



WAGENINGENUR
For quality of life

Optimalisatie van het Nieuwe Telen

Werkpakket Fotosynthesemonitoring

Jan Snel, Mary Warmenhoven en Arie de Gelder



Referaat

In het nieuwe telen zullen investering, meeropbrengst en energiebesparing in balans moeten zijn. Teeltoptimalisatie moet voor een bedrijfszekere toepassing van energiebesparing zorgen. Monitoren van de gewasfotosynthese kan de teler hierbij behulpzaam zijn.

In dit project is samen met Gademann Instruments een meetsysteem ontwikkeld waarmee PAR en fotosynthese in 8 gewaslagen gelijktijdig gemeten kan worden. De fotosynthese van alle lagen bij elkaar opgeteld levert de gewasfotosynthese. Daarnaast is software ontwikkeld om de meetdata on-line te bekijken en te analyseren. Vanaf eind juli zijn drie meetsystemen getest in een afdeling bij Wageningen UR en daarna in de proefafdelingen van het Improvement Centre.

De resultaten laten zien dat in de periode september - oktober er binnen het gewas weinig variatie is in de relatie tussen PAR en fotosynthese. Dat geldt voor alle afdelingen. Ook werd duidelijk dat het gewas in geen van de afdelingen in die periode last had van lichtschaad. Uit de resultaten blijkt wel dat de nauwkeurigheid van de PAR meting met de kleine interne PAR sensor te laag is voor een betrouwbare opschaling naar gewasfotosynthese.

Abstract

In Next Generation Greenhouse Cultivation applications investments, yield improvements and energy savings need to be in balance. Optimization of crop growth will have to ensure a reliable implementation of energy saving concepts. Monitoring of crop photosynthesis can assist the grower in optimizing light use and production.

In this project Wageningen UR Greenhouse Horticulture and Gademann Instruments have developed and tested a monitoring system for PAR and photosynthesis in 8 crop layers simultaneously. The combined photosynthesis data from all layers is a measure for crop photosynthesis. Software was developed for on-line access and analysis of real-time and stored data. Three units were first tested in a greenhouse compartment WUR and afterwards installed in the Improvement Centre.

The results showed little variation in light response of leaves of the various crop layers during the monitoring period (September - October). It was also evident that the crop did not suffer from light stress, as judged by the high photosynthesis efficiency during the night (F_v/F_m). Evaluation of the results shows that the PAR measurement with the internal PAR sensor of the instrument is too inaccurate for a reliable upscaling to crop photosynthesis.

© 2014 Wageningen, Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek (DLO) onderzoeksinstituut Wageningen UR Glastuinbouw.

Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk
: Postbus 20, 2665 ZG Bleiswijk
Tel. : 0317 - 48 56 06
Fax : 010 - 522 51 93
E-mail : glastuinbouw@wur.nl
Internet : www.glastuinbouw.wur.nl

Inhoudsopgave

	Samenvatting	5
1	Inleiding	7
2	Ontwikkeling meetmethode	9
	2.1 Meetprincipe	9
	2.2 Meetopstelling	9
	2.2.1 Micro-Moni-SET	10
	2.2.2 Meetpaal	10
	2.2.3 Data-acquisitie, opslag en verwerking	11
	2.3 Ontwikkeling methode voor berekenen ETR gewas	12
	2.3.1 Meetdata Micro-Moni-PAM	12
	2.3.2 Verband tussen ETR en PAR	12
	2.3.3 PAR verdeling in gewas	13
	2.3.4 Omrekening naar verdeling fotosynthese over de gewaslagen	14
3	Resultaten en discussie teeltmonitoring	15
	3.1 Vergelijking ETR gewas tussen afdelingen	15
	3.2 Vergelijking ETR verdeling tussen afdelingen	16
	3.3 Maximale efficiëntie fotosynthese	17
4	Conclusies en aanbevelingen	19
	4.1 PAR meting	19
	4.2 ETR meting	19
	4.3 Gebruikersinterface	20
5	Geraadpleegde literatuur	21

Samenvatting

Het nieuwe telen wordt meer en meer toegepast. Op veel punten zal het concept nog verder verfijnd gaan worden. Investing, meeropbrengst en energiebesparing zullen in balans moeten zijn. Intensiever schermen - ook in de zomer bij te veel licht -, verbetering van het microklimaat op basis van metingen aan het gewas, een gezond gewas door het juiste substraat en de juiste watergift zijn daarbij belangrijke bouwstenen. Door teeltkundige optimalisatie kan de bereikte energiebesparing bedrijfszeker worden toegepast.

Fotosynthese monitoring met behulp van nieuwe fluorescentie meters met meerdere koppen biedt de mogelijkheid om gelijktijdig op meerdere hoogtes in het gewas de actuele fotosynthese te volgen. Informatie over de actuele fotosynthese kan helpen om de groei van het gewas beter te kunnen verklaren. Daarnaast kan met deze sensoren de totale gewasfotosynthese geschat worden. In dit deelrapport worden de ontwikkeling en de resultaten van de metingen in drie afdelingen tomaat in het Improvement Centre beschreven. Voor de beschrijving en de resultaten van de teeltproef wordt verwezen naar het rapport *Optimalisatie van Het Nieuwe Telen* (de Gelder *et al.* 2014).

Tot nu toe zijn er geen meters beschikbaar om gewasfotosynthese te meten. Wel kan de fotosynthese geschat worden met ETR parameter van de Plantivity meter. Sinds kort zijn er goedkopere, kleinere en eenvoudiger te bedienen fluorescentiemeters beschikbaar en wordt het daarmee mogelijk om PAR en ETR bij meerdere lagen in het gewas te meten. Opgeteld levert de actuele ETR van alle lagen bij elkaar de actuele ETR van het gewas. Ook kan, naar analogie van de lichtsom, een ETR-som berekend worden voor het gewas. Met behulp van calibratiemetingen met de Licor 6400 fotosynthesemeter kan de ETR omgerekend worden naar echte fotosynthese.

