



Plantmonitoring op basis van fotosynthese sensoren

Ontwikkelen en testen van sensoren

Anja Dieleman¹, Jan Bontsema¹, Henk Jalink², Jan Snel^{1,5}, Frank Kempkes¹, Jan Voogt³, Sander Pot⁴, Anne Elings¹, Vincent Jalink² en Esther Meinen¹

Rapport GTB-1405

1 Wageningen UR Glastuinbouw, 2 PhenoVation, 3 Hoogendoorn growth management, 4 PlantDynamics, 5 Adviesbureau JFH Snel

Referaat

Het basisproces voor de groei en productie van een gewas is de fotosynthese. Het meten van de gewasfotosynthese is dus van belang om goed te monitoren hoe het gewas er voor staat en of het kasklimaat is ingesteld naar de behoefte van het gewas. In dit project zijn twee meetsystemen ontwikkeld en getest om de gewasfotosynthese te meten. (1) De gewasfotosynthesemonitor is een soft sensor die de CO₂ opname van een hele kas met gewas kan berekenen. Dit doet deze monitor op basis van de balans tussen enerzijds CO₂ dosering en anderzijds verlies van CO₂ door ventilatie en gewasfotosynthese. Door de CO₂ concentratie en de luchtvochtigheid binnen en buiten de kas te meten kan de gewasfotosynthese berekend worden. (2) De nieuwe fluorescentiesensor die ontwikkeld is, de CropObserver, meet de efficiëntie van de lichtbenutting als maat voor de fotosynthese van een groot oppervlakte gewas (3 x 3 m²). Het gewas wordt belicht met korte laserlichtpulsjes bovenin de kas, de sensor meet het terugkomende fluorescentiesignaal. Beide nieuwe sensoren zijn begin 2014 getest in een tomatengewas. De eerste testen waren veelbelovend. De sensoren hebben zonder problemen gefunctioneerd en leverden een dagverloop van de fotosynthese op, dat redelijk tot goed overeen kwam met referentiemetingen.

Abstract

The basic process for crop growth and production is photosynthesis. Measuring crop photosynthesis is therefore important to monitor the status of the crop and whether the greenhouse climate is set to the needs of the crop. In this project, two monitoring systems for crop photosynthesis were developed and tested. (1) The crop photosynthesis monitor is a soft sensor that can calculate the CO₂ uptake of an entire crop. The basis for these calculations are the balance between CO₂ supply and CO₂ loss via ventilation and crop photosynthesis. By measuring the CO₂ concentration and humidity inside and outside the greenhouse, the crop photosynthesis can be calculated. (2) The CropObserver is a fluorescence sensor that measures the light use efficiency of photosynthesis of a large crop area (3 x 3 m²). The crop receives light pulses from a laser in the top of the greenhouse, the sensor measures the fluorescence signal of the crop. Both sensors were tested in a tomato crop in 2014 with promising results. The sensors functioned without problems and delivered patterns of daily photosynthesis which matched the reference measurements reasonably well up to well.

Rapportgegevens

Rapport GTB-1405

Projectnummer: 3742198000

Disclaimer

© 2016 Wageningen UR Glastuinbouw (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek), 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.wageningenUR.nl/glastuinbouw. Wageningen UR Glastuinbouw.

Wageningen UR 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 UR 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
	Voorwoord	7
1	Inleiding	9
	1.1 Plantmonitoring	9
	1.2 Fotosynthesesensoren	10
	1.3 Doelstellingen	11
	1.4 Leeswijzer	11
2	Fotosynthese en fluorescentie	13
	2.1 Fotosynthese	13
	2.2 Fluorescentie	14
3	Ontwikkeling van de monitoringsystemen	17
	3.1 Gewasfotosynthesemonitor	17
	3.1.1 Wat is het werkingsprincipe van dit systeem?	17
	3.1.2 Wat was er al voor dit project?	17
	3.1.3 Wat is er in dit project gedaan aan de gewasfotosynthesemonitor?	18
	3.1.4 Resultaten	18
	3.2 CropObserver	19
	3.2.1 Wat is werkingsprincipe van dit systeem?	19
	3.2.2 Wat was er al voor dit project?	20
	3.2.3 Wat is er in dit project gedaan aan de CropObserver?	20
	3.2.4 Resultaten	20
	3.3 Micro-Moni-PAM	22
	3.3.1 Wat is werkingsprincipe van dit systeem?	22
	3.3.2 Wat was er al voor dit project?	23
	3.3.2.1 Micro-Moni-Set	23
	3.3.2.2 Data-acquisitie, opslag en verwerking	24
	3.3.2.3 Methode voor berekenen ETR gewas	25
	3.3.2.4 Verband tussen ETR en PAR	25
	3.3.2.5 PAR verdeling in gewas	26
	3.3.3 Omrekening naar verdeling fotosynthese over de gewaslagen	27
	3.3.4 Wat is er in dit project aangepast aan de MicroMoniPAMs?	28
	3.3.5 Resultaten	28
	3.4 Stomata sensor	30
	3.4.1 Wat is het werkingsprincipe van dit systeem?	31
	3.4.2 Wat was er al voor dit project?	31
	3.4.3 Wat is er in dit project aangepast aan de stomatasensor?	32
	3.4.4 Resultaten	32
	3.5 Opschalen van de handmatige fotosynthesemetingen naar gewasfotosynthese	33
	3.5.1 Wat is het werkingsprincipe van dit systeem?	33
	3.5.2 Wat was er al voor dit project?	33
	3.5.3 Resultaten	34

4	Beschrijving experiment	35
4.1	Experiment	35
4.2	Selectie van dagen	35
5	Resultaten van de sensoren	37
5.1	Resultaten gewasfotosynthesemonitor	37
5.2	Resultaten van het opschalen van de bladfotosynthese naar gewasfotosynthese	39
5.3	Vergelijk gewasfotosynthesemonitor met bladfotosynthesemetingen opgeschaald naar gewasfotosynthese	41
5.4	Resultaten van de CropObserver	43
5.5	Resultaten van de Micro MoniPams	46
5.6	Vergelijk van de CropObserver met de Micro Moni PAMs	48
5.7	Resultaten van gelijktijdige metingen van CO ₂ opname en fluorescentie	49
5.8	Resultaten van de Stomatasensor	51
6	Conclusies en aanbevelingen	59
6.1	Inleiding	59
6.2	De gewasfotosynthesemonitor	59
6.2.1	Resultaten	59
6.2.2	Conclusies	60
6.2.3	Aanbevelingen	61
6.3	CropObserver	61
6.3.1	Resultaten	61
6.3.2	Conclusies	62
6.3.3	Aanbevelingen	62
7	Publicaties en communicatie	63
8	Literatuur	65
	Bijlage I Kasklimaatparameters geselecteerde dagen	67
	Bijlage II Resultaten berekeningen gewasfotosynthesemonitor op de geselecteerde dagen	77

Samenvatting

Fotosynthesemetingen

In de glastuinbouw is licht een belangrijke productiefactor. Het licht wordt in de fotosynthese gebruikt om CO₂ om te zetten in assimilaten om daarmee groei mogelijk te maken. In de winter wordt er veel belicht om het schaarse natuurlijk licht aan te vullen, met grote consequenties voor het elektriciteitsgebruik. Daarmee heeft het optimaal gebruiken van licht in de fotosynthese directe gevolgen voor het energie- en elektriciteitsgebruik. Het monitoren van de fotosynthese kan dus bijdragen aan een aanzienlijke besparing op energie. Op dit moment zijn er geen instrumenten commercieel beschikbaar waarmee telers de fotosynthese kunnen monitoren om op basis daarvan het klimaat bij te sturen (zoals eerder of meer schermen en gedurende bepaalde momenten minder of helemaal niet belichten kan sturen). Veel telers hebben aanwijzingen dat op bepaalde momenten de fotosynthese niet optimaal is, maar missen de mogelijkheden om er op te sturen, juist in een periode dat de teelt veel energie-input vraagt. Met een goede monitor van de fotosynthese lijkt een besparing van 15% op het energiegebruik mogelijk.

Daarom zijn begin 2014 door Wageningen UR Glastuinbouw en PhenoVation twee nieuwe fotosynthesesensoren ontwikkeld, de gewasfotosynthesemonitor en de CropObserver, en zijn deze getest in een proef met belichte tomaten. De sensoren en de conclusies van de testen staan hieronder beschreven.

Gewasfotosynthesemonitor

De gewasfotosynthesemonitor is een soft sensor die de CO₂-opname van een hele kas kan berekenen. De monitor bepaalt de gewasfotosynthese uit het verschil van de CO₂-dosering en het verlies van CO₂ door de ramen. De CO₂-dosering wordt bepaald door de klimaatcomputer en is dus bekend. Het ventilatieverlies wordt berekend met de ventilatiemonitor, die in eerdere projecten is ontwikkeld. De voordelen van de gewasfotosynthesemonitor zijn dat de CO₂-opname van het hele gewas wordt bepaald, dat er geen dure sensor voor nodig is, dat het onderhoudsvrij is en dat er continu, on-line gemeten kan worden. Uit de testen van de gewasfotosynthesemonitor bleek dat het verloop van de fotosynthese over de dag goed overeen kwam met handmatige metingen en de opschaling hiervan naar gewasfotosynthese. Een punt voor verbetering is nog dat de resultaten van de gewasfotosynthesemonitor gevoelig zijn voor (snelle) veranderingen in raamopening (dus ventilatie). Echter, in de winterperiode waarin de sensor met name goed gebruikt kan worden bij het ondersteunen van de teler in beslissingen over stoken, schermen of het afschakelen van de lampen zullen de ramen grotendeels gesloten zijn, waarmee dit nadeel mogelijk niet groot zal zijn. Samenvattend kan gezegd worden dat de eerste test van de gewasfotosynthesemonitor veelbelovend was, maar dat er zeker nog praktijktesten en intensieve monitoring nodig zijn voordat deze sensor zijn weg zal kunnen vinden naar de praktijk.

CropObserver

De efficiëntie van de lichtbenutting in de fotosynthese kan bepaald worden door gebruik te maken van fluorescentiemetingen. Wanneer daarnaast ook de huidmondjesopening bekend is, kan de fotosynthese bepaald worden. Voor dit project is een nieuwe fluorescentiesensor ontwikkeld, de CropObserver, die de lichtbenutting in de fotosynthese van een groot (ca. 9 m²) oppervlakte gewas meet. Met deze sensor wordt het gewas belicht met korte lichtpuls van boven uit de kas. De sensor meet de lichtintensiteit op die plaats en het terugkomende fluorescentiesignaal. De sensor is zo geprogrammeerd dat er op een groot aantal plaatsen in een oppervlakte van 3 x 3 m wordt gemeten. Omdat het snelle metingen zijn, ontstaat er in korte tijd een goed beeld van het hele gewas. Voordelen van deze methode zijn dat het de plant ongemoeid laat, dat de metingen snel zijn en dat de sensor zelfs mobiel gemaakt kan worden voor het meten van grotere oppervlaktes in de kas. Een nadeel is dat de efficiëntie van een deel van het fotosyntheseprocessus gemeten wordt, en dat voor het bepalen van de CO₂ opname van het gewas ook de huidmondjesopening bekend moet zijn. Hiervoor zou in een volgend project nog een module ontwikkeld kunnen worden. Uit de testen van de CropObserver bleek dat metingen goed overeen stemmen met de "handmatige" fluorescentiemetingen. Zoals verwacht volgde de efficiëntie van de lichtbenutting in de fotosynthese de instraling op de voet. Samenvattend kan gezegd worden dat de CropObserver klaar lijkt voor de finale praktijktest, waarin nog de nodige aandacht besteed moet worden aan een eenduidige presentatie van de data, zodat direct duidelijk is hoe het gewas functioneert en of er nog iets te verbeteren valt.

Voorwoord

Voor u ligt de rapportage van het project “Plantmonitoring op basis van fotosynthesesensoren”. Dit project heeft een lange aanloop gehad, waarbij in een aantal kleine projecten de behoefte van de teler om fotosynthese in hun teelten te kunnen meten is gepeild. Uit deze projecten bleek duidelijk dat de telers zeer geïnteresseerd waren in de mogelijkheid de momentane gewasfotosynthese te kunnen meten. Omdat daar nog geen instrumenten commercieel verkrijgbaar voor waren, hebben Wageningen UR Glastuinbouw en PhenoVation twee fotosynthesesensoren ontwikkeld die de gewasfotosynthese van een groot oppervlakte gewas kunnen meten. In dit rapport staan de beide sensoren, de gewasfotosynthesemonitor en de CropObserver beschreven. De sensoren zijn vervolgens getest in een van de afdelingen met een LED-belichte tomatenteelt van het project “Tomaten belichten met minder elektriciteit” en vergeleken met referentiemetingen (Micro-Moni-PAMs) en modelberekeningen. In deze teelt heeft ook de Stomatasensor van Hoogendoorn meegelopen om na te gaan of er een relatie gelegd kon worden tussen de gemeten gewasfotosynthese en de huidmondjesopening.

Het project heeft mooie resultaten opgeleverd: er zijn nu twee sensoren ontwikkeld waarmee de efficiëntie van de fotosynthese van een groot oppervlakte gewas gemeten kan worden (CropObserver) en de CO₂ opname van een kas (gewasfotosynthesemonitor) die gedurende de hele proef zonder problemen hebben gefunctioneerd. De verbeterpunten die in dit project geconstateerd zijn, zullen in een volgend project aangepakt worden.

De voortgang van het project werd periodiek besproken in de begeleidingscommissie van dit project, waaraan Nic van Roosmalen, Ted Duijvestijn, Pieter van Staalduinen, Hans Swinkels, Jan Voogt (Hoogendoorn), Joost Veenman (Hortimax), Peter Kamp en Patrick Dankers (Priva), Leo Oprel en Dennis Medema deelnamen.

Het project werd uitgevoerd in het kader van het programma Kas als Energiebron en gefinancierd door Productschap Tuinbouw en het Ministerie van EZ.

Wij willen allen van harte bedanken voor hun bijdragen aan dit project.

Wageningen/Bleiswijk, augustus 2016

Anja Dieleman

1 Inleiding

1.1 Plantmonitoring

In de afgelopen jaren is het energiegebruik in de glastuinbouw steeds verder teruggebracht door het gebruik van (meerdere) schermen, verlagen van de buistemperaturen, gecontroleerde ontvochtiging en efficiënter belichten. Al deze acties hebben effecten op het kasklimaat en daarmee ook op de plantprocessen en uiteindelijk op de ontwikkeling, groei en productie van het gewas. Vaak zijn de reacties van het gewas pas na verloop van uren of dagen te zien (aan bijvoorbeeld kopdikte, bladlengte, gemiddeld vruchtgewicht, productie), terwijl de beslissingen om eerder of langer te schermen of wel of niet te belichten op minuten- tot uurbasis genomen worden. Het zou dan ook wenselijk zijn op deze zelfde korte tijdschaal aan het gewas te kunnen zien wat de gevolgen van een actie (schermen, belichten, CO₂ doseren, etc.) betekenen voor het gewas (bijvoorbeeld aan de planttemperatuur of fluorescentie).

Het is tot op heden niet inzichtelijk voor de tuinder wat energiebesparende maatregelen betekenen voor de plantprestaties, omdat de efficiëntie van het gewas niet direct gemeten kan worden. Wanneer het effect van een actie wel direct terug te zien zou zijn in de reactie van de plant, zal het makkelijker zijn beslissingen te nemen zonder een zekerheidsmarge in acht te nemen. Dat kan leiden tot een besparing in het energiegebruik.

Het teeltproces is een complex geheel van korte- en lange termijn effecten waarvan we op heel veel punten de samenhang nog niet goed begrijpen. Maar één ding is wel zeker en dat is dat voor groei van de plant het fotosynthese proces onontbeerlijk is, en dat we dus moeten voorkomen dat dit proces stagneert door verkeerde combinaties van omstandigheden zoals PAR licht, temperatuur, luchtvochtigheid en CO₂. Het monitoren van dit proces kan in principe op meerdere manieren gedaan worden. Eén daarvan is een directe of indirecte meting aan het fotosynthese proces zelf, via fluorescentie of de CO₂ opname. Een andere benadering is het monitoren van het huidmondjes gedrag. Met de huidmondjes regelt de plant zelf de balans tussen wateropname, verdamping en bladtemperatuur, hetgeen ook gevolgen kan hebben voor de opname van CO₂.

Verder is het van groot belang niet alleen te monitoren of het groeiproces goed verloopt, maar ook de verbanden te kunnen leggen naar de verschillende klimaatfactoren. Hiervoor is het nodig om alle relevante groeifactoren te meten en deze in een samenhangend model te koppelen. De verwachting is dat met een optimalisatie van het groeiklimaat een hoge effectiviteit van de plant kan worden bereikt met een maximale benutting van het zonlicht en tegelijk een minimum aan verbruik van fossiele energie.

Er zijn op dit moment meerdere klimaat- en plantmonitoringsystemen (commercieel) verkrijgbaar. Dit zijn bijvoorbeeld:

- Planttemperatuurmeters. Meten de temperatuur van het bovenste deel (kop) van 5 tot 10 m² gewas. Kan gekoppeld worden aan de kasklimaatregeling.
- Weeggoten. Bepalen watergift, wateropname, verdamping en gewasgroei door het afzonderlijk meten van het gewicht van de mat, de planten en de drain.
- Huidmondjessensor. Berekent openingstoestand van de huidmondjes op basis van kasklimaat en planttemperatuur.
- Sapstroommeter. Meet de snelheid en richting van vochttransport door de plant. Is daarmee een maat voor de waterhuishouding van de plant.
- Bladdiktemeter. Meet de bladdikte als maat voor de waterhuishouding van de plant.
- Plantivity. Meet de fluorescentie van een stukje blad. Samen met een model voor huidmondjesopening is het signaal een maat voor de fotosynthese.
- Fotosynthesemeter. Meet de CO₂ opname (fotosynthese) van een stukje blad.

De meeste sensoren die commercieel verkrijgbaar zijn en in de praktijk toegepast worden, meten (een deel van) de waterhuishouding van de plant, om daarmee grip te krijgen op de verdamping en de regeling van de luchtvochtigheid in de kas via stoken, ventilatie en schermregeling. Sommige sensoren meten meerdere planten en/of een groot meetoppervlakte (planttemperatuurmeters, weeggoten, huidmondjessensor), andere sensoren meten slechts aan één plant (sapstroommeter, bladdiktemeter) of een deel van een blad (Plantivity, fotosynthesemeter). Geen van de genoemde sensoren is tot nu toe zodanig gangbaar in de praktijk dat de sensor op praktisch alle bedrijven geïmplementeerd is.

Dit rechtvaardigt de vraag wat de "ideale" plantsensor voor de glastuinbouw dan zou moeten meten. Wanneer we bedenken dat het kasklimaat wordt ingesteld om een optimale groei en productie te realiseren, zou een sensor zich vooral op de processen assimilatenaanmaak en -verdeling moeten richten.

1.2 Fotosynthesesensoren

In 2013 zijn twee workshops gehouden in het kader van het project "Energie besparen door sturing van licht en CO₂ op basis van gewasbehoefte" over het regelen van het kasklimaat op basis van fotosynthesemetingen. Beide workshops waren goed bezocht, hetgeen aangaf dat het onderwerp van plantmonitoring op het gebied van fotosynthese leeft onder telers. De algehele conclusie van de workshops was dat het meten van fotosynthese de klimaatregeling en daarmee de teelt ten goede zou komen, en dat we zeker door zouden moeten meten met de ontwikkeling van een goed, robuust en betrouwbaar meetsysteem voor de gewasfotosynthese.

In de workshops werden de eisen waaraan goede plantsensoren zouden moeten voldoen als volgt samengevat:

- De sensoren moeten bij voorkeur het gewas niet raken, maar op afstand kunnen meten zodat ze de plant niet beïnvloeden.
- De sensoren moeten een groter oppervlakte of meerdere planten meten.
- Ze moeten een betrouwbaar signaal geven.
- Ze moeten robuust, storingsvrij en goedkoop in onderhoud zijn.
- Ze moeten een on-line continu signaal geven dat makkelijk te koppelen of te vergelijken is met klimaatdata.
- De sensor moet eenduidige gegevens leveren met een duidelijke weergave zodat in één oogopslag duidelijk is wat er met het gewas gebeurt.
- De sensor zou advies moeten kunnen geven over aanpassingen in klimaatregeling.

In dit project hebben we sensoren ontwikkeld en getest die een goed beeld geven van de processen die momentaan reageren op aanpassingen in het kasklimaat, en vooral van belang zijn voor de groei en productie. Dat betekent dat we ons gericht hebben op sensoren voor de aanmaak van assimilaten. Daarnaast is in dit project een sensor ingezet die zich richt op het huidmondjesgedrag, omdat deze betrekking heeft op klimaatfactoren die van belang zijn voor het energiegebruik in een kas.

Dit project is uitgevoerd in samenwerking met een aantal bedrijven die geïnteresseerd zijn in de mogelijkheden van fotosynthesemetingen op gewasniveau. In dit project hebben Hoogendoorn, Hortimax en Priva hun kennis en ervaring in op het gebied van het monitoren van gewassen en het regelen van kasklimaat ingebracht. PlantDynamics heeft hun ervaring met het meten van fotosynthese en het vertalen van deze meetresultaten naar aanbevelingen ten aanzien van de regeling van het kasklimaat ingebracht. De ontwikkeling van de CropObserver is in eerste instantie gedaan door Wageningen UR Glastuinbouw, later zijn de betrokken medewerkers verzelfstandigd in PhenoVation.

1.3 Doelstellingen

Energiedoelstellingen

Het doel is van dit voorstel is te komen tot 15-20% energiebesparing door een energie-efficiëntere klimaatregeling, met name op gebied van belichting, CO₂ dosering en inzetten van schermen.

- 10-15% energiebesparing door het efficiënter inzetten van belichting (Volgens het "Position paper licht" (KEMA en Wageningen UR, 2007) is een energiebesparing van 10-15% mogelijk door een betere timing van de belichting)
- 5% energiebesparing door de instellingen van het schermdoek, en de temperatuur- en vochtdeficietinstellingen aan te passen aan de fotosynthese.
- Dit onderzoek draagt bij aan de doelstelling om de CO₂ emissie met 50% te verlagen door CO₂ voornamelijk te doseren op momenten dat de opname door het gewas hoog is.

Technische doelstellingen

- Ontwikkelen van meetsystemen voor de gewasfotosynthesesnelheid, waaruit de lichtbenuttingsefficiëntie bepaald kan worden.
- Koppelen van de nieuw ontwikkelde sensoren met bestaande sensoren en/of sensoren die bij bedrijven nog in de ontwikkelfase zitten om een volledig beeld te krijgen van de processen die leiden tot een goede gewasgroei en productie.
- Optimaal af kunnen stemmen van zowel belichting en CO₂ dosering als ook temperatuur en vochtdeficiet op plantprocessen om zo te komen tot een verbeterde plantgroei en productie bij minder inzet van energie
- De meetsystemen moeten resultaten opleveren die voor telers interpreteerbaar en bruikbaar zijn.

1.4 Leeswijzer

In dit project worden twee sensoren ontwikkeld die de fotosynthese van een groot oppervlakte gewas kunnen meten.

De eerste sensor is de *gewasfotosynthesemonitor*, een softsensor die de CO₂ opname van een hele kas kan berekenen. Dit 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 gewasfotosynthese. Door de CO₂ concentratie te meten en het ventilatieverlies te bepalen, kan de gewasfotosynthese berekend worden.

De tweede sensor is de *CropObserver*, een fluorescentiesensor, die een beeld geeft van de efficiëntie van de lichtbenutting in de fotosynthese van het gewas. De CropObserver belicht het gewas met korte laserlichtpuls van boven uit de kas. De sensor meet het terugkomende fluorescentiesignaal, en is zo geprogrammeerd dat er steeds op een andere plek in een oppervlakte van 3 x 3 m wordt gemeten. Omdat het snelle metingen zijn, ontstaat er in korte tijd een goed beeld van de fotosynthese van het hele gewas.

In hoofdstuk 2 wordt een aantal algemene principes van fotosynthese- en fluorescentiemetingen beschreven.

In hoofdstuk 3 staat beschreven in hoeverre de gewasfotosynthesemonitor en de CropObserver in dit project ontwikkeld zijn, en welke aanpassingen en testen er gedaan zijn. Om deze twee sensoren goed te kunnen valideren, worden de metingen vergeleken met de metingen van een aantal andere sensoren. De gegevens van de gewasfotosynthesemonitor worden vergeleken met handmatige fotosynthesemetingen aan een gewas, die met een model opgeschaald worden naar gewasfotosynthese (zie hoofdstuk 3.5). De gegevens van de CropObserver worden vergeleken met een aantal kleine fluorescentiemeters die op verschillende hoogtes in het gewas worden gehangen (hoofdstuk 3.3). De metingen van deze Micro Moni PAMs worden opgeschaald naar fluorescentie van een heel gewas en geven zo een beeld van de efficiëntie van de fotosynthese van het hele gewas. Verder wordt de huidmondjesopening bepaald met behulp van de Stomatasensor van Hoogendoorn (zie hoofdstuk 3.4).

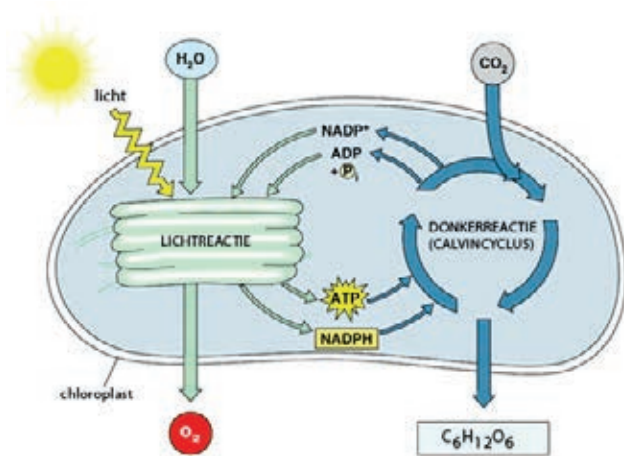
De sensoren zijn beproefd in een tomatenexperiment bij Wageningen UR Glastuinbouw in Bleiswijk, dat staat beschreven in hoofdstuk 4. De resultaten van deze testen staan beschreven in hoofdstuk 5 voor de verschillende sensoren. Om een koppeling tussen de gewasfotosynthesemonitor, die CO₂ opname van het gewas meet, en de CropObserver, die efficiëntie van het elektronentransport in de lichtreactie van de fotosynthese meet, mogelijk te maken zijn door PlantDynamics tegelijkertijd aan planten in deze proef fluorescentie- en fotosynthesemetingen gedaan. De resultaten daarvan staan beschreven in hoofdstuk 5.5.

In hoofdstuk 6 worden de conclusies en aanbevelingen uit dit onderzoek beschreven, en in hoofdstuk 7 staat een overzicht van de artikelen in vakbladen en op websites en van de lezingen die er over dit onderwerp gehouden zijn.

2 Fotosynthese en fluorescentie

2.1 Fotosynthese

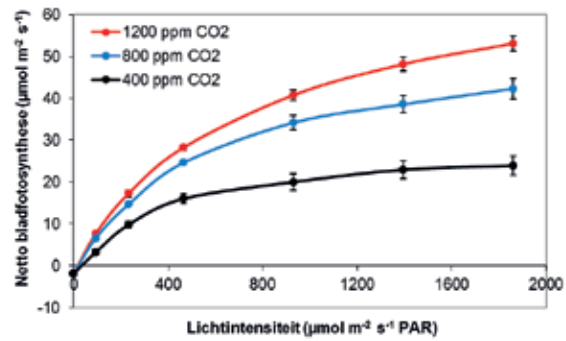
De basis voor de groei van een plant is de fotosynthese. Dit is het proces in de bladeren waarbij CO_2 via de huidmondjes opgenomen wordt en met behulp van de energie uit het licht omgezet wordt in suikers. Hierbij komt zuurstof vrij. De suikers die in de fotosynthese aangemaakt worden zijn de bouwstoffen die een plant nodig heeft om te kunnen groeien. Het fotosyntheseproces bestaat uit twee deelprocessen: de lichtreactie en de donkerreactie (Figuur 1).



Figuur 1 Schematische weergave van de fotosynthese met daarin de deelprocessen van de lichtreactie en de donkerreactie (Calvincyclus)..

In de lichtreactie wordt lichtenergie in de vorm van ATP en NADPH vastgelegd die in de donkerreactie (Calvincyclus) gebruikt wordt voor het vastleggen van CO_2 om suikers te maken. Beide reacties zijn afhankelijk van elkaar: wanneer er geen energie wordt vastgelegd in de lichtreactie (omdat er geen licht is) dan kan er geen CO_2 vastgelegd worden in de donkerreactie. De donkerreactie kan zowel in het donker als in het licht plaatsvinden. Omdat er geen licht voor nodig is (maar wel energie) wordt deze reactie "donkerreactie" genoemd. Een misleidende naam. Het is daarom beter deze reactie CO_2 -bindingsreactie te noemen, omdat dat is wat er in deze reactie gebeurt.

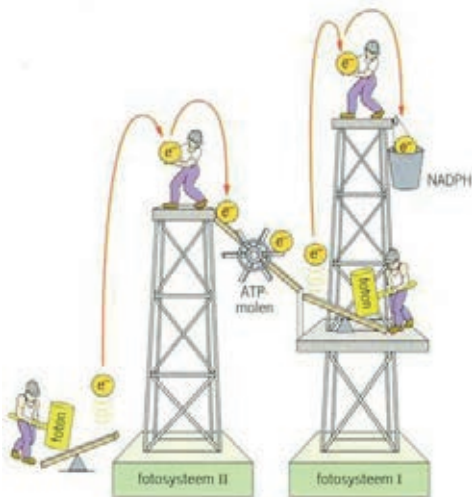
De fotosynthesesnelheid van een blad wordt vooral bepaald door de hoeveelheid licht. Immers, hoe meer lichtenergie er beschikbaar is, hoe beter de vastlegging van CO_2 plaats vindt. Daarnaast is de CO_2 concentratie in de kaslucht een belangrijke factor voor de fotosynthese, omdat dit het substraat is voor de aanmaak van suikers. Als er geen CO_2 meer beschikbaar is, kunnen er geen suikers gevormd worden. Deze relaties kunnen vastgelegd worden door de fotosynthese te meten. De (draagbare) fotosynthesemeters die hiervoor gebruikt worden, klemmen een stukje blad in de meetcuve. Over dat stukje blad wordt een luchtstroom geblazen met een bekende CO_2 concentratie en luchtvochtigheid. Door voor en na het blad de CO_2 concentratie en luchtvochtigheid in de luchtstroom te meten, wordt de verdamping en fotosynthese (CO_2 opname) van dat stukje blad bepaald (Figuur 2). Wanneer dit wordt gedaan bij een reeks lichtintensiteiten en CO_2 concentraties, is de reactie van het blad op licht en CO_2 vast te stellen. In Figuur 2 (rechts) is te zien dat de fotosynthese toeneemt met de lichtintensiteit, totdat de curve afbuigt. Op dat moment is licht niet meer de beperkende factor, maar de hoeveelheid beschikbare CO_2 . Wanneer de CO_2 concentratie wordt verhoogd, neemt de fotosynthese weer toe tot bij een hogere lichtintensiteit en bereikt dan ook een hogere waarde.



Figuur 2 Handmatige fotosynthesemetingen aan tomatenplanten (links) en een lichtresponscurve van de fotosynthese bij drie CO₂ concentraties (rechts).

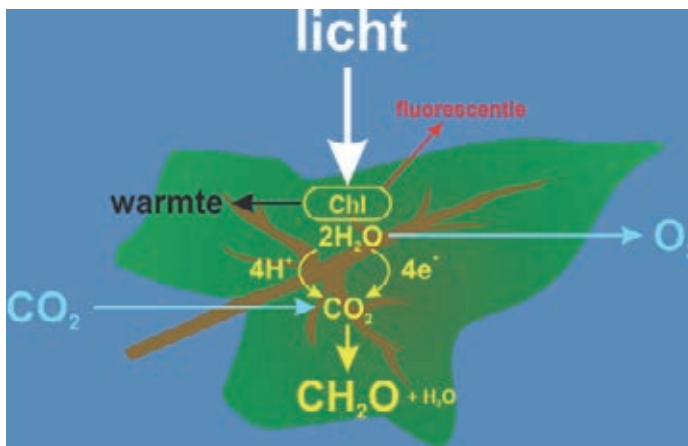
2.2 Fluorescentie

De lichtenergie wordt gebruikt om de elektronen te transporteren door fotosysteem I en fotosysteem II (Figuur 3). Hoe meer lichtdeeltjes worden opgevangen, hoe sneller het elektronentransport plaats vindt. Echter, het is vaak zo dat er meer licht geabsorbeerd wordt dan gebruikt kan worden voor de vorming van NADPH en ATP. Dat kan bijvoorbeeld veroorzaakt worden doordat er op dat moment geen transporteiwitten beschikbaar zijn, de overdracht van de vorige elektronen dan nog niet klaar is of doordat de verwerking van NADPH in de donkerreactie niet snel genoeg gaat. Er worden dan meer elektronen vrijgemaakt in fotosysteem II dan kunnen worden overgedragen op fotosysteem I. De overtollige aangeslagen elektronen vallen dan terug naar de grondtoestand, waarbij licht wordt uitgezonden (fluorescentie). Bij een hogere lichtintensiteit kan het licht minder goed verwerkt worden en is de fluorescentie hoger.



Figuur 3 Schematische weergave van het elektronentransport van fotosysteem II naar fotosysteem I. Als er te veel lichtenergie (elektronen) door de plant geabsorbeerd wordt, worden er meer elektronen aangevoerd in fotosysteem II dan verwerkt kunnen worden. Een deel van deze elektronen valt dan terug naar de grondtoestand, waarbij licht wordt uitgezonden (fluorescentie). Figuur: Linus van der Plas.

Door de fluorescentie te meten, wordt de elektronentransportsnelheid (ETR; R = rate) bepaald. Deze methode maakt gebruik van het principe dat de door het blad geabsorbeerde straling nuttig gebruikt kan worden voor de fotosynthese, veilig afgevoerd kan worden als warmte of uitgestraald kan worden als fluorescentie. Met twee fluorescentiemetingen – één bij omgevingslicht en één bij verzadigend licht – en een meting van het omgevingslicht (PAR) wordt een schatting gemaakt van het eerste deel van het fotosyntheseproces: het elektronentransport (Figuur 4).



Licht = **A** fotosynthese + **W**armte + **F**luorescentie

Bij omgevingslicht: $\mathbf{A/L + W/L + F/L = 1}$

Bij verzadigende lichtpuls: $\mathbf{F/L=0}$

$\mathbf{W/L + A/L = 1}$

$\mathbf{W/F = constant}$

Figuur 4 Schematische weergave van de verdeling van door het blad geabsorbeerde licht naar fotosynthese, fluorescentie en warmte.

