als een energiescherm. Verder zijn er in alle kassen ventilatoren (VentilationJets in combinatie met nivolutoren) geïnstalleerd, die droge en koude lucht van boven de schermdoeken naar de kas verplaatsen. Zie voor een uitgebreide beschrijving van deze proef Dueck *et al.* 2015.

Tomaat

- *Praktijkproef 1 (onbelichte teelt)*: Teelt van cocktail tomaten (vruchtgewicht 90-120 g, ras: Audience), planting op 16 december 2015. De oppervlakte van het kascompartiment was 6000 m², de kas heeft dubbel glas.
- *Praktijkproef 2 (belichte teelt)*: Teelt van cherry tomaten met 185 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ belichting en planting begin juli 2014. In het bedrijf werden RV en CO₂ sensoren geplaatst, en verder werd gebruik gemaakt van op de bedrijf aanwezige meetapparatuur, die via de klimaatcomputer op 5 minuutinterval zijn gelogd.
- *WUR Glastuinbouw in Bleiswijk*: Teelt van een cocktail tomaat (vruchtgewicht 35-40 g, ras Brioso). Geplant op 12 oktober 2015 in een onderzoekskas van 144 m². Er werd open gewasstructuur gerealiseerd om de assimilatenbeschikbaarheid voor de vruchten te vergroten.

2.2 Metingen van fotosynthese in praktijkkassen

In beide praktijkproeven werden in januari en maart 2015 uitgebreide fotosynthese metingen uitgevoerd door Plant Dynamics. De metingen werden gedaan met de Li-6400 (draagbaar fotosynthese meetsysteem). Het doel van deze metingen is het in kaart brengen van het verticale profiel van de fotosynthese in tomaat, waarbij rekening wordt gehouden met bladleeftijd en positie van het blad in het gewas. Om een volledig beeld van de fotosynthese eigenschappen te krijgen zijn de metingen gericht op:

- Het bepalen van de fotosynthese response (CO₂ opname van het blad) op licht en CO₂ (metingen werden gedaan bij een oplopende reeks van licht en CO₂ concentraties).
- Bepaling van de ademhaling (dissimilatie) via donkermeting en met 2% zuurstof over 5 bladlagen in het gewas.
- Kwantificeren van de fotorespiratie (= competitie tussen O₂ en CO₂ bij het enzym Rubisco, die verantwoordelijk is voor de binding van CO₂ tot suikers) op verschillende hoogtes in het gewas d.m.v. metingen met 2% zuurstof en hoog/laag CO₂.

2.3 Gewasfotosynthesemonitor

De gewasfotosynthesemonitor berust op de massabalans van een kas voor CO₂. Aan de ene kant wordt de CO₂ balans beïnvloed door gewasprocessen (vermindering CO₂ concentratie door assimilatie, verhoging door ademhaling), aan de andere kant door technische processen in het kas (verhoging door CO₂ dosering, verlies (of verhoging) door ventilatie). Het basisprincipe van de gewasfotosynthesemonitor is de simultane oplossing van drie balansen. De drie onbekenden (ventilatie, verdamping en CO₂-opname) worden berekend met de volgende drie vergelijkingen:

1. Warmte-input – warmteverlies door kasdek – energieverlies door ventilatie = verandering energie-inhoud.
2. CO₂-dosering – CO₂-assimilatie – CO₂-verlies door ventilatie = verandering CO₂-concentratie.
3. Verdamping – vochtverlies door ventilatie = verandering absolute luchtvochtigheid.

Vergelijking 1 (in $W m^{-2}$)

- **Warmte-input:** warmte van de buizen, de lampen en de globale straling. Bij globale straling is rekening gehouden met de (beperkte) transmissie van licht door het kasdek en de schermen, afhankelijk van de schermpositie en type schermdoek.
- **Warmteverlies door het kasdek:** berekend door een vaste k-waarde, die wordt beïnvloed door de schermstand. De k-waarde vermenigvuldigd met het verschil tussen kastemperatuur en buitentemperatuur is het (convectieve) warmteverlies¹.
- **Energieverlies door ventilatie:** wordt berekend als de (onbekende) ventilatie, vermenigvuldigd met het enthalpieverschil tussen kas- en buitenlucht.
- **Verandering energie-inhoud:** wordt berekend door op twee opeenvolgende meetmomenten de enthalpie van de kaslucht te vergelijken. Hierbij wordt ook rekening gehouden met de warmtebuffering van de kas (constructie en inrichting), het gewas en de bodem (warmtecapaciteit van $40000 J m^{-2} K^{-1}$).

Vergelijking 2 (in $mg m^{-2} s^{-1}$)

- **CO₂-dosing:** wordt iedere 5 minuten geregistreerd.
- **CO₂-opname:** een van de drie onbekenden.
- **CO₂-verlies:** berekend door het verschil in CO₂-concentratie (binnen-buiten), vermenigvuldigd met de ventilatie.
- **Verandering CO₂-concentratie:** berekend door op twee opeenvolgende meetmomenten de CO₂-concentratie van de kaslucht te vergelijken.

Vergelijking 3 (in $g m^{-2} s^{-1}$)

- **Verdamping:** een van de drie onbekenden.
- **Dampverlies door ventilatie:** berekend door het verschil in absolute luchtvochtigheid, vermenigvuldigd met de ventilatie.
- **Verandering absolute luchtvochtigheid:** berekend door op twee opeenvolgende meetmomenten de absolute luchtvochtigheid van de kaslucht te vergelijken.

2.4 Berekeningen van de fotosynthese met het gewasgroeimodel

De fotosynthesesnelheid wordt in het INTKAM-model berekend op basis van fotosynthetisch actieve straling (photosynthetically active radiation, PAR) in de kas, de CO₂ concentratie in de lucht, de luchttemperatuur, en het dampdrukdeficit (Marcelis *et al.* 2000). De fotosynthesesnelheid wordt niet voor het gehele bladpakket in een keer als geheel berekend, maar voor een aantal representatieve punten die over de gewasdiepte zijn verdeeld. Daarvoor is het nodig dat het lichtprofiel door de gewasdiepte heen bekend is. De lichtonderschepping wordt apart berekend voor direct en diffuus PAR, waarbij een gelijkmatige bladstructuur wordt verondersteld met een sferische bladhoekverdeling (Goudriaan & Van Laar, 1994). Dit leidt bijvoorbeeld tot een meer homogene lichtverdeling voor diffuse straling dan voor directe straling. De bruto bladfotosynthesesnelheid (dus de snelheid op een bepaald punt in het gewas) wordt berekend met het biochemische Farquhar-model (Farquhar *et al.* 1980; Farquhar & Von Caemmerer, 1982) op 5 gewasdieptes. Deze berekening vindt met een kleine rekenstap plaats (5 minuten) zodat er optimaal rekening wordt gehouden met de variatie in omstandigheden, met name straling en CO₂ concentratie. Het effect van het dampdrukdeficit komt tot uitdrukking via de huidmondjesopening, waarbij dit wordt gekoppeld aan de waterbalans van het model. Met behulp van een zgn. Gaussische integratiemethode (Goudriaan, 1986) worden de bladfotosynthesesnelheden iedere rekenstap over de gewasdiepte geïntegreerd tot een momentane bruto gewasfotosynthesesnelheid. Deze momentane bruto gewasfotosynthesesnelheden worden vervolgens over de dag geïntegreerd tot een dagelijkse bruto gewasfotosynthesesnelheid. Als laatste stap wordt de netto fotosynthesesnelheid berekend als het verschil tussen de bruto fotosynthesesnelheid en de onderhoudsademhaling, die wordt eerst berekend als functie van het drooggewicht van de organen en de luchttemperatuur (Spitters *et al.* 1989). De onderhoudsademhaling bedraagt ongeveer 5-10% van de totale assimilatenbeschikbaarheid.

¹ Voor gerbera is dit op de volgende wijze gedaan: de kasdektemperatuur is berekend op basis van de buitentemperatuur, de temperatuur boven het scherm, de uitstraling en de windsnelheid. De uitstraling is dan berekend op basis van het verschil tussen kastemperatuur en kasdektemperatuur, rekening houdend met de schermstand.

Door middel van het gekalibreerde fotosynthesemodel (op basis van de fotosynthesemetingen in het tomatenexperiment, voorjaar 2014) is vervolgens de momentane gewasfotosynthese berekend. Daarvoor werd eerst de lichtonderschepping per bladlaag berekend, met behulp van het gemeten oppervlakte per blad, en de lichtuitdoving met de LAI-diepte volgens de Lambert-Beer formule. Vervolgens diende de per bladlaag berekende lichtuitdoving als input voor de fotosyntheseberekening.

Deze fotosynthese is vermenigvuldigd met het gemeten oppervlak per bladlaag en gesommeerd voor de bladlagen om tot een gewasfotosynthese per m² kasoppervlak te komen.

2.5 CropObserver

De CropObserver is een systeem dat volledig zelfstandig kan meten, meestal vanaf de tralie waaraan de monitor eenvoudig gemonteerd kan worden. Een laserstraal wordt op het gewas gericht via een spiegelsysteem dat bestuurd wordt door de ingebouwde computer. Op deze wijze kan steeds een andere positie van het gewas worden gemeten over een oppervlak van ca. 3 x 3 m² afhankelijk van de afstand tussen CropObserver en het gewas. Per positie wordt gemeten hoe efficiënt licht gebruikt wordt. Ook wordt de lichtintensiteit geschat die op het gewas valt door de reflectie van het gewas te meten. De CropObserver neemt voor de conversie van reflectie naar lichtintensiteit aan dat het spectrum van het licht dat op het gewas valt ongeveer overeen komt met het zonlicht. Dat houdt in dat de lichtintensiteit niet absoluut is, maar in arbitraire eenheden weergegeven wordt. De lichtintensiteit van een lichtbron die niet vergelijkbaar is met zonlicht (bijvoorbeeld LED licht) kan hiermee niet goed gemeten worden. Uit de metingen van lichtintensiteit en efficiëntie van het gebruik van licht in de fotosynthese wordt de ETR (elektronentransportsnelheid, ETR, ook in arbitraire eenheden) berekend. Een typische meting bestaat uit 900 metingen in een matrix van 30 x 30 posities. Bij het starten van de meting worden eerst alle 900 meetposities gemeten en alleen posities die voldoende chlorofylfluorescentie signaal geven worden vervolgens in de tijd doorgemeten. De posities die niet worden gemeten, worden dus overgeslagen, want dit zijn bijvoorbeeld het gangpad of de verwarmingsbuizen. Planten kunnen bewegen in de tijd en daarom worden na 6 uur door de CropObserver alle 900 posities opnieuw doorgemeten en gecontroleerd op fluorescentie signaal. De CropObserver kan volledig zelfstandig meten en wordt bediend en uitgelezen via een WiFi verbinding.

2.6 Stomata sensor

De stomata sensor berekent de openingsstand van huidmondjes (of stomata) op basis van kasklimaat (licht, temperatuur en vochtdeficiet) en planttemperatuur (gemeten door een infraroodcamera) op gewasniveau. Dit omdat het monitoren van huidmondjes op een deel van een blad technisch lastig uitvoerbaar is, en bovendien weinig representatief is voor het gewas als geheel. Huidmondjes reageren heel lokaal op de waterstatus in een bepaald deel van de plant en de heersende omstandigheden in de kas. De stomata sensor is een soft sensor die de kasklimaatdata en de planttemperatuur gebruikt in de berekening van een globale energiebalans die geldig is voor enkele m² gewasoppervlak. Hieruit wordt vervolgens een gemiddelde gewasverdamping en huidmondjes geleidbaarheid berekend (Voogt en Van Weel, 2008).

2.7 Berekening van gemiddelde afwijking

Om te kunnen bepalen hoe nauwkeurig de gewasfotosynthesemonitor de netto fotosynthese over de dag bepaalt, werden de data met de berekeningen van netto fotosynthese door het groeiemodel (INTKAM) vergeleken. Daarvoor werd de gemiddelde afwijking (of Root Mean Squared Error, RMSE) berekend,

$$RMSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{(y_i - x_i)^2} \quad (\text{Eq. 1})$$

waar n is het totale aantal data, y_i is de door het gewasfotosynthesemonitor geschatte waarde voor netto fotosynthese voor tijd i, en x_i is de door het groeiemodel geschatte waarde voor netto fotosynthese voor tijd i. Op die manier was het mogelijk de prestatie van de gewasfotosynthesemonitor over gewassen en perioden te vergelijken.

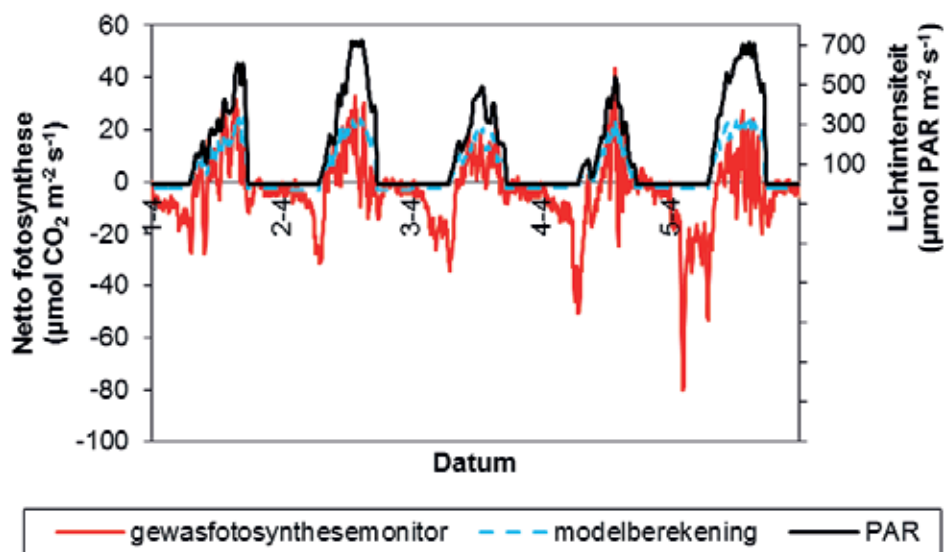
3 Resultaten

3.1 Gerbera

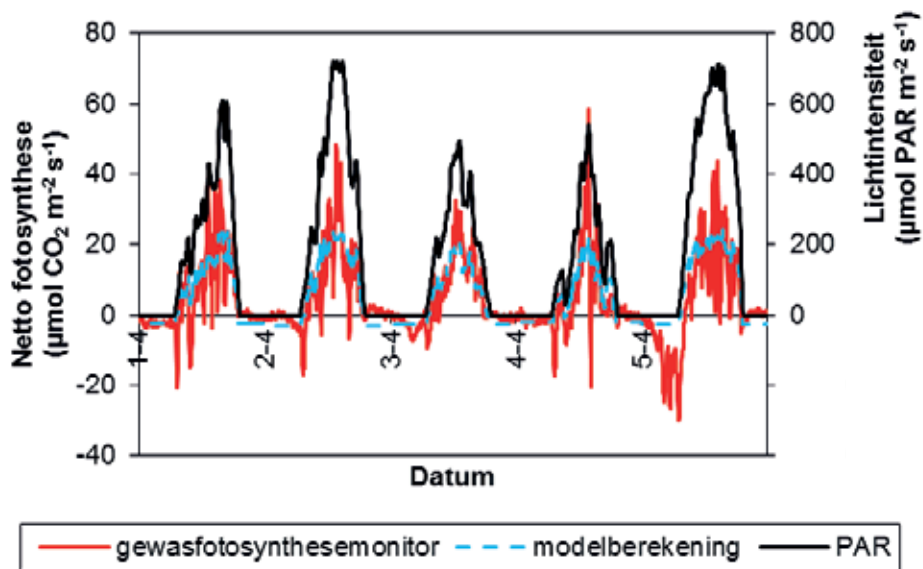
3.1.1 Geschatte gewasfotosynthese

De gewasfotosynthesesnelheid van gerbera geteeld bij drie klimaatstrategieën bij WUR Glastuinbouw in Bleiswijk werd in de periode 25 maart tot 13 april 2015 geschat door de gewasfotosynthesemonitor, door een op gerbera toegepast groeimodel (INTKAM) en door de CropObserver (zie paragraaf 3.3). Schommelingen van de 5 minuten inputwaarden werden voor de berekeningen van de gewasfotosynthesemonitor afgevlakt door een voortschrijvend gemiddelde van 30 minuten te berekenen.

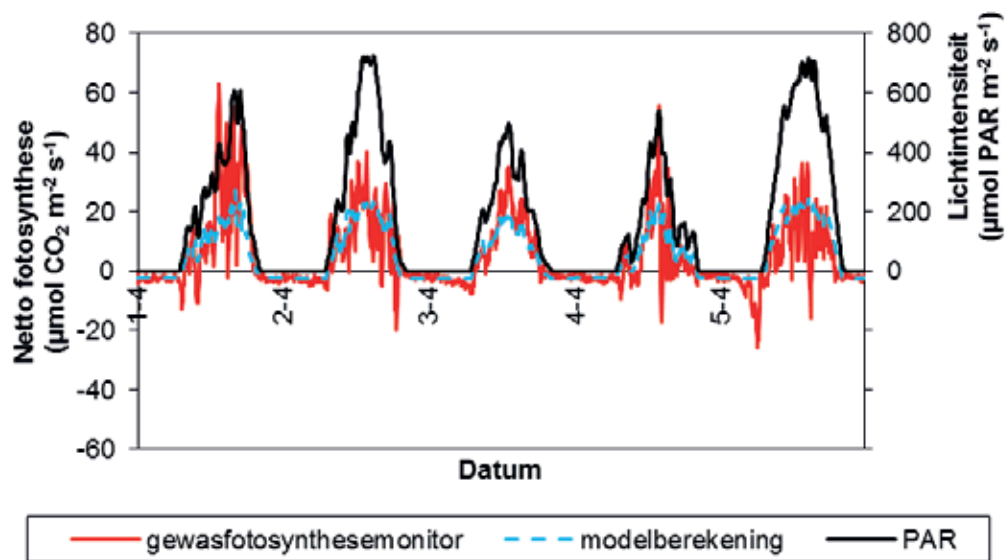
De gewasfotosynthese bepaald met de gewasfotosynthesemonitor, volgde door de dag heen de lichtintensiteit redelijk goed, maar liet 's nachts soms grote verliezen zien, die door de respiratie van het gewas niet te verklaren zijn (Figuren 3.1-3.3). Deze fluctuaties zijn mogelijk te verklaren met een afwijking van het ventilatieverlies in combinatie met een groot verschil in CO₂-concentratie tussen binnen en buiten, doordat de concentratie in de nacht hoog kan oplopen. Verder was het opvallend dat het gewasfotosynthesemonitor de netto fotosynthesesnelheid in kas 8.01 duidelijk lager schatte dan in kassen 8.02 en 8.03, terwijl de lichtintensiteit en de modelberekeningen in alle kassen op elkaar lijken (Figuren 3.4-3.6). Kas 8.01 heeft meer gevelwanden aan de corridor dan kassen 8.02 en 8.03. Een mogelijke verklaring voor de onderschatting van fotosynthese in kas 8.01 is dan ook dat de gewasfotosynthesemonitor in deze kasafdeling het warmteverlies via de gevel heeft onderschat en daardoor met een te hoge ventilatie rekende.