Voor dit project is samen met Gademann Instruments in Duitsland de Micro-Moni-Set ontwikkeld: een meetsysteem bestaande uit 8 Micro-Moni-PAM sensoren. Vanaf eind juli zijn drie meetsystemen getest in een afdeling bij de WUR en daarna in de proefafdelingen van het Improvement Centre.

Doordat de systemen later beschikbaar kwamen, dan in het projectplan was voorzien, was de tijd gepasseerd dat er uitspraken mogelijk waren over het effect van schermen bij teveel licht. De drie meetsystemen hebben vanaf begin september tot het eind van de teelt gedraaid. De resultaten laten zien dat in de periode september - oktober er binnen het gewas weinig verschil is in de relatie tussen PAR en fotosynthese. Dat geldt voor alle afdelingen. Ook werd duidelijk dat het gewas in geen van de afdelingen in die periode last had van lichtschade.

Uit de resultaten blijkt wel dat de nauwkeurigheid van de PAR meting met de kleine interne PAR sensor te laag is om een betrouwbare uitspraak te doen over actuele gewasfotosynthese. Voor een goede schatting van de actuele gewasfotosynthese is een PAR sensor nodig die op verschillende hoogtes in het gewas een goede waarde geeft voor de gemiddelde PAR op die hoogte.

1 Inleiding

Fotosynthese vormt de basis voor de groei van planten. De snelheid van de fotosynthese is afhankelijk van veel omgevingsfactoren: licht, CO₂, temperatuur en luchtvochtigheid. Daarnaast speelt ook de fysiologische leeftijd van de bladeren een grote rol. Optimalisatie van de gewasfotosynthese zonder fotosynthesemetingen is daarom nog niet eenvoudig.

Het meten van de fotosynthese van een gewas is lastig en tot nu toe zijn er geen eenvoudige en goedkope manieren om gewasfotosynthese te meten. Het is echter wel mogelijk om de fotosynthese te schatten op basis van meting van het z.g. fotosynthetisch elektrontransport. In de bladgroenkorrels in het blad wordt met licht een elektrische stroom opgewekt die er voor zorgt dat CO₂ vastgelegd kan worden. Deze elektrische stroom (afgekort tot ETR) kan wel gemeten worden. De eerste op dit principe gebaseerde meter in de tuinbouw was de Plantivity. Met de komst van goedkopere, kleinere en eenvoudig te bedienen fluorescentiemeters is het mogelijk om de PAR en de ETR op meerdere posities in het gewas te meten. Door die posities strategisch te kiezen kan het gewas in een aantal bladlagen verdeeld worden. Door de gemeten ETR van alle lagen bij elkaar op te tellen kan de ETR van het gewas berekend worden. Ook kan, naar analogie van de lichtsom, een ETR-som berekend worden voor het gewas. Met behulp van calibratiemetingen kan de ETR omgerekend worden naar fotosynthese.

Met deze informatie kunnen (groente)telers in de toekomst beter sturen op fotosynthese. Dat is vooral belangrijk in periodes met grote schommelingen in source (licht) en/of sink.

Voor dit project zijn drie sets compleet nieuwe sensoren ontwikkeld. Deze ontwikkeling was een samenwerking met Gademann Instruments in Duitsland en het resultaat is de Micro-Moni-Set: een meetsysteem bestaande uit 8 Micro-Moni-PAM sensoren. Omdat het project pas in medio maart van start kon gaan, kwamen de eerste sensoren pas begin juni beschikbaar voor testen en werd de complete serie Micro-Moni-Sets pas eind juli geleverd. Deze ontwikkelstap bleek nog nodig om de sensoren ook praktisch op meerdere locaties in een kas te kunnen inzetten. Dat heeft er toe geleid dat er pas vanaf eind juli getest kon worden in een afdeling bij de WUR en pas daarna de sensoren in de proefafdelingen van het IC geïnstalleerd konden worden.

Dit rapport behandelt alleen de fotosynthesemonitoring. Voor het verslag van de proef wordt verwezen naar het rapport 'Optimalisatie van Het Nieuwe Telen' van de Gelder *et al.* 2014.

2 Ontwikkeling meetmethode

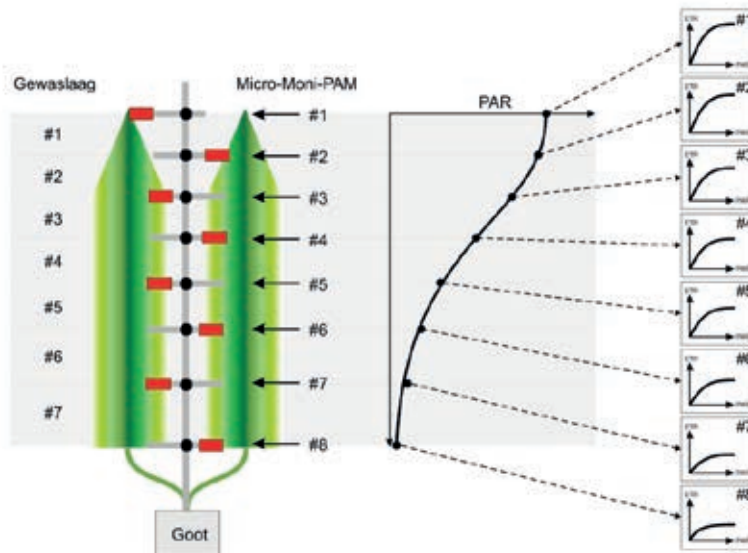
2.1 Meetprincipe

De schatting van de ETR is gebaseerd op chlorofylfluorescentie. Voor een uitgebreide beschrijving van deze schatting wordt verwezen naar het rapport *Handleiding gebruik van plantsensoren voor de fotosynthese in de praktijk* (Pot *et al.* 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 een speciaal voor dit project ontwikkelde chlorofylfluorescentiemeter: de Micro-Moni-PAM. Uit de metingen overdag worden twee modelcurves berekend:

