



# On-line monitoring van transpiratie en fotosynthese: de praktijk

J. Bontsema, J. Hemming, H.J.J. Janssen, E. Meinen, S. Rispens, J.W. Steenhuizen, P. de Visser



### **Abstract NL**

Belangrijke processen met betrekking tot het gewas zijn verdamping en fotosynthese. Met een on-line weergave van de verdamping kan de teler een betere afweging maken tussen de bevordering van de activiteit van het gewas en de inzet van productiefactoren hiervoor, zoals meer energie bij verhoging minimum buis of verlies aan energie bij verhoging raamstand. Met een on-line weergave van de fotosynthese kan de teler een afweging maken voor de inzet van meer of minder CO<sub>2</sub>. WUR Glastuinbouw heeft monitoren ontwikkeld voor de on-line bepaling van de verdamping en fotosynthese. Deze monitoren zijn uitgetest bij diverse vruchtgroentetelers en slatelers. In het onderzoek is ook een nieuwe transpiratiemonitor ontwikkeld, op basis van een statische energie- en vochtbalans. De beide transpiratiemonitoren geven goede resultaten in de praktijk. De fotosynthesemonitor werkt nog niet goed. Alle monitoren zijn eenvoudig te implementeren in de klimaat-computer en kunnen dan als beslissingsondersteuning van de telers worden gebruikt.

### **Abstract UK**

Important processes related to the crop are transpiration and photosynthesis. With an on-line representation of the transpiration the grower can make a better balance between the activation of the crop and the use of production factors for this, like more energy for raising the minimum pipe temperature or the loss of energy due to increasing the window aperture. With an on-line representation of the photosynthesis a grower can choose for using more or fewer CO<sub>2</sub>. WUR Greenhouse Horticulture has developed monitors for the on-line determination of the transpiration and photosynthesis. These monitors have been tested at several growers of fruit vegetables and at growers of lettuce. In the research also a new transpiration monitor has been developed, based on a static energy and moisture balance. Both transpiration monitors give good results in practice. The photosynthesis monitors is yet not working very well. All monitors can be easy implemented in the climate computer and can be used as a decision support tool for the growers.

© 2011 Wageningen, Wageningen UR Glastuinbouw.

## **Wageningen UR Glastuinbouw**

Adres : Droevendaalsesteeg 1, 6708 PB Wageningen  
: Postbus 644, 6700 AP Wageningen  
Tel. : 0317 - 48 63 90  
Fax : 0317 - 41 80 94  
E-mail : [glastuinbouw@wur.nl](mailto:glastuinbouw@wur.nl)  
Internet : [www.glastuinbouw.wur.nl](http://www.glastuinbouw.wur.nl)

# Inhoudsopgave

Voorwoord		5
Samenvatting		7
1	Inleiding	9
2	Waarom transpiratie en fotosynthese meten?	11
	2.1 Inleiding	11
	2.2 Hoe werken de transpiratie- en fotosynthesemonitor?	12
	2.3 Wat kun je met de transpiratie- en fotosynthesemonitor?	13
3	Praktijknetwerk	15
	3.1 Deelnemende bedrijven	15
	3.2 Technische uitvoering	15
4	Transpiratie	19
	4.1 Inleiding	19
	4.2 Transpiratiemonitor I	19
	4.3 Transpiratiemonitor II	20
	4.4 Transpiratiemodel	21
	4.5 Meetgoot	21
	4.6 Verdamping van de bodem	24
	4.6.1 Inleiding	24
	4.6.2 Metingen van verdamping en respiratie van de bodem in de kas	24
	4.6.3 Discussie	27
	4.7 Resultaten	27
	4.7.1 Transpiratiemonitor I	27
	4.7.2 Transpiratiemonitor II	32
	4.7.3 Meetgoot	34
	4.8 Discussie	34
5	Fotosynthese	39
	5.1 Inleiding	39
	5.2 Fotosynthesemonitor	39
	5.3 Fotosynthesemodel	40
	5.4 Fotosyntheseschatting met een gewasmodel	40
	5.4.1 Inleiding	40
	5.4.2 Methode	40
	5.4.2.1 Metingen:	40
	5.4.2.2 Actuele netto bladfotosynthese	41
	5.4.2.3 Lichtrespons curven via bladkamer	41
	5.4.2.4 Modelleren fotosynthese in 5 stappen: Tomaat	42
	5.4.2.5 Modelleren fotosynthese in 5 stappen: Sla	43
	5.4.3 Resultaten tomaat	43

	5.4.3.1	Actuele fotosynthese	43
	5.4.3.2	Lichtresponscurven	45
	5.4.3.3	Calibratie van parameters van het fotosynthesemodel	46
	5.4.3.4	Licht- en fotosyntheseverdeling in het gewas	46
	5.4.4	Resultaten sla	50
	5.4.4.1	Lichtresponscurven	50
	5.4.4.2	Kalibratie van parameters van het fotosynthesemodel	51
	5.4.4.3	Licht- en fotosyntheseverdeling in het gewas	51
	5.4.5	Conclusies schatting gewasfotosynthese	53
	5.5	Resultaten en discussie	53
6		Discussie	61
7		Conclusie	63
8		Referenties	65

# Voorwoord

Voor u ligt het eindrapport van het project “On-line monitoring van transpiratie en fotosynthese: de praktijk 1”. Dit project is een vervolg op het project “On-line monitoring van transpiratie en fotosynthese”. In dit rapport wordt beschreven hoe de ontwikkelde transpiratiemonitor en fotosynthesemonitor in de praktijk verder ontwikkeld zijn. De resultaten van de testen bij verschillende tuinders worden beschreven.

Het project is gefinancierd door het Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie en het Productschap Tuinbouw, in het kader van het energieonderzoek. Wij bedanken beide instanties voor deze ondersteuning.

Dit onderzoek is uitgevoerd door:

Dr. J. Bontsema, dr. J. Hemming, ing. H.J.J. Janssen, ing. E. Meinen, ir. S. Rispens, ing. J.W. Steenhuizen en dr. P. de Visser, Wageningen UR Glastuinbouw;

De experimenten zijn uitgevoerd bij Improvement Centre, Bleiswijk, Doorn, Heerde, Ammerlaan, Sexbierum, Van Dijk, Harmelen, Boer, Ridderkerk, Hermans, Leunen en Thijssen, Venlo. Wij bedanken Sjoerd Nieboer, Willem Doorn, Jaap Ammerlaan, Ton van Dijk, Arjan Boer, Johan Hermans en Har Thijssen voor het gebruik van hun klimaatdata en voor hun bijdrage aan de discussies.

De toeleveranciers Priva B.V., Hortimax en LetsGrow willen we graag bedanken voor hun steun bij de uitvoering van het project.

Dr. J. Bontsema, projectleider

Wageningen, juli 2011

## **Projectreferenties**

WUR Glastuinbouw projectnummer: 3242021000

PT projectnummer: 12735

LNV-DK programma: BO-03-06 Energie in de beschermde teelten



# Samenvatting

Belangrijke processen met betrekking tot het gewas zijn de verdamping en de fotosynthese. Met een weergave van de verdamping kan de teller een betere afweging maken tussen de bevordering van de activiteit van het gewas (de verdamping) en de inzet van productiefactoren hiervoor, zoals meer energie bij verhoging minimum buis of verlies aan energie bij verhoging raamstand of door actieve ontvochtiging door middel van het inblazen van droge buitenlucht. Weergave van de fotosynthese kan bepalend zijn voor de inzet van meer of minder CO<sub>2</sub>. Een on-line monitor voor deze processen kan bijdragen tot een efficiënte inzet van productiefactoren.

In het project "On-line monitoring van transpiratie en fotosyntheseactiviteit" zijn analoog aan de ventilatiemonitor uit het project "On-line schatting van het ventilatievoud van kassen" twee monitoren ontwikkeld voor de bepaling van verdamping en de fotosynthese van een gewas in een kas. De verdamping en de fotosynthese worden net als het ventilatievoud bepaald uit dynamische balansen. In dit geval is de transpiratiemonitor, zoals de methode wordt genoemd om de verdamping te bepalen, gebaseerd op de vochtbalans. Verdamping is één van de onderdelen van de balans en juist omdat de balans altijd in evenwicht moet zijn, kan uit de balans de verdamping worden berekend. Voor deze berekening wordt een slimme methode uit de systeem- en regeltechniek gebruikt. De transpiratiemonitor heeft metingen nodig voor de RV binnen en buiten, de ventilatie en de temperatuur binnen en buiten. Op moderne bedrijven is steeds vaker een RV-sensor voor buiten aanwezig en de ventilatie kan worden bepaald met de ventilatiemonitor. De overige gegevens zijn standaard aanwezig in de klimaatcomputer. De binnen- en buitentemperatuur worden gebruikt om de condensatie aan het dek, wat ook een onderdeel is van de balans, te berekenen. De methode is in principe geschikt voor alle typen kassen. In het project "Ventilatievoud: De praktijk" is een tweede methode ontwikkeld voor het bepalen van de verdamping gebaseerd op de gekoppelde statische balansen voor energie en vocht, deze methode is nog eenvoudiger te implementeren. Deze nieuwe methode is ook in dit project getest.

De fotosynthesemonitor berust op de CO<sub>2</sub>-balans. Hiervoor zijn metingen nodig van CO<sub>2</sub>-concentratie binnen en buiten, de ventilatie en gegevens van de CO<sub>2</sub>-dosering. Voor de CO<sub>2</sub>-concentratie buiten is een extra sensor nodig of het huidige meetsysteem voor binnen moet aangepast worden voor aanzuiging van buitenlucht. De ventilatie kan weer worden gemeten met de ventilatiemonitor.

De uitkomsten van de transpiratiemonitoren zijn vergeleken met een fysisch model en bij 1 tuinder met een meetgoot. De transpiratiemonitoren zijn uitgetest bij meerdere vruchtgroentetelers en bij enkele slatelers. Bij de slateelt in de vollegrond is ook gekeken naar de verdamping uit de bodem. Beide transpiratiemonitoren geven goede uitkomsten, waarbij opgemerkt moet worden, dat de transpiratiemonitor, die gebaseerd is op de ventilatiemonitor gecorrigeerd moet worden voor een offset. De transpiratiemonitors hebben als voordeel dat ze voor allerlei gewassen toegepast kunnen worden en niet afhankelijk zijn van gewasparameters als bijvoorbeeld de leaf area index (LAI).

De fotosynthesemonitor is vergeleken met of-line metingen van de fotosynthese bij tomaat en sla en met een rekenmodel. De monitor werkt technisch goed, maar geeft geen goede uitkomsten. De monitor lijkt erg gevoelig voor onnauwkeurigheid in de ventilatiebepaling uit de ventilatiemonitor en onnauwkeurigheid van de metingen van de CO<sub>2</sub>-concentraties binnen en buiten. Ook de bepaling van de dosering laat te wensen over.





# 1 Inleiding

De huidige praktijk in de glastuinbouw is dat de teler het klimaat in zijn kas voorschrijft in de hoop optimale omstandigheden voor zijn gewas te creëren. De klimaatcomputer zorgt ervoor dat het gewenste klimaat zo goed mogelijk wordt gerealiseerd. Echter het doel is niet om het klimaat zo goed mogelijk te regelen, maar om het gewas zo goed mogelijk te sturen om een economisch zo goed mogelijke opbrengst van het gewas te krijgen. De vertaling van een goede gewasresponsie naar een klimaatstrategie is grotendeels de verantwoording van de teler, die door ervaring en door adviezen van derden deze vertaalslag maakt.

In het project “On-line monitoring van transpiratie en fotosynthesecapaciteit” is een methode bedacht om in de praktijk tot nu ontbrekende grootheden op de klimaatcomputer, namelijk fotosynthese en transpiratie van het gewas op een eenvoudige uit de toch al gemeten klimaatgrootheden te berekenen. Hiermee zou de tuinder eenvoudig inzicht in de conditie en het gedrag van zijn gewas kunnen krijgen.

Voor de verdamping van het gewas is een belangrijk proces. In de praktijk wil de teler graag een zo optimaal mogelijke verdamping van het gewas, of zoals in de praktijk genoemd het gewas moet actief zijn (Dieleman e.a., 2006). Om het gewas te activeren, met als doel het gewas meer te laten verdampen, neemt een teler maatregelen als verhoging van de minimumbuis en vergroting van de minimum raamstand. Ook het effect op de verdamping van het actief ontvochtigers van de kas met droge buitenlucht, zoals wordt toegepast in Het Nieuwe Telen, kan hiermee bepaald worden. In de huidige praktijk moet de teler aan de hand van gewaswaarnemingen zelf bepalen of zijn maatregelen effect hebben. Een monitor voor de transpiratie zou dan ook een enorme vooruitgang zijn. In de praktijk zijn hiervoor nu ook meetgoten in gebruik, deze meten echter lokaal en zijn ook niet geschikt voor iedere teelt en vergen ook onderhoud.

Hetzelfde geldt voor de fotosynthese, deze bepaalt uiteindelijk de opbrengst van het gewas. Met een monitor voor de fotosynthese kan een teler zien of zijn beslissingen voor de CO<sub>2</sub>-dosering effect hebben of niet. De fotosynthesemonitor kan vooral in belichte en in semigesloten kassen belangrijk zijn.

In een eerder project “On-line monitoring van transpiratie en fotosyntheseactiviteit” zijn monitors ontwikkeld om met behulp van de in het project “On-line schatting van het ventilatievoud van kassen” ontwikkelde ventilatiemonitor en meting van de buiten RV en CO<sub>2</sub>-concentratie de verdamping en de fotosynthese van het gewas on-line te bepalen. Deze methodes zijn toen bij 1 tuinder getest.

In dit project zijn de transpiratie-monitor en de fotosynthesemonitor uitgetest bij verschillende tuinders, o.a. bij vier vruchtgroentelers (tomaat, komkommer en paprika) en drie slatelers.

Het doel van dit project is om de ontwikkelde transpiratie- en fotosynthesemonitor een stap dichterbij de praktijk te brengen, door deze te testen in de praktijk en de resultaten uit te dragen naar de sector en het bedrijfsleven. Het onderzoek heeft de volgende doelstellingen:

1. Het project levert een methodiek (hulpmiddel voor de tuinder) op waarmee het ventilatievoud van kassen en de transpiratie en fotosynthese van het gewas tijdens de teelt continue door de klimaatcomputer kunnen worden geschat uit beschikbare metingen van binnen- en buitenklimaat. Dit resulteert in een getal voor het ventilatievoud, een getal voor transpiratie en een getal voor fotosynthese op een tijdschaal van ½ tot 1 uur. Afhankelijk van de responstijd van het klimaat- en gewasgroeiproces kunnen schattingen ook sneller worden geproduceerd (zeg eens per 15 minuten). De rekenkracht van de huidige computers vormt daarvoor geen belemmering.
2. De methode is op eenvoudige wijze in de klimaatcomputer (in software) te implementeren.
3. Vastgesteld zal worden welke kasgebonden parameters door de tuinder moeten worden opgegeven voor succesvolle schatting van ventilatievoud, transpiratie en fotosynthese.
4. De nauwkeurigheid van de transpiratie- en fotosynthesemonitor wordt gerelateerd aan de nauwkeurigheid van de gemeten klimaatgrootheden.
5. In overleg met de deelnemende tuinders, wordt bepaald op welke wijze de schattingen het beste aan de tuinder kunnen worden gepresenteerd.
6. Er wordt een relatie gelegd tussen de door de monitor bepaalde transpiratie en fotosynthese en door de tuinders gebruikte productiemiddelen, zoals bijvoorbeeld schermen, verwarming (hete lucht) en belichting. (Meeste bladgroentetuinders hebben hete luchtverwarming en geen verwarmingsbuizen. In het project zal geïnventariseerd worden hoe de tuinders hun klimaat bepalen)
7. Managementtool, dat bijdraagt tot optimalisatie van het teeltsysteem.

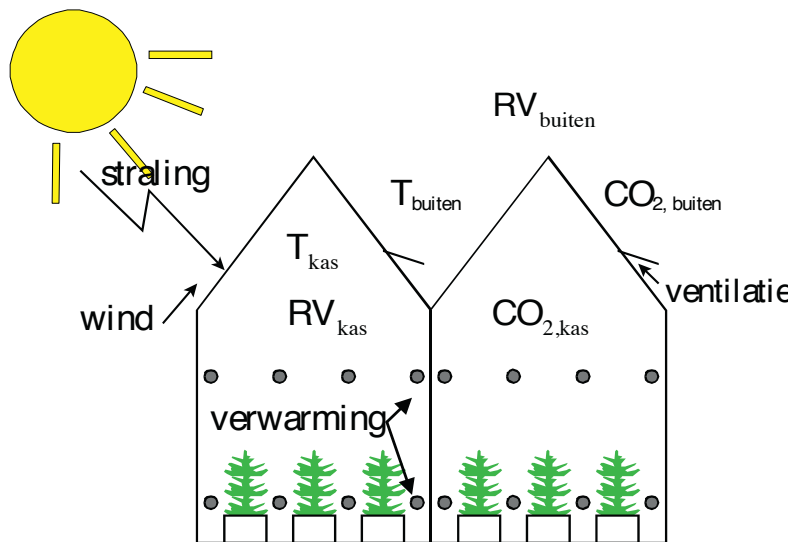
In de volgende hoofdstukken wordt het onderzoek beschreven en uiteengezet hoe aan de doelstellingen is voldaan.

- In hoofdstuk 2 wordt ingegaan waarom transpiratie en fotosynthese belangrijk zijn en wordt kort ingegaan op hoe beide monitoren werken.
- In hoofdstuk 3 wordt het praktijknetwerk beschreven en vooral hoe de resultaten van de monitoren aan de teler en anderen worden gepresenteerd.
- Hoofdstuk 4 beschrijft de twee gebruikte transpiratiemonitoren in meer detail. Verder wordt een rekenmodel beschreven. De resultaten van beide monitoren in vergelijking met het rekenmodel en bij 1 tuinder in vergelijking met een meetgoot worden besproken en bediscussieerd.
- Hoofdstuk 5 beschrijft de fotosynthesemonitor, de off-line fotosynthesemetingen en een rekenmodel. De resultaten van de fotosynthesemonitor worden besproken en bediscussieerd.
- Hoofdstuk 6 wordt het belang van het onderzoek voor de sector besproken.
- In hoofdstuk 7 staan de conclusies vermeld.

## 2 Waaron transpiratie en fotosynthese meten?

### 2.1 Inleiding

In een natuurlijk geventileerde kas spelen een drietal klimaatgrootheden een hoofdrol. Dit zijn de temperatuur in de kas, de relatieve luchtvochtigheid en de  $\text{CO}_2$ -concentratie. Deze klimaatgrootheden worden beïnvloed door enerzijds door de teler bepaalde invloeden, zoals verwarming,  $\text{CO}_2$ -dosering en ventilatie. Anderzijds wordt het klimaat in de kas beïnvloed door de buitenomstandigheden, zoals zonnestraling, buitentemperatuur,  $\text{CO}_2$ -concentratie buiten, RV buiten en de windsnelheid en windrichting. Echter in een kas met een gewas, heeft ook het gewas een behoorlijke invloed op het klimaat. De verdamping van het gewas heeft grote invloed op de relatieve luchtvochtigheid, 90% van het water dat de planten opnemen, komt door verdamping in de kas. Daarnaast bepaalt de verdamping hoeveel energie van de zon daadwerkelijk wordt gebruikt om de kas op te warmen. Meer verdamping van het gewas geeft een minder warme kas. De fotosynthese beïnvloedt de  $\text{CO}_2$ -concentratie in de kas. Anderzijds wordt de  $\text{CO}_2$ -concentratie in de kas gebruikt om de fotosynthese te beïnvloeden. In onderstaand figuur is dit proces schematisch weergegeven.



Figuur 2.1. Schematische weergave kasklimaat.

Daarnaast is het natuurlijk zo, dat de teler zijn klimaat regelt om een goed gewas te krijgen, dus de gewasresponsie bepaalt ook indirect, via de instellingen van de teler het kasklimaat. Voor een goed klimaat stelt de tuinder bepaalde waarden in zoals een stook- en ventilatielijn, en grenzen voor de RV en  $\text{CO}_2$ . De invloed van de verwarming op de temperatuur van de kas is voor een tuinder inzichtelijk, verhoging van de buistemperatuur geeft een hogere kastemperatuur. Verhoging van de  $\text{CO}_2$ -dosering geeft meestal een verhoging van de  $\text{CO}_2$ -concentratie.

Inzicht in het klimaat is niet voldoende, uiteindelijk gaat het om het gewas en de gewasresponsies, zoals verdamping en fotosynthese. In de praktijk zal men interesse hebben in vragen als wat is het effect van een hogere of lagere minimumbuitentemperatuur of een grotere of kleinere raamstand op de verdamping? Of wat is het effect van meer of minder ventilatie, gemeten met de ventilatiemonitor, op de verdamping. En wat is het effect van een hogere  $\text{CO}_2$ -dosering op de fotosynthese.

In vervolg op het ontwerpen van de ventilatiemonitor is daarom de vraag gesteld of het ook niet mogelijk is om op soortgelijke wijze een monitor voor de verdamping en fotosynthese te bedenken.

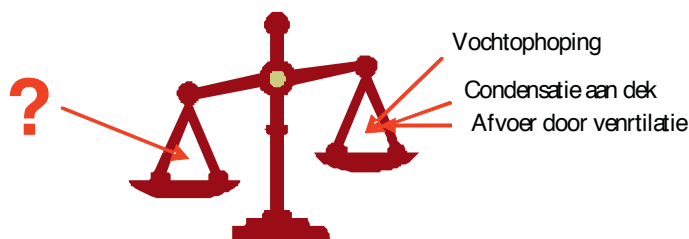
## 2.2 Hoe werken de transpiratie- en fotosynthesemonitor?

De transpiratiemonitor berust op de vochtbalans van de kas. De balans is weergegeven in Figuur 2.2. De vochtbalans kan worden weergegeven als een weegschaal. Links op de weegschaal staat de verdamping van het gewas, de oorzaak van vocht in de kas. Rechts op de weegschaal staat het afgevoerde vocht via de ventilatie, het afgevoerde vocht via de condensatie aan het kasdek, samen met de vochtophoping de kas. Het afgevoerde vocht bestaat dus uit vochtafvoer door ventilatie en vochtafvoer via condensatie. Het toegevoerde vocht in de kas is afkomstig van transpiratie van het gewas. De vochtophoping is het verschil tussen toegevoerde en afgevoerde vocht en bepaalt de stijging of daling van de waterdampconcentratie in de kas.



Figuur 2.2. De vochtbalans van een kas.

Natuurkundig gesproken is de weegschaal altijd in balans. Hiervan wordt bij de transpiratiemonitor in de berekening van de transpiratie gebruik gemaakt. In principe zijn er goede modellen voor de transpiratie, maar net als in het project 'On-line schatting van het ventilatievoud van kassen', heeft zo'n model niet een directe of een niet voldoende terugkoppeling met de werkelijke transpiratie. Voor condensatie gaan we er vanuit dat we deze correct kunnen berekenen uit het verschil tussen kastemperatuur en dektemperatuur. Voor de ventilatie gebruiken we de waarde, die de ventilatiemonitor, uit het project 'On-line schatting van het ventilatievoud van kassen', berekend. Wij gaan er hier vanuit, net als bij het schatten van ventilatievoud, dat de transpiratie onbekend is. Omdat we de transpiratie niet kennen krijgen we dus de situatie als weergegeven in Figuur 2.3. De balans lijkt uit evenwicht.



Figuur 2.3. Vochtbalans uit evenwicht door onbekende verdamping.

Door nu op ieder tijdstip net zolang de vochttoevoer door transpiratie te corrigeren tot de weegschaal weer in evenwicht is, is de transpiratie dus te berekenen. Met behulp van een techniek uit de meet- en regeltechniek kan dit proces volledig geautomatiseerd worden.

De transpiratiemonitor maakt gebruik van de ventilatiemonitor, klimaatgegevens, zoals die nu al bij iedere tuinder door de klimaatcomputer worden gemeten en een buiten RV meting. Deze laatste meting vindt tegenwoordig op steeds meer bedrijven standaard plaats.

De fotosynthesemonitor werkt op soortgelijke wijze. Hiervoor wordt de CO<sub>2</sub>-massabalans gebruikt. Links op de balans staan dan de CO<sub>2</sub>-ophoping, de fotosynthese en het verlies van CO<sub>2</sub> door ventilatie en rechts staat de dosering van CO<sub>2</sub>.