Met behulp van fluorescentiemeters kan de efficiëntie van fotosysteem II bepaald worden, zowel in het licht (F_q'/F_m') als na donkeradaptatie en gemeten in het donker (F_v/F_m). Een waarde van de F_v/F_m van 0.79 tot 0.84 is ongeveer de optimale waarde voor de meeste plantensoorten (Maxwell en Johnson, 2000; Kitajima en Butler, 1975). Deze waarde wordt ook wel het rendement genoemd en is eigenlijk het maximale rendement van het elektronentransport van fotosysteem II naar fotosysteem I in de lichtreactie.

In het licht neemt het rendement van de lichtreactie af met toenemende lichtintensiteit. Ook dit is te bepalen door de fluorescentie in het licht te meten (F_q'/F_m'). Wanneer het rendement in het licht vermenigvuldigd wordt met de geabsorbeerde straling (PAR licht), kan de ETR bepaald worden. De ETR is een goede inschatting van de fotosynthese, er van uitgaande dat de huidmondjesopening niet beperkend is voor de opname van CO_2 .

3 Ontwikkeling van de monitoringsystemen

Begin 2014 zijn twee door Wageningen UR Glastuinbouw en PhenoVation twee nieuwe fotosynthesesensoren ontwikkeld, de gewasfotosynthesemonitor en de CropObserver. De resultaten van deze sensoren zijn vergeleken met de Micro MoniPAMs (fluorescentie), handmatige fotosynthesemetingen die met een gewasgroeimodel opgewerkt zijn naar gewasfotosynthese en met de stomatasensor. In dit hoofdstuk worden de verschillende monitoringsystemen toegelicht.

3.1 Gewasfotosynthesemonitor

3.1.1 Wat is het werkingsprincipe van dit systeem?

De gewasfotosynthesemonitor berust op de massabalans van een kas voor CO_2 . Deze massabalans kan weergegeven worden als een weegschaal (Figuur 5). Links op de weegschaal staat de dosering van CO_2 . Rechts op de weegschaal staan de gewasfotosynthese, het verlies van CO_2 door ventilatie en de verandering van de CO_2 concentratie in de kas. Het verlies aan CO_2 bestaat uit opname van CO_2 door het gewas (fotosynthese) en ventilatieverlies aan CO_2 via de ramen. De aanvoer van CO_2 bestaat uit de CO_2 dosering. De toename van de CO_2 concentratie is het verschil tussen het verlies en de aanvoer van CO_2 en bepaalt de toename of afname van de CO_2 concentratie in de kas. In het geval van potgrond of bark als substraat, is er ook een post " CO_2 afgifte door het substraat". Omdat we in dit project werken met tomaat in een inert medium (steenwol), hebben we deze post niet meegenomen.



Figuur 5 CO_2 massa balans van een kas.

Natuurkundig gesproken is de weegschaal altijd in balans. Hiervan wordt bij de fotosynthesemonitor in de berekening van de fotosynthese gebruik gemaakt. Om het ventilatieverlies aan CO_2 te bepalen, wordt gebruik gemaakt van de waarde die de ventilatiemonitor berekent. We gaan er van uit dat de fotosynthese onbekend is. Daarmee is de balans uit evenwicht. Door nu op ieder tijdstip net zolang de opname van CO_2 door de fotosynthese te corrigeren tot de weegschaal weer in evenwicht is, is de fotosynthese te berekenen.

Voor de gewasfotosynthesemonitor zijn de CO_2 concentratie in de kas, de CO_2 dosering, het ventilatievoud en de CO_2 concentratie buiten nodig. De eerste twee worden standaard door de klimaatcomputer geleverd, de derde kan worden berekend door de ventilatiemonitor en voor de vierde is een extra sensor nodig of een aanpassing van de CO_2 meetapparatuur binnen.

3.1.2 Wat was er al voor dit project?

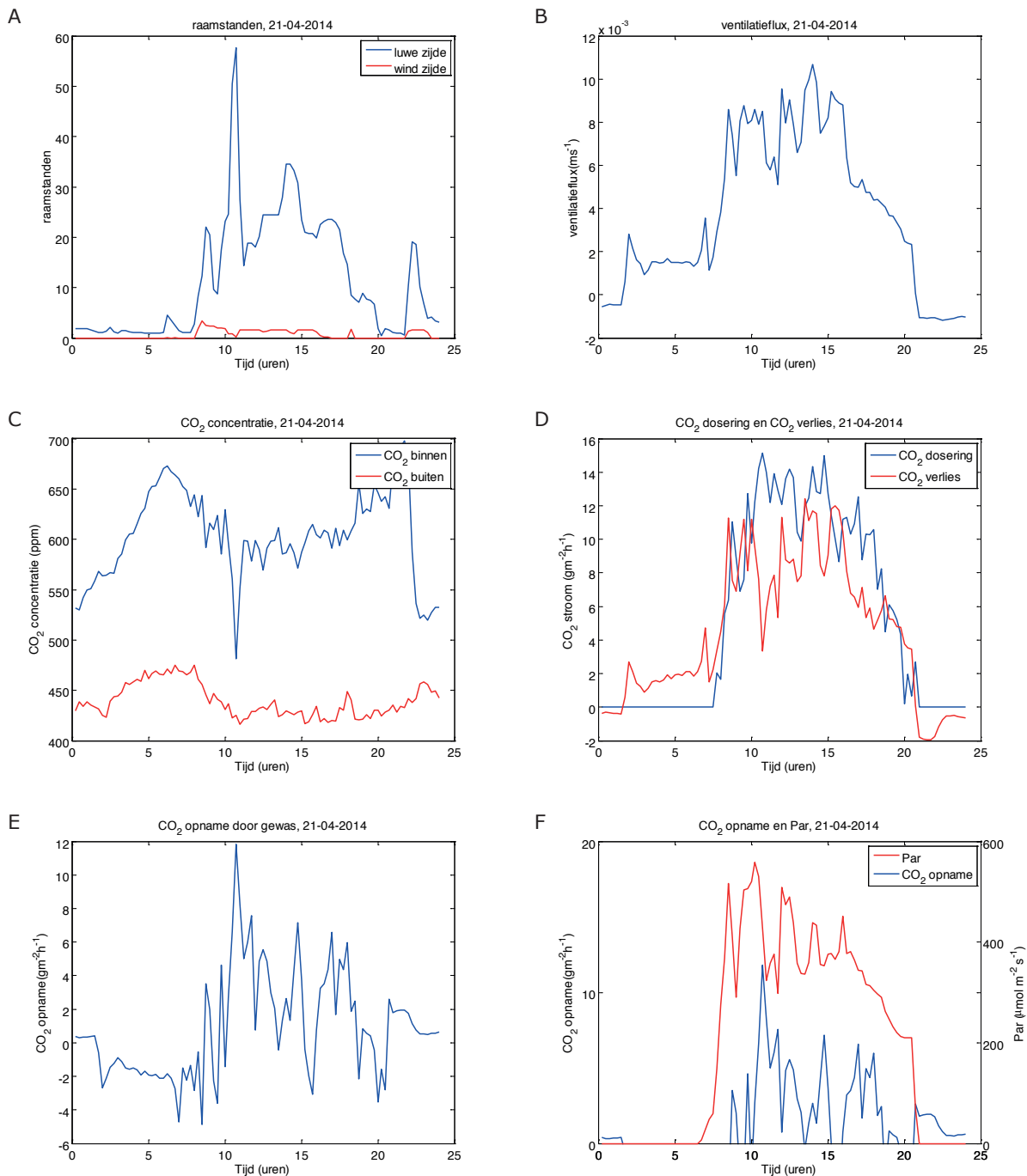
De gewasfotosynthesemonitor borduurt voort op ontwikkeling van voorgaande projecten in het kader van het programma Kas als Energiebron. In Van Henten *et al.* (2006), Bontsema *et al.* (2005, 2006a, 2009) is een ventilatiemonitor beschreven, die online de ventilatieflux van een kas berekend. In Bontsema *et al.* (2007, 2008, 2010, 2011) is dit verder uitgewerkt om ook de verdamping te bepalen en is geprobeerd ook fotosynthese te bepalen, wat toen niet gelukt is.

3.1.3 Wat is er in dit project gedaan aan de gewasfotosynthesemonitor?

In dit project is een nieuwe gewasfotosynthesemonitor ontwikkeld, die gelijktijdig de ventilatieflux, de verdamping (eigenlijk verdamping minus condensatie aan dek) en de fotosynthese op gewasniveau bepaalt, in tegenstelling tot de eerder genoemde resultaten waarbij deze sequentieel werden bepaald. De huidige ontwikkelde methode borduurt voort op werk beschreven in Van Henten *et al.* (2010) en Bontsema (2012). De variatie in de CO₂-concentratie (de opslag van CO₂ in de kas) wordt in dit onderzoek verwaarloosd.

3.1.4 Resultaten

De gewasfotosynthesemonitor heeft meegerekend met een tomatenteelt onder diffuus glas en met LED top- en tussenbelichting (Dieleman e.a., 2015). De kasklimaatdata (5-minuten waarden) worden ingelezen, en op basis hiervan wordt de ventilatieflux berekend (Figuur 6B). Op basis van de CO₂ concentraties binnen en buiten wordt het CO₂ verlies berekend (Figuur 6D). Het verschil in CO₂ dosering en het CO₂ verlies door ventilatie wordt bepaald door de CO₂ opname door het gewas (Figuur 6E en 6F). In onderstaande figuur staan de resultaten van de verschillende stappen van de berekeningen gepresenteerd voor 21 april. Vergelijkbare figuren zijn gemaakt voor alle dagen waarop de fotosynthese is berekend (zie bijlage II).



Figuur 6 Klimaatdata van een afdeling belichte tomaten op 21 april 2014, te weten raamstanden (A), ventilatieflux (B), CO₂ concentratie (C), CO₂ dosering en CO₂ verlies (D), berekende CO₂ opname door het gewas (E) en berekende CO₂ opname en PAR licht (F).

3.2 CropObserver

3.2.1 Wat is werkingsprincipe van dit systeem?

De CropObserver is een meetsysteem dat volledig zelfstandig kan meten van uit de nok van de kas (Figuur 7). Een laserstraal wordt op plantmateriaal gericht via een spiegelsysteem dat bestuurd wordt door de ingebouwde computer. Op deze wijze kan steeds een andere positie van het gewas worden gemeten. Hierbij kan het een oppervlak van 3 x 3 m² bestrijken. Per positie wordt de lichtintensiteit gemeten en hoe efficiënt dit licht wordt gebruikt in de fotosynthese. Uit deze twee metingen wordt de ETR (elektronentransportsnelheid, zie ook paragraaf 2.2) 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 doormeten en gecontroleerd op fluorescentie signaal. De CropObserver kan volledig zelfstandig meten en worden bediend en uitgelezen via een WiFi verbinding.



Figuur 7 Computertekening van de CropObserver. Er is alleen een 230 V aansluiting nodig en verbinding met internet via de draadloze WiFi verbinding.

3.2.2 Wat was er al voor dit project?

De CropObserver is ontwikkeld en gebouwd door PhenoVation. Voor dit project was het meetprincipe aangetoond op labschaal en bij buitenmetingen in het veld. Met de laser kon op een afstand van 4 meter de efficiëntie van de fotosynthese worden gemeten. Het meetsysteem met de CropObserver met een laser gaf dezelfde meetwaarden als een draagbare fluorescentiesensor.

3.2.3 Wat is er in dit project gedaan aan de CropObserver?

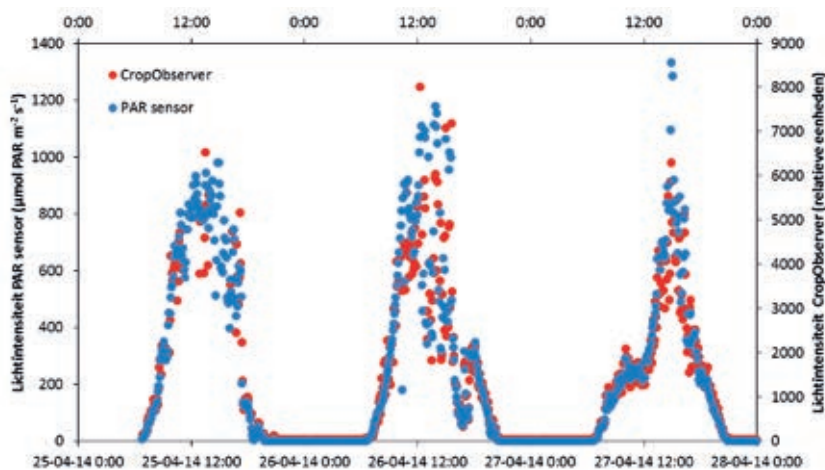
In dit project is de dataverwerking aangepast. Om de data die de CropObserver genereert goed te kunnen te vergelijken met de Micro-Moni-PAM (zie paragraaf 3.3) moest een gemiddelde over een hele meetronde worden berekend. Individuele metingen per spot gaven een variërende uitslag doordat lokaal de lichtintensiteit zeer verschillende is. Door nu een gemiddelde waarde te berekenen over de metingen van de 900 meetposities die voldoende fluorescentie signaal geven, konden deze fluctuaties worden gemiddeld en uitgezet worden tegen de metingen van de Micro-Moni-PAM.

3.2.4 Resultaten

In dit project werd de CropObserver in de nok van een tomatenkas in Bleiswijk opgehangen (Figuur 8). Er zijn testen uitgevoerd waarbij de lichtintensiteit is gemeten met de CropObserver op het gewas. Tevens werd met een PAR-sensor in de nok van de kas de straling gemeten. De resultaten laten zien dat er een uitstekende correlatie is tussen deze twee metingen (Figuur 9).

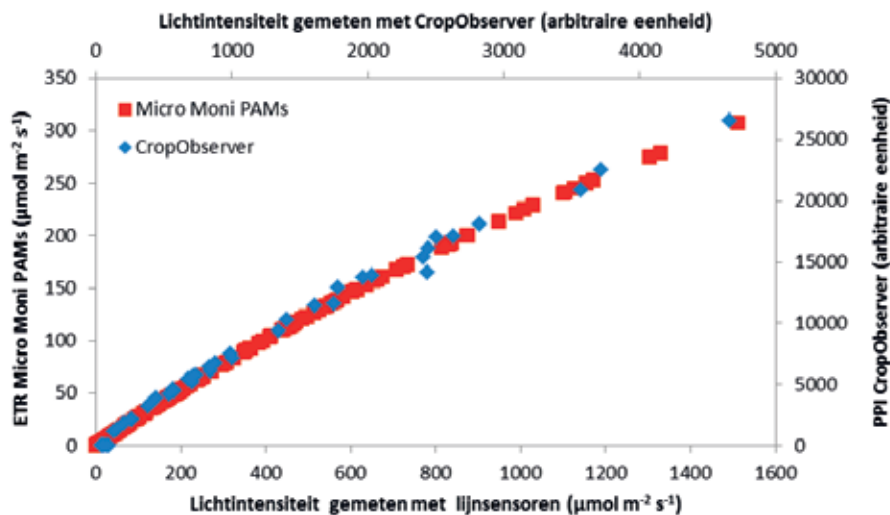


Figuur 8 CropObserver in de nok van een kas met een belicht tomatengewas bij Wageningen UR Glastuinbouw in Bleiswijk.



Figuur 9 Vergelijking van de lichtintensiteit gemeten met de CropObserver op het tomatengewas en de PAR sensor in de nok van de kas over een periode van drie dagen, 25, 26 en 27 april.

Zowel de CropObserver als het systeem met Micro MoniPAMs (zie paragraaf 3.3) meten de efficiëntie van het elektronentransport en de lichtintensiteit. In onderstaande figuur staat een vergelijking van de lichtresponscurves van het elektronentransport van zowel de CropObserver als de Micro MoniPAMs. Hieruit blijkt dat er een goede overeenkomst is in vorm en orde van grootte tussen beide systemen (Figuur 10). Dat betekent dat de CropObserver op grote schaal (enkele vierkante meters) hetzelfde signaal meet als de Micro MoniPAMs op een klein oppervlakte.



Figuur 10 Vergelijking tussen de lichtresponscurves van de elektronentransportsnelheid gemeten door de CropObserver en de Micro MoniPAMs van metingen op 21 mei in een tomatengewas.

3.3 Micro-Moni-PAM

3.3.1 Wat is werkingsprincipe van dit systeem?

De schatting van de ETR is gebaseerd op chlorofylfluorescentie. Voor een uitgebreide beschrijving van deze schatting wordt verwezen naar paragraaf 2.2 en het rapport "Handleiding gebruik van plantsensoren voor de fotosynthese in de praktijk" (Pot e.a., 2011). De bepaling van de gewas ETR is gebaseerd op continue meting van i) de plaatselijke lichtintensiteit met PAR sensoren en ii) het plaatselijke elektronentransport (ETR) op verschillende hoogtes in het gewas met de Micro-Moni-PAM (Figuur 12).

Uit de metingen overdag worden twee modelcurves berekend:

- PAR (gemiddelde over lichtperiode) als functie van de hoogte in het gewas: $PAR = f_1(\text{hoogte})$ [1]
- ETR als functie van PAR van blad op de betreffende hoogte in het gewas: $ETR = f_2(PAR)$ [2]

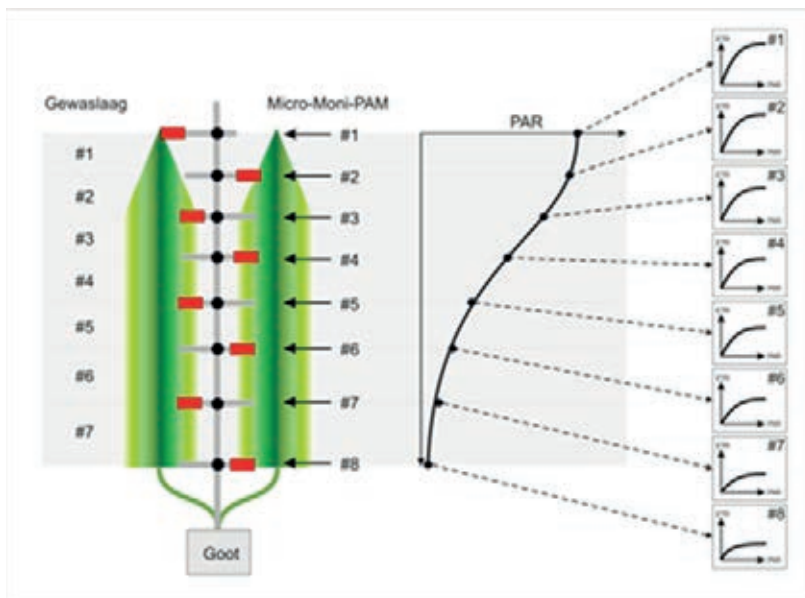
Met deze functies kan de ETR op een bepaalde hoogte in het gewas berekend worden:

$$ETR(\text{hoogte}) = f_1(\text{hoogte}) \times f_2(PAR) \quad [3]$$

Deze ETR geeft echter nog niet de ETR van de bladlaag, maar de ETR van het blad op een bepaalde hoogte. Omdat ook de lichtabsorptie (=hoeveelheid blad) in een laag afhankelijk is van de hoogte, moet hiervoor gecorrigeerd worden.

$$ETR(\text{laag}) = ETR(\text{hoogte}) \times PAR(\text{opvallend}) - PAR(\text{doorgelaten}) \quad [4]$$

De waarden voor PAR (opvallend) en PAR (doorgelaten) kunnen eenvoudig uit vergelijking [2] berekend worden. Door de ETR van alle lagen bij elkaar op te tellen kan de gewas ETR berekend worden. Ook kan, naar analogie van de lichtsom, een ETR-som berekend worden door alle waarden van de gewas ETR over een dag bij elkaar op te tellen.

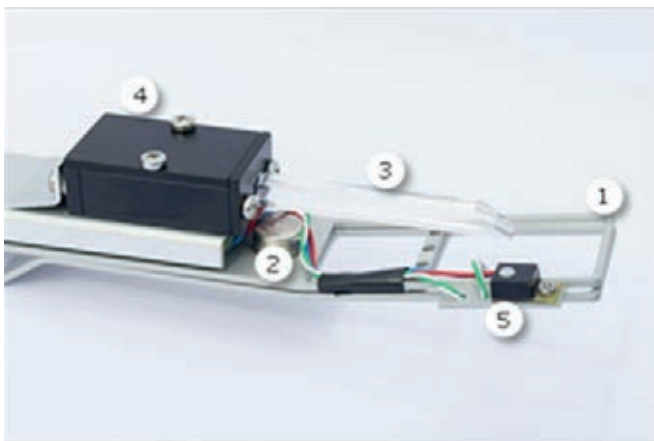


Figuur 12 Schematische weergave van de meetopstelling in een gewasrij. De grafiek in het midden toont de uitdoving van licht in het gewas. De serie grafieken rechts geeft het verband tussen ETR en PAR zoals gereconstrueerd van de data gemeten door de Micro-Moni-PAM gedurende een dag.

3.3.2 Wat was er al voor dit project?

3.3.2.1 Micro-Moni-Set

In het project Optimalisaties Het Nieuwe Telen is de Micro-Moni-Set ontwikkeld voor het meten van gewas ETR. Het gewas wordt opgedeeld in 7 lagen (Figuur 12). Aan de rand van elke laag wordt met een nieuw ontwikkelde PAR/fotosynthese sensor met een korte interval tijd, die instelbaar is, gemeten. Hiervoor zijn 8 PAR/fotosynthese sensoren nodig. Voor het meten van PAR en ETR in een groentegewas is de bestaande Plantivity minder geschikt. De Plantivity is groter, duurder en daarom minder praktisch voor het meten van gewasfotosynthese met meerdere sensoren in een hogedraadteelt. De Micro-Moni-Set bestaat uit een aantal kleine Micro-Moni-PAM meetkoppen (incl. microprocessor, zie Figuur 13) die via een RS485 kabel en een interface box verbonden zijn met de USB poort van de meetcomputer. De Micro-Moni-PAM heeft sensoren voor het meten van chlorofylfluorescentie, PAR en bladtemperatuur. Eén Micro-Moni-Set bestaat uit een interface box met 8 Micro-Moni-PAM sensoren en bijbehorende kabels.



Figuur 13 Micro-Moni-PAM: de meetkop van Micro-Moni-Set. De meetkop (Micro-Moni-PAM) bestaat uit (1) bladklem met vaste bovenkant en losse onderzijde, (2) magneet voor vastklemmen onderzijde, (3) lichtgeleider voor meten van chlorofylfluorescentie, (4) elektronica voor chlorofylsensor en (5) externe PAR sensor.

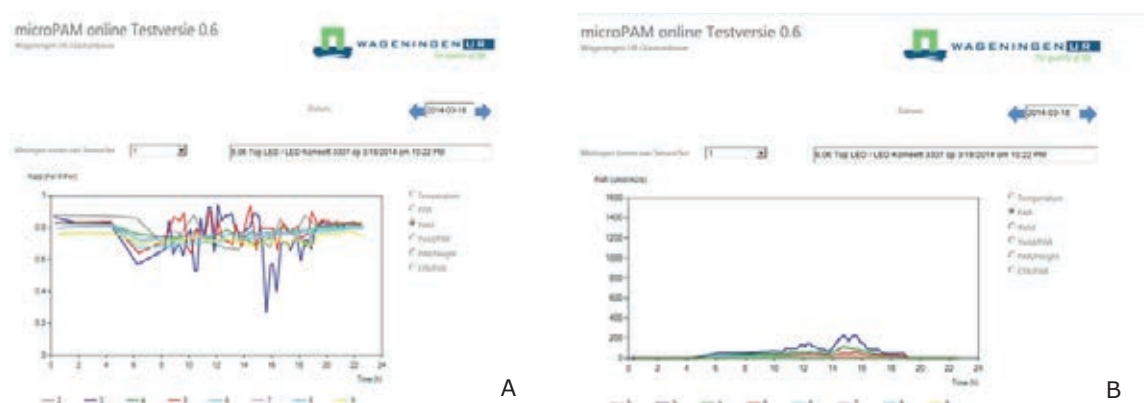
De Micro-Moni-PAM meetkoppen waren bevestigd aan een meetpaal. De meetpaal werd midden op de goot geplaatst en met tie-wraps aan de gootophanging bevestigd. De Micro-Moni-PAM sensoren werden op korte staafjes gemonteerd die op van te voren aangegeven hoogtes met klemmen bevestigd waren aan de meetpaal (Figuur 14). De Micro-Moni-PAM meetkoppen werden in principe 1x per week op een ander blad gezet. Dat gebeurde tegelijk met het verhangen van de planten. De Interfaceboxen werden op de meetpaal bevestigd en de mini-PC in de corridor buiten de kas.



Figuur 14 De meetopstelling in de kas. Links de meetpaal met de Micro-Moni-PAM sensoren gemonteerd boven de goot tussen twee rijen planten. Midden de interfaceboxen gemonteerd aan de meetpaal. Rechts de mini-PC hangend onder de goot. De laptop op de goot werd alleen gebruikt voor de afregeling van de sensoren.

3.3.2.2 Data-acquisitie, opslag en verwerking

De Micro-Moni-PAM sensoren werden aangestuurd met software die de meetdata in een database op een webserver opslaat. Deze software is voorzien van een gebruikersinterface om de positie van de sensoren te definiëren.



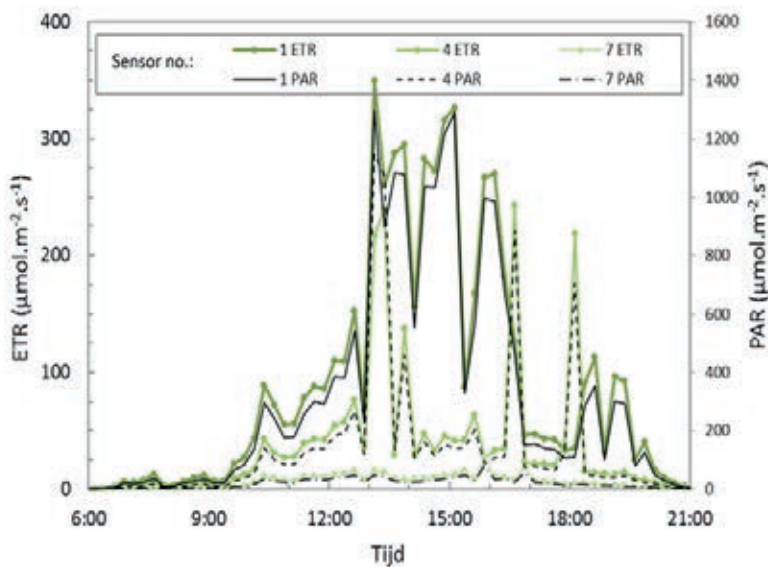
Figuur 15 Screenshots van de gebruikersinterface van de webapplicatie waarmee de data van de sensoren on-line bekeken kunnen worden. Tijdsverloop van de lichtbenutting van de fotosynthese (A) en de PAR (B).

Met een bijbehorende web applicatie kunnen de data online bekeken (zie Figuur 15) en gedownload worden voor verdere analyse in Microsoft Excel en/of PTC MathCad (zie onder) of andere rekenprogramma's. De meetfrequentie van de Micro-Moni-PAM's was overdag 1x per kwartier en 's nachts 1x per twee uur.

3.3.2.3 Methode voor berekenen ETR gewas

De Micro-Moni-PAM meet de fotosynthese (ETR) en de PAR van een blad. Figuur 16 geeft een voorbeeld van het tijdsverloop tijdens een dag voor 3 van de 8 sensoren. Er zit veel dynamiek in zowel PAR als ETR. Dat betekent dat een momentane waarde op een dag niet veel zegt over de lichtsom of de ETR-som op die dag. De oorzaak ligt primair in de fluctuaties van de intensiteit van het daglicht, maar ook in de verandering van de zonnestand waardoor lokale schaduw ontstaat ten gevolge van kasconstructie en het gewas dat zich boven de sensor bevindt. Zo is goed te zien dat sensor 4 (midden gewas) om ca. 13.30 u, om 16.30 uur en om 18.15 uur meer licht ziet dan sensor 1 (boven in gewas).

Voor het berekenen van de lichtonderschepping van een gewaslaag moet de lichtintensiteit boven de laag hoger zijn dan onder de laag. Fluctuaties ten gevolge van lokale beschaduwing zijn dan zeer storend. Door de meetwaarden over de hele lichtperiode van een dag te middelen worden de fluctuaties ten gevolge van lokale schaduw uitgemiddeld en kunnen betrouwbaardere resultaten verkregen worden.



Figuur 16 Tijdsverloop van bladfotosynthese (ETR) en PAR op 19 augustus 2013 op drie hoogtes in een tomatengewas in afdeling 7 van het Improvement Center. Voor details met betrekking tot de teelt zie De Gelder et al. (2014).

3.3.2.4 Verband tussen ETR en PAR

Figuur 16 laat zien dat het verband tussen ETR en PAR voor alle sensoren vergelijkbaar is. Dat betekent dat, in deze proef, de fotosynthese-eigenschappen van het blad niet afhankelijk is van de hoogte in het gewas, en dat de relatie tussen ETR en PAR met een eenvoudige formule beschreven kan worden. Voor de uitwerking van de data is de volgende formule gebruikt:

$$ETR(PAR, ETR_{max}, Q2, m) := \frac{(Q2 \cdot PAR + ETR_{max}) - \sqrt{(Q2 \cdot PAR + ETR_{max})^2 - 4 \cdot Q2 \cdot PAR \cdot ETR_{max} \cdot m}}{2 \cdot m} \quad [5]$$

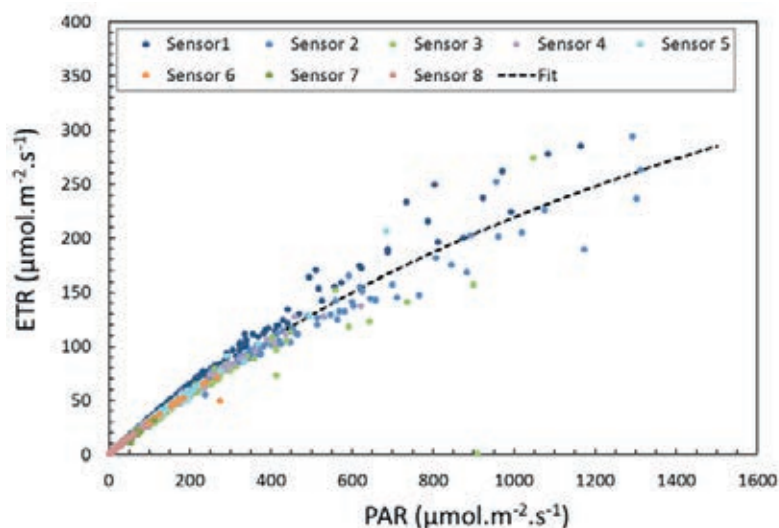
Met: ETR = Elektronentransportsnelheid; Q2 = maximale lichtbenutting; m=constante die curvatuur bepaalt.

De parameters van vergelijking [5] zijn gefit aan de meetwaarden op basis van een kleinste kwadratenmethode in het programma MathCad (PTC, USA).

Toch zijn in Figuur 17 ook verschillen tussen sensoren waar te nemen. Sensor 1 geeft een hogere ETR, sensor 3 een lagere ETR en sensor 2 zit er tussenin. Het verschil tussen sensor 1 en sensor 3 is toch al gauw 15-20%. De volgende factoren spelen hier mogelijk een rol:

1. Leeftijd blad. Jong, volgroeid blad heeft een hogere lichtbenuttingsefficiëntie (dus ETR) dan oud blad.
2. Kalibratie sensoren. De fluorescentiemeting is aan het begin van de meetperiode gekalibreerd. Mogelijk is de nulinstelling van sensor 3 wat verlopen waardoor een te lage waarde voor de lichtbenutting (ETR) gevonden wordt.

Achteraf is moeilijk vast te stellen in hoeverre de twee factoren bijgedragen hebben aan de verschillen tussen sensor 1 en sensor 3. Aan de kalibratie zal in toekomstig onderzoek meer aandacht besteed moeten worden.



Figuur 17 Bladfotosynthese (ETR) als functie van het opvallende licht (in PAR). De metingen zijn gedaan in de periode van 12 t/m 15 september in afdeling 8 van het Improvement Centre. De datapunten van de verschillende Micro-Moni-PAM sensoren zijn met verschillende kleuren aangegeven.

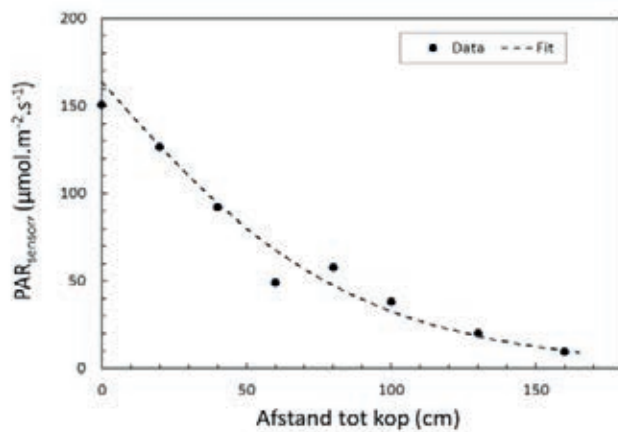
3.3.2.5 PAR verdeling in gewas

Figuur 18 geeft als voorbeeld de lichtverdeling als functie van de hoogte in het gewas gemiddeld over een periode van 4 dagen. De uitdoving van het licht in het gewas kan beschreven worden met een Gompertz functie; deze geeft een redelijke fit van de gemeten data. Bij de uitwerking van de data is gebruik gemaakt van de gemiddelde PAR waarden gedurende de lichtperiode.

$$PAR(x, PAR_0, b, c) := PAR_0 \cdot \left(1 - e^{-b e^{c \cdot x}}\right) \quad [6]$$

met: PAR_0 = PAR boven gewas; x = afstand tot kop; b en c zijn constanten.

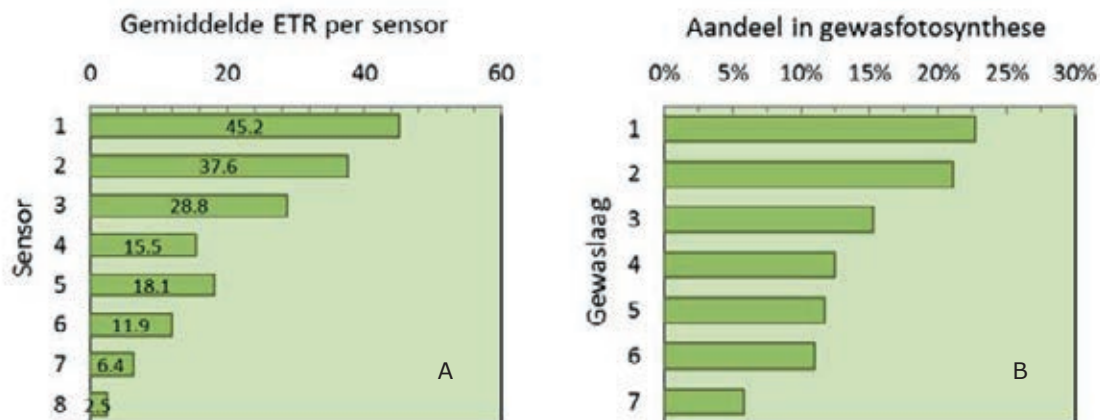
De parameters van vergelijking [6] zijn gefit aan de meetwaarden op basis van een kleinste kwadratenmethode in het programma MathCad (PTC, USA).



