

Werkingsonderzoek HortiAir

Peter Hoogendoorn

Bart Veltkamp



tussenrapport metingen

LEVEL energy technology

Panterlaan 20

5691 GD Son

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave III

Inleiding 5

2	meting in de proefkas.....	6
3	2 oktober 2011; onbewolkte warme dag met veel instraling.....	9
3.1	meting9	
3.2	berekening	11
3.3	vergelijkende meting zonder verneveling in de kas	16
3.4	metingen Pedak	17
4	5 oktober 2011; warme dag weinig instraling	18
4.1	meting18	
4.2	berekeningen.....	19
4.3	metingen Pedak	21
5	1 oktober 2011; warme dag veel instraling	22
5.2	metingen Pedak	23
6	12 november 2011; koude dag	25
6.2	metingen Pedak	26
7	1 september 2011; veel instraling	28
7.2	metingen Pedak	29
8	15 september 2011; wisselend bewolkte dag.....	31
8.2	metingen Pedak	32
9	berekende dag; veel instraling.....	33
10	berekende dag; koud en weinig instraling	36
11	flow 39	
12	Opbrengsten HortiAir	40
13	Conclusies 42	

Bijlage A	berekening van condensatie op het kasdek en verliezen naar buiten	44
Bijlage B	berekening van de instraling en de verdamping van de plant.....	49
Bijlage C	evaluatie Climeco	51
Bijlage D	uitgangswaarde voor de berekeningen.....	52

Inleiding

De HortiAir is ontworpen om, slechts gebruik makend van buitenlucht, een gewenst temperatuurgebied en vochtdeficiet te handhaven. Hij regelt de temperatuur en relatieve vochtigheid in de kas. Hierbij kan de kas gesloten blijven en is het energieverbruik minimaal. Het CO₂ gehalte wordt optimaal voor de plant ingesteld, en het CO₂ verbruik wordt tot een minimum beperkt. Alle CO₂ wordt in het product vastgelegd. Centraal staat het optimaliseren van de groeiomstandigheden van het gewas met een zo optimaal mogelijk effect op energie en CO₂ besparing en bovenal op het totale bedrijfsrendement. De kwantiteit en de kwaliteit van het product worden door het constante *lente* klimaat verhoogd, terwijl het productietijdstip verlegd kan worden.

De HortiAir dient als basis besparingsmiddel, waaraan in een vervolgstap een warmtepomp kan worden toegevoegd. Hiermee wordt de CO₂, die vrijkomt voor de krachtopwekking, volledig in de geproduceerde biomassa vastgelegd en wordt het primaire energieverbruik verder verlaagd. Voldoende koelvermogen is dan beschikbaar om elk teeltrecept te kunnen realiseren bij een volledig gesloten kas. Tevens wordt hiermee al het water teruggewonnen. Toepassing van lange termijn warmteopslag zal verder zorgen voor een betere benutting van de zonnewarmte en een lager vermogen voor de warmtepomp. De WKK kan dan aanzienlijk kleiner worden gedimensioneerd.

Bij de HAS in Den Bosch worden in een proefkas testen uitgevoerd om de werking van de HortiAir aan te tonen. De teelt is komkommer, waarmee een aantal malen per jaar een proef kan worden uitgevoerd.

Dit project is ondersteund door Productschap Tuinbouw en de HagelUnie. De HAS in den Bosch heeft een proefkas beschikbaar gesteld en zorg gedragen voor de planten. Croppings is adviseur voor het teelt technische gedeelte. De WUR (Feye de Zwart) heeft geadviseerd voor het plant fysiologisch model. Climeco heeft de installatie kritisch beoordeeld. LTO groeiservice heeft de projectbegeleiding gedaan. De begeleidingscommissie van innovatieve tuinders heeft ons met beide benen op de grond gehouden.

2 meting in de proefkas

De metingen in de proefkas zijn uitgevoerd om aan te tonen dat met de HortiAir het klimaat in een kas gecontroleerd kan worden. In deze fase van de ontwikkeling is het niet de opzet om een ideaal klimaat voor de komkommers te creëren. De HortiAir regelt het klimaat met vaste instellingen voor vochtdeficiet en temperatuur. Het is in deze proefopzet niet het doel om deze waarden afhankelijk van het tijdstip van de dag aan te passen. De instellingen van de HortiAir worden in de toekomst in een praktijkopstelling door een centrale klimaatcomputer doorgegeven. De instellingen tijdens de proef zijn:

- | | | |
|--|----|---------------------|
| • minimale kastemperatuur (of stooklijn) | 20 | [°C] |
| • maximale gewenste kastemperatuur | 24 | [°C] |
| • minimaal vochtdeficiet | 2 | [gm ⁻³] |
| • maximaal vochtdeficiet | 4 | [gm ⁻³] |

Andere redenen waarom geen ideaal klimaat gerealiseerd kan worden is

- het ontbreken van een energiescherm en een stralingsscherm
- een aanzienlijke lekkage van 1,66 m³h⁻¹ per m² vloeroppervlak
- de kas heeft meer verliesoppervlak naar de zijkanten dan naar buiten.

Dit neemt niet weg dat de HortiAir wel beoordeeld kan worden op zijn werking.

De start van het project was moeizaam. Het kostte veel tijd alvorens de HortiAir zonder storingen werkte, pas vanaf half Augustus 2011 heeft de HortiAir zonder haperingen gewerkt. Vanaf die datum zijn er ook volop meetgegevens beschikbaar. Daarvoor zijn de meetgegevens niet altijd even goed bruikbaar.

Er worden verschillende dagen gepresenteerd en geanalyseerd. De dagen hebben alleen een ander weerbeeld, hiermee moet aangetoond worden dat de HortiAir in staat is het klimaat te controleren. De metingen van de HortiAir worden vergeleken met metingen van de klimaatcomputer van de HAS. De weertypen zijn:

- 3 warme onbewolkte dag met veel instraling (2 oktober)
- 4 warme bewolkte dag met weinig instraling (5 oktober)
- 5 warme onbewolkte dag met veel instraling (1 oktober)

- 6 koude onbewolkte dag, weinig instraling (12 november)
- 7 veel instraling ($> 700 \text{ Wm}^{-2}$)
- 8 wisselend bewolkte dag
- 9 berekende dag, veel instraling
- 10 berekende dag, koud

In ieder hoofdstuk worden de metingen van de Hortiair vergeleken met de metingen uit de HAS klimaatcomputer. Voor de metingen geldt dat de positie van de meting bepalend kan zijn voor de waarde, zo is er vooral een groot verschil tussen de temperatuur bovenin de kas en halverwege het gewas, midden in de kas.

De data uit de HAS computer zijn:

bladtemperatuur	[°C]	gemeten op de bovenste bladeren
temperatuur kas	[°C]	gemeten in het midden van de kas, midden tussen de planten
temperatuur buiten	[°C]	
vochtdeficiet	[gm^{-3}]	berekend uit “temperatuur kas” en “RV kas”
buistemperatuur	[°C]	de temperatuur van het water waar het de kas ingaat
instraling globaal	[Wm^{-2}]	
RV kas	[%]	de relatieve vochtigheid behorende bij “temperatuur kas” gemeten tussen de planten in het midden van de kas
CO ₂	[ppm]	gemeten door de HAS

Voor de figuren met meet data van de Hortiair worden data van de HAS overgenomen en wordt in de Hortiair gemeten.

Tblad	[°C]	de bladtemperatuur overgenomen uit de HAS-data
Tkas	[°C]	de kastemperatuur gemeten in de pijp die kaslucht aanzuigt van bovenin de kas
Tbuiten	[°C]	de buitentemperatuurgemeten in de pijp die buitenlucht aanzuigt door het kasdek
Tnaarkas	[°C]	de temperatuur van de geconditioneerde lucht welke na de Hortiair weer teruggevoerd wordt naar de kas.

VDkas	[gm ⁻³]	berekend uit “Tkas” en de relatieve vochtigheid daarvan
Iglobaal	[Wm ⁻²]	de “instraling globaal” overgenomen uit de HAS-data
CO ₂	[ppm]	gemeten op de HortiAir

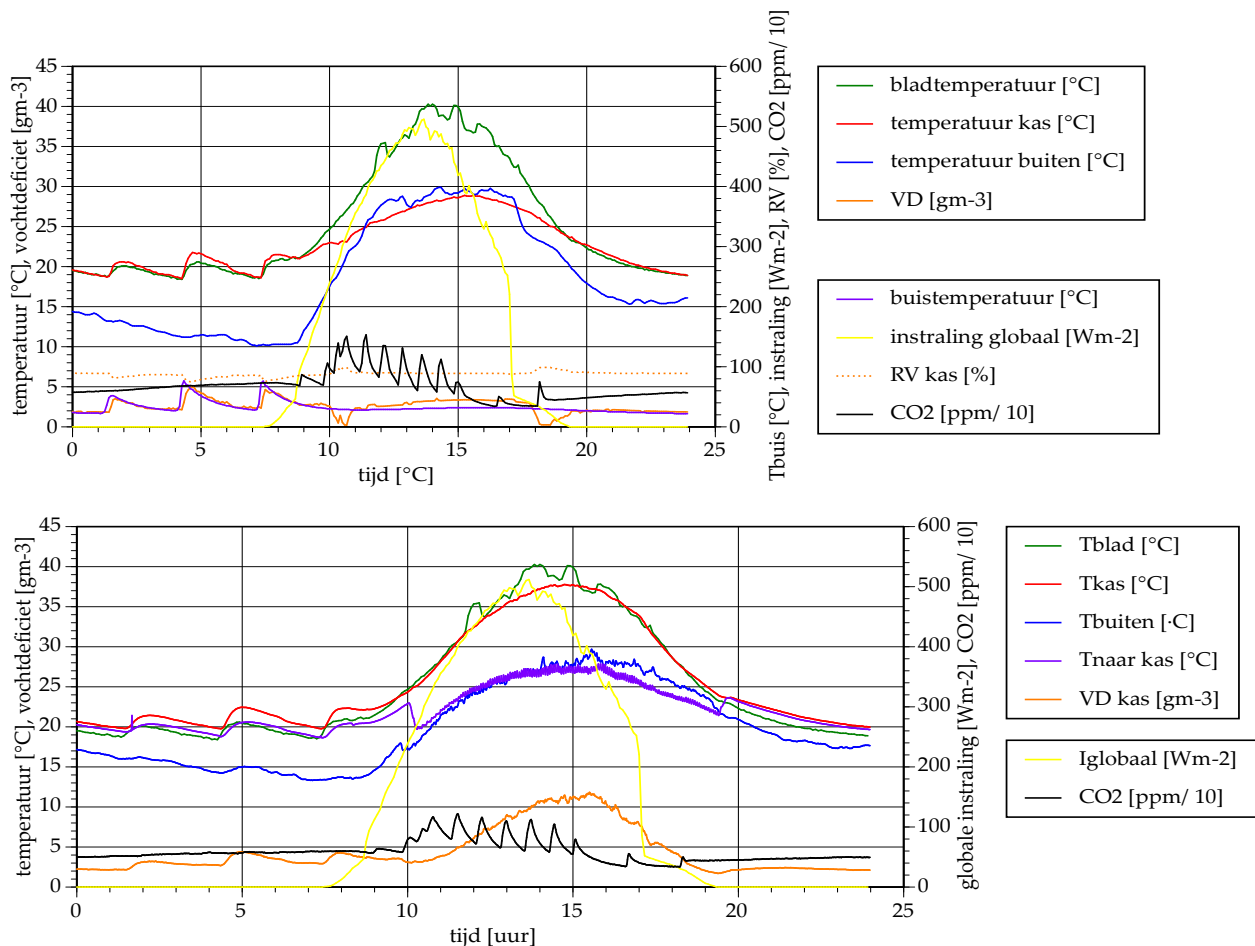
Tot slot is ook de temperatuur en vochtigheid gemeten nog met de Pedak-sensoren. Deze zijn bij iedere meting in een apart figuur weergegeven. Er zijn 16 meetpunten, als volgt geplaatst in de kas:

1 t/m 5	onderin de kas op ± 0,5 m, tussen de planten
6 t/m 10	midden in de kas op ± 2 m, tussen de planten
11 t/m 15	boven in de kas ± 30 cm boven de planten planten
1; 6; en 11	links achter in de kas
2; 7; en 12	links voor in de kas
3; 8; en 13	in het midden
4; 9; en 14	rechts achter in de kas
5; 10; en 15	rechts voor in de kas

3 2 oktober 2011; onbewolkte warme dag met veel instraling

3.1 meting

2 oktober 2011 was een warme dag met buitentemperaturen tussen 14 °C en 30 °C en veel instraling, tot 500 Wm⁻². Fig. 3.1 geeft de resultaten weer van de metingen in de proefkas. Het bovenste fig. geeft de metingen weer volgens de HAS klimaatcomputer, het onderste figuur de metingen uit de Hortiair.



figuur 3.1 meting in de proefkas op 2 oktober 2011-10-31 boven: HAS; onder: HortiAir

Opmerkelijk aan het figuur zijn:

Temperatuur

De maximum temperatuur van de kaslucht verschilt aanzienlijk, de HAS meet tot bijna 30 °C, de Hortiair meet tot 37 °C. De positie van meten is bepalend voor deze meting. De Hortiair regelt op de temperatuur bovenin de kas, het lijkt veel beter om op de temperatuur bij de plant te regelen. Dit is op 2 manieren op te lossen, als eerste kan lager afgezogen worden. De kaslucht blijft dan boven de planten hoog, het koelvermogen door het kasdek hierdoor ook. Een 2e optie is de meting tussen de planten te gebruiken om op te regelen en de lucht hoog boven de planten af te zuigen (zoals nu gebeurt) om het koelvermogen te vergroten.

Vochtdeficiet

Het vochtdeficiet in de meting van de Hortiair loopt op tot een waarde van bijna 12 gm⁻³, in de meting van de HAS blijft deze onder de 4 gm⁻³. Ook hier is de positie van meten bepalend. Het vochtdeficiet bij de plant is de waarde waar op geregeld zou moeten worden, de HAS meting toont aan dat dit met de HortiAir onder deze condities goed mogelijk is.

De HAS meting toont echter ook een ongewenst gedrag, het vochtdeficiet zakt tot onder 2 gm⁻³. Na 10.00 zakt het zelfs tot bijna 0 gm⁻³. Dit is eenvoudig te verklaren doordat er geregeld wordt op de metingen bovenin de kas in plaats van tussen de plant. Om 10.00 stijgt de temperatuur bovenin de kas voor het eerst boven de 24 °C. De HortiAir schakelt over op koelen, dit is te zien doordat Tnaarkas daalt tot ongeveer de buitentemperatuur. Om extra koelvermogen te creëren, wordt de kaslucht bevochtigd. Het VD mag dalen tot 2 gm⁻³, omdat de Hortiair regelt op het hoge VD bovenin de kas, is er ruim de mogelijkheid om te bevochtigen. De nevel daalt in de kas, hierdoor is het VD bij de plant (met een lagere temperatuur) flink lager. Het VD is eenvoudig in de hand te houden als de bevochtiging pas later ingeschakeld wordt, en er geregeld wordt op het VD bij de plant. Een meting onder soortgelijke condities waarbij de vernevelaars buiten werking waren toont dit aan. Dit voorbeeld wordt in hoofdstuk 3.3 uitgewerkt.

CO₂

De CO₂ concentratie ligt vrij laag 's nachts < 500 ppm, overdag tussen de 500 en 1000 ppm. In dit geval komt dat doordat de CO₂ fles in de kas leeg was en de CO₂ concentratie bepaald wordt door een CO₂ regeling van een naburige kas. Deze wordt hierdoor min of meer ongecontroleerd toegevoegd. De snelle afname van de concentratie is een gevolg van lekken in de kas en de HortiAir, daaruit afgeleid is de lek 1,66 m³h⁻¹.

verwarming

De regeling van de verwarming is nog grof. Zodra de kastemperatuur onder 20 °C zakt, stijgt de temperatuur na het aanzetten van de verwarming vrij snel ± 2 °C, waarna de kas in een paar uur weer afkoelt tot 20 °C. De kas heeft geen energiedek, de verwarming moet hierdoor bij relatief hoge buitentemperaturen toch regelmatig aangezet worden.

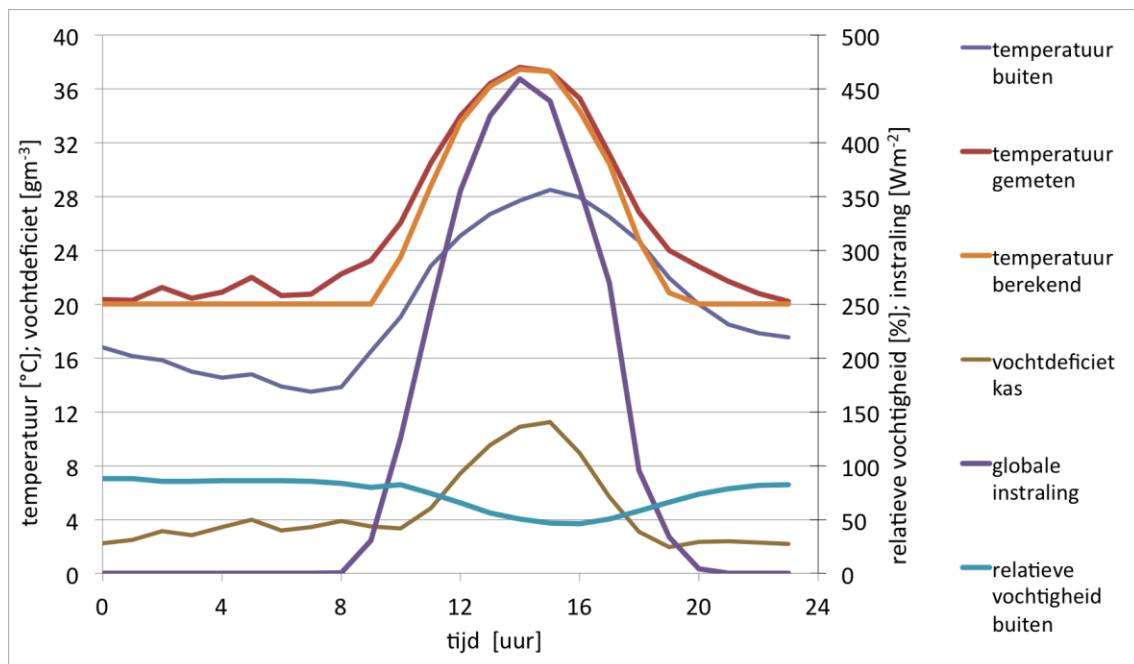
bevochtiging

De temperatuur bovenin de kas stijgt tot ruim 37 °C, waarbij het vochtdeficiet stijgt tot 11 gm⁻³. Dit is hoog vanwege het feit dat de lucht wordt afgezogen op het hoogste punt van de kas, waar, door de thermische gelaagdheid, de temperatuur en daarmee het VD ruim hoger zijn dan gemeten tussen het gewas. De capaciteit van de ultrasone vernevelaars is nog te laag. In de proefkas van 72 m² staan 2 vernevelaars met elk een capaciteit van ongeveer 1,6 kgh⁻¹. Voor deze condities zou de capaciteit ongeveer 3 maal zo hoog moeten zijn. Bovendien wordt er geen gebruik gemaakt van een scherm, wat zowel de temperatuur als het vochtdeficiet zou verlagen. Om een inschatting te krijgen van het effect van voldoende bevochtigen en het plaatsen van een scherm is van deze dag een controle berekening gemaakt. Deze wordt in hoofdstuk 3.2 gepresenteerd.

3.2 berekening

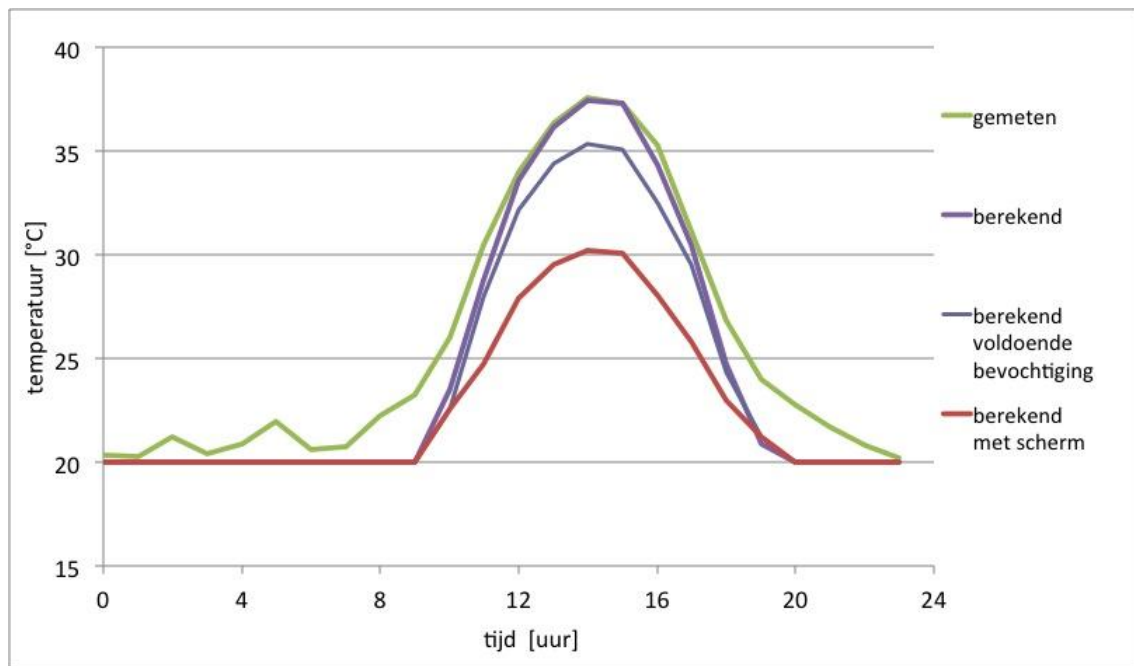
In een eenvoudig model worden de metingen vergeleken met de berekeningen. Als uitgangspunt wordt voor ieder uur de gemiddelde buitentemperatuur en –vochtigheid en instraling gebruikt. Met deze gegevens wordt berekend wat de temperatuur en vochtigheid in de kas wordt. Voor ieder uur wordt bepaald bij welke temperatuur en vochtigheid er een balans is in ingaande en uitgaande energiestromen en in verdamping en condensatie.