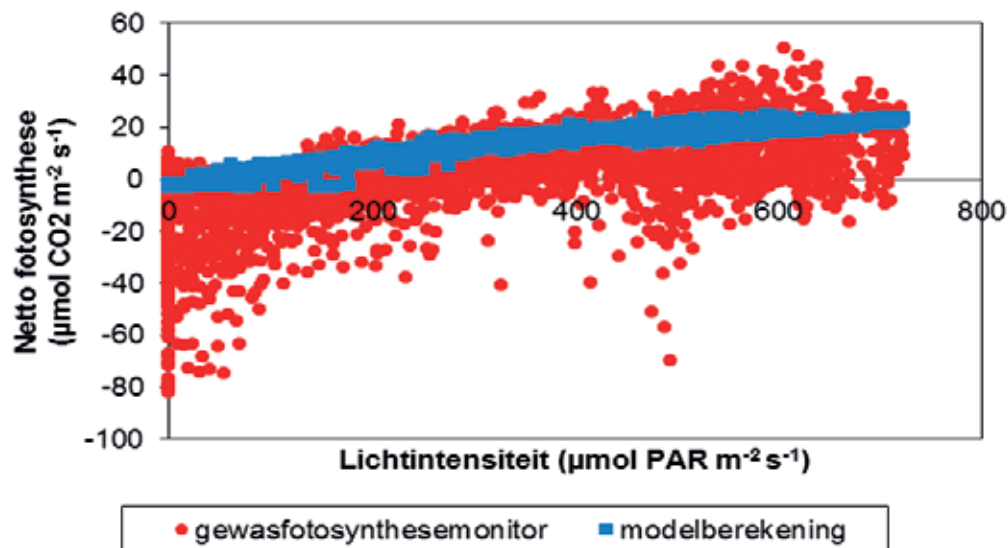
Figuur 3.1 Verloop van lichtintensiteit (zwarte lijn) en gewasfotosynthese over meerdere dagen in kas 8.01. Gewasfotosynthese was geschat door de gewasfotosynthesemonitor (rode lijn) of door modelberekeningen met INTKAM (blauwe lijn).



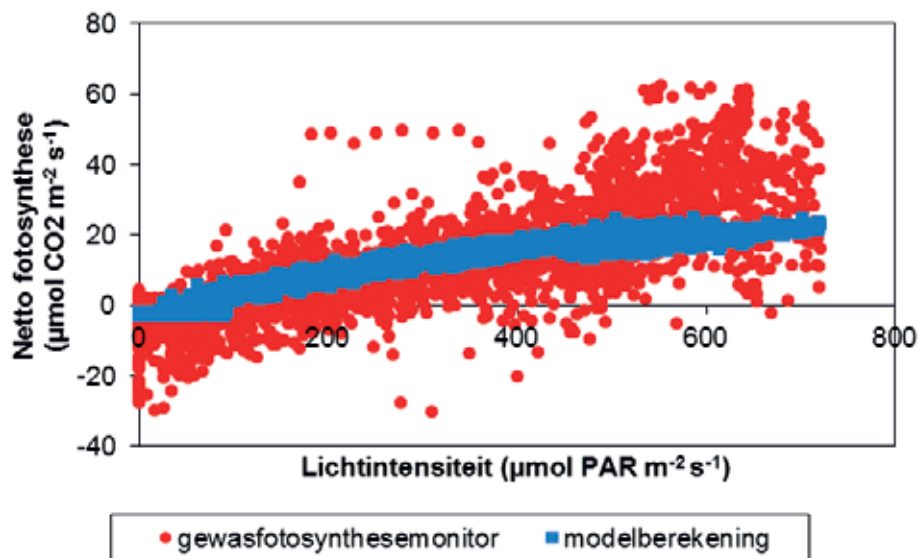
Figuur 3.2 Verloop van lichtintensiteit en gewasfotosynthese over meerdere dagen in kas 8.02.



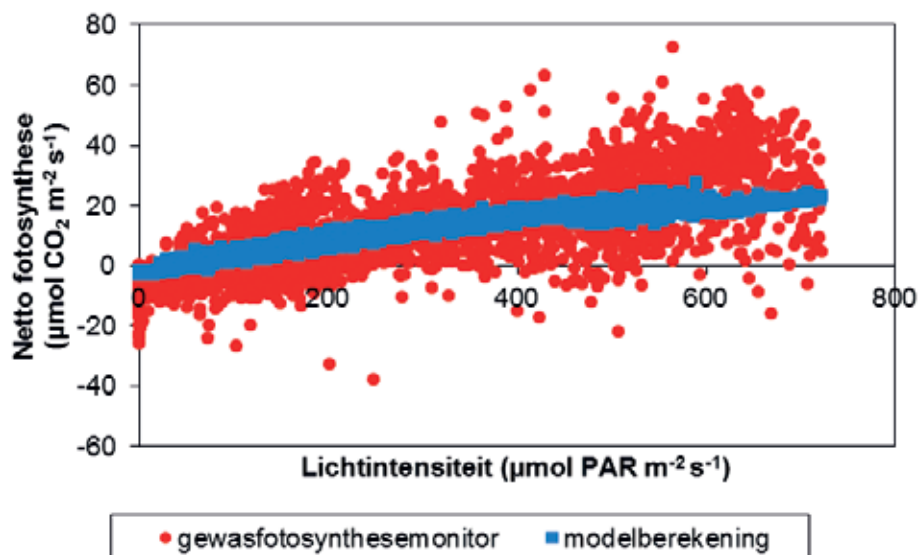
Figuur 3.3 Verloop van lichtintensiteit en netto gewasfotosynthese over meerdere dagen in kas 8.03.



Figuur 3.4 Verhouding van lichtintensiteit en netto fotosynthese in kas 8.01. Gewasfotosynthese was geschat door de gewasfotosynthesemonitor (rode kringen) of door INTKAM (blauwe vierkanten).



Figuur 3.5 Verhouding van lichtintensiteit en netto fotosynthese in kas 8.02.

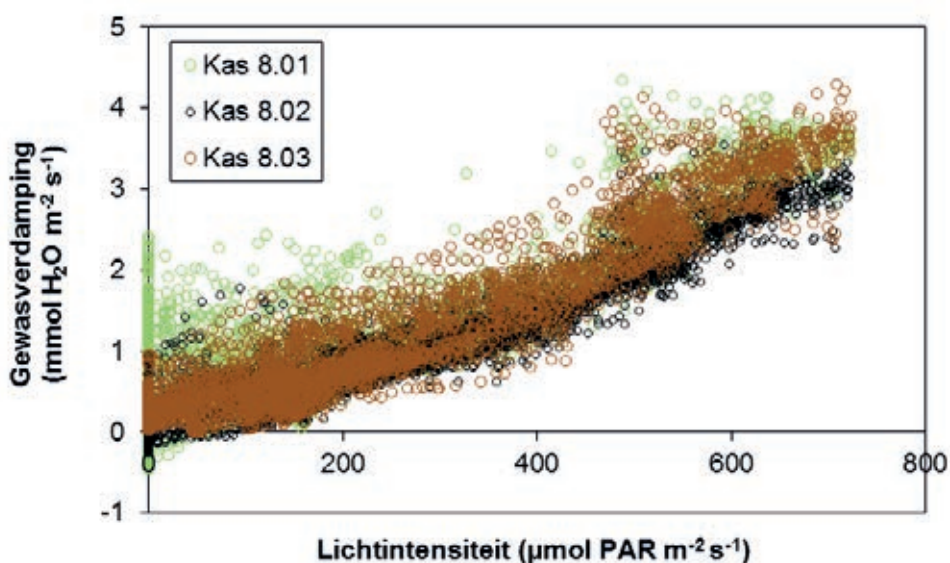


Figuur 3.6 Verhouding van lichtintensiteit en netto fotosynthese in kas 8.03

De gemiddelde afwijking tussen de twee datasets (gewasfotosynthesemonitor en modelberekeningen) was $10.0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ voor kas 8.01, $4.8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ voor kas 8.02 en $4.7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ voor kas 8.03 (5700 datapunten voor elk kas). Deze afwijking is weergegeven in de eenheid van meting zelf en geeft dus de absolute 'afstand' tussen beide manieren van schatting aan. Ook hier is duidelijk dat de schatting van netto fotosynthese door de gewasfotosynthesemonitor minder precies was in kas 8.01 dan in kassen 8.02 en 8.03, maar de ordes van grootte stemden voor beide manieren van schatting redelijk goed overeen.

3.1.2 Geschatte verdamping

De verdamping van het gewas, geschat door de gewasfotosynthesemonitor, volgde de lichtintensiteit redelijk goed in alle kassen (Figuur 3.7). In kas 8.01 ligt de geschatte verdamping iets hoger dan de andere kassen, mogelijk door een te hoog berekend ventilatievoud. Het is te zien dat de gewasverdamping stijgt met de lichtintensiteit.



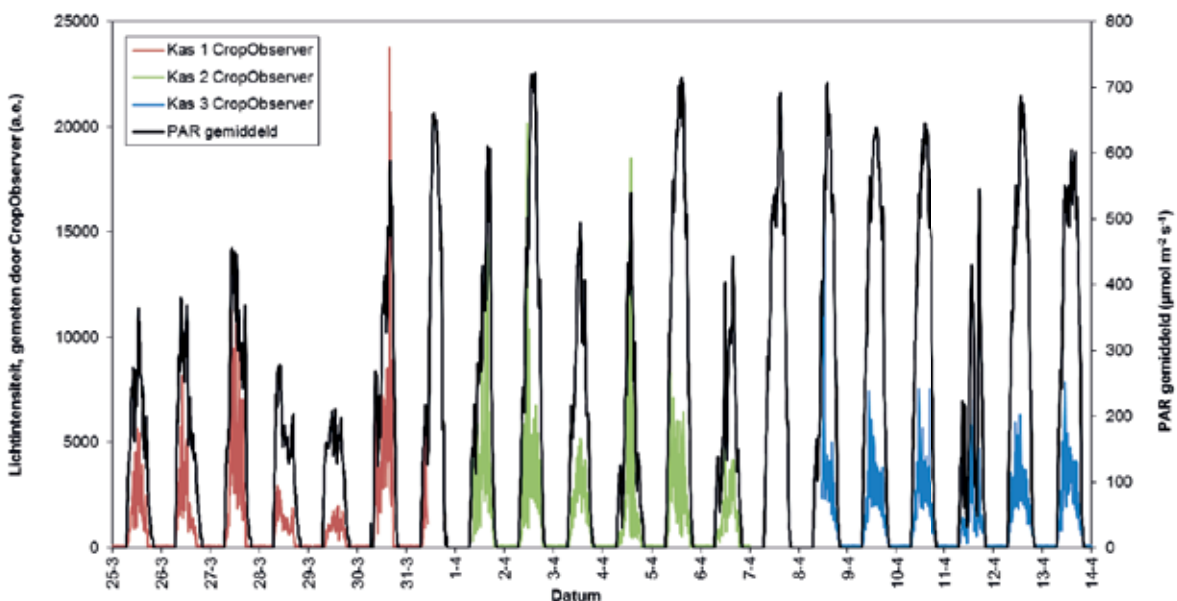
Figuur 3.7 Verhouding van lichtintensiteit en gewasverdamping, geschat door de fotosynthesemonitor, voor de drie kassen.

3.1.3 Metingen van de CropObserver

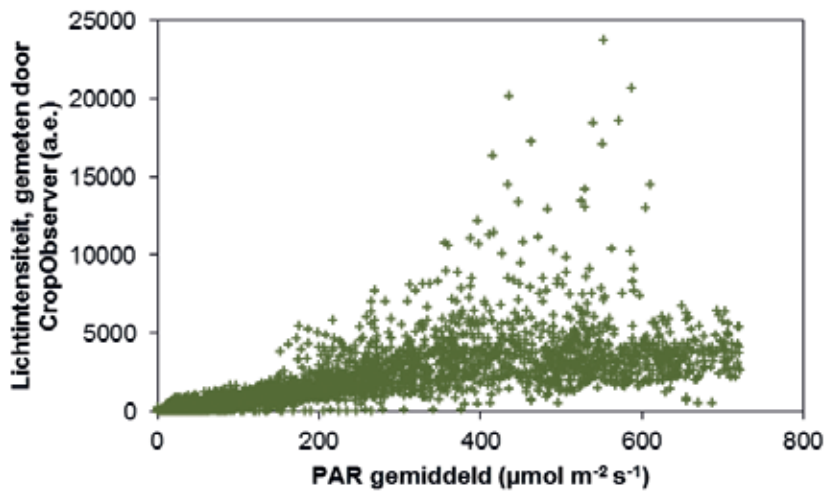
De CropObserver was in de periode 25 maart tot 13 april 2015 in drie kassen van Wageningen UR Glastuinbouw (Bleiswijk) geïnstalleerd. Hij werd in die tijd twee keer verplaatst, zodat hij in elk kas ongeveer een week kon meten: 25-31 maart in kas 8.01, 1-7 april in kas 8.02 en 8-13 april in kas 8.03. De CropObserver meet zelf de lichtintensiteit op de plek waar hij ook de metingen van chlorofylfluorescentie doet.

Wanneer de lichtintensiteit gemeten door de CropObserver vergeleken wordt met de lichtintensiteit in de kas (Figuren 3.8 en 3.9) blijkt dat deze verschillen vertonen. Zo is er op 27 maart wel hetzelfde patroon te zien, maar op 28 en 29 maart was de door de CropObserver gemeten lichtintensiteit relatief veel lager. Een mogelijke verklaring zou kunnen zijn dat, afhankelijk van de richting van invallend licht, de meting van de CropObserver beïnvloedt wordt door schaduw in het gewas, geworpen door kasconstructie, delen van het gewas en de CropObserver zelf. Verder is het mogelijk dat de reflectie van het gewas geen betrouwbare basis is voor de schatting van lichtintensiteit. Wat dan ook de verklaring voor het verschil in lichtintensiteiten is, het is duidelijk dat een vergelijking van buiten de kas gemeten PAR (vermenigvuldigd met een factor voor de lichttransmissie van de kas, plus de instraling van de lampen) en lokaal gemeten ETR niet juist is. De verhouding van ETR en lichtintensiteit op dezelfde plekken van meting was lineair (Figuur 3.10), dus is met een hogere lichtintensiteit in het gewas een hogere ETR en fotosynthesesnelheid te verwachten.

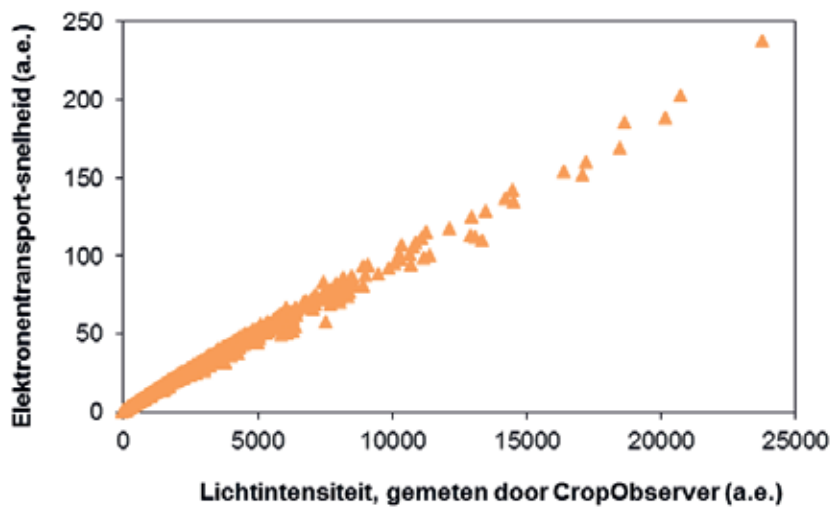
De CropObserver meet het verloop van F_v/F_m – dit is een indicator van de efficiëntie waarmee het licht gebruikt wordt in de fotosynthese, en voor de stresstoestand van het gewas. In gezonde, donker adapterde bladeren is de waarde van F_v/F_m bij 0.80-0.82. Het is te zien dat het gewas in alle drie kassen dit niveau inderdaad bereikt, terwijl F_v/F_m tijdens de dag, afhankelijk van de lichtintensiteit, daalde (Figuur 3.11). Vanuit die getallen kan dus geconcludeerd worden dat de gewassen tijdens de duur van de metingen niet gestrest en gezond waren.