Figuur 18 PAR als functie van de hoogte in het gewas, gemeten in cm beneden de top van het gewas. De metingen zijn gedaan in de periode van 12 t/m 15 september in afdeling 8 van het IC. De datapunten zijn het daggemiddelde van de PAR sensor in de Micro-Moni-PAM meters. Door de datapunten is een Gompertz functie gefit die de lichtuitdoving in het gewas beschrijft.

3.3.3 Omrekening naar verdeling fotosynthese over de gewaslagen

Met de drie gevonden functies, PAR als functie van hoogte (vergelijking [5]) en ETR als functie van PAR (vergelijking [6]) en lichtabsorptie per laag (afgeleid van vergelijking [6]), kan niet alleen de ETR op elke hoogte uitgerekend worden, maar ook het aandeel in de totale gewas ETR. Onderverdeling van het gewas in 7 lagen levert het volgende beeld op (Figuur 19):

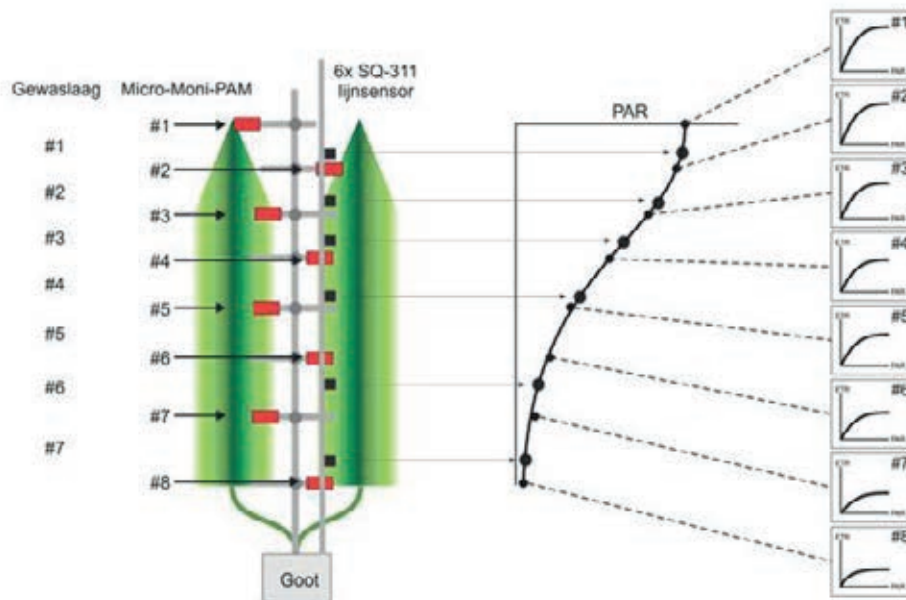


Figuur 19 A: ETR per sensor. B: Aandeel ETR per gewaslaag in totale ETR van gewas.

Uit Figuur 19A blijkt dat de ETR in het bovenste blad het hoogst is en afneemt lager in het gewas. Dat ligt voor de hand omdat ook de PAR bovenin het hoogst is. In Figuur 19B is de ETR van de bovenste laag niet veel hoger dan in de tweede laag. De bovenste laag heeft minder blad en absorbeert daardoor minder licht. Omdat de ETR per laag wordt berekend uit de hoeveelheid licht die de laag geabsorbeerd heeft en de efficiëntie van het blad (ETR_{sensor}/PAR_{sensor}), leidt een lagere lichtabsorptie tot een lagere ETR per laag.

3.3.4 Wat is er in dit project aangepast aan de MicroMoniPAMs?

In dit project ligt de focus op het bepalen van het dagelijks verloop van de gewasfotosynthese. Omdat de bepaling van de lichtonderschepping de zwakste schakel was, is in de project de lichtonderschepping berekend uit PAR metingen uitgevoerd met 6 aparte SQ-311 quantum lijnsensoren (Apogee). Samen met de lichtsensoren boven het gewas waren er 7 meetpunten voor de PAR verdeling in het gewas. De meetopstelling ziet er daarmee als volgt uit (Figuur 20).



Figuur 20 Schematische weergave van de meetopstelling in een gewasrij. De figuur is grotendeels gelijk aan figuur 12, maar nu met toevoeging van de Apogee SQ-311 lijnsensoren.

3.3.5 Resultaten

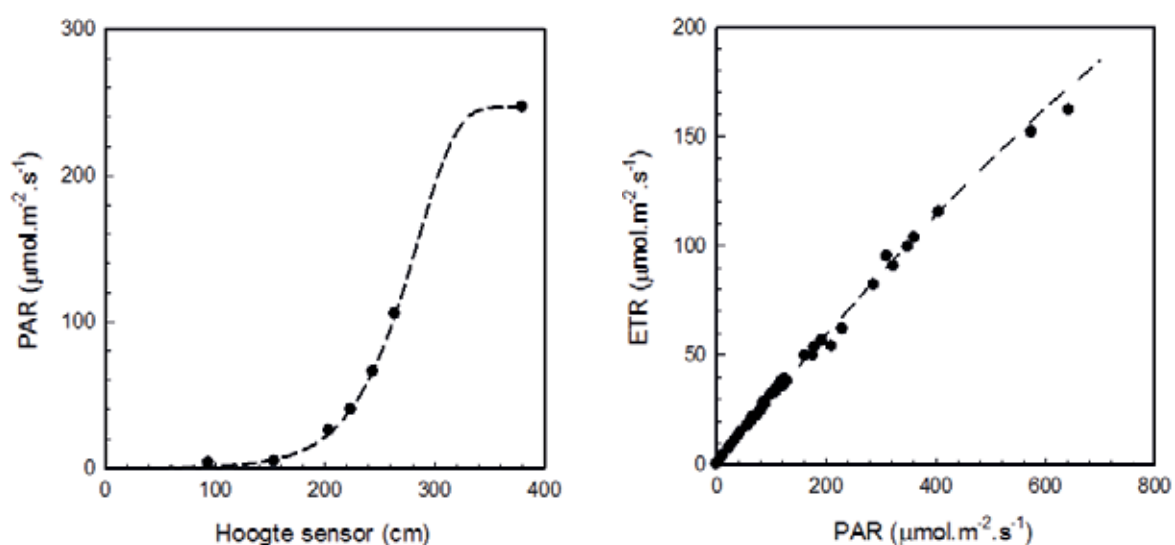
De Apogee lijnsensoren zijn eerst uitgebreid getest om er voor te zorgen dat er geen verschillen zijn in gevoeligheid tussen de sensoren. Op 26 maart werd een test uitgevoerd met de 6 sensoren in de corridor. De lichtsom van de 6 meters bedroeg 15.55 ± 0.17 mol/m²/dag (gemiddelde $\pm$ standaarddeviatie). De relatieve standaarddeviatie bedroeg 1.1%.



Figuur 21 A: Foto van meetpaal met vier van de zes SQ-311 lijnsensoren in beeld. Rechts: Micro-Moni-PAM sensoren boven (B) en onder in gewas (C).

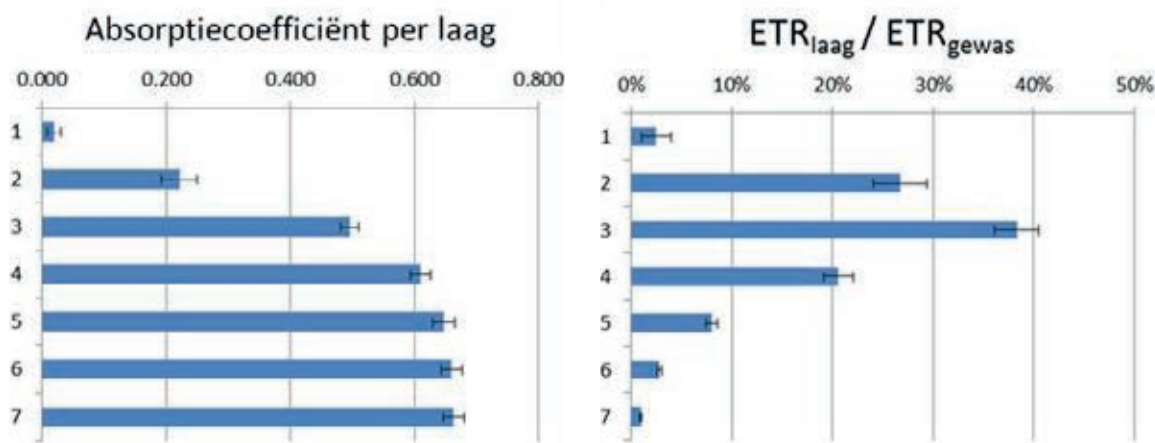
De lijnsensoren zijn op een aparte meetpaal gemonteerd op een afstand van ca. 50 cm van de meetpaal met de Micro-Moni-PAM sensoren. De lijnsensoren zijn op verschillende hoogtes evenwijdig aan de rij gemonteerd. De sensoren stonden uit het midden van de carrousel, dicht bij de stengels. Figuur 21 laat zien hoe de sensoren in het gewas gepositioneerd waren.

De lichtverdeling in het gewas is met de nieuwe SQ-311 lijnsensoren nu wel goed te beschrijven met de Gompertz functie (Figuur 22). De hoogste sensor hing echter vrij laag in het gewas waardoor er weinig data zijn van de lichtuitdoving boven in het gewas. Later zijn de sensoren verhangen om een betere verdeling van de lichtmeting in het gewas te krijgen.



Figuur 22 Resultaten van de PAR metingen (daggemiddelde) met de SQ-311 lijnsensor (links) en de ETR meting met de Micro-Moni-PAM (rechts) op 18 april 2014.

Figuur 23 laat zien dat met de lijnsensoren nu een goede reproduceerbaarheid gehaald wordt. Over een periode van 4 dagen bedraagt de standaardfout in de absorptiecoëfficiënt 0.017 en die in de ETR_{laag} 1.2%. Hiermee wordt aangetoond dat er gedurende opeenvolgende dagen weinig variatie in de verdeling van de lichtabsorptie en de ETR over het gewas waarneembaar waren. Gezien het feit dat de kop inmiddels uit het gewas verwijderd was is die niet vreemd.



Figuur 23 Absorptie coëfficiënt (deel van het licht geabsorbeerd door laag) en het aandeel ETR per laag (t.o.v. totaal van gewas) bepaald per dag en gemiddeld over een periode van 4 dagen. De foutenbalken geven de standaardfout weer.

3.4 Stomata sensor

De stomata sensor of huidmondjes monitor is ontwikkeld door LetsGrow.com vanaf 2006. Het is een methode om het gedrag van huidmondjes te monitoren 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. Bekend is bijvoorbeeld dat de stand van de huidmondjes over één blad sterk kan verschillen en zelfs plaatselijk kan oscilleren.

De stomata sensor meet de kasomstandigheden en de planttemperatuur en brengt deze samen in een globale energiebalans die geldig is voor enkele m^2 gewasoppervlak. Hieruit wordt vervolgens een gemiddelde gewasverdamping en huidmondjes geleidbaarheid berekend (Voogt en Van Weel, 2008). In het kader van het Aircokas onderzoek (Wageningen UR Glastuinbouw / Hoogendoorn Growth management 2006 – 2009) is de stomata sensor bij uiteenlopende gewassen toegepast om de reactie van planten onder semigesloten kascondities te monitoren. Dit bleek goed te voldoen. Opvallend was bijvoorbeeld dat storingen in de watergeefinstallatie of de nevelinstallatie goed terug gevonden kunnen worden in het verloop van de huidmondjesgeleidbaarheid. Hierbij bleek bovendien dat de berekende gewasverdamping volgens deze methode een betrouwbaar beeld geeft van de momentane verdamping in vergelijking met weegschalen en andere reken modellen (Voogt en Van Weel, 2008).

De belangrijkste functie van het rekenmodel is om de tuinder inzicht te geven in het verloop van de waterstatus van de plant, zoals dat uit de energiebalans naar voren komt. Het gaat daarbij vaak meer om het verloop over de dag dan om de absolute waarden. Vaak blijkt in de praktijk dat het verloop van temperatuur, straling en RV op zichzelf geen aanleiding geeft tot ingrijpen, maar dat de combinatie wel degelijk kan zorgen voor waterstress. Temeer als de watergift bijvoorbeeld niet tijdig wordt aangepast op het stralingsniveau. Ook geeft de huidmondjesmonitor een goede indicatie voor het inzetten van hoge druk verneveling als middel om waterstress te verminderen of te voorkomen. Op zichzelf is het "knijpen" van huidmondjes tegen uitdroging een volkomen natuurlijke reactie van de plant. In onze kassen proberen we dat echter te voorkomen omdat gesloten huidmondjes niet alleen de verdamping beperken maar ook de opname van CO₂ kunnen belemmeren. Te sterke waterstress kan verder leiden tot ongewenste wateronttrekking aan de vruchten etc.

Een bijzonder interessant aspect in dit onderzoek is om vast te stellen of er een relatie is tussen het gedrag van de huidmondjes en de momentane fotosynthese. Als die relatie er is, dan zou de huidmondjes monitor niet alleen een hulpmiddel zijn voor de tuinder om de waterstatus van het gewas te monitoren, maar tevens een zeer betaalbare en robuuste indicatie voor de fotosynthese efficiëntie vormen.

3.4.1 Wat is het werkingsprincipe van dit systeem?

Stomata of huidmondjes spelen een centrale rol bij het functioneren van de plant omdat ze de schakel vormen tussen de energiebalans en de waterbalans, en tevens de toevoer van CO₂ kunnen beïnvloeden. De basisfunctie van huidmondjes is het reguleren van de verdamping om uitdroging van de plant te voorkomen. Idealiter heeft de plant voldoende water ter beschikking om de energie die binnenkomt in de vorm van straling van de zon te absorberen en om te zetten in waterdamp. Hierbij zal de planttemperatuur van sterk verdampende gewassen zoals vruchtgroenten rond of iets onder de luchttemperatuur liggen. Bij minder verdampende gewassen zoals potplanten zal de planttemperatuur vaak stijgen tot enkele graden boven de ruimtetemperatuur. Bij onvoldoende waterbeschikbaarheid zullen de huidmondjes gedeeltelijk sluiten. Hierdoor zal de bladtemperatuur verder stijgen ten opzichte van de luchttemperatuur en zal een (groter) deel van de energie worden afgegeven aan de omgeving door middel van convectie. Hierdoor komt de energiebalans in evenwicht bij een lagere verdamping.

De stomata sensor berekent op basis van de energiebalans de netto momentane gewasverdamping. Tevens wordt bepaald welk dampdrukverschil (VPD) er kennelijk nodig is om dat te realiseren. Vervolgens wordt dit vertaald in een maat voor de huidmondjesgeleidbaarheid. Omdat instraling de belangrijkste energiebron is voor de gewasverdamping is de berekening het meest nauwkeurig bij hoge instraling. In de gebruikte versie van het rekenmodel voor tomaat wordt voor de nachtperiode een vaste schatting aangehouden die resulteert in een verdamping van 25 g/m².uur bij een VPD van 1 kPa. Hierdoor vertoont de berekende huidmondjesgeleidbaarheid vaak een vlak verloop gedurende de nacht en ontstaan bij de overgangen van donker naar licht en omgekeerd soms wat abrupte "stappen".

3.4.2 Wat was er al voor dit project?

Voor dit onderhavige project was *et al.* een statische rekenmodule waarin uitgaande van de metingen van kastemperatuur, de kas RV, de inkomende straling (PAR bij de plant) en de planttemperatuur de energiebalans werd opgesteld en de daaruit volgende gewasverdamping werd bepaald. De parameters in het rekenmodel, waaronder de LAI werden handmatig bijgesteld door in een reeks van dagen de cumulatieve berekende verdamping te vergelijken met de netto wateropname van het gewas (gift – drain) in liters/m² per etmaal.

Het rekenmodel maakte hiervoor gebruik van de bestaande meet infrastructuur van de kasafdeling waar het belichte tomatengewas stond. Hiervoor zijn de volgende datalijnen, op 5 minuut basis, gebruikt:

- Kasluchttemperatuur [°C].
- Planttemperatuur [°C].
- Relatieve vochtigheid [%].
- PAR op de plant [μmol/m².s].

Voor de meting van de PAR bij de plant waren in principe 3 meetwaarden beschikbaar, te weten:

- Meting A: afkomstig van een PAR array sensor boven in de kas, die is aangesloten op de klimaatcomputer en waarvan de meting dus on-line beschikbaar was in de LetsGrow database.
- Meting B: afkomstig van 6 PAR punt sensoren boven in de kas die niet aan de klimaatcomputer gekoppeld zijn. Deze meting wordt één maal per dag als het gemiddelde van deze punt-sensoren op 5 minutenbasis naar de Letsgrow database ge-upload waarna de berekende huidmondjesgeleidbaarheid wordt herberekend.
- Meting C: afkomstig van de PAR metingen van de Micro MoniPAM sensoren tussen het gewas. Ook van deze metingen werd eenmaal per dag een gemiddelde van de 5 minuten samples geupload naar LetsGrow waarna de berekende stomatageleidbaarheid wordt herberekend.

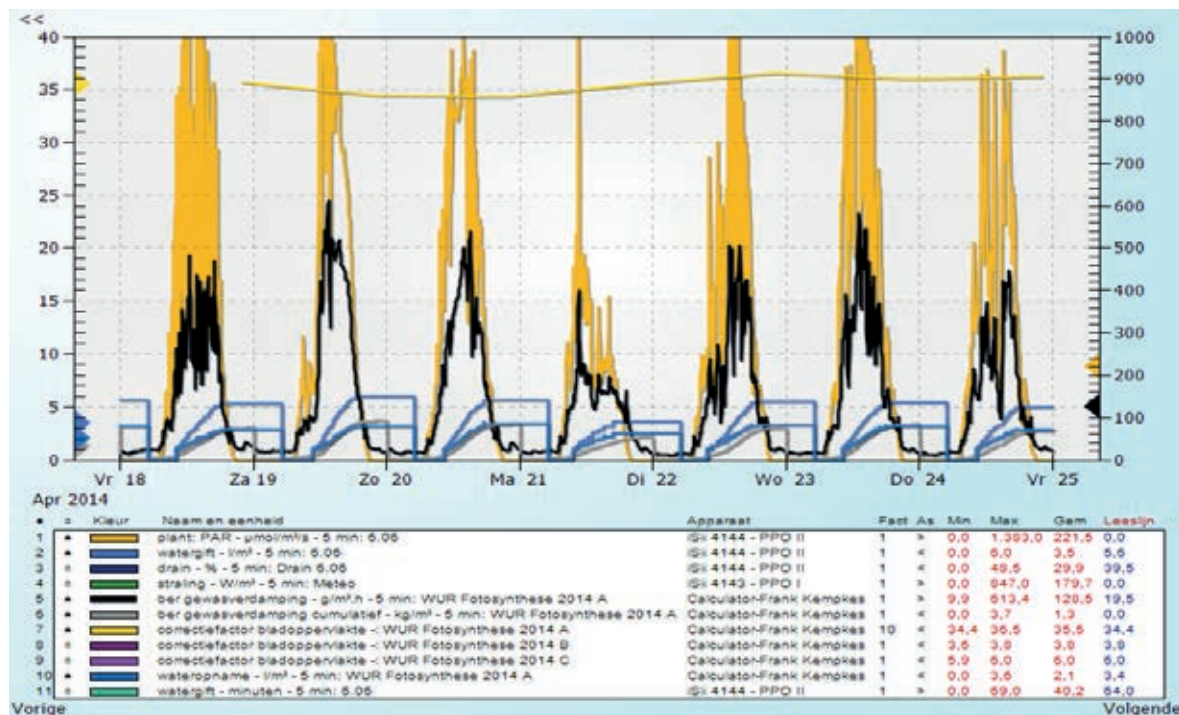
Voor elke PAR meting A, B en C is een separate rekenmodel geactiveerd in LetsGrow om te kunnen bepalen wat de beste benadering zou geven. Tussen metingen A en B bleken weinig verschillen te zijn. Meting C leverde een duidelijk afwijkend beeld op omdat deze sensoren tussen het gewas slechts een deel van het PAR licht registreren. In deze rapportage worden alleen de resultaten van meting A, als zijnde het meest relevant, verder getoond en besproken.

3.4.3 Wat is er in dit project aangepast aan de stomatasensor?

Voor dit project is een automatisch tuningsmechanisme ingebouwd in het model. Dagelijks wordt de cumulatieve gewasverdamping vergeleken met de netto wateropname gift – drain. Bij afwijkingen worden de relevante parameters in het model automatisch gecorrigeerd. In principe worden hiermee dus mismatches in de parameterisering opgevangen, maar ook onder andere variaties in de LAI door bijvoorbeeld bladplukken automatisch gevolgd door het model.

3.4.4 Resultaten

De resultaten van de Stomata sensor worden verderop besproken. Daarom beperken we ons hier tot een bespreking van het tuningsmechanisme.



Figuur 24 Weergave van de klimaatfactoren, gewasverdamping en een correctiefactor voor de bladoppervlakte in LetsGrow voor de periode 18 – 25 april 2014 in een belichte tomatenteelt.

De grafiek hierboven geeft een beeld van het automatische tuningsmechanisme dat speciaal voor dit project is ontwikkeld. De (lichter) blauwe lijn (2) laat de door de computer geregistreeerde watergift zien in liter/m². Aan de hand van het verloop van het drain % over de dag, lijn (3) (niet getoond) berekent het model de netto wateropname (donker) blauwe lijn (10). Tegelijk worden ook de momentane verdamping, de zwarte lijn (5) in liter/m².uur en de cumulatieve verdamping, de grijze lijn (6) in liter/m² berekend. Uit de grafiek komt naar voren dat lijn 10 en lijn 6 op de meeste dagen over elkaar heen liggen, maar soms ook afwijken. Deze afwijkingen geven aanleiding tot een bijstelling van de correctiefactor, de gele lijn (7) die in het model de LAI van het gewas vertegenwoordigt. Deze correctiefactor beweegt zich rond de waarde 3,5 (weergave x 10) wat goed overeenkomt met de gangbare LAI van een tomatengewas.

De conclusie is dat het tuningsmechanisme goed functioneert en zorgt voor een stabiele werking van het model zonder dagelijks onderhoud.

3.5 Opschalen van de handmatige fotosynthesemetingen naar gewasfotosynthese

3.5.1 Wat is het werkingsprincipe van dit systeem?

De fotosynthesesnelheid wordt in het Intkam-model berekend op basis van fotosynthetisch actieve straling (photosynthetic active radiation, PAR) in de kas, de CO₂ concentratie in de lucht, de luchttemperatuur, en het dampdrukdeficit (Marcelis e.a., 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 er 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 e.a., 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 e.a., 1989). De onderhoudsademhaling bedraagt ongeveer 5-10% van de totale assimilatenbeschikbaarheid.

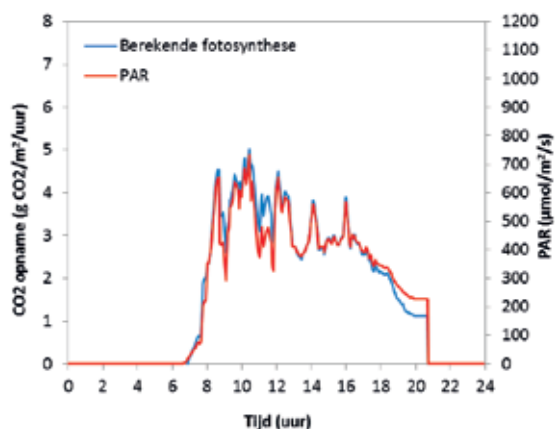
3.5.2 Wat was er al voor dit project?

Deze aanpak is ook gebruikt in het project "On-line schatten van transpiratie en fotosynthese: de praktijk" (Bontsema e.a., 2011).

3.5.3 Resultaten

Door middel van het gekalibreerde fotosynthesemodel (op basis van de fotosynthesemetingen in het tomatenexperiment, voorjaar 2014) is vervolgens voor 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 oppervlakte per bladlaag en gesommeerd voor de bladlagen om tot een gewasfotosynthese per m² kasoppervlak te komen. In figuur 25 is de berekende momentane gewasfotosynthese weergegeven voor 21 april 2014, berekend op basis van de klimaatdata, fotosyntheseparameters en het bladoppervlakte van het gewas.



Figuur 25 Berekende gewasfotosynthese en PAR licht in de kas op 21 april 2014.

4 Beschrijving experiment

4.1 Experiment

De gewasfotosynthesemonitor en de CropObserver die in het eerste deel van het project ontwikkeld zijn, zijn in een experiment beproefd. Hiervoor is gebruik gemaakt van een belichte tomatenteelt, onderdeel van het project "Belichten met minder elektriciteit" (zie voor een uitgebreide beschrijving van experiment en resultaten Dieleman e.a., 2015).

Op 23 oktober 2013 zijn in afdeling 6.06 geënt-getopte tomatenplanten van het ras Komeett op de onderstam Maxifort geplant met een stengeldichtheid van 2.5 stengels per m². In weken 49 en 1 zijn extra stengels aangehouden, resulterend in een einddichtheid van 3.75 stengels per m². De afdeling was gedekt met diffuus glas met een hemisferische transmissie van 85% en haze factor van 62% (Agro P high AR van Guardian). Er werd belicht met 105 µmol/m²/s LED topbelichting (Philips GreenPower, efficiëntie van 2.3 µmol/J) en 105 µmol/m²/s LED tussenbelichting in twee strengen (Philips GreenPower, efficiëntie van 2.1 µmol/J). De proef werd beëindigd op 21 mei 2014.

In de kas werden de CropObserver en de MicroMoniPAMs opgehangen, en werd op basis van de kasklimaatdata en de planttemperatuurmetingen meegerekend met de gewasfotosynthesemonitor en de stomatasensor. Tijdens de proef werden door PlantDynamics fotosynthese- en fluorescentiemetingen gedaan met de Licor-6400 om de relatie tussen elektronentransportsnelheid (ETR) en CO₂ opname door het blad te bepalen. Er is gemeten aan bladeren waaraan tot 7 mei gemeten was met de Micro MoniPAMs. Omdat deze bladeren al 1 week in Micro MoniPAMs zaten, was de positie van de bladeren al redelijk 'diep' in het gewas. Daarom is daarnaast een referentiemeting gedaan aan een blad bovenin het gewas (5^e blad gerekend vanaf de top). Daar zijn dus geen vergelijkbare Micro MoniPAM metingen van, maar deze kwamen wat positie betreft wel goed overeen met de nieuwe bladeren die zijn ingeklemd in de bovenste Micro MoniPAMs. De lichtresponscurves zijn gemeten bij 450 en 700 ppm CO₂, bladtemperatuur van 23°C, RV van ca. 70% (VPD 0.6 - 1 kPa), en een lichtreeks van donkeradaptatie, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 600, 800, 1000 en 1200 µmol PAR m⁻² s⁻¹. De metingen zijn gedaan op 7 en 8 mei 2014.

4.2 Selectie van dagen

In de periode januari – mei 2015 is de gewasfotosynthese bepaald met een aantal monitoringsystemen. Dit leverde een enorme hoeveelheid data op. Om de informatie overzichtelijk te houden, en analyse mogelijk te maken, is een aantal dagen geselecteerd om nader te analyseren. Er is een selectie gemaakt van dagen in de periode 20 april tot en met 22 mei, de periode dat alle systemen gefunctioneerd hebben. Voor deze afzonderlijke dagen is gezocht naar een zo groot mogelijke variatie in weersoorten zoals zonnige, bewolkte maar ook variabele dagen. De geselecteerde dagen zijn:

- Mooi zonnig: 17 en 18 mei.
- Donkere dagen: 21 april en 11 mei.
- Van licht naar donker: 26 april en 21 mei.
- Van donker naar licht: 27 april en 10 mei.
- Hoge temperatuur: 20 mei.

In bijlage I zijn per dag in grafiekvorm alle relevante kasklimaatparameters van temperatuur tot en met de raamstanden getoond.

5 Resultaten van de sensoren

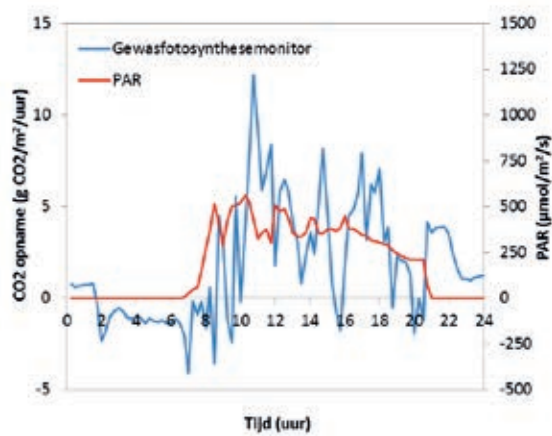
5.1 Resultaten gewasfotosynthesemonitor

De gewasfotosynthesemonitor heeft meegerekend met de tomatenproef in het voorjaar van 2014. In bijlage II staan de tussenliggende stappen van de berekeningen, en het eindresultaat (CO₂ opname). In figuur 26 staat het verloop van de door de gewasfotosynthesemonitor bepaalde CO₂ opname over de dag weergegeven voor de geselecteerde dagen. In deze figuur staat ook de PAR van die dagen weergegeven.

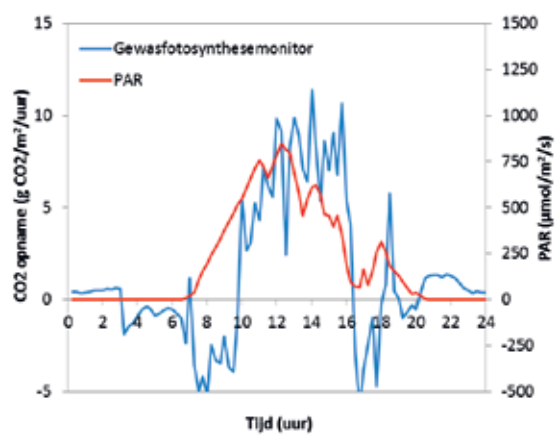
Op de meeste dagen volgt het verloop van de fotosynthese volgens de gewasfotosynthesemonitor goed het verloop van de PAR straling, wat ook verwacht mag worden. Op de meeste dagen is de orde van grootte goed, dat wil zeggen dat de verhoudingen tussen PAR en CO₂ opname redelijk constant zijn (21, 26, 27 april, 17, 18 en 21 mei). Op donkere dagen (11 mei) of wanneer een deel van de dag relatief donker is (10 mei) geeft de gewasfotosynthesemonitor erg lage waarden van de fotosynthese aan (negatief). Het lijkt dat op deze dagen de waarde van de gewasfotosynthese zo laag is, dat de gewasfotosynthesemonitor moet werken "in de ruis", namelijk met waarden die zo klein zijn dat ze niet nauwkeurig te bepalen zijn. Op 20 mei gebeurt het tegenovergestelde, dan geeft de gewasfotosynthesemonitor een (veel) hogere waarde aan van de gewasfotosynthese dan verwacht zou mogen worden op basis van de instraling (PAR). Op deze dag wijkt de CO₂ concentratie niet af van die van andere dagen, dus dat is niet de reden voor de hogere berekende gewasfotosynthese.

De CO₂ opname zoals bepaald met de gewasfotosynthesemonitor vertoont een verloop over de dag dat redelijk overeenstemt met de instraling en het verloop van de CO₂ concentratie. Er zitten echter in dit patroon af en toe scherpe pieken en dalen, die niet te verklaren zijn door veranderingen in instraling of CO₂ concentratie. Wil de gewasfotosynthesemonitor toepassing in de praktijk vinden om het kasklimaat te sturen, dan zal dit nog verbeterd moeten worden.

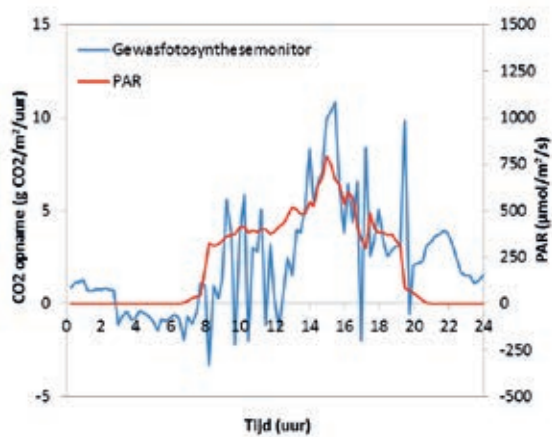
Op een aantal dagen (bijvoorbeeld 26 april, 21 mei) berekent de gewasfotosynthesemonitor in de ochtend een (erg) negatieve CO₂ opname. Dat zijn de periodes dat *et al.* wel licht is, de CO₂ concentratie in de kas daalt, maar er nog niet gedoseerd wordt. De CO₂ opname door het gewas zou dan een positieve waarde moeten hebben, maar heeft dit volgens de gewasfotosynthesemonitor (nog) niet. In de uren die dan volgen, als de CO₂ dosering is gestart, hebben de berekende gewasfotosynthesewaardes wel een logisch te verwachten waarde.