## 2.3 Wat kun je met de transpiratie- en fotosynthesemonitor?

Goede transpiratie van het gewas is essentieel om een goede productie en een gezond gewas te krijgen. Een te geringe verdamping zorgt ervoor dat er te weinig mineralen van de wortels naar de overige delen van de plant worden, wat voor calcium kan leiden tot neusrot. Ook een te grote verdamping kan leiden tot neusrot omdat dan alle mineralen naar de bladeren worden getransporteerd. Het is ook mogelijk om op transpiratie te regelen, om het versgewicht te regelen (zie Bijlage I). Daarnaast kan met de transpiratiemonitor inzicht verworven worden op het effect dat bijvoorbeeld ventilatie en verwarming op de transpiratie hebben. Ook is het mogelijk om de transpiratie te vergelijken met de wateropname van de plant, het verschil is de toename van het versgewicht van de plant. De wateropname kan in principe uit de waterregeling worden gehaald. In de praktijk hebben telers het over activeren van het gewas, wat voor hen betekent dat het gewas veel verdampt [Dieleman e.a., 2006]. Hiervoor gebruikt men een verhoging van de minimumbuistemperatuur en/of vergroting van de minimum raamstand. Met de transpiratiemonitor kan de teler direct zien of zijn maatregelen al dan niet effect hebben. Indien ze geen effect hebben, kunnen de maatregelen teruggedraaid worden en kan op deze manier er energie bespaard worden.

Netto assimilatie (het netto door de plant vastgelegde koolstof) is de motor van de gewasgroei.

Fotosynthese en onderhoudsrespiratie worden beïnvloed door de actuele klimaatomstandigheden in de kas, door de water status en door nutriënten (vooral stikstof) opname van het gewas. Als de teler de beschikking zou hebben over een monitor voor de netto assimilatie, dan krijgt de teler grip op: voorkomen van suboptimale condities, het reguleren van water en nutriënten dosering. De teler krijgt inzicht in de effecten op de assimilatie van klimaat regelacties, zoals, zuivere CO<sub>2</sub>-dosering, belichting, ventilatie en verwarming. Hiermee kan de teler indirect ook bepalen of zulke acties rendabel zullen zijn. Uit de actuele assimilatie kan de potentiële assimilatie worden bepaald, waardoor de teler kan bepalen of extra CO<sub>2</sub> of belichting zinvol zal zijn.



## 3 Praktijknetwerk

### 3.1 Deelnemende bedrijven

De transpiratie- en fotosynthesemonitor zijn getest bij verschillende bedrijven:

1. Komkommerteler in Heerde, midden Nederland. De teler heeft dakberegening en heeft een energiescherm, dat ook als schaduw scherm wordt gebruikt.
2. Improvement Centre Bleiswijk. Commercieel onderzoekstation 1 afdeling met tomaten gebruikt. In deze afdeling was een meetgoot aanwezig.
3. Tomatenteler in Sexbierum, Noordwest Nederland.
4. Paprikatelers in Harmelen, Midden Nederland.
5. Sla teler in Ridderkerk, West-Nederland. Sla wordt op bewegende goten geteeld.
6. Sla teler in Leunen, Zuid-Nederland. Heteluchtverwarming.
7. Sla teler in Venlo, Zuid-Nederland. Heteluchtverwarming.

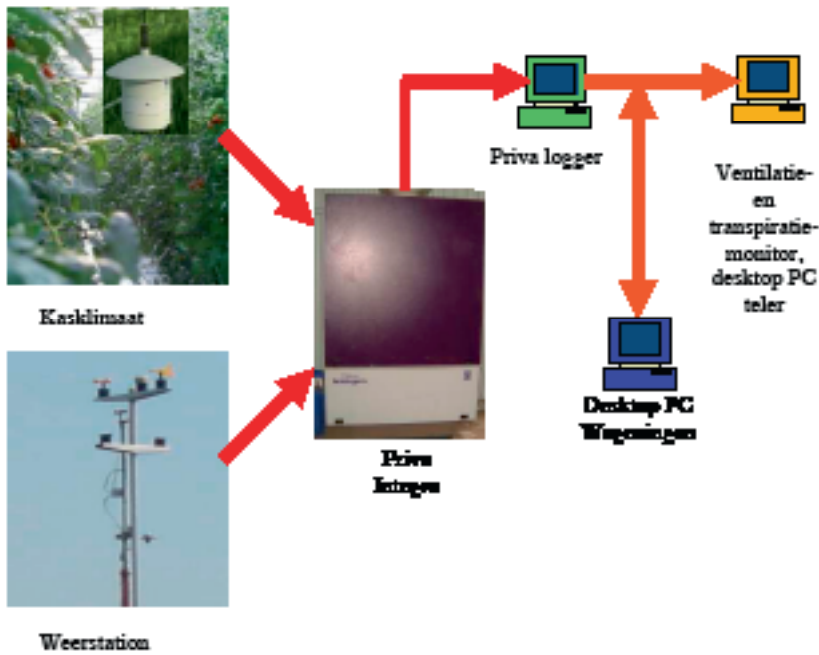
### 3.2 Technische uitvoering

In de kas wordt het klimaat gemeten met de standaard klimaatmeetbox van de tuinder. De weersomstandigheden buiten de kas worden gemeten met het weerstation van de tuinder. Om de verdamping en de fotosynthese van het gewas kunnen berekenen zijn bij de tuinders, voor zover niet aanwezig, een buiten RV-sensor en een buiten CO<sub>2</sub>-sensor door hun leverancier geplaatst. Alle klimaatgegevens, ook van de bijgeplaatste sensoren worden door de klimaatcomputer geregistreerd. Deze signalen worden samen met bepaalde stuursignalen zoals buistemperatuur en raamopeningen gestuurd naar een Desktop PC waarop de benodigde berekeningen voor de ventilatie-, transpiratie- en fotosynthesemonitor worden uitgevoerd. Deze desktop kan bij de tuinder staan of op een andere plaats, bijvoorbeeld bij WUR Glastuinbouw. Dit is afhankelijk van de gebruikte online interface tussen de teler en WUR Glastuinbouw.

Voor die telers, die een Priva klimaatcomputer (Integro) hebben is de configuratie als in Figuur 3.1.

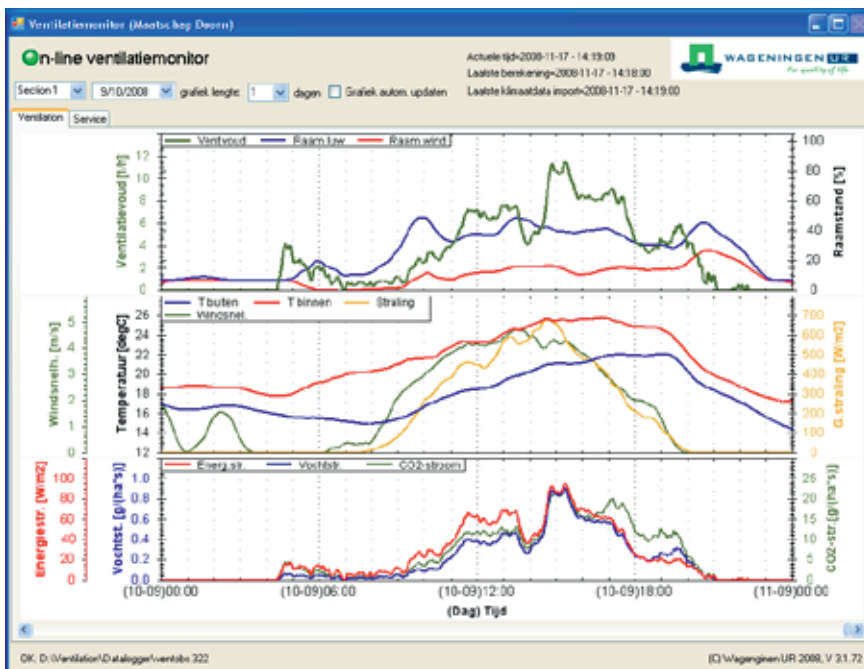
De data worden uit de klimaatcomputer gelezen door middel van een klein software pakket, de zogenaamde Priva-logger. Dit pakket kan draaien op een willekeurige Desktop PC in het netwerk van de tuinder. De Priva logger geeft deze data door aan de desktop bij de tuinder waarop de berekeningen voor de monitors worden uitgevoerd. Deze desktop heeft een remote verbinding met de desktops van de onderzoekers in Wageningen, via het programma LogMeIn ([www.logmein.com](http://www.logmein.com)).

De ventilatie-, transpiratie- en fotosynthesemonitor zijn geschreven in C# ([www.microsoft.com](http://www.microsoft.com)). De algoritmes in de monitors, die on-line het ventilatievoud, de verdamping en de fotosynthese berekenen zijn in geschreven in Matlab® ([www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)) en gecompileerd met behulp van de Matlab Compiler naar dll's, die in C# aangeroepen kunnen worden. De gebruikte klimaatdata en de uitkomsten van de ventilatieberekeningen worden op de desktop computer bij de tuinder in een database, gebouwd met behulp van MySQL ([www.mysql.com](http://www.mysql.com)), opgeslagen.



Figuur 3.1. Technische infrastructuur Priva-telers.

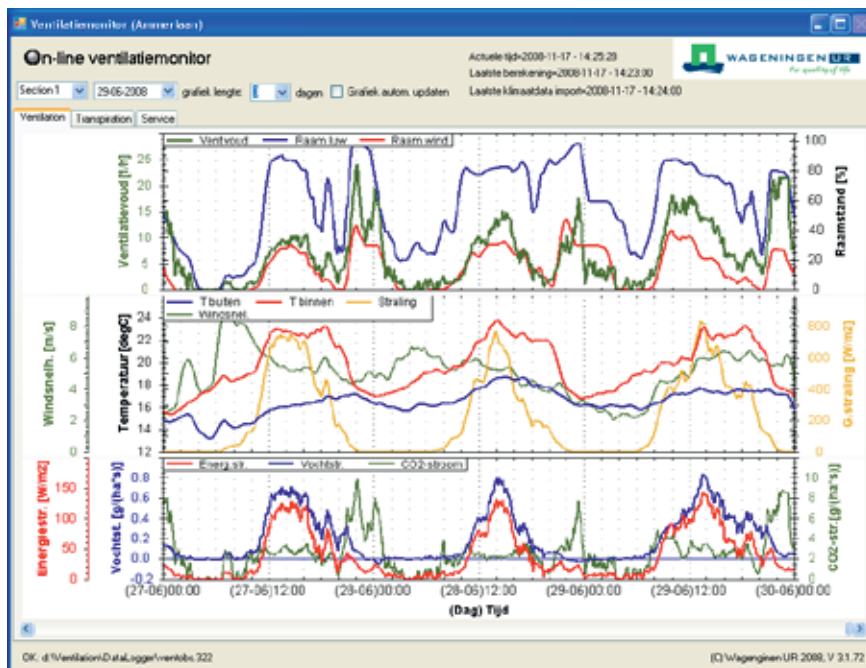
Op de desktop bij de tuinder, wordt de ventilatiemonitor weergegeven zoals in Figuur 3.2.



Figuur 3.2. De ventilatiemonitor zoals getoond aan de tuinder.

Het scherm is gemaakt met behulp van de softwarebibliotheek Zedgraph ([www.zedgraph.com](http://www.zedgraph.com)). In het scherm wordt in principe altijd de laatste 24 uur weergegeven. Echter de tuinder kan ook meerdere dagen tegelijk weergeven, tot maximaal 7 en hij kan ook terugkijken naar een willekeurige datum, zie Figuur 3.3.

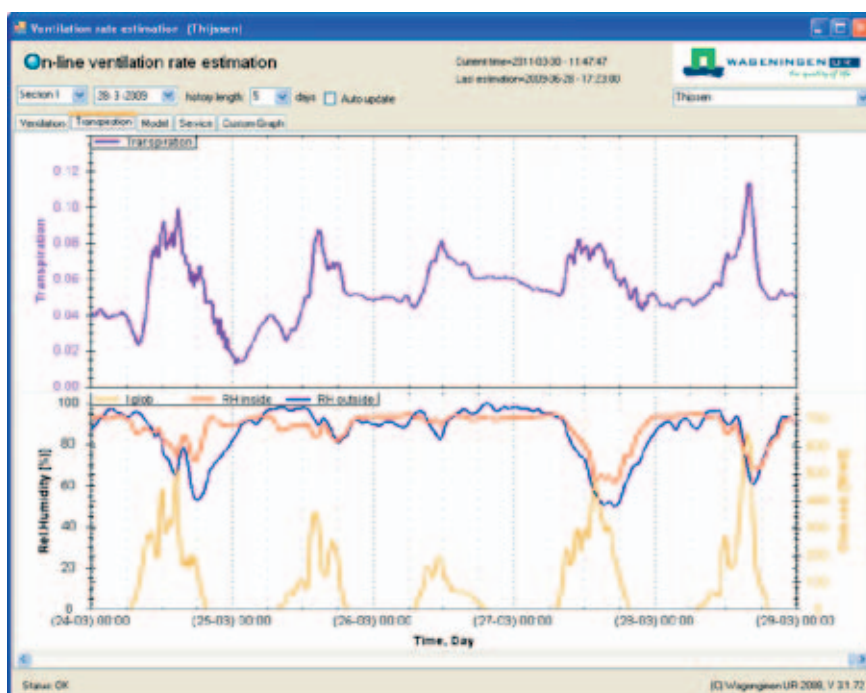




Figuur 3.3. Ventilatie monitor voor meerdere dagen.

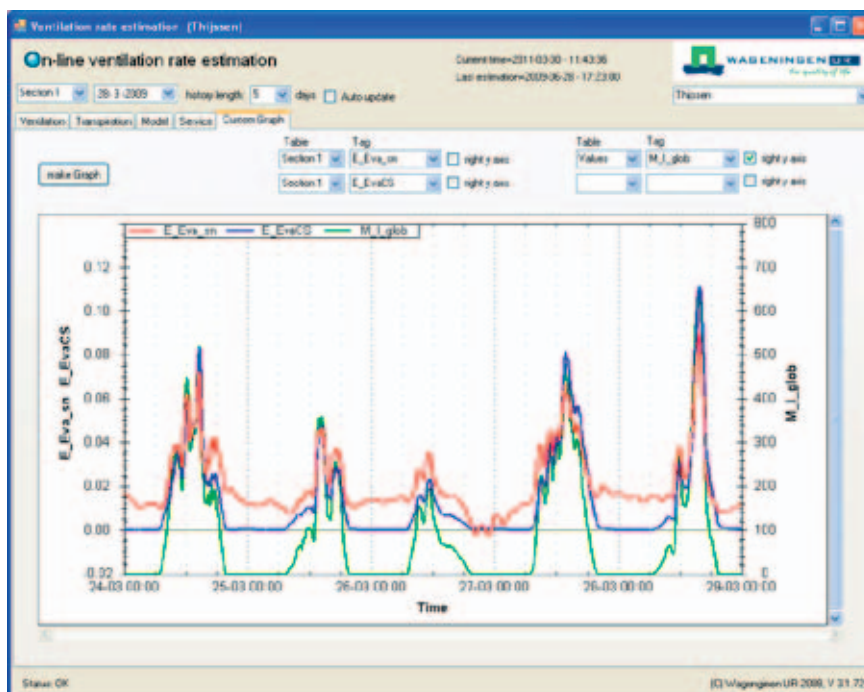
De tuinder kan ook switchen tussen verschillende afdelingen (secties). In het bovenste figuur van het scherm wordt het ventilatievoud weergegeven, samen met de raamopeningen aan de luze en wind zijde. In het middelste figuur worden de kastemperatuur, de buitentemperatuur, de windsnelheid en de straling weergegeven. In het onderste figuur zijn het energieverlies en CO<sub>2</sub>-verlies als gevolg van ventilatie en de vochtafvoer weergegeven.

Het tabblad "Service" is niet bedoeld voor de tuinder, maar voor de software ontwikkelaars en kan tevens worden gebruikt om in te loggen om bij de database van de tuinder te komen. Het tabblad "Transpiratie" laat de resultaten van de transpiratiemonitor (Transpiratiemonitor I, zie sectie 4.2) zien, in combinatie met de RV binnen en buiten en de globale straling van de zon, zie Figuur 3.4.



Figuur 3.4. Het tabblad "Transpiratie" van de database.

De desktop computer bij de tuinder is via internet verbonden met verschillende desktop computers bij Wageningen UR Glastuinbouw. Met gebruikmaking van het programma LogMeln ([www.loggemein.com](http://www.loggemein.com)) hebben de onderzoekers toegang tot de desktopcomputers bij de tuinders. Voor onderzoeksdoeleinden is een centrale database, gebouwd met behulp van MySQL ([www.mysql.com](http://www.mysql.com)), die de een soortgelijke grafische interface heeft als de ventilatiemonitor van de telers. De centrale database werd iedere week bijgewerkt, door het werkstation (PC) van de tuinder te koppelen aan de database en de data van de tuinder naar de database te transporteren. De grafische interface van de database heeft meerdere schermen. In de database heeft men direct toegang tot meerdere schermen, zoals verdamping, model en custom graph. Het tabblad "Custom Graph" kan gebruikt worden om data te tonen, die niet in de standaard schermen worden weergegeven. Dit tabblad kan ook bij de tuinder worden getoond, door op zijn database in te loggen, deze functionaliteit is ook gebruikt bij de contacten met de telers. In Figuur 3.5. is een voorbeeld gegeven van een sla teler, waarbij verdamping volgens transpiratiemonitor II (zie sectie 4.3) wordt vergeleken met een rekenmodel (zie sectie 4.4) en de globale straling van de zon.



Figuur 3.5. Het tabblad "Custom Graph" van de database.

Twee telers in het onderzoek hadden een Hortimax klimaatcomputer. Bij de één is voor de communicatie gebruik gemaakt van LetsGrow en kon de tuinder de resultaten van de monitors zien via LetsGrow. Bij de ander verliep de communicatie tussen klimaatcomputer en de WUR desktop bij de tuinder via het softwarepakket Klimlink en de verbinding naar de WUR via een beveiligde (VPN)-verbinding.

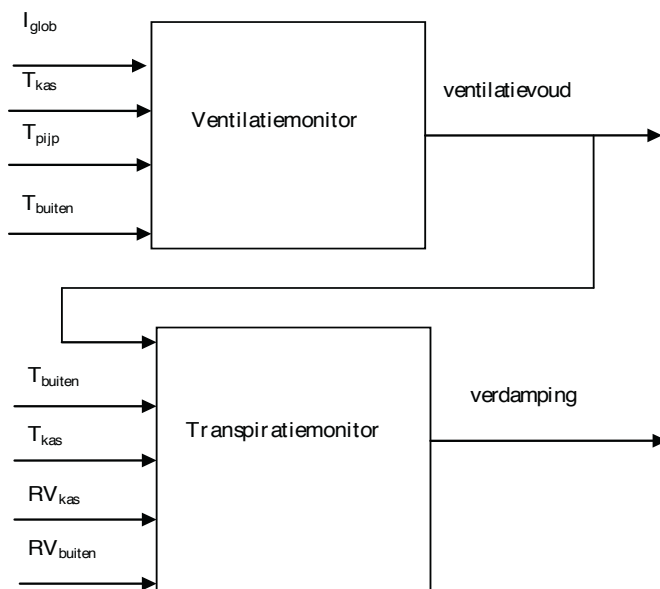
## 4 Transpiratie

### 4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden twee verschillende transpiratiemonitors, een meetgoot om transpiratie te bepalen en een model voor de verdamping behandeld. De reden om in dit project naast een meetgoot ook gebruikt te maken van een model is dat de meetgoot slechts bij één van de tuinders aanwezig was en het financieel niet mogelijk was om dit ook bij de andere tuinders te installeren. Het model wordt alleen gebruikt om de monitoren te testen. Het model is niet gefit op uitkomst van de monitoren of omgekeerd. Tevens wordt de verdamping uit de bodem behandeld. Vervolgens worden de resultaten voor verschillende gewassen weergegeven.

### 4.2 Transpiratiemonitor I

Schematisch kan de transpiratiemonitor, zoals ontwikkeld in het project “On-line monitoring van transpiratie en fotosyntheseactiviteit”, [Bontsema, e.a., 2007], weergegeven worden zoals in Figuur 4.1.



Figuur 4.1. De transpiratiemonitor.

De transpiratiemonitor gebruikt de volgende klimaatgegevens: temperatuur binnen ( $T_{kas}$ ) en buiten ( $T_{buiten}$ ) de kas en de relatieve luchtvochtigheid binnen ( $RV_{binnen}$ ) en buiten ( $RV_{buiten}$ ) de kas. De eerste drie zijn standaard beschikbaar via de kasklimaatcomputer. Voor de vierde is een extra RV-sensor buiten nodig, maar dit komt in de praktijk steeds vaker voor. Verder gebruikt de transpiratiemonitor het ventilatievoud, zoals berekend door de ventilatiemonitor, die op zijn beurt weer gebaseerd is op een aantal klimaat-gegevens, die standaard beschikbaar zijn, zoals globale straling ( $I_{glob}$ ), temperatuur binnen ( $T_{kas}$ ) en buiten ( $T_{buiten}$ ) de kas en de pijptemperatuur ( $T_{pijp}$ ). Twee van de drie slatelers gebruiken hete lucht verwarming, in dat geval is het aan/uit signaal van de branders en de capaciteit van de branders nodig in plaats van de pijptemperatuur. De transpiratiemonitor is gebaseerd op een vochtbalans, zoals beschreven [Bontsema, e.a., 2007]. Om uit deze balans de verdamping te bepalen is weer gebruikt gemaakt van een techniek uit de systeem- en regeltechniek. De methode, het ontwerp van een zogenaamde unknown input observer, is hetzelfde als bij het ontwerp van de ventilatiemonitor, zie [Van Henten, e.a., 2006].

## 4.3 Transpiratiemonitor II

Het is gebleken, dat de ventilatievoudmonitor en daardoor ook de transpiratiemonitor uit sectie 4.2. problemen heeft als de binnen- en buitentemperatuur in de kas het zelfde zijn. Deze situatie treedt veelvuldig in de praktijk op, vooral aan het eind van de middag. In die situatie is de ventilatievoud onbepaald en door de constructie is dan ook de transpiratie niet te bepalen.

Hiervoor is vervolgens een nieuwe methode bedacht, die uitgaat van een combinatie energie- en vochtbalans van de kas, voor uitgebreide beschrijving zie [Rispen, 2009].

De dynamische energiebalans voor een kas is:

$$c_{cap} \frac{dT_{kas}}{dt} = c_{pijp} (T_{pijp} - T_{kas}) + c_{straling} I_{glob} - LE - c_{dek} (T_{kas} - T_{buiten}) - \varphi_{vent} (T_{kas} - T_{buiten})$$

De dynamische vochtbalans voor de kas:

$$h \frac{X_{kas}}{dt} = E - C - \varphi_{vent} (X_{kas} - X_{buiten})$$

Met  $c_{cap}$  de capaciteit van lucht, bodem, gewas en kasconstructie,  $c_{pijp}$  de warmteoverdrachtcoëfficiënt van de verwarmingspijpen,  $c_{straling}$  is de doorlatendheid van het dek,  $L$  is de latente warmte van de verdamping,  $E$  is de verdamping,  $C$  is de condensatie aan het dek,  $c_{dek}$  is de transmissiecoëfficiënt van het dek,  $\varphi_{vent}$  de ventilatieflux en  $h$  de hoogte van de kas. Vervolgens wordt aangenomen dat er geen energieopslag en vochttopslag plaatsvindt in de kas, m.a.w.  $\frac{dT_{kas}}{dt} = 0$  en  $\frac{X_{kas}}{dt} = 0$ .

De dynamische energie- en vochtbalans worden dan statische balansen:

$$c_{pijp} (T_{pijp} - T_{kas}) + c_{straling} I_{glob} - LE - c_{dek} (T_{kas} - T_{buiten}) - \varphi_{vent} (T_{kas} - T_{buiten}) = 0$$

en

$$E - C - \varphi_{vent} (X_{kas} - X_{buiten}) = 0$$

Dit zijn nu twee vergelijkingen met de twee onbekenden  $E$  en  $\varphi_{vent}$ , dit stelsel is eenvoudig op te lossen. Er zijn geen oplossingen als er geen verschil is tussen zowel de binnen- en buitentemperatuur en tussen de binnen en buiten  $RV$ . Deze nieuwe methode is bij een aantal tuinders geïmplementeerd en wordt hier Transpiratiemonitor II genoemd.

Men kan ook een term  $LC$  toevoegen aan de energiebalans, bij condensatie komt warmte vrij, en  $E - C$  als onbekende grootte te nemen in plaats van  $E$  [Galardo Salazar, 2010], dit levert een nog nauwkeurige bepaling van het ventilatievoud op.