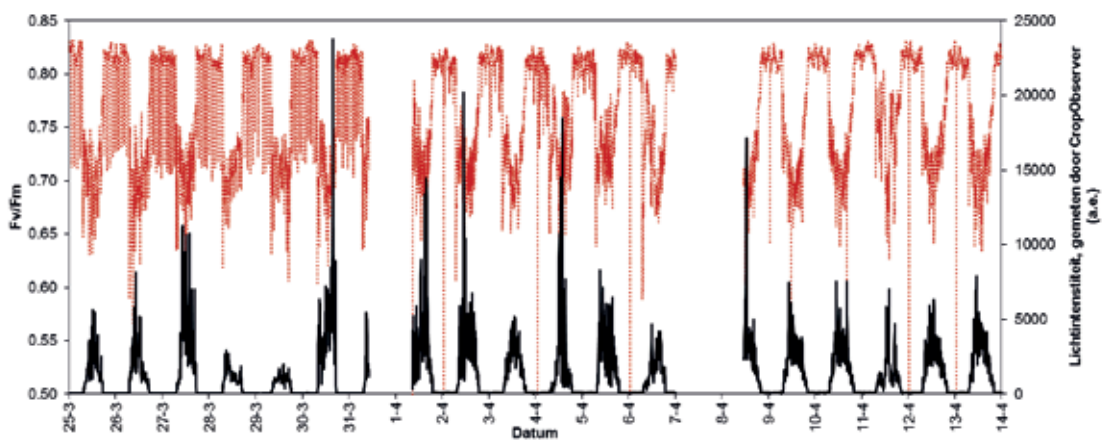
Figuur 3.8 Verloop van de lichtintensiteit in drie kassen. De lichtintensiteit werd gemeten door de CropObserver, of buiten alle kassen door een puntsensor (globale straling), en werd dan apart berekend voor de drie kassen (PAR). Omdat de berekende PAR niet sterk verschilde tussen kassen is het hier als gemiddelde getal weergegeven.



Figuur 3.9 Verhouding tussen PAR in kassen en lichtintensiteit gemeten door de CropObserver. Getallen zijn dezelfde als in Figuur 3.8.



Figuur 3.10 Verhouding van lichtintensiteit en elektrontransport-snelheid in de drie kassen; beide parameters zijn gemeten door de CropObserver.



Figuur 3.11 Verloop van F_v/F_m (rood) en lichtintensiteit (zwart) in de drie kassen; beide parameters zijn gemeten door de CropObserver.

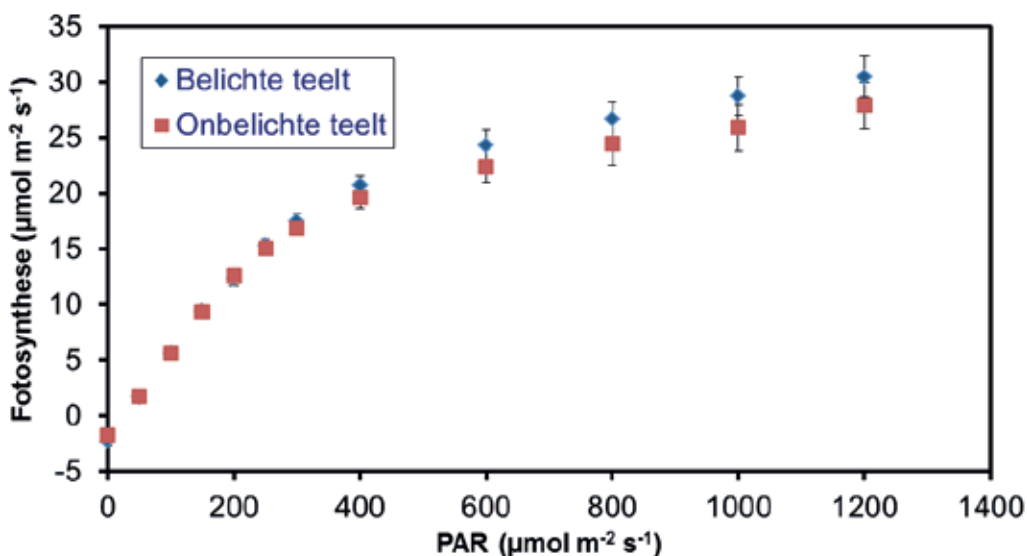
3.2 Tomaat

3.2.1 Metingen van gasuitwisseling en chlorofyl fluorescentie van enkele bladeren in de praktijk

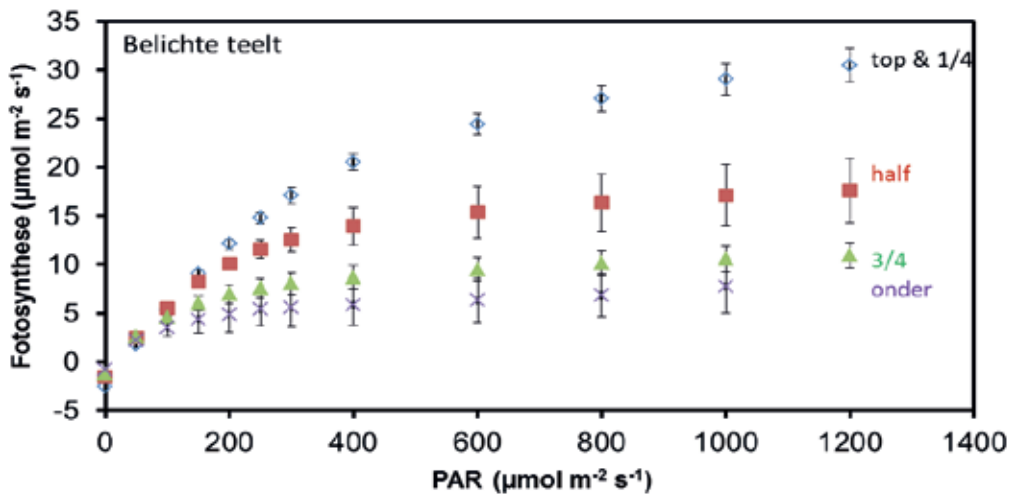
De fotosynthese, ademhaling en stomataire geleidbaarheid van enkele bladeren werd in twee tomatengewassen, in onbelichte (praktijkproef 1, gemeten in maart 2015) en belichte teelt (praktijkproef 2, gemeten in januari 2015), door Plant Dynamics gemeten.

3.2.1.1 Lichtrespons in een belicht en onbelicht gewas

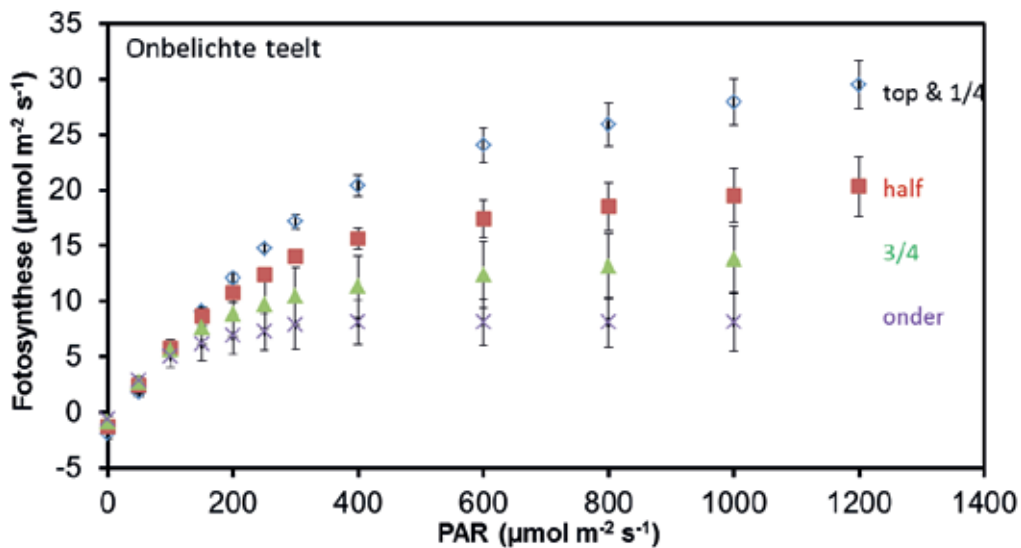
De lichtrespons werd gemeten bij een CO₂ concentratie van 700 ppm. Bij lage lichtintensiteiten (tussen 0 en 300 $\mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$) was de lichtrespons van de fotosynthesesnelheid in de topbladeren van beide gewassen hetzelfde (Figuur 3.12). Bij hogere lichtintensiteiten was er een tendens naar een hogere fotosynthese snelheid in de belichte teelt. De lichtrespons van verschillende bladlagen in de belichte en onbelichte teelt nam met toenemende afstand van de top in beide gevallen af (Figuren 3.13, 3.14). De elektronentransport-snelheid, gemeten met de CropObserver op dezelfde moment als de fotosynthesesnelheid, liet voor alle metingen (dus alle bladlagen, lichtintensiteiten en belichtingsstrategieën) een lineaire verhouding met de fotosynthesesnelheid zien (Figuren 3.15, 3.16): in beide praktijkproeven was $R^2=0.99$ voor een lineaire regressie, en de verhouding was 5.2 mol elektronen per mol vastgelegd CO₂.



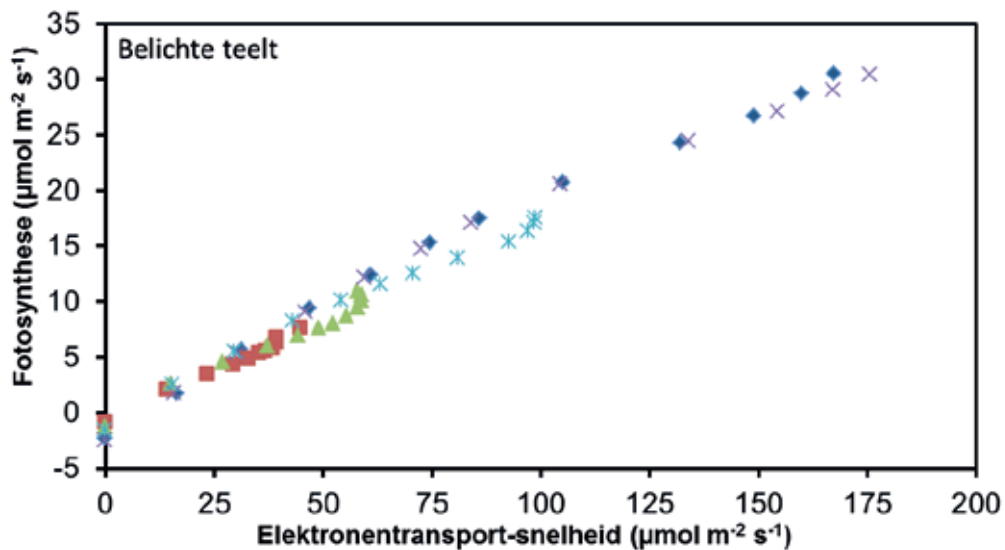
Figuur 3.12 Netto fotosynthese in het topblad, gemeten bij verschillende lichtintensiteiten in een belicht en onbelicht gewas.



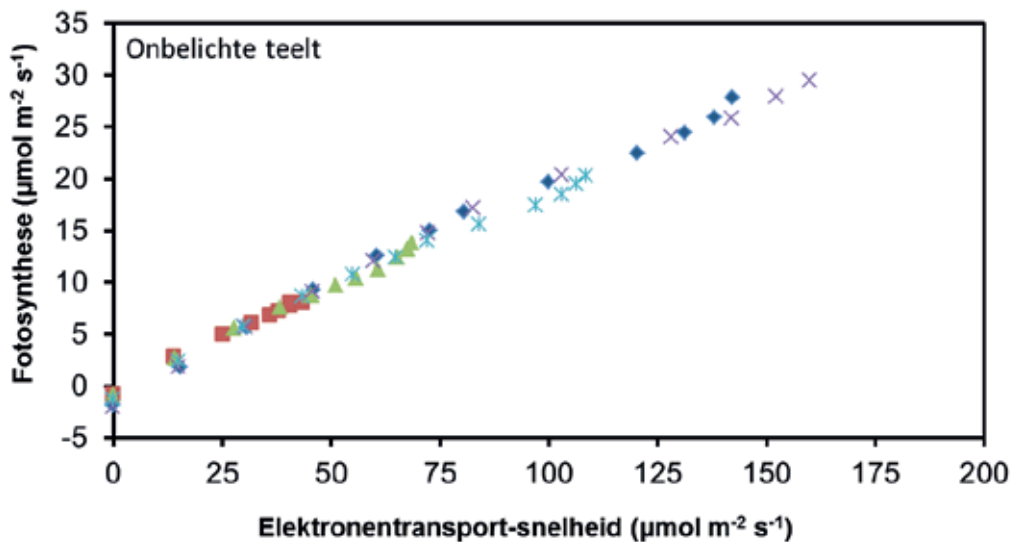
Figuur 3.13 Respons van de fotosynthese op lichtintensiteit in verschillende bladlagen in een belicht gewas. Top&1/4 is de bovenste bladlaag in het gewas, half is halverwege het gewas en 3/4 en onder zijn de onderste bladlagen.



Figuur 3.14 Respons van de fotosynthese op lichtintensiteit in verschillende bladlagen in een onbelicht gewas. Top&1/4 is de bovenste bladlaag in het gewas, half is halverwege het gewas en 3/4 en onder zijn de onderste bladlagen.



Figuur 3.15 Verhouding tussen de fotosynthese en de elektronentransport-snelheid in een belicht gewas. Voor de legenda: zie figuren 3.12-3.14.

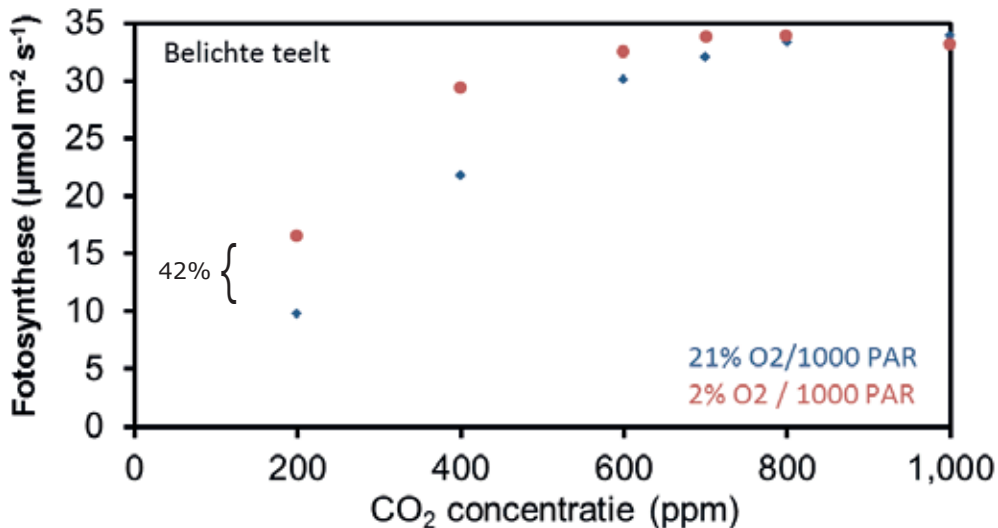


Figuur 3.16 Verhouding tussen de fotosynthese en de elektronentransport-snelheid in een onbelicht gewas. Voor de legenda: zie figuren 3.12-3.14.

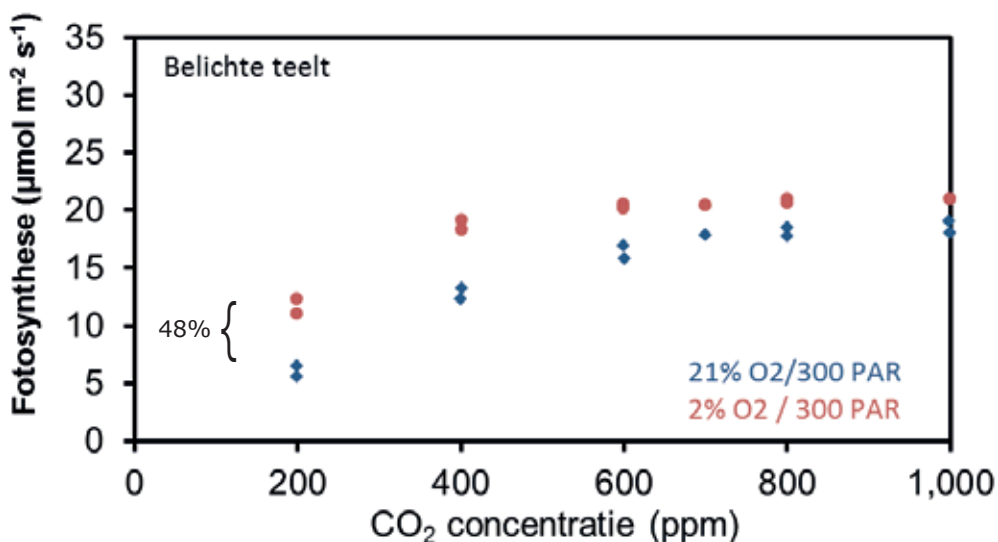
3.2.1.2 CO₂-respons in afhankelijkheid van lichtintensiteit en O₂ concentratie

De CO₂-respons van de fotosynthese werd bij een lage (300 µmol PAR m⁻² s⁻¹) en een hoge lichtintensiteit (1000 µmol PAR m⁻² s⁻¹) gemeten. Verder werd de fotosynthese bij normaal (21%) en laag (2%) zuurstof gemeten, om de fotorespiratie in afhankelijkheid van de CO₂ concentratie te bepalen. Bij hoog licht was er een grotere toename van de fotosynthese met een toename in CO₂ concentratie te zien (Figuren 3.17-3.20). Dat komt daardoor dat de fotosynthese bij laag licht dubbel beperkt is (door licht en CO₂), terwijl het bij hoog licht alleen door CO₂ beperkt wordt.