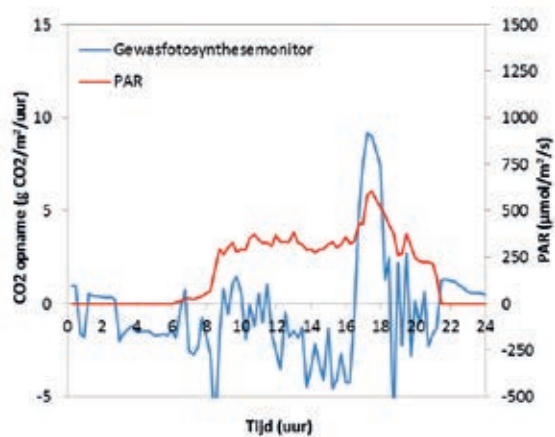
Datum: 21 april. Donkere dag



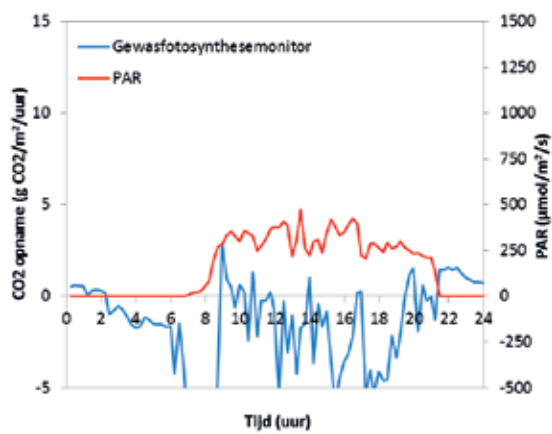
Datum: 26 april. Van licht naar donker



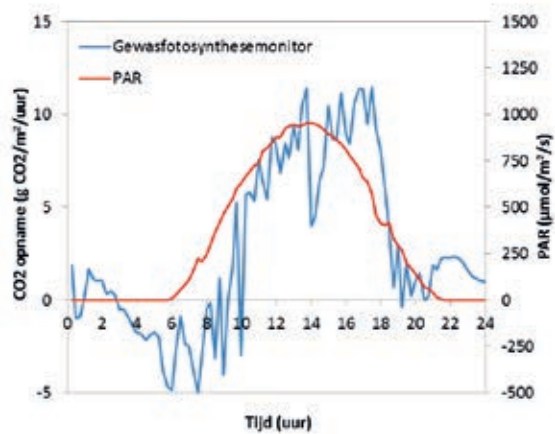
Datum: 27 april. Van donker naar licht



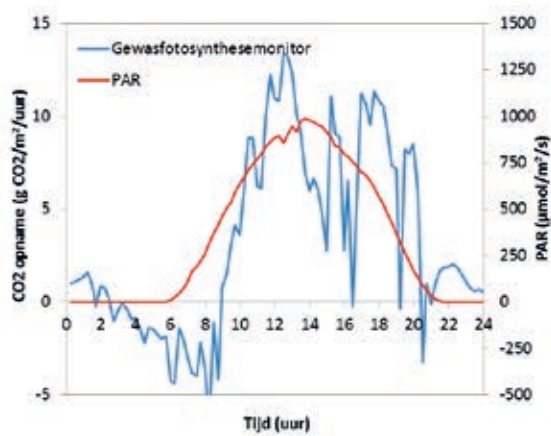
Datum: 10 mei. Van donker naar licht



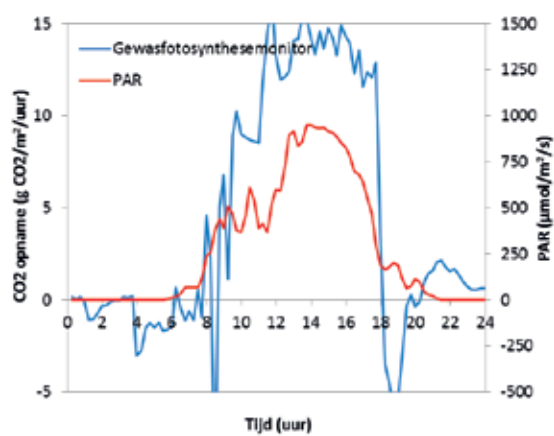
Datum: 11 mei. Donkere dag



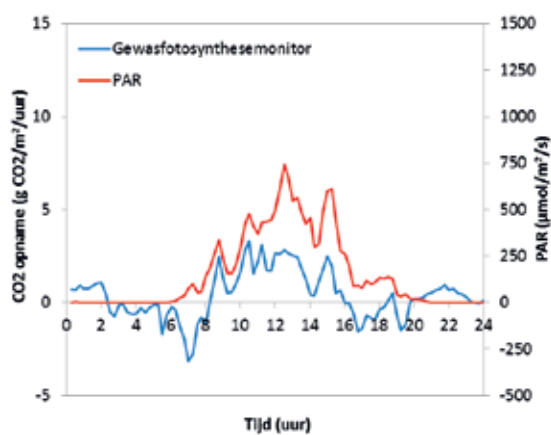
Datum: 17 mei. Zonnige dag



Datum: 18 mei. Zonnige dag



Datum: 20 mei. Hoge temperatuur

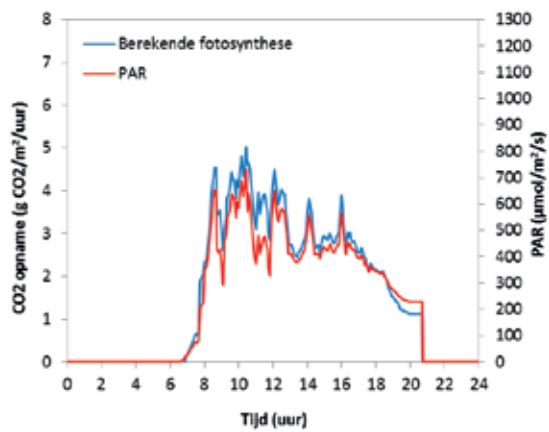


Datum: 21 mei. Van licht naar donker, geen dosering van CO₂

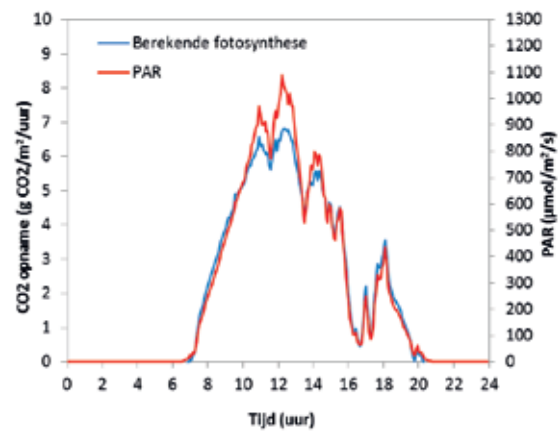
Figuur 26 *Patroon van de PAR en de CO₂ opname bepaald met de gewasfotosynthesemonitor op een aantal van te voren geselecteerde dagen met verschillende patronen van instraling.*

5.2 Resultaten van het opschalen van de bladfotosynthese naar gewasfotosynthese

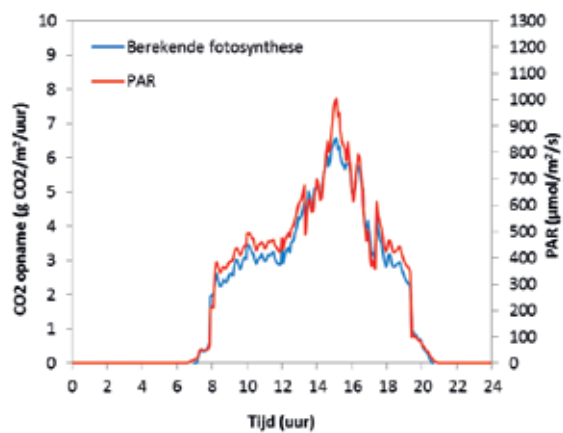
Met behulp van het gewasgroeimodel INTKAM zijn de handmatige metingen van bladfotosynthese in het experiment opgeschaald naar momentane snelheden van gewasfotosynthese. In figuur 27 zijn de resultaten van deze berekeningen te zien.



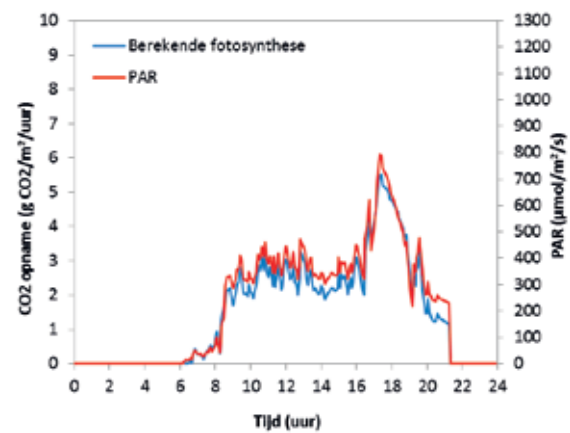
Datum: 21 april. Donkere dag



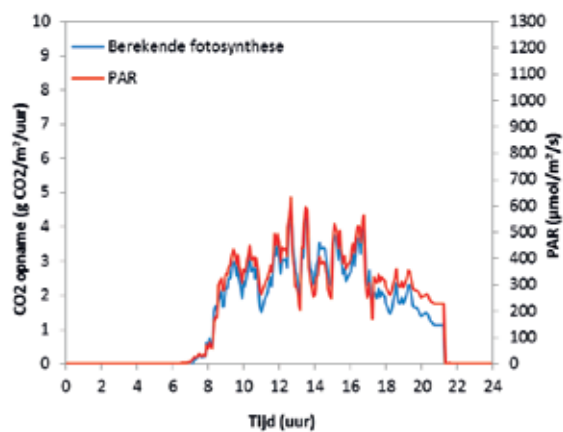
Datum: 26 april. Van licht naar donker



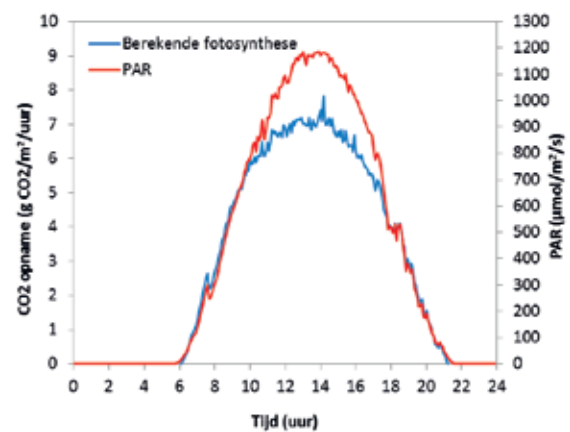
Datum: 27 april. Van donker naar licht



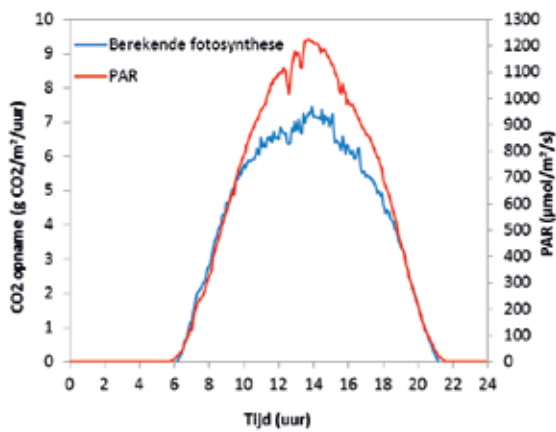
Datum: 10 mei. Van donker naar licht



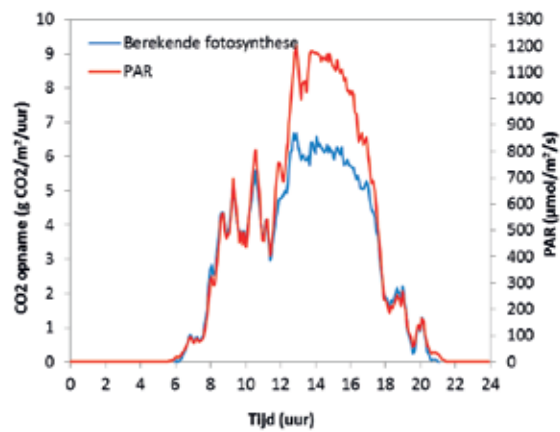
Datum: 11 mei. Donkere dag



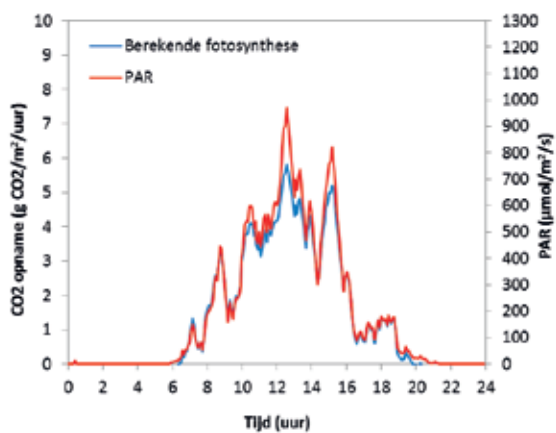
Datum: 17 mei. Zonnige dag



Datum: 18 mei. Zonnige dag



Datum: 20 mei. Hoge temperatuur



Datum: 21 mei. Van licht naar donker, geen dosering van CO₂

Figuur 27 *Patroon van de PAR en de CO₂ opname berekend met het gewasgroeimodel op een aantal van te voren geselecteerde dagen met verschillende patronen van instraling.*

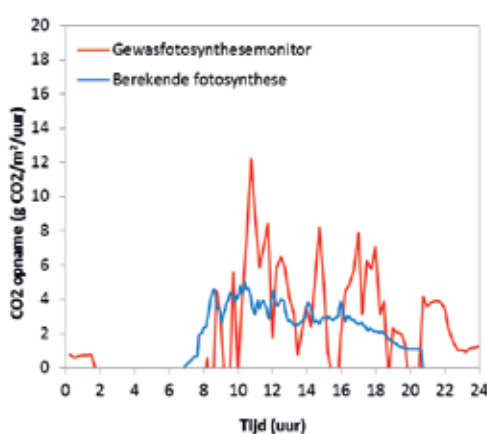
In alle figuren is te zien dat de berekende gewasfotosynthese grotendeels de PAR volgt, wat te verklaren is uit het feit dat PAR een belangrijke bepalende factor in de berekeningen van de fotosynthese is. Bij hogere lichtintensiteiten neemt de fotosynthesesnelheid minder toe dan het stralingsniveau vanwege het niet-lineaire karakter van de relatie (Figuur 2). De variatie die te zien is op de relatie tussen PAR instraling en gewasfotosynthese worden veroorzaakt door variaties in CO₂ concentratie.

5.3 Vergelijk gewasfotosynthesemonitor met bladfotosynthesemetingen opgeschaald naar gewasfotosynthese

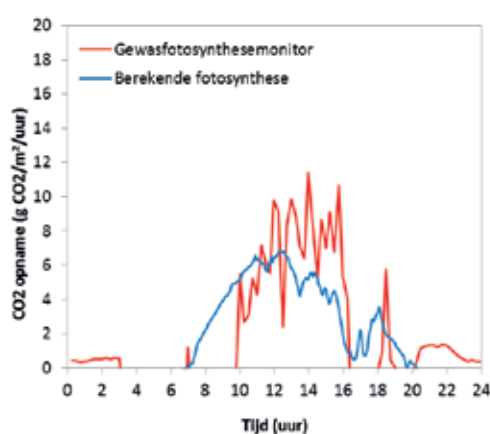
Voor alle geselecteerde dagen is de gewasfotosynthese die is bepaald met de gewasfotosynthesemonitor vergeleken met de gewasfotosynthese die is berekend met het gewasgroeimodel INTKAM op basis van het gerealiseerde kasklimaat (Figuur 29). Op de meeste dagen komt de orde van grootte van de gewasfotosynthese bepaald met de gewasfotosynthesemonitor goed overeen met de berekende waarde. Alleen op 11 mei, een donkere dag, blijft de waarde van de gewasfotosynthesemonitor achter bij de berekende waarde, terwijl op 20 mei, een dag met hoge temperaturen, de gewasfotosynthesemonitor een veel hogere waarde voor de gewasfotosynthese aangeeft dan de berekeningen met INTKAM.

De berekeningen van de gewasfotosynthese met het gewasgroeimodel zijn gedaan op basis van de kasklimaatdata die per 5 minuten beschikbaar zijn. De bepalingen met de gewasfotosynthesemonitor zijn gedaan per 15 minuten. Dat verschil is in figuur 29 ook terug te zien, aangezien de resultaten van de gewasfotosynthesemonitor (rode lijnen) veel meer fluctuaties vertonen dan de berekende gewasfotosynthese (met het gewasgroeimodel). Wanneer de gewasfotosynthesemonitor zodanig aangepast zou kunnen worden dat deze fluctuaties er uit gefilterd zouden kunnen worden, zou het verloop naar verwachting goed overeenstemmen met de door het gewasgroeimodel berekende waarde voor de gewasfotosynthese.

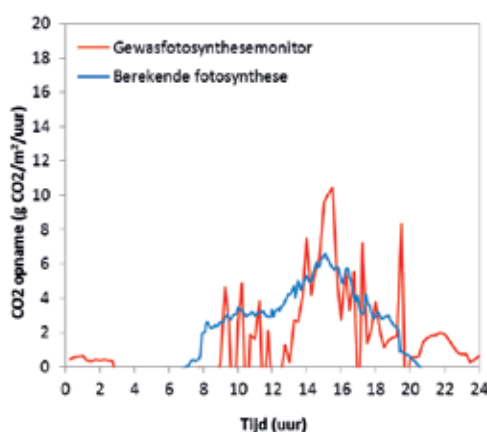
Uit de vergelijking van beide methodes om de gewasfotosynthese te bepalen blijkt verder dat de berekende gewasfotosynthese de lichtintensiteit nauw volgt: als het licht wordt, of de lampen gaan aan, neemt de berekende gewasfotosynthese direct toe (zie ook figuur 27). De gewasfotosynthese bepaald door de gewasfotosynthesemonitor wordt aan het begin van de nachtperiode vaak (erg) negatief, en bereikt dan pas weer positieve waarden enkele uren nadat het licht is geworden of de lampen zijn aangegaan (zie ook figuur 26). In een volgende versie van de gewasfotosynthesemonitor zou nagegaan moeten worden wat hiervan de oorzaak is, en of dit te verhelpen zou zijn.



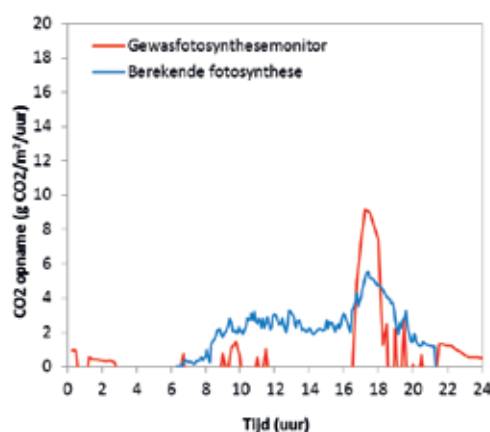
Datum: 21 april. Donkere dag



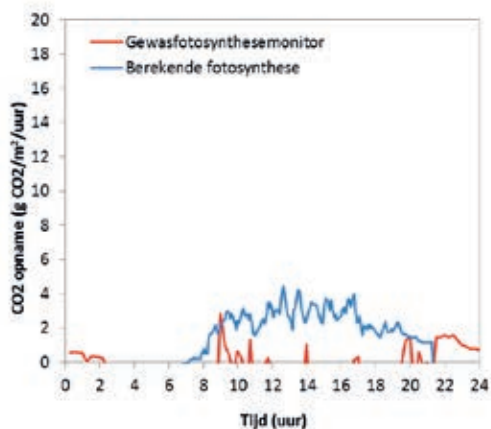
Datum: 26 april. Van licht naar donker



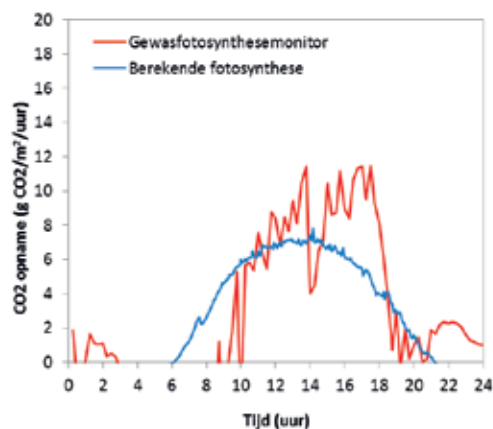
Datum: 27 april. Van donker naar licht



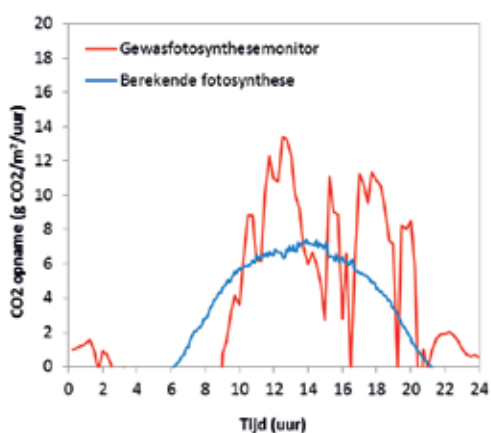
Datum: 10 mei. Van donker naar licht



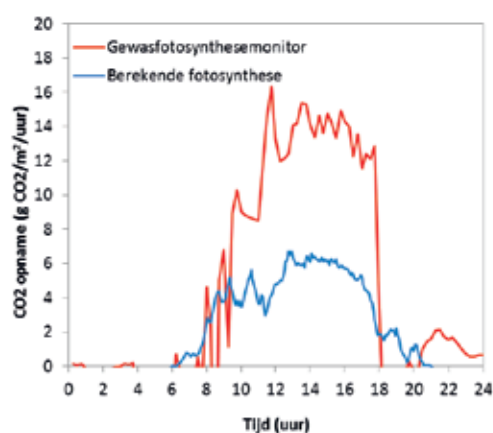
Datum: 11 mei. Donkere dag



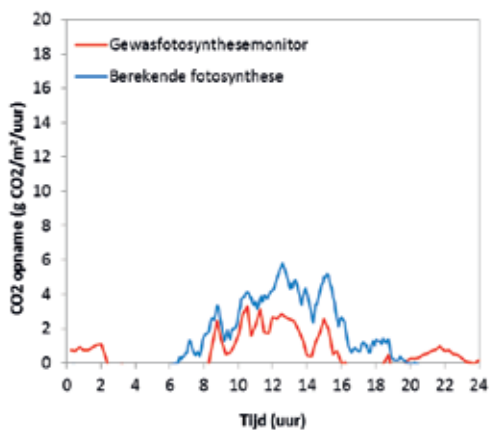
Datum: 17 mei. Zonnige dag



Datum: 18 mei. Zonnige dag



Datum: 20 mei. Hoge temperatuur



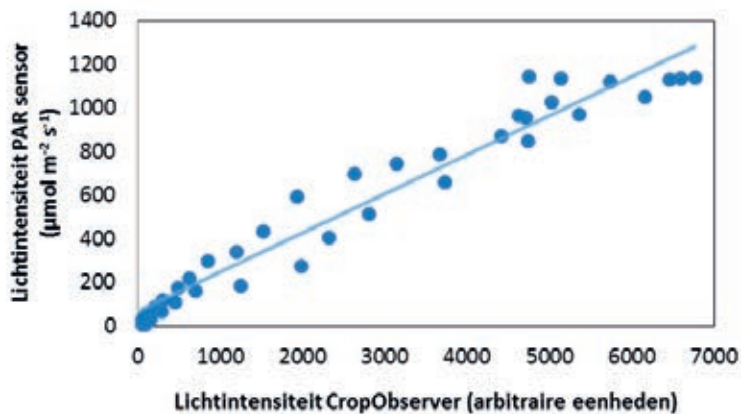
Datum: 21 mei. Van licht naar donker, geen dosering van CO₂

Figuur 29 Berekende fotosynthese (CO₂ opname) met de gewasfotosynthesemonitor en het gewasgroeimodel INTKAM.

5.4 Resultaten van de CropObserver

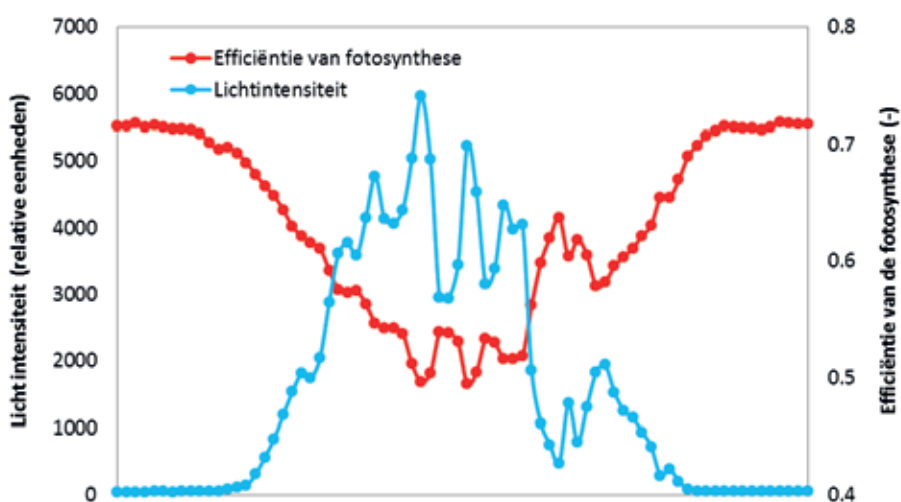
De CropObserver is aan het begin van deze proef gebouwd en in de loop van de proef in de kas geïnstalleerd. Er zijn daarom geen CropObserver data van april beschikbaar, wel van de geselecteerde dagen in mei.

De CropObserver meet per meetpunt zowel de straling als de efficiëntie van de fotosynthese (F_q'/F_m'). Het vermenigvuldigen van de straling met de efficiëntie van de fotosynthese levert de elektronentransportsnelheid op (ETR), een maat voor de (eerste stap van de) fotosynthese. Uit de vergelijking van de metingen van de CropObserver en de metingen van de PAR sensor bovenin de kas (boven de LED lampen) blijkt dat de door de CropObserver gemeten waarden goed correleren met de PAR metingen (Figuur 30).



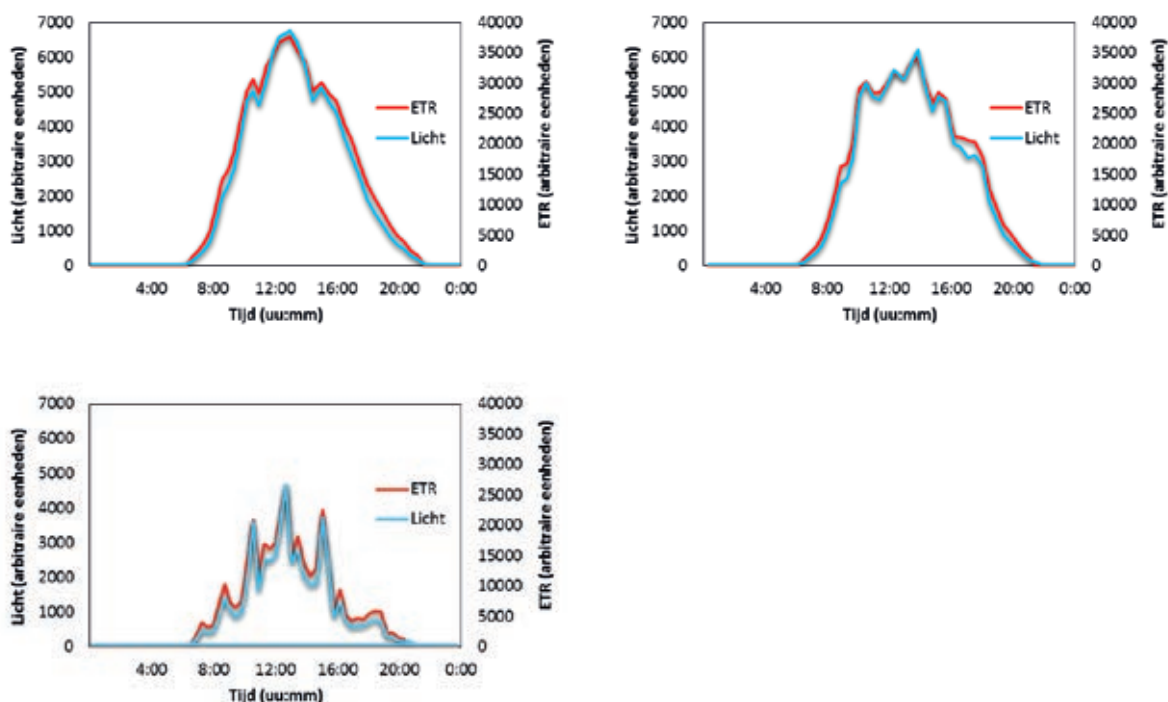
Figuur 30 Lichtintensiteit gemeten in de nok van de kas met diffuus glas door een PAR-sensor uitgezet tegen de lichtintensiteit gemeten door de CropObserver op het gewas.

De CropObserver meet het verloop van de lichtintensiteit en de efficiëntie van de fotosynthese (F_q'/F_m') (Figuur 31). Naarmate er meer licht is, neemt de efficiëntie van de fotosynthese af (zie ook hoofdstuk 2), omdat er dan meer reactiecentra al lichtverzadigd zijn en tijdelijk even geen fotonen kunnen verwerken. Echter, naarmate de lichtintensiteit toeneemt, neemt de electron transport rate (ETR) toe, omdat de lichtintensiteit dan sterker toeneemt dan dat de efficiëntie afneemt. Immers: de relatieve ETR is de $F_q'/F_m' \times \text{PAR}$. Als de lichtintensiteit meer toeneemt dan de efficiëntie afneemt, neemt de ETR toch toe.



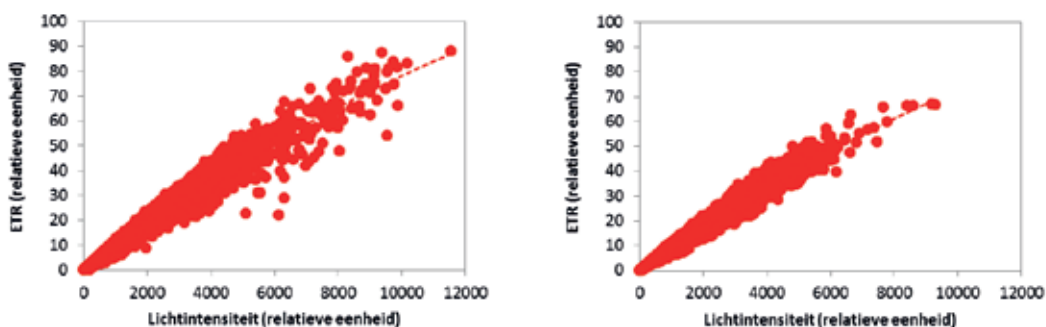
Figuur 31 Over een periode van een nacht-dag-nacht van 26 april, zijn de metingen van de efficiëntie van de lichtbenutting in de fotosynthese uitgezet samen met de lichtintensiteit zoals gemeten door de CropObserver. De efficiëntie van de fotosynthese in het licht wordt uitgedrukt als F_q'/F_m' en in het donker als F_v/F_m .

Op de geselecteerde dagen is de ETR uitgezet tegen de lichtintensiteit, beiden gemeten met de CropObserver (Figuur 32). Uit deze figuren blijkt dat de ETR de lichtintensiteit grotendeels volgt. Dit verloop verschilt van dat van de gewasfotosynthesemonitor en de modelberekeningen, waarbij bij hoge instraling de CO₂ opname achterblijft bij de instraling, o.a. door een lagere CO₂ concentratie.

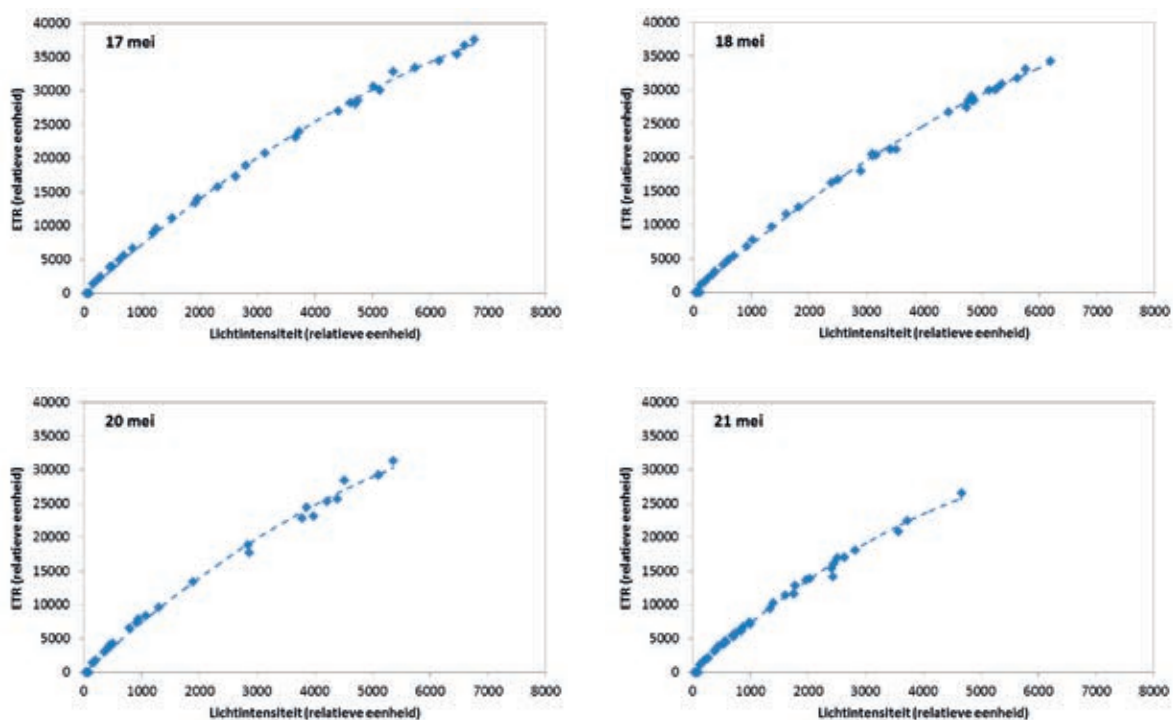


Figuur 32 Verloop van de lichtintensiteit in het gewas en de ETR gemeten met de CropObserver op 17 mei (linksboven), 18 mei (rechtsboven) en 21 mei 2014 (linksonder)

Het feit dat de ETR de lichtintensiteit volgt, is te zien in figuren 33 en 34. De relatie verloopt als een verzadigingscurve, waarbij de toename van ETR met lichtintensiteit kleiner wordt bij toenemende lichtintensiteit. In figuur 33 is deze relatie weergegeven op basis van alle (punt)metingen van een dag, in figuur 34 op basis van gemiddelde waarden per 22 minuten, de duur van een meetcyclus waarin alle punten van het vlak van 3 x 3 m² worden gemeten.



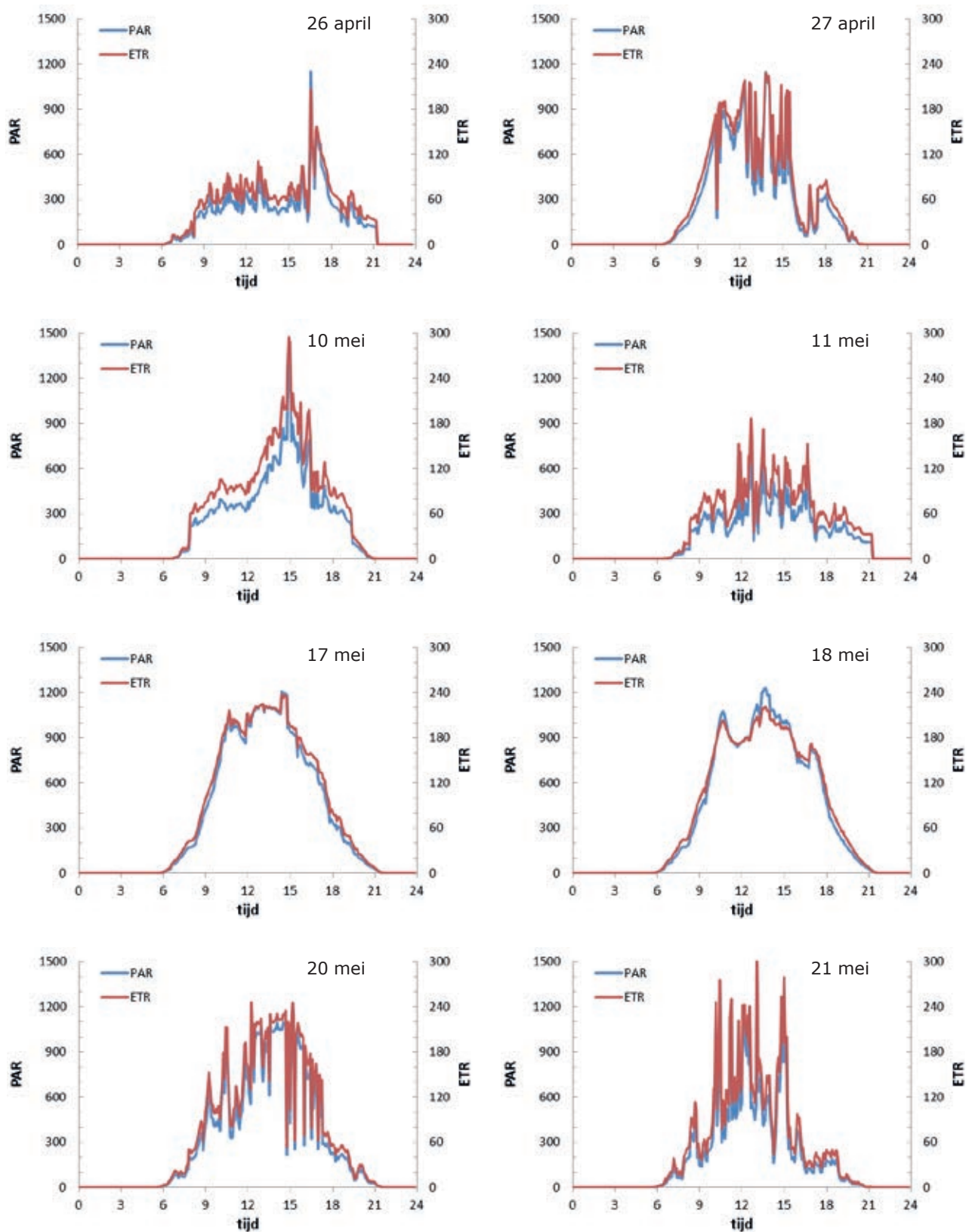
Figuur 33 De ETR uitgezet tegen de lichtintensiteit gemeten met de CropObserver op 10 (links) en 11 (rechts) mei 2015. In deze figuren zijn alle meetwaarden (iedere 2 seconden) opgenomen.