tie. Fig. 3.2 vergelijkt de berekende temperatuur met die van de gemeten temperatuur. Vooral de hogere temperaturen komen goed overeen.



figuur 3.2 resultaten berekening

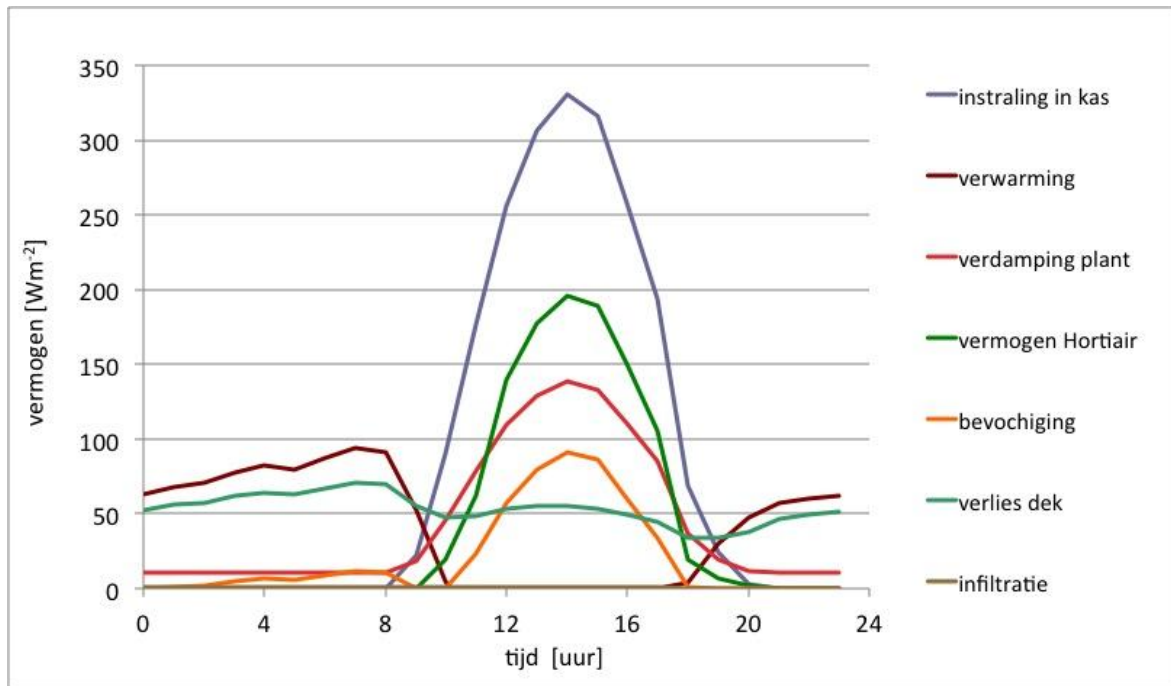
Belangrijk om te weten is wat het resultaat zou zijn als er wel voldoende bevochtigd kan worden, en als de kast redelijk luchtdicht zou zijn. In een volgende berekening wordt bij een kasttemperatuur boven 24 °C een stralingsscherm toegepast welke 40 % van de instraling tegenhoudt. De resultaten zijn weergegeven in Fig. 3.3.



figuur 3.3 temperatuur in de kas bij voldoende bevochtiging en bij gebruik van een scherm

Bij voldoende bevochtiging en bij een vochtdeficiet van 2 zou de temperatuur 2,5 °C lager uitkomen, met een scherm nog eens 5 °C lager.

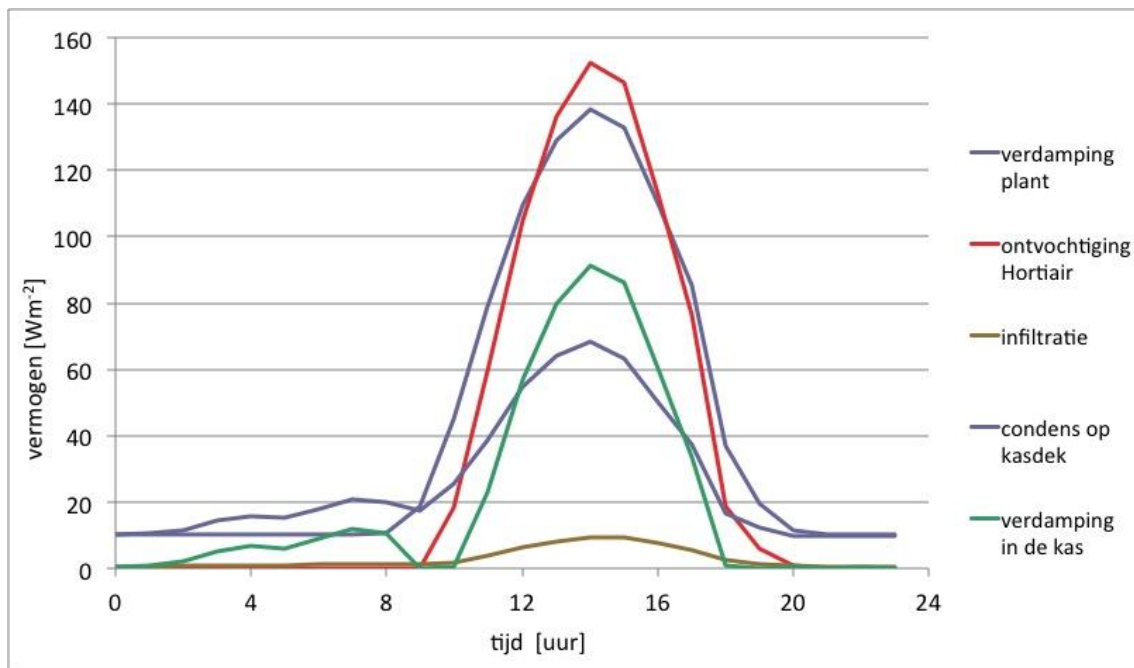
Fig. 3.4 geeft een overzicht van de energiestromen in de kas voor de berekening waarbij er voldoende bevochtiging aanwezig is om de kas op een vochtdeficiet van 2 te houden. Voor de berekening van het condensatie op het kasdek, de energieverliezen door het kasdek zie bijlage A. Voor de verdamping van de plant zie bijlage B.



figuur 3.4 energiestromen in de kas

Er zijn 2 positieve vermogens welke de kas opwarmen. In de nacht is dit de verwarming, in de middaguren is dit de zinstraling. Deze 2 positieve vermogens zijn gelijk aan de 5 negatieve vermogens in de kas deze zijn:

- de verdamping van de plant
- het koelvermogen van de HortiAir, hier staat het voelbare koelvermogen (temperatuur) + het latente (ontvochtiging) vermogen weergegeven
- de extra bevochtiging in de kas. Tijdens koelen wordt door extra bevochtigen het vochtdeficiet op 2 gm^{-3} gehouden, door de verdamping koelt de kas.
- het verlies door het kasdek. Deze is 's nachts relatief hoog omdat er geen energiescherm aanwezig is.
- de infiltratie. Deze is gering omdat er van een luchtdichte kas uitgegaan is ($0,5 \text{ m}^3\text{m}^{-2}$) ongeveer 0,1 maal de kasinhoud per uur.



figuur 3.5 vocht in de kas

Fig. 3.5 geeft een overzicht van de bijdrage van het vocht in Wm^{-2} . Er zijn 2 positieve vermogens welke de kas bevochtigen.

- de verdamping van de plant
- als het mogelijk is wordt er om te koelen extra vocht verdampt in de kas.

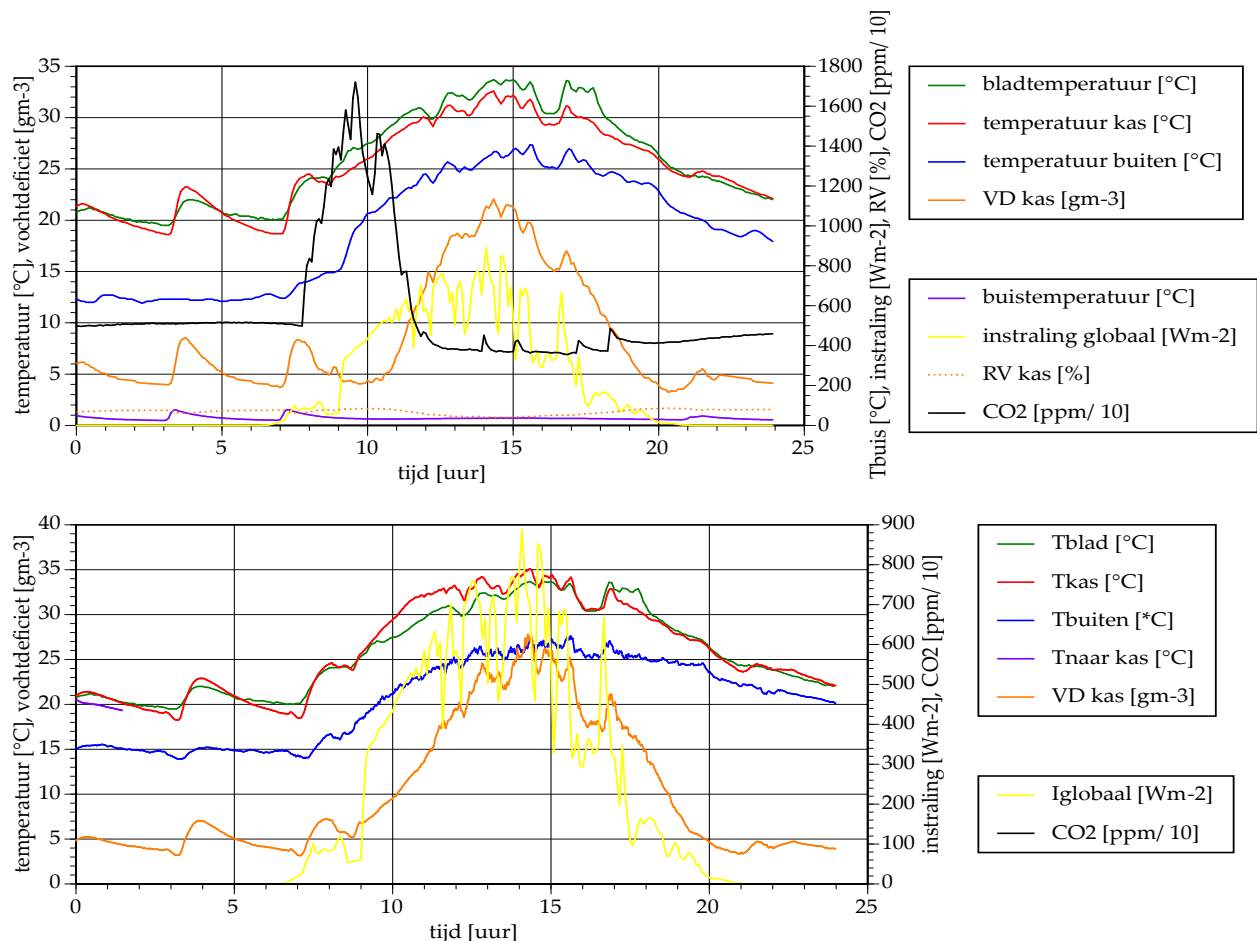
Deze 2 positieve vermogens zijn gelijk aan de 3 negatieve vermogens in de kas welke de kas ontvochtigen:

- ontvochtiging van de HortiAir. Vooral bij hoge temperaturen bevat de lucht veel damp, en kan de HortiAir veel ontvochtigen. In dit geval ontvochtigt de HortiAir meer dan de plant verdampt, hierdoor kan er extra bevochtigd (koelvermogen) worden in de kas
- condens op het kasdek
- infiltratie, of verliezen van binnen de kas naar buiten

De hoeveelheid *verdamping in de kas* op het hoogste punt is 91 Wm^{-2} , dit komt overeen met $9,6 \text{ kgh}^{-1}$ voor de complete proefkas van 72 m^2 . In werkelijkheid is er ongeveer $3,5 \text{ kgh}^{-1}$ geïnstalleerd. Dit is te weinig om het vochtdeficiet van 2 gm^{-3} te realiseren.