## 4.4 Transpiratiemodel

Voor verdamping zijn ook rekenmodellen in gebruik. Een bekend model is van Stanghellini [Stanghellini 1987, Bontsema e.a., 2007]:

$$E = \frac{2LAI}{(1 + \varepsilon)r_b + r_s} \left[ \chi_a^* - \chi_a + \frac{\varepsilon r_b R_n}{2LAI L} \right], \text{ gm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

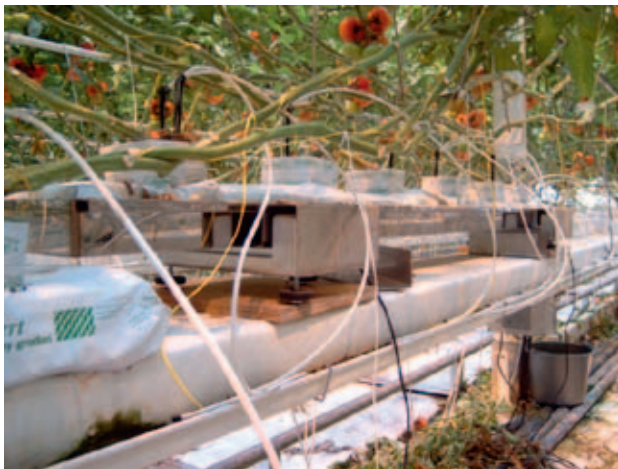
met:

$LAI$	[-]	Leaf area index van het gewas
$\varepsilon$	[-]	Ratio van de latente en sensible warmte inhoud van verzadigde lucht voor een verandering van 1 °C in temperatuur. $\varepsilon = 0.7584e^{0.05187T_a}$
$\chi_a$	[g m <sup>-3</sup> ]	Waterdamp concentratie van lucht. $\chi_a^*$ is de verzadigde damp concentratie en is een functie van de luchttemperatuur $T_a$ , die voor temperaturen $T_a = 15$ tot 30 °C, benaderd kan worden door: $\chi_a^* = 5.5638e^{0.0572T_a}$ gm <sup>-3</sup> Het verschil $\chi_a^* - \chi_a$ is het vocht deficit concentratie van lucht air. Het verband tussen relatieve luchtvochtigheid $RV$ en $\chi_a^*$ is: $\chi_a^* - \chi_a = \frac{100-RV}{100} \chi_a^*$
$L$	[J g <sup>-1</sup> ]	Latente warmte van verdamping van, $L=2450$ voor $T_a = 20$ °C
$r_b$	[s m <sup>-1</sup> ]	Weerstand voor warmte transport van blad grenslaag
$r_s$	[s m <sup>-1</sup> ]	Stomatale weerstand (voor tomaat)
		$r_s = 82 \frac{\frac{R_n}{2LAI} + 4.30}{\frac{R_n}{2LAI} + 0.54} (1 + 0.023(T_a - 24.5))^2$
$R_n$	[W m <sup>2</sup> ]	Netto door het gewas onderschepte straling, $R_n = 0.86(1 - e^{-0.7LAI})I_{sun}$

Hierbij moet opgemerkt worden dat de waarde van  $r_b$  per gewas verschilt en de functie voor  $r_s$  ook per gewas verschilt.

## 4.5 Meetgoot

Voor de bepaling van de verdamping van een gewas kan ook een meetgoot worden gebruikt. In onderstaand figuur wordt de meetgoot getoond, zoals in dit project gebruikt bij het Improvement Centre.



Figuur 4.2. De meetgoot voor de bepaling van de verdamping bij het Improvement Centre.

De meetgoot is een Priva Groscale®. De berekening van de verdamping voor tomaat kan dan als volgt worden bepaald (Bontsema e.a., 2007).

De gegevens, die via de klimaatcomputer beschikbaar zijn: gewicht van de substraatmatten in de weeggoot ( $M$ ), drain van het overtollige water in de goot ( $D$ ) en supply van water via de druppelaars ( $S$ ). De drain en de supply worden cumulatief door de klimaatcomputer geleverd. Iedere nacht rond twee uur, worden deze twee signalen gereset. De massabalans voor de weeggoot is dan:

Verandering van het matgewicht = supply – verdamping – drain

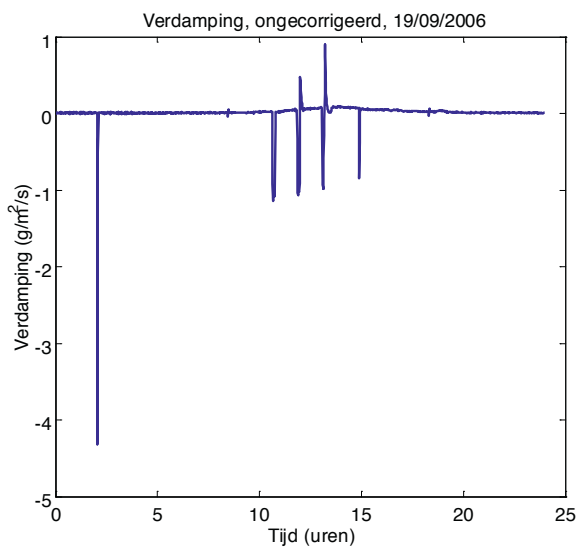
Of in formulevorm, met  $M$  het matgewicht,  $S$  de supply,  $E$  verdamping en  $D$  de drain:

$$\frac{dM}{dt}(t) = S(t) - E(t) - D(t)$$

Omgeschreven geeft dit een formule voor de verdamping:

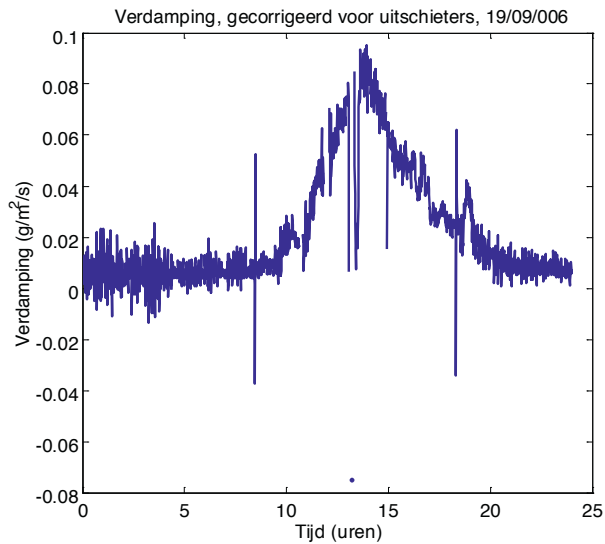
$$E(t) = S(t) - D(t) - \frac{dM}{dt}(t)$$

Op 19/09/2006 (data GreenQ, Monster) geeft dit het onderstaande resultaat:



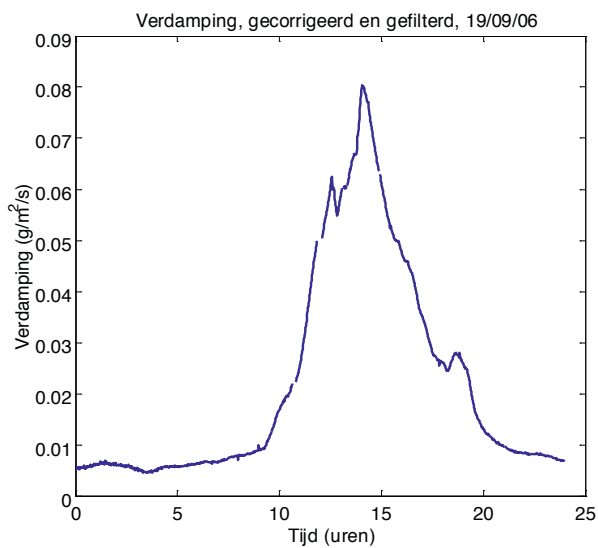
Figuur 4.3. De verdamping.

De grote afwijking om twee 's nachts wordt veroorzaakt door de reset van de signalen voor drain en supply. De pieken omlaag worden veroorzaakt door de watergeefbeurten en de pieken omhoog door de drain. Het signaal uit Figuur 4.3. wordt vervolgens ontdaan van deze pieken, het resultaat is weergegeven in onderstaand figuur.



Figuur 4.4. Meetsignaal gecorrigeerd voor uitschieters.

Duidelijk is te zien dat er nogal wat meetruis op het berekende signaal zit. Dit wordt vermoedelijk veroorzaakt door de weegschalen. In een kas is er altijd wel enige beweging. Het signaal uit Figuur 4.4. wordt vervolgens gefilterd door middel van een voortschrijdend gemiddelde over een uur. Het uiteindelijke resultaat is te zien in Figuur 4.5.



Figuur 4.5. Meetsignaal, gecorrigeerd voor uitschieters en gefilterd.

Men krijgt zo een mooi glad signaal voor de verdamping.

## 4.6 Verdamping van de bodem

### 4.6.1 Inleiding

Met behulp van de soil respiration hood en de LCPro+ van ADC BioScientific Ltd, uit Herts, Engeland kan de verdamping en de CO<sub>2</sub>-productie (respiratie) uit de bodem worden gemeten. Om deze metingen te kunnen uitvoeren wordt de bladkamer van de LCPro+ verwijderd en de soil respiration hood op de meetarm bevestigd.

De soil respiration hood bestaat uit een PVC kamer met een ventilator en een ventilatie-opening. De ventilatieopening houdt de luchtdruk in de kamer constant. De PVC kamer dient op een stalen ring te worden geplaatst die in de bodem kan worden gedrukt. Het oppervlak van deze stalen ring is 97.5 cm<sup>2</sup>.

Van de inkomende en uitgaande lucht in de kamer wordt de luchtvochtigheid en de CO<sub>2</sub> concentratie gemeten. De temperatuur in de kamer wordt gemeten. Met de PAR-sensor van de LCPro+ die op de PVC kamer kan worden geplaatst, is de hoeveelheid PAR licht te meten. Met een aparte thermometer kan de temperatuur van de te onderzoeken bodem worden gemeten. De gemeten parameters kunnen regelmatig gedurende de meting worden opgeslagen.

### 4.6.2 Metingen van verdamping en respiratie van de bodem in de kas

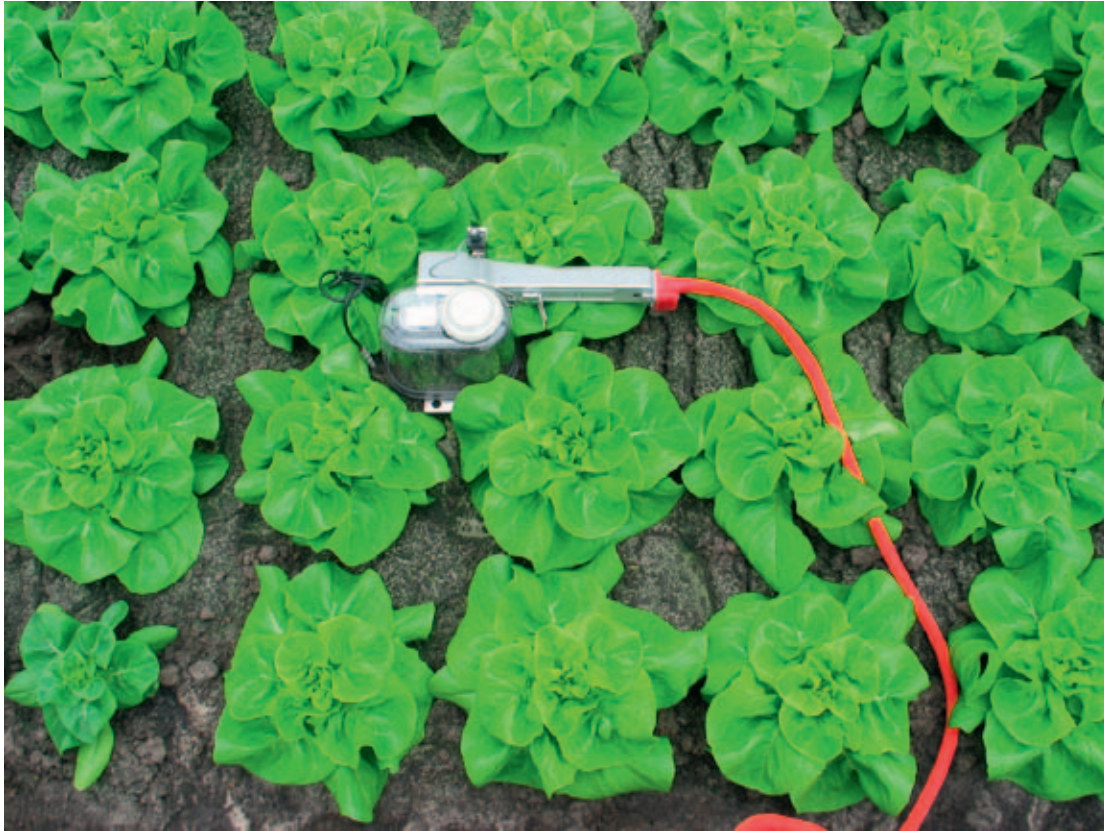
De metingen van de verdamping en de respiratie van de bodem in de kas zijn op 16 januari en 12 maart 2008 (Figuur 4.6.) uitgevoerd bij H. Thijssen, Richardsweg 18, 5916 RH te Venlo en op 2 april 2008 bij J. Hermans, de Hoef 2, 5809 EM te Leunen (Figuur 4.7.). De kassen met verschillende slarassen worden verwarmd met hete luchtkachels.

Bij H. Thijssen is op eerste meetdag gemeten in het ras Lollo Bianca en de tweede dag in botersla, bij J. Hermans is ook gemeten in botersla.



*Figuur 4.6. Meting van de bodemverdamping en de respiratie met de LCPro+ en soil respirationhood in botersla bij H.Thijssen te Venlo op 12 maart 2008.*



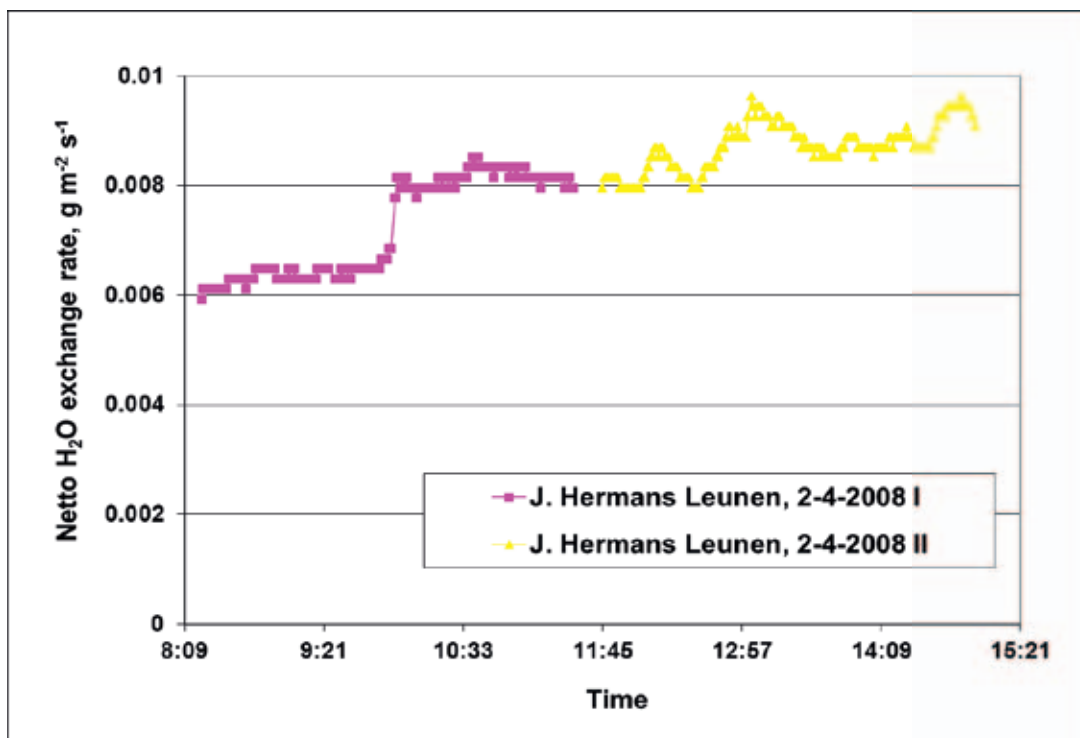


*Figuur 4.7. Meting van de bodemverdamping en de respiratie met de LCPro+ en soil respirationhood in botersla bij J. Hermans te Leunen op 2 april 2008.*

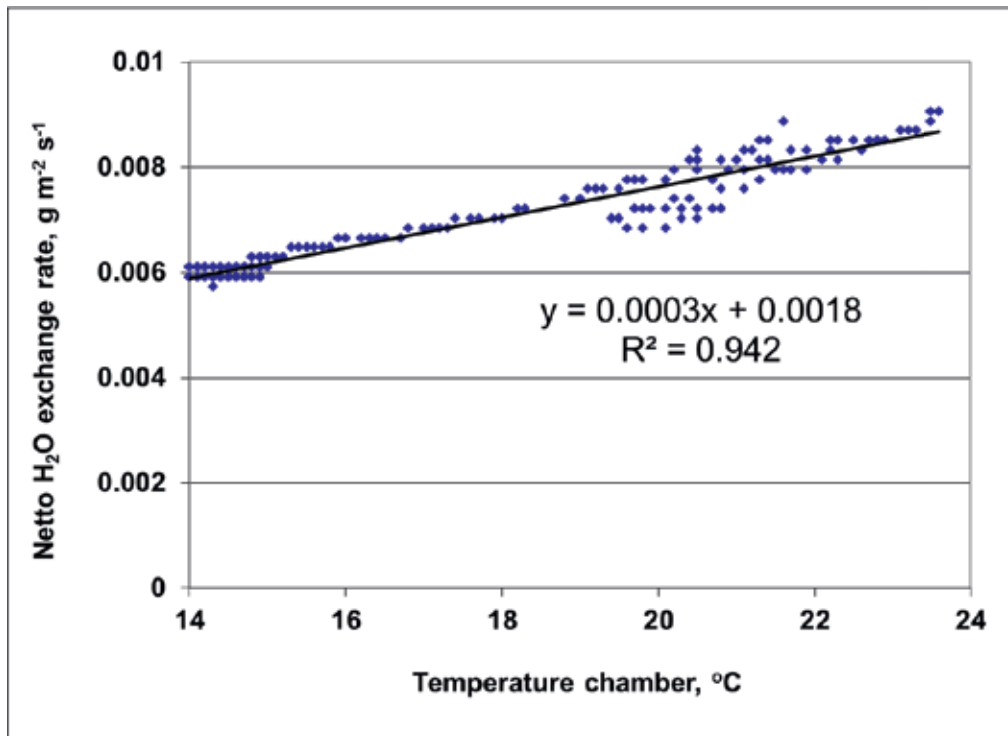
Gedurende de eerste meetdag bij Thijssen is in het zelfde groeistadium van Lollo Bianca op vier verschillende plaatsen gedurende de dag gemeten. Op de tweede meetdag is bij deze teler gedurende de gehele dag op dezelfde plek gemeten. Bij J. Hermans is de verdamping van de bodem in twee verschillende kassen bepaald. Het vochtgehalte van de bodemmonsters is later in het laboratorium te Wageningen bepaald. Het vochtgehalte, de verdamping en respiratie van de bodem staan vermeld in Tabel 4.1.

Datum	Teler	Bodembedekking, % geschat	Vochtgehalte bodem, %	Verdamping, l m <sup>2</sup> dag <sup>-1</sup>	CO <sub>2</sub> produktie, kg m <sup>2</sup> dag <sup>-1</sup>
16-01-08	H. Thijssen, Venlo, monster 1	60	16.7	0.477	0.01855
16-01-08	H. Thijssen, Venlo, monster 2	60	16.8	0.491	0.00803
16-01-08	H. Thijssen, Venlo, monster 3	60	16.6	0.457	0.00506
16-01-08	H. Thijssen, Venlo, monster 4	60	17.1	0.495	0.00595
12-03-08	H. Thijssen, Venlo, monster 1	30	17.9	0.544	0.00236
02-04-08	J. Hermans, Leunen, monster 1	5	27.0	0.610	0.00278
02-04-08	J. Hermans, Leunen, monster 2	80	14.9	0.732	0.00299

In onderstaande figuren is respectievelijk het verloop van de bodemverdamping in de kas gedurende de dag bij J. Hermans op 2 april 2008 (Figuur 4.8.) en de bodemverdamping afhankelijk van de temperatuur in de kas bij H. Thijssen op 13 maart 2008 (Figuur 4.9.) weergegeven.



Figuur 4.8. Verloop van de bodemverdamping gedurende de dag bij J. Hermans te Leunen op 2 april 2008.



Figuur 4.9. De relatie tussen de temperatuur in de kas en de bodemverdamping bij H. Thijssen te Venlo op 12 maart 2008.

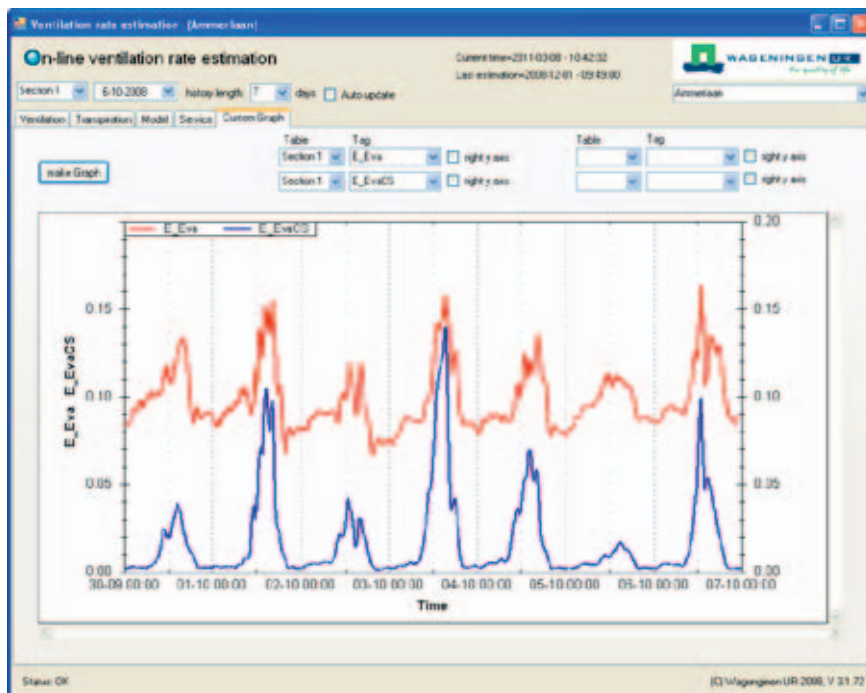
### 4.6.3 Discussie

De bodemverdamping varieert op de dag tussen ongeveer 0.006 en 0.009 g m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>.

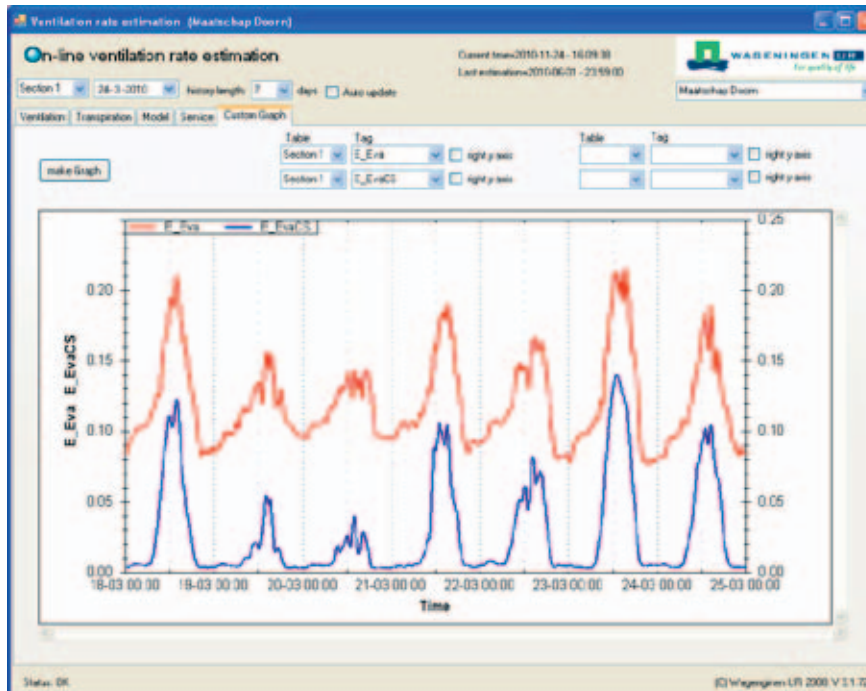
## 4.7 Resultaten

### 4.7.1 Transpiratiemonitor I

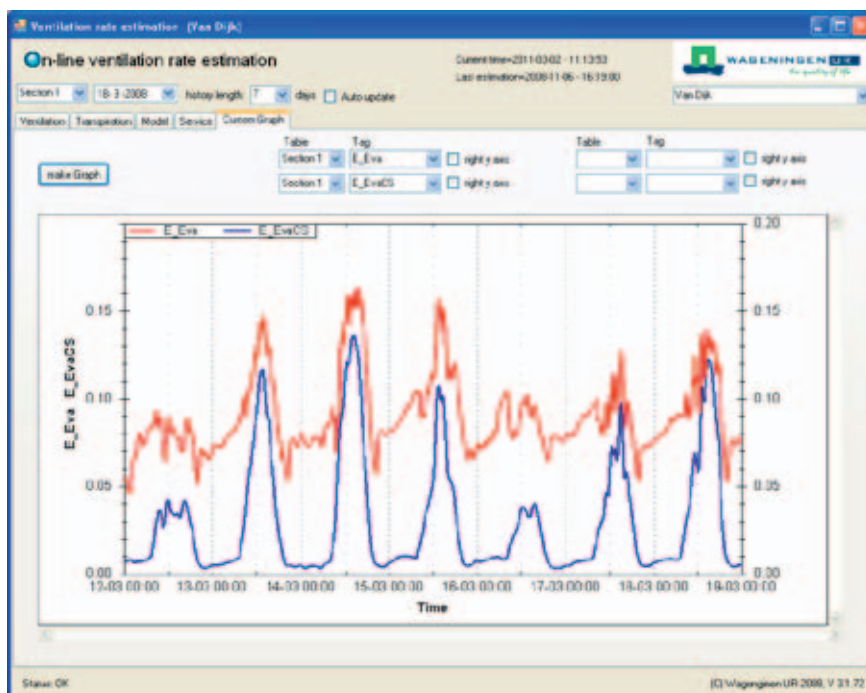
Voor een aantal tuinders worden hier de resultaten van de transpiratiemonitor I weergegeven en vergeleken met de uitkomst van het model, die beschreven is in sectie 4.4. In eerste instantie werd door bestudering van de resultaten bij de tuinders, via de monitor scherm (zie Figuur 3.4.) de conclusie getrokken dat de transpiratiemonitor niet werkte. De verdamping is 's nachts veel te hoog. Daarom is in eerste instantie verder gewerkt aan de ontwikkeling van Transpiratiemonitor II (sectie 4.3). Bij nadere bestudering blijkt dat de Transpiratiemonitor I bij alle tuinders een zelfde soort probleem heeft. Zie onderstaande figuren, voor de gewassen tomaat, komkommer, paprika en sla.