- PAR als functie van de hoogte in het gewas: $PAR = f_1(\text{hoogte})$
- ETR als functie van PAR van blad op de betreffende hoogte in het gewas: $ETR = f_2(PAR)$

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

$$ETR(\text{hoogte}) = f_1(\text{hoogte}) \times f_2(PAR)$$



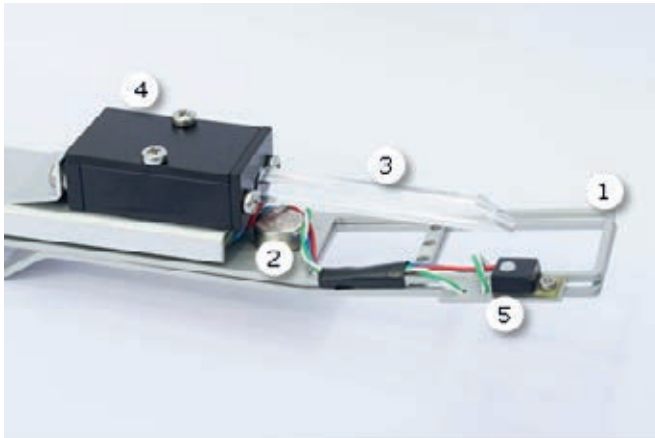
Figuur 1. Schematische weergave van de meetopstelling in een gewasrij. De grafiek in het midden toont de uitdoving van licht in het gewas. De serie grafieken rechts geeft het verband tussen ETR en PAR zoals gereconstrueerd van de data gemeten door de Micro-Moni-PAM gedurende een dag.

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.

2.2 Meetopstelling

In de huidige proef is het gewas opgedeeld in 7 lagen (Figuur 1.). 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 3 afdelingen zijn dus 24 PAR/Fotosynthese sensoren nodig.

2.2.1 Micro-Moni-SET



Figuur 2. 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. Electronica voor chlorofylsensor
5. Externe PAR sensor

Voor het meten van PAR en ETR in een groentegewas is de bestaande Plantivity minder geschikt. De Plantivity is groot, duur en niet praktisch voor het meten van gewasfotosynthese met meerdere sensoren in een hogedraadteelt. Daarom is, in samenwerking met Gademann Instruments (Würzburg, Duitsland), op basis van de Junior-PAM (zie Junior-PAM gebruikershandleiding) een nieuw systeem ontwikkeld voor het meten van gewas ETR: de Micro-Moni-Set. De Micro-Moni-Set bestaat uit een aantal kleine Micro-Moni-PAM meetkoppen (incl microprocessor, zie Figuur 2.) die via een RS485 kabel en een interfacebox 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. De opdracht voor 3 meetsystemen kon pas eind april worden afgegeven. Eind juli waren alle sensoren geleverd.

2.2.2 Meetpaal

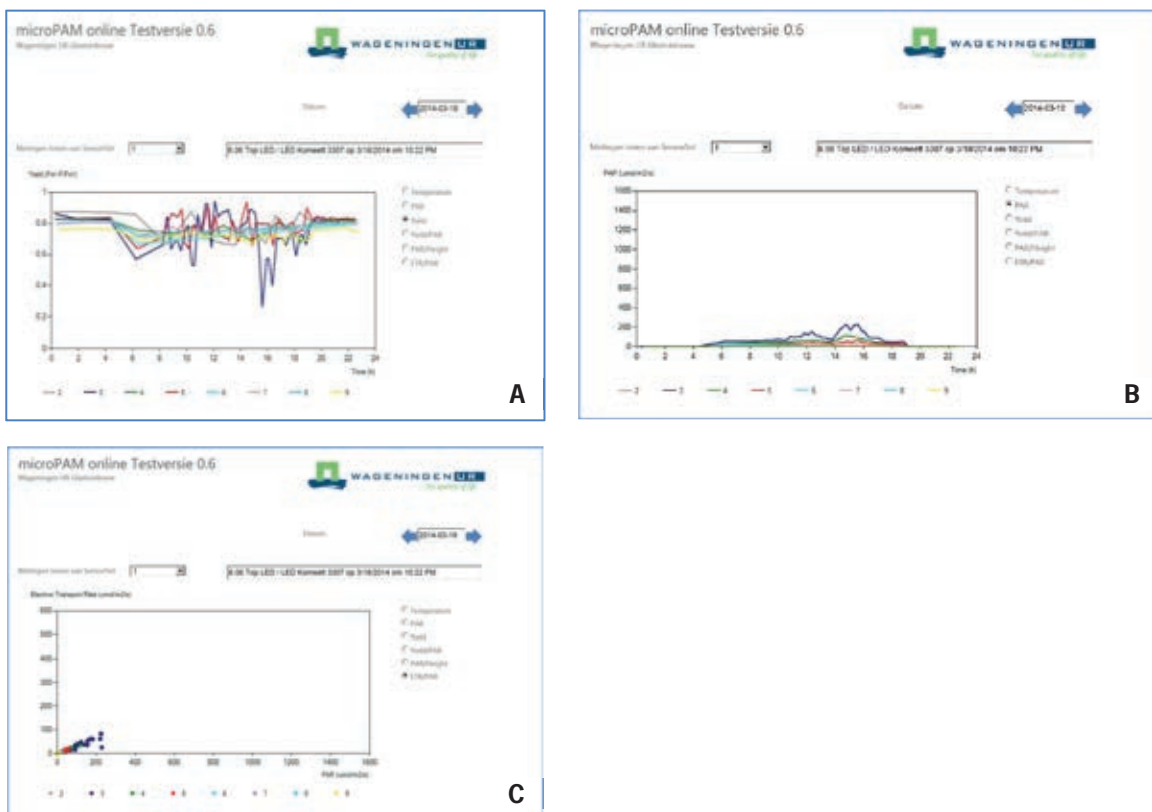
Per afdeling werd één meetpaal midden op de goot geplaatst en met tie-wraps aan de staaldraad bevestigd waaraan de goot opgehangen is. De Micro-Moni-PAM sensoren werden op korte staafjes gemonteerd die op van te voren aangegeven hoogtes met klemmen bevestigd waren aan de meetpaal (Fig.3). De Micro-Moni-PAM 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 onder de goot aan het begin van het pad.