3.3 vergelijkende meting zonder verneveling in de kas

Fig. 3.6 geeft een meting waarbij de verneveling in de kas niet werkte. De meting is van 20 augustus 2011, de omstandigheden lijken op die van 5 oktober, de instraling is wat hoger. Tnaarkas is niet weergegeven in het fig. met metingen van de HortiAir.

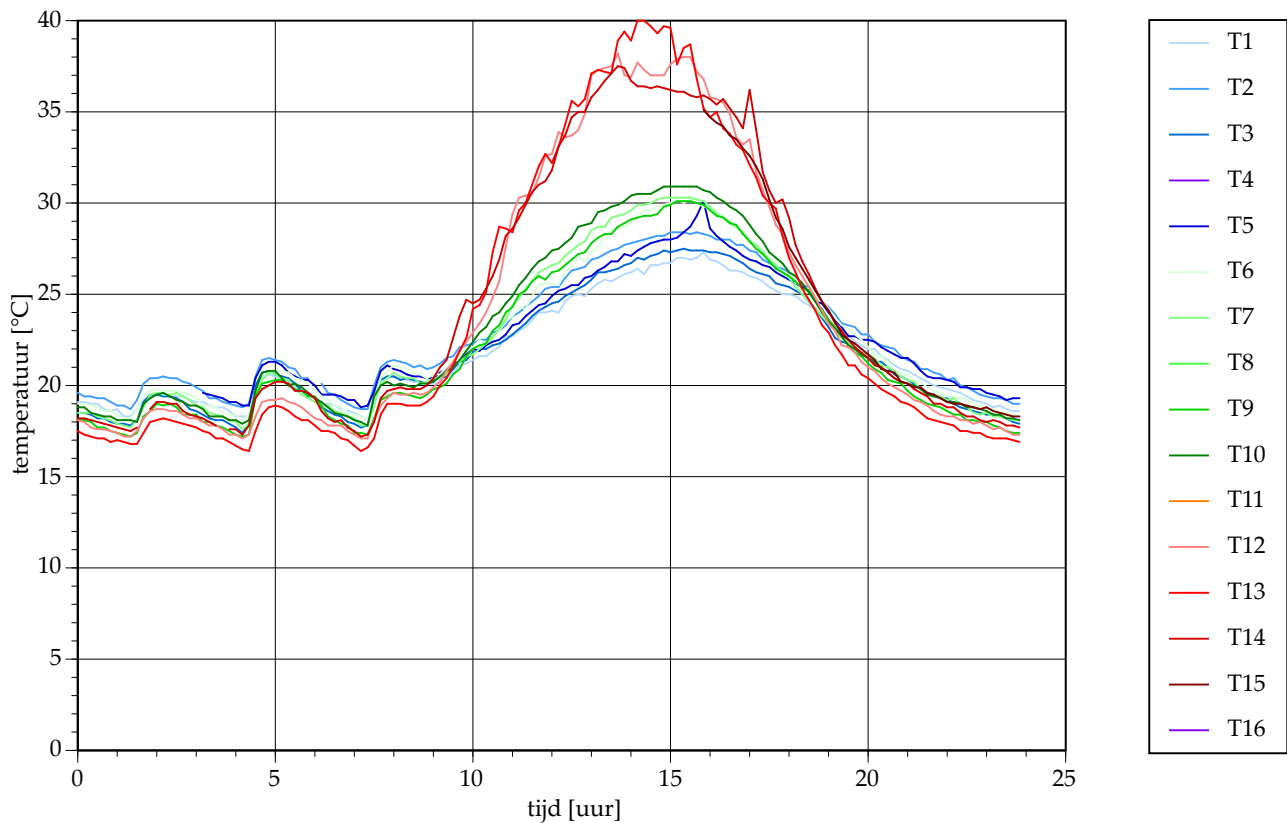


figuur 3.6 20 augustus 2011, warme dag met veel instraling boven: HAS; onder: HortiAir

De meting wordt vergeleken met fig. 3.1. Om ongeveer 8.00 stijgt de temperatuur tot boven 24 °C, de HortiAir schakelt in de koelstand. De temperatuur stijgt verder, omdat de verneveling in de kas op deze dag niet werkte stijgt ook het VD, zowel bij de meting van de HortiAir (bovenin de kas) als bij de meting van de HAS (tussen het gewas). In fig. 3.1 daalde het VD tot onder 2 gm⁻³, omdat daar geregeld werd op het hoge VD van bovenin de kas, en er continu met maximale capaciteit verneveld werd. Fig. 3.6 toont aan dat met minder (in dit geval geen) verneveling, het VD juist stijgt. Het is mogelijk om het VD onder controle te houden door de meting van het VD rond de planten te gebruiken om op te regelen, ofwel de lucht voor de HortiAir daar af te zuigen.

3.4 metingen Pedak

De metingen van Pedak geven een maximum temperatuur tussen 37 °C en 40 °C aan boven het gewas (T11 t/m T15, rode lijnen). Tussen de planten is de temperatuur acceptabel; tussen 27 °C en 31 °C. Deze metingen bevestigen de metingen van fig. 3.1. De HortiAir zuigt warme lucht af van bovenin de kas, terwijl de temperatuur tussen de planten lager is.

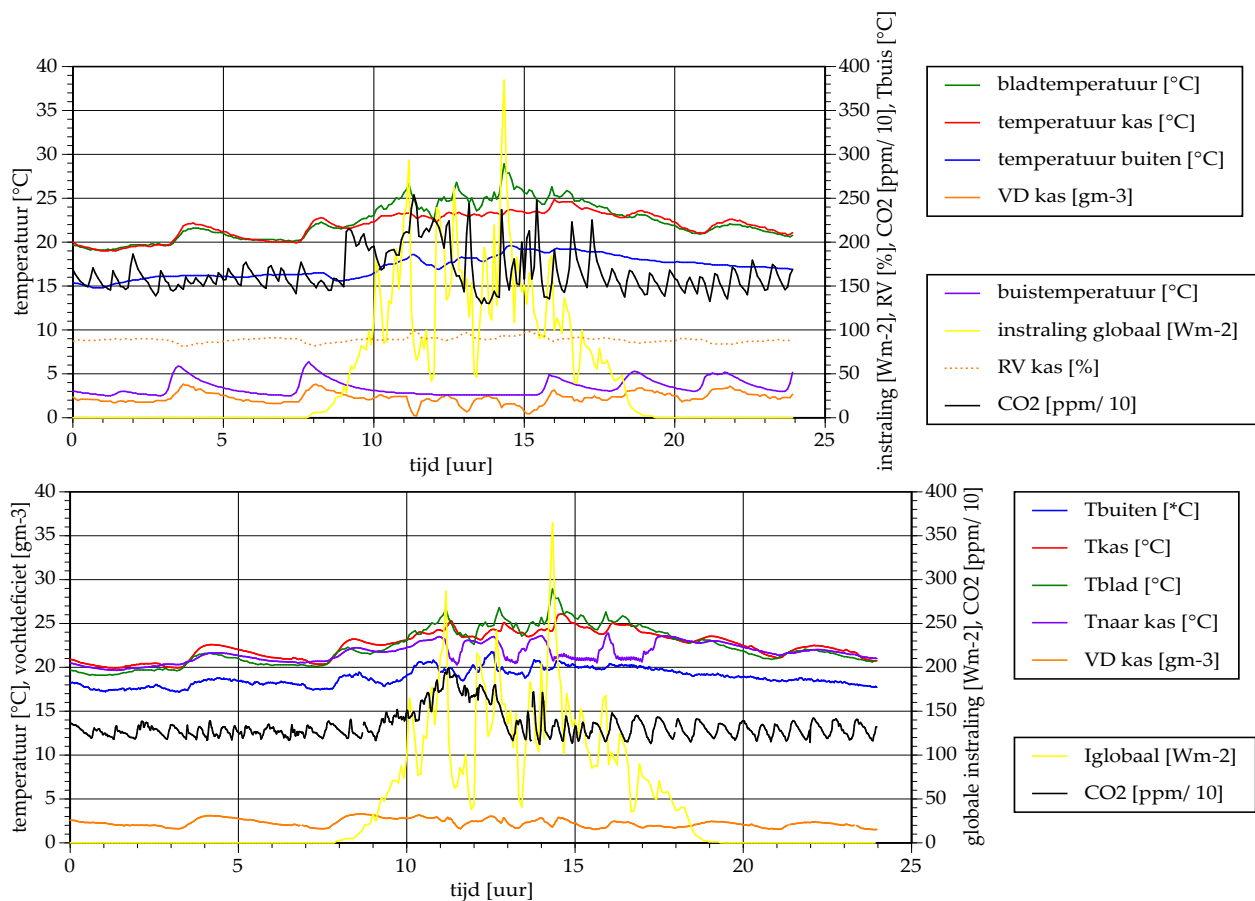


figuur 3.7 metingen Pedak

4 5 oktober 2011; warme dag weinig instraling

4.1 meting

5 oktober was een warme dag met weinig instraling. Zowel de temperatuur (tussen 20 °C en 24 °C) als het vochtdeficiet (tussen 2 gm⁻³ en 4 gm⁻³) werd de gehele dag door geregeld. Zie fig. 4.1, met bovenin de HAS meting, en onderin de HortiAir meting.



figuur 4.1 meting in de proefkas op 5 oktober 2011-10-31 boven: HAS; onder: HortiAir