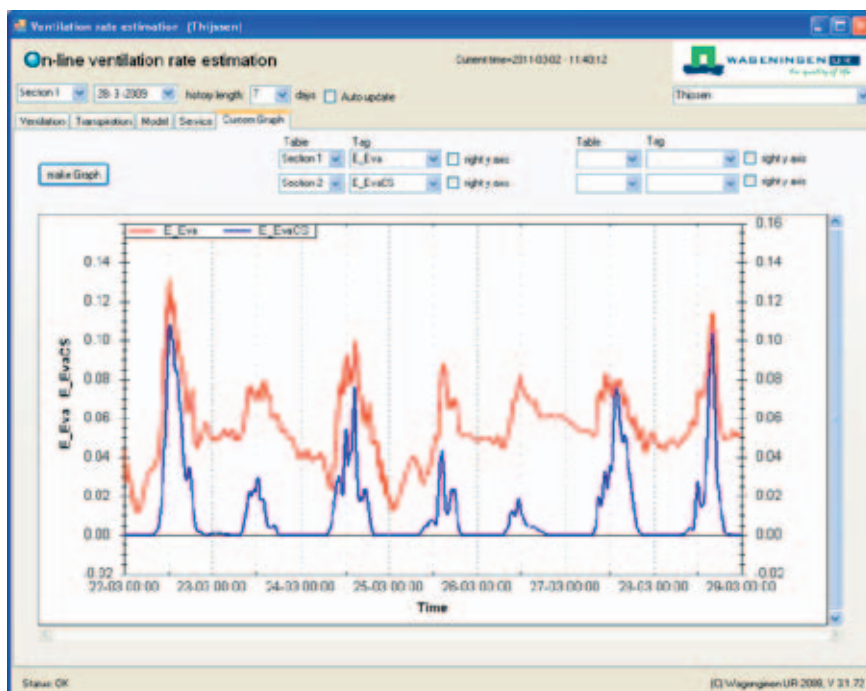
Figuur 4.10. De verdamping volgens transpiratiemonitor I (rood) en volgens het model (blauw), bij het gewas tomaat, van 30 september tot 7 oktober 2008.



Figuur 4.11. De verdamping volgens transpiratiemonitor I (rood) en volgens het model (blauw), bij het gewas komkommer, van 18 maart tot 25 maart 2010.

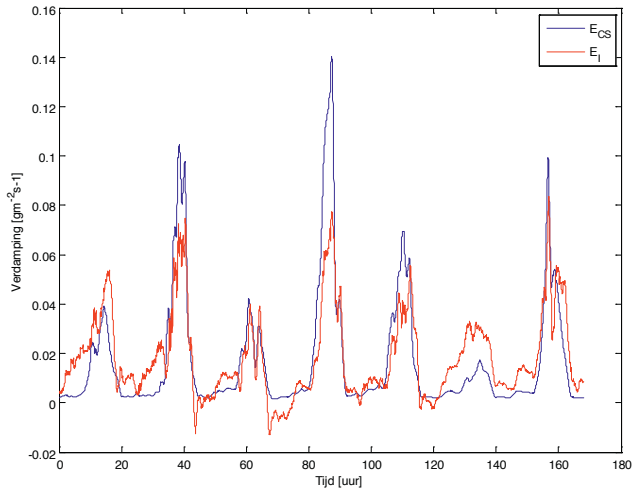


Figuur 4.12. De verdamping volgens transpiratiemonitor I (rood) en volgens het model (blauw), bij het gewas paprika, van 12 maart tot 19 maart 2008.

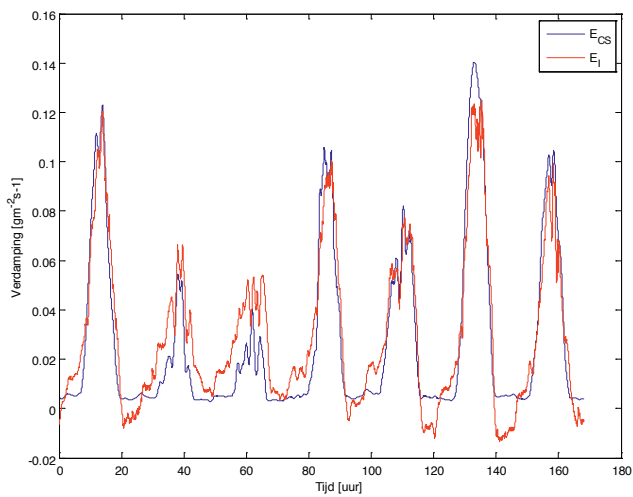


Figuur 4.13. De verdamping volgens transpiratiemonitor I (rood) en volgens het model (blauw), bij het gewas sla, van 22 maart tot 29 maart 2009.

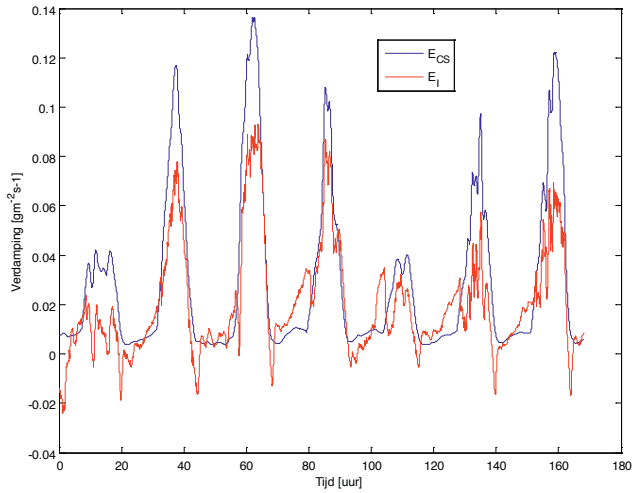
De monitor heeft voor alle gewassen een zelfde soort afwijking, namelijk een offset, die per gewas verschillend is. De offset voor tomaat is 0.08, voor komkommer 0.09, voor paprika 0.07 en voor sla 0.03. Het is niet duidelijk geworden waar de oorzaak van deze offset ligt, inherent aan de gebruikte methode of een fout in de software. Als bovenstaande uitkomsten van de transpiratiemonitor worden gecorrigeerd worden voor de offset, dan krijgt men de resultaten als weergegeven in onderstaande figuren.



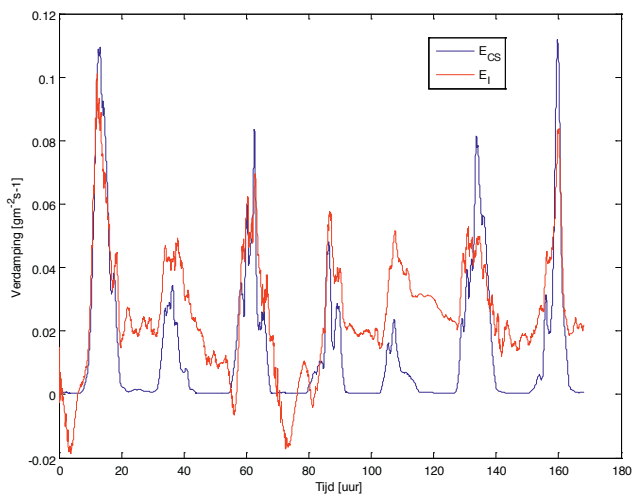
Figuur 4.14. De verdamping volgens transpiratiemonitor I, gecorrigeerd voor een offset van 0.08 (rood) en volgens het model (blauw), bij het gewas tomaat, van 30 september tot 7 oktober 2008.



Figuur 4.15. De verdamping volgens transpiratiemonitor I, gecorrigeerd voor een offset van 0.09 (rood) en volgens het model (blauw), bij het gewas komkommer, van 18 maart tot 25 maart 2010.



Figuur 4.16. De verdamping volgens transpiratiemonitor I, gecorrigeerd voor een offset van 0.07 (rood) en volgens het model (blauw), bij het gewas paprika, van 12 maart tot 19 maart 2008.

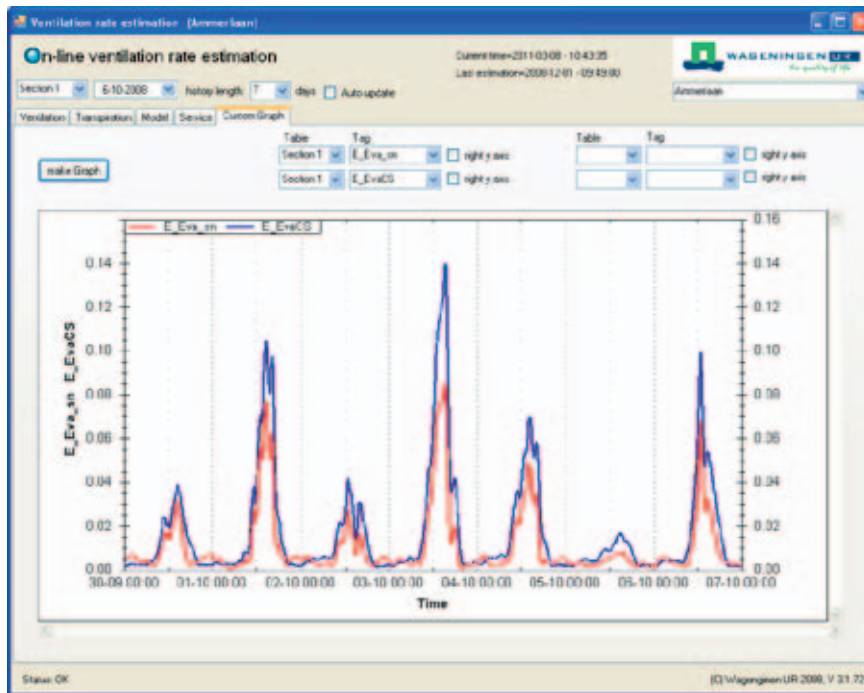


Figuur 4.17. De verdamping volgens transpiratiemonitor I, gecorrigeerd voor een offset van 0.03 (rood) en volgens het model (blauw), bij het gewas sla, van 22 maart tot 29 maart 2009.

Gecorrigeerd voor de offset geeft Transpiratiemonitor goede resultaten, zelfs bij sla. Bij sla blijft op sommige dagen een offset bestaan.

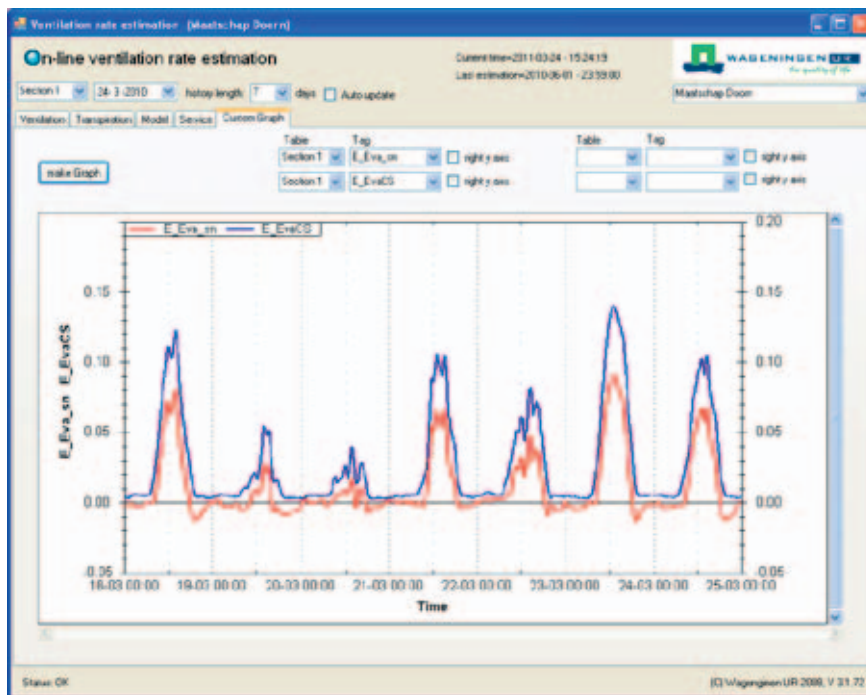
## 4.7.2 Transpiratiemonitor II

In deze sectie worden enkele resultaten van de transpiratiemonitor II, uit sectie 4.3 getoond. De figuren zijn afkomstig van de bij de tuinders geïmplementeerde systemen. Paprika ontbreekt hier, omdat de transpiratiemonitor II hier niet geïmplementeerd is.

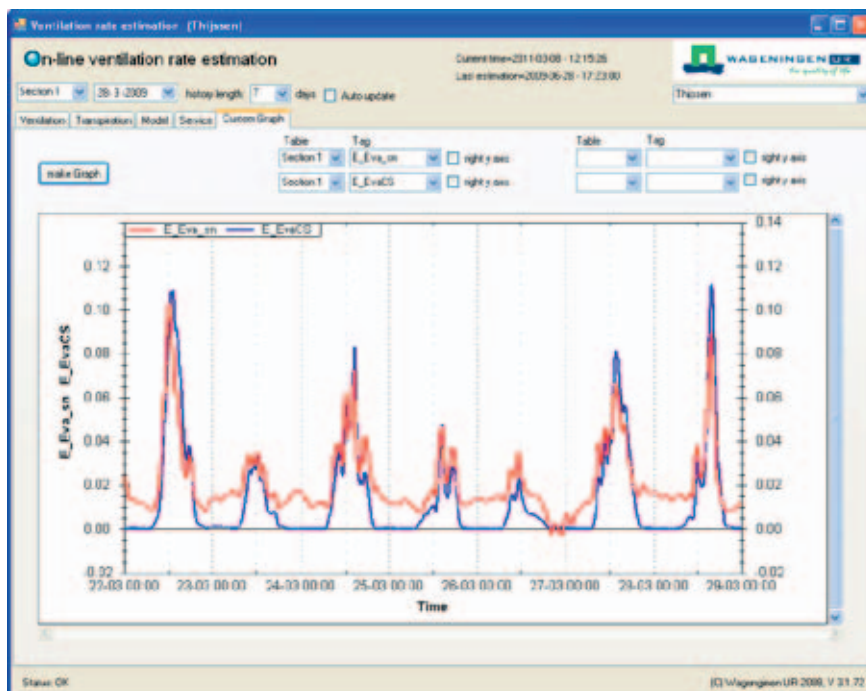


Figuur 4.18. De verdamping volgens transpiratiemonitor II (rood) en volgens het model (blauw), bij het gewas tomaat, van 30 september tot 7 oktober 2008.





Figuur 4.19. De verdamping volgens transpiratiemonitor II (rood) en volgens het model (blauw), bij het gewas komkommer, van 18 maart tot 25 maart 2010.

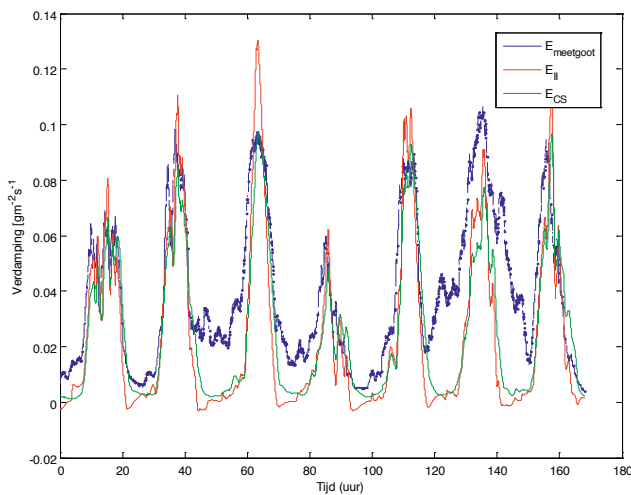


Figuur 4.20. De verdamping volgens transpiratiemonitor II (rood) en volgens het model (blauw), bij het gewas sla, van 22 maart tot 29 maart 2009.

Bij sla treedt ook bij deze transpiratiemonitor een offset op, misschien door verdamping van de bodem. De verdamping van de bodem kan echter de hele offset niet verklaren, hoogstens voor de helft.

### 4.7.3 Meetgoot

De ruwe data van de meetgoot zijn met behulp van de methode uit sectie 4.5 omgezet in de verdamping van het gewas (tomaat) en vergeleken met de verdamping bepaald door Transpiratiemonitor II.

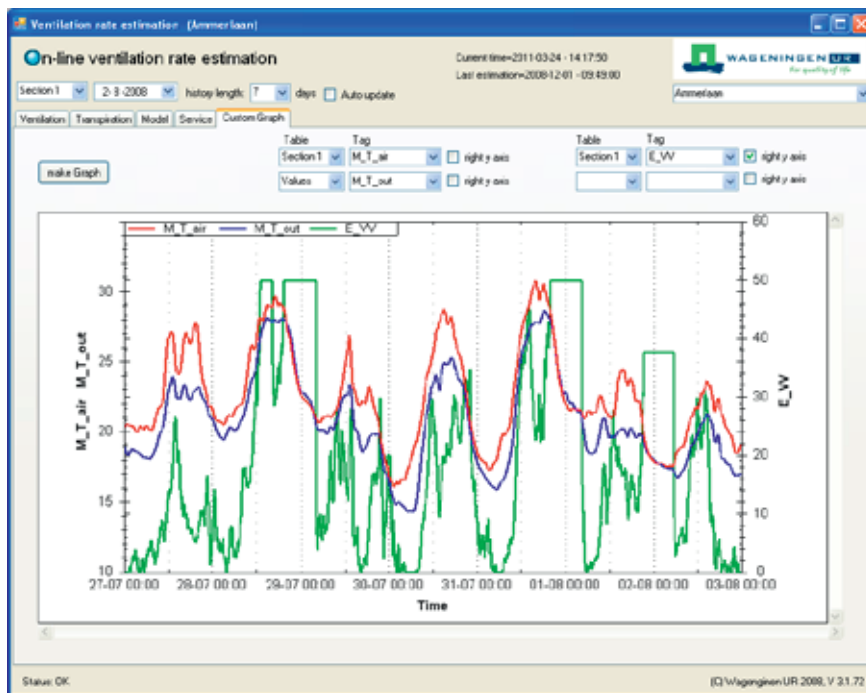


Figuur 4.21. De verdamping volgens transpiratiemonitor II, (rood), volgens de meetgoot (blauw) en volgens het model (groen), bij het gewas tomaat, van 8 augustus tot 15 augustus 2008.

De meetgoot geeft 's nachts een te hoge waarde, die niet verklaard kon worden. Overdag komen de resultaten van Transpiratiemonitor II, model en de meetgoot goed overeen.

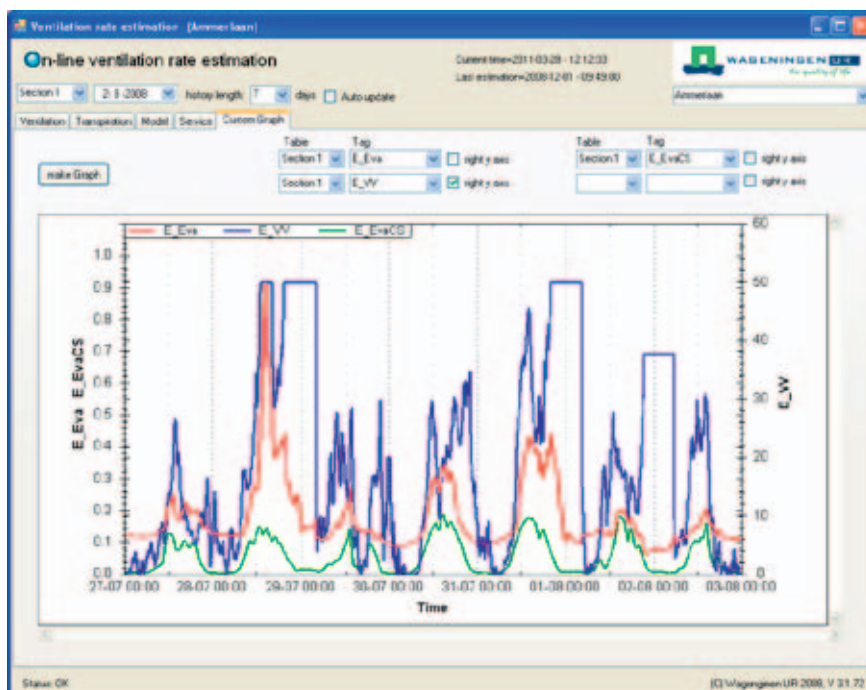
## 4.8 Discussie

De Transpiratiemonitor I is gebaseerd op de eerder ontwikkelde ventilatiemonitor en de daarin gebruikte unknown input observer. Na correctie van een niet verklaarde offset geeft de transpiratiemonitor een goede meting van de verdamping, vergeleken met het rekenmodel van de verdamping. Verwacht wordt dat Transpiratiemonitor I geen goede resultaten geeft, als de ventilatievoud bepaald door de ventilatiemonitor onbepaald is, dit gebeurt als de binnen- en buitentemperatuur gelijk zijn. Dit komt regelmatig voor aan het eind van de middag en dan de rest van de avond, zie Figuur 4.22. Op 28/7, 31/7 en 1/8 is duidelijk te zien dat in de loop van de middag en vervolgens de rest van de avond en begin van de nacht de beide temperaturen gelijk zijn en de ventilatievoudberekening afgekapt is.



Figuur 4.22. De binnentemperatuur (rood), buitentemperatuur (blauw) en de ventilatievoud (groen) volgens de ventilatiemonitor, bij het gewas tomaat, van 27 juli tot 3 augustus 2008.

In Figuur 4.23 is de verdamping volgens Transpiratiemonitor I en het rekenmodel (sectie 4.4), samen met het ventilatievoud weergegeven.



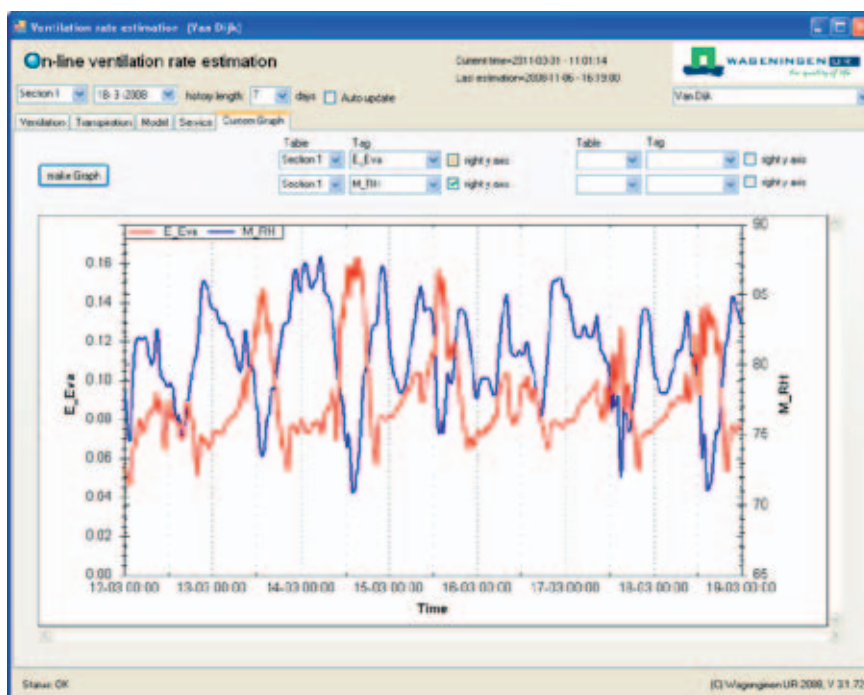
Figuur 4.23. De verdamping volgens Transpiratiemonitor I (rood), ventilatievoud (blauw) en verdamping volgens rekenmodel (groen), bij het gewas tomaat, van 27 juli tot 3 augustus 2008.