Figuur 3. 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.

2.2.3 Data-acquisitie, opslag en verwerking

De Micro-Moni-PAM sensoren werden aangestuurd met zelf ontwikkelde 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 4. 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). Screenshot C geeft de fotosynthese (ETR) als functie van de PAR. De getoonde screenshots zijn niet van de proef in het Improvement Centre, maar van de Climate KIC tomatenproef proef in Afd. 6.06 (LED/LED, diffuus glas). Met dank aan Fokke Buwalda voor het schrijven van de software.

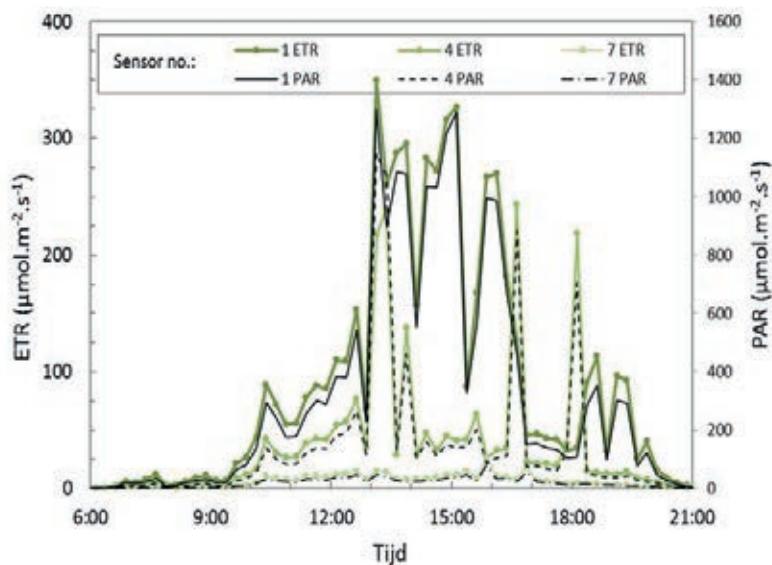
Met een bijbehorende web applicatie kunnen de data online bekeken (zie Figuur 4.) en gedownload worden voor verdere analyse in Microsoft Excel en/of PTC MathCad (zie onder) of andere rekenprogramma's. De meetfrequentie van de Micro-Moni-PAM's was overdag 1x per kwartier en 's nachts 1x per twee uur. De meetapparatuur was bij het IC in 3 afdelingen in bedrijf van week 34 tot en met week 42.

2.3 Ontwikkeling methode voor berekenen ETR gewas

2.3.1 Meetdata Micro-Moni-PAM

De Micro-Moni-PAM meet de fotosynthese (ETR) en de PAR van een blad. Figuur 5. geeft een voorbeeld van het tijdsverloop tijdens een dag van 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 de verschillende gewaslagen moet de lichtintensiteit boven de laag hoger zijn dan die 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 5. Tijdsverloop van bladfotosynthese (ETR) en PAR op 19 augustus 2013 op drie hoogtes in het gewas in afd. 7.

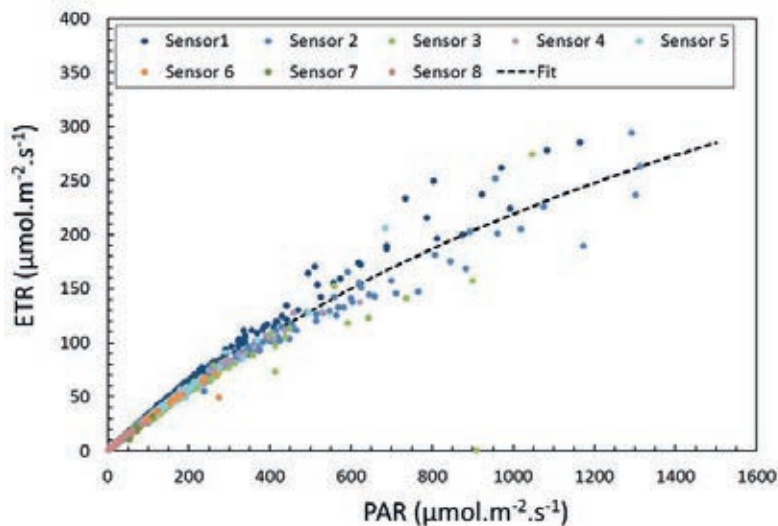
2.3.2 Verband tussen ETR en PAR

Figuur 6. 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:

$$ETR(PAR, ETR_{max}, Q_2, m) := \frac{(Q_2 \cdot PAR + ETR_{max}) - \sqrt{(Q_2 \cdot PAR + ETR_{max})^2 - 4 \cdot Q_2 \cdot PAR \cdot ETR_{max} \cdot m}}{2 \cdot m} \quad [1]$$

Met: ETR = Elektronentransportsnelheid; Q_2 = maximale lichtbenutting; m = constante die curvatuur bepaalt.

De parameters van vergelijking [1] zijn gefit aan de meetwaarden op basis van een kleinste kwadratenmethode in het programma MathCad (PTC, USA).



Figuur 6. Bladfotosynthese (ETR) als functie van het opvallende licht (in PAR). De metingen zijn gedaan in de periode van 12 t/m 15 september in afd. 8. De datapunten van de verschillende Micro-Moni-PAM sensoren zijn met verschillende kleuren aangegeven.

Toch zijn in Figuur ook verschillen tussen sensoren waar te nemen. Sensor 1 geeft een hogere ETR, sensor 3 een lagere ETR en sensor 2 zit er tussin. 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. Tussen sensor 1 en 3 verwacht ik echter niet veel verschil.
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.