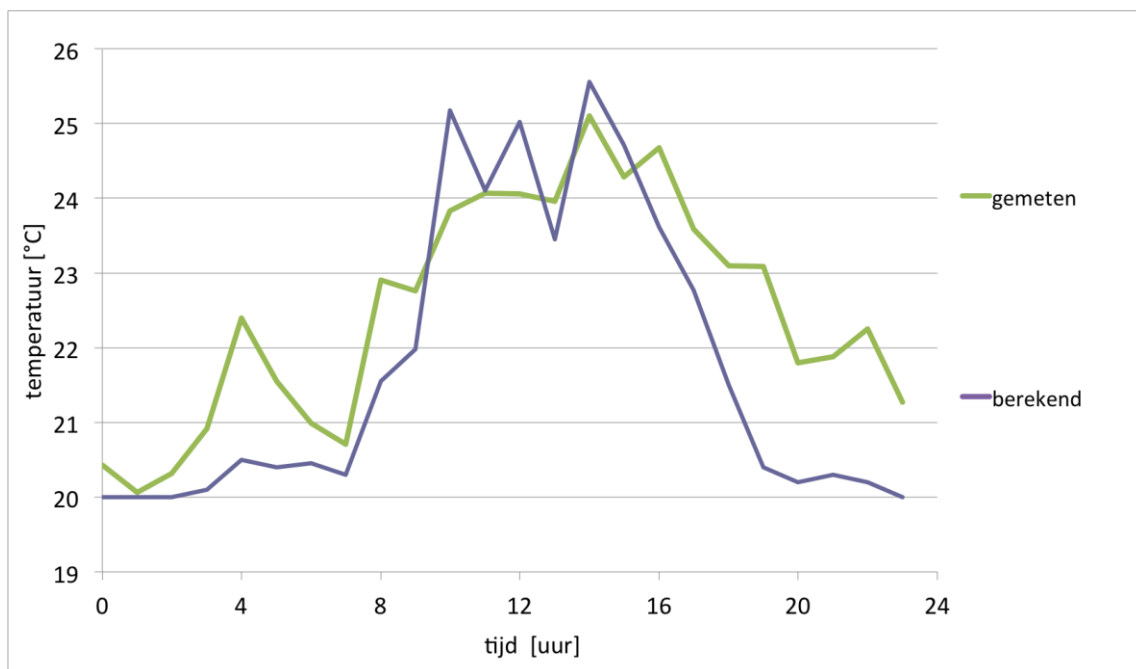
's Nachts gaat de verwarming aan om de temperatuur te regelen, maar ook om het vochtdeficiet te regelen. Overdag schakelt de HortiAir een paar keer van koelstand naar warmteterugwinstand. Dit is goed te zien aan *Tnaarkas* (paars), deze geeft de temperatuur aan die de HortiAir terugvoert naar de kas.

Vochtdeficiet

Ook in deze meting zakt het vochtdeficiet in de HAS meting een paar keer tot onder 2 gm^{-3} . Dit is weer te verklaren door het regelen op de metingen bovenin de kas in plaats van tussen de plant. Zodra de HortiAir overschakelt op koelen wordt extra koelvermogen gecreëerd door te vernevelen in de kas. Het VD mag dalen tot 2 gm^{-3} , omdat de HortiAir regelt op het hoge VD bovenin de kas, is er ruim de mogelijkheid om te bevochtigen. De nevel daalt in de kas, hierdoor is het VD bij de plant (met een lagere temperatuur) flink lager. Het VD is eenvoudig in de hand te houden als de bevochtiging pas later ingeschakeld wordt, en er geregeld wordt op het VD bij de plant.

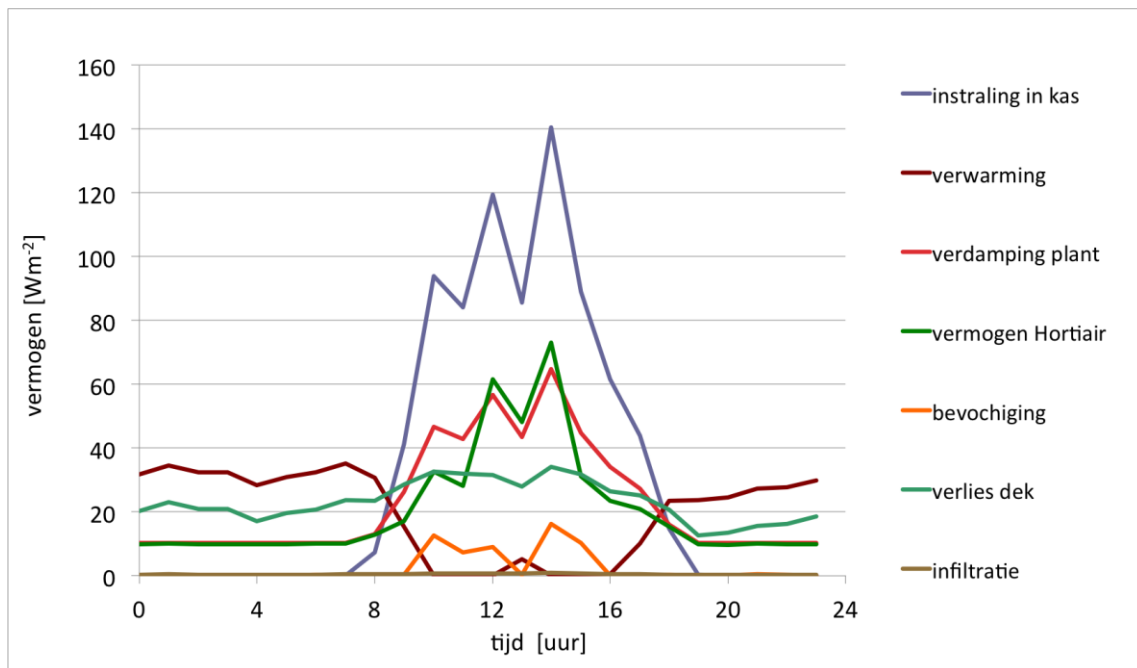
4.2 berekeningen

De metingen worden vergeleken met berekeningen, fig. 4.2 is een vergelijking van de berekende en de gemeten waarden.



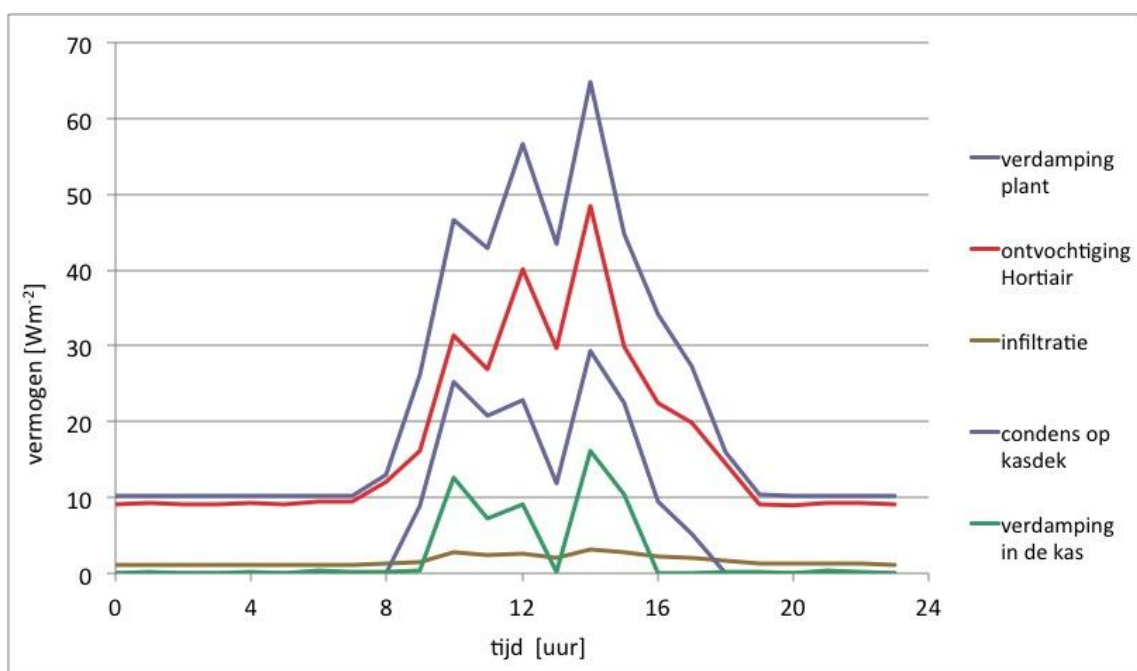
figuur 4.2 gemeten waarden en berekende waarden

Zowel in de meting als in de berekening kan de HortiAir de gehele dag regelen op temperatuur en vochtdeficiet. Fig. 4.3 is een overzicht van de energiestromen.



figuur 4.3 berekende energiestromen

Fig. 4.4 is een overzicht van de verdamping en ontvochtiging.



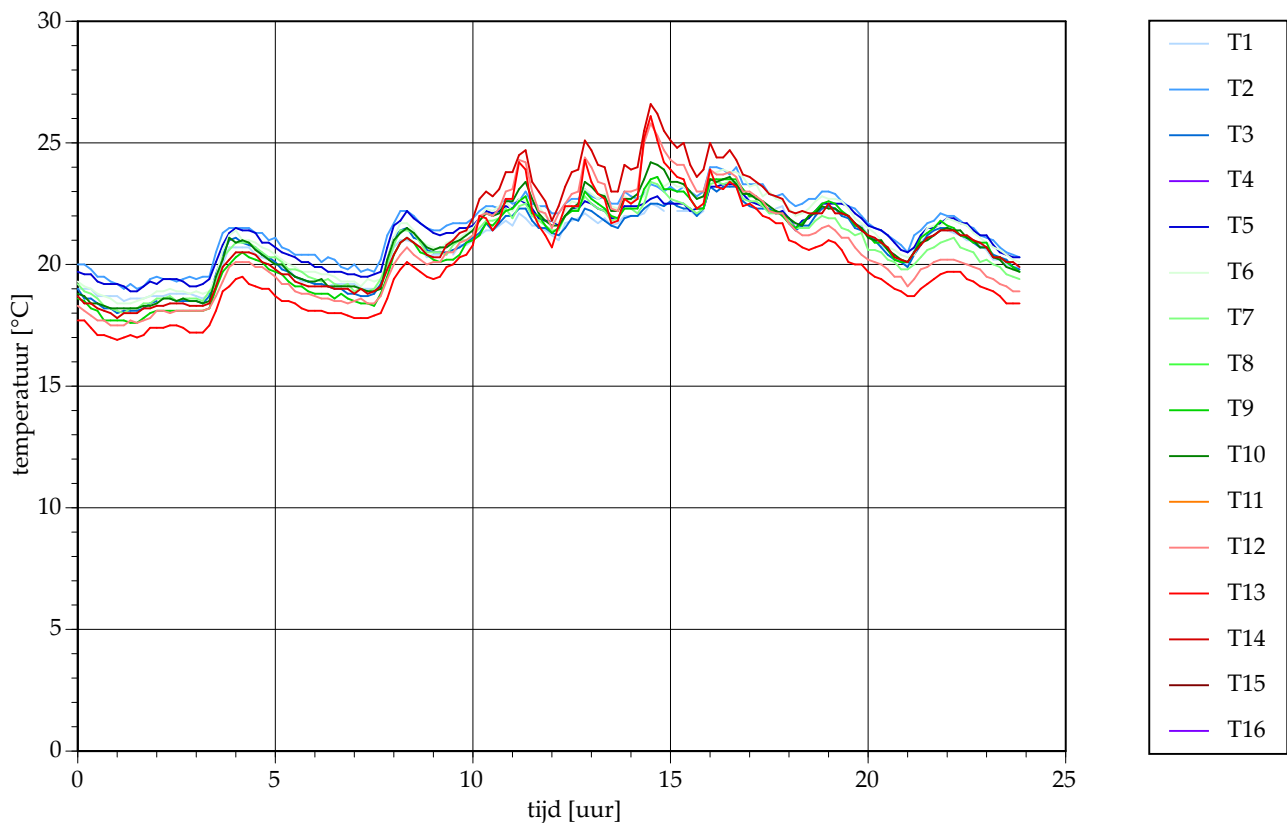
figuur 4.4 verdamping en ontvochtiging

De HortiAir ontvochtigt bijna de gehele vochtproductie van de plant. In de warme uren condenseert er daarnaast een deel op het kasdek. Om extra koelvermogen te creëren, wordt nog een kleine hoeveelheid water in de kas verdampt.