Het blijkt, dat de berekening van de verdamping door de monitor, niet sterk wordt beïnvloed door het onnauwkeurige ventilatievoud op de genoemde momenten. De verdamping bepaald door Transpiratiemonitor I, is niet gecorrigeerd voor de offset (sectie 4.7 en 4.8).

De Transpiratiemonitor II is gebaseerd op twee gekoppelde balansen, de energie- en de vochtbalans van de kas. Deze monitor heeft minder de nadelen van de Transpiratiemonitor I bij gelijke binnen- en buitentemperaturen. Alleen als ook de binnen en buiten RV hetzelfde zijn dan kan er geen berekening van de verdamping plaatsvinden, omdat de twee vergelijkingen dan geen oplossingen hebben. De Transpiratiemonitor II geeft bij tomaat bij lagere instraling een lagere verdamping dan berekend door Transpiratiemonitor I. Bij komkommer is dit effect nog veel sterker. Voor sla is er niet zoveel verschil tussen beide transpiratiemonitoren.

Transpiratiemonitor II is eenvoudig te implementeren. De monitor gebruikt standaard klimaatgegevens, aanwezig bij de tuinder en behoeft één extra sensor namelijk, een buiten RV meting. De extra software is slechts enkele regels code om twee vergelijkingen met twee onbekenden op te lossen, dit zou ook bijvoorbeeld in Excel kunnen.

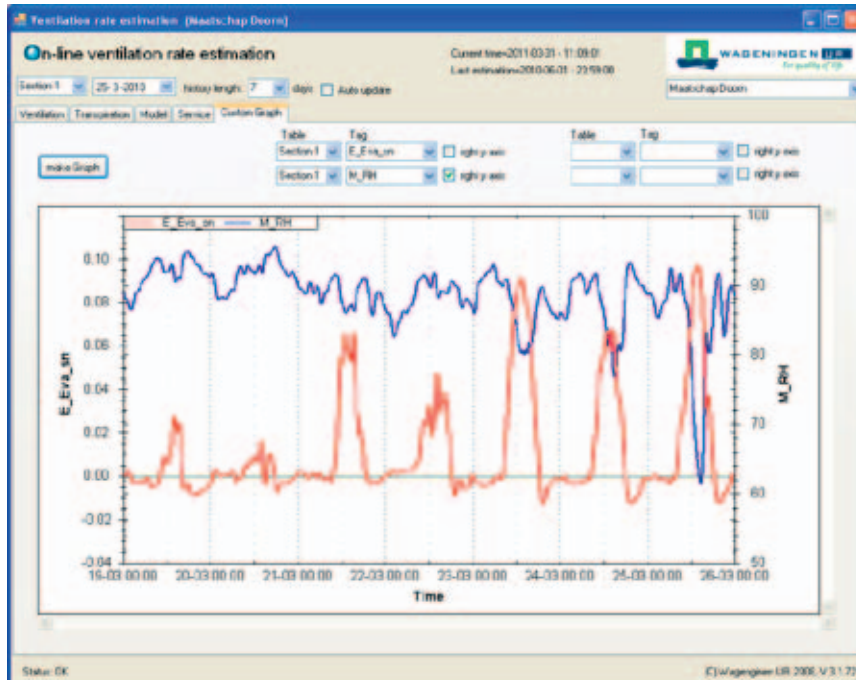
Transpiratiemonitor I laat regelmatig zien dat de berekende verdamping aan het eind van de dag sterk “doorschiet”, zie bijvoorbeeld Figuur 4.15 en 4.16. In onderstaande figuur is de niet gecorrigeerde uitkomst van Transpiratiemonitor I bij paprika vergeleken met de binnen RV.



Figuur 4.24. De verdamping volgens transpiratiemonitor I (rood) en een de relatieve luchtvochtigheid (blauw), bij het gewas paprika, van 12 maart tot 19 maart 2008.

De uitschieters naar beneden, die op het eind van de dag optreden, lijken te correleren met een sterke stijging van de RV (blauw in Figuur 4.24).

Transpiratiemonitor II lijkt hier minder last van te hebben, vergelijk Figuur 4.14 en 4.18. Bij komkommer is er nog steeds sprake van uitschieters aan het eind van de dag. Ook dit lijkt weer te correleren met een sterke stijging van de RV, zie Figuur 4.25.



Figuur 4.25. De verdamping volgens transpiratiemonitor II (rood) en een de relatieve luchtvochtigheid (blauw), bij het gewas komkommer, van 19 maart tot 25 maart 2010.

Verdamping kan ook bepaald worden met behulp van een rekenmodel. De uitkomsten van het model komen in het algemeen goed overeen met de uitkomsten van beide monitors. Dat het model soms hogere waarden voor de verdamping geeft kan o.a. verklaard worden uit het feit dat de LAI niet werd gemeten en altijd een vaste waarde heeft. Het model is ooit gemaakt voor tomaat en behoeft eigenlijk aanpassing als het voor andere gewassen wordt gebruikt, o.a. functie voor de stomataire weerstand kan voor ieder gewas anders zijn, evenals de grenslaagweerstand.

Bij teelt in de volle grond, zoals bij twee van de drie sla telers, moet ook rekening worden gehouden, met verdamping van de bodem. Deze verdamping is ongeveer 10% van de verdamping van het gewas.

Vergelijking van de verdamping bepaald met de meetgoot en Transpiratiemonitor II laat zien dat er overdag niet veel verschil is. 's Nachts geeft de meetgoot een niet verklaarde te hoge waarde.



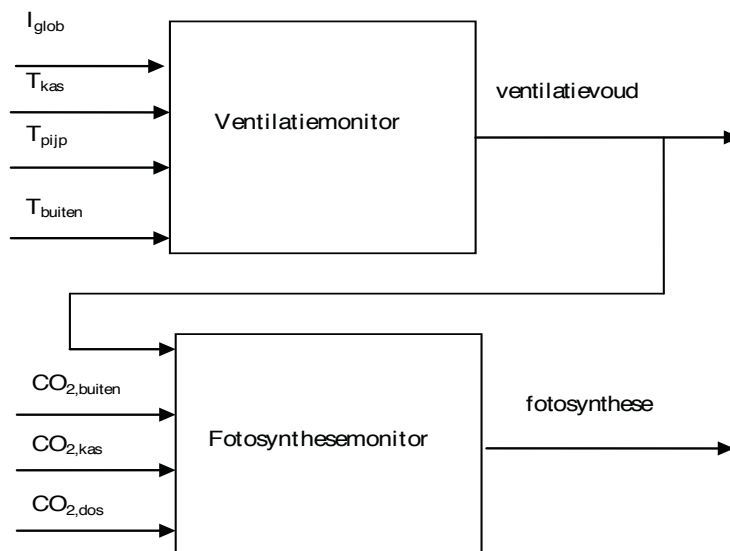
# 5 Fotosynthese

## 5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de fotosynthesemonitor, off-line fotosynthesemetingen en een rekenmodel voor fotosynthese behandeld. De reden om in dit project naast fotosynthesemetingen ook gebruikt te maken van een model is dat de metingen van wege kosten slechts beperkt mogelijk waren. Het model was bedoeld om de monitoren te testen. Het model is bedoeld om te fitten op de uitkomst van de monitor of omgekeerd. Vervolgend worden de resultaten besproken.

## 5.2 Fotosynthesemonitor

Op dezelfde manier als de transpiratiemonitor is ook de fotosynthesemonitor ontworpen. De schematische weergave staat in Figuur 5.1.



Figuur 5.1. Fotosynthesemonitor.

Voor de fotosynthesemonitor zijn de  $\text{CO}_2$ -concentratie in de kas, de  $\text{CO}_2$ -dosering, het ventilatievoud en de  $\text{CO}_2$ -concentratie buiten nodig. De eerste twee worden standaard door de klimaatcomputer geleverd, de derde kan worden geleverd door de ventilatiemonitor en voor de vierde is een extra sensor nodig of een aanpassing van de  $\text{CO}_2$ -meetapparatuur binnen. Ook voor de fotosynthesemonitor is gebruikt gemaakt van de techniek voor het ontwerpen van een unknown input observer [Van Henten, e.a., 2006].

## 5.3 Fotosynthesemodel

Een eenvoudig rekenmodel voor de gewasfotosynthese is bepaald door [Nederhoff, 1994], zie ook [Bontsema e.a., 2007] en wordt beschreven door de volgende formule:

$$A_{net} = p_1 + p_2 \frac{I}{I + p_3 CO_2 + p_4} + p_5 LAI$$

Met:  $A_{net}$  netto fotosynthese [ $gm^{-2}h^{-1}$ ],  $CO_2$  is de globale straling ( $\mu molm^{-2}s^{-1}$ ),  $CO_2$  is de  $CO_2$  concentratie (vpm) in de kas en  $LAI$  ( $m^2m^{-2}$ ) is de leaf area index van het gewas.

$p_1, p_2, p_3, p_4, p_5$  zijn experimenteel bepaalde parameters met de respectievelijk de waarden -0.78, 11.9, 577, 221 en 0.18.

## 5.4 Fotosyntheseschatting met een gewasmodel

### 5.4.1 Inleiding

Het doel van dit onderzoeksdeel van het project was om voor 2 meetdagen het dagverloop van de momentane netto gewasfotosynthese te berekenen met een gewasfotosynthesemodel. Dit is gedaan voor tomaat (vruchtgroente) en voor sla (bladgroente). Voor ijking van het model werden fotosynthesemetingen m.b.v. bladcuvetten uitgevoerd in de betreffende kas.

### 5.4.2 Methode

#### 5.4.2.1 Metingen:

Op 10 en 11 juli (bewolkte dag) en 29 augustus 2007 (zonnige dag) zijn bladfotosynthesemetingen uitgevoerd in een tomatengewas 'Levanzo' (grove trostomaat) bij het Improvement Centre in Bleiswijk. Het kasdek van deze afdeling was diffuus. Op 19 juni (zonnige dag) en 21 november 2007 (bewolkte dag) is gemeten aan sla bij de Boer/den Hoedt in Ridderkerk.

Metingen zijn uitgevoerd met een draagbare fotosynthesemeter (LCpro+, ADC, Hoddesdon, Verenigd Koninkrijk) met een bladkamer van  $6.25 \text{ cm}^2$ . Een deel van het blad werd in de bladkamer gebracht, waarin lucht met een constante snelheid langs het blad stroomt. Uit het verschil van de hoeveelheid  $CO_2$  van de ingaande en uitgaande lucht wordt de netto fotosynthese berekend.

Er zijn twee typen metingen uitgevoerd: netto actuele fotosynthesemetingen en lichtresponscurven.



### 5.4.2.2 Actuele netto bladfotosynthese

Bij tomaat is op beide meetdagen tussen 9 uur en 17 uur de actuele netto fotosynthese gemeten aan 60 verschillende planten. Bij 30 van deze 60 planten zijn de metingen uitgevoerd aan redelijk volgroeide en onbeschaduwde bladeren hoog in het gewas (6<sup>e</sup> blad van boven geteld; deze bevond zich onder de tweede bloeiende tros). Bij de andere 30 planten is gemeten aan bladeren die zich in het midden van de plant bevonden (tussen de vijfde en de zesde tros geteld vanaf de eerste bloeiende tros; er zaten nog 4 trossen onder dit meetblad en nog circa 7 bladeren). De meetbladeren zijn zodanig gekozen dat ze samen een goede afspiegeling vormen van het totale gewas. Er is aan blad gemeten met verschillende standen ten opzichte van de zon en met verschillende standen ten opzichte van het pad en het plantbed. Er is niet aan necrotisch blad gemeten. Tijdens het meten bevond het meetblad zich in horizontale positie. Aan een meetblad werd iedere 10 s de netto fotosynthese gemeten gedurende in totaal 5 minuten. Tijdens de metingen werden de klimaatcondities in de bladkamer niet ingesteld. Bij iedere meting werden de actuele klimaatcondities in de bladkamer vastgelegd: de hoeveelheid fotosynthetisch actieve straling (PAR) op het blad, de temperatuur in de bladkamer, de dampspanning en de hoeveelheid CO<sub>2</sub> in de bladkamer.

Bij sla zijn geen actuele metingen uitgevoerd. Sla wordt namelijk geteeld op grote plantbedden waar geen meetopstelling tussen geplaatst kan worden. Bij actuele metingen zou iedere 5 minuten de meetopstelling verplaatst moeten worden tussen de planten en dat was niet mogelijk. Daarom zijn bij sla alleen lichtresponscurves gemeten, waarbij een plant uit het plantbed gehaald werd en naar de meetopstelling werd gebracht die aan de rand van het plantbed stond.

### 5.4.2.3 Lichtrespons curven via bladkamer

#### Tomaat

Op 10 juli en 29 augustus 2007 zijn lichtrespons curven gemeten m.b.v. een in sterkte variabele lichtbron in de bladkamer. De netto fotosynthese werd gemeten aan een blad door de lichtintensiteit van de externe lichtbron op het blad in stappen te laten afnemen. Er is gemeten bij lichtintensiteiten op het blad van 1860, 1395, 930, 465, 233, 93, en 0  $\mu\text{mol PAR m}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Dit is 93% van de lichtintensiteit van de lichtbron, omdat de lichttransmissie van het glas van de bladkamer 93% is. De meettijd van een totale curve was 45 minuten.

De helft van de lichtrespons curven zijn uitgevoerd bij 400 ppm CO<sub>2</sub> in de bladkamer en de helft bij 800 ppm CO<sub>2</sub> in de bladkamer. De temperatuur in de bladkamer benaderde de temperatuur in de kas en was 25 °C en de ingaande lucht werd iets gedroogd zodat de relatieve luchtvochtigheid van de uitgaande lucht ongeveer 80% bedroeg.

In totaal zijn er 8 curves hoog in het gewas gemeten en 8 curves met een meethoogte halverwege in het gewas. De hoogten corresponderen met de hoogten die bij de actuele metingen beschreven staan.

#### Sla

Lichtresponscurven zijn gemeten op een zonnige dag op 19 juni en op een bewolkte dag op 21 november 2007. Er is gemeten aan de cultivars Lollo rosso, Lollo bionda en eikenbladsla. Er is gemeten aan 3 stadia en aan 3 bladleeftijden.

#### 5.4.2.4 Modelling fotosynthese in 5 stappen: Tomaat

##### 1. ijking van bladfotosynthese-parameters:

###### 1a – via fotosynthese-meting bij actueel licht:

Alle actuele metingen zijn per bladlaag samengevoegd en gebruikt voor ijking van één parameterset, betrekking hebbende op die bladlaag. In deze studie betreft het twee bladlagen: midden en boven in het gewas (zie ook boven). Ijking levert waarden op voor de parameters  $\alpha$ ,  $\theta$  en  $J_{max}$ , die nodig zijn in de fotosynthese-berekening volgens de Farquhar-vergelijking (Farquhar et al., 1980). Voor de ijking werd een optimalisatiemodel gebruikt (zie o.a. Elings et al., 2004) dat werkt op basis van genetische algoritmen. Per optimalisatie worden gemiddeld 400 runs uitgevoerd.

###### 1b – via fotosynthese-meting bij oplopende lichtniveaus in de bladkamer (lichtresponscurven):

De lichtresponscurven m.b.v. de ADC-apparatuur worden standaard gebruikt voor ijking van de bladfotosynthese-parameters. Bij grote verschillen in  $CO_2$  en VPD kan er een discrepantie zijn, die dan ligt aan modelbeperking in correcte parameterwaarden voor relatie fotosynthese versus  $CO_2$  en VPD.

##### 2. Verticale verdeling bladoppervlak:

Op 11 juli zijn 4 stengels geoogst en is van elk blad de lengte gemeten en het bladoppervlak. Op 29 augustus is niet destructief gemeten, maar is de bladlengte gemeten. De relatie tussen bladlengte en bladoppervlakte ( $R^2 = 0.98$ ) gemeten op 11 juli is gebruikt om van de bladlengtes gemeten op 29 augustus de bladoppervlaktes af te leiden.

##### 3. Verticale verdeling lichtniveau:

Het lichtniveau neemt in de simulatie af van boven naar onder in het gewas volgens een exponentiële uitdoving, als functie van extinctiecoëfficiënt en bladoppervlak (zie punt 2) van elke bladlaag.

Fractie PAR in licht, reflectie en extinctie hangen af van de verhouding tussen direct en diffuus licht per tijdstip. Op de betreffende meetdagen was het licht 100% diffuus, en zijn de daarbij behorende parameters gebruikt (zie Goudriaan & Van Laar, 1994).

##### 4. $CO_2$ -vastlegging door gewas gedurende de dag:

Voor elk tijdstip op de twee meetdagen is vervolgens uit de bovengenoemde *blad* fotosynthese de *gewas* fotosynthese berekend. Hiervoor is de globale straling boven het gewas, en de concentratie van  $CO_2$ , de temperatuur en de luchtvochtigheid in de het gewas omringende kaslucht noodzakelijk. Deze klimaatdata waren als 1-minuut gemiddelden aanwezig. Voor  $CO_2$ , temperatuur en RV veronderstellen we een ruimtelijk homogene verdeling.

##### 5. De berekening van de netto-fotosynthese is bruto-fotosynthese minus respiratie.

Deze respiratie betreft alleen die van de bladmassa. Respiratie van stengel en wortel wordt niet meegenomen, en kan tot een lichte overschatting van de  $CO_2$ -vastlegging leiden.

#### 5.4.2.5 Modelling fotosynthese in 5 stappen: Sla

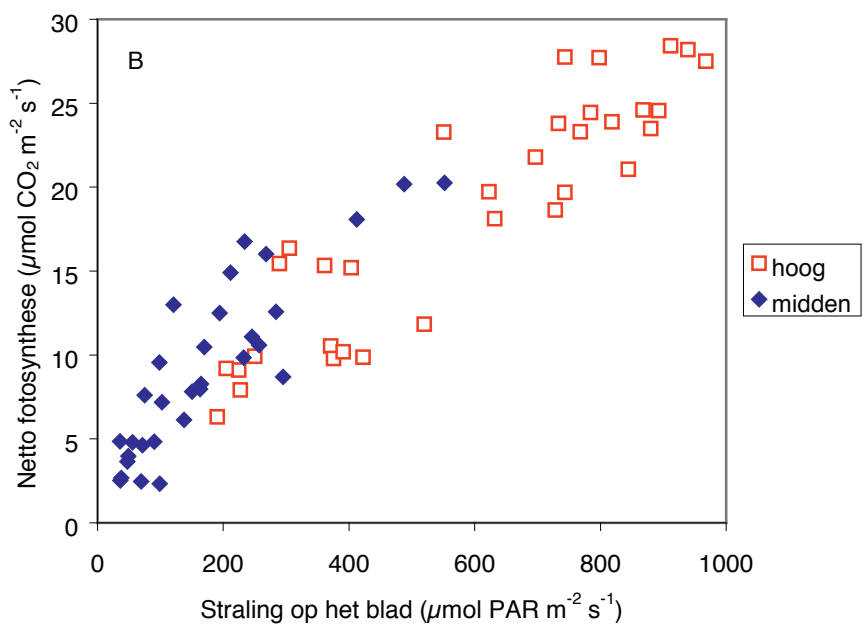
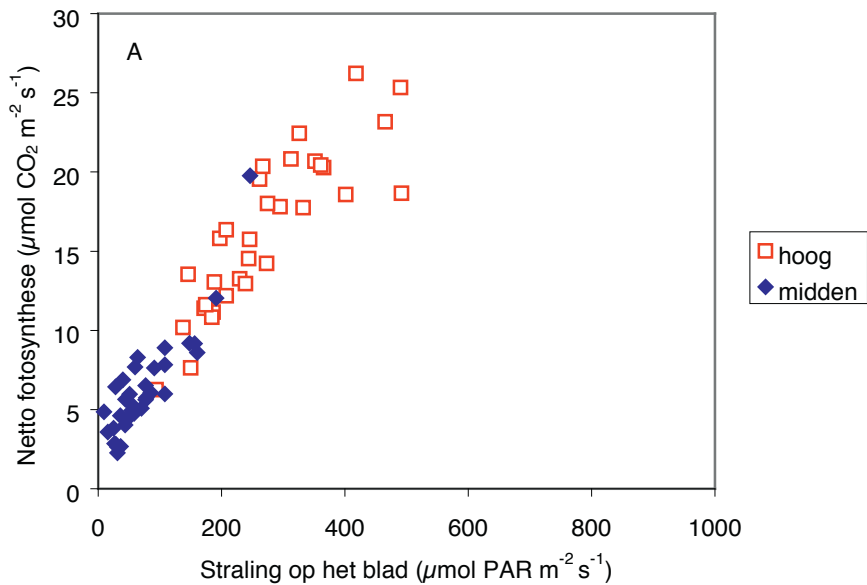
1. ijkijng van bladfotosynthese-parameters: via fotosynthese-meting bij oplopende lichtniveaus in de bladkamer (lichtresponscurven)
2. Verdeling bladoppervlak:  
Op de meetdagen zijn 5 planten per cultivar geoogst van Lollo bionda (19 juni) en van Lollo rosso (21 november) 3 stadia en is de LAI gemeten.
3. Verticale verdeling lichtniveau:  
Omdat de gewasstructuur van sla heel anders is dan die van tomaat is andere aanpak gebruikt om de lichtextinctie in het gewas te berekenen. Binnen 1 plant is een verdeling gemaakt van 3 bladleeftijden; jong, middel en oud. Het oude blad (15% bladoppervlak van de totale plant) staat wijder uit en vangt volledig licht. De andere 2 bladleeftijden zitten midden in de plant en onderscheppen nagenoeg al het licht dat er op valt. Net als bij tomaat is aangenomen dat het lichtniveau afneemt van boven naar onder volgens een exponentiële uitdoving, als functie van extinctiecoëfficiënt en bladoppervlak. Deze 85% van het bladoppervlak wordt in 2 gelijke delen gesplitst (2 bladleeftijden) en voor elk bladpakket wordt het gemiddelde lichtniveau berekend.
4. CO<sub>2</sub>-vastlegging door gewas gedurende de dag:  
Voor elk tijdstip op de twee meetdagen is vervolgens uit de bovengenoemde *blad*fotosynthese de *gewas*fotosynthese berekend. Hiervoor is de globale straling boven het gewas, en de concentratie van CO<sub>2</sub>, de temperatuur en de luchtvochtigheid in de het gewas omringende kaslucht noodzakelijk. Deze klimaatdata waren als 1-minuut gemiddelden aanwezig. Voor CO<sub>2</sub>, temperatuur en RV veronderstellen we een ruimtelijk homogene verdeling.
5. De berekening van de netto-fotosynthese is bruto-fotosynthese minus respiratie.  
Deze respiratie betreft alleen die van de bladmassa. Respiratie van wortel wordt niet meegenomen, en kan tot een lichte overschatting van de CO<sub>2</sub>-vastlegging leiden.

### 5.4.3 Resultaten tomaat

#### 5.4.3.1 Actuele fotosynthese

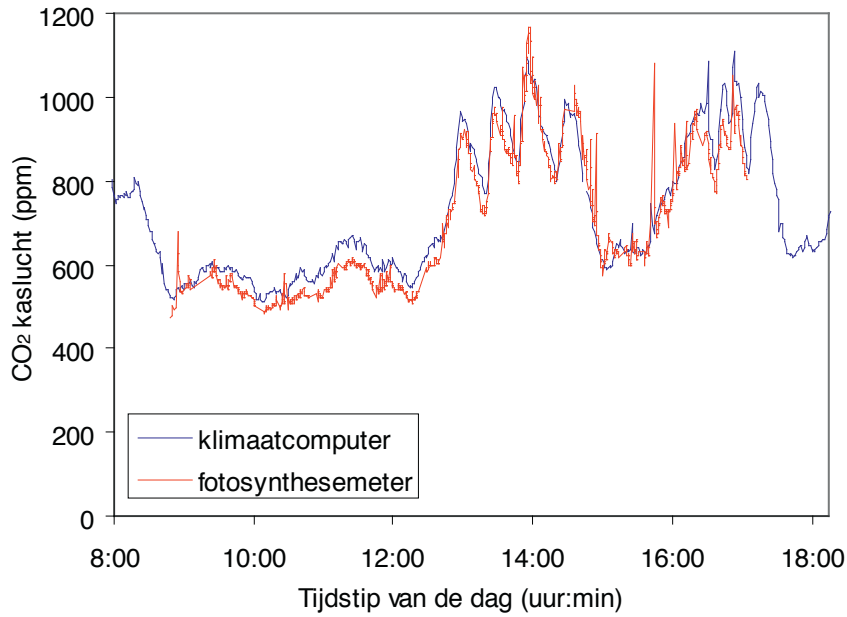
Bij de dataverwerking bleek dat de netto fotosynthese gedurende 5 minuten in de bladkamer bij de meeste planten redelijk stabiel was. Bij deze planten zijn de metingen tussen 1 en 5 minuten in de bladkamer per plant gemiddeld. Bij in totaal 5 planten was er gedurende 5 minuten fluctuatie in fotosynthese veroorzaakt door fluctuaties van straling op het blad. Bij deze planten zijn metingen gemiddeld in een periode met lage instraling (lage fotosynthese) en in een periode met hoge instraling (hoge fotosynthese). Verdere berekeningen zijn alleen uitgevoerd met de gemiddelde fotosynthese- en lichtniveaus van deze 5-min metingen.