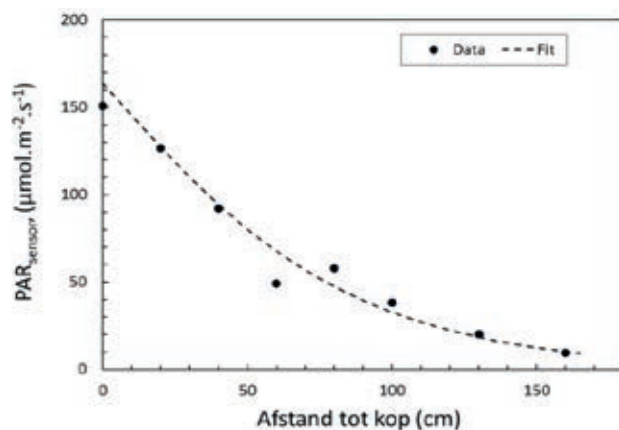
2.3.3 PAR verdeling in gewas

Figuur 7. 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.

$$PAR(x, PAR_0, b, c) := PAR_0 \cdot \left(1 - e^{-b e^{c \cdot x}}\right) \quad [2]$$

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

De parameters van vergelijking [2] zijn gefit aan de meetwaarden op basis van een kleinste kwadratenmethode in het programma MathCad (PTC, USA).



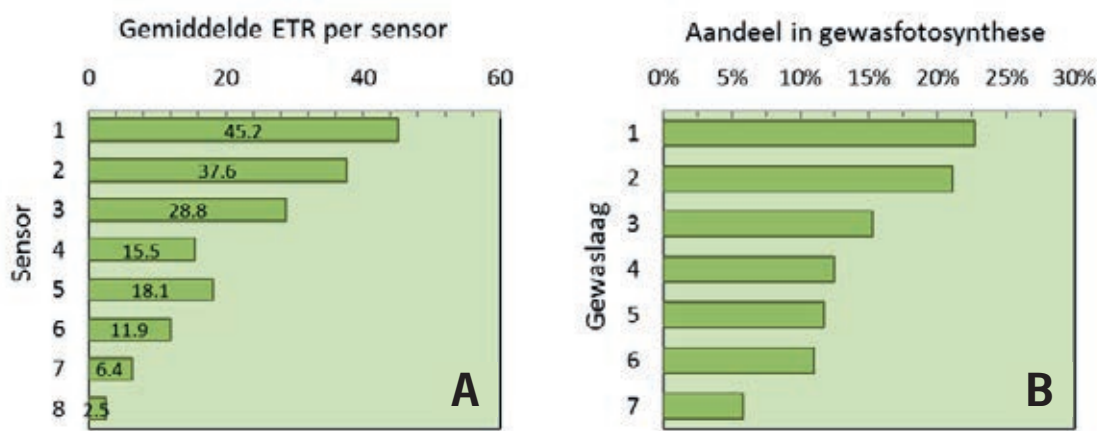
Figuur 7. PAR als functie van de hoogte in het gewas, gemeten in cm beneden de top van het gewas. De metingen zijn gedaan in de periode van 12 t/m 15 september in afd. 8. De datapunten zijn het daggemiddelde van de PAR sensor in de Micro-Moni-PAM meters. Door de datapunten is een Gompertz functie gefit die de lichtuitdoving in het gewas beschrijft.

2.3.4 Omrekening naar verdeling fotosynthese over de gewaslagen

Met de twee gevonden functies, PAR als functie van hoogte (vergelijking [2]) en ETR als functie van PAR (vergelijking [1]), 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.

Uit Figuur 8A 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 8B 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 (ETRsensord/PARsensors), leidt een lagere lichtabsorptie tot een lagere ETR per laag.

Figuur 8A is dus het meest geschikt voor het schatten van de fotosynthese op bladniveau. Bijvoorbeeld of de bovenste bladeren teveel licht krijgt en daardoor minder efficiënt worden. Figuur 8B is meer geschikt voor het schatten van de bijdrage van de verschillende lagen aan de gewasfotosynthese. In het geval dat de bovenste bladeren veel licht krijgen en minder efficiënt worden kan dan de vraag beantwoord worden: 'Wat is het aandeel van de bovenste bladeren in de gewasfotosynthese?'. Met die informatie kan uitgerekend worden of de gewasfotosynthese gebaat is bij schermen of dat beter de inefficiëntie van de bovenste bladeren op de koop toe genomen kan worden.



Figuur 8. A: ETR per sensor. B: Aandeel ETR per gewaslaag in totale ETR van gewas.

3 Resultaten en discussie teeltmonitoring

De meetopstelling was in bedrijf in 3 afdelingen van het IC van week 34 tot en met week 42. Door problemen met één van de meetcomputers zijn er aan het begin dagen uitgevallen bij afdeling 7. Ook zijn tussendoor sensoren uitgevallen omdat het blad beschadigd bleek of zelfs uit de sensor verdwenen was. Uiteindelijk zijn twee periodes van 5 dagen gevonden waarin alles goed werkte. In paragraaf 3.1 worden de effecten van de behandelingen op ETR, lichtabsorptie en lichtbenutting op gewasniveau vergeleken. In paragraaf 3.2 wordt de verdeling van de parameters over de verschillende gewaslagen vergeleken.

3.1 Vergelijking ETR gewas tussen afdelingen

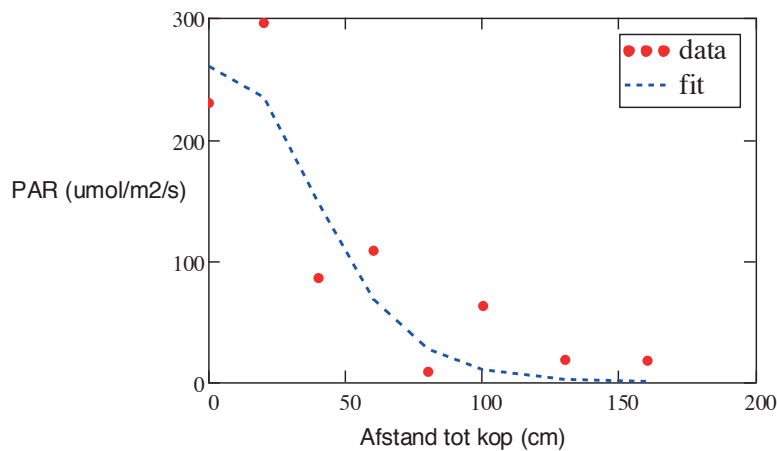
Tabel 1. laat de berekende ETR van het gewas zien van de drie afdelingen op een aantal dagen waarop alle drie de meetsystemen gedurende 24 uur betrouwbare mee data gaven.