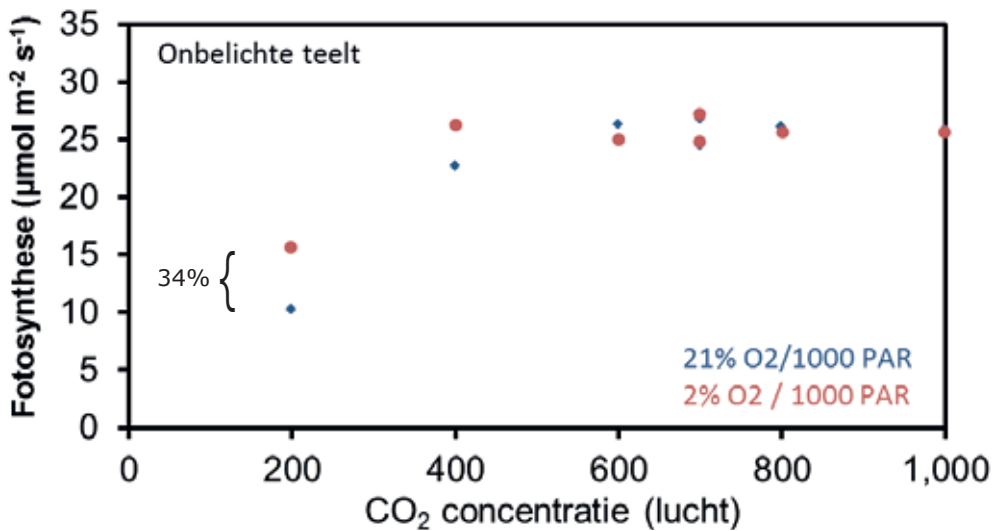
Verder was het opvallend dat het verschil tussen fotosynthese bij normaal en laag zuurstof met toenemende CO₂ concentratie kleiner werd: bij 1000 ppm CO₂ en hoog licht was er geen verschil meer te zien tussen fotosynthese bij 21 en bij 2% zuurstof (Figuren 3.17-3.20). De verklaring hiervoor is dat de snelheid van de fotorespiratie afhankelijk is van de zuurstof- en van de CO₂-concentratie: beide moleculen concurreren om opname door het enzym Rubisco. Als de zuurstofconcentratie laag of de CO₂-concentratie hoog is, is de katalyse van zuurstof (en daarmee de fotorespiratie) laag. Om de snelheid van de fotorespiratie te bepalen, kan dus het best een lage CO₂ concentratie gebruikt worden. Dat is in de volgende serie metingen bij 200 ppm CO₂ gedaan. Uit deze analyse blijkt dat de fotorespiratie in het belicht gewas iets hoger (42-48%, Figuren 3.17, 3.18) was dan in het onbelicht gewas (34-36%, Figuren 3.19, 3.20). Het is niet duidelijk waardoor dit verschil komt.



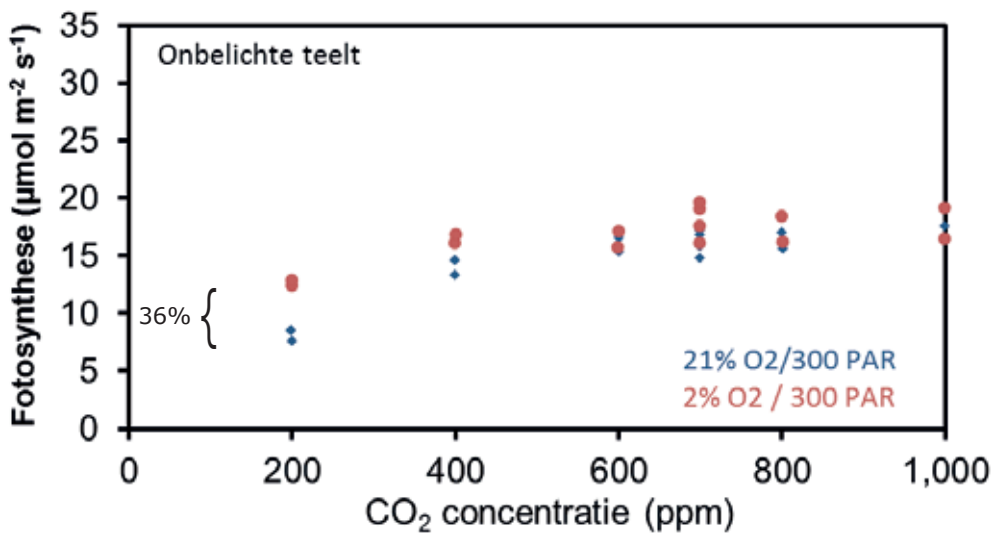
Figuur 3.17 CO₂ respons van de fotosynthese in een belicht gewas bij hoog licht (1000 μmol PAR m⁻² s⁻¹), en bij hoog (21%) en laag (2%) zuurstof. De nummer tussen datapunten bij 200 ppm CO₂ geeft het verschil tussen 21 en 2% zuurstof als een schatting van de fotorespiratie aan.



Figuur 3.18 CO₂ respons van de fotosynthese in een belicht gewas bij laag licht (300 μmol PAR m⁻² s⁻¹), en bij hoog (21%) en laag (2%) zuurstof.



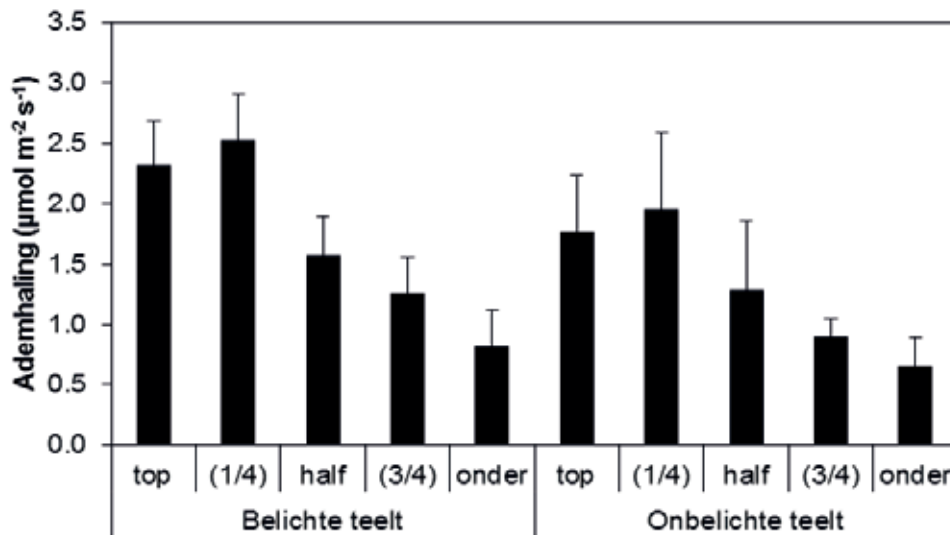
Figuur 3.19 CO₂ respons van de fotosynthese in een onbelicht gewas bij hoog licht (1000 μmol PAR m⁻² s⁻¹), en bij hoog (21%) en laag (2%) zuurstof.



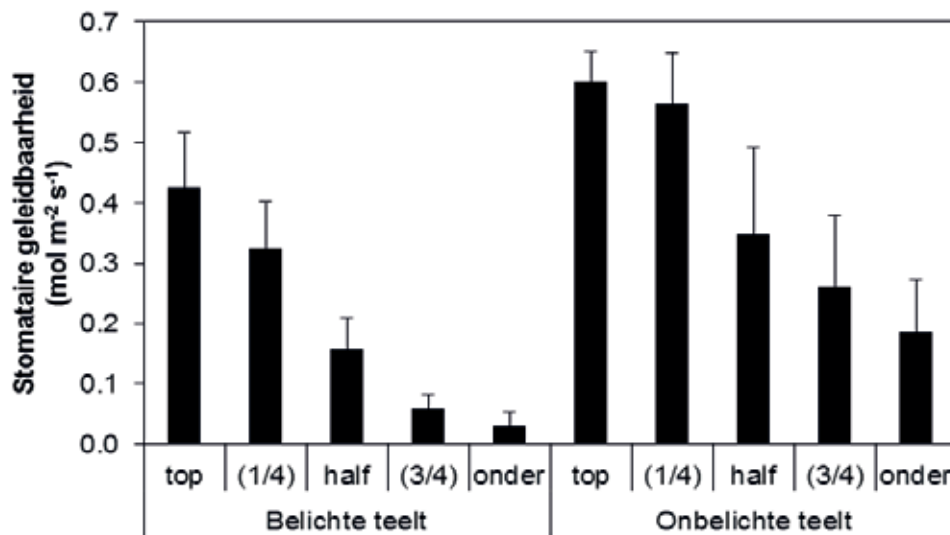
Figuur 3.20 CO₂ respons van de fotosynthese in een onbelicht gewas bij laag licht (300 μmol PAR m⁻² s⁻¹), en bij hoog (21%) en laag (2%) zuurstof.

3.2.1.3 Ademhaling en stomataire geleidbaarheid

De ademhaling in het donker en de stomataire geleidbaarheid werden in dezelfde bladlagen gemeten als de lichtrespons. Zowel de ademhaling als de stomataire geleidbaarheid nam in beide gewassen af naarmate de bladeren dieper in het gewas zaten (Figuren 3.21, 3.22). Beide parameters lieten dus dezelfde trend zien als de lichtrespons van de fotosynthese (Figuren 3.13, 3.14). De afname van deze parameters is te verklaren met het dubbel effect van veroudering en acclimatie van de bladeren aan een lagere lichtintensiteit.



Figuur 3.21 Ademhaling in het donker van bladeren in verschillende posities in het gewas.

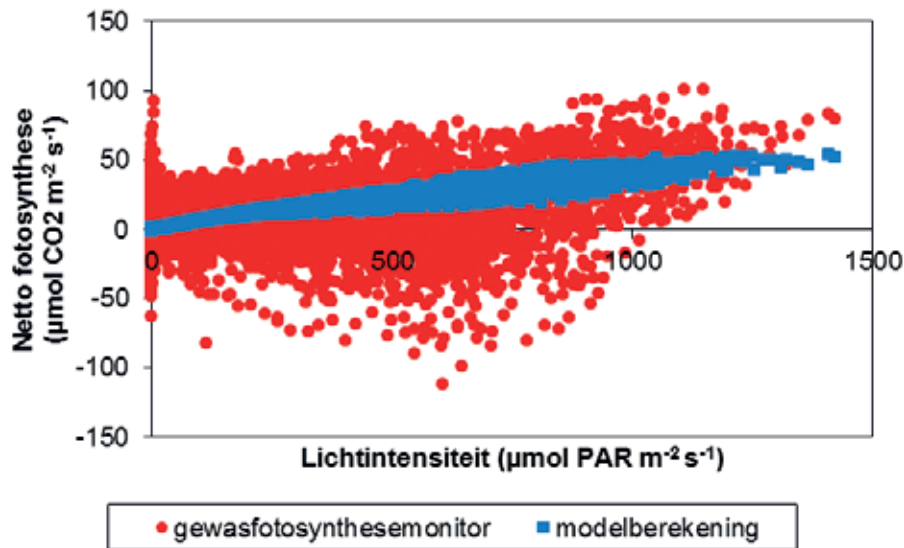


Figuur 3.22 Stomataire geleidbaarheid van bladeren in verschillende posities in het gewas

3.2.2 Geschatte gewasfotosynthese op praktijkproef 1

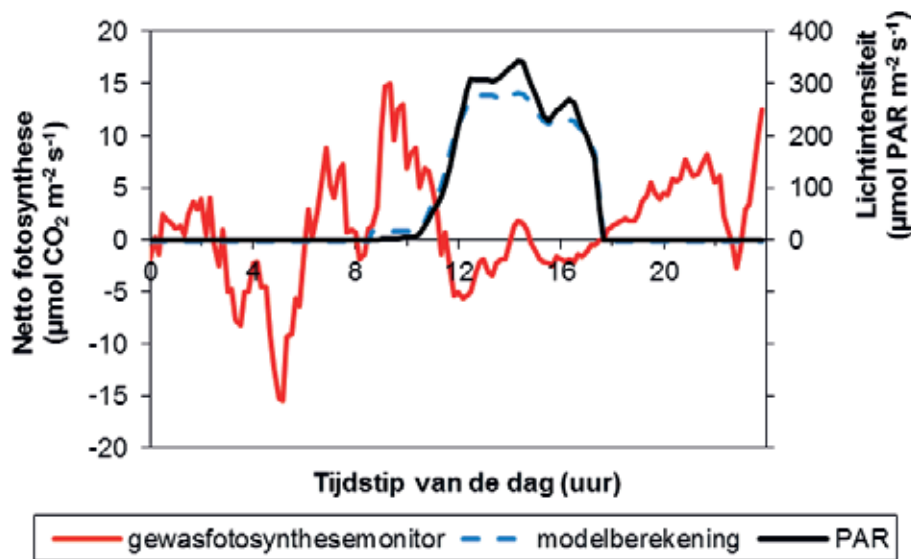
De gewasfotosynthese op praktijkbedrijf 1 werd bepaald in de periode 1 januari tot en met 4 mei 2016 met de gewasfotosynthesemonitor en met modelberekeningen (INTKAM). Schommelingen van de 5 minuten inputwaarden werden voor de berekeningen van de gewasfotosynthesemonitor afgevlakt door een voortschrijvend gemiddelde van 60 minuten te berekenen.

Zoals in Figuur 3.23 is te zien, waren er grote afwijkingen in gewasfotosynthese tussen de gewasfotosynthesemonitor en INTKAM. De gewasfotosynthese bepaald door de gewasfotosynthesemonitor bleek ook bij hogere lichtintensiteiten (tot $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) vaak negatief te zijn, hetgeen onder normale omstandigheden niet te verwachten is. De gewasfotosynthese berekend met INTKAM vertoonde deze negatieve gewasfotosynthese in het licht niet. De gemiddelde afwijking tussen de twee datasets was $11.4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (15400 datapunten) en dus vrij hoog.

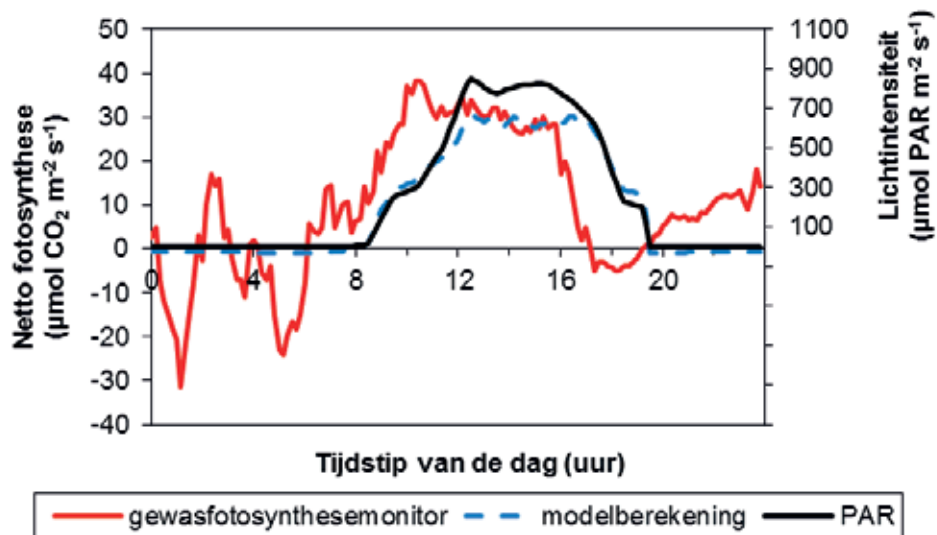


Figuur 3.23 Verhouding van lichtintensiteit en netto fotosynthese in een commercieel bedrijf. Gewasfotosynthese was geschat door de gewasfotosynthesemonitor (rode stippen) of door modelberekening (blauwe vierkanten).

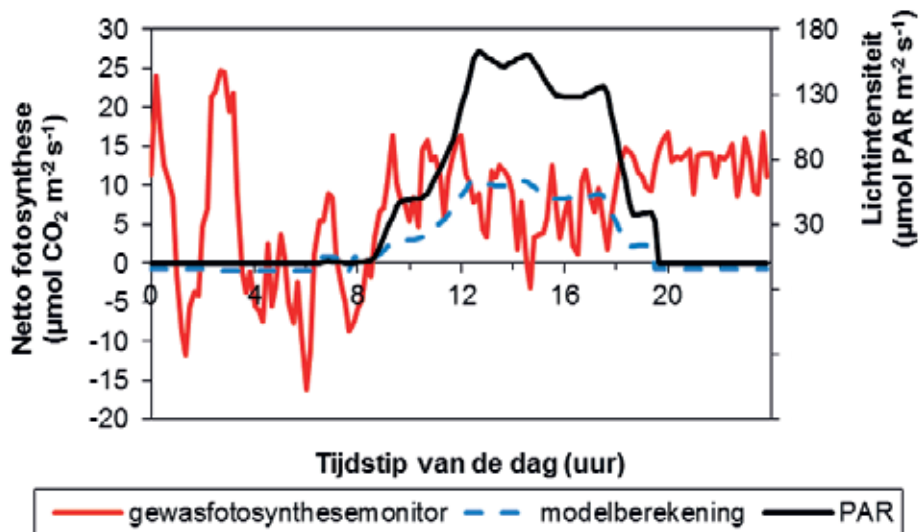
De volgende stap was een paar dagen met representatieve patronen eruit te halen en deze in een groter detail te bekijken (Figuren 3.24-3.28). De redenen voor de selectie van deze 5 gekozen dagen zijn in het onderschrift van de verschillende figuren te zien.