In Figuur 5.2. zijn alle actuele fotosynthesemetingen uitgezet tegen de gemeten straling op het blad op beide meetdagen. Op 11 juli (fig. 5.2A) was het een bewolkte dag en was er minder straling op het blad dan op de zonnige dag op 29 augustus (fig. 5.2B). Hoog in het gewas valt duidelijk meer licht op de bladeren dan midden in het gewas. Op beide dagen is er een duidelijk verband te zien tussen de hoeveelheid licht die op het blad valt en de netto fotosynthese. Op 11 juli is het verband lineair en wordt geen verzadiging bereikt; op 29 augustus buigt de curve enigszins op bij hogere lichtintensiteiten.



Figuur 5.2. Gemeten actuele netto fotosynthese ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ s}^{-1} \text{ m}^2 \text{ blad}$ ) gedurende de dag op 11 juli (A) en 29 augustus (B) hoog in het gewas ( ) en midden ( ) in het gewas. Elk symbool is een meting aan een ander blad.

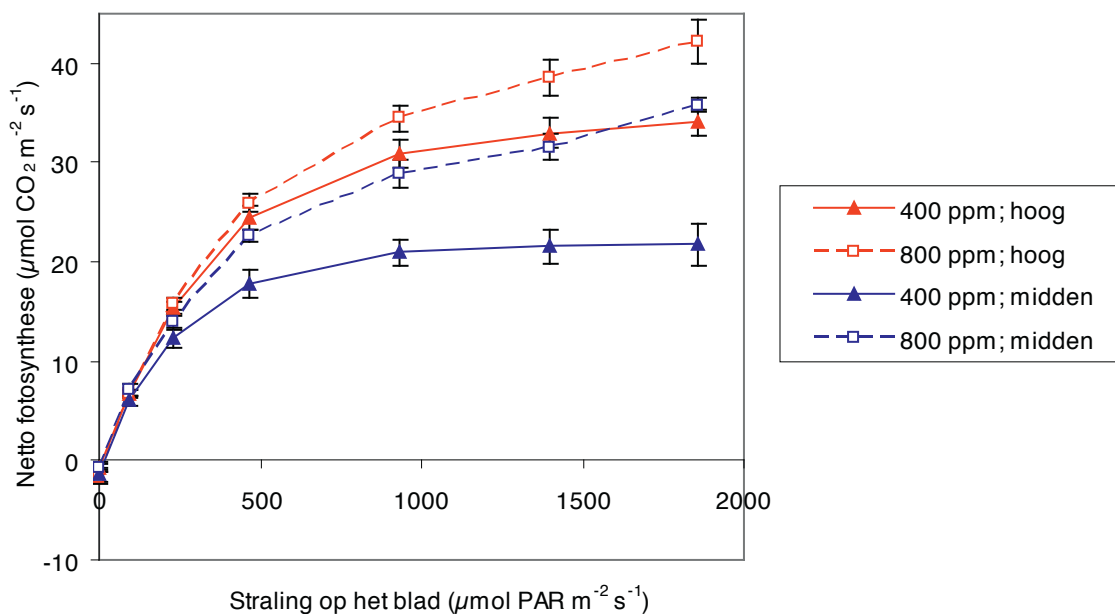
De  $\text{CO}_2$  concentratie in de bladkamer is gelijk aan de actuele waarde in de kas en varieerde gedurende de dag. Op 11 juli was de  $\text{CO}_2$  concentratie 's morgens ongeveer 550 ppm. Op moment dat ramen gesloten werden liep de  $\text{CO}_2$  concentratie op tot 1000 ppm (Figuur 5.3.). Op 29 augustus werd meer geventileerd en was de  $\text{CO}_2$  concentratie gedurende de hele dag rond 500 ppm (uitgezonderd 750 ppm om 9:00 en 17:00). De  $\text{CO}_2$  concentratie gemeten door de fotosynthesemeter correspondeerde goed met de metingen van de meetbox (Figuur 5.3; alleen data vertoond op 11 juli; op 29 augustus waren de metingen ook vergelijkbaar tussen fotosynthesemeter en meetbox).



Figuur 5.3. Gemeten CO<sub>2</sub> concentratie in de kaslucht door de fotosynthesemeter en door de meetbox op 11 juli 2007.

#### 5.4.3.2 Lichtresponscurven

In Figuur 5.4. zijn de gemiddelde lichtresponscurven weergegeven hoog in het gewas gemeten en midden in het gewas bij 400 en 800 ppm CO<sub>2</sub> in de bladkamer.



Figuur 5.4. Gemeten lichtresponscurven ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ s}^{-1} \text{ m}^2 \text{ blad}$ ) hoog in het gewas (rood) en midden (blauw) in het gewas bij 400 (▲) en 800 ppm CO<sub>2</sub> (■) in de bladkamer (gemiddelden met standaardfout).

De maximale netto fotosynthese is hoger van blad hoog in het gewas vergeleken met blad midden in het gewas. Blad midden in het gewas is geadapteerd aan relatief lagere lichtintensiteiten en dit heeft een negatief effect op de maximale fotosynthesecapaciteit. Verhoging van CO<sub>2</sub> van 400 naar 800 ppm CO<sub>2</sub> verhoogt de maximale netto fotosynthese bij beide bladlagen ongeveer dezelfde fractie. Op het oog is er een verschil in CO<sub>2</sub>-respons, maar gelet op de gemeten standaardafwijking is dit niet significant.

### 5.4.3.3 Calibratie van parameters van het fotosynthesemodel

Metingen uitgevoerd op 10 juli (lichtrespons) en 11 juli (actuele metingen) zijn samengevoegd en fotosyntheseparameters zijn berekend. Metingen uitgevoerd op 29 augustus (actuele metingen en lichtrespons) zijn eveneens samengevoegd en gebruikt om de fotosyntheseparameters te berekenen. De data voor 10 juli zijn gepooled m.b.t. de 2 hoogten (midden & hoog) omdat in de metingen de lichtrespons bij 800 ppm niet significant verschilde tussen deze 2 gewashoogten als gevolg van vrij hoge variatie. Om die reden zijn de data van midden en hoog t.b.v. de calibratie gepooled voor 10 juli. Wel was voor 400 ppm i.t.t. 800 ppm op 10 juli net als in augustus de fotosynthese duidelijk hoger bij het hoge blad. Op 29 augustus was er een duidelijk verschil tussen de hellingen van de curven tussen metingen die hoog in het gewas zijn gedaan en halverwege het gewas (Figuur 5.2B) en zijn de fotosyntheseparameters apart berekend voor deze 2 gewashoogtes.

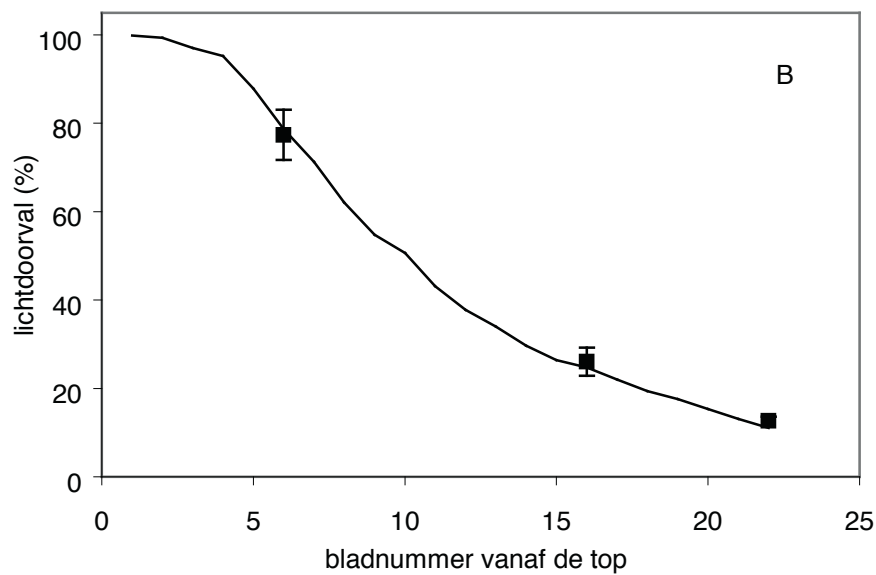
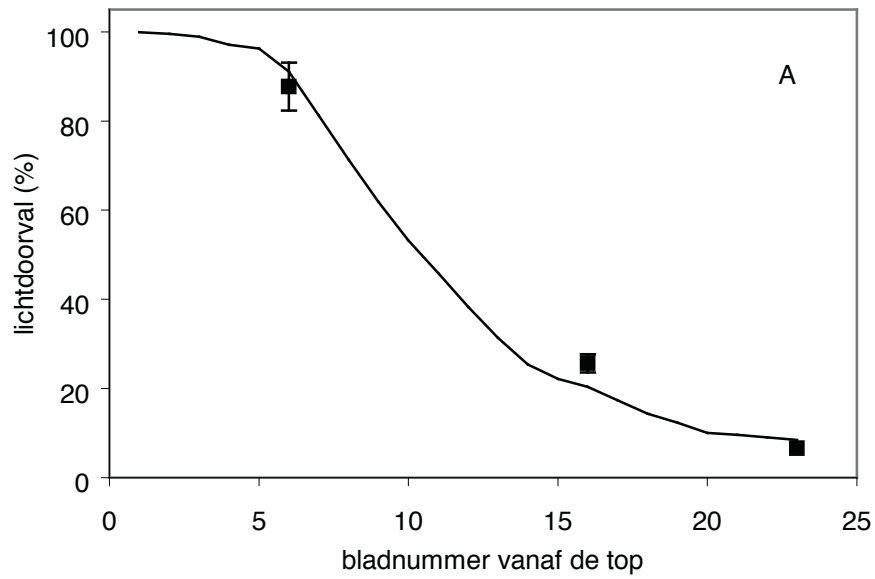
Tabel 5.1. Waarden van de gekalibreerde fotosyntheseparameters

Datum	Meethoogte in gewas	Jmax μmol e s <sup>-1</sup> m <sup>2</sup>	theta -/-	alpha mol CO <sub>2</sub> mol <sup>-1</sup> photons	R2
10,11 juli	hoog+midden	218.5	0.69	0.42	0.91
29 augustus	hoog	262.4	0.35	0.30	0.88
	midden	166.6	0.66	0.42	0.89

De R<sup>2</sup> is hoog van alle kalibraties; dat betekent dat het fitten van de parameters van het fotosynthesemodel betrouwbaar is verlopen.

### 5.4.3.4 Licht- en fotosyntheseverdeling in het gewas

Lichtintensiteiten boven het gewas (berekend uit de klimaatdata met een lichttransmissie in de kas van 60%), en bij het 6<sup>de</sup> en 16<sup>de</sup> blad (gemiddelden van de metingen m.b.v. de bladkamer) geven een sterk dalend verloop te zien (Figuur 5.5.). Voor dit verloop wordt algemeen een exponentiële uitdovingscurve via de wet van Lambert-Beer aangenomen (zie o.a. Goudriaan en Van Laar, 1994). Deze curve is gefit op de meetdata. De totale lichtonderschepping door het gewas was op 11 juli 93.4% en op 29 augustus 87.3% (gemeten met de SunScan van Delta-T devices). De lichtgradient is op 29 augustus wat minder steil dan op 11 juli, en hiervoor zijn verschillende oorzaken mogelijk: een kleiner blad (lagere LAI bij zelfde aantal bladeren), steilere bladstand, of bijv. lagere hoek van lichtinval (later in zomer).

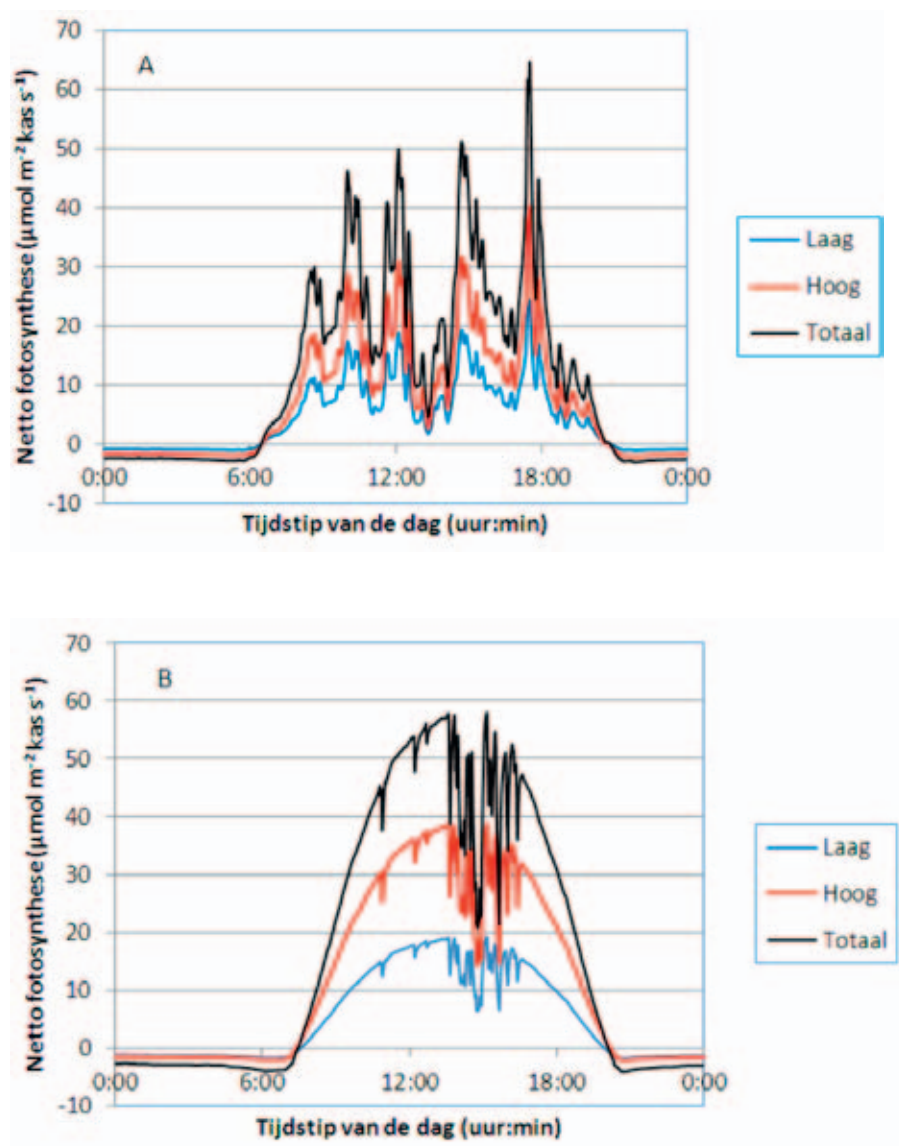


Figuur 5.5. Lichtdoorval in het tomatengewas (als % van niveau boven het gewas) als functie van diepte in het gewas op 11 juli (A) en op 29 augustus 2007 (B). Doorgetrokken lijn, simulatie; punten, meting.

Middels het gekalibreerde fotosynthesemodel is vervolgens voor twee bladpakket (laag resp. hoog) de fotosynthese berekend. Daarvoor werd eerst de lichtonderschepping per afzonderlijk blad berekend, m.b.v. het gemeten oppervlak per blad, en de lichtuitdoving met de gewasdiepte volgens de Lambert-Beer formule. Vervolgens diende de per bladpakket berekende lichtuitdoving als input voor de fotosyntheseberekening.

Deze fotosynthese is vervolgens weer vermenigvuldigd met het gemeten oppervlak per bladpakket, en gesommeerd voor beide bladpakketten (zie Fig. 5.6) om tot een fotosynthese per m<sup>2</sup> kasoppervlak te komen. Het totale bladoppervlak (LAI) was op 11 juli 3.7 m<sup>2</sup> per m<sup>2</sup> kas en op 29 augustus 3.3 m<sup>2</sup> per m<sup>2</sup> kas. Hiervan nemen de bovenste, sterk belichte bladlagen (meting bij blad 6, dus van 1 tot ca. 12) ongeveer 40% (11 juli) tot 48% (29 augustus) voor hun rekening, en de rest van de LAI door het onderste bladpakket. De lichtonderschepping is bovenin sterker, zodat het bovenste bladpakket gemiddeld 66% (11 juli) en 69% (29 augustus) onderscheept.

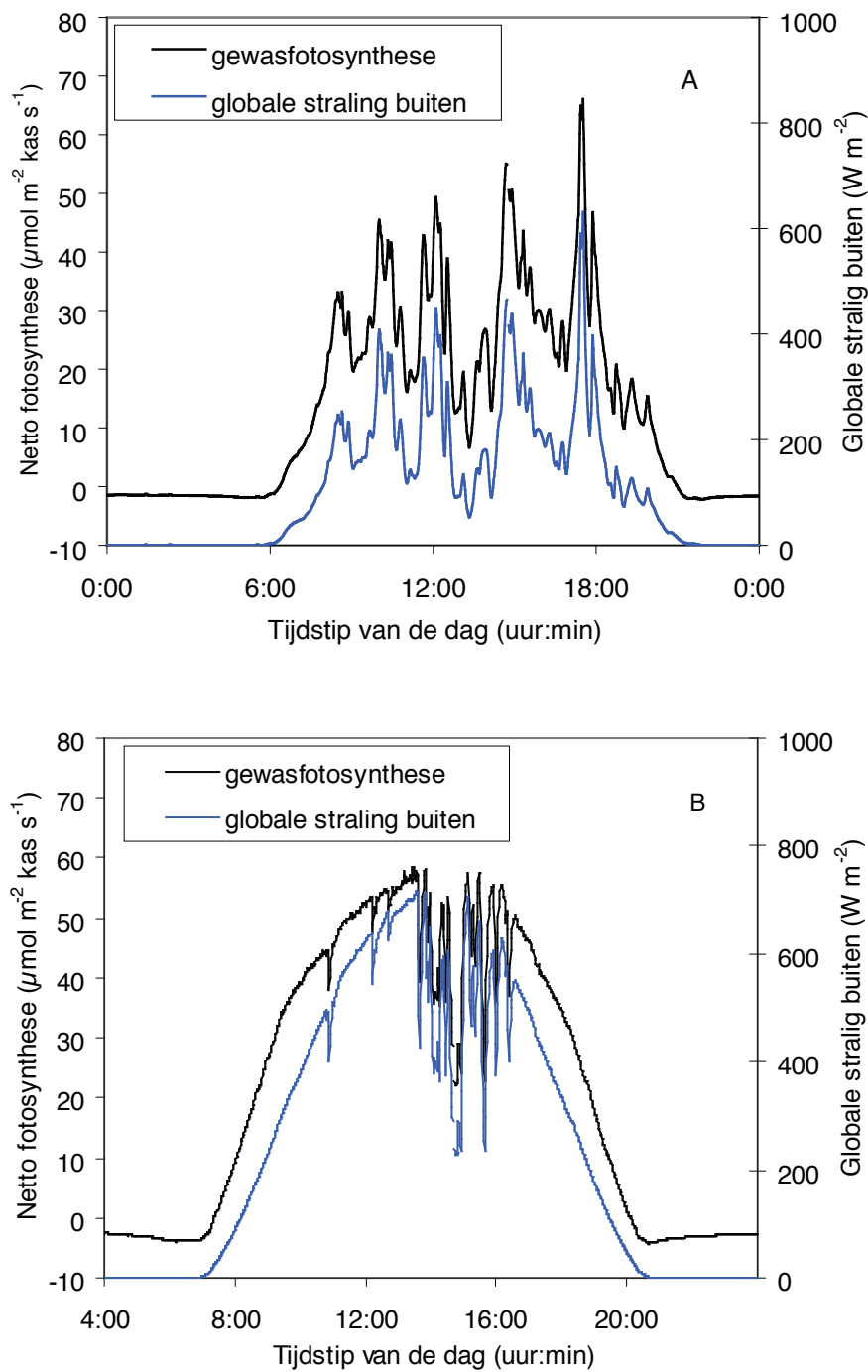
In Figuur 5.6. is de gewasfotosynthese weergegeven voor 11 juli en 29 augustus, berekend op basis van de klimaatdata, fotosyntheseparameters en het bladoppervlak per bladpakket.



Figuur 5.6. Berekende fotosynthese van tomaat van de 2 bladpakketten (hoog en midden) en de gesommeerde totale gewasfotosynthese op 11 juli (A) en op 29 augustus 2007 (B).



Op 29 augustus is de gewasfotosynthese hoger dan op 11 juli. Belangrijkste reden hiervoor is dat de globale straling op 29 augustus hoger was dan op 11 juli (Figuur 5.7.).

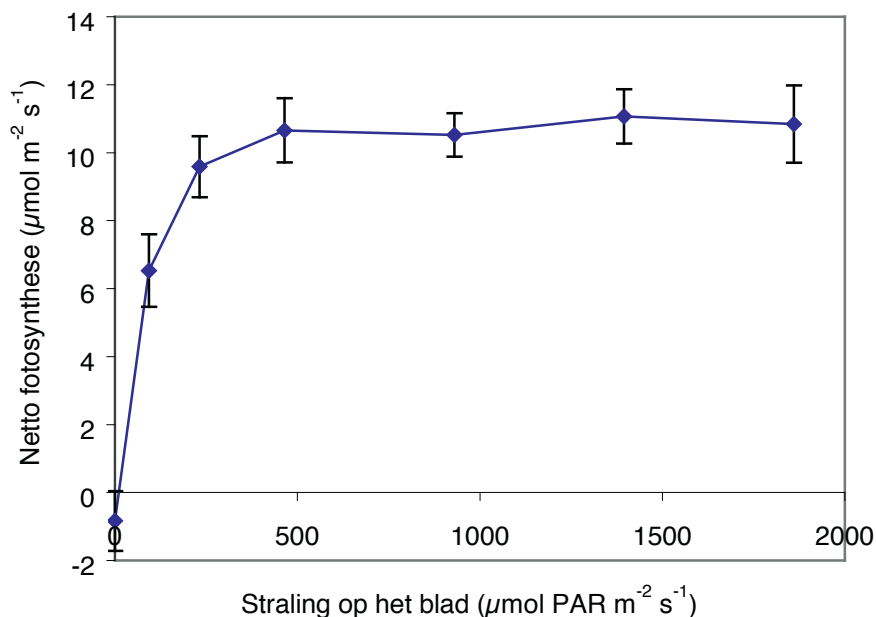


Figuur 5.7. Berekende gewasfotosynthese van tomaat en de globale instraling buiten op 11 juli (A) en op 29 augustus 2007 (B).

## 5.4.4 Resultaten sla

### 5.4.4.1 Lichtresponscurven

Op 19 juni 2007 zijn lichtresponscurven gemeten aan Lollo bionda bij 3 stadia en 3 bladleeftijden. Alle gemeten stadia en bladleeftijden vertoonden hetzelfde verloop; de gemiddelde fotosynthese met de standaardfout is in Figuur 5.8. weergegeven.



Figuur 5.8. Gemeten lichtresponscurven ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ blad}$ ) in Lollo bionda bij 400  $\text{CO}_2$  in de bladkamer (gemiddelde van 11 curves met standaardfout).

Op 21 november 2007 is aan 3 rassen gemeten, waarvan 3 stadia en 3 bladleeftijden. De curves verschilden onderling sterk, waarbij met name de maximale fotosynthese (Tabel 5.2.) verschilde in tegenstelling tot de beperkte variatie (zie o.a. Fig. 5.8) bij de metingen uitgevoerd op 19 juni (lichtresponscurven van 21 november zijn niet weergegeven).

Tabel 5.2. Gemiddelde maximale fotosynthese door sla met 400 ppm  $\text{CO}_2$  in de bladkamer.

Ras	stadium	bladleeftijd	Maximale fotosynthese ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	Maximale fotosynthese (% van Lollo rosso)
Lollo rosso	klein	middel	12.48	138.8
	middel	middel	8.99	100.0
	groot	middel	4.39	48.8
	middel	middel	8.99	100.0
		oud	6.54	71.75
Lollo bionda	middel	middel	3.5	38.9
Eikenbladsla	middel	middel	9.61	106.9

#### 5.4.4.2 Kalibratie van parameters van het fotosynthesemodel

Fotosyntheseparameters zijn berekend voor het ras dat het grootste areaal besloeg (Tabel 5.3.).