4.3 metingen Pedak

Bij weinig zoninstraling is de temperatuur over de gehele kas constant. Fig 4.5 geeft aan dat alleen bij pieken in de zoninstraling de temperatuur bovenin de kas toeneemt ten opzichte van de temperatuur tussen de planten.

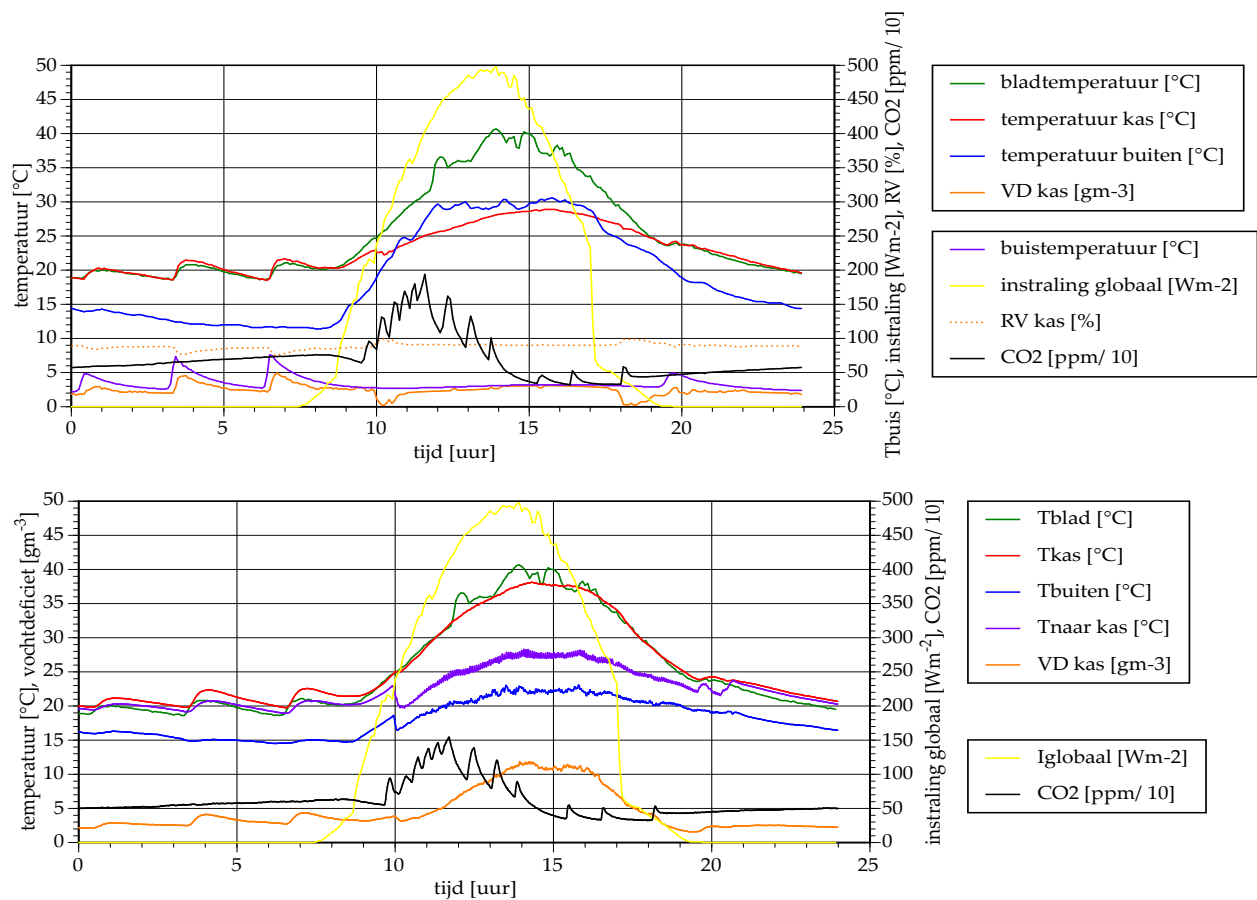
Opvallend is dat in de nacht de temperatuur bovenin de kas juist lager is dan die tussen de planten., dit duidt op uitstraling, de werkelijke temperatuur zal iets hoger liggen.



figuur 4.5 metingen Pedak

5 1 oktober 2011; warme dag veel in- straling

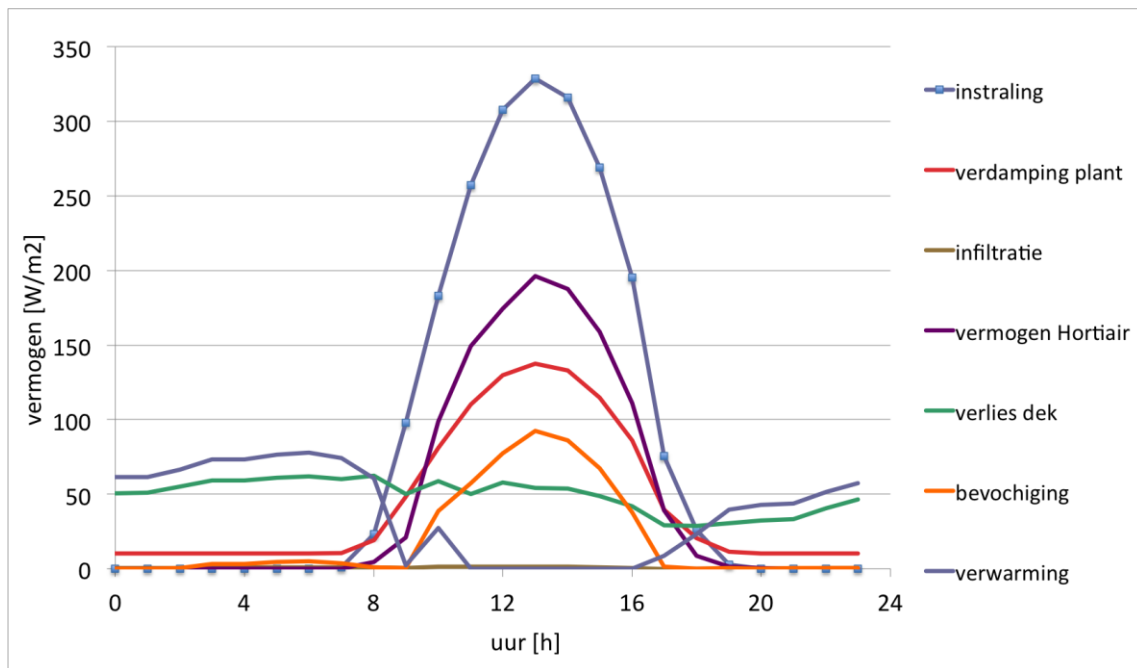
1 oktober was een gedenkwaardige dag, een uitzonderlijk mooie zonnige dag. Het weer leek erg op dat van 2 oktober, fig. 5.1 geeft de metingen in de kas weer.



figuur 5.1 meting in de proefkas op 1 oktober 2011-10-3131; boven: HAS; onder: HortiAir

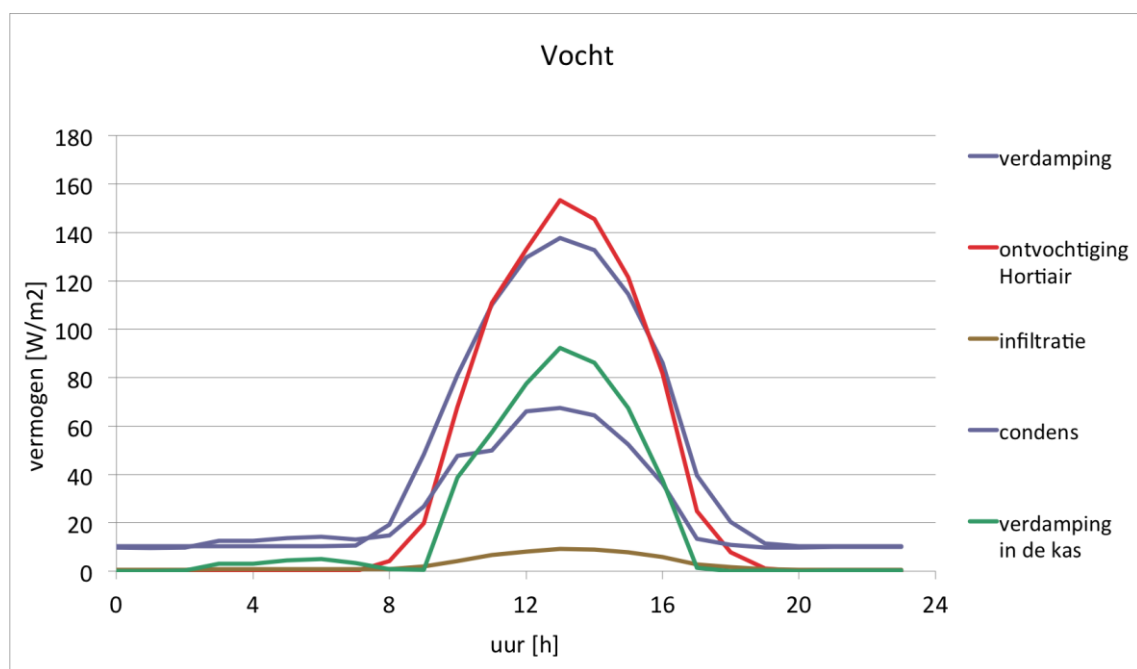
Fig. 5.1 lijkt in alle opzichte op fig. 3.1, en toont aan dat de test betrouwbaar zijn (zelfde resultaten bij zelfde omstandigheden). Er is een PowerPoint file beschikbaar met meet data tussen 19 augustus en 16 november, zowel met de metingen van de HAS als die van de HortiAir.

Fig. 5.2 is een overzicht van de energiestromen.



figuur 5.2 berekende energiestromen

Fig. 5.3 is een overzicht van de verdamping en ontvochtiging.