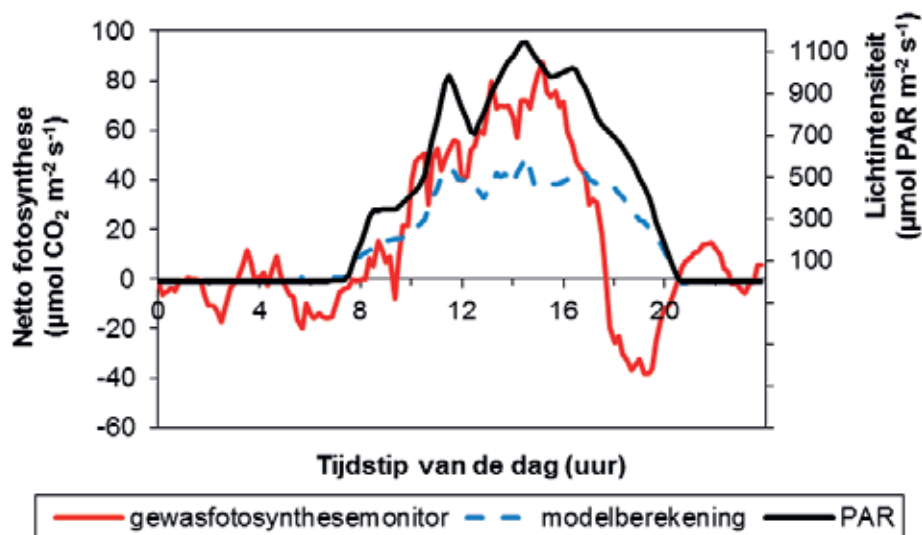
Figuur 3.24 Verloop van lichtintensiteit (zwarte lijn) en gewasfotosynthese op 8 januari 2016 in praktijkbedrijf 1. Gewasfotosynthese was geschat door de gewasfotosynthesemonitor (rode lijn) of door modelberekening (blauwe lijn). 8 januari was gekozen omdat het een dag zonder CO_2 toediening (een van de parameters van de gewasfotosynthesemonitor) maar met veel zonlicht was.



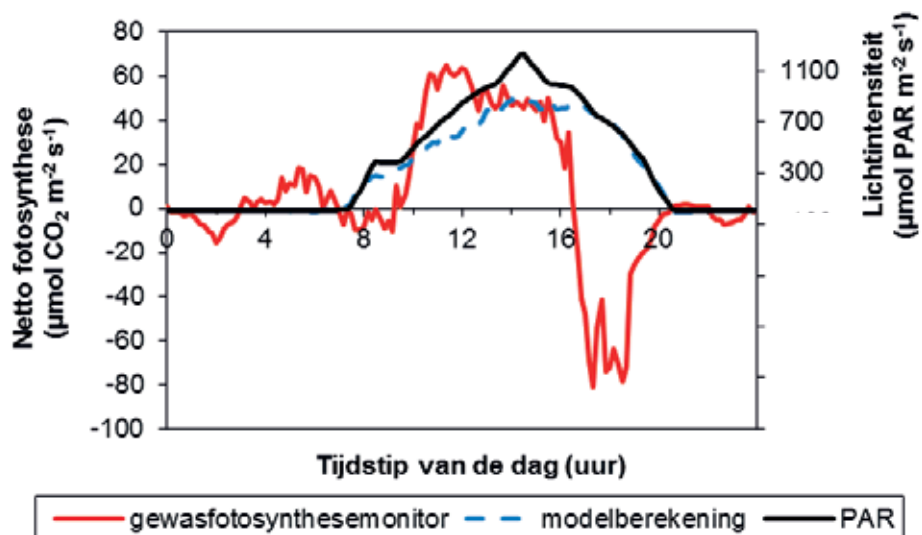
Figuur 3.25 Verloop van lichtintensiteit en gewasfotosynthese op 17 maart 2016 in praktijkbedrijf 1. 17 maart was gekozen als een voorbeeld van een dag waar de door de gewasfotosynthesemonitor geschatte netto fotosynthese redelijk goed de lichtintensiteit volgde.



Figuur 3.26 Verloop van lichtintensiteit en gewasfotosynthese op 18 maart 2016 in praktijkbedrijf 1. 18 maart was gekozen als een voorbeeld voor een dag met lage lichtintensiteit en daardoor lage CO₂ opname door het gewas.



Figuur 3.27 Verloop van lichtintensiteit en gewasfotosynthese op 19 april 2016 in praktijkbedrijf 1. 19 april was gekozen omdat de door de gewasfotosynthesemonitor geschatte netto fotosynthese goed volgde en de lichtintensiteit hoog was (in vergelijking met 20 april, zie Figuur 3.13).

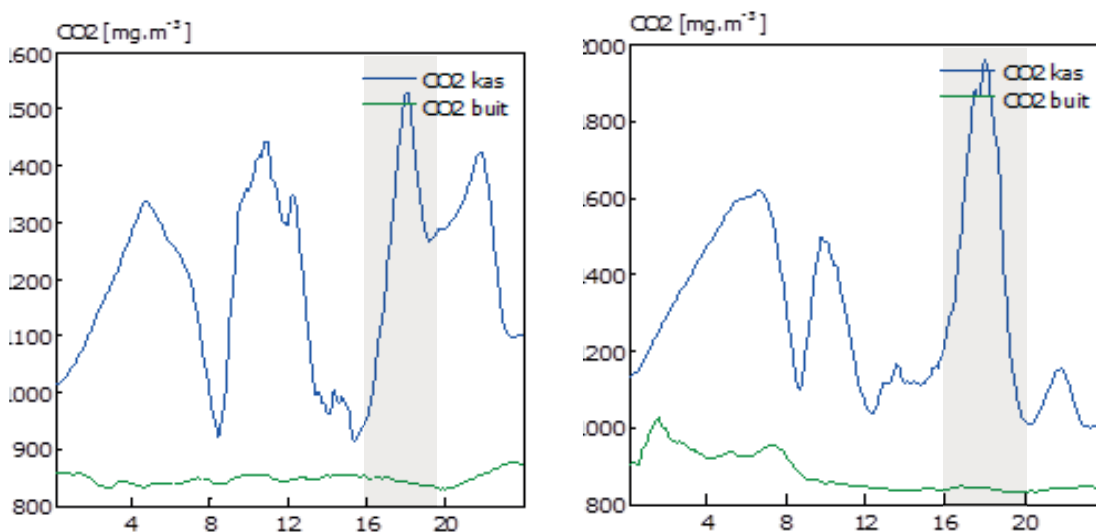


Figuur 3.28 Verloop van lichtintensiteit en gewasfotosynthese op 20 april 2016 in praktijkbedrijf 1. 20 april was gekozen omdat de lichtintensiteit vergelijkbaar was met 19 april, maar de door de gewasfotosynthesemonitor geschatte netto fotosynthese een duidelijk afwijkend en zwaar negatief patroon in de middag liet zien.

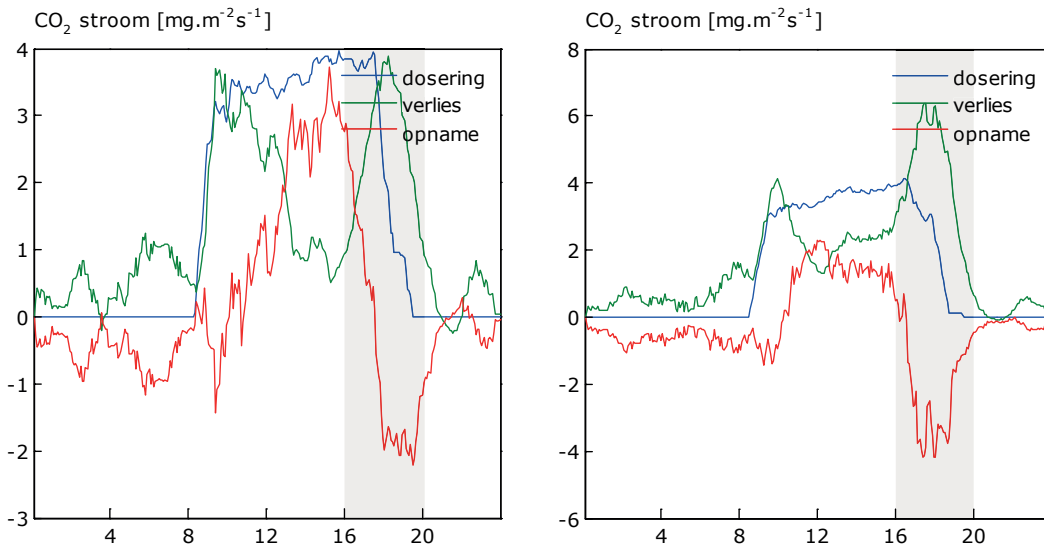
Uit de analyse van deze dagen blijkt dat wanneer de gewasfotosynthese laag is (omdat de instraling laag is (18 maart) of er geen CO₂ gedoseerd wordt (8 januari)), de gewasfotosynthese bepaald door de gewasfotosynthesemonitor "in de ruis" valt, dus geen betrouwbare waarden oplevert. Op dagen dat de gewasfotosynthese hoger is, blijkt dat de gewasfotosynthese bepaald met de gewasfotosynthesemonitor overeenstemt met de orde van grootte zoals berekend met het gewasgroeimodel INTKAM.

Een serieuze beperking van de mogelijkheden om de gewasfotosynthesemonitor als sturing te gebruiken voor de instellingen van het kasklimaat is het feit dat er sterke schommelingen in de bepalingen van de gewasfotosynthese gedurende de dag zijn.

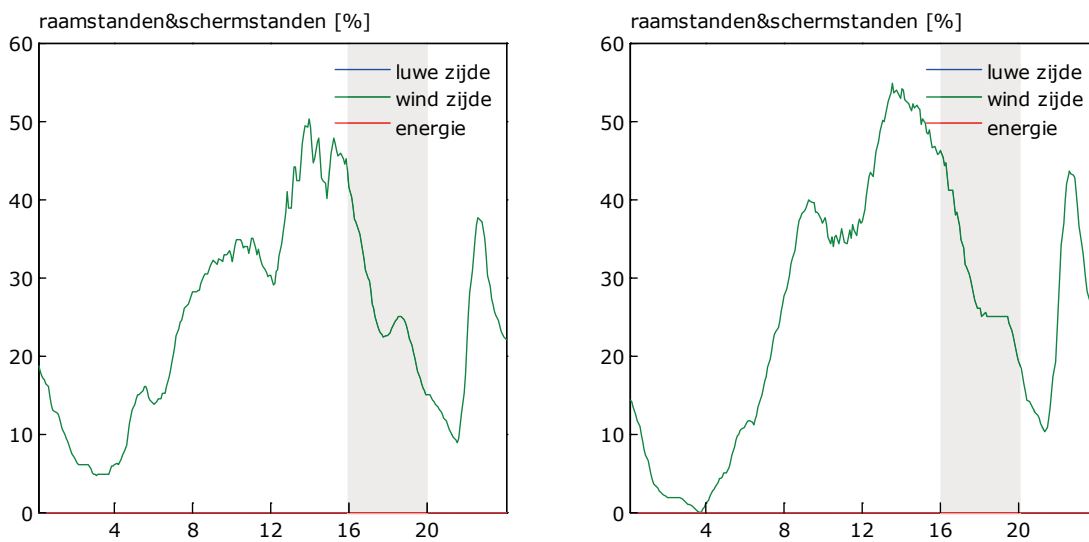
Voor een groot aantal dagen was er 's middags (tussen 16 en 20 uur) een sterke daling in de door de gewasfotosynthesemonitor geschatte netto fotosynthese te zien, die bij de lichtintensiteit in de kas niet te verwachten was. Gegevens van 19 en 20 april (Figuren 3.27, 3.28) zijn er een goed voorbeeld van. Wij hebben dus voor deze dagen patronen van verschillende inputgegevens onder de loep genomen. Wat direct opvalt, is dat de CO₂ concentratie in de periode 16-20 uur scherp verandert: in het begin stijgt het heel sterk, en daalt in de tweede helft weer; de CO₂ concentratie buiten de kas is in de hele meetperiode constant (Figuur 3.29). Echter, de stijging in de CO₂ concentratie is niet veroorzaakt door de CO₂ dosering, die in deze tijd constant is of daalt (Figuur 3.30). Verder staan de ramen in het begin wijd open, en sluiten dan in de periode tussen 16 en 20 uur (Figuur 3.31). Het is duidelijk dat de berekende ventilatie (Figuur 3.32) hetzelfde patroon heeft als de raamstanden. Het zou kunnen dat de sluiting van de ramen de luchtbeveging in de kas verandert, wat voor een momentane stijging van de door de CO₂ sensor gemeten CO₂ concentratie zorgt. Dat zou dus betekenen dat de CO₂ concentratie in de kas niet echt verandert, maar dat zich de snelheid van de vermenging van de kaslucht verandert, waardoor de CO₂ sensor een stijging in de CO₂ concentratie registreert. In het algemeen weten wij nog steeds veel te weinig over hoe goed de lucht in een kas echt gemengd is. Het zou kunnen dat maar een sensor om de CO₂ concentratie van een hele kas te meten niet genoeg is om kleine veranderingen in de CO₂ concentratie nauwkeurig te bepalen (zie ook paraaf 4.1).



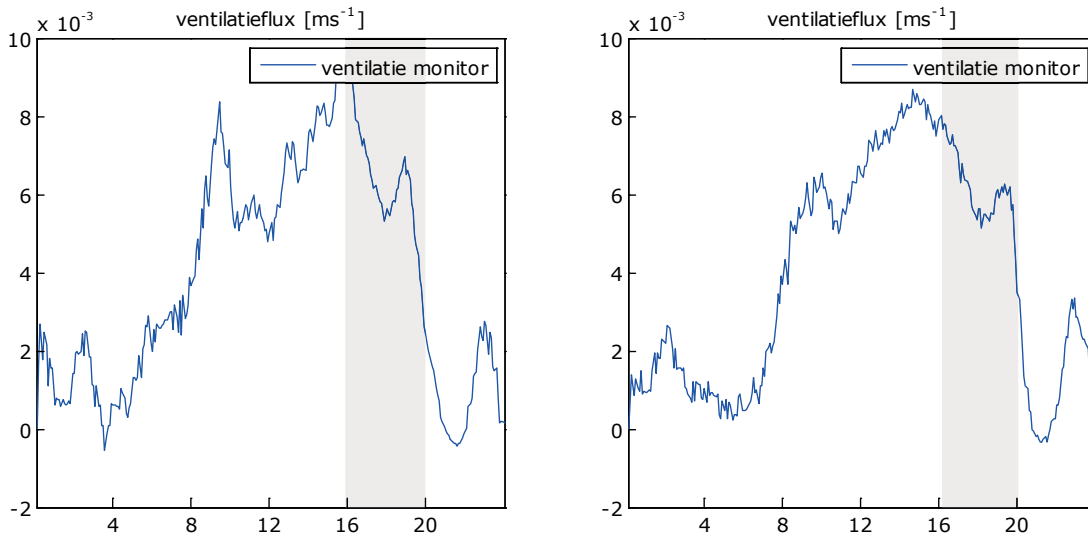
Figuur 3.29 Het verloop van de CO₂ concentratie in de kas (blauwe lijn) en buiten de kas (groene lijn) op 19 april (links) en 20 april (rechts) 2016. De periode tussen 16 en 20 uur is grijs gekleurd. 800 mg CO₂ m⁻³ is gelijk aan 444 ppm CO₂.



Figuur 3.30 CO₂ dosering (blauwe lijn), verlies (groene lijn) en berekende opname door het gewas (rode lijn) op 19 april (links) en 20 april (rechts). De periode tussen 16 en 20 uur is grijs gekleurd.



Figuur 3.31 Raamstanden wind zijde van het kas op 19 april (links) en 20 april (rechts). De periode tussen 16 en 20 uur is grijs gekleurd.

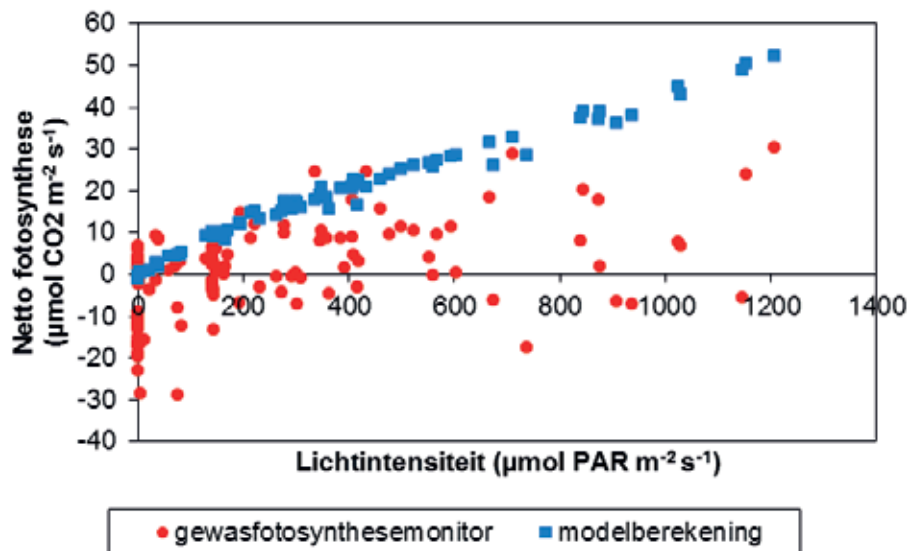


Figuur 3.32 Berekende ventilatieflux op 19 april (links) en 20 april (rechts). De periode tussen 16 en 20 uur is grijs gekleurd.