Tabel 5.3. Waarden van de gekalibreerde fotosyntheseparameters

Datum	ras	Jmax $\mu\text{mol e s}^{-1} \text{m}^{-2}$	theta -/-	alpha mol CO <sub>2</sub> mol <sup>-1</sup> photons	R2
19 juni	Lollo bionda	75.28	0.98	0.42	0.99
21 november	Lollo rossa	82.47	0.59	0.31	0.97

Op 21 november was er effect van stadium, ras en bladleeftijd. Om gewasfotosynthese te berekenen is de Jmax aangepast als percentage van de gemeten maximale fotosynthese.

#### 5.4.4.3 Licht- en fotosyntheseverdeling in het gewas

Lichtintensiteiten boven het gewas zijn berekend uit de klimaatdata met een lichttransmissie in de kas van 75% (opgave door teler). Klimaatgegevens van de meetdag 21 november waren niet correct; daarom is de gewasfotosynthese berekend voor 18 november 2007. De berekende fotosyntheseparameters uit de fotosynthesemetingen van 21 november zullen ook gelden voor 18 november.

Middels het gekalibreerde fotosynthesemodel is vervolgens per bladleeftijd de fotosynthese berekend. Deze fotosynthese is vermenigvuldigd met het gemeten bladoppervlak om tot een fotosynthese per m<sup>2</sup> kasoppervlak te komen. In de zomer was de LAI aanzienlijk hoger dan in de winter (Tabel 5.4.). De plantdichtheid was verschillend voor de 3 stadia en bedragen respectievelijk, 40, 25 en 16 planten per m<sup>2</sup>.

Tabel 5.4. Gemeten bladoppervlakte van verschillende stadia en verschillende rassen van sla.

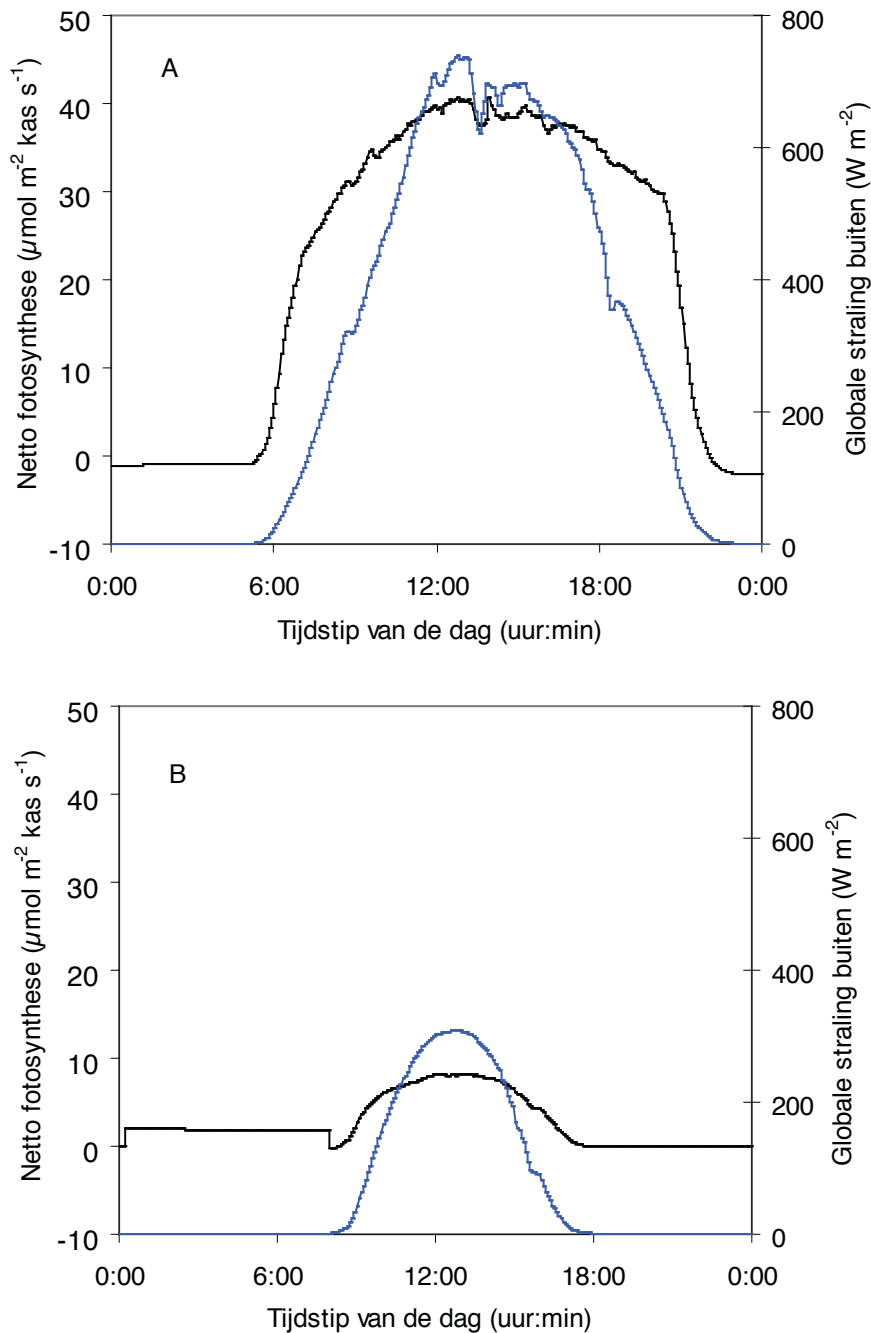
Datum	ras	stadium	LAI (-/-)
19 juni	Lollo bionda	klein	2.64
		middel	4.76
		groot	5.92
21 november	Lollo rosso	klein	0.85
		middel	1.97
		groot	2.54
	Lollo bionda	middel	2.14
	Eikenbladsla	middel	2.76

Binnen 1 plant is een verdeling gemaakt van 3 bladleeftijden; jong, middel en oud. Het oude blad (15% bladoppervlak van de totale plant) staat wijder uit en vangt volledig licht. De andere 2 bladleeftijden (85% van het bladoppervlak van de totale plant) zitten midden in de plant en onderscheppen nagenoeg al het licht dat er op valt. Net als bij tomaat is aangenomen dat het lichtniveau afneemt van boven naar onder volgens een exponentiële uitdoving, als functie van extinctie coëfficiënt en bladoppervlak. Deze 85% van het bladoppervlak wordt in 2 gelijke delen gesplitst (2 bladleeftijden). Uit de berekening volgt dan dat het bovenste deel het grootste deel van het licht onderschept (84% van het licht dat hierop valt) en het onderste deel de rest. Voor elk van de 3 bladleeftijden wordt het gemiddelde lichtniveau berekend. Vervolgens is voor deze 3 bladleeftijden op basis van klimaatdata en fotosyntheseparameters en het bladoppervlak per ras de fotosynthese berekend.

Om de gewasfotosynthese per  $\text{m}^2$  kas te berekenen is aangenomen dat de verdeling van de gewasstadia in de kas als volgt verdeeld is: 1/3 klein stadium, 1/3 midden stadium en 1/3 groot stadium. Voor de berekening van de gewasfotosynthese in november was dat van belang omdat de maximale fotosynthese verschillend was voor de 3 stadia. Daarnaast is rekening gehouden met de arealen van de verschillende cultivars om de totale gewasfotosynthese  $\text{m}^2$  kas te berekenen.

In november is er een geringe fotosynthese berekend tussen 0:00 en 8:00 uur (Figuur 5.9.). Tijdens deze uren wordt de sla belicht.

Op 19 juni is de gewasfotosynthese hoger dan op 18 november (Figuur 5.9.). Belangrijkste redenen hiervoor zijn dat de globale straling in juni hoger was dan in november en de hogere LAI in juni (Tabel 5.4.).



Figuur 5.9. Berekende gewasfotosynthese van sla en de globale instraling buiten op 19 juni (A) en op 18 november 2007 (B).

## 5.4.5 Conclusies schatting gewasfotosynthese

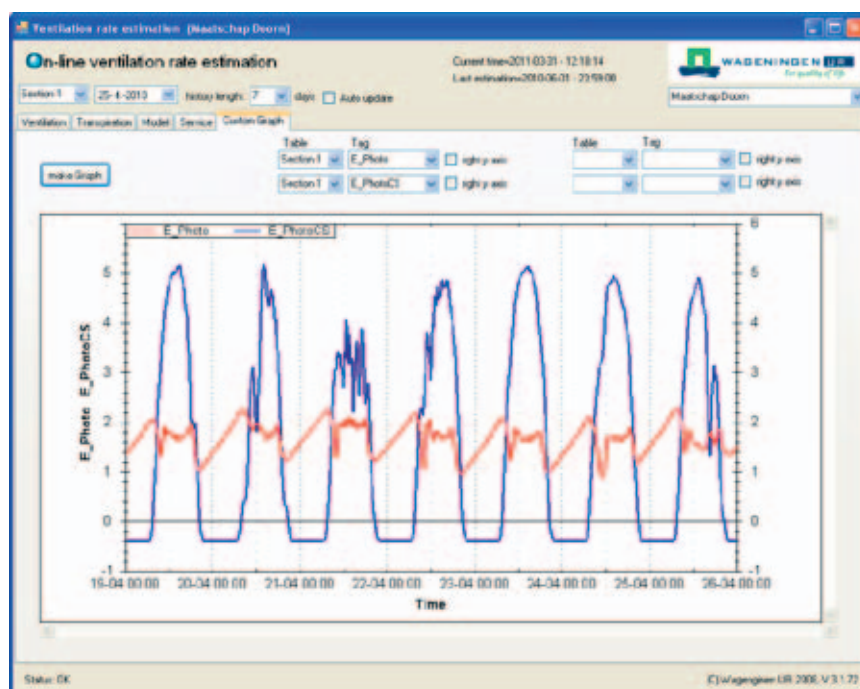
Er is een schatting van de gewasfotosynthese gemaakt door gebruikmaking van een gestructureerde meetopzet en een beproefde kalibratiemethode van de fotosyntheseparameters. De schatting voor tomaat geldt voor de gewasgesteldheid van juli en augustus 2007. De hoogte van de fotosynthese is hoger dan berekend in 2006 (Bontsema et al. 2007); in 2006 was de gewasfotosynthese maximaal  $14 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ kas s}^{-1}$ . De lage waarden gemeten in 2006 houden mogelijk verband met waargenomen schade door het pepino-mozaïek virus. In de teelt van 2007 was tot zover bekend geen ziekte aanwezig. De netto fotosynthese gemeten bij hoge lichtintensiteit bedroeg in 2006 circa  $10 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ kas s}^{-1}$  en dit jaar was deze maximale fotosynthese ruim 2.5 keer zo hoog. Opgemerkt moet worden dat in 2006 de  $\text{CO}_2$  concentratie in de kas erg laag waren (rond 250 ppm) en dit jaar aanzienlijk hoger (minstens 500 ppm); dit verklaart deels de lagere maximale fotosynthese in 2006. Daarnaast was de LAI in 2006  $1.7 \text{ m}^2 \text{ blad m}^{-2} \text{ kasoppervlak}$ , dus aanzienlijk lager dan nu is gemeten (gemiddeld 3.5). Genoemde factoren hebben invloed op de totale gewasfotosynthese en verklaren de hogere waarden die dit jaar zijn gemeten en berekend.

Sla is een heel ander gewas dan tomaat en er zijn een aantal aannames gedaan om gewasfotosynthese te kunnen berekenen. Bij tomaat kon de lichtverdeling in het gewas worden gemeten; door de structuur van sla was dat niet mogelijk en moest worden volstaan met een berekende lichtverdeling. De berekende gewasfotosynthese van sla heeft in de zomer waarden die in de zelfde orde van grootte liggen als tomaat, ondanks de lagere maximale fotosynthese van sla. Sla heeft in de zomer een hogere LAI dan tomaat en dat draagt bij aan de totale gewasfotosynthese. In de winter is de berekende gewasfotosynthese vrij laag, veroorzaakt door een combinatie van een lage LAI, een lage instraling en een geringe fotosynthese respons op licht.

## 5.5 Resultaten en discussie

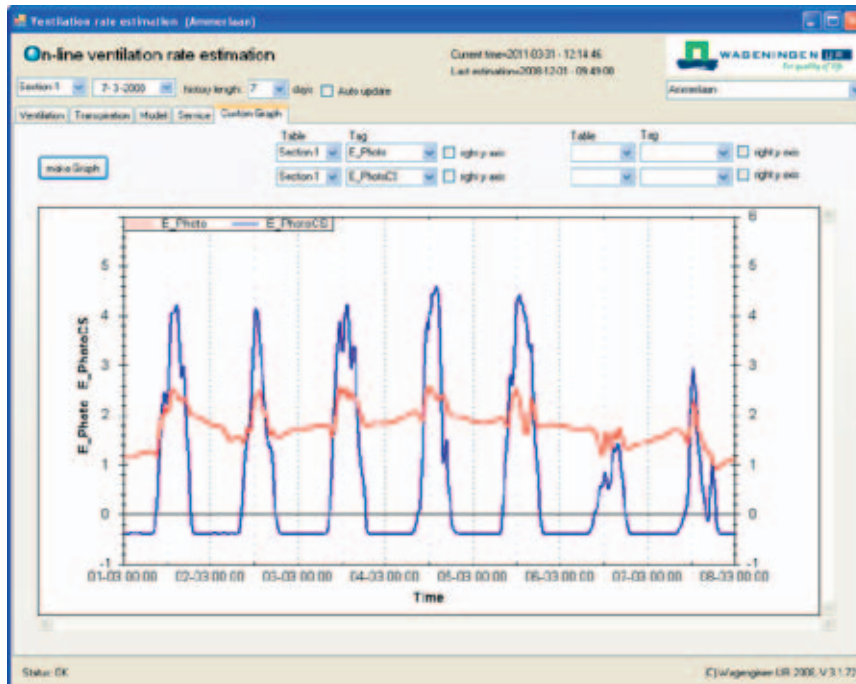
In het project "On-line monitoring van transpiratie en fotosynthesecapaciteit", [Bontsema e.a. 2007] bleek dat de fotosynthesemonitor niet al te goede resultaten geeft. Ook in dit project bleek dit weer. In deze sectie worden enkele resultaten van de fotosynthesemonitor gegeven en wordt gekeken naar eventuele oorzaken van het falen van de fotosynthesemonitor.

In Figuur 5.10. en 5.11. worden de resultaten van de fotosynthesemonitor vergeleken met het rekenmodel uit sectie 5.3.



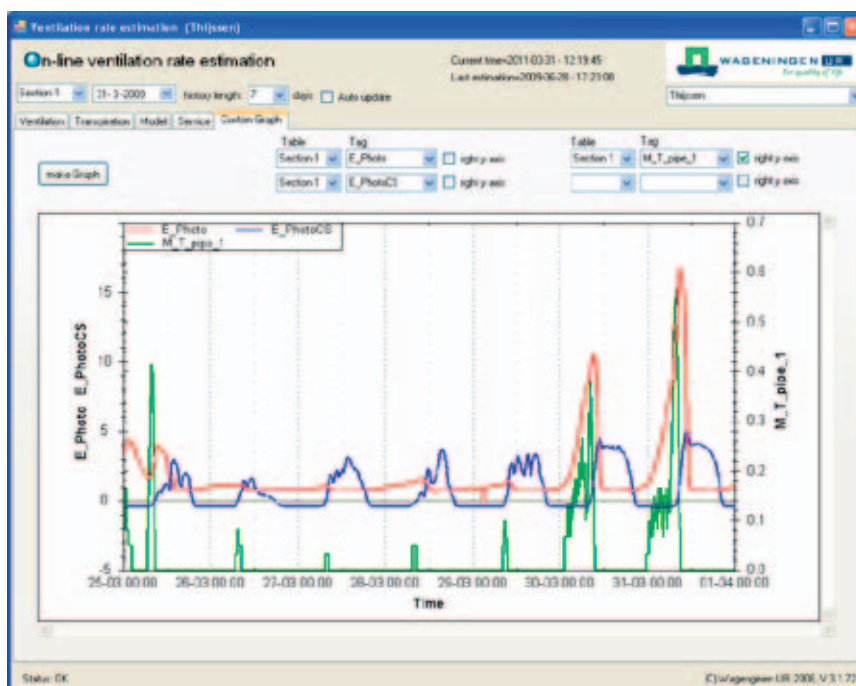
Figuur 5.10. De fotosynthese ( $\text{gm}^2\text{h}^{-1}$ ) volgens de Fotosynthesemonitor (rood) en volgens het rekenmodel (blauw), gewas komkommer, 19 april tot 26 april 2010.

Uit Figuur 5.10. blijkt dat volgens de fotosynthesemonitor de fotosynthese 's nachts oploopt en overdag ongeveer constant is, wat dus niet kan. Bij tomaat, Figuur 5.11. lijkt het wat beter te gaan, de fotosynthese gaat overdag met de straling mee. Ook hier klopt er 's nachts niets van.



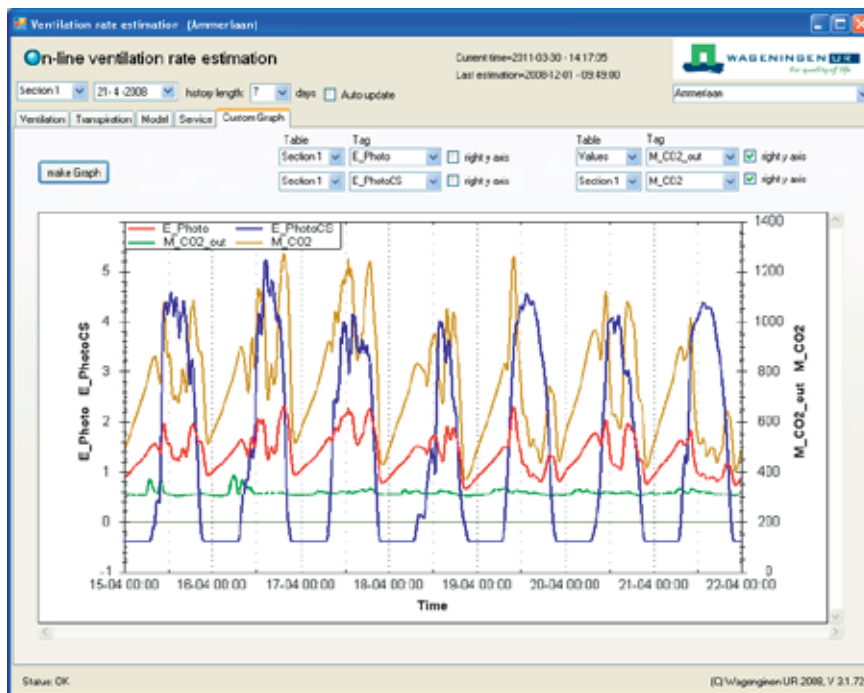
Figuur 5.11. De fotosynthese volgens de Fotosynthesemonitor (rood) en volgens het rekenmodel (blauw), gewas tomaat, 1 maart tot 8 maart 2008.

Bij sla is er geen enkele overeenkomst en loopt de fotosynthese van de Fotosynthesemonitor de laatste twee dagen sterk op. Hier is een duidelijke correlatie met het gebruik van de heteluchtbranders.



Figuur 5.12 De fotosynthese volgens de Fotosynthesemonitor (rood) en volgens het rekenmodel (blauw), gewas sla, 25 maart tot 1 april 2009. In groen het gemiddelde aan/uit signaal van de branders.

In Figuur 5.13. zijn er voor een ander tijdstip de resultaten van tomaat, samen met de binnen en buiten CO<sub>2</sub>-concentratie weergegeven. Duidelijk is dat de door de Fotosynthesemonitor bepaalde fotosynthese de CO<sub>2</sub>-concentratie binnen volgt.



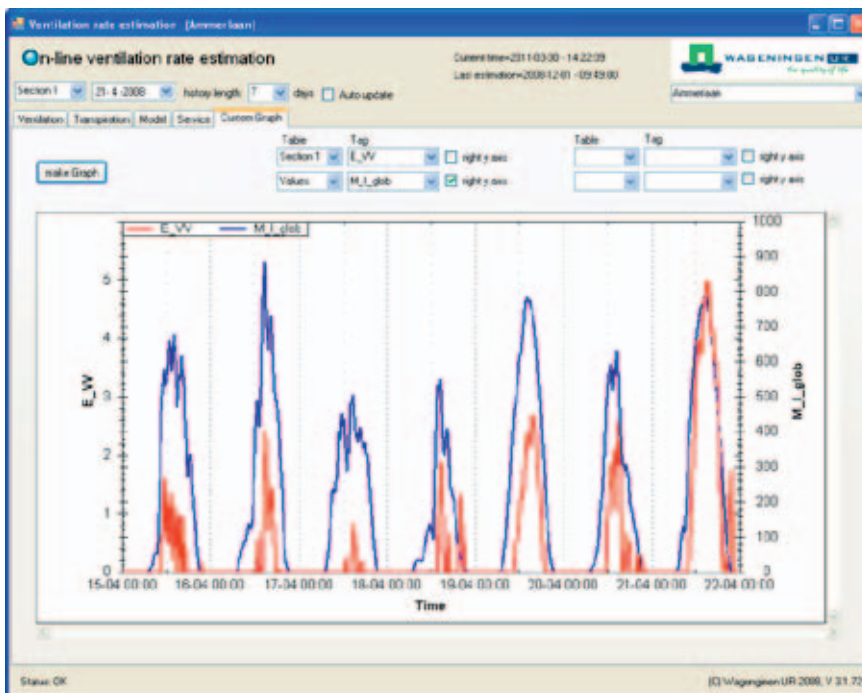
Figuur 5.13. De fotosynthese volgens de Fotosynthesemonitor (rood) en volgens het rekenmodel (blauw), CO<sub>2</sub>-concentratie binnen (licht bruin) en CO<sub>2</sub>-concentratie buiten (groen), gewas tomaat, 15 april tot 22 april 2008.

In Figuur 5.14. is ook de dosering weergegeven, hier is geen duidelijke relatie met de geschatte fotosynthese.



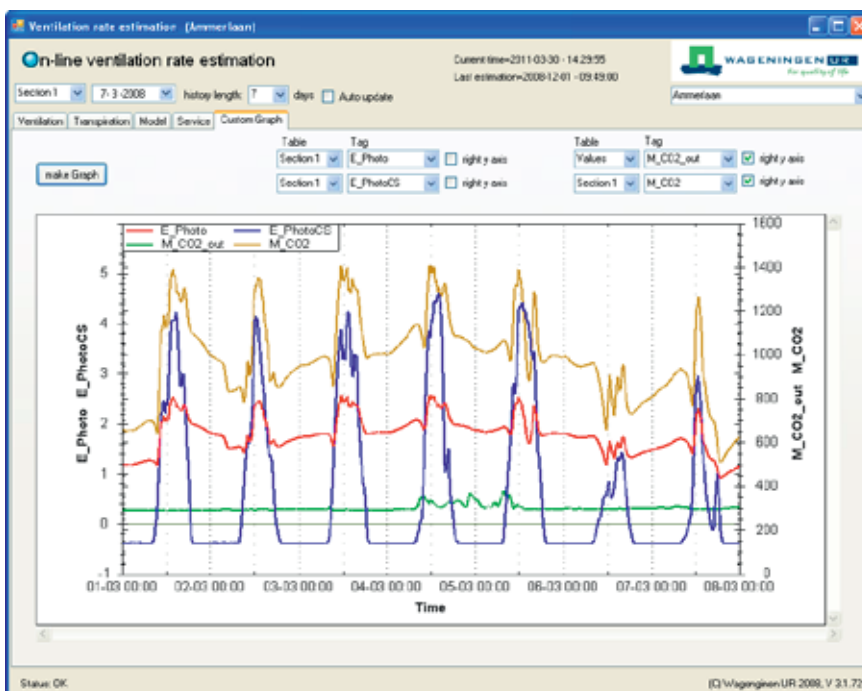
Figuur 5.14. De fotosynthese volgens de Fotosynthesemonitor (rood) en volgens het rekenmodel (blauw), CO<sub>2</sub>-concentratie binnen (licht bruin) en de CO<sub>2</sub>-dosering (groen), gewas tomaat, 15 april tot 22 april 2008.

In Figuur 5.15. is de straling en het ventilatievoud voor deze situatie weergegeven. Duidelijk is dat de  $\text{CO}_2$ -concentratie afneemt door de ventilatie en dat de fotosyntheseschatting gewoon afneemt met de afname van de  $\text{CO}_2$ -concentratie. Een voorzichtige conclusie is dat de uitwisseling van  $\text{CO}_2$  met buiten de dominante term is in de massabalans voor  $\text{CO}_2$  en de fotosyntheseterm in de balans gaat overheersen.