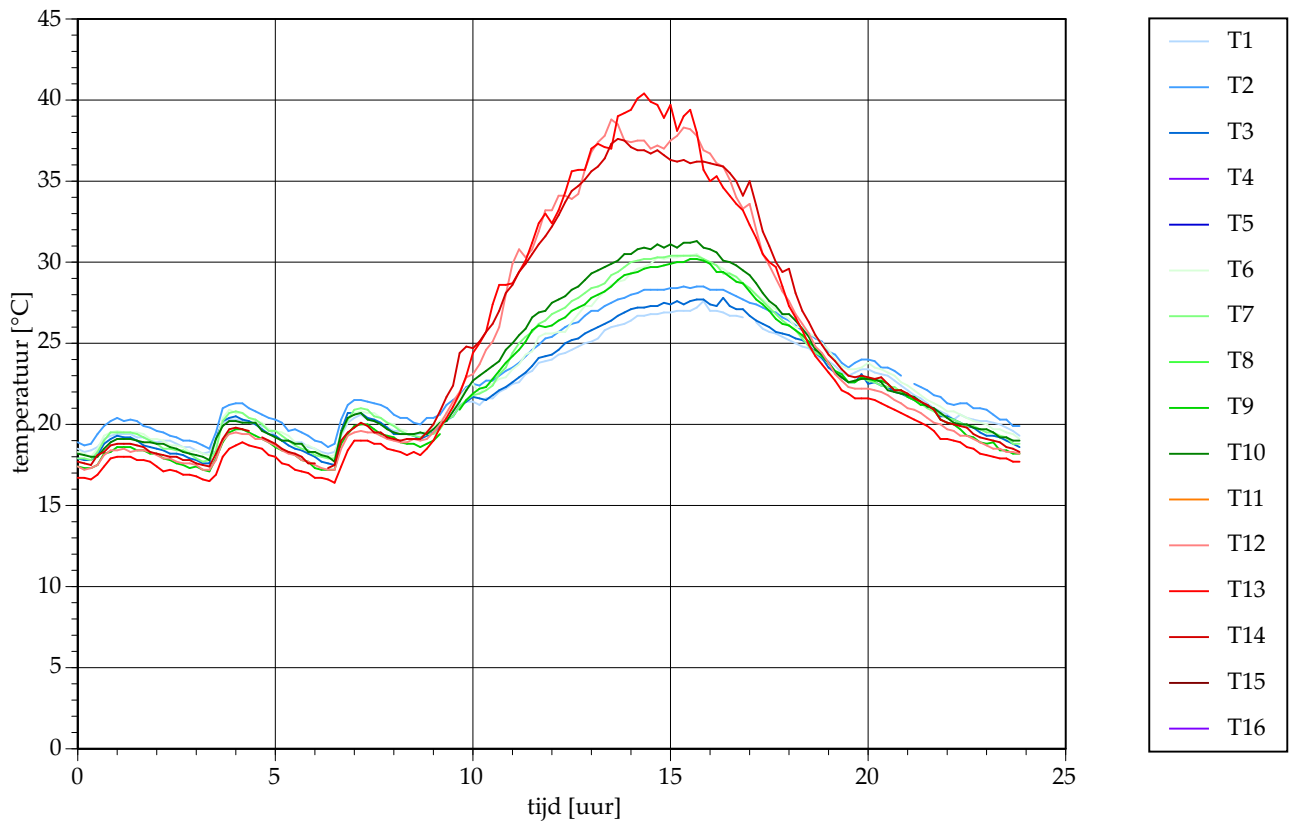


figuur 5.3 verdamping en ontvochtiging

5.2 metingen Pedak

De metingen van Pedak, fig. 5.4, geven een maximum temperatuur tussen 37 °C en 40 °C aan boven het gewas (T11 t/m T15, rode lijnen). Tussen de planten is de temperatuur

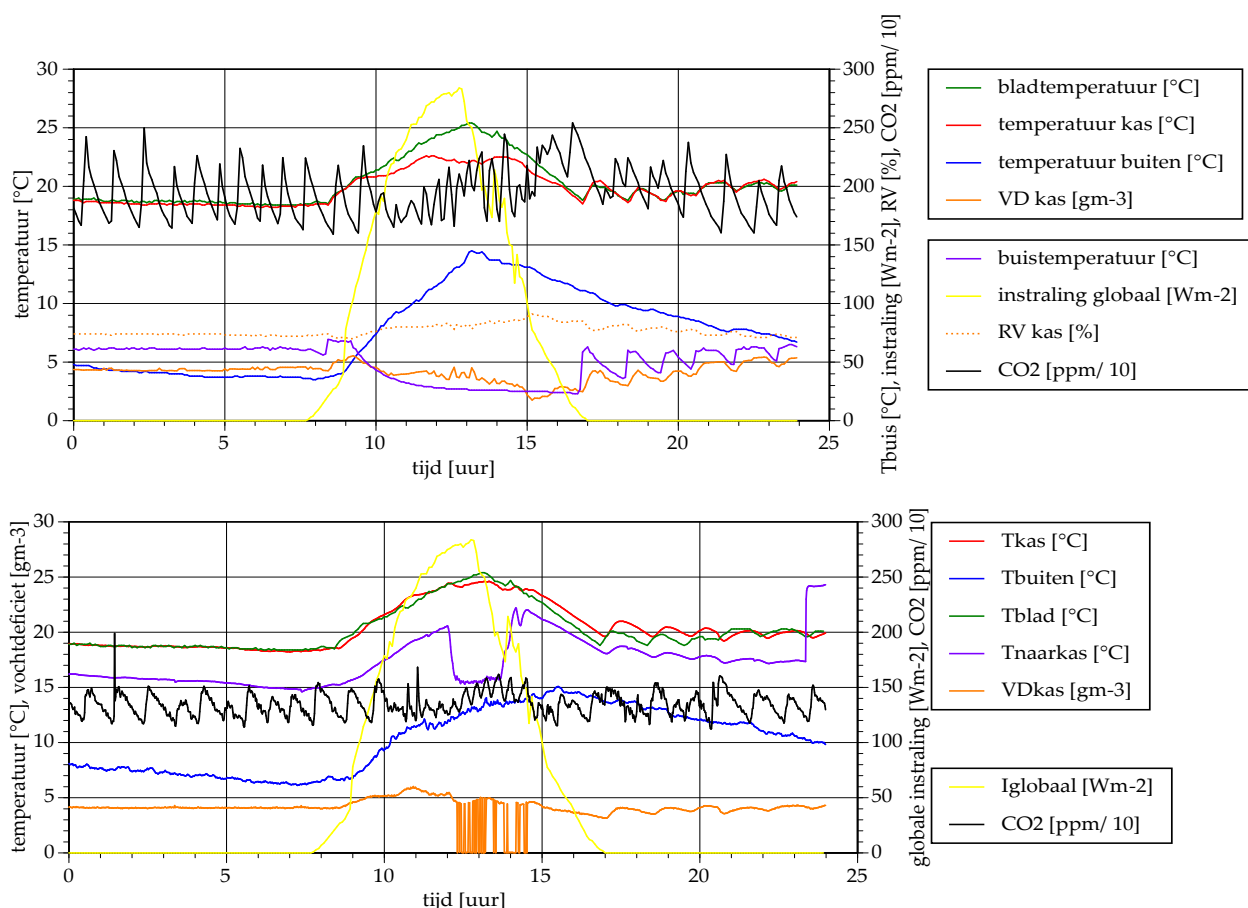
acceptabel; tussen 27 °C en 31 °C. De metingen komen overeen met die uit fig. 5.1. De HortiAir zuigt warme lucht af van bovenin de kas, terwijl de temperatuur tussen de planten is lager. Dit geeft hetzelfde resultaat als op 2 oktober (fig. 3.7)



figuur 5.4 metingen Pedak

6 12 november 2011; koude dag

11 november was een koude dag, de buitentemperatuur varieerde tussen de 3 °C en 14 °C. Fig. 6.1 geeft de metingen weer.



figuur 6.1 meting in de proefkas op 11 november 2011; 31 boven: HAS; onder: HortiAir

Vochtdeficiet

Voor de HortiAir is dit een “gemakkelijke” dag, de gehele dag door is het vochtdeficiet te hoog (boven 4 gm⁻³), ontvochtigen is niet nodig. Slechts tussen 12.00 en 14.30 uur is er een koelbehoefte, en schakelt de HortiAir in om te koelen.

Ook 's nachts is het vochtdeficiet > 4 gm⁻³, dit heeft een aantal oorzaken:

- Er wordt geregeld op een vrij laag vochtdeficiet tussen de 2 en 4 gm⁻³, hierdoor is er niet snel een vochtoverschot, en is niet snel ontvochtiging gewenst.
- Door het lage vochtdeficiet is er altijd veel condensatie op het kasdek

- Er wordt geen energiescherm ingezet, er is hierdoor veel condensatie op het kasdek
- 's nachts wordt een (relatief) hoge temperatuur aangehouden (20 °C), hierdoor moet veel verwarmd worden, waardoor het vochtdeficiet stijgt, bovendien is er bij hogere temperaturen (en laag vochtdeficiet) veel condensatie op het kasdek.

In de proefkas in Den Bosch zal het hierdoor relatief weinig voorkomen dat er zowel ontvochtigd als warmte teruggewonnen moet worden. Bij het inzetten van een energiescherm zal dit vaker voorkomen.