Datum	ETR			geabsorbeerde PAR			Lichtbenutting		
	Afd.7	Afd.8	Afd.9	Afd.7	Afd.8	Afd.9	Afd.7	Afd.8	Afd.9
20-9-2013	53.7	72.2	37.3	139.5	189.0	99.5	0.385	0.382	0.375
21-9-2013	76.4	116.2	66.6	216.3	304.7	166.9	0.353	0.381	0.399
22-9-2013	37.2	61.2	41.9	103.2	153.6	99.0	0.361	0.398	0.423
23-9-2013	33.6	94.7	56.3	103.0	245.4	144.9	0.326	0.386	0.389
24-9-2013	60.1	77.0	59.4	157.4	202.5	171.9	0.382	0.380	0.346
Gemiddeld	52.2	84.2	52.3	143.9	219.0	136.4	0.361	0.386	0.386
Standaardfout	15%	11%	11%	15%	12%	12%	3.0%	0.9%	3.3%
1-10-2013	48.9	114.2	133.1	144.2	331.4	259.9	0.339	0.344	0.512*
2-10-2013	71.0	104.9	105.9	191.3	297.2	204.6	0.371	0.353	0.518*
3-10-2013	175.4	120.9	130.2	461.6	319.7	227.8	0.380	0.378	0.572*
8-10-2013	52.4	44.8	62.9	136.5	123.0	168.4	0.384	0.364	0.374
9-10-2013	57.0	48.8	71.7	149.1	128.7	198.3	0.382	0.379	0.362
Gemiddeld	80.9	86.7	100.8	216.5	240.0	211.8	0.371	0.364	0.467*
Standaardfout	30%	19%	14%	29%	20%	7%	2.3%	1.9%	9.0%*

* Hoge waarden zijn artefacten veroorzaakt door slechte kwaliteit PAR data.

Uit Tabel 1. blijkt dat de geabsorbeerde PAR en de ETR een flinke variatie vertonen. Dat is het gevolg van de wisselende weersomstandigheden. De lichtbenutting varieert veel minder, maar dat is ook een gewaseigenschap en verandert dus minder snel dan het lichtklimaat. Op 1, 2 en 3 oktober was de geschatte lichtbenutting erg hoog. Dit bleek een artefact veroorzaakt door een slechte schatting van de lichtdoving in het gewas. Figuur 9. laat zien dat er nogal wat spreiding in de PAR data zit. Dat heeft te maken met de positie van de sensoren. Sensoren 1, 3, 5 en 7 stonden in één rij planten; de sensoren 2, 4, 6 en 8 in de andere rij. Mogelijk is door het verhangen van de planten een verschil ontstaan tussen de twee rijen of is het licht bv 's morgens anders geweest dan 's middags waardoor in een noord-zuid rijrichting de sensoren aan de westzijde een andere hoeveelheid licht ontvangen dan de sensoren aan de oostzijde van de rij.

Het feit dat de lichtbenutting in Afd. 8 en Afd. 9 hetzelfde is terwijl bij Afd. 8 veel mer licht is geabsorbeerd, geeft aan dat bij de betreffende PAR niveau's de fotosynthese (ETR) nog in het lineaire deel van de lichtrespons ligt. In het lineaire deel van de lichtrespons is de lichtbenutting namelijk constant. De lichtrespons in Figuur 6. laat zien dat het lineaire gebied voor de tomaten in deze teelt tussen 0 en 400 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (PAR, gemiddeld over lichtperiode) ligt.



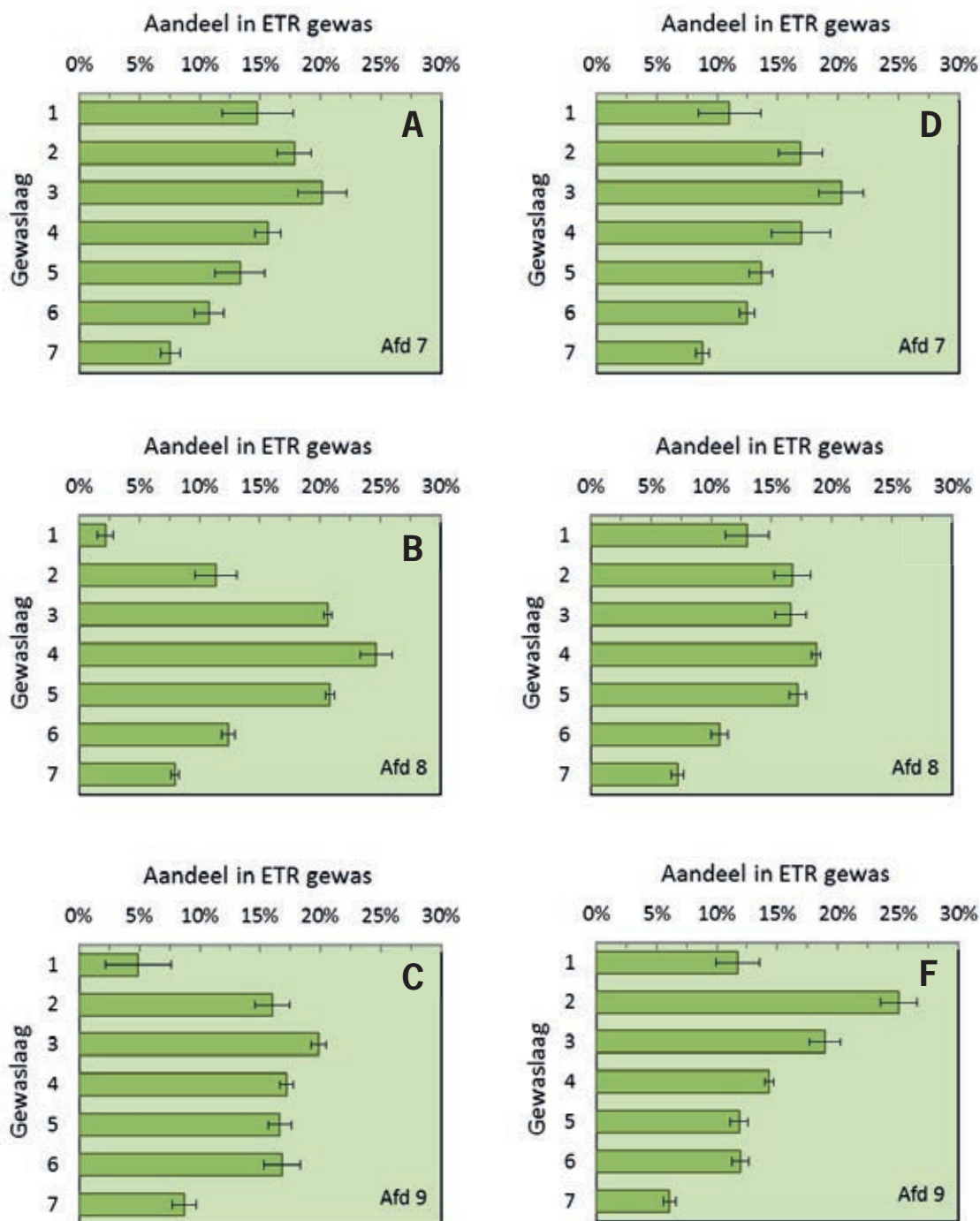
Figuur 9. PAR als functie van de hoogte in het gewas, gemeten in cm beneden de top van het gewas op 1 oktober in afd. 9. De datapunten zijn het daggemiddelde van de PAR sensor in de Micro-Moni-PAM meters. Door de datapunten is een Gompertz functie gefit die de lichtuitdoving in het gewas beschrijft.