Figuur 34 De electron transport rate (ETR) uitgezet tegen de lichtintensiteit gemeten door de CropObserver. Metingen gedaan op 17, 18, 20 en 21 mei. In deze figuren zijn de metingen gemiddeld over 22 minuten uitgezet.

5.5 Resultaten van de Micro MoniPams

De gewas ETR wordt rechtstreeks berekend uit de PAR gemeten boven het gewas (momentaan), de lichtabsorptie per laag (daggemiddelde) en de relatie tussen ETR en PAR (bladniveau). De berekende gewas ETR volgt de gemeten PAR boven het gewas momentaan. Omdat de ETR bij hoge PAR relatief lager ligt, is in Figuur 35 te zien dat bij hoge PAR de gewas ETR relatief ook wat lager ligt. Omdat de PAR boven het gewas op slechts één plaats gemeten wordt (puntmeting), fluctueert de PAR wat meer dan de globale straling buiten de kas.

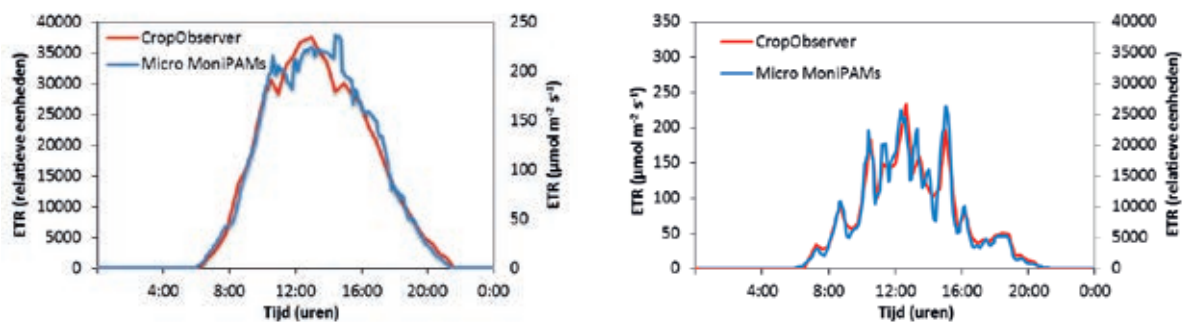


Figuur 35 Verloop van de PAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en de Gewas ETR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) gemeten met de Micro MoniPAMs gedurende de dag op een aantal geselecteerde dagen.

5.6 Vergelijk van de CropObserver met de Micro Moni PAMs

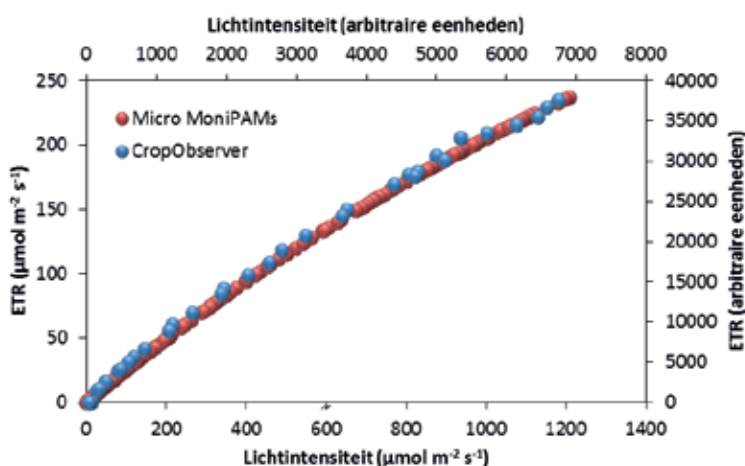
Wanneer het verloop van de meetsignalen van de Micro MoniPAMs en de CropObserver voor dezelfde dagen wordt uitgezet, blijkt dat beide systemen een zeer vergelijkbaar verloop hebben (Figuur 36). Omdat de Micro MoniPAMs gebruik maken van lichtmetingen met een PAR sensor, heeft het ETR signaal van de Micro MoniPAMs ook $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ als eenheid. Omdat de CropObserver het licht meet via reflectie, wordt het licht gemeten met de CropObserver uitgedrukt in arbitraire eenheden, en de ETR van de CropObserver dus ook.

De verschillen in verloop van beide meetsystemen worden veroorzaakt door de verschillen in lichtmetingen. De CropObserver meet per plaats waar de fluorescentie gemeten wordt ook de lichtintensiteit. De MicroMoniPAMs maken gebruik van Apogee lijnsensoren op verschillende hoogtes in het gewas. Incidenteel kunnen er verschillen in deze metingen te zien zijn, bijvoorbeeld door slagschaduw of de positie van de zon ten opzichte van de rij waarin de Apogee lijnsensoren opgehangen zijn. Dit is bijvoorbeeld te zien in de gegevens van 17 mei, rond 15:00 uur (Figuur 36).



Figuur 36 Verloop van de ETR gemeten met de CropObserver (arbitraire eenheden) en de Micro MoniPAMs ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) op 17 mei (links) en 21 mei (rechts) 2015.

Wanneer de ETR van de Micro MoniPAMs en de CropObserver tegen elkaar en de gemeten lichtintensiteiten worden uitgezet, is te zien dat de relatie tussen lichtintensiteit en ETR voor beide systemen vergelijkbaar is (Figuur 37).

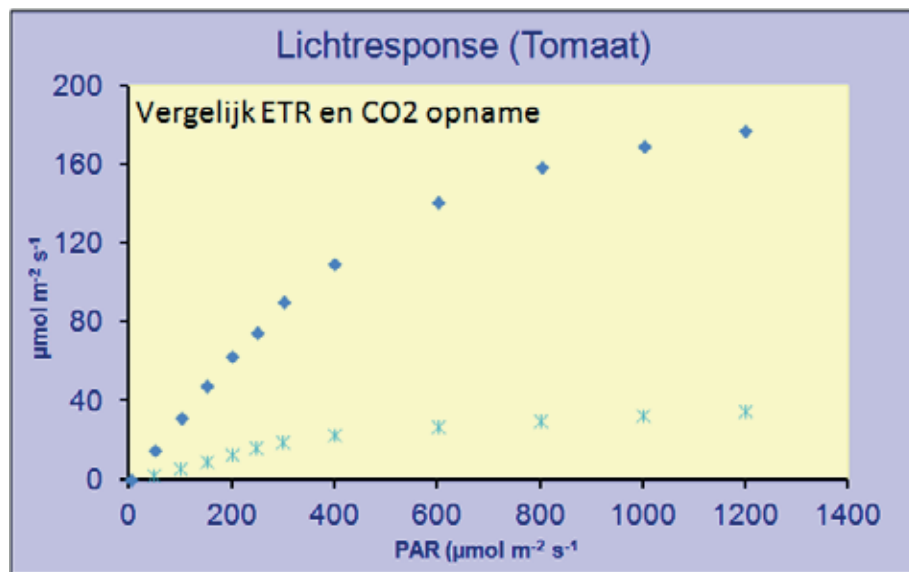


Figuur 37 Vergelijking tussen de lichtintensiteiten gemeten met de CropObserver (arbitraire eenheden) en met de Micro MoniPAMs ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en de ETR gemeten met de CropObserver (arbitraire eenheden) en de Micro MoniPAMs ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) op 17 mei 2015.

Het feit dat de CropObserver hetzelfde verloop van de ETR over de dag meet als de Micro MoniPAMs geeft aan dat de CropObserver een betrouwbaar signaal geeft, met als voordeel dat het een groot oppervlakte gewas meet en op afstand kan meten, zodat het niet in de weg hangt bij gewaswerkzaamheden.

5.7 Resultaten van gelijktijdige metingen van CO₂ opname en fluorescentie

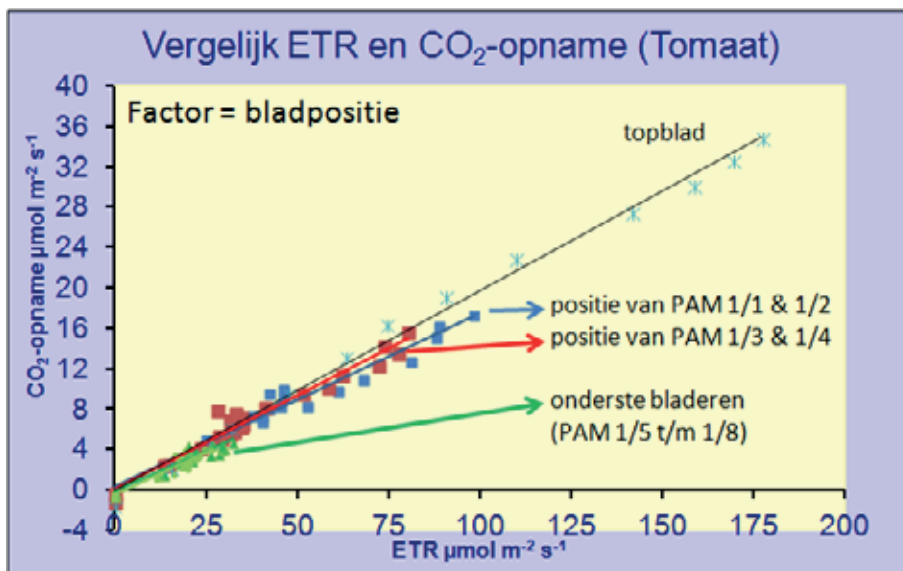
De metingen aan CO₂ opname en fluorescentie hebben als doel de relatie tussen deze twee vast te stellen en na te gaan in hoeverre deze relatie beïnvloed wordt door de CO₂ concentratie in de kaslucht en de positie van het blad in het gewas.



Figuur 38 Lichtresponscurves van de CO₂ opname (fotosynthese; lichtblauwe kruisjes) en ETR (donkerblauwe ruitjes) gemeten aan een volgroeid blad bovenin het gewas.

Om een goed beeld te krijgen van de toepasbaarheid van fluorescentiesensoren in het algemeen (en in dit geval van de Micro MoniPAMs en de CropObserver in het bijzonder) is de vraag in hoeverre de relatie tussen CO₂ opname en ETR zoals gemeten aan het topblad bij een CO₂ concentratie van 700 ppm algemeen geldig is, of dat deze relaties veranderen bij een andere CO₂ concentratie of bladpositie.

Daarom zijn ook de ETR en CO₂ opname gemeten bij een CO₂ concentratie van 450 ppm en op twee hoogtes in het gewas (Figuur 39).

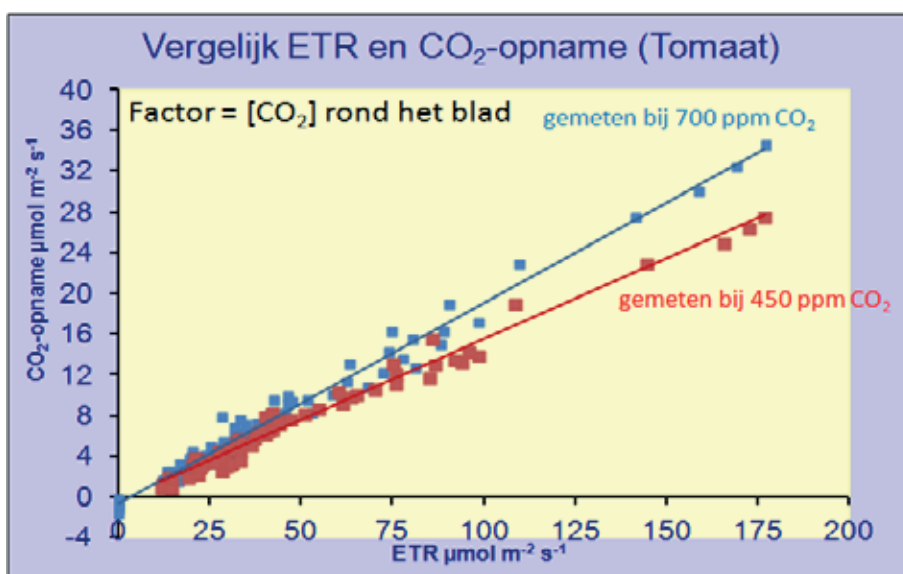


Figuur 39 Effect van de bladpositie op de relatie tussen ETR en CO₂ opname gemeten bij 700 ppm CO₂.

Uit deze metingen blijkt dat de efficiëntie van ETR op de fotosynthese (CO₂ opname) toeneemt naarmate hoger in het gewas wordt gemeten. Dat betekent dat de relatie tussen ETR en de CO₂ opname niet constant is. Echter, de fout als in alle gevallen met één factor wordt gerekend, is klein.

De verhouding tussen de ETR en CO₂ opname verandert daarentegen wel sterk als de CO₂ concentratie in de kaslucht (rondom het blad) verandert. De efficiëntie van de ETR op de fotosynthese neemt duidelijk af bij een lagere CO₂ concentratie. Dat komt door een beperking van de C_i (interne CO₂ concentratie, de CO₂ concentratie in het blad) die wel een remmend effect heeft op de CO₂ opname door het blad, maar niet op de ETR. Dat betekent dat er een correctie nodig is voor de omrekening van de ETR naar de fotosynthese als de CO₂ concentratie in de kaslucht verandert.

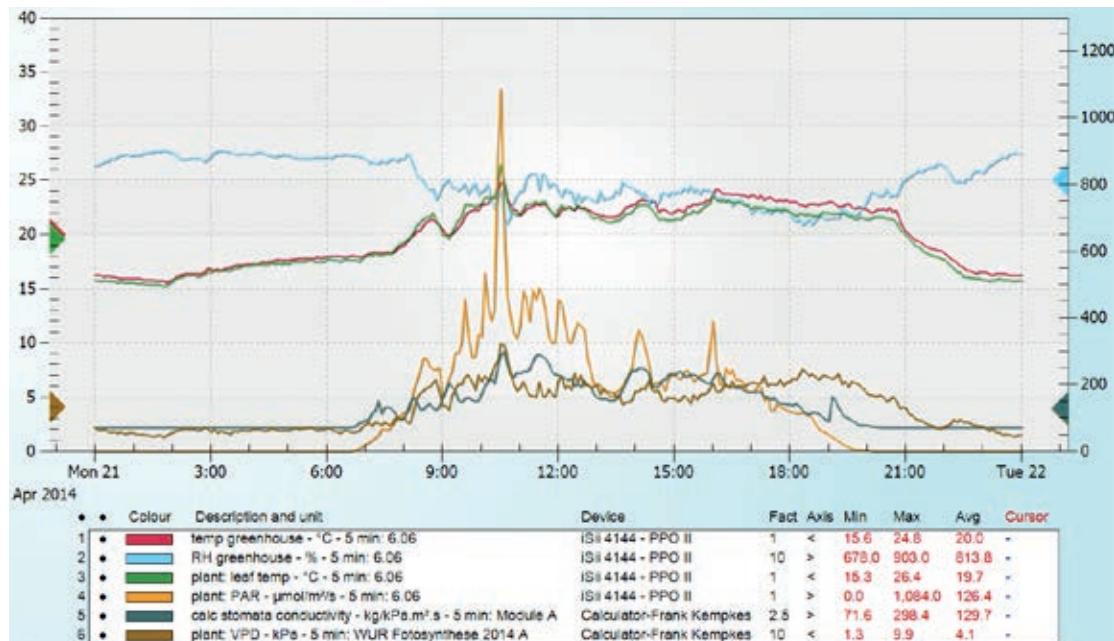
Bij een lage CO₂ concentratie gaat ook de positie van de bladeren in het gewas een grotere rol spelen. De reden hiervoor is dat de stomataire geleidbaarheid van de bladeren lager in het gewas kleiner is, waardoor er sneller een beperking van de C_i op de fotosynthese kan optreden.



Figuur 40 Effect van de CO₂ concentratie op de relatie tussen ETR en CO₂ opname gemeten aan bladeren in de bovenste bladlaag.

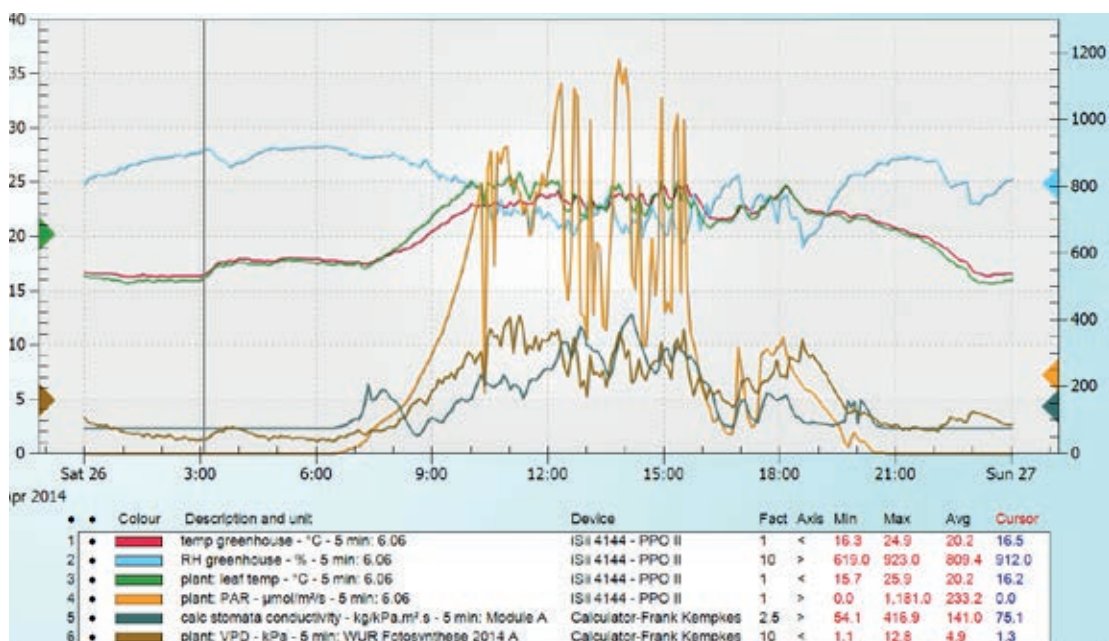
5.8 Resultaten van de Stomatasensor

In de volgende figuren zijn de resultaten van de stomatasensor op de geselecteerde dagen weergegeven.



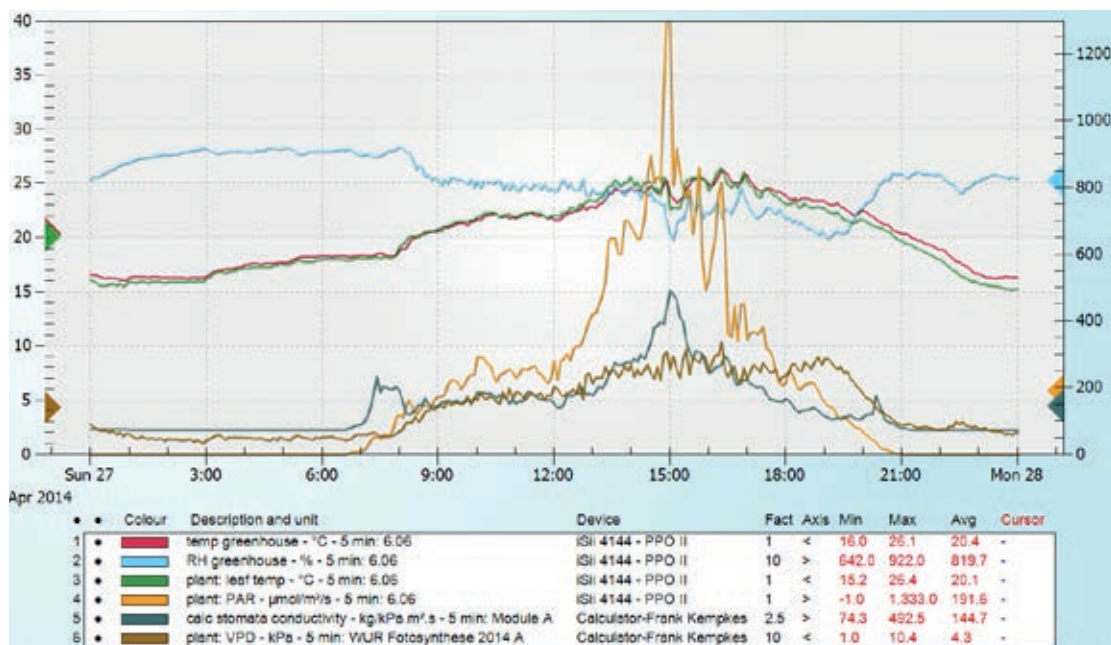
Figuur 41 Berekende huidmondjesgeleidbaarheid, kas- en plant-temperatuur, kaslucht RV, PAR gemeten in de kas en de dampdruk van de plant op 21 april, een donkere dag.

Afgezien van een enkele uitschieter is het stralingsniveau de hele dag laag. Uit het verloop van de planttemperatuur (groene lijn) ten opzichte van de kasluchttemperatuur (rood) blijkt dat de waterstatus van het gewas niet tot nauwelijks uit balans is geweest en dat er dus ook weinig huidmondjes activiteit nodig was. Het "huppeltje" in de grafiek rond 19.00 uur is een typische overgang van de dynamische energiebalans naar de vaste nachtwarde bij het uitdovend licht zoals beschreven in hoofdstuk 3.4.



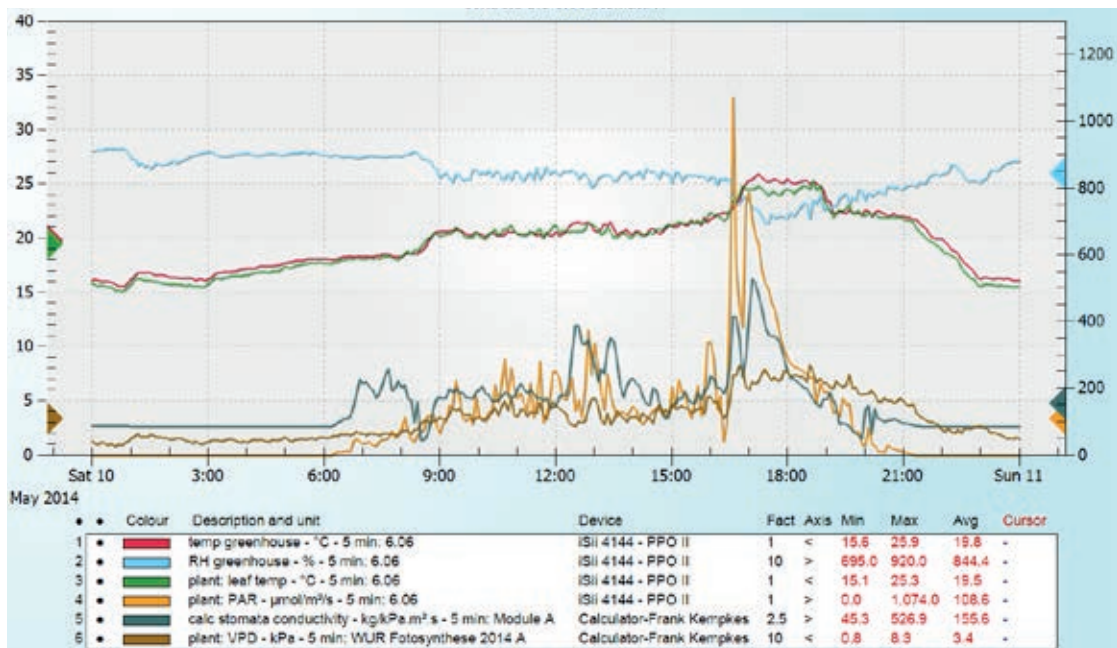
Figuur 42 Berekende huidmondjesgeleidbaarheid, kas- en plant-temperatuur, kaslucht RV, PAR gemeten in de kas en de dampdruk van de plant op 26 april, een dag van licht naar donker.

Het stralingsniveau vertoont het patroon van een heldere ochtend met vanaf circa 10:00 uur toenemende wisselende bewolking, waarbij vanaf circa 15:30 uur de lucht helemaal dicht trekt. Uit het verloop van de planttemperatuur ten opzichte van de luchttemperatuur valt af te lezen dat de plant bij aanvang van de lichtperiode duidelijk moeite heeft de verdamping op gang te brengen. Dit vertaalt zich in het sluiten van de huidmondjes vanaf ca. 8:00 uur. Voor veel praktiserende tomatenkwekers met een gewastemperatuurmeter is dit een atypisch beeld. Een mogelijke verklaring is dat er in deze proef relatief laat begonnen is met het herversadigen van de substraatmat. Vanaf ca. 12:00 uur stabiliseert de waterstatus zich op een redelijk niveau. Later in de middag neemt de water beschikbaarheid weer iets af, wellicht omdat dan gestopt wordt met watergeven.



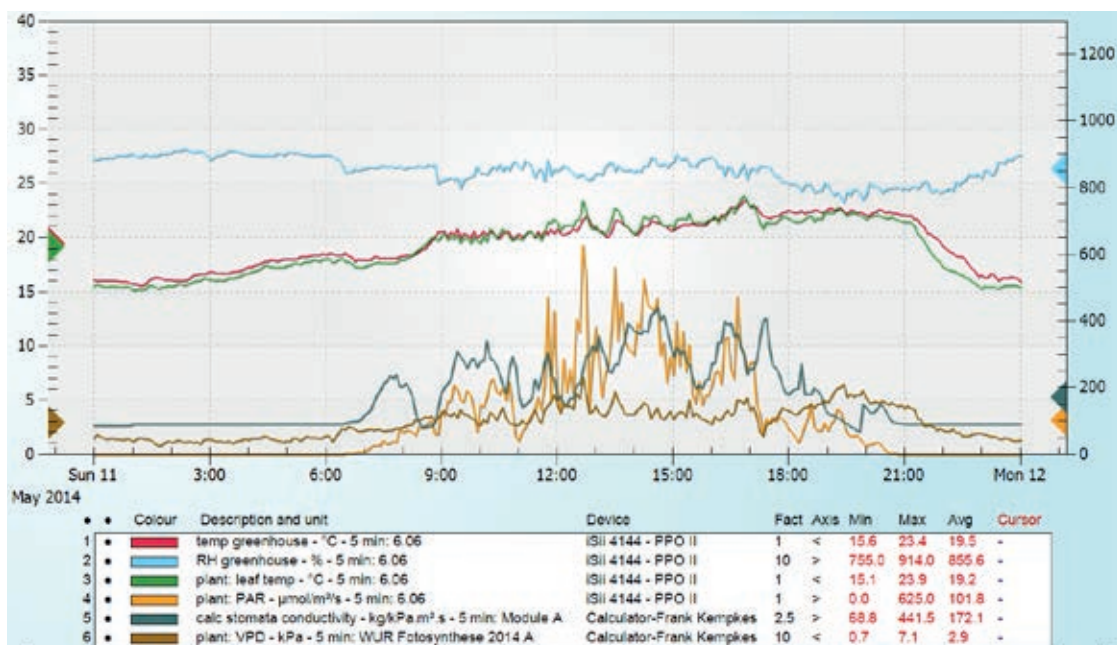
Figuur 43 Berekende huidmondjesgeleidbaarheid, kas- en plant-temperatuur, kaslucht RV, PAR gemeten in de kas en de dampdruk van de plant op 27 april, een dag van donker naar licht.

Het stralingsniveau vertoont het patroon van een bewolkte ochtend met vanaf ca. 12:00 uur afnemende wisselende bewolking, waarbij vanaf ca. 16:30 uur de lucht weer dicht trekt. Uit het verloop van de planttemperatuur ten opzichte van de luchttemperatuur valt af te lezen dat de plant hierbij geen grote moeite heeft om de wisselende verdamping bij te houden. De huidmondjesgeleidbaarheid laat een regelmatig verloop zien dat globaal de stralingsintensiteit volgt, geheel naar verwachting. Wel is voor 9:00 uur een dip te zien die correspondeert met het dagelijks patroon van een late start van de watergift. De VPD plant loopt naar het einde van de middag iets op, ook geheel in overeenstemming met de iets dalende RV in de kas.



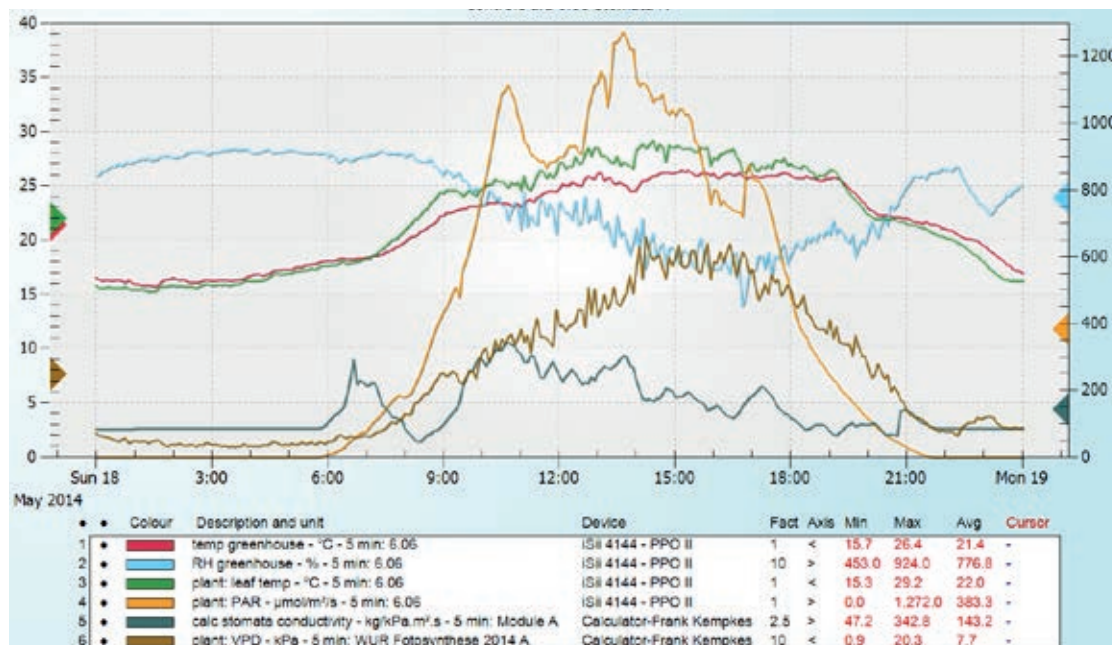
Figuur 44 Berekende huidmondjesgeleidbaarheid, kas- en plant-temperatuur, kaslucht RV, PAR gemeten in de kas en de dampdruk van de plant op 10 mei, een dag van donker naar licht.

Het stralingsniveau vertoont het patroon van een zwaar bewolkte dag met tussen ca. 16:30 en 18:00 uur een lichtere periode. Uit het verloop van de planttemperatuur ten opzichte van de luchttemperatuur valt af te lezen dat de plant hierbij geen grote moeite heeft om de wisselende verdamping bij te houden. De huidmondjesgeleidbaarheid laat een regelmatig verloop zien dat globaal de stralingsintensiteit volgt. Herkenbaar is weer de dip voor 9:00 uur, die correspondeert met het dagelijks patroon van een late start van de watergift.



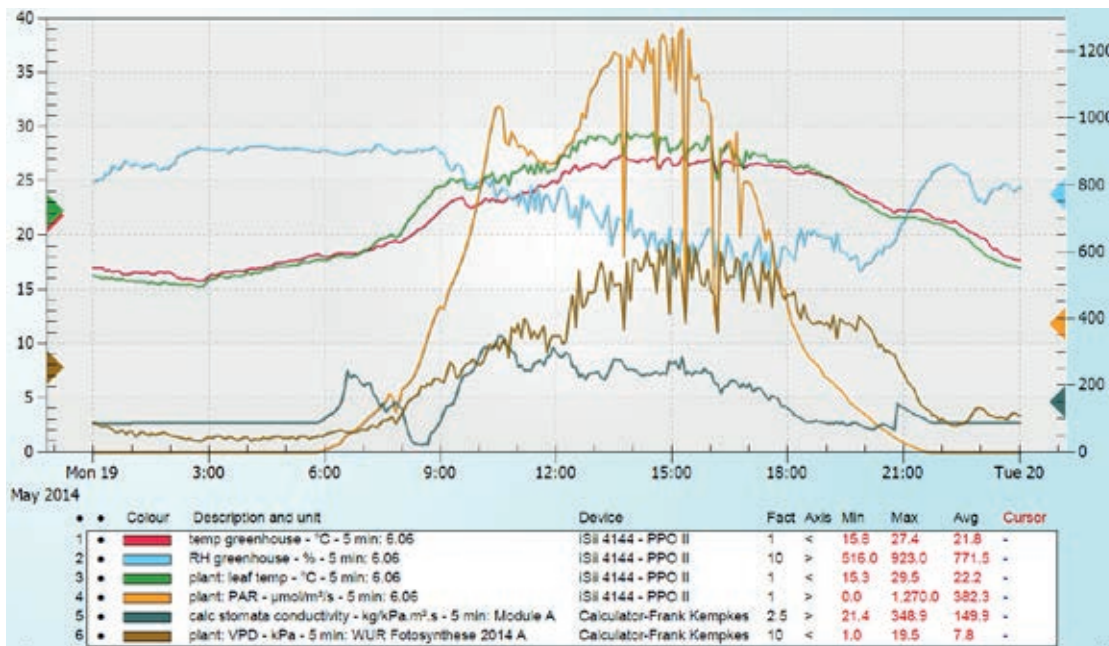
Figuur 45 Berekende huidmondjesgeleidbaarheid, kas- en plant-temperatuur, kaslucht RV, PAR gemeten in de kas en de dampdruk van de plant op 11 mei, een donkere dag.