Buitentemperatuur

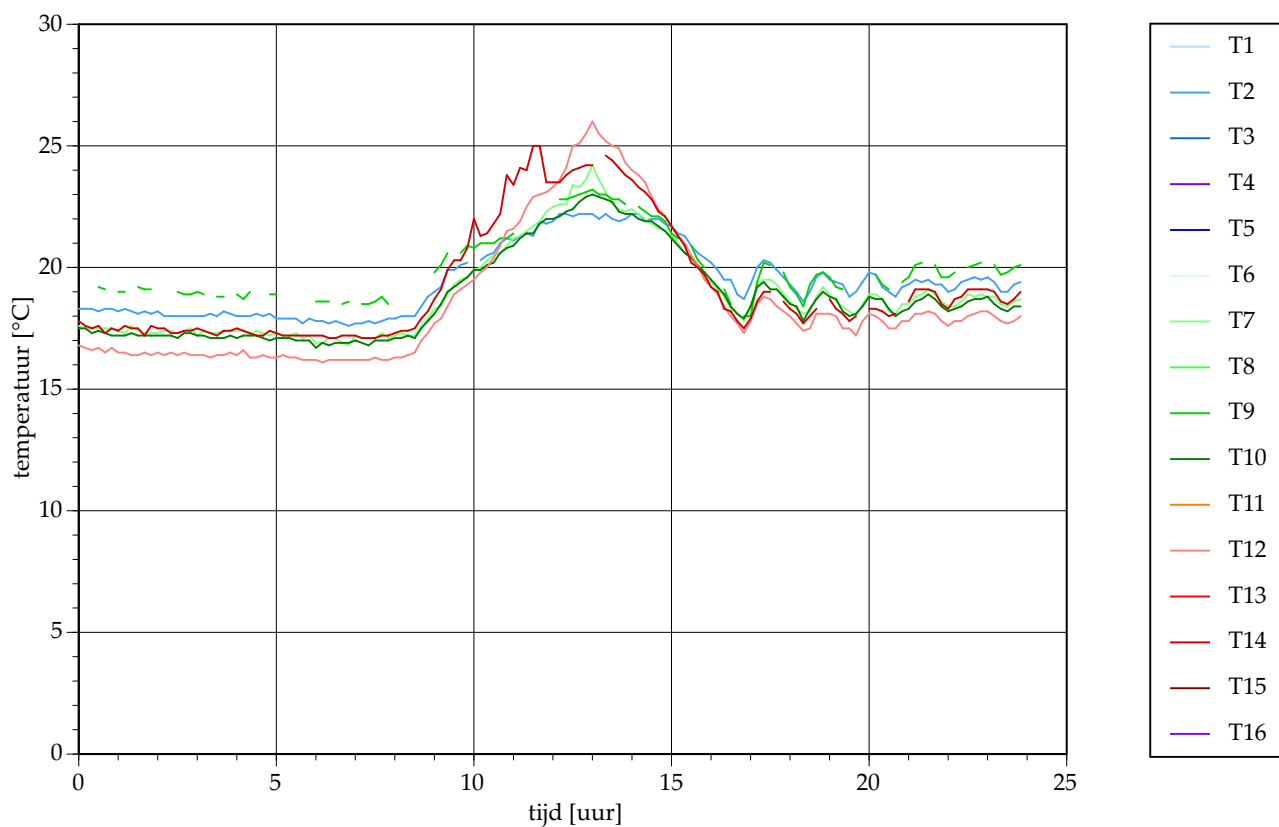
Opvallend is dat de buitentemperatuur bij de HAS meting lager is. Dit is te verklaren doordat de buitentemperatuur van de HortiAir beneden in de het aanzuigkanaal gemeten wordt. Tijdens deze meting is de flow door de HortiAir praktisch 0, er wordt dus een luchttemperatuur gemeten van de stilstaande lucht in het aanzuigkanaal, die door warmtegeleiding vanuit de kas is toegenomen.

Kastemperatuur

De temperatuur in de kas is bij de meting van de HAS met instraling steeds een paar graden lager dan bij de HortiAir meting. De HAS meting is dan ook tussen de planten, de meting van de HortiAir is van de lucht bovenin de kas.

6.2 metingen Pedak

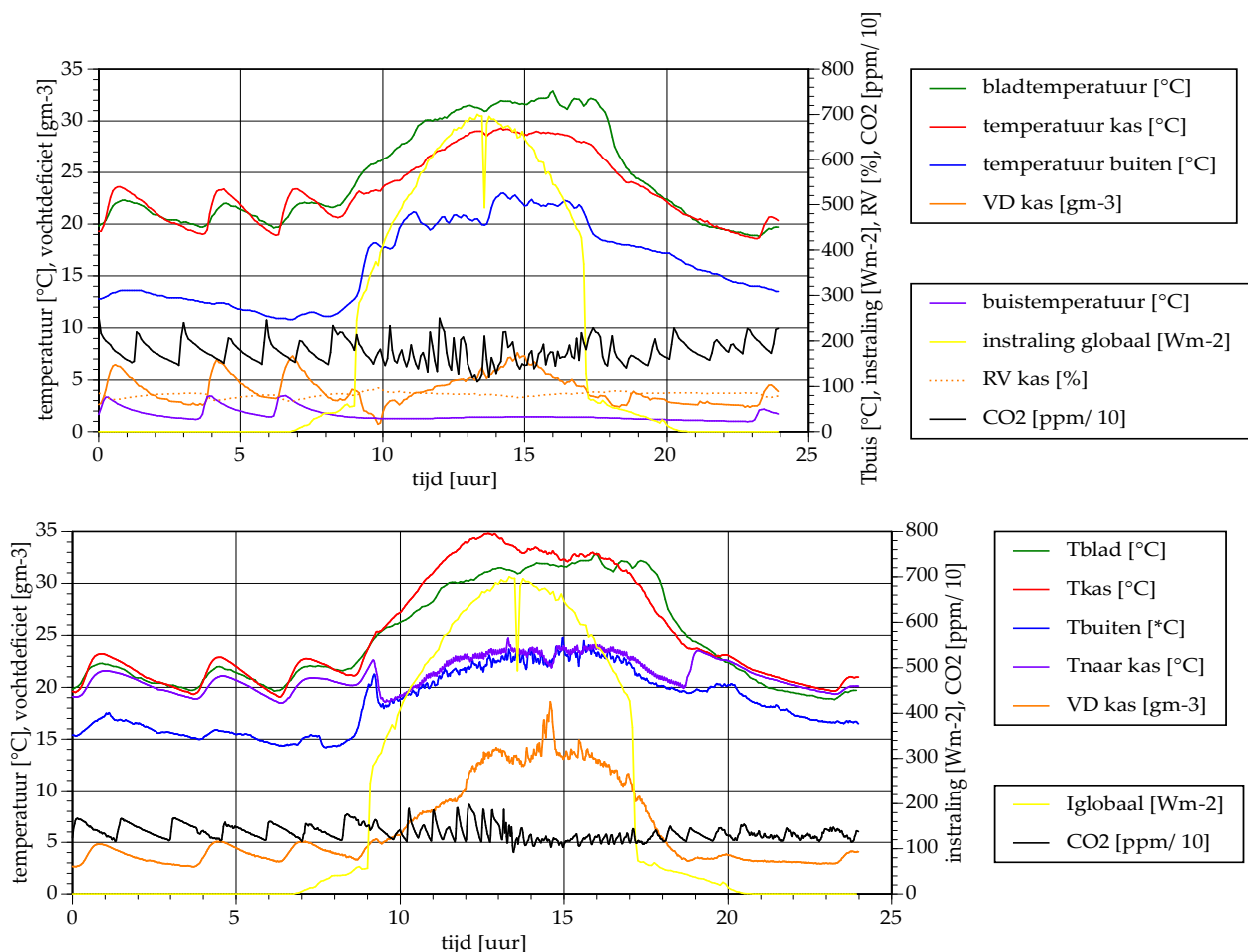
De metingen van Pedak (fig. 6.2) laten een egaal temperatuurveld zien. Alleen tussen 11.00 en 14.00 loopt de temperatuur bovenin de kas op. Dit is het moment dat de zoninstraling maximaal is, maar niet boven 300 Wm^{-2} uitkomt, en de HortiAir in de koelstand schakelt.



figuur 6.2 metingen Pedak

7 1 september 2011; veel instraling

1 september 2011 is een dag met veel instraling, tot 700 Wm^{-2} . Fig. 7.1 geeft de metingen weer.



figuur 7.1 veel instraling 1 september 2011. Boven: meting HAS; onder: meting HortiAir

Temperatuur

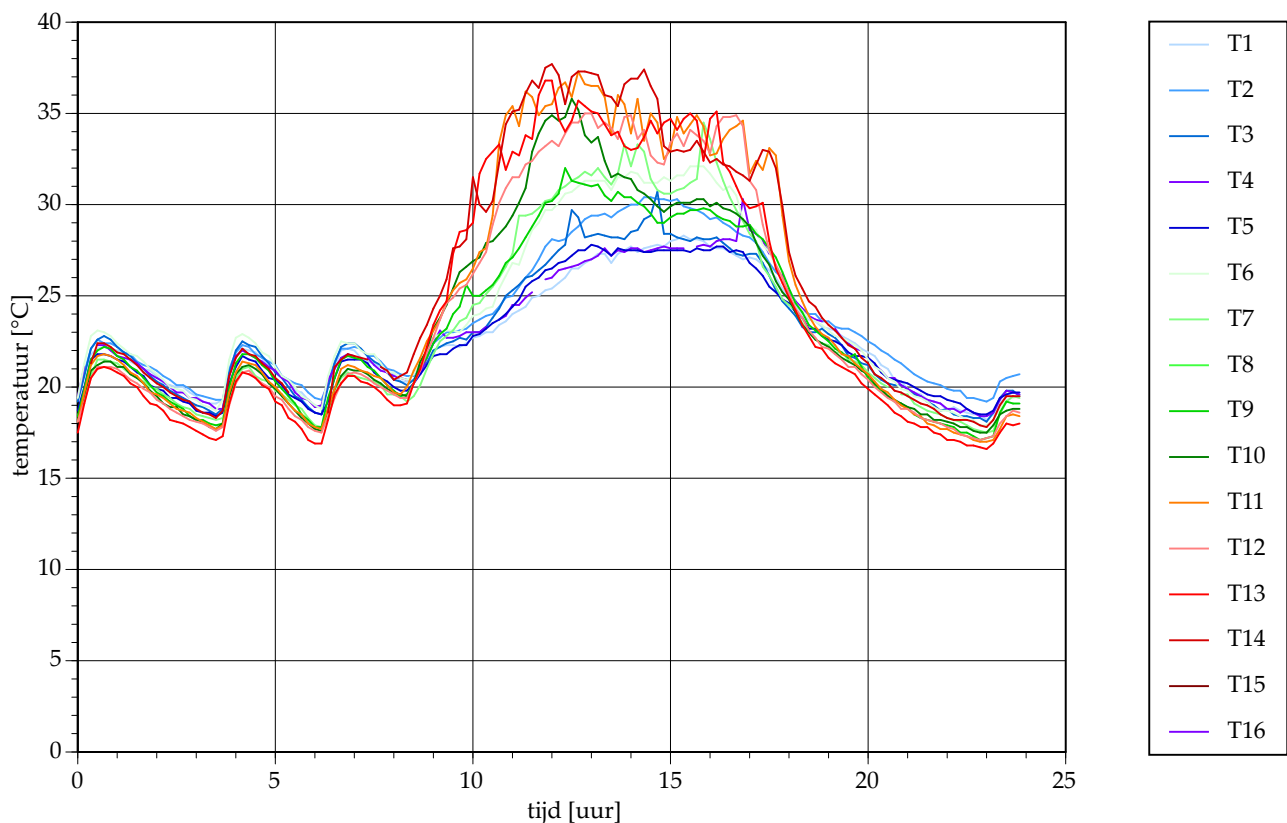
De maximum temperatuur van kaslucht is bij de meting van de HAS bijna 30°C , de HortiAir meet tot 35°C . Bovenin de kas is het duidelijk warmer. Opvallend is dat het verschil tussen de HAS en de HortiAir kleiner is dan in fig. 3.1, waar de instraling lager was ($< 500 \text{ Wm}^{-2}$). Dit komt door de lagere buitentemperatuur (24°C tegen 30°C)

Vochtdeficiet

Het vochtdeficiet in de meting van de Hortiair loopt op tot een waarde van bijna 18 gm^{-3} , in de meting van de HAS blijft deze onder de 7 gm^{-3} . Ook hier is de positie van meten bepalend. Het vochtdeficiet bij de plant is de waarde waar op geregeld zou moeten worden, de HAS meting toont aan dat dit met de HortiAir onder deze condities net niet lijkt te lukken, maar met een grotere capaciteit van de bevochtiging zal ook onder deze condities het klimaat gecontroleerd kunnen worden.

7.2 metingen Pedak