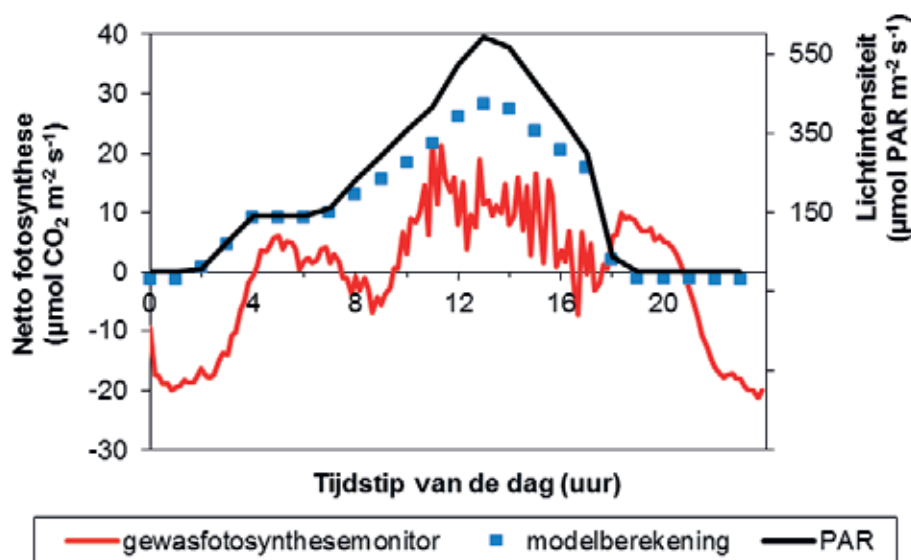
3.2.3 Vergelijking tussen berekende waarden praktijkproef 1 en Wageningen University & Research Glastuinbouw

Om na te gaan wat de reden kunnen zijn voor het verloop van de met de gewasfotosynthesemonitor bepaalde fotosynthese op het praktijkbedrijf hebben we voor dezelfde vijf dagen (8 januari, 17 maart, 18 maart, 19 april en 20 april 2016) de gewasfotosynthese van een belicht tomatengewas in Bleiswijk (WUR glastuinbouw) bepaald. In een naburige afdeling was eerder ook de gewasfotosynthesemonitor in tomaat getest, met redelijk goede resultaten (Dieleman *et al.* 2016). De gewasfotosynthese bepaald met de gewasfotosynthesemonitor werd vergeleken met de berekende gewasfotosynthese (INTKAM) voor de kas in Bleiswijk.

Uit de figuren 3.33 en 3.34 blijkt dat ook voor de proefkas in Bleiswijk het verloop van de gewasfotosynthese bepaald met de gewasfotosynthesemonitor fluctuaties vertoont, evenals in praktijkproef 1. Verlopen van andere dagen laten vergelijkbare verschillen zien, maar zijn hier niet afgebeeld. De gemiddelde afwijking tussen de twee datasets was $13.4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bij 119 datapunten, en dus vergelijkbaar met de gemiddelde afwijking in praktijkbedrijf 1 ($11.4 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$, zie 3.2.1.). De kwaliteit van de input-gegevens was dus niet de (enige) reden voor de schommelingen in de resultaten van de gewasfotosynthesemonitor.



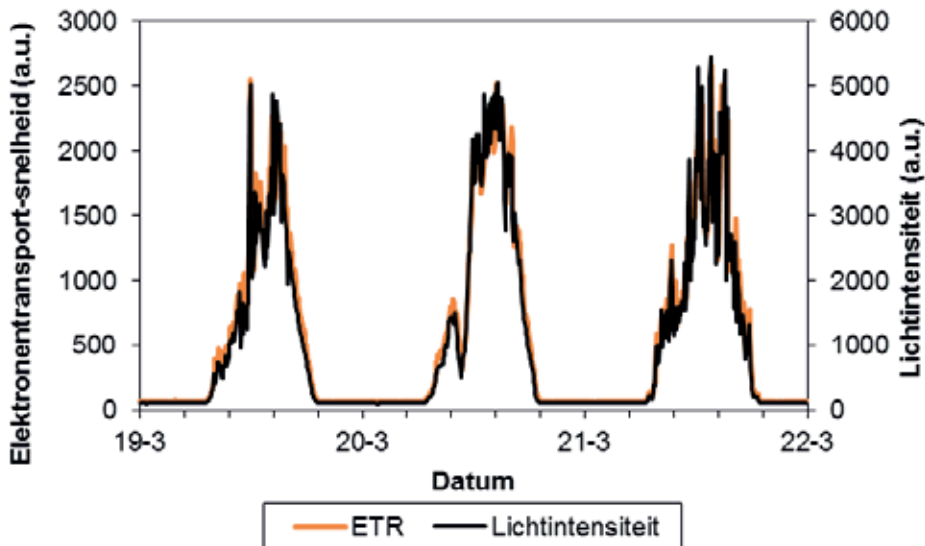
Figuur 3.33 Verhouding van lichtintensiteit en geschatte gewasfotosynthese in een tomatengewas in Bleiswijk, voor 5 verschillende dagen in het voorjaar 2016. Getoonde waarden zijn gemiddeld per uur. Gewasfotosynthese was geschat door de gewasfotosynthesemonitor (rode kringen) of door modelberekening (blauwe vierkanten).



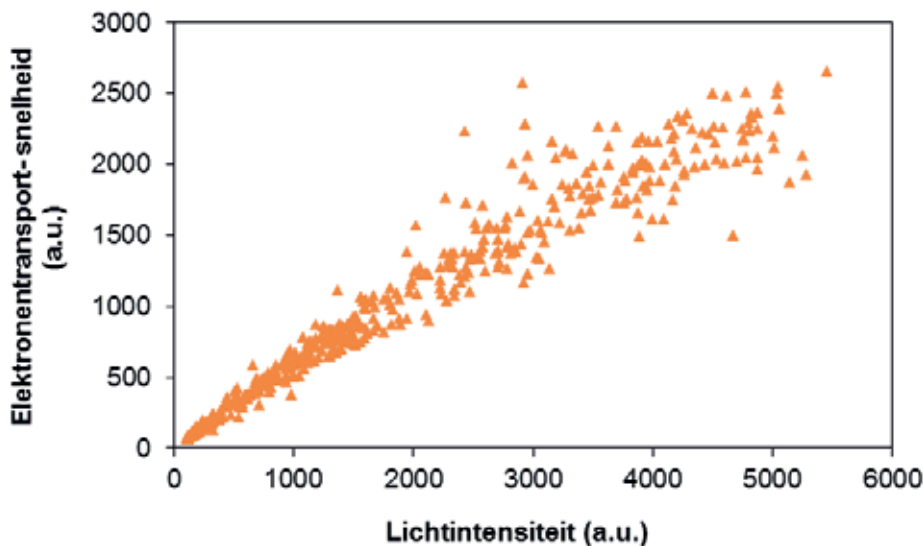
Figuur 3.34 Verloop van lichtintensiteit (zwarte lijn) en gewasfotosynthese op 17 maart 2016 in een tomatengewas in Bleiswijk. Blauwe vierkanten en rode punten laten een deel van de waarden zien, die voor de berekening van de gemiddelde afwijking tussen datasets gebruikt werden.

3.2.4 CropObserver op praktijkproef 1

De CropObserver is in het voorjaar 2015 enkele maanden geïnstalleerd geweest op praktijkbedrijf 1. Er bleek een goede relatie te zijn tussen de door de CropObserver gemeten lichtintensiteit en de elektrontransport-snelheid (Figuren 3.35 en 3.36). Dat betekent dat dit tomatengewas al het licht dat het krijgt efficiënt kan gebruiken.



Figuur 3.35 Verloop van elektrontransport-snelheid (ETR) en lichtintensiteit, beide gemeten door de Crop-Observer, over meerdere dagen.

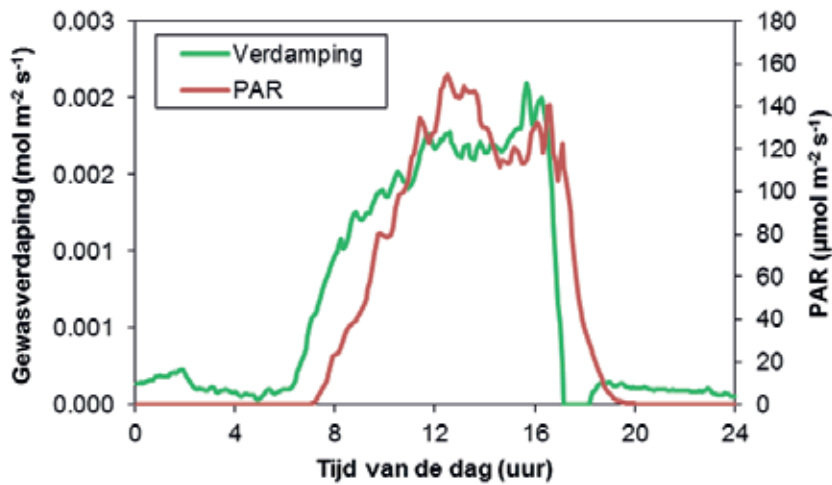


Figuur 3.36 Verhouding van elektrontransport-snelheid en lichtintensiteit.

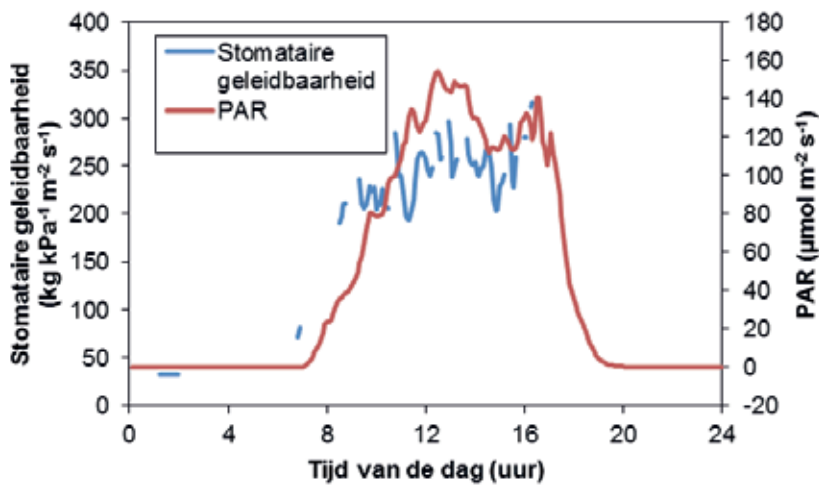
3.2.5 Stomata sensor op praktijkproef 1

Voor de periode 1 januari tot 4 mei werd in het praktijkbedrijf 1 (onbelichte teelt) de stomataire geleidbaarheid op gewasniveau bepaald met de Stomata sensor.

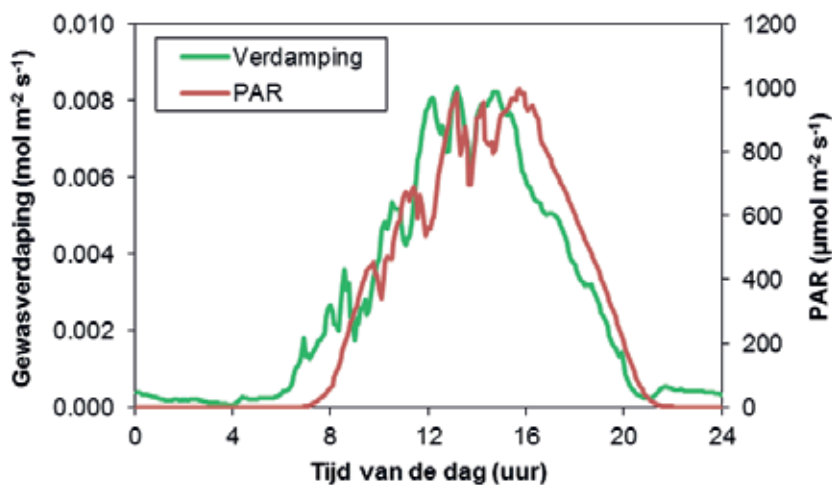
Voor de vijf gekozen dagen (8 januari, 17 en 18 maart, 19 en 20 april, zie 3.2.2) werd gekeken hoe goed de door de stomata sensor geschatte gewasverdamping en de stomataire geleidbaarheid van het gewas gedurende de dag verliepen (Gedeeltelijk weergegeven in figuren 3.37-3.40). Daaruit is te zien dat de gewasverdamping bepaald met de Stomatasensor gedurende de dag het patroon van de lichtintensiteit duidelijk volgde. Uit de gegevens van de huidmondjesopening bleek dat er geen reden was aan te nemen dat er onregelmatigheden in de watergift of andere stressfactoren voor de planten waren gedurende deze dagen.



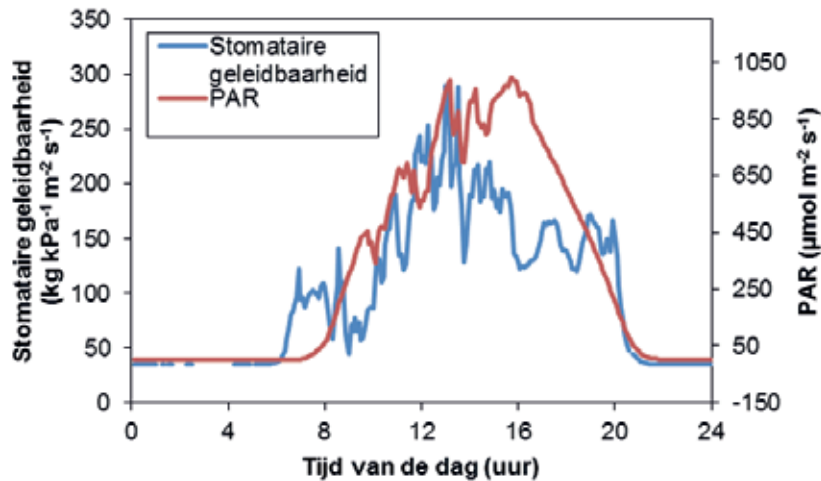
Figuur 3.37 Dagelijks verloop van de gewasverdamping (geschat door de stomata sensor) en de lichtintensiteit op 18 maart.



Figuur 3.38 Dagelijks verloop van de stomataire geleidbaarheid en de lichtintensiteit op 18 maart.



Figuur 3.39 Dagelijks verloop van de gewasverdamping (geschat door de stomata sensor) en de lichtintensiteit op 19 april.



Figuur 3.40 Dagelijks verloop van de stomataire geleidbaarheid en de lichtintensiteit op 19 april.

3.2.6 Gewasfotosynthesemonitor in praktijkproef 2

In deze proef werd de gewasfotosynthese in een belicht gewas van cherry tomaten geschat. Uiteindelijk waren de berekeningen van de gewasfotosynthesemonitor voor dit bedrijf echter niet betrouwbaar, omdat het niet mogelijk was de CO₂ flux naar de kas nauwkeurig genoeg te bepalen: de CO₂ concentratie in de transportbuis kon binnen een minuut tussen bijv. 17.000 en 60.000 ppm wisselen. Er is dus in dit geval niet verder gegaan met analyses.

4 Discussie

In dit rapport zijn twee methoden onderzocht die de fotosynthese en de verdamping van gerbera en tomaat in praktijk- en onderzoekskassen kunnen meten of schatten. Deze methoden waren:

- Gewasfotosynthesemonitor: schatting van de CO₂ opname van het gewas door de CO₂ balans van de gehele kas op te stellen.
- CropObserver: schatting van elektronentransportsnelheid in een deel van het gewas met behulp van chlorofyl fluorescentie.

Deze methodes zijn vergeleken met de volgende methodes:

- Modelberekening (INTKAM): schatting van de gewasfotosynthese en -groei op basis van gewasparameters en het kasklimaat.
- Stomata sensor: schatting van de stomataire geleidbaarheid van een gewas met behulp van het gemeten kasklimaat en de gewastemperatuur.

In de volgende alinea's worden de verschillende methoden bediscussieerd en met elkaar vergeleken.

4.1 Gewasfotosynthesemonitor

Na de eerste test van de gewasfotosynthesemonitor in 2014 werd geconcludeerd dat de CO₂ opname geschat door de gewasfotosynthesemonitor een verloop over de dag vertoont dat redelijk overeenstemt met de instraling en het verloop van de CO₂ concentratie. Maar dat er in dit patroon pieken en dalen zitten, die niet te verklaren zijn door veranderingen in instraling of CO₂ concentratie (Dieleman e.a., 2016). Er werd toen ook geconcludeerd dat dit verbeterd zal moeten worden wil de gewasfotosynthesemonitor toepassing in de praktijk vinden. Uit de resultaten van de praktijktesten is gebleken dat deze problemen niet opgelost zijn. De door de gewasfotosynthesemonitor bepaalde fotosynthese heeft wel de juiste orde van grootte, maar vertoont gedurende de dag te veel afwijkingen die geen verband lijken te houden met de CO₂ opname door het gewas, maar met veranderingen in de raamopening of CO₂ doseersnelheid.

De techniek die door de gewasfotosynthesemonitor gebruikt wordt is het meest vergelijkbaar met de zogenoemde 'eddy covariance' techniek. Deze meet de CO₂ en water uitwisseling van gehele ecosystemen. Door eddy covariance wordt de snelheid, richting en temperatuur van luchtstromen samen met hun gehalten aan CO₂ en water gemeten, waardoor voor grote oppervlaktes en over meerdere jaren met een hoge nauwkeurigheid de CO₂ en waterbalans berekend kan worden (Baldocchi, 2003). Echter, de eddy covariance techniek werkt niet goed als de luchtstroom tussen een gewas en de hemel te laag is, en er dus een te grote grenslaag tussen de lucht rond het gewas en de omgevingslucht bestaat (Baldocchi, 2003). Het is te verwachten dat deze situatie ook bestaat in een kas met een hoogopgaand gewas zoals tomaat, dat de ruimte in het kas grotendeels vult en de luchtbeweging rond het bladpakket minimaliseert. Daardoor is een doorlopende vermenging van de lucht, die voor een representatieve meting van de CO₂-concentratie en vocht in de kaslucht nodig is, waarschijnlijk niet genoeg om relatief kleine veranderingen in de CO₂ concentratie, veroorzaakt door de opname van het gewas, te meten. In de kassen met gerbera waren ventilatoren geïnstalleerd, wat vermoedelijk de luchtbeweging ten opzichte van de kassen met tomaat duidelijk verhoogd heeft. Dat kan een verklaring zijn waarom de verloop van de gewasfotosynthesemonitor in gerbera overdag duidelijk beter was dan in tomaat. Verder kan het volume van het gewas ook een rol spelen: gerbera is veel korter en compacter dan tomaat, wat de lucht boven het gewas een grotere kans voor beweging en regelmatige vermenging geeft.