Het stralingsniveau vertoont het patroon van een zwaar bewolkte dag met tussen ca. 11:00 en 17:00 uur een aantal kortstondige lichtere perioden. Uit het verloop van de planttemperatuur ten opzichte van de luchttemperatuur valt af te lezen dat de plant juist bij deze pieken wat meer moeite heeft om de toenemende verdamping bij te houden. Dit is een gebruikelijk beeld, en het komt terug in het verloop van de huidmondjesgeleidbaarheid, die voor het overige globaal de stralingsintensiteit volgt. Herkenbaar is weer de dip voor 9:00 uur, die correspondeert met het dagelijkse patroon van een late start van de watergift.



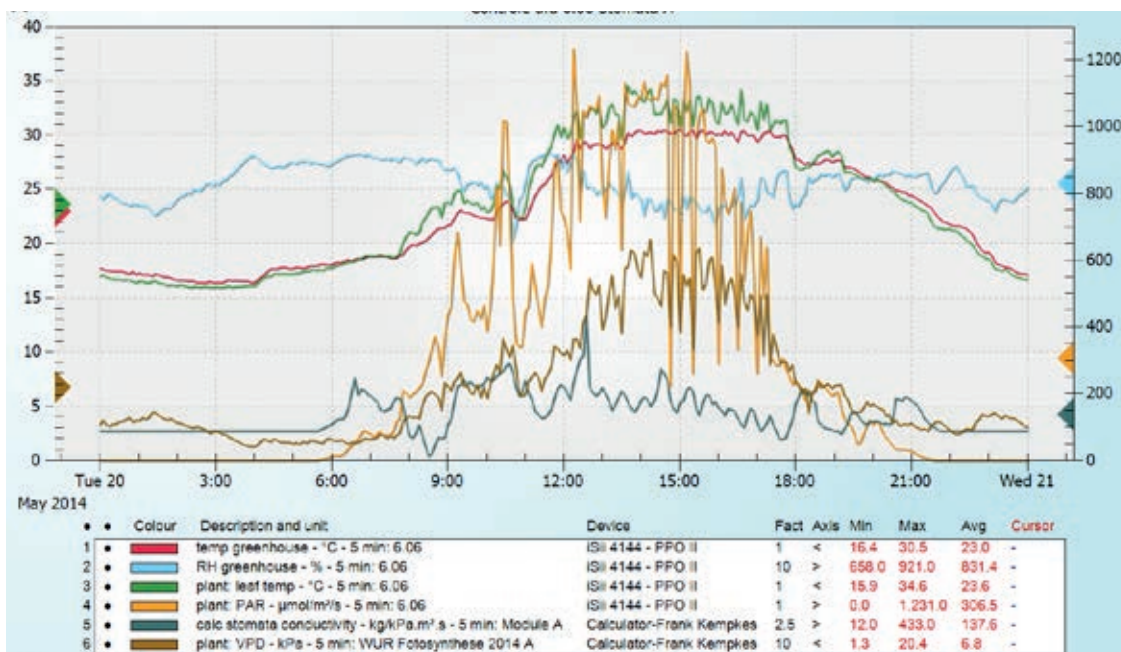
Figuur 46 Berekende huidmondjesgeleidbaarheid, kas- en plant-temperatuur, kaslucht RV, PAR gemeten in de kas en de dampdruk van de plant op 18 mei, een zonnige dag.

Het stralingsniveau vertoont het patroon van een heldere tot licht bewolkte dag met een tweetal wat donkerder perioden. Opvallend is dat de planttemperatuur gedurende de hele dag ruim boven de luchttemperatuur blijft, een voor tomaat atypisch beeld, dat wijst op een achterblijvende verdamping. Wellicht als gevolg van een zuinige watergift. Herkenbaar is weer de dip voor 9:00 uur, die correspondeert met het dagelijkse patroon van een late start van de watergift. Bovendien is er een afnemende trend naar het einde van de middag. Dit beeld komt vaker voor bij tomaat en wordt ook wel de "namiddag dip" genoemd. Deels wordt dit veroorzaakt door de dalende RV in de kas die rond 17:00 uur zelfs onder de 50% komt. Zie ook de oplopende VPD die eind van de middag bijna 2 kPa bereikt.



Figuur 47 Berekende huidmondjesgeleidbaarheid, kas- en plant-temperatuur, kaslucht RV, PAR gemeten in de kas en de dampdruk van de plant op 19 mei, een zonnige dag.

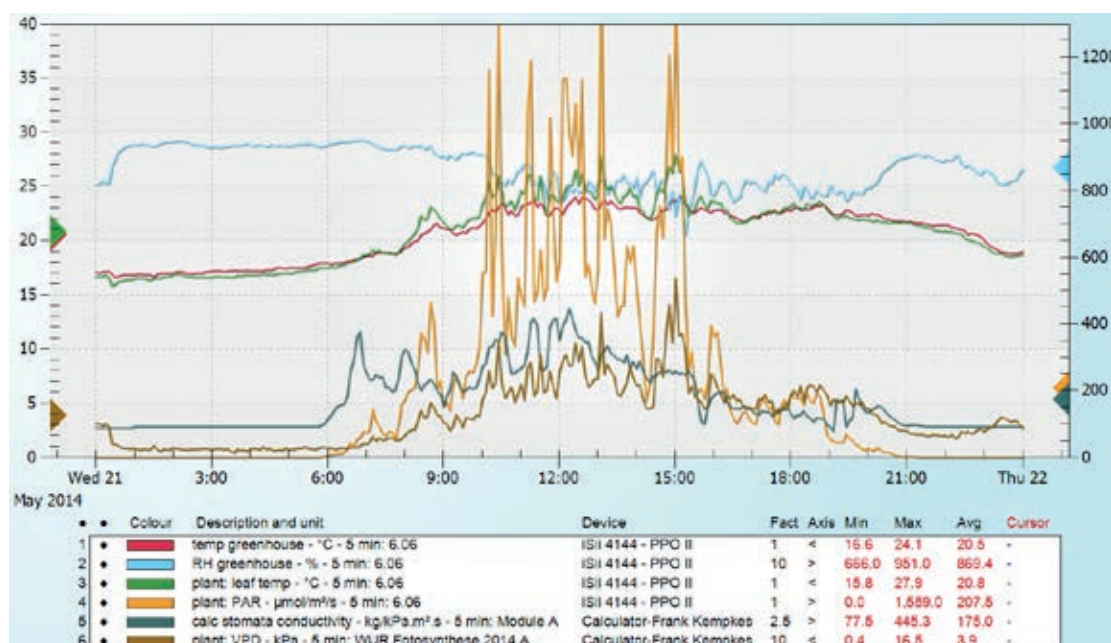
Het stralingsniveau vertoont het patroon van een heldere ochtend met vanaf ca. 10:00 uur wat wisselende bewolking die zorgt voor langere en kortere perioden met minder straling, maar bij elkaar toch een hoog gemiddelde. Opvallend is weer dat de planttemperatuur gedurende de hele dag ruim boven de luchttemperatuur blijft, een voor tomaat atypisch beeld, dat wijst op een achterblijvende verdamping. Wellicht als gevolg van een zuinige watergift. Herkenbaar is weer de dip voor 9:00 uur, die correspondeert met het dagelijks patroon van een late start van de watergift. Bovendien is er een afnemende trend naar het einde van de middag. Dit beeld komt vaker voor bij tomaat en wordt ook wel de "namiddag dip" genoemd, corresponderend met een dalende RV in de kas en dien ten gevolge een stijgende VPD plant.



Figuur 48 Berekende huidmondjesgeleidbaarheid, kas- en plant-temperatuur, kaslucht RV, PAR gemeten in de kas en de dampdruk van de plant op 20 mei, een lichter wordende dag met een hoge kasluchttemperatuur van 30°C.

Het stralingsniveau vertoont het patroon van een behoorlijk wisselende bewolking die zorgt voor langere en kortere pieken en dalen in het stralingsniveau, maar toch een redelijk hoog gemiddelde. Opvallend is weer dat de planttemperatuur gedurende de hele dag ruim boven de luchttemperatuur blijft, een voor tomaat atypisch beeld, dat wijst op een achterblijvende verdamping. Wellicht als gevolg van een zuinige watergift. Herkenbaar is weer de dip voor 9:00 uur, die correspondeert met het dagelijks patroon van een late start van de watergift. Bovendien is er een afnemende trend naar het einde van de middag.

Om wat extremen in het kasklimaat te genereren is op 20 mei een klimaatstrategie aangehouden, waarbij de ramen nauwelijks geopend werden. Gevolg hiervan was dat de temperatuur en RV hoger opliepen dan op de voorgaande dag, 19 mei. Deze andere klimaatstrategie heeft geen grote invloed op de huidmondjesgeleidbaarheid die op beide dagen een waarde rond 200 bedraagt. Op beide dagen is kenmerkend dat de planttemperatuur langdurig meerdere graden boven de ruimtetemperatuur komt wat zou wijzen op een te lage waterbeschikbaarheid.



Figuur 49. *Berekende* huidmondjesgeleidbaarheid, kas- en plant-temperatuur, kaslucht RV, PAR gemeten in de kas en de dampdruk van de plant op 21 mei, een donker eindigende dag.

Het stralingsniveau vertoont het patroon van een behoorlijk wisselende bewolking die zorgt voor langere en kortere pieken en dalen in het stralingsniveau, met een vrij laag gemiddelde. De planttemperatuur blijft meestentijds boven de luchttemperatuur, maar toch minder ver dan op de voorgaande dag. Het verloop van de huidmondjesgeleidbaarheid vertoont algemeen de zelfde kenmerken als de voorgaande dagen.

Samenvattend

Als we het verloop van de straling en de planttemperatuur ten opzichte van de kasluchttemperatuur van alle bovenstaande dagen tezamen nemen dat komt het volgende beeld naar voren:

- Een planttemperatuur die langdurig flink boven de ruimtetemperatuur blijft is atypisch voor tomaat. Tomaat is een sterk verdampend gewas dat in staat is ook bij hoge instraling voldoende te koelen om de bladtemperatuur laag te houden.
- Juist ook vanwege dit feit is op 13 mei 2014 de opstelling van de IR planttemperatuur meter extra gecontroleerd. Deze bleek naar de algemene richtlijnen niet optimaal te zijn. De meter was gericht op een te klein gewas oppervlak en het meetgebied lag vanaf ca 12.00 uur te veel in de schaduw van de zijgevel van de kas. Voor zover mogelijk is dat bijgesteld zodat de opstelling vanaf 13 mei beter voldeed aan de richtlijnen voor gewastemperatuur metingen. Aangezien de hier boven besproken dagen van vóór 13 mei voornamelijk donkere dagen zijn heeft deze bijstelling hierop weinig invloed. Maar het geeft wel extra zekerheid dat de metingen van de hoge planttemperaturen op de lichte dagen na 13 mei overeenkomen met de werkelijkheid.
- Het patroon van een dip in de huidmondjesgeleidbaarheid voor 9.00 uur 's morgens zou wijzen op een (te) late start van de watergift aan het begin van de dag.
- Het beeld van een langdurig en groot verschil tussen planttemperatuur en ruimtetemperatuur bij hoge (gemiddelde) instraling zou wijzen op een "zuinige" watergeef strategie.
- Voor het overige volgen de berekende lijnen van de huidmondjesgeleidbaarheid het gebruikelijke beeld van vruchtgroenten gewassen: een toenemende geleidbaarheid bij toenemende straling en dips in de geleidbaarheid bij plotselinge stralingspieken.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Inleiding

Om de effecten van energiebesparende maatregelen op het gewas te kunnen monitoren zou het wenselijk zijn de reacties van het gewas op minuten- of uurbasis te kunnen meten, zodat het kasklimaat direct op de behoeftes van het gewas afgestemd zouden kunnen worden. Het basisproces voor de groei en productie van een gewas is de fotosynthese. Het meten van de gewasfotosynthese is dus van belang om goed te monitoren hoe het gewas er voor staat en of er aanpassingen in het kasklimaat nodig zijn.

In een eerder project zijn in een aantal bijeenkomsten de eisen aan een dergelijk monitoringsysteem benoemd.

- De sensoren moeten bij voorkeur het gewas niet raken, maar op afstand kunnen meten zodat ze de plant niet beïnvloeden.
- De sensoren moeten een groter oppervlakte of meerdere planten meten.
- Ze moeten een betrouwbaar signaal geven.
- Ze moeten robuust, storingsvrij en goedkoop in onderhoud zijn.
- Ze moeten een on-line continu signaal geven dat makkelijk te koppelen of te vergelijken is met klimaatdata.
- De sensor moet eenduidige gegevens leveren met een duidelijke weergave zodat in één oogopslag duidelijk is wat er met het gewas gebeurt.
- De sensor zou advies moeten kunnen geven over aanpassingen in klimaatregeling.

Een monitoringssysteem dat aan deze eisen voldoet, is op dit moment nog niet commercieel verkrijgbaar. Daarom hebben Wageningen UR Glastuinbouw en PhenoVation begin 2014 twee sensoren ontwikkeld die de CO₂ opname van een hele kas kunnen bepalen (gewasfotosynthesemonitor) en een fluorescentiesensor waarmee de fotosynthesecapaciteit van een groot oppervlak gewas bepaald kan worden (CropObserver). Deze monitoringssystemen zijn vervolgens in het voorjaar van 2014 in een kasproef getest.

6.2 De gewasfotosynthesemonitor

6.2.1 Resultaten

De gewasfotosynthesesensor is een softsensor die de CO₂ opname van een kas met gewas kan berekenen. Dit doet deze monitor op basis van de CO₂ balans van een kas, met aan de ene kant de aanvoer van CO₂ (CO₂ dosering) en aan de andere kant het verlies van CO₂ (ventilatie, veranderingen in de CO₂ concentratie en de gewasfotosynthese). Door de CO₂ concentratie te meten en het ventilatieverlies te bepalen, kan de gewasfotosynthesemonitor de gewasfotosynthese berekenen.

De gewasfotosynthesemonitor heeft betrouwbare data nodig van de CO₂ concentratie en relatieve luchtvochtigheid binnen en buiten de kas. Verder moet de aanvoer van CO₂ naar de kas bekend zijn. In de proef bij Wageningen UR Glastuinbouw in Bleiswijk werd dit bepaald met een CO₂ flowmeter op de aanvoer van CO₂ naar de kas en CO₂ en RV sensoren in de kasafdeling en buiten de kas. Hiermee waren de randvoorwaarden aanwezig voor de berekeningen met de gewasfotosynthesemonitor, die dan ook gedurende de hele proef zonder problemen heeft meegerekend.

Om een goede vergelijking te kunnen maken van de verschillende sensoren die in deze proef gebruikt zijn zonder het spoor bijster te raken in de enorme hoeveelheid data die de sensoren genereerden, is een aantal dagen geselecteerd met verschillende verlopen en hoeveelheden instraling. Verder zijn op een dag aan het einde van de proef de ramen gesloten gehouden en de CO₂ dosering gestopt om een extreem klimaat te krijgen.

Voor alle geselecteerde dagen is de gewasfotosynthese die is bepaald met de gewasfotosynthesemonitor vergeleken met de gewasfotosynthese die is berekend met het gewasgroeimodel INTKAM op basis van het gerealiseerde kasklimaat. Op de meeste dagen volgde het verloop van de gewasfotosynthese volgens de gewasfotosynthesemonitor goed het verloop van de PAR straling, wat ook verwacht mag worden. Op die dagen komen de ordes van grootte tussen de gewasfotosynthesemonitor en de met INTKAM berekende gewasfotosynthese goed overeen (21, 26, 27 april, 17, 18 en 21 mei). Op donkere dagen (11 mei) of wanneer een deel van de dag relatief donker is (10 mei) geeft de gewasfotosynthesemonitor erg lage waarden van de fotosynthese aan (negatief) en wijkt daarmee af van de met het gewasgroeimodel berekende waarde. Het lijkt dat op deze dagen de waarde van de gewasfotosynthese zo laag is, dat de gewasfotosynthesemonitor moet werken "in de ruis", namelijk met waarden die zo klein zijn dat ze niet nauwkeurig te bepalen zijn. Op 20 mei gebeurt het tegenovergestelde, dan geeft de gewasfotosynthesemonitor een (veel) hogere waarde aan van de gewasfotosynthese dan verwacht zou mogen worden op basis van de instraling (PAR) en berekend werd met INTKAM. Op deze dag wijkt de CO₂ concentratie niet af van die van andere dagen, dus dat is niet de reden voor de hogere berekende gewasfotosynthese.

De CO₂ opname zoals bepaald met de gewasfotosynthesemonitor vertoont een verloop over de dag dat redelijk overeenstemt met de instraling en het verloop van de CO₂ concentratie. Er zitten echter in dit patroon af en toe 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 nog verbeterd moeten worden.

Op een aantal dagen (bijvoorbeeld 26 april, 21 mei) berekent de gewasfotosynthesemonitor in de ochtend een (erg) negatieve CO₂ opname. Dat zijn de periodes dat *et al.* wel licht is, de CO₂ concentratie in de kas daalt, maar er nog niet gedoseerd wordt. De CO₂ opname door het gewas zou dan een positieve waarde moeten hebben, maar heeft dit volgens de gewasfotosynthesemonitor (nog) niet. In de uren die dan volgen, als de CO₂ dosering is gestart, hebben de berekende gewasfotosynthesewaarden wel een logisch te verwachten waarde. In een volgende versie van de gewasfotosynthesemonitor zou nagegaan moeten worden wat hiervan de oorzaak is, en of dit te verhelpen zou zijn.

De berekeningen van de gewasfotosynthese met het gewasgroeimodel zijn gedaan op basis van de kasklimaatdata die per 5 minuten beschikbaar zijn. De bepalingen met de gewasfotosynthesemonitor zijn gedaan per 15 minuten. Consequentie hiervan is dat de resultaten van de gewasfotosynthesemonitor veel meer fluctuatie vertonen dan de berekende gewasfotosynthese. Wanneer de gewasfotosynthesemonitor zodanig aangepast zou kunnen worden dat deze fluctuaties er uit gefilterd zouden kunnen worden, zou het verloop naar verwachting goed overeenstemmen met de door het gewasgroeimodel berekende waarde voor de gewasfotosynthese.

6.2.2 Conclusies

De gewasfotosynthesemonitor voldoet op grote lijnen aan de eisen die gesteld zijn in eerdere projecten aan monitoringssystemen voor de gewasfotosynthese:

- De gewasfotosynthesemonitor maakt gebruik van CO₂ en RV sensoren en de CO₂ flow naar de kas om de gewasfotosynthese te bepalen. Daarbij laat de monitor het gewas vrij, hangt niet in de weg bij gewaswerkzaamheden en beïnvloedt het gewas niet.
- De gewasfotosynthese heeft als meeteenheid de kas of de afdeling, en bepaalt daarmee de gewasfotosynthese van een groot oppervlak aan planten.
- De gewasfotosynthesemonitor heeft gedurende het hele experiment de gewasfotosynthese bepaald zonder storingen en zonder dat onderhoud nodig was. De data van de gewasfotosynthesemonitor maken gebruik van (een deel van) de kasklimaatdata, en zijn daarmee gemakkelijk met de kasklimaatdata te vergelijken. Dit gaat op dit moment nog via Matlab, een interface die voor telers nog niet gebruikelijk is. Daarmee is het signaal nog niet on-line continu te raadplegen.
- De gewasfotosynthesemonitor levert een duidelijk signaal: het dagverloop van de gewasfotosynthese in gram opgenomen CO₂ per m² per uur.
- De gewasfotosynthesemonitor levert nog geen advies over eventuele aanpassingen in het kasklimaat die nodig of wenselijk zouden zijn om de gewasfotosynthese te verhogen.

6.2.3 Aanbevelingen

De waarde van de gewasfotosynthese bepaald met de gewasfotosynthesemonitor stemt op de meeste dagen die geanalyseerd zijn goed overeen met de waardes en het verloop zoals berekend met het gewasgroeimodel. Dat betekent dat het aanbeveling verdient de gewasfotosynthesemonitor verder te ontwikkelen, gezien de voordelen die onder 6.2.2 genoemd staan. Bij de verdere ontwikkeling van de gewasfotosynthesemonitor zouden de volgende aanbevelingen meegenomen moeten worden:

- De gewasfotosynthesemonitor bepaalt per 15 minuten de waarde van de gewasfotosynthese. Wanneer het verloop van deze gewasfotosynthese wordt uitgezet door de gewasfotosynthese, per 5 minuten berekend door het gewasgroeimodel INTKAM op basis van 5 minuten waarden van de kasklimaatdata blijken de waardes van de gewasfotosynthesemonitor veel grotere schommelingen te vertonen dan de door het model berekende waardes. Wanneer de gewasfotosynthesemonitor zodanig aangepast zou kunnen worden dat deze fluctuaties er uit gehaald zouden kunnen worden, zou het verloop naar verwachting goed overeenstemmen met de door het gewasgroeimodel berekende waarde voor de gewasfotosynthese en het kasklimaat. Dan zou de gewasfotosynthesemonitor ook geschikter zijn als monitor om op basis daarvan het kasklimaat te sturen.
- Op momenten dat de gewasfotosynthese laag is, namelijk dagen of periodes met een lage instraling, lijkt de gewasfotosynthese “in de ruis” te werken. De monitor levert dan hele lage of zelfs negatieve waarden voor de gewasfotosynthese, die op basis van de vergelijking met de door het model berekende gewasfotosynthese niet reëel zijn. Het zou goed zijn voor de gewasfotosynthesemonitor een gevoeligheidsanalyse te doen zodat op basis daarvan uitspraken gedaan zouden kunnen worden over het geldigheidsdomein van de gewasfotosynthesemonitor. Dat betekent dat ook een minimumwaarde van de fotosynthese wordt bepaald, waaronder de gewasfotosynthese wiskundig gezien geen betrouwbaar signaal af kan geven.
- Wanneer in een volgende versie van de gewasfotosynthesemonitor bovenstaande aanbevelingen opgevolgd zijn, zou het aanbeveling verdienen de uitvoer van de gewasfotosynthesemonitor zo te structureren dat het gemakkelijk naar een database als bijvoorbeeld Letsgrow teruggevoerd zou kunnen worden, zodat het voor telers direct on-line to volgen zou zijn. Op die manier is het patroon van de gewasfotosynthese over de dag direct te vergelijken met de waarden van de kasklimaatparameters als lichtintensiteit, CO₂, temperatuur en luchtvochtigheid, zodat relaties gelegd kunnen worden en het kasklimaat waar nodig bijgesteld kan worden.

6.3 CropObserver

6.3.1 Resultaten

De CropObserver is een fluorescentiesensor, die een beeld geeft van de (eerste stap van de) fotosynthese van het gewas. De CropObserver belicht het gewas met korte laserlichtpulsjes van boven uit de kas. De sensor meet het terugkomende fluorescentiesignaal, en is zo geprogrammeerd dat er steeds op een andere plek in een oppervlakte van 3 x 3 m wordt gemeten. Op deze zelfde plekken wordt ook de lichtintensiteit gemeten waarmee de efficiëntie van de fotosynthese kan worden bepaald.

De CropObserver heeft geen gegevens nodig van het kasklimaat of CO₂ dosering, maar meet het fluorescentiesignaal van het gewas. Omdat de CropObserver zelf de straling op iedere meetplek meet op basis van reflectie door het gewas, zijn geen externe PAR metingen nodig. Uit de vergelijking van deze metingen van de CropObserver en de metingen van de PAR sensor bovenin de kas (boven de LED lampen) blijkt dat de door de CropObserver gemeten waarden een sterke relatie hebben met de PAR metingen.

Voor de geselecteerde dagen is het verloop van de ETR (elektronen transport snelheid) gemeten door de CropObserver uitgezet tegen dezelfde metingen door de Micro-Moni-PAMs. Hieruit blijkt dat beide systemen een zeer vergelijkbaar verloop hebben, hetgeen betekent dat de CropObserver een betrouwbaar beeld geeft van de lichtbenuttingsefficiëntie in de fotosynthese van het gewas. Het voordeel van de CropObserver hierbij is dat het een groot oppervlakte gewas meet en op afstand kan meten, zodat het niet in de weg hangt bij gewaswerkzaamheden.

Uit de metingen aan tomaat blijkt dat het signaal van de CropObserver grotendeels de lichtintensiteit volgt. Dit betekent dat tomaat een gewas is dat al het licht dat het ontvangt efficiënt kan benutten in de fotosynthese.

6.3.2 Conclusies

De CropObserver voldoet op grote lijnen aan de eisen die gesteld zijn in eerdere projecten aan monitoringsystemen voor de gewasfotosynthese:

- De CropObserver wordt bovenin de kas gehangen, ruim boven het gewas. Daarmee laten ze het gewas vrij en wordt de efficiëntie van de fotosynthese op afstand gemeten. Dat betekent dat de CropObserver niet in de weg hangt bij gewaswerkzaamheden en het gewas niet beïnvloedt.
- De CropObserver meet een groot oppervlakte gewas, namelijk een oppervlakte van $3 \times 3 \text{ m}^2$.
- De CropObserver heeft gedurende de periode dat het apparaat in de kas hing grotendeels zonder problemen gefunctioneerd. Wanneer de CropObserver tijdelijk geen signaal afgaf, kon dit meestal zonder problemen op afstand opgelost worden door een reset te geven. De CropObserver is daarmee robuust en (nagenoeg) storingsvrij.
- De CropObserver levert een on-line continu signaal, dat met een bijgeleverde computer, tablet of smartphone is uit te lezen. Wanneer de ETR in dezelfde figuur wordt uitgezet als de PAR levert dit een duidelijk beeld van de efficiëntie waarmee het licht in de fotosynthese wordt gebruikt.
- De CropObserver levert nog geen advies over eventuele aanpassingen in het kasklimaat die nodig of wenselijk zouden zijn om de gewasfotosynthese te verhogen.

6.3.3 Aanbevelingen

Het verloop van de elektronen transport snelheid (ETR) over de dag zoals gemeten met de CropObserver stemt goed overeen met het verloop van de Micro-Moni-PAMs. Dat betekent dat de CropObserver een betrouwbaar beeld geeft van de (eerste stap van de) fotosynthese van een groot oppervlakte gewas, en dat het aanbeveling verdient de CropObserver verder te ontwikkelen. Bij de verdere ontwikkeling van de CropObserver zouden de volgende aanbevelingen meegenomen moeten worden:

- De CropObserver meet de lichtintensiteit op de meetplek via reflectie. Dat betekent dat het licht in een arbitraire eenheid gemeten wordt. Het zou aanbeveling verdienen als deze lichtintensiteit omgezet zou kunnen worden naar de gebruikelijke eenheid van $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, zodat de door de CropObserver gemeten lichtintensiteit zich makkelijk laat vergelijken met de PAR sensor van de teler.
- Omdat de gemeten lichtintensiteit vermenigvuldigd met de efficiëntie van de fotosynthese de elektronen transport snelheid (ETR) oplevert, en de lichtintensiteit in arbitraire eenheden gemeten wordt, moet ook de waarde van de ETR in arbitraire eenheden weergegeven worden. Wanneer de lichtintensiteit gemeten door de CropObserver omgezet zou kunnen worden in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, zou de waarde van de ETR weergegeven kunnen worden in $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, wat een vergelijk met andere systemen mogelijk zou maken.
- De wijze waarop de lichtintensiteit gemeten is met de versie van de CropObserver zoals in dit project is gebruikt, maakt het niet mogelijk het LED licht mee te meten. Het zou aanbeveling verdienen in een volgende versie van de CropObserver de meting van de lichtintensiteit op de meetplek zodanig aan te passen dat ook eventueel gebruikt LED licht meegemeten wordt.
- De CropObserver bepaalt de elektronen transport snelheid, een maat voor de eerste stap van de fotosynthese. In de tweede stap van de fotosynthese wordt CO_2 omgezet in suikers. Deze beide stappen samen bepalen de CO_2 opname door het gewas, en dus de gewasfotosynthese. Uit de metingen die in dit project zijn gedaan blijkt dat eenzelfde waarde van de ETR bij een hogere CO_2 concentratie in de kas leidt tot een hogere CO_2 opname dan een lagere CO_2 concentratie. Om met de CropObserver een volledig beeld te krijgen van de fotosynthese, zou er een module aan de CropObserver gekoppeld moeten worden die de huidmondjesopening bepaald, en waarmee de CO_2 concentratie, temperatuur en relatieve luchtvochtigheid in de kas gemeten kunnen worden. Daarmee zou de ETR omgezet kunnen worden naar de CO_2 opname door het gewas.

7 Publicaties en communicatie

Artikelen in vakbladen en op websites

Arkesteijn, M, A. de Gelder, A., J.A. Dieleman, 2014.

Teler moet goede reden hebben om sensoren aan te schaffen. Planten monitoren om er iets mee te doen.
Onder Glas 11(2): 42-43.

Dieleman, J.A., J. Bontsema, J.F.H. Snel, H. Jalink, H., 2014.

Metten van de gewasfotosynthese in de kas: realiteit of toekomstmuziek? KasTechniek 3: 30-34

Dieleman, J.A., 31 maart 2014.

Gewas volgen met fotosynthesemeter. www.energiek2020.nu

Boonekamp, G., 2014.

Laserorgel brengt fotosynthese 'real-time' in kaart. Vinger aan de pols bij belangrijkste proces.
Groenten+Fruit 10: 25-27

Dieleman, J.A., 16 mei 2014.

Goed beeld van fotosynthese gewas. www.energiek2020.nu

Dieleman, J.A., G.J. Swinkels, 3 december 2013.

Licht optimaliseren met nieuwe meettechniek. www.energiek2020.nu

Vegter, B., 2013.

Betere teelt door sturen via fotosynthese-monitor. Vakblad voor de bloemisterij 35: 32-33

Visser, P., 2013.

Behoeftte aan inzicht opname CO₂. Groenten & Fruit website, 2013-02-28

Visser, P., 2013.

Sturen op fotosynthese. Groenten & Fruit website, 2013-03-14

Sleegers, J., 2013.

Op weg naar de volautomatische kas. Vakblad voor de bloemisterij 68(13): 32-33

Presentaties

Dieleman, J.A., 2013.

Plantmonitoring: meten van de fotosynthese. Arenasessie Werken aan Vaardigheden, 28 november 2013.

Dieleman, J.A., 2014.

Measuring crop photosynthesis in a greenhouse: fact or fiction? Presentation at the Photonics Event 2014, 12 June 2014, Veldhoven

Dieleman, J.A., S. Pot, 2014.

Plantmonitoring op basis van fotosynthesesensoren. Workshop op het Energiek2020 Event in Bleiswijk, 24 april 2014.

8 Literatuur

- Bontsema, J., E.J. van Henten, J.G. Kornet, J. Budding, Th. Rieswijk, 2005.
On-line estimation of the ventilation rate of greenhouses. Proceedings of the 16th IFAC World Congress, Praag, 3-8 July 2005, 6 pp.
- Bontsema, J., E.J. van Henten, J. Hemming, J. Budding, Th. Rieswijk, 2006a.
On-line estimation of the ventilation rate of greenhouses: a system theoretical approach. *Acta Horticulturae* 718: 233 - 241.
- Bontsema, J., J. Hemming, C. Stanghellini, P.H.B. de Visser, E.J. van Henten, J. Budding, T. Rieswijk, T., S. Nieboer, 2008.
On-line estimation of the transpiration in greenhouse horticulture. Proceedings Agricontrol 2007, Osijek, Croatia, 3 - 5 September 2007: 29 - 34.
- Bontsema, J., J. Hemming, C. Stanghellini, P.H.B. de Visser, E.J. van Henten, J. Budding, T. Rieswijk, S. Nieboer, 2007.
On-line monitoring van transpiratie en fotosyntheseactiviteit. *Nota Wageningen UR Glastuinbouw* 451 - 40 p.
- Bontsema, J., J. Hemming, J. Budding, M. Steenbakkens, S. Rispens, H.J.J. Janssen, 2009.
Ventilatievoud: de praktijk. Rapport Wageningen UR Glastuinbouw 294.
- Bontsema, J., R.J.C. van Ooteghem, J. Hemming, E.J. van Henten, A. van 't Ooster, H.J.J. Janssen, 2010.
On-line monitoring of the energy and moisture flows in greenhouses. Proceedings Agricontrol 2010, IFAC International Conference, 6-8 December, 2010, Kyoto, Japan.
- Bontsema, J., J. Hemming, H.J.J. Janssen, E. Meinen, S. Rispens, J.W. Steenhuizen, P.H.B. de Visser, 2011.
On-line monitoring van transpiratie en fotosynthese: de praktijk. Rapport Wageningen UR Glastuinbouw, GTB 1091, 65 p.
- Bontsema, J., 2012.
Multivariable dynamic unknown input observer for ventilation rate and transpiration. Presentatie Teammeeting Wageningen UR Glastuinbouwtechnologie 13 november 2012 (ongepubliceerd).
- De Gelder A., M. Warmenhoven, P. Klapwijk, P.H. van Baar, 2014.
Optimalisatie van Het Nieuwe Telen. Wageningen, Rapport nr GTB-1300, 68 pp.
- Dieleman, J.A., J. Janse, A. de Gelder, F.L.K. Kempkes, P.H.B. de Visser, P. Lagas, E. Meinen, M. Warmenhoven, A. Elings, A., 2015.
Tomaten belichten met minder elektriciteit. Rapport Wageningen UR Glastuinbouw, GTB-1338, 74 pp.
- Farquhar, G.D., S. Von Caemmerer, J.A. Berry, 1980.
A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C3 species. *Planta* 149: 78-90.
- Farquhar G.D., S. Von Caemmerer, 1982.
Modelling of photosynthetic response to environmental conditions; *Encyclopedia of plant physiology new series* vol. 1: 549 - 582.
- 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., H.H. van Laar, 1994.
Modelling potential crop growth processes. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 238 pp.
- Henten, E.J. van, J. Bontsema, J.G. Kornet, J. Hemming, 2006b.
On-line schatting van het ventilatievoud van kassen. Rapport Plant Research International Wageningen, 60 p.
- Henten, E.J. van, C. Stanghellini, J. Bontsema, T. Gallardo, A. van 't Ooster, 2010.
Estimating greenhouse ventilation, crop transpiration and roof condensation using an unknown-input-observer. Proceedings AgEng 2010, Clermont-Ferrand, France 2010-09-06/2010-09-08.
- Kitajima, M., W.L. Butler, 1975.
Quenching of chlorophyll fluorescence and primary photochemistry in chloroplasts by dibromothymoquinone. *Biochimica and Biophysica Acta* 376: 105-115
- Marcelis, L.F.M., R. van den Boogaard, E. Meinen, 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 Post-harvest Processing. IFAC, pp. 351-356

Maxwell, K., G.N. Johnson, 2000.

Chlorophyll fluorescence – a practical guide. *Journal of Experimental Botany* 51 (345): 659 - 668

Voogt, J., P.A. van Weel, 2008.