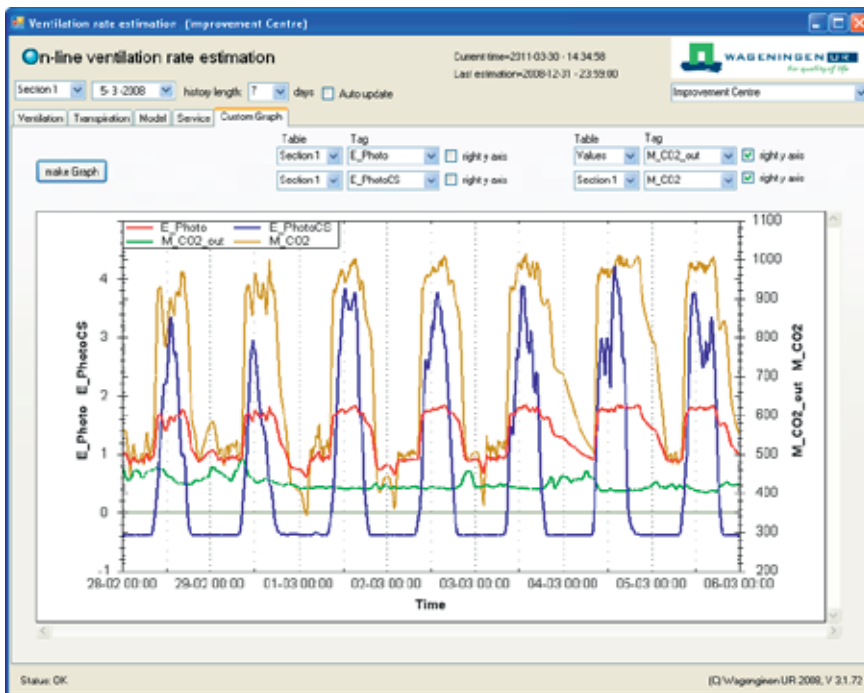
Figuur 5.15. Het ventilatievoud (rood) en de globale straling (blauw), gewas tomaat, 15 april tot 22 april 2008.

Ook in het meer gunstige geval van Figuur 5.11., blijkt de geschatte fotosynthese voornamelijk de binnen  $\text{CO}_2$ -concentratie te volgen. Dit blijkt bij de tweede tomatenteler ook te gelden, zie Figuur 5.16. en 5.17.



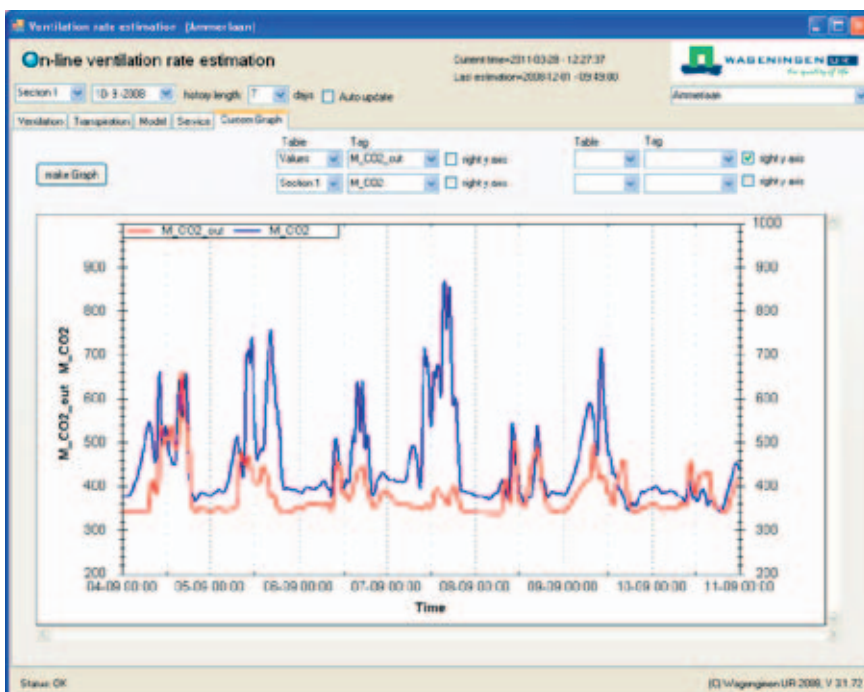
Figuur 5.16. De fotosynthese volgens de Fotosynthesemonitor (rood) en volgens het rekenmodel (blauw),  $\text{CO}_2$ -concentratie binnen (licht bruin) en  $\text{CO}_2$ -concentratie buiten (groen), gewas tomaat, 1 maart tot 8 maart 2008.



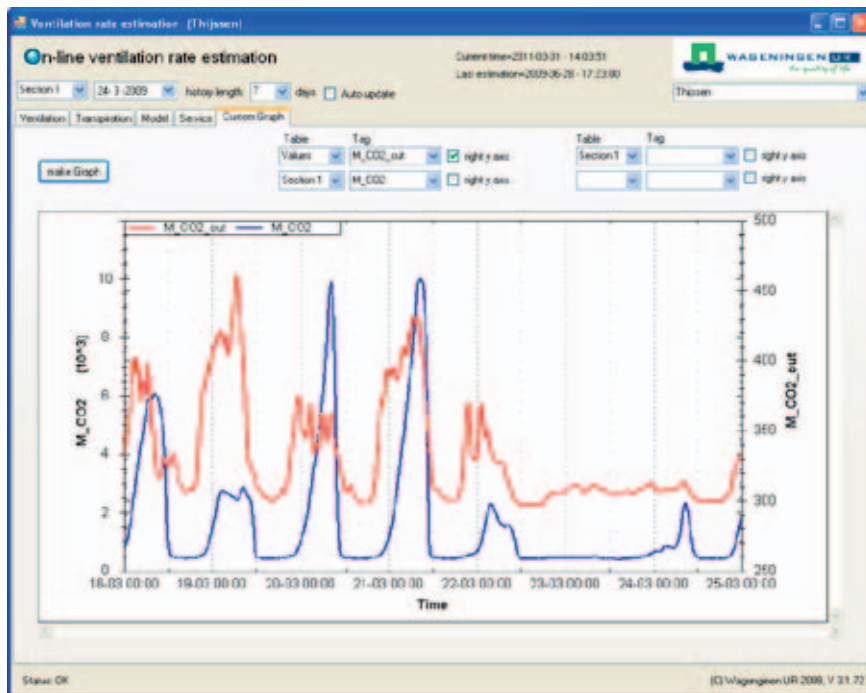


Figuur 5.17. De fotosynthese volgens de Fotosynthesemonitor (rood) en volgens het rekenmodel (blauw), CO<sub>2</sub>-concentratie binnen (licht bruin) en CO<sub>2</sub>-concentratie buiten (groen), gewas tomaat (Improvement Centre), 28 februari tot 6 maart 2008.

De buiten CO<sub>2</sub>-meting blijkt beïnvloed te worden door de binnen CO<sub>2</sub>-concentratie. Oorzaak is dat de buiten CO<sub>2</sub>-sensor te dicht bij de kas is geplaatst of zich in baan van het rookgas van de schoorsteen bevindt, wat weer afhankelijk is van de windrichting. Onderstaande figuren illustreren dit.



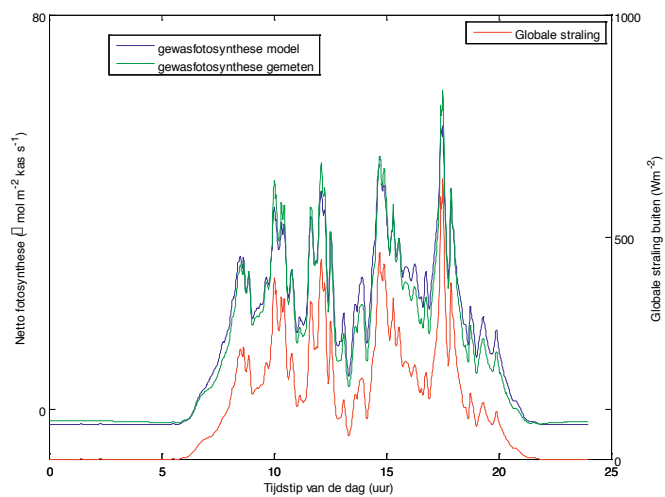
Figuur 5.18. Binnen- (blauw) en buiten- (rood) CO<sub>2</sub>-concentratie, gewas tomaat, 4 september tot 11 september 2008.



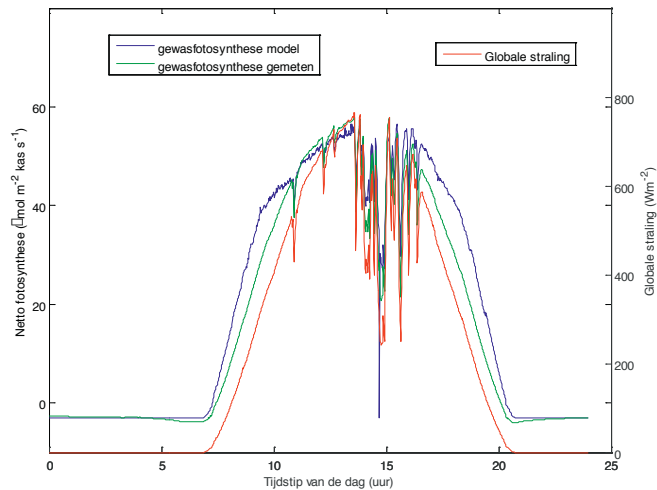
Figuur 5.19. Binnen- (blauw) en buiten- (rood) CO<sub>2</sub>-concentratie, gewas sla, 18 maart tot 25 maart 2009.

Tot slot worden de gewasfotosynthesemetingen (sectie 5.4) vergeleken met de fotosynthese volgens het rekenmodel (sectie 5.3).

In Figuur 5.20. en 5.21. is de fotosynthese bepaald op respectievelijk 11 juli 2007 en 29 augustus bij tomaat (Improvement Centre).

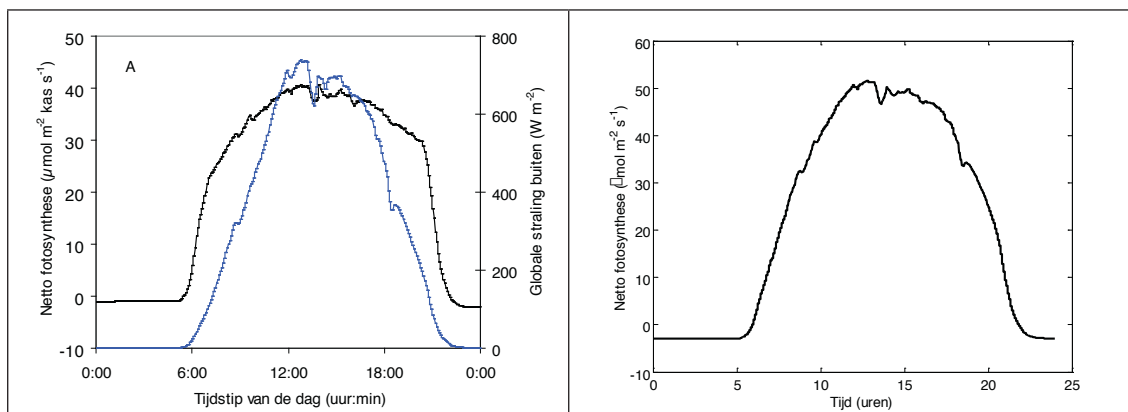


Figuur 5.20. De gemeten gewasfotosynthese en de berekende fotosynthese (linker as), straling (rechter as), gewas tomaat (Improvement Centre), 11 juli 2007.



Figuur 5.21. De gemeten gewasfotosynthese en de berekende fotosynthese (linker as), straling (rechter as), gewas tomaat (Improvement Centre), 29 augustus 2007.

Het blijkt uit deze resultaten dat het rekenmodel uit sectie 5.3 goed de fotosynthese van het gewas kan voorspellen. In Figuur 5.22. is een meetresultaat bij sla (De Boer) te zien.



Figuur 5.22. De gemeten gewasfotosynthese (links) en de berekende fotosynthese (rechts), gewas sla (De Boer), 19 juni 2007.

Ook bij sla is er een goede overeenkomst. De berekende fotosynthese is hier echter hoger dan de gemeten. Het rekenmodel is echter ook niet voor sla opgesteld. Uit Figuur 5.20., 5.21. en 5.22. blijkt dat het rekenmodel een goede methode biedt om de uitkomsten van de Fotosynthesemonitor in de praktijk mee te vergelijken.



## 6 Discussie

Het monitoren van de transpiratie heeft twee belangrijke voordelen: de tuinder weet of het gewas actief is en op welk niveau, en de tuinder ziet tijdig door de terugvallende transpiratie (bijv. de middag 'dip') dat er watertekort dan wel huidmondjessluiting is. Zo is er een extra middel om het functioneren van het gewas te meten, en plantenstress te voorkomen. Met de Transpiratiemonitor kan hierbij een afweging gemaakt worden tussen optimaal teeltklimaat en een investering in energie voor buisverwarming, voor actieve ontvochtiging met droge buitenlucht of voor natuurlijke ventilatie. De oplossingsruimte voor een tuinder is echter heel beperkt: de voor de plant gewenste warmte- en vochtafvoer kosten energie, en gaan ten koste van de CO<sub>2</sub>. Los van een dure maar wel effectieve investering in een airco-systeem zou de tuinder met de Transpiratiemonitor de rek in het systeem kunnen opzoeken: het gewas zou een hoger stressniveau kunnen tolereren mits er fotosynthese blijft plaatsvinden. Dit kan met de gerapporteerde modellentools in combinatie met de Transpiratie- en Fotosynthesemonitor geoptimaliseerd worden.

Voor sommige teelten kan een meetgoot worden gebruikt. Een meetgoot geeft echter alleen de verdamping weer van de planten die op de meetgoot staan. De veronderstelling is dat deze planten representatief zijn voor het hele gewas. Daarnaast moet zoals bij komkommer door de teler informatie over de grootte van de planten in de computer worden ingevoerd. Ook vergt de meetgoot onderhoud. De Transpiratiemonitor geeft in de eerste plaats de verdamping van het hele gewas weer, er is geen informatie over het gewas nodig en vergt geen onderhoud. Het enige wat moet gebeuren is een goede initialisatie bij de tuinder bij ingebruikname. De parameters van de kas die nodig zijn voor de Transpiratiemonitor zijn in principe bij de toeleverancier van de klimaatcomputer bekend of kunnen eenvoudig bepaald worden. Voor de toeleverancier is de installatie van de Transpiratiemonitor eenvoudig en in het geval van de Transpiratiemonitor II zeer eenvoudig. Transpiratiemonitor II kan in principe ook in bijvoorbeeld LetsGrow geïmplementeerd worden of in een Excel applicatie voor voorlichters.

De vraag van het gewas naar CO<sub>2</sub> t.b.v. fotosynthese is redelijk goed in te schatten met het gepresenteerde rekenmodel. De resultaten van dit model komen ook goed overeen met de schatting gebaseerd op bladniveau gemeten lichtabsorptie en fotosynthese die opgeschaald werden naar gewasniveau (zie §5.4). Voor optimale productie is er geen tekort van CO<sub>2</sub> gewenst. In de praktijk is het echter lastig om steeds de gevraagde CO<sub>2</sub> te leveren: het effectief doseren is vanuit kosten oogpunt zeer gewenst, maar verliezen door raamventilatie zijn aanzienlijk. De verliezen lijken onvermijdelijk aangezien in de zomer de behoefte aan CO<sub>2</sub> door het gewas (door de hoge instraling) en tegelijkertijd de behoefte aan grotere raamstanden voor afkoeling elkaar tegenwerken. Een fotosynthese- en transpiratiemonitor als extra tool voor telers zou kunnen helpen om een betere afweging te maken. CO<sub>2</sub>-toediening is gewenst tot uiterlijk iets voor het moment dat gelucht moet worden, en dit toedieningsinterval en -niveau kan met het huidige model vooraf redelijk ingeschat worden. Wat meer warmte toelaten lijkt een 'met het weer mee' oplossing, want de huidmondjes gaat uiteindelijk toch dicht bij veel waterverlies en in weerwil van een grotere raamstand. In samenspraak met telers zou de winst dan gezocht moeten worden in het in de ochtend zo lang mogelijk CO<sub>2</sub> doseren tot de opgebouwde warmte om andere acties vraagt.

Het verkennen van bovengenoemde fysiologische grenzen van het gewas gekoppeld aan gerapporteerde rekentools zou in de tuinderspraktijk getoetst kunnen worden als er gelijktijdig een gewasmonitoring loopt (bv. een GrowWatch of I4all). Ook noodzakelijk is het om dan ook een goede meting van binnen- en buitenwaarde van CO<sub>2</sub> en vochtdeficiet mee te laten lopen.

In een bij het project "Meten van fotosynthese: van plant tot kas" (Dieleman e.a., 2010) horende workshop hebben de telers aangegeven dat zij het continue monitoren van het gewas, zoals fotosynthese, belangrijk vinden. Daarbij is aangegeven dat het belangrijk is dat wordt aangegeven hoe de data geïnterpreteerd worden. De vruchtgroentetelers hebben aangegeven dat zij de fotosynthese graag van het hele gewas in de kas willen meten, om daarop het klimaat te regelen en prognoses te doen voor de productie. De Fotosynthesemonitor zou hiervoor een geschikte kandidaat zijn.

De Fotosynthesemonitor is in principe eenvoudig door de toeleveranciers te implementeren. Echter er moet nog meer onderzoek worden gedaan naar vooral de nauwkeurigheid van de CO<sub>2</sub>-metingen. Daarnaast zou het interessant zijn om te onderzoeken of de methodiek van de Transpiratiemonitor II ook geschikt is voor de fotosynthesemonitor, waardoor de implementatie nog eenvoudiger zou worden en ook bijvoorbeeld geschikt is als offline tool voor voorlichters.

## 7 Conclusie

In dit rapport worden de ervaringen met het gebruik van een eerdere ontwikkelde transpiratie-monitor en fotosynthesemonitor in de praktijk beschreven. Voor de transpiratie zijn twee monitors getest: Transpiratiemonitor I, gebaseerd op de dynamische energie- en vochtbalans van de kas in combinatie met een zogenaamde Unknown Input Observer en Transpiratiemonitor II, gebaseerd op de gekoppelde statische energie- en vochtbalans van de kas. De testen zijn uitgevoerd bij verschillende tuinders uit het netwerk van het project "Ventilatievoud: de praktijk", aangevuld met een drietal sla-telers.

De volgende conclusies met betrekking tot de transpiratiemonitors en de fotosynthesemonitor kunnen worden getrokken:

### Technisch

1. Transpiratiemonitor I heeft een niet verklaarde offset, na weghalen geeft deze monitor goede resultaten.
2. Transpiratiemonitor I lijkt toch goede resultaten (behoudens de offset) als de ventilatiemonitor geen goede ventilatief-luxschatting geeft.
3. Transpiratiemonitor II geeft goede resultaten, voor alle gewassen
4. Omdat beide monitors afhangen van de energiebalans van de kas, is het noodzakelijk om alle energiestromen in de kas in kaart te brengen en correct in de energiebalans op te nemen. Voorbeelden hiervan zijn warmteabsorptie door de bodem en warmteafvoer door middel van dakberging.
5. Omdat beide monitors afhangen van de energiebalans is het belangrijk om correcte papprameters voor de kas, zoals lichtdoorlatendheid, isolatiewaarde van het dek, warmteoverdracht van de verwarmingsbuizen te gebruiken.
6. Net als gold voor de nieuwe ventilatiemonitor, die gebaseerd is op statische balansen, zou het ideaal zijn om de statische methode voor Transpiratiemonitor II om te zetten naar een dynamische methode en de verschillen te bepalen.
7. De fotosynthesemonitor werkt in de praktijk niet. Monitor lijkt zeer gevoelig voor afwijkingen in de berekende ventilatievoud. Verder lijkt de CO<sub>2</sub> buitenconcentratie niet altijd goed gemeten te worden. Afhankelijk van de windrichting hangt de sensor in de rookgassen of in de uitgaande CO<sub>2</sub>stroom van de kas.

### Tuinders

1. Een belangrijk voordeel van een transpiratiemonitor t.o.v. van een rekenmodel is dat de transpiratiemonitor in principe voor ieder gewas werkt en niet afhangt van meestal niet gemeten grootheden, zoals de LAI.
2. Een belangrijk voordeel van een transpiratiemonitor t.o.v. van een meetgoot is dat de transpiratiemonitor in principe voor ieder gewas werkt en geen onderhoud vergt.
3. De uitkomst van Transpiratiemonitor I is in principe vertraagd, door de gebruikte methode. Echter dit geldt ook voor de bepaalde verdamping met behulp van de meetgoot, zowel als hier toegepast. De in de praktijk gebruikte meetgoten hebben ook zo'n vertraging. Men dient bij het gebruik van zo'n meetgoot hiermee rekening te houden, wat men momentaan ziet, is de verdamping van enige tijd geleden.
4. Uit alle resultaten, blijkt dat de verdamping voornamelijk wordt gedreven door de straling van de zon.
5. Belangrijk voor implementatie van een verdampingsmonitor is dat de tuinders ook informatie of een tool bijgeleverd krijgen, wat ze met de resultaten moeten doen.
6. De fotosynthesemonitor werkte niet goed, waardoor niet duidelijk is geworden of tuinders hier voordeel van hebben.

## **Toeleveranciers**

1. Transpiratiemonitor I is eenvoudig te implementeren. Er zijn alleen gemeten kasklimaatdata nodig en een aantal parameters van de kas. De parameters van de kas zijn bij de toeleverancier bekend of kunnen eenvoudig bepaald worden. Tevens is een extra sensor nodig voor de buiten RV. Het ingewikkeldste deel van de software is het doorrekenen van de dynamische energiebalans en de dynamische vochtbalans. Hiervoor is standaard software in iedere programmeertaal beschikbaar.
2. Transpiratiemonitor II is nog eenvoudiger te implementeren. Net als bij Transpiratiemonitor I zijn er alleen gemeten kasklimaatdata nodig en een aantal parameters van de kas. De parameters van de kas zijn bij de toeleverancier bekend of kunnen eenvoudig bepaald worden. Tevens is een extra sensor nodig voor de buiten RV. Het doorrekenen van de gekoppelde energie- en vochtbalans is nu gereduceerd tot het oplossen van twee vergelijkingen met twee onbekenden en kan ook bijvoorbeeld in Excel worden opgelost.
3. Transpiratiemonitor I heeft een “vertraging”, doordat vanwege de gebruikte methode van een unknown input observer de klimaatdata voor de berekening gefilterd moeten worden. Voor Transpiratiemonitor II geldt dit niet, waardoor Transpiratiemonitor II geschikt zou zijn om in de klimaatregeling opgenomen te worden.



## 8 Referenties

- Bontsema, J., Hemming, J., Stanghellini, C., Visser, P.de, Henten, E.J. van, Budding, J., Rieswijk, T. & Nieboer, S., 2007.  
On-line monitoring van transpiratie en fotosyntheseactiviteit. Wageningen UR Glastuinbouw nota 451.
- Bontsema, J., Hemming, J., Budding, J., Steenbakkens, M., Rispiens, S. & Janssen, H.J.J., 2009.  
Ventilatievoud: De praktijk. Wageningen UR Glastuinbouw nota 294.
- Elings, A., De Visser, P.H.B., Marcelis, L.F.M., Heinen, M., Van den Boogaard, H.A.G.M., Gieling, T.H. en Werner, B.E., 2004.  
Feed-forward control of water and nutrient supply in greenhouse horticulture: development of a system. Acta Hort. 654, 195-204.
- Dieleman, A.F., Kempkes, F., Dueck, T., 2006.  
Activeren of stilzetten op donkere dagen. Wageningen UR Glastuinbouw nota 423, 32 pp.
- Dieleman A.F., Driever, S., Van Weel, P. en Bontsema, J., 2010.  
Meten van fotosynthese: van plant tot kas. Wageningen UR Glastuinbouw, Rapport GTB-1041,
- Farquhar, G.D., Von Caemmerer, S. en Berry, J.A., 1980.  
A biochemical model of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of C3 species. Planta 149, 78-90.
- Gallardo Salazar, T.A., 2010.  
An estimate of greenhouse transpiration, condensation and natural ventilation fluxes. MSc-rapport Agricultural & Bioresource Engineering, Wageningen University, 75 pp.
- Goudriaan, J. and Van Laar, H.H., 1994.  
Modeling potential crop growth processes: textbook with exercises. Current issues in production ecology 2. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 238pp.
- Nederhoff, E.M., 1994.  
Effects of CO<sub>2</sub> concentration on photosynthesis, transpiration and production of greenhouse fruit vegetable crops. PhD-thesis Wageningen University, 213 pp.
- Rispiens, S., 2009.  
Verbetering van de on-line schatting van het ventilatievoud van kassen. MSc-rapport Agricultural & Bioresource Engineering, Wageningen University, 116 pp.
- Stanghellini, C., 1997.  
Transpiration of greenhouse crops: an aid to climate management. PhD-thesis Wageningen University, 150 pp.
- Van Henten, E.J., Bontsema J., Kornet, J.G. and Hemming, J., 2006.  
On-line schatting van het ventilatievoud van kassen. Nota PRI, 60 p.