Er zijn vaak grote verticale en horizontale temperatuurgradiënten in de kaslucht (1-8 °C; Dieleman *et al.* 2012; Kittas *et al.* 2008), terwijl de luchttemperatuur meestal met een sensor per regelafdeling die al snel meer dan 5000 m² kan beslaan, gemeten wordt. De gemeten temperatuur kan dus niet representatief zijn voor de kas. De gewasfotosynthesemonitor is heel gevoelig voor onzekerheden in de temperatuur (zie paragraaf 3.3.1). Waarschijnlijk is dus een betrouwbare berekening door de gewasfotosynthesemonitor alleen mogelijk, als er meerdere temperatuursensoren (en CO₂-sensoren, zie bovenstaande punt) geïnstalleerd zijn, maar het is de vraag hoe uitvoerbaar dat is.

Een ander punt is de gevoeligheid van de gewasfotosynthesemonitor voor fluctuaties. Hierbij is het grootste probleem dat hij probeert een stroom (netto fotosynthese van het gewas) van CO₂ te bepalen, die ten opzichte van de andere stroom van CO₂ (ventilatieverlies van CO₂) zeer klein is. Ook is er geen grote buffer voor CO₂ in de lucht, wat betekent dat elke verandering van de CO₂ concentratie leidt tot grote veranderingen in de berekende gewasfotosynthese. Samen met een mogelijk onvoldoende vermenging van de kaslucht (zie boven) en het feit dat CO₂ sensoren 40-50 ppm kunnen afwijken wordt dus de verhouding van signaal en ruis heel ongunstig. In conclusie is het dus bijna onmogelijk om de CO₂ balans van een geventileerde kas nauwkeurig in de tijd te bepalen, en de daarmee berekende gewasfotosynthese te gebruiken om het kasklimaat aan te sturen.

4.2 CropObserver

In een eerder project is de CropObserver getest en zijn de metingen vergeleken met metingen van Micro Moni PAMs (Dieleman *et al.* 2016). Het bleek dat de bepalingen van de chlorofyl fluorescentie, gemeten door beide meetapparaten, goed overeenstemden. De CropObserver geeft dus een goed beeld van de efficiëntie van de lichtbenutting in de fotosynthese, voor planten die geen stress ondervinden. Uit dit rapport blijkt dat dit ook geldt voor tomaten en gerberaplanten in verschillende teeltsystemen. Er zijn echter nog enkel punten van aandacht die de bruikbaarheid van de CropObserver beperken. Deze worden in de volgende paragraaf besproken.

De CropObserver meet, via chlorofyl fluorescentie en reflectie van het gewas, de ETR (elektronentransportsnelheid). Een deel van de door het gewas onderschepte lichtenergie wordt gebruikt om het transport van elektronen tussen de twee fotosystemen (II en I) aan te drijven. Dit elektronentransport is nodig om de chemische energie in de cel (ATP en NADPH) te vormen. Deze energie wordt gebruikt in de Calvin cyclus, om een fosfaat (RuBP) te vormen, wat door het enzym Rubisco gebruikt wordt om CO₂ (carboxylering, fotosynthese) of zuurstof (zuurstofvoorziening, fotorespiratie) te binden. Voor de ETR maakt het niet uit, of en met welke snelheid fotosynthese of fotorespiratie plaats vindt, omdat voor beide processen energie in de vorm van ATP en NADPH nodig is (ETR draait dus in beide gevallen). Voor de groei van het gewas maakt het echter wel uit, omdat alleen fotosynthese voor nieuwe suikers en dus groei zorgt, terwijl fotorespiratie meestal alleen energie verbruikt. Als de huidmondjes van de plant open staan, de CO₂ concentratie in de kaslucht niet te sterk verandert en de bladtemperatuur redelijk stabiel is, is er een vrij constante verhouding tussen fotosynthese en fotorespiratie te verwachten, en kan de ETR goed gebruikt worden om de fotosynthese te voorspellen. Echter, als de plant gestrest is (bijv. ziekte, waterstress, hoge temperaturen) kan het zijn dat de huidmondjes zich sluiten en de fotosynthese, door een lage interne CO₂ concentratie, daalt. Op dat moment stijgt de fotorespiratie meestal en de netto fotosynthese daalt, maar deze veranderingen zijn in de ETR niet te zien. Verder stijgt de fotorespiratie ten opzichte van de fotosynthese als de planttemperatuur stijgt. Om de momentane fotosynthese van de plant goed te monitoren is dus een combinatie van de meting van de huidmondjesopening (eventueel verdamping als afgeleide) en de ETR en een correctie voor de temperatuur van het gewas nodig.

Uit de gecombineerde metingen van gasuitwisseling en chlorofyl fluorescentie, gedaan met de LI-6400, kan afgeleid worden dat er bij verschillende lichtintensiteiten een rechtlijnig verband is tussen de netto-fotosynthesesnelheid en de ETR (bij een CO₂ concentratie van 700 ppm, Figuren 3.15 en 3.16). Dat zou theoretisch betekenen, dat de door de CropObserver gemeten waarden voor ETR zouden kunnen worden omgerekend naar netto gewasfotosynthese. Maar omdat de CropObserver de lichtintensiteit bepaalt door de reflectie van het licht met een aangenomen spectrum door het gewas, geeft hij de lichtintensiteit (en de ETR) in arbitraire eenheden aan. Een omrekening van ETR naar netto fotosynthesesnelheid is daarmee dus niet mogelijk. Verder varieert, afhankelijk van de eigenschappen van een gewas, de reflectie bij dezelfde geabsorbeerde hoeveelheid licht. Ook neemt de CropObserver voor de conversie van reflectie naar lichtintensiteit aan dat het lichtspectrum ongeveer hetzelfde is als dat van zonlicht. Dat betekent dat als de plant met bijvoorbeeld LEDs belicht wordt, er met filters op de CropObserver gewerkt moet worden om de lichtintensiteit te kunnen bepalen. Een via reflectie gemeten lichtintensiteit is dus altijd relatief voor een bepaald gewas en een lichtbron. In conclusie is de CropObserver wel goed bruikbaar om relatieve veranderingen van de efficiëntie van lichtbenutting in de fotosynthese in een ongestrest gewas te bepalen, maar niet om een absolute meting van de CO₂ opname of de door het gewas geabsorbeerde lichtintensiteit te doen.

4.3 Stomata sensor

De stomatasensor van Hoogendoorn berekent op basis van de energiebalans de momentane gewasverdamping en de huidmondjesgeleidbaarheid. Uit de gegevens van de stomatasensor bleek dat er geen afwijkingen in het verloop van de stomataire geleidbaarheid geconstateerd zijn, zodat aangenomen kan worden dat het gewas reageert zoals verwacht mag worden ten aanzien van verdamping en fotosynthese. Dat blijkt ook uit de figuren in paragraaf 3.2.5 waaruit blijkt dat de verdamping goede overeenkomst vertoont met het lichtniveau.

4.4 Meting van gasuitwisseling en chlorofyl fluorescentie

Directe metingen van de gasuitwisseling en chlorofyl fluorescentie in een bladkamer van een draagbare fotosynthesemeter hebben veel voordelen: ze zijn nauwkeurig, het klimaat rond het gemeten deel van het blad is goed beheersbaar en ze zijn in staat om de variatie in verschillende eigenschappen (bijv. licht- en CO₂-verzadigingspunten, respiratie, stomataire geleidbaarheid) door een gewas te laten zien. Dat was in dit geval bij metingen in een tomatengewas op een praktijkbedrijf met onbelichte teelt ook zo (zie paragraaf 3.2.1.). Deze metingen waren heel nuttig om de fotosynthese, stomataire geleidbaarheid en respiratie door het gewas in kaart te brengen. Deze parameters zijn van groot belang om het groeiemodel (INTKAM) goed op een specifieke situatie in te stellen. Ook zijn deze metingen nodig om andere relatieve metingen van de fotosynthese (zoals ETR, gemeten door de CropObserver) aan absolute getallen te kunnen relateren ('ground truthing'). Omdat dit soort metingen veel tijd kosten, en alleen plaatsvinden op een klein oppervlakte van een blad (tussen 2 en 6 m²) en omdat de apparatuur duur en kwetsbaar is, is het handmatig meten van fluorescentie en fotosynthese echter niet inzetbaar als monitoringsmethode in de praktijk.

4.5 Modelberekening van fotosynthese en groei (INTKAM)

Het gewasgroeiemodel INTKAM wordt al jaren gebruikt, en is vele malen gevalideerd op basis van werkelijke plantmetingen, met goede resultaten. Er mag dan ook aangenomen worden dat de resultaten van het gewasgroeiemodel INTKAM een reëel beeld geven van de gewasfotosynthese. Dit wordt bevestigd door het feit dat de ordes van grootte van de gewasfotosynthese bepaald met de gewasfotosynthesemonitor en INTKAM (vaak) overeenstemmen. Het nadeel van de modelberekeningen is dat dit niet een gemeten fotosynthese (CO₂ opgenomen uit de kas door het gewas) is, maar een berekende fotosynthese op basis van het huidige klimaat. Voor de twee gewassen die we gebruikt hebben, tomaat en gerbera mag aangenomen worden dat als de huidmondjes voldoende open staan en de waarden van de chlorofylfluorescentie redelijk zijn, dat het gewas reageert 'volgens het boekje'. Dan geeft INTKAM een reële, betrouwbare en momentane inschatting van de gewasfotosynthese, en is dan dus ook als zodanig bruikbaar. Maar, omdat een modelberekening geen sensor is, kan het model het niet 'zien' als er in het gewas iets mis gaat en het gewas dus niet op het klimaat reageert zoals verwacht mag worden.

Een goede methode om de gewasfotosynthese te voorspellen, en daarmee een inschatting te geven van de gewasgroei, en het klimaat te regelen zal dus misschien een combinatie van betrouwbare momentane metingen en berekeningen door een groeiemodel (zoals INTKAM) zijn. Mogelijk inzetbare sensoren zijn 'sap flow meters' (meten de stroom van water door een plant), warmtebeeldcamera's (kunnen ingezet worden om de transpiratie van het gewas te meten), een verdampingsmonitor of chlorofyl fluorescentie camera's. Het voordeel van een combinatie uit model en sensor zou zijn dat het groeiemodel de momentane fotosynthese en groei (inclusief oogst) met een grote nauwkeurigheid voorspelt (met de aanname dat het gewas gezond en niet gestrest is), en de teler dus op basis hiervan beslissingen over het klimaat en/of gewasmanagement kan nemen, terwijl de sensor monitort of de modelberekeningen nog steeds met de realiteit overeenstemmen. Als er sterke afwijkingen tussen berekeningen en metingen zijn, zouden deze gebruikt kunnen worden om waarschuwingen aan de teler te sturen, dat iets met het gewas of het klimaat mis gaat.

5 Aanbevelingen en conclusies

Het basisproces voor de groei en productie van een gewas is de fotosynthese. Naarmate er meer licht en CO₂ beschikbaar is voor het gewas is de gewasfotosynthese en uiteindelijk ook de productie hoger. Dat betekent dat er in de winter veel wordt belicht om het schaarse natuurlijk licht aan te vullen. Het optimaal omzetten van (kunst)licht in fotosynthese heeft – zeker in het winterhalfjaar – directe gevolgen voor het energie en elektriciteitsgebruik. Ook het inzetten van CO₂ brengt kosten met zich mee, en een milieubelasting. Het optimaal monitoren van de fotosynthese kan dus bijdragen aan een besparing op het gebruik van energie en op een verlaging van de CO₂ voetafdruk (carbon footprint). Een goed instrument waarmee een teler de fotosynthese kan monitoren en het klimaat op kan sturen ontbreekt tot nu toe nog.

In de afgelopen jaren zijn twee sensoren ontwikkeld en getest, de CropObserver en de gewasfotosynthese monitor. Deze zijn samen met de Stomatasensor van Hoogendoorn en de fotosynthesemodule van INTKAM gebruikt om een beeld te geven van het verloop van de gewasfotosynthese en aanverwante processen gedurende de dag. In dit rapport staan de resultaten van deze testen weergegeven. In dit hoofdstuk kijken we wat deze resultaten betekenen voor de mogelijkheden om de gewasfotosynthese te meten in de praktijk, en op basis hiervan het kasklimaat te regelen.

5.1 Mogelijkheden om met de CropObserver de gewasfotosynthese te bepalen

In de eerste stap van de fotosynthese wordt de lichtenergie omgezet in chemische energie. Met behulp van chlorofylfluorescentie kan de efficiëntie van deze stap gemeten worden. In dit project is de CropObserver gebruikt, een fluorescentiesensor die vanuit de nok van de kas snelle metingen kan doen in een oppervlakte van enkele vierkante meters. Met behulp van software kan de gewenste meetfrequentie, parameters, meetpunten, tijdverloop e.d. ingesteld worden. Een voordeel van de CropObserver is dat het het gewas vrij laat, niet in de weg hangt, onderhoudsarm is en een online continue meting van de elektronentransportsnelheid (ETR) geeft. Daarmee voldoet de CropObserver op grote lijnen aan de eisen die oorspronkelijk gesteld werden aan monitoringsystemen voor de gewasfotosynthese. Met behulp van de CropObserver is in dit project dan ook vastgesteld dat zowel tomaat als gerbera het aangeboden licht (in de wintermaanden) efficiënt kan benutten.

Om de CropObserver te kunnen gebruiken om de gewasfotosynthese te kunnen bepalen, zouden er nog wel een aantal punten aangepast moeten worden. Het is (goed) mogelijk om de elektronentransportsnelheid (ETR) om te zetten naar molen opgenomen CO₂, zoals is aangetoond in paragraaf 3.2 voor een zekere CO₂ concentratie. Echter, daarvoor is wel een ETR nodig die gemeten is in μmol elektronen per m² per seconde. De ETR die door de CropObserver wordt bepaald is weergegeven in arbitraire eenheden, omdat ook de lichtintensiteit door de CropObserver gemeten wordt in arbitraire eenheden. Het zou aanbeveling verdienen als de meting van de lichtintensiteit door de CropObserver zodanig werd aangepast dat gemeten zou kunnen worden in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, zodat deze gebruikt zou kunnen worden om de ETR te berekenen in $\mu\text{mol elektronen m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Verder zou de CropObserver ook licht van specifieke golflengtes moeten kunnen meten, wat nu nog niet het geval is, om bijvoorbeeld LED licht mee te nemen in de meting van lichtintensiteit. Tenslotte zou er een module aan de CropObserver gekoppeld moeten worden die de huidmondjesopening bepaalt, en waarmee de CO₂ concentratie, temperatuur en relatieve luchtvochtigheid in de kas gemeten kunnen worden. Daarmee zou de ETR omgezet kunnen worden naar de CO₂ opname door het gewas en zou de CropObserver gebruikt kunnen worden als instrument om de gewasfotosynthese te bepalen.

5.2 Mogelijkheden om met de gewasfotosynthesemonitor de gewasfotosynthese te bepalen

De gewasfotosynthesemonitor is een softsensor die op basis van de CO₂ balans van de kas de CO₂ opname door het gewas (gewasfotosynthese) kan bepalen. Dit is op zich een hele elegante methode, omdat er geen apart instrument voor nodig is en omdat het de fotosynthese van een hele kas met gewas kan bepalen. Echter, van de hoeveelheid CO₂ die gedoseerd wordt, wordt maar een klein deel gebruikt voor de gewasfotosynthese.

Het grootste deel van de CO₂ die gedoseerd wordt, gaat via lek of ventilatie verloren. Dat betekent dat de gewasfotosynthesemonitor heel nauwkeurig moet zijn, omdat het een relatief kleine post in de CO₂ balans van de kas moet schatten.

Bij de eerste test van de gewasfotosynthesemonitor was de conclusie dat de CO₂ opname bepaald met de gewasfotosynthesemonitor goed overeenstemde met de met een model berekende waardes. Echter, het verloop over de dag vertoonde te veel schommelingen die niet verklaarbaar waren uit veranderingen in licht of CO₂ concentratie om bruikbaar te zijn als monitoringinstrument. Die test is gedaan in de onderzoekskassen bij Wageningen University & Research in Bleiswijk, waar de CO₂ dosering nauwkeurig werd bepaald. Bij de metingen van de gewasfotosynthese in de praktijk bleek dat niet op alle bedrijven de CO₂ dosering van een afdeling goed bekend is: buizen met één signaal splitsen naar twee afdelingen, een ventilator zuigt buitenlucht aan met een onbekende flow of er is een klep die af en toe open wordt gestuurd. Wanneer de CO₂ dosering niet nauwkeurig bekend is, is het onmogelijk om de gewasfotosynthese met de gewasfotosynthesemonitor te bepalen.

Verder bleek dat de gewasfotosynthese bepaald met de gewasfotosynthesemonitor sterk beïnvloed wordt door veranderingen in de raamstanden. Wanneer de ramen openen of sluiten, verandert de ventilatieflux en daarmee ook het verlies aan CO₂ via de ramen. Deze veranderingen zijn zoveel groter dan de opname van CO₂ door het gewas dat de balans te instabiel is om de gewasfotosynthese te kunnen bepalen. Aanpassingen in de (software van de) gewasfotosynthesemonitor hebben dit probleem niet kunnen verhelpen. Verder zouden gradiënten van luchttemperatuur en CO₂ concentratie in en rond de kas reden voor grote schommelingen in de door de gewasfotosynthesemonitor berekende waarden kunnen zijn. Dat betekent dat de gewasfotosynthesemonitor niet geschikt is om de CO₂ opname van het gewas in de praktijk continu te kunnen meten met de gewenste nauwkeurigheid.

5.3 Mogelijkheden om op andere wijzen de gewasfotosynthese te bepalen

Bij alle testen van de gewasfotosynthesemonitor is ook meegerekend met het gewasgroeimodel INTKAM, dat naast groei en productie ook de momentane gewasfotosynthese en gewasverdamping berekend. Dit model is al vaak gevalideerd, en geeft betrouwbare waarden voor de gewasfotosynthese, zoals ook bleek uit de vergelijking met de gewasfotosynthesemonitor. Daarmee zou INTKAM een (goede) mogelijkheid zijn de gewasfotosynthese in te schatten. Daarbij moet opgemerkt worden dat er in de fase die voorafging aan dit project workshops met telers zijn gehouden, waarin de telers aangaven wat zij belangrijk vonden voor een gewasfotosynthesemonitor. Een van de dingen die zij noemden was dat een monitor echt moest meten, en niet een rekenregel of een model was, omdat die geen rekening houdt met een gewas dat niet reageert zoals verwacht. Dat betekent dat om INTKAM toepassing te doen laten vinden, het gekoppeld zou moeten worden aan metingen die laten zien dat het gewas reageert zoals verwacht mag worden. Een mogelijkheid is om op basis van chlorofylfluorescentiemetingen (Plantivity of CropObserver) te laten zien dat de lichtbenutting in de fotosynthese volgens verwachting is, en de Stomatasensor of klimaatmetingen, om te laten zien dat de huidmondjes voldoende ver open staan om niet beperkend te zijn voor de CO₂ opname.