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

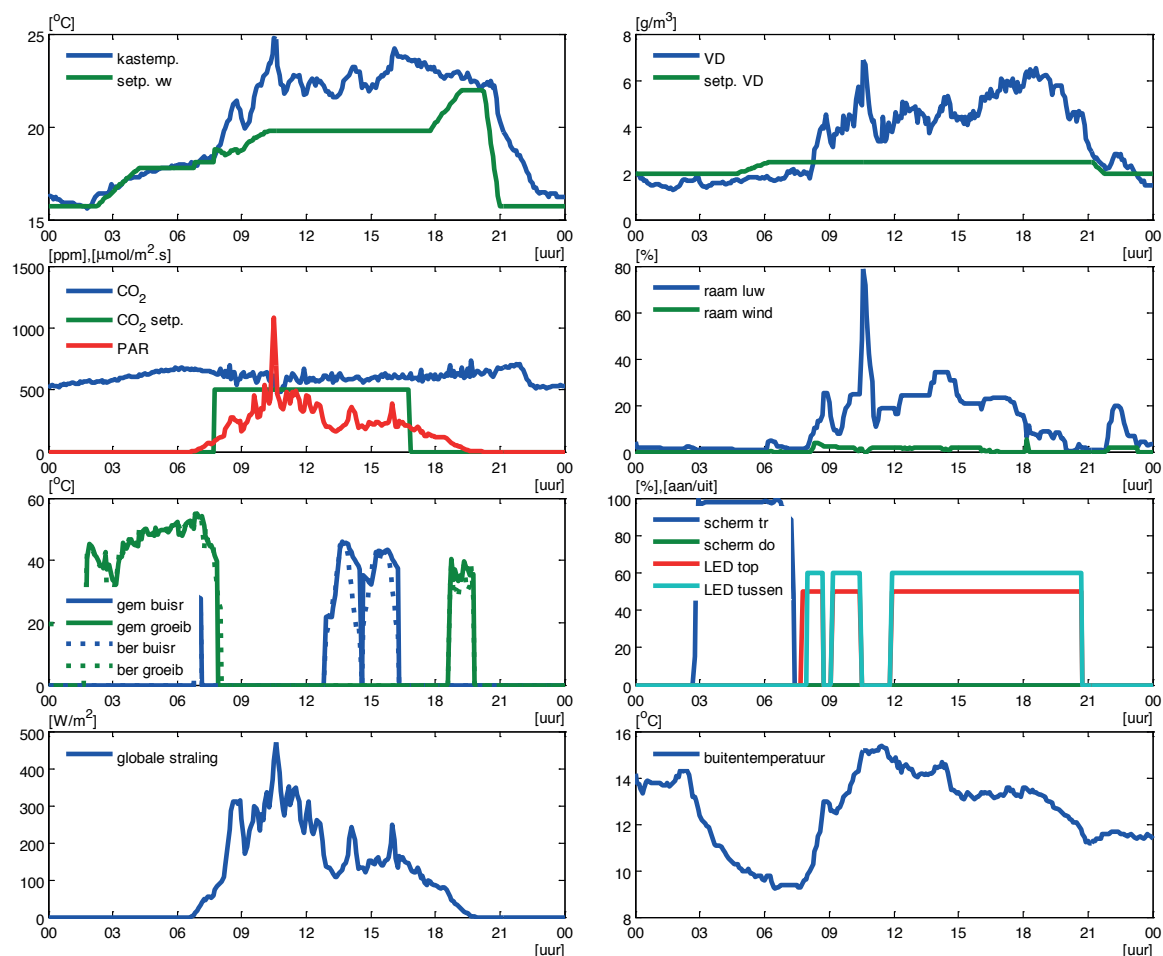
Pot, C.S., G. Trouwborst, A.H.C.M. Schapendonk, 2011.

Handleiding gebruik van plantsensoren voor de fotosynthese in de praktijk. Wageningen: Plant Dynamics B.V., 28 pp.

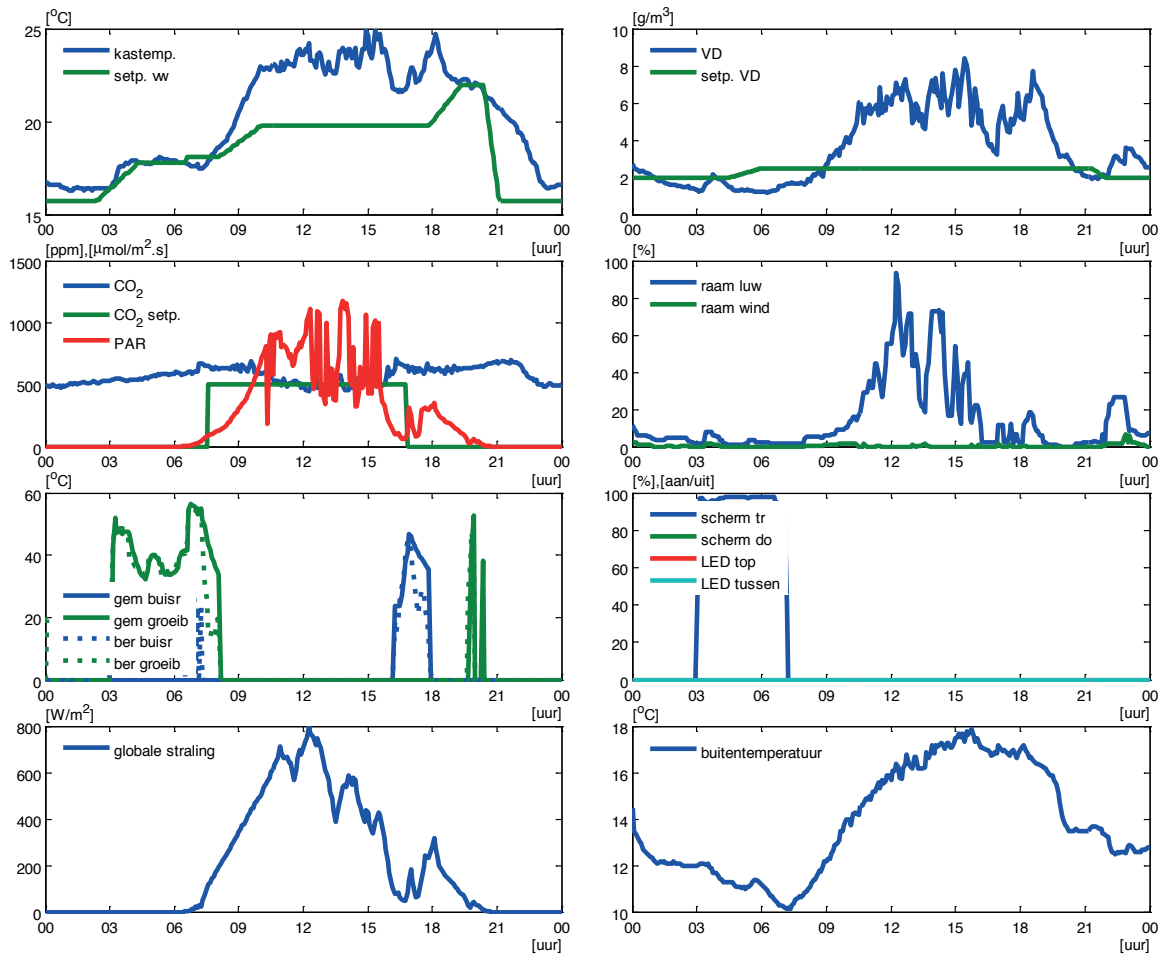
Spitters, C.J.T., H. van Keulen, D.W.G. van Kraalingen, 1989.

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.

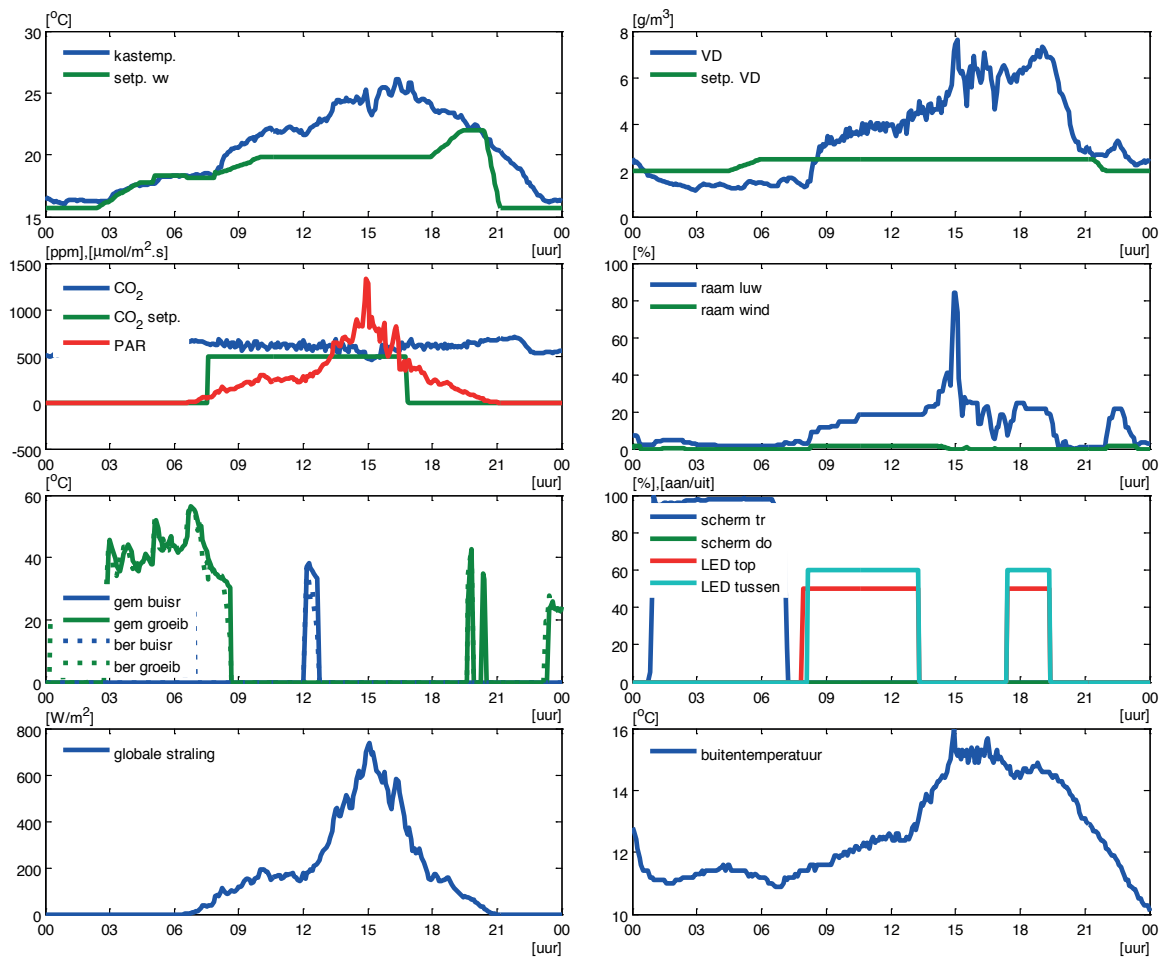
Bijlage I Kasklimaatparameters geselecteerde dagen



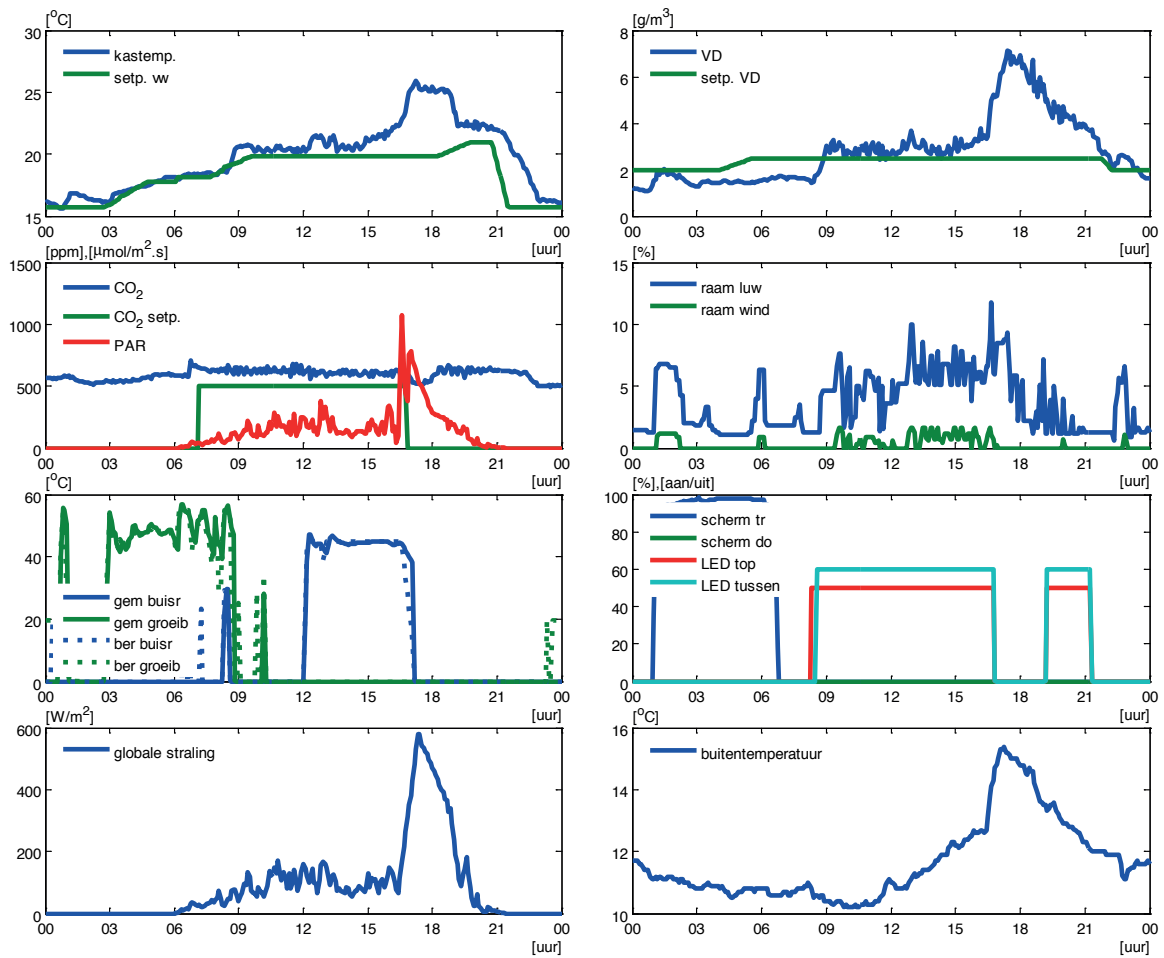
Figuur I-1 Kasklimaatparameters 21 april, een donkere dag.



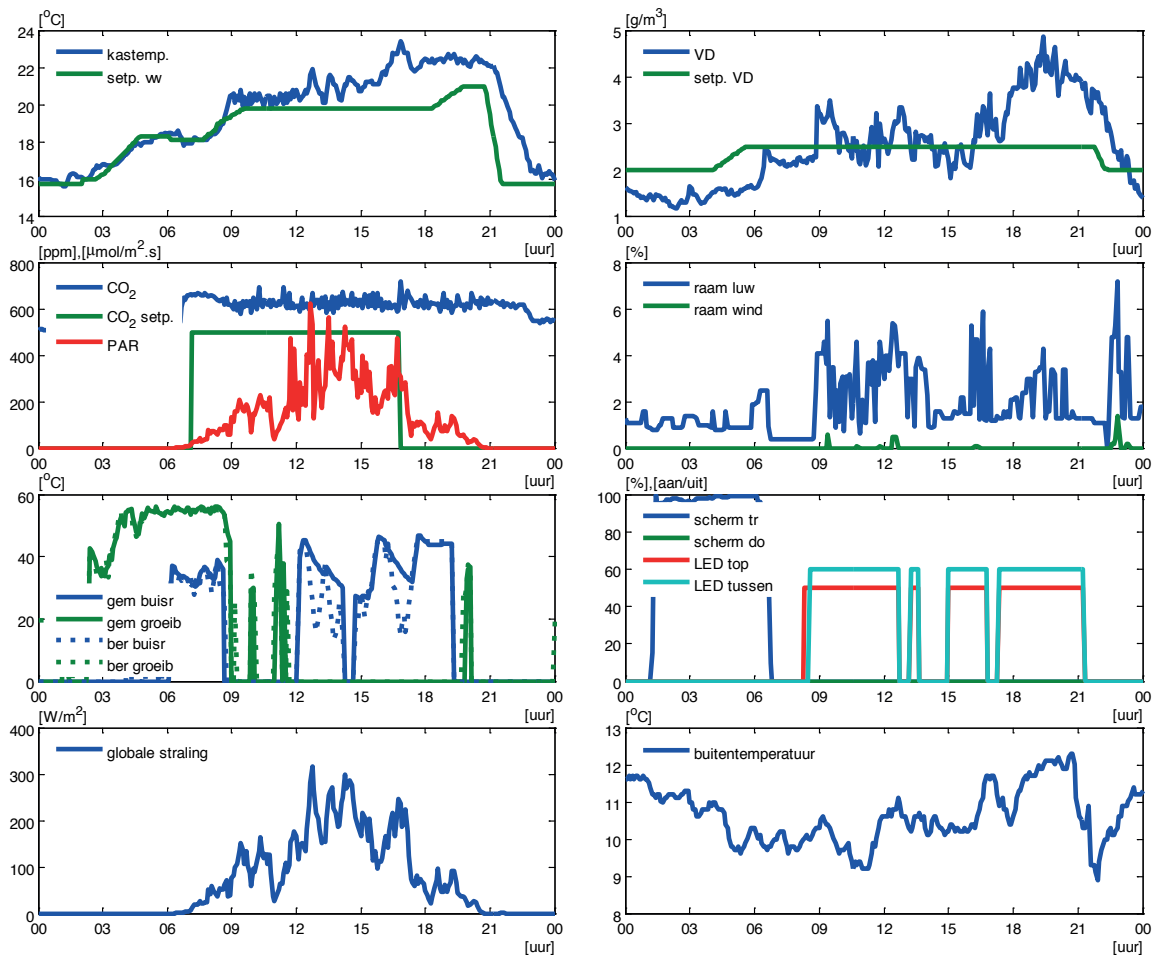
Figuur I-2 Kasklimaatparameters 26 april, een dag van licht naar donker.



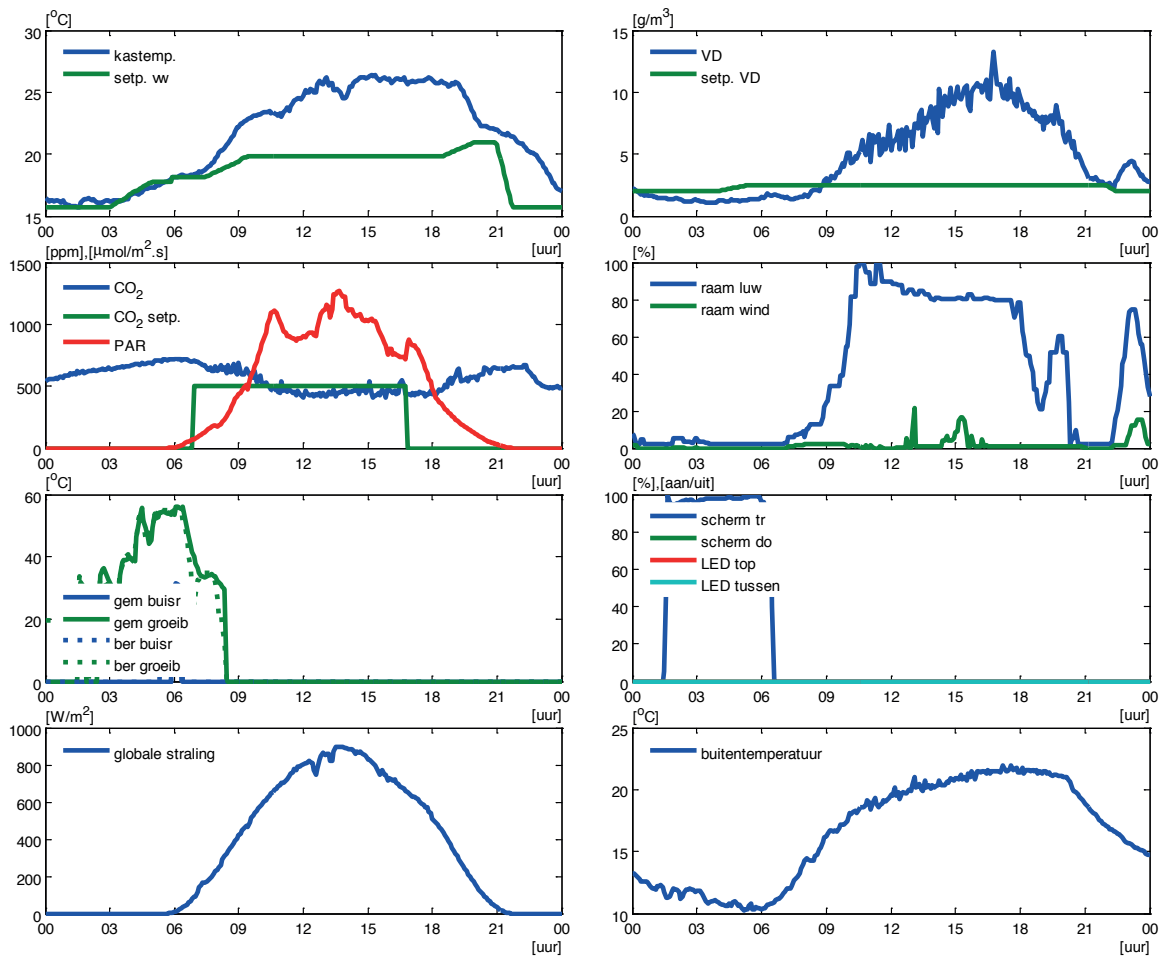
Figuur I-3 Kasklimaatparameters 27 april, een dag van donker naar licht.



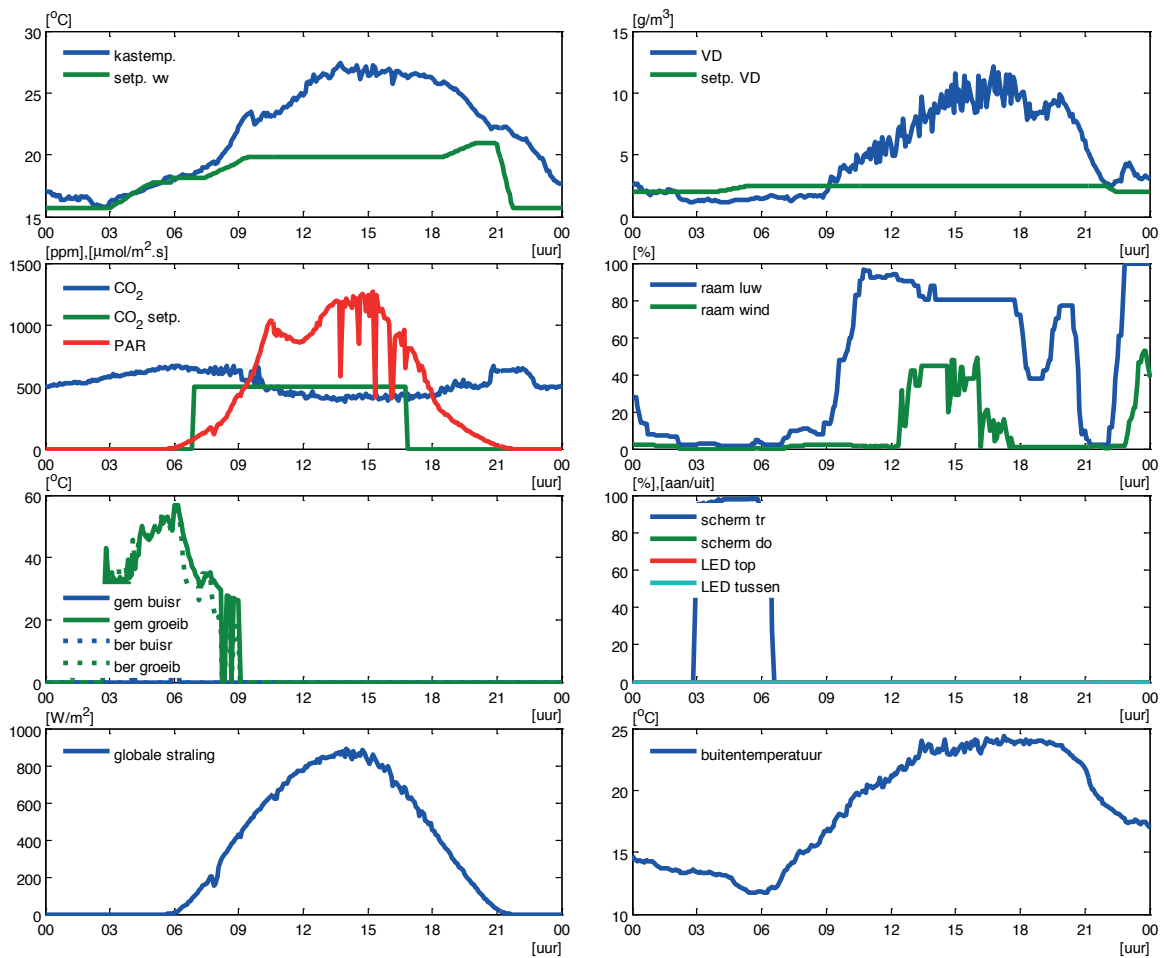
Figuur I-4 Kasklimaatparameters 10 mei, een dag van donker naar licht.



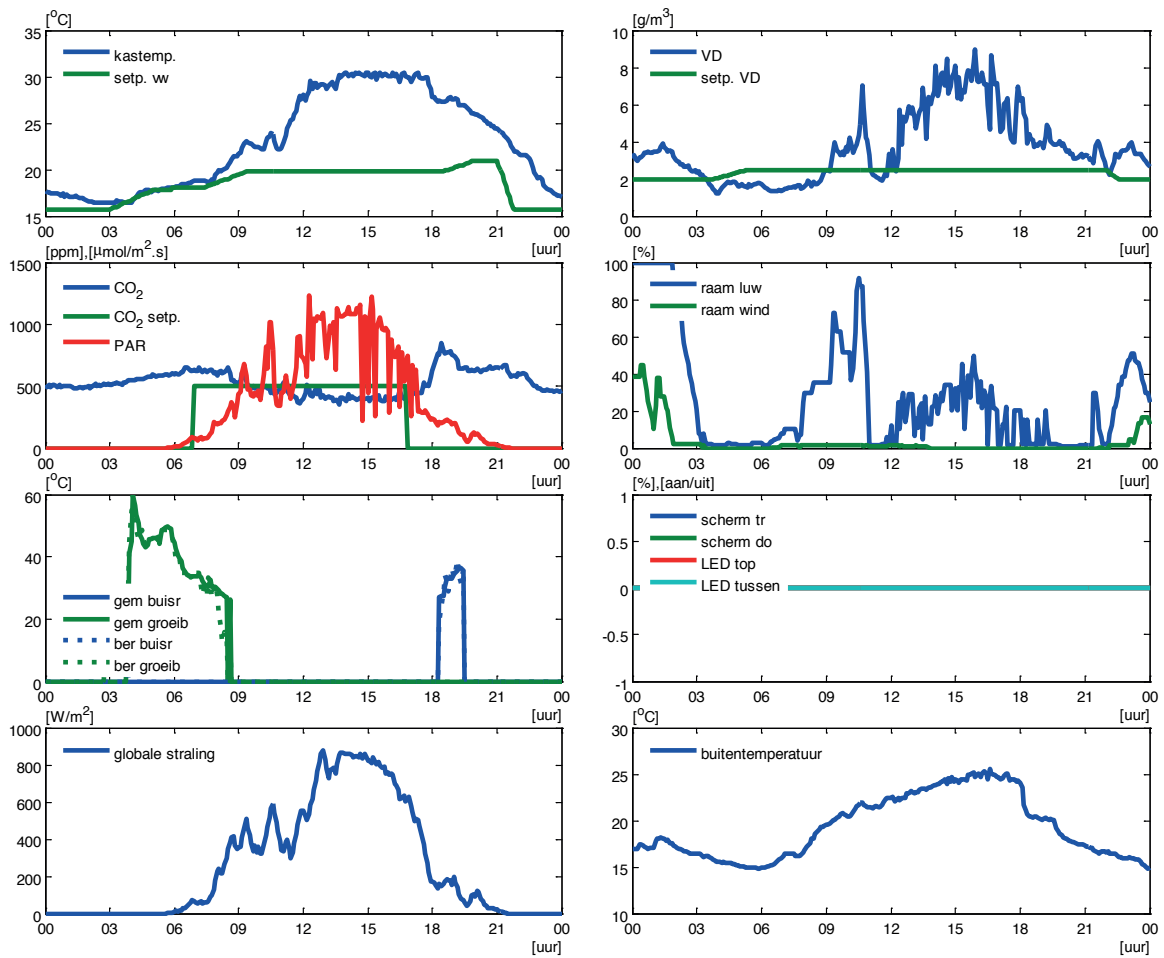
Figuur I-5 Kasklimaatparameters 11 mei, een donkere dag.



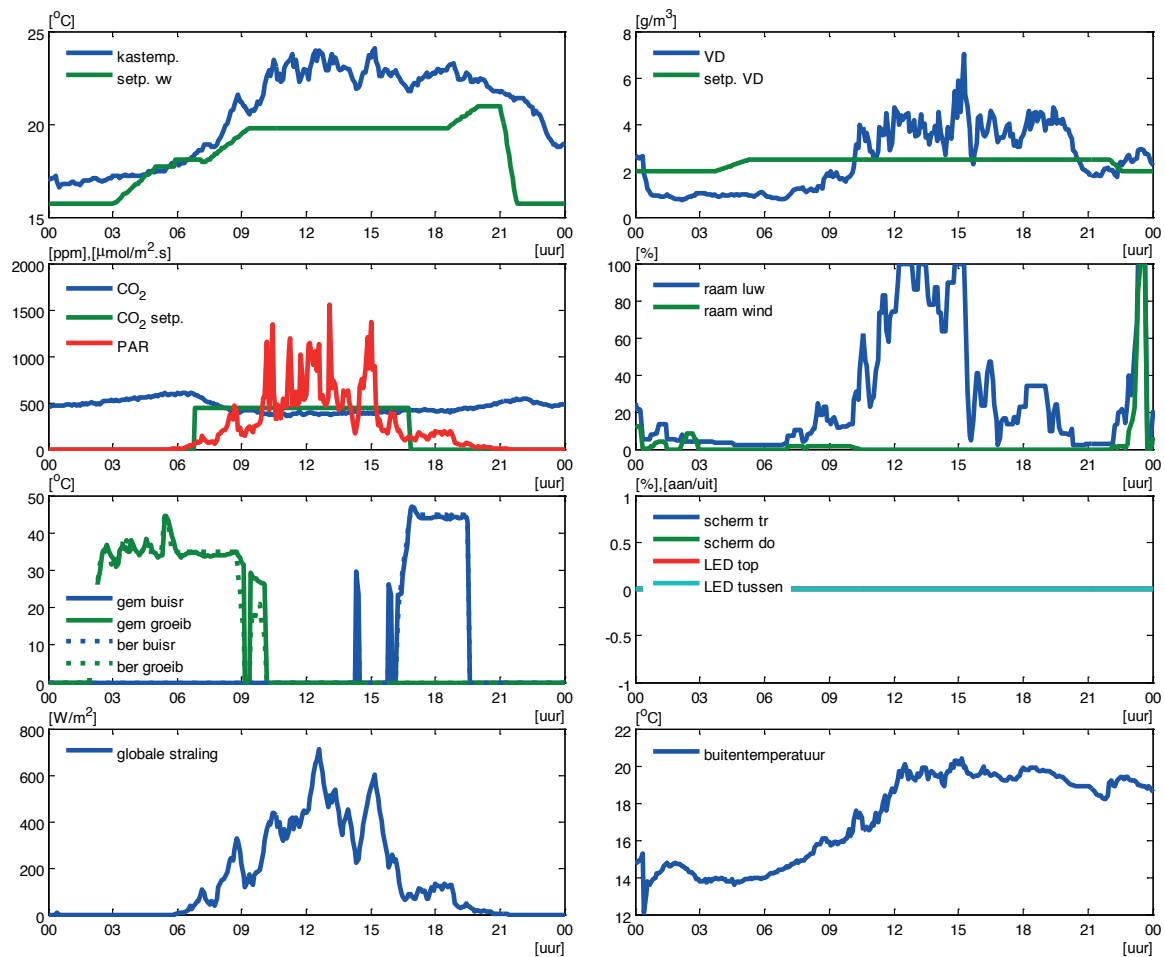
Figuur I-6 Kasklimaatparameters 18 mei, een lichte dag.



Figuur I-7 Kasklimaatparameters 19 mei, een lichte dag.



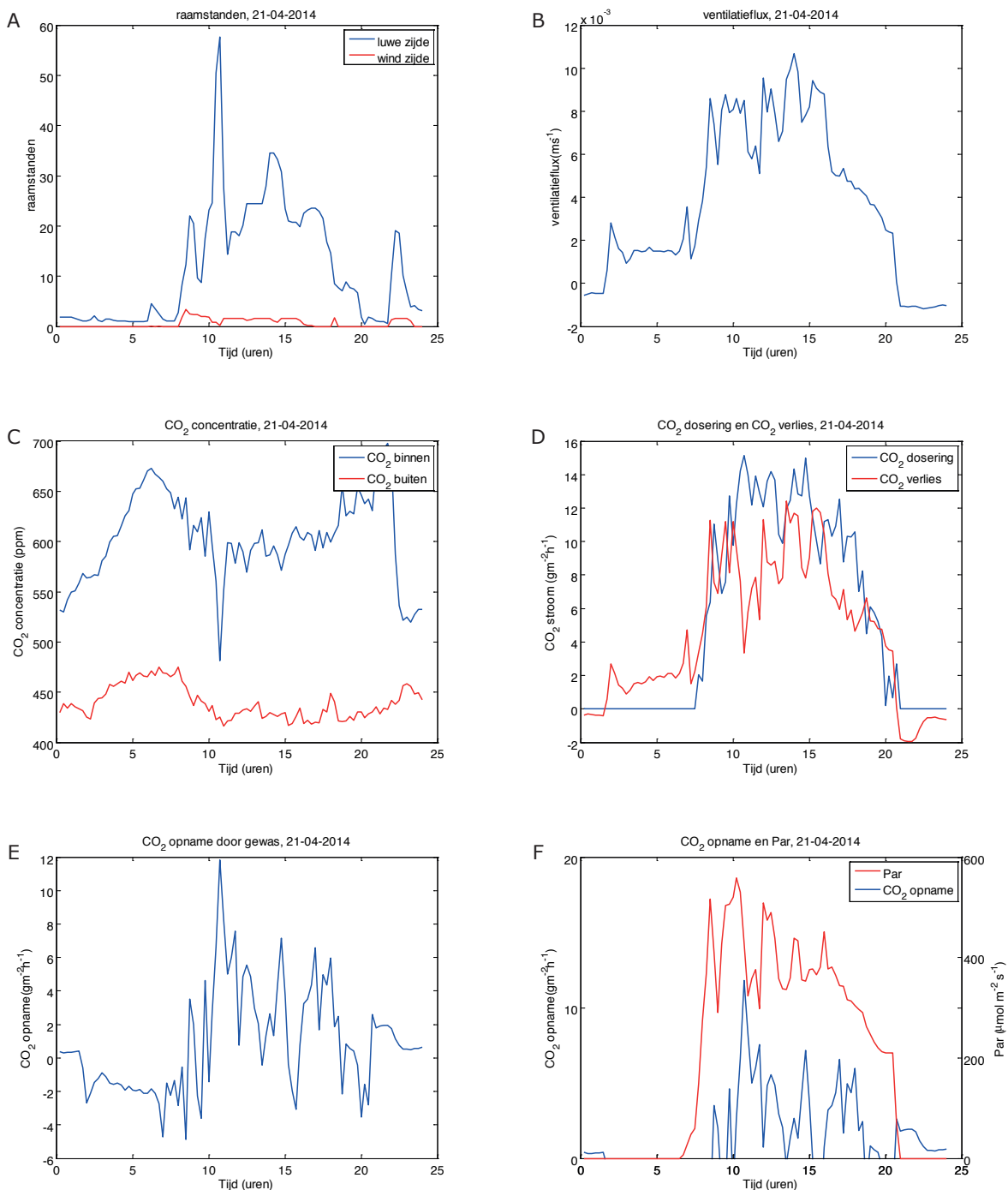
Figuur I-8 Kasklimaatparameters 20 mei, een lichter wordende dag met een hoge kasluchttemperatuur 30°C.