3.2 Vergelijking ETR verdeling tussen afdelingen

Zoals Figuur 6. toont ligt een aantal ETR waarden duidelijk boven het gemiddelde (gefitte lijn). Deze hoge waarden worden veroorzaakt door het feit dat de PAR sensor niet op dezelfde plek zit als de ETR sensor (zie Figuur 2.). Daardoor kan het voorkomen dat de PAR sensor direct zonlicht 'ziet' en de plek waar de ETR gemeten wordt in de schaduw ligt. Voor de berekening van de ETR wordt gebruik gemaakt van de efficiëntie van de fotosynthese. Die is bij laag licht hoger dan bij hoog licht. In dit geval wordt de hoge efficiëntie bij laag licht vermenigvuldigd met de hoge PAR waarde. Dat levert een te hoge ETR waarde op. Een artefact of outlier dus. Deze outliers zijn bij de verdere analyse niet meegenomen.

Op basis van de Gompertz fit (PAR als functie van hoogte in gewas) en de lichtrespons (ETR als functie van PAR) is ook de bijdrage van de 7 gewaslagen aan de gewas ETR berekend. Omdat door het verhangen van de planten de verdeling per dag kan verschillen, is in Figuur 10. gewerkt met gemiddelde waarden van 5 dagen.

In september heeft het gewas in afdeling 7 een andere ETR verdeling. In september is vooral de ETR bijdrage van de bovenste gewaslaag in afdeling 7 een stuk hoger. In oktober heeft laag 2 in afdeling 9 een duidelijk hogere bijdrage aan de ETR dan bij de andere afdelingen.

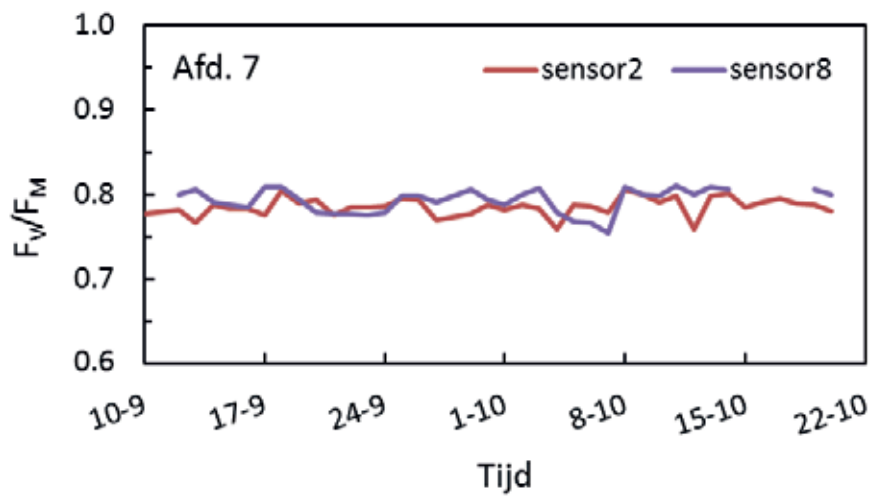


Figuur 10. Aandeel van gewaslaag in de totale ETR van het gewas in de drie afdelingen in de periode 20-24 september (A,B,C) en 1-9 oktober (D,E,F). De waarden zijn het gemiddelde van de dagwaarden en de foutindicaties zijn standaardfouten.

3.3 Maximale efficiëntie fotosynthese

De maximale efficiëntie van de fotosynthese (F_v/F_M) geeft aan of het fotosyntheseapparaat al dan niet beschadigd is door licht. Bij een volledig intact fotosyntheseapparaat is de F_v/F_M ongeveer 0.8. Bij ernstige beschadiging kan die waarde teruglopen tot 0.6 of lager. Figuur 10. geeft een voorbeeld van het verloop van de F_v/F_M in de periode van week 37 tot en met week 43. Zowel sensor 2 (één na hoogste positie) als bij sensor 8 (onderin gewas) geven een F_v/F_M die rond de 0.8 schommelt. Dat geeft aan dat het gewas in deze periode niet te leiden heeft gehad van te hoge lichtniveau 's.