Literatuur

Baldocchi D.D., 2003.

Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology* 9: 479-492.

Dieleman A., de Gelder A., Janse J., Lagas P., Eveleens B., Qian T., Elings A., Steenhuizen J., Stanghellini C., Nederhoff E., Savvides A., Farneti B., de Visser R., Marcelis L., 2012.

Verticale temperatuurgradiënten in geconditioneerde kassen. Effecten op groei, ontwikkeling en onderliggende processen bij tomaat. Wageningen UR Glastuinbouw Rapport GTB-1122.

Dieleman A., Bontsema J., Jalink H., Snel J., Kempkes F., Voogt J., Pot S., Elings A., Jalink V., Meinen E. 2016.

Plantmonitoring op basis van fotosynthese sensoren. Ontwikkelen en testen van sensoren. Wageningen UR Glastuinbouw Rapport GTB-1405.

Dueck T., Kempkes F., de Visser P., Lagas P., De Groot M., 2015.

Besparen op Groeilicht en Warmte bij Gerbera. Wageningen UR Glastuinbouw Rapport GTB-1377.

Goudriaan J., 1986.

A simple and fast numerical method for the computation of daily totals of crop photosynthesis. *Agricultural and Forest Meteorology* 38: 249-254.

Goudriaan J., van Laar H.H., 1994.

Modelling potential crop growth processes. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 238 pp.

Farquhar G.D., Von Caemmerer S., Berry J.A., 1980.

A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta* 149: 78-90.

Farquhar G.D., Von Caemmerer S. 1982.

Modelling of photosynthetic response to environmental conditions; *Encyclopedia of plant physiology new series* vol. 1: 549 - 582.

Kittas C., Bartzanas T., Jaffrin A., 2003.

Temperature gradients in a partially shaded large greenhouse equipped with evaporative cooling pads. *Biosystems Engineering* 81 (1): 87-94

Marcelis L.F.M., van den Boogaard R., Meinen E., 2000.

Control of crop growth and nutrient supply by the combined use of crop models and plant sensors.

Proceedings Int. Conf. Modelling and Control in Agriculture, Horticulture and Postharvest Processing. IFAC, pp. 351-356.

Spitters C.J.T., van Keulen H., van Kraalingen D.G.W., 1989.

A simple and universal crop growth simulator: SUCROS87. In: R. Rabbinge, S.A. Ward and H.H. Van Laar (Editors), *Simulation and systems management in crop protection. Simulation Monographs* 32. Pudoc, Wageningen, pp.147-181.

Voogt J., Van Weel P., 2008.

Climate control based on stomatal behavior in a semi-closed greenhouse system 'Aircokas'. *Acta Horticulturae* 797: 151-156.

Bijlage 1 Gevoeligheidsanalyse van de gewasfotosynthesemonitor

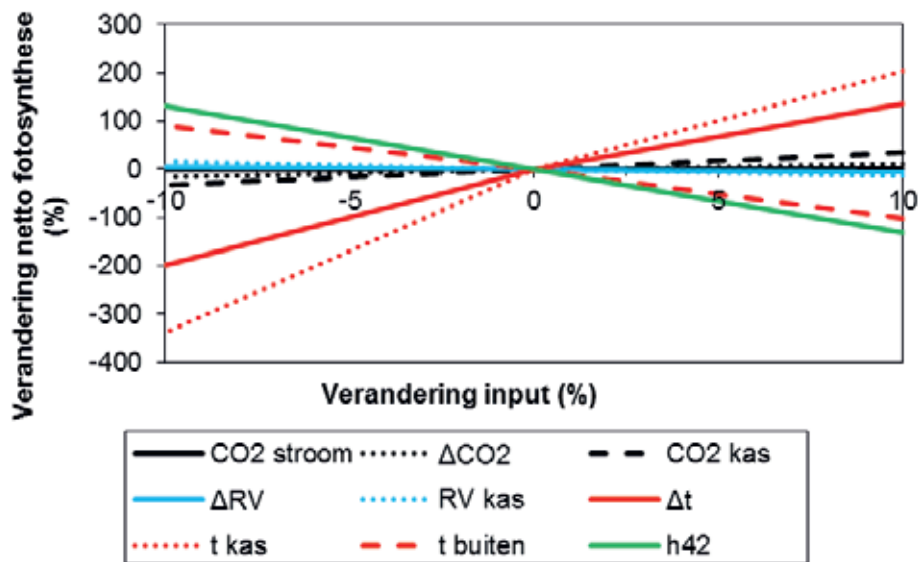
Om te kunnen bepalen voor welke factoren de gewasfotosynthesemonitor het meest gevoelig was, hebben wij verschillende inputs voor het model veranderd en dan voor praktijkbedrijf 1 doorgerekend hoe sterk de netto fotosynthese veranderd was tegenover de situatie met de originele inputs. Deze inputs waren alle soorten data, die het model nodig heeft om de output te kunnen berekenen:

- CO_2 *stroom*: dosering van CO_2 in de kas.
- ΔCO_2 : verschil van CO_2 concentratie binnen en buiten de kas.
- CO_2 *kas*: CO_2 concentratie in de kas.
- ΔRV : verschil van relatieve vochtigheid van de lucht binnen en buiten de kas.
- RV *kas*: relatieve vochtigheid in de kas.
- Δt : temperatuurverschil binnen en buiten de kas.
- t *kas*: kastemperatuur.
- t *buiten*: buitentemperatuur.
- $h42$: gesommeerde verwarming vermogen door drie verschillende verwarmingssystemen (buisrail, groeibuis en lampen).

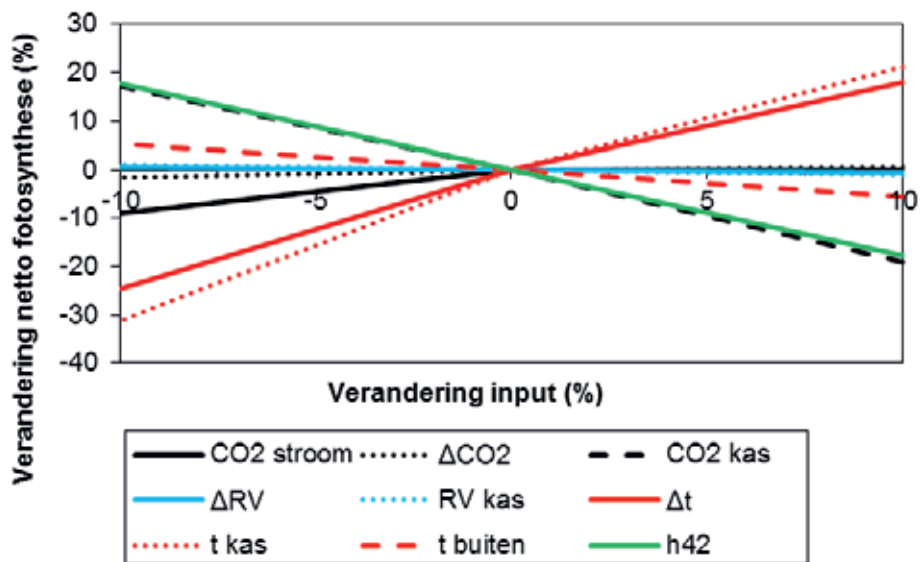
De inputs werden voor vijf gekozen dagen (8 januari, 17 maart, 18 maart, 19 april en 20 april) met 10% verhoogd of 10% verlaagd. De gevoeligheidsanalyse is gebaseerd op 19 berekeningen per dag (9 inputs x 2 scenario's + scenario zonder verandering in inputs).

De resultaten, te zien in Figures 3.52-3.56, laten een aantal dingen zien: het model is alle dagen extreem gevoelig voor temperatuur-gerelateerde inputs. Dit is bijzonder opvallend voor kastemperatuur, het verschil tussen binnen-en buitentemperatuur en de gesommeerde verwarming ('h42'), en minder voor de buitentemperatuur. Dat betekent ook dat de gewasfotosynthesemonitor gevoelig is voor alles wat de ventilatie beïnvloedt. Als deze inputs niet nauwkeurig zijn, kan de voorspelling van de gewasfotosynthese door de gewasfotosynthesemonitor ook niet nauwkeurig zijn. Aan de andere kant is het model vrij ongevoelig voor onzekerheden in RV. Inputfactoren gerelateerd aan de CO_2 concentratie (CO_2 concentratie in de kas, CO_2 dosering, en het verschil tussen CO_2 concentratie binnen en buiten de kas) hadden, afhankelijk van de dag, een kleinere of grotere invloed op de gevoeligheid van het model.

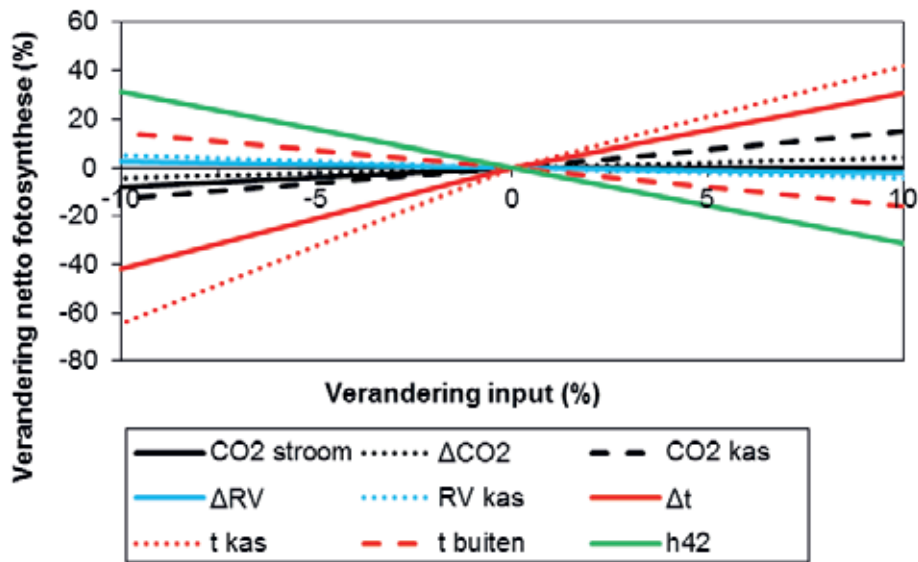
Verder was het opvallend dat de algemene gevoeligheid van het model voor veranderingen in de invloedfactoren op sommige dagen veel hoger was dan op andere dagen. Dit lijkt met de gemiddelde gewasfotosynthesesnelheid te maken te hebben, die het model voor een bepaalde dag berekent: hoe hoger die was, hoe lager de gevoeligheid van de gewasfotosynthesemonitor voor veranderingen in de inputs (Figuur 6). Verder was het model gevoeliger voor onderschattingen (gemiddelde verandering netto fotosynthese bij 10% kleinere inputs: 44%) dan voor overschattingen (gemiddelde verandering netto fotosynthese bij 10% hogere inputs: 35%).



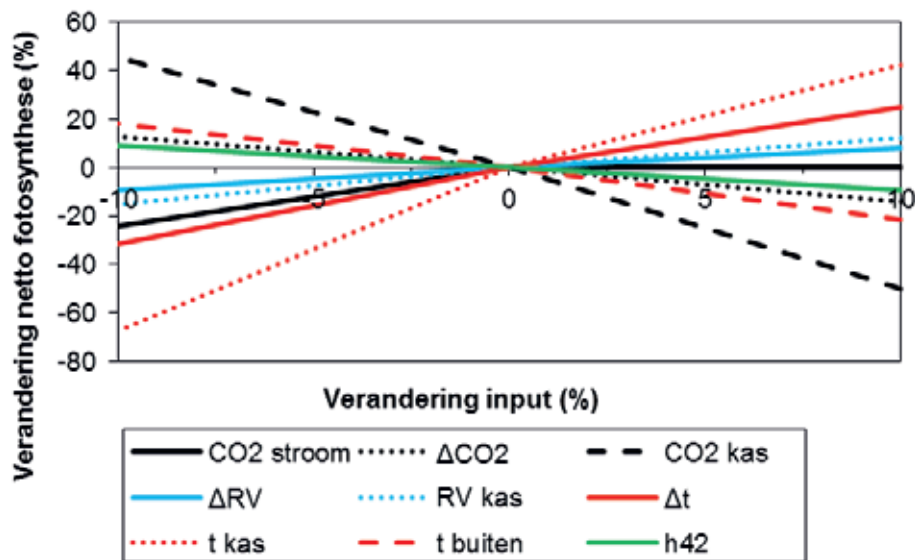
Figuur 1 Resultaten van gevoeligheidsanalyse van het gewasfotosynthesemonitor op 8 januari.



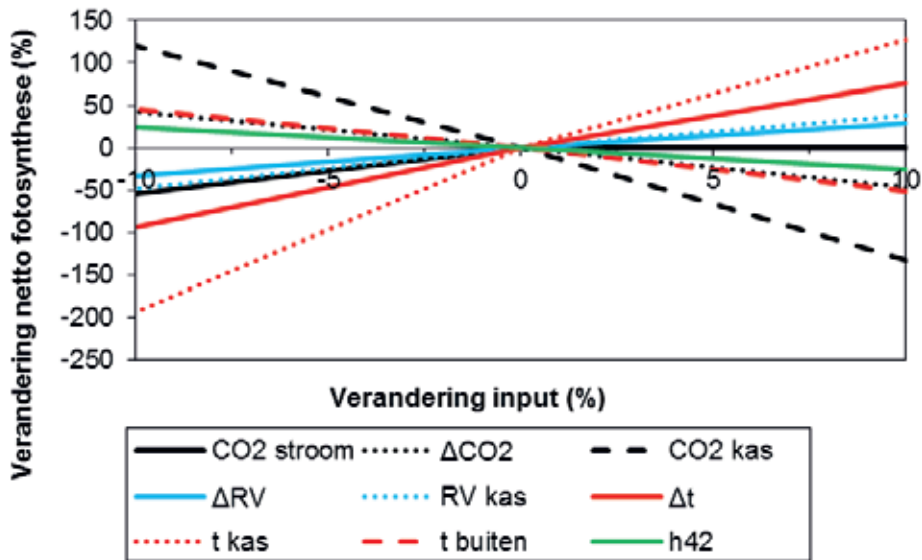
Figuur 2 Resultaten voor gevoeligheidsanalyse van het gewasfotosynthesemonitor op 17 maart.



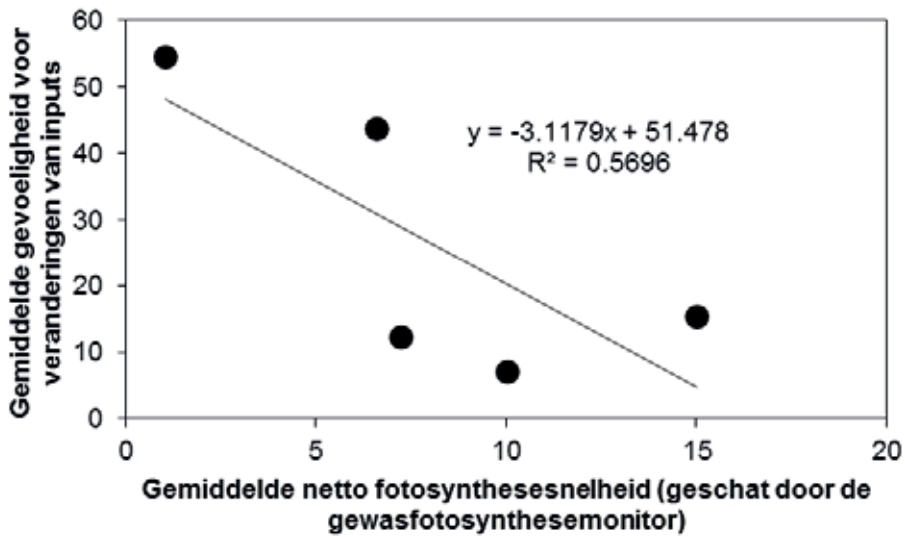
Figuur 3 Resultaten van gevoeligheidsanalyse van het gewasfotosynthesemonitor op 18 maart.



Figuur 4 Resultaten van gevoeligheidsanalyse van het gewasfotosynthesemonitor op 19 april.



Figuur 5 Resultaten van gevoeligheidsanalyse van het gewasfotosynthesemonitor op 20 april.



Figuur 6 Verhouding van de gemiddelde fotosynthesesnelheid, en de gemiddelde gevoeligheid voor veranderingen van inputfactoren, van het gewasfotosynthesemonitor op vijf gekozen dagen.

To explore
the potential
of nature to
improve the
quality of life



Wageningen University & Research,
BU Glastuinbouw
Postbus 20
2665 ZG Bleiswijk
Violierenweg 1
2665 MV Bleiswijk
T +31 (0)317 48 56 06
F +31 (0) 10 522 51 93
www.wur.nl/glastuinbouw

Glastuinbouw Rapport WPR-712

Wageningen University & Research, BU Glastuinbouw initieert en stimuleert de ontwikkeling van innovaties gericht op een duurzame glastuinbouw en de kwaliteit van leven. Dat doen wij door toepassingsgericht onderzoek, samen met partners uit de glastuinbouw, toeleverende industrie, veredeling, wetenschap en de overheid.

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen WUR bundelen 9 gespecialiseerde onderzoeksinstituten van stichting DLO en WUR hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 6.000 medewerkers en 9.000 studenten behoort WUR wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.