Figuur I-9 Kasklimaatparameters 21 mei, een donker eindigende dag.

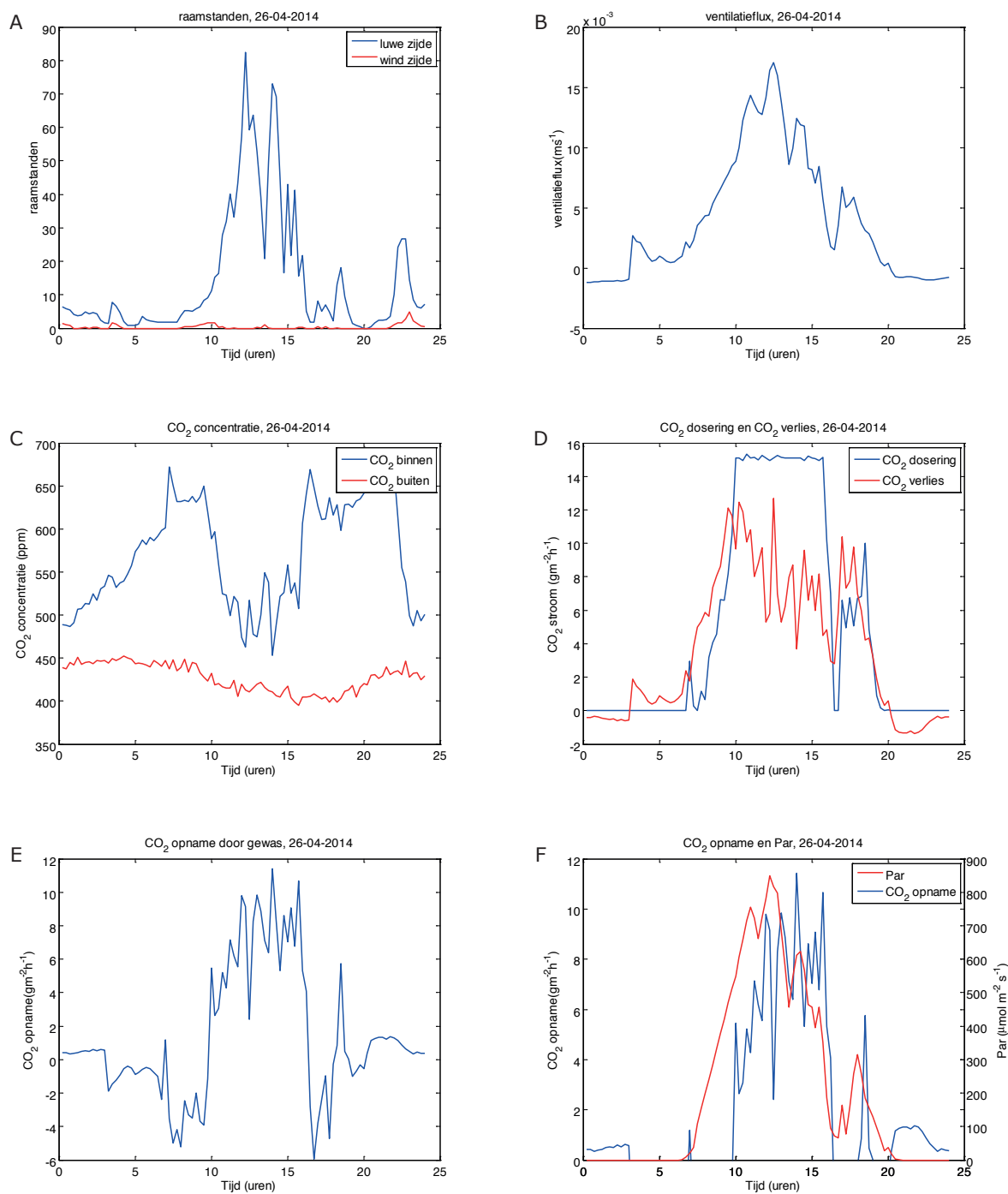
Bijlage II Resultaten berekeningen gewasfotosynthesemonitor op de geselecteerde dagen

Datum: 21 april. Donkere dag



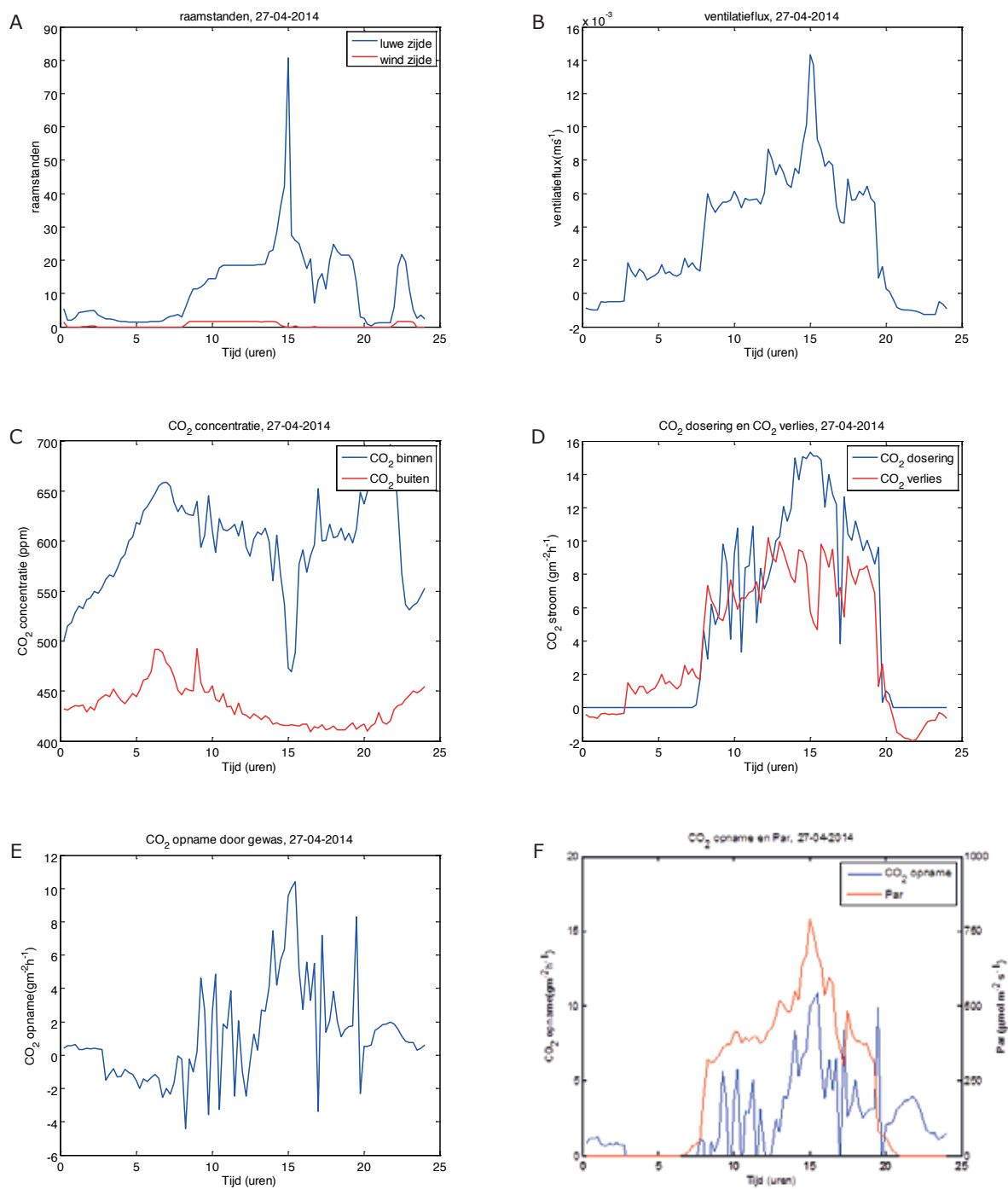
Figuur II.1 Klimaatdata van een afdeling belichte tomatenteelt op 21 april 2014, te weten raamstanden (A), ventilatieflux (B), CO₂ concentratie (C), CO₂ dosering en CO₂ verlies (D), berekende CO₂ opname door het gewas (E) en berekende CO₂ opname en PAR licht (F).

Datum: 26 april. Van licht naar donker



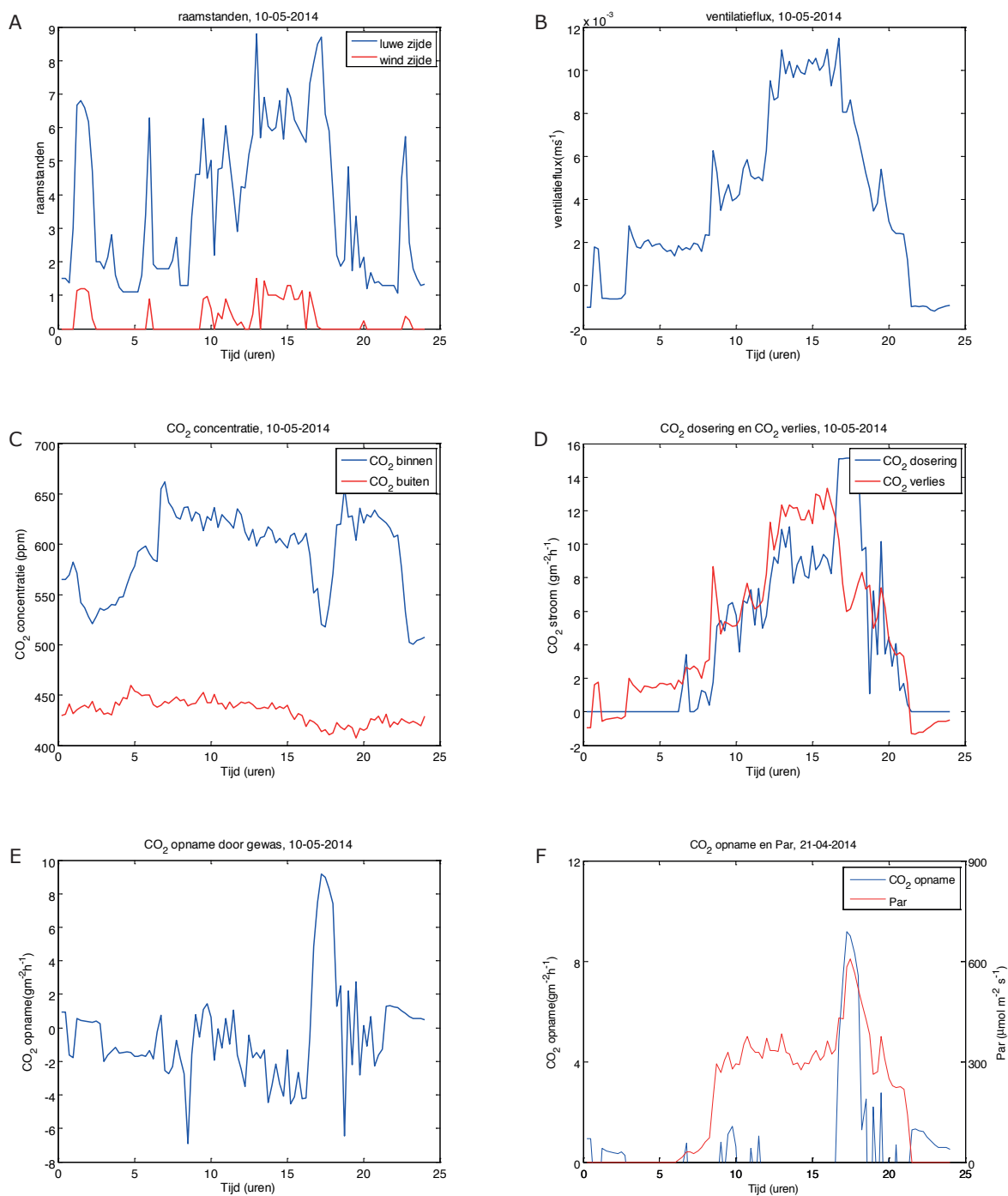
Figuur II.2 Klimaatdata van een afdeling belichte tomatenteelt op 26 april 2014, te weten raamstanden (A), ventilatieflux (B), CO₂ concentratie (C), CO₂ dosering en CO₂ verlies (D), berekende CO₂ opname door het gewas (E) en berekende CO₂ opname en PAR licht (F).

Datum: 27 april. Van donker naar licht



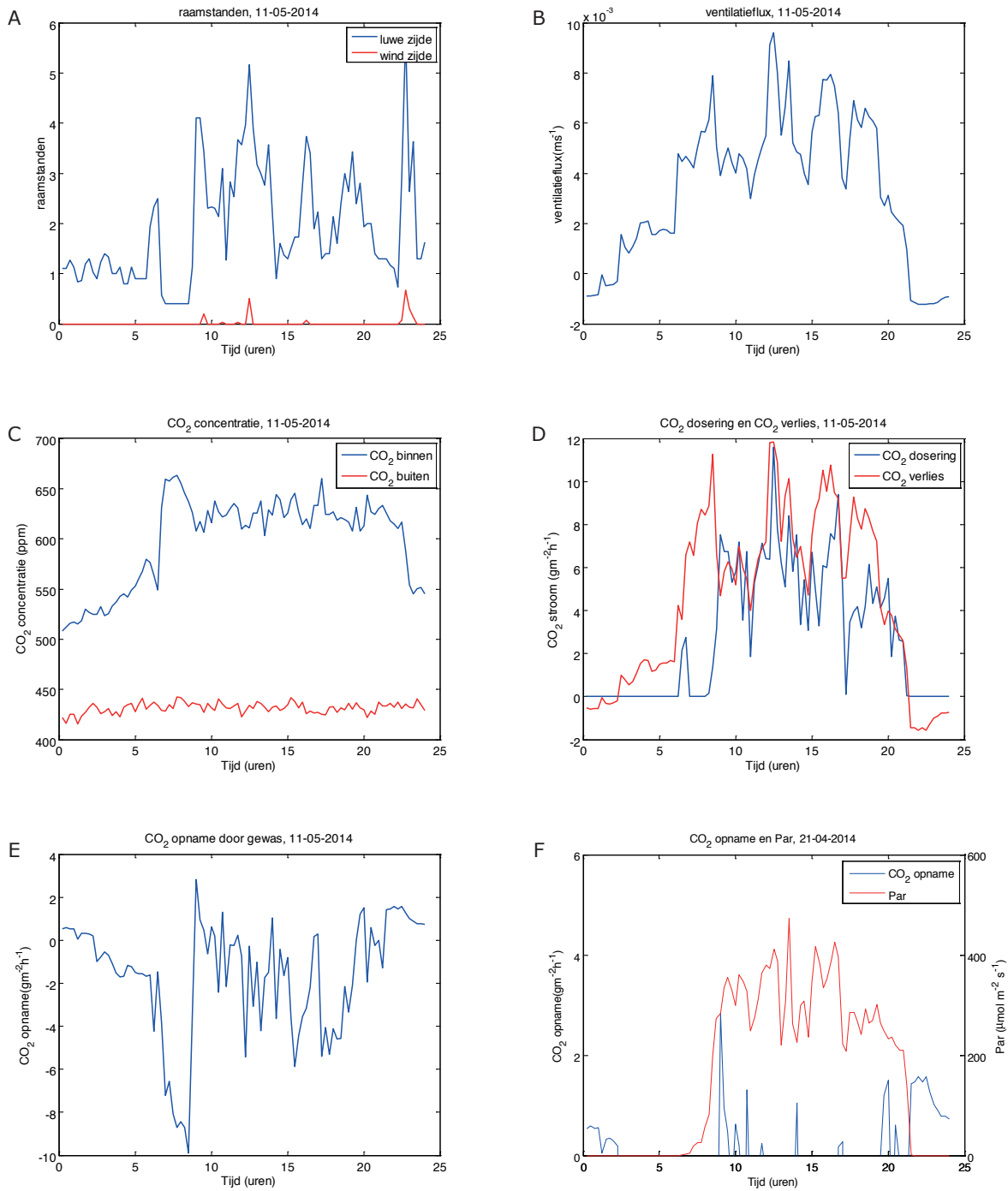
Figuur II.3 Klimaatdata van een afdeling belichte tomatenteelt op 27 april 2014, te weten raamstanden (A), ventilatieflux (B), CO₂ concentratie (C), CO₂ dosering en CO₂ verlies (D), berekende CO₂ opname door het gewas (E) en berekende CO₂ opname en PAR licht (F).

Datum: 10 mei. Van donker naar licht



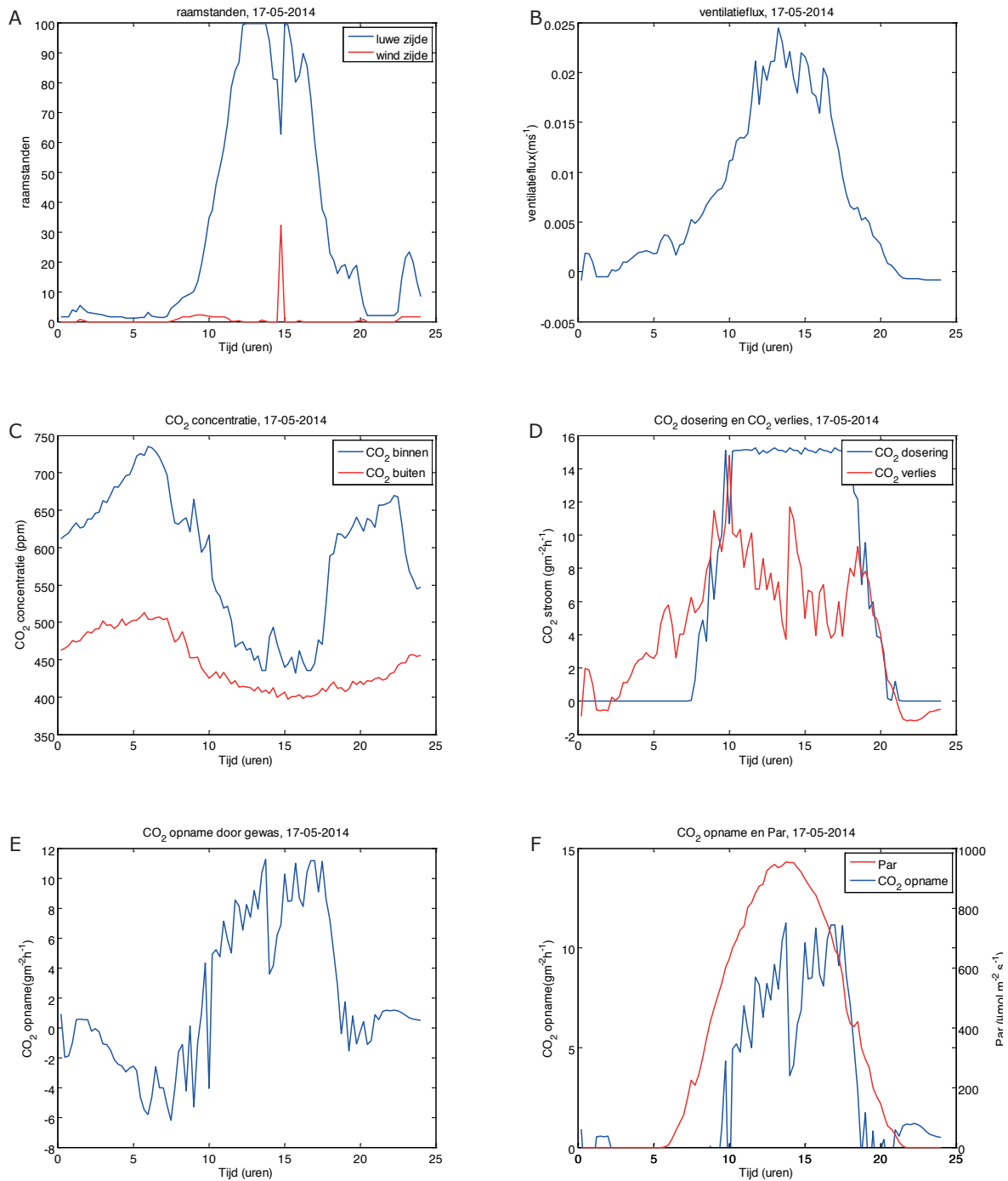
Figuur II.4 Klimaatdata van een afdeling belichte tomatenteelt op 10 mei 2014, te weten raamstanden (A), ventilatieflux (B), CO₂ concentratie (C), CO₂ dosering en CO₂ verlies (D), berekende CO₂ opname door het gewas (E) en berekende CO₂ opname en PAR licht (F).

Datum: 11 mei. Donkere dag



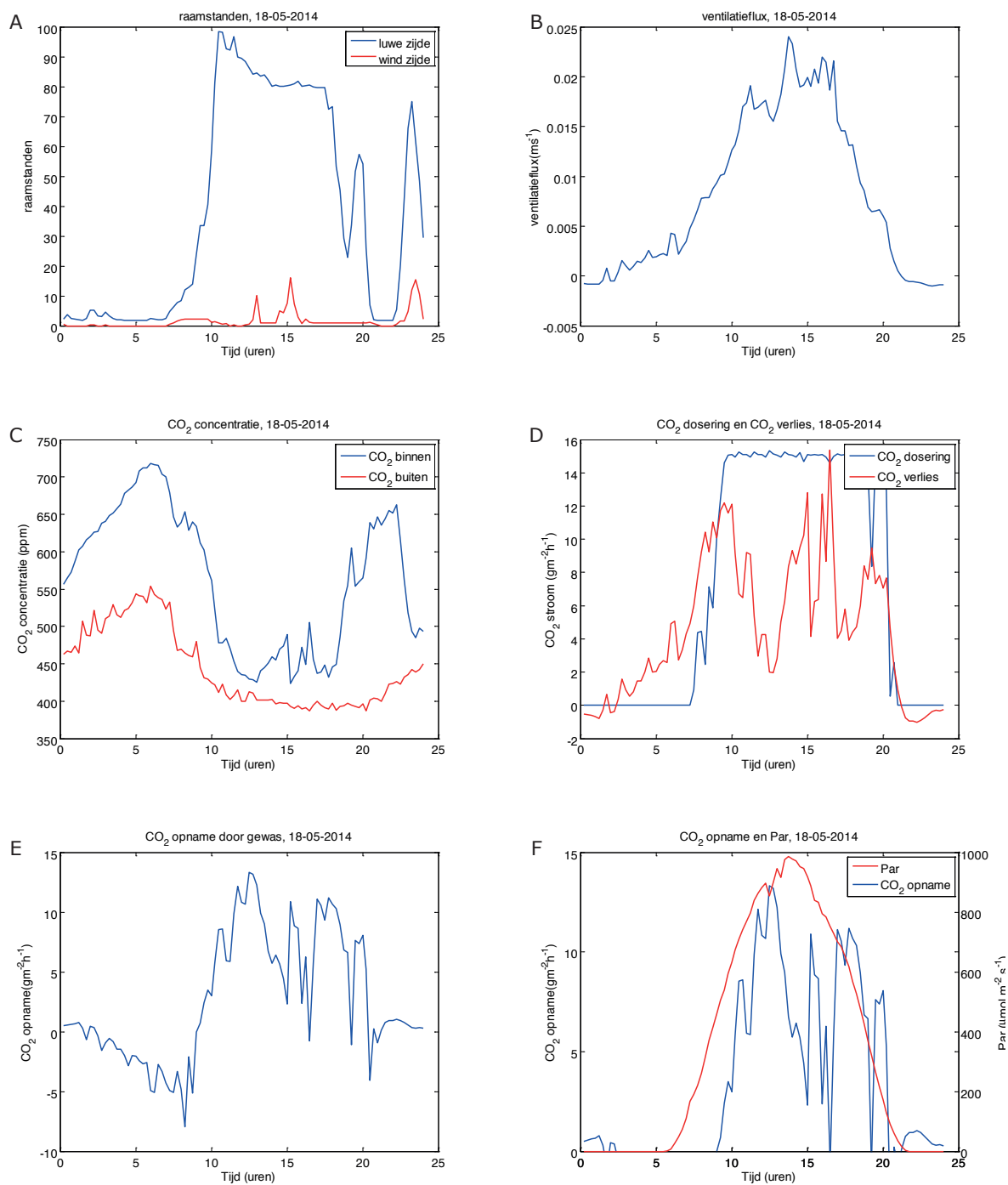
Figuur II.5 Klimaatdata van een afdeling belichte tomatenteelt op 11 mei 2014, te weten raamstanden (A), ventilatieflux (B), CO₂ concentratie (C), CO₂ dosering en CO₂ verlies (D), berekende CO₂ opname door het gewas (E) en berekende CO₂ opname en PAR licht (F).

Datum: 17 mei. Zonnige dag



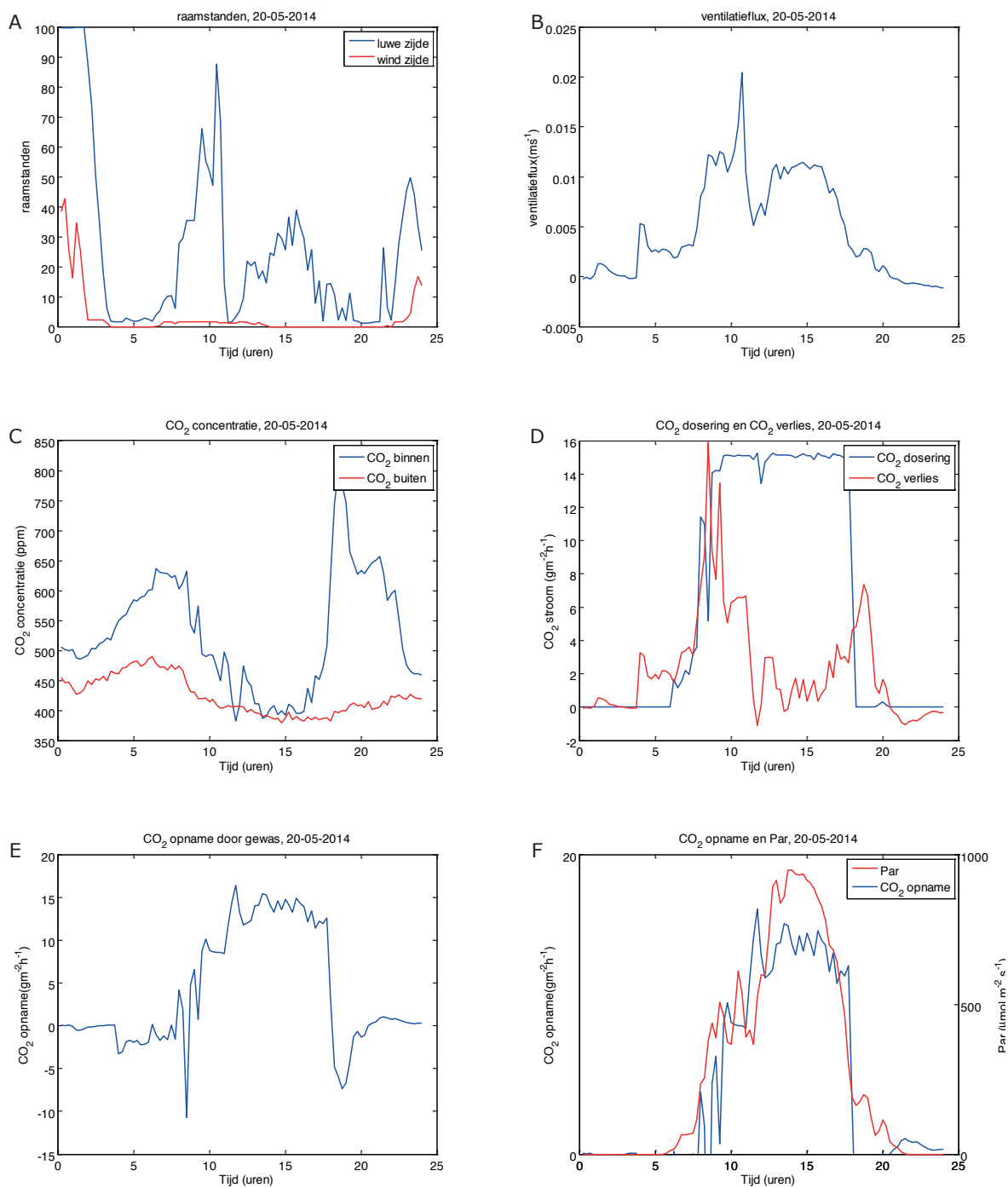
Figuur II.6 Klimaatdata van een afdeling belichte tomatenteelt op 17 mei 2014, te weten raamstanden (A), ventilatieflux (B), CO₂ concentratie (C), CO₂ dosering en CO₂ verlies (D), berekende CO₂ opname door het gewas (E) en berekende CO₂ opname en PAR licht (F).

Datum: 18 mei. Zonnige dag



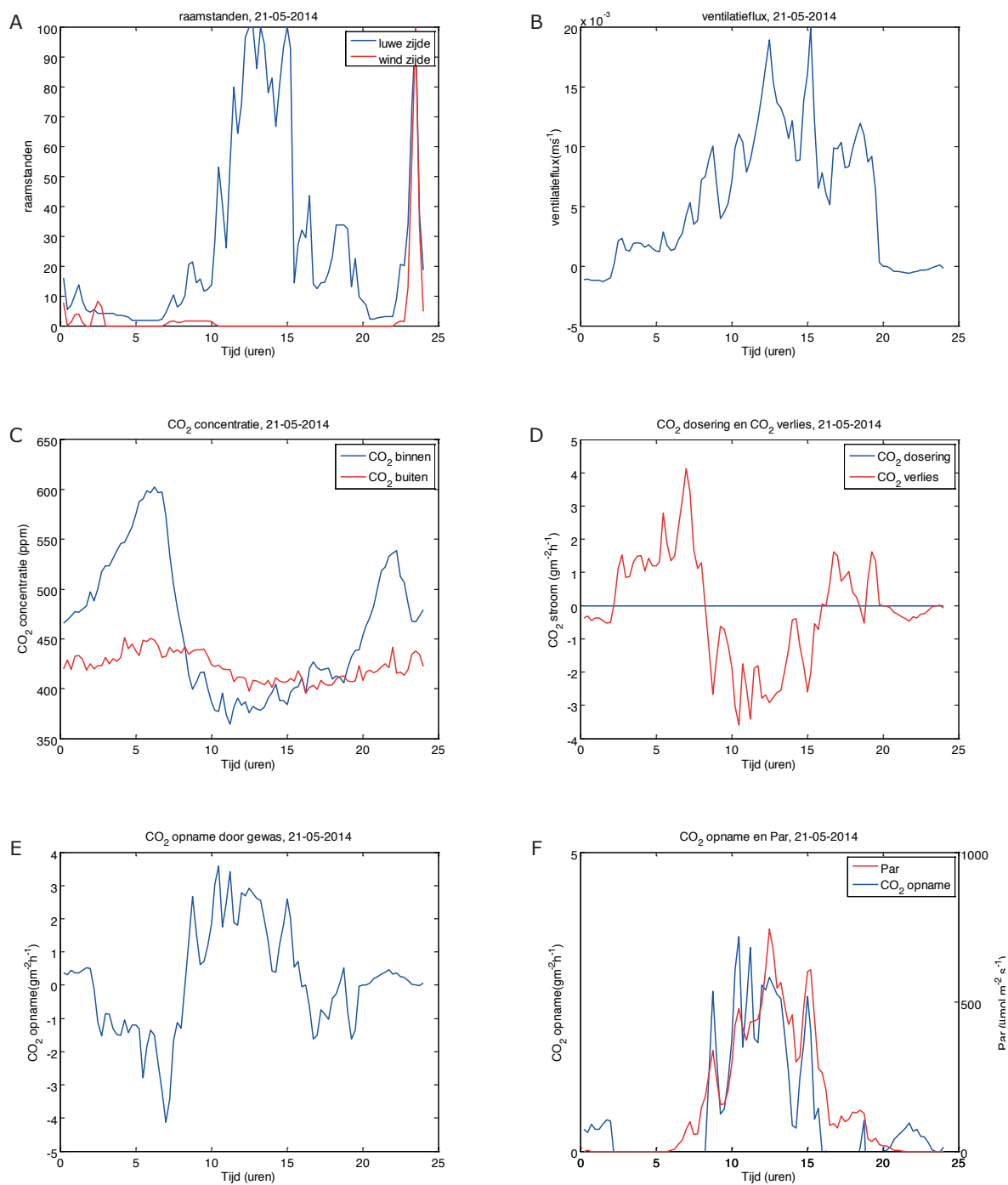
Figuur II.7 Klimaatdata van een afdeling belichte tomatenteelt op 18 mei 2014, te weten raamstanden (A), ventilatieflux (B), CO₂ concentratie (C), CO₂ dosering en CO₂ verlies (D), berekende CO₂ opname door het gewas (E) en berekende CO₂ opname en PAR licht (F).

Datum: 20 mei. Hoge temperatuur



Figuur II.8 Klimaatdata van een afdeling belichte tomatenteelt op 20 mei 2014, te weten raamstanden (A), ventilatieflux (B), CO₂ concentratie (C), CO₂ dosering en CO₂ verlies (D), berekende CO₂ opname door het gewas (E) en berekende CO₂ opname en PAR licht (F).

Datum: 21 mei. Van licht naar donker, geen dosering van CO₂



Figuur II.9 Klimaatdata van een afdeling belichte tomatenteelt op 21 mei 2014, te weten raamstanden (A), ventilatieflux (B), CO₂ concentratie (C), CO₂ dosering en CO₂ verlies (D), berekende CO₂ opname door het gewas (E) en berekende CO₂ opname en PAR licht (F).

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



Wageningen UR 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.wageningenur.nl/glastuinbouw

Glastuinbouw Rapport GTB-1405

Wageningen UR 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 UR (University & Research centre) is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen UR bundelen 9 gespecialiseerde onderzoeksinstituten van stichting DLO en Wageningen University 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 Wageningen UR 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.