Ook bij de andere afdelingen was geen sprake van lichtschade (verlaagde F_v/F_M) in deze periode.



Figuur 11. Maximale efficiënte van de bladfotosynthese (F_v/F_M) gemeten aan bladeren op 20 cm (sensor#2) resp. 130 cm (sensor #7) beneden de top van het gewas op 1 oktober in afd. 7.

4 Conclusies en aanbevelingen

4.1 PAR meting

Conclusie 1. De lichtonderscheppingsmetingen zijn uitgevoerd met de kleine PAR sensoren op de Micro-Moni-PAM. Deze sensoren zijn gevoelig voor beschaduwing. Integratie van de meetwaarden over de gehele lichtperiode om effecten van zonnestand uit te middelen leidt niet tot een betrouwbare meting van de lichtonderschepping.

Aanbeveling 1. Maak gebruik van PAR sensoren met een groter oppervlak (bv de Apogee SQ-3xx Quantum Line sensor) voor het monitoren van lichtonderschepping. Met deze lijnsensoren kunnen lichtonderschepping real-time bepaald en zichtbaar gemaakt worden voor de gebruiker.

Conclusie 2. In de proef is gewerkt met 8 sensoren en 7 gewaslagen om een goed beeld te krijgen van licht- en fotosyntheseverdeling in het gewas. Bij het simuleren van gewasfotosynthese met modellen wordt tot nu toe meestal gebruik gemaakt van maximaal 5 gewaslagen.

Aanbeveling 2. Reduceer het aantal gewaslagen tot maximaal 5 voor praktijkmetingen. Waarbij vooral de verdeling over de bovenste lagen belangrijk is.

Conclusie 3. Door de plaats van de PAR sensoren (op de Micro-Moni-PAM) is alleen de lichtonderschepping aan de rand van de gewasrij (boven de goot) gemeten. Deze waarde voor de lichtonderschepping is niet representatief voor de lichtonderschepping van het hele gewas. In het pad zal er namelijk wat meer licht verloren gaan dan in de rij tussen het gewas.

Aanbeveling 3. Meet lichtonderschepping van het gehele gewas door de lichtmeting van pad tot pad uit te voeren.

4.2 ETR meting

Conclusie 4. Figuur 6. laat zien dat de relatie tussen PAR en ETR niet afhankelijk is van de positie (hoogte) in het gewas in de meetperiode.

Aanbeveling 4. In situaties waarin de relatie tussen PAR en ETR weinig afhankelijk is van de positie in het gewas kan met minder ETR metingen volstaan worden. De grootste variatie in de relatie tussen PAR en ETR is hoog in het gewas. Daarom is het beter om meer meet punten in het bovenste deel van het gewas te hebben en onderin het gewas met slechts een punt te volstaan.

Conclusie 5. In Figuur 6. ligt een aantal ETR waarden duidelijk boven het gemiddelde. Deze waarden kunnen als outliers of artefacten beschouwd worden.

Aanbeveling 5. Bepaal de relatie tussen PAR en ETR door aan het begin van de dag de lichtresponscurve van de fotosynthese te meten met behulp van de interne LED van de Micro-Moni-PAM. ETR waarden die duidelijk boven de lichtresponscurve vallen kunnen dan eenvoudig als outlier bestempeld worden.

Conclusie 6. Gewaslagen 2 t/m 5 dragen het meest bij aan de gewas ETR. De vraag is of deze verdeling optimaal is of dat lagen 1, 6 en 7 ook meer zouden kunnen bijdragen.

Aanbeveling 6. Onderzoek of betere verdeling ETR over gewas tot meerproductie leidt.

Conclusie 7. De maximale efficiëntie van de fotosynthese (F_v/F_m) lag in de meetperiode rond de 0.8. Dit betekent dat het gewas in deze periode geen last heeft gehad van lichtschade. Dat wil natuurlijk niet zeggen dat er 's zomers geen lichtschade geweest is.

Aanbeveling 7. Monitor in een tomatengewas in de zomer om te zien of en in welke gewaslagen er lichtschade (verlaging F_v/F_m) optreedt en hoeveel impact dat heeft op gewasfotosynthese.

4.3 Gebruikersinterface

Conclusie 8. De online gebruikersinterface geeft alleen real-time data van de huidige dag. Het gaat hierbij om data per sensor (temperatuur, PAR, efficiëntie fotosynthese) en relaties tussen sensorwaarden (efficiëntie fotosynthese als functie van PAR, PAR als functie van hoogte in gewas en ETR als functie van de PAR).

Aanbeveling 8. Maak de gebruikersinterface informatiever door niet alleen de actuele van de huidige dag te tonen, maar geef ook de mogelijkheid om eerdere dagen te bekijken.

5 Geraadpleegde literatuur

de Gelder A., Warmenhoven M, Klapwijk P en van Baar PH. 2014.

Optimalisatie van Het Nieuwe Telen. Wageningen, Rapport nr. GTB-1300.

Dankers P, Rooij E de, Verberkt H, Blaakmeer A, Roovers-Huijben T, Pot S, Trouwborst G. 2011.

GrowSense 2. Energiebesparing door optimalisering van de teelfactoren temperatuur, CO₂, licht en VPD op basis van plantreacties. Rapport PT 13236.

Genty B, Briantais J-M, Baker NR. 1989.

The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. *Biochimica et Biophysica Acta* 990, 87- 92.

Anonymous. 2007.

Junior-PAM CHLOROPHYLL FLUOROMETER Operator's Guide, 58pp. Heinz Walz GmbH, Effeltrich (Germany).
www.walz.com/downloads/manuals/junior-pam/jpm_071206.pdf.

Pot CS, Trouwborst G, Schapendonk AHCM. 2011.

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

Anonymous. Owner's manual quantum sensor Model SQ-100 and SQ-300 Series. Apogee Instruments, Inc., Logan (USA): 17p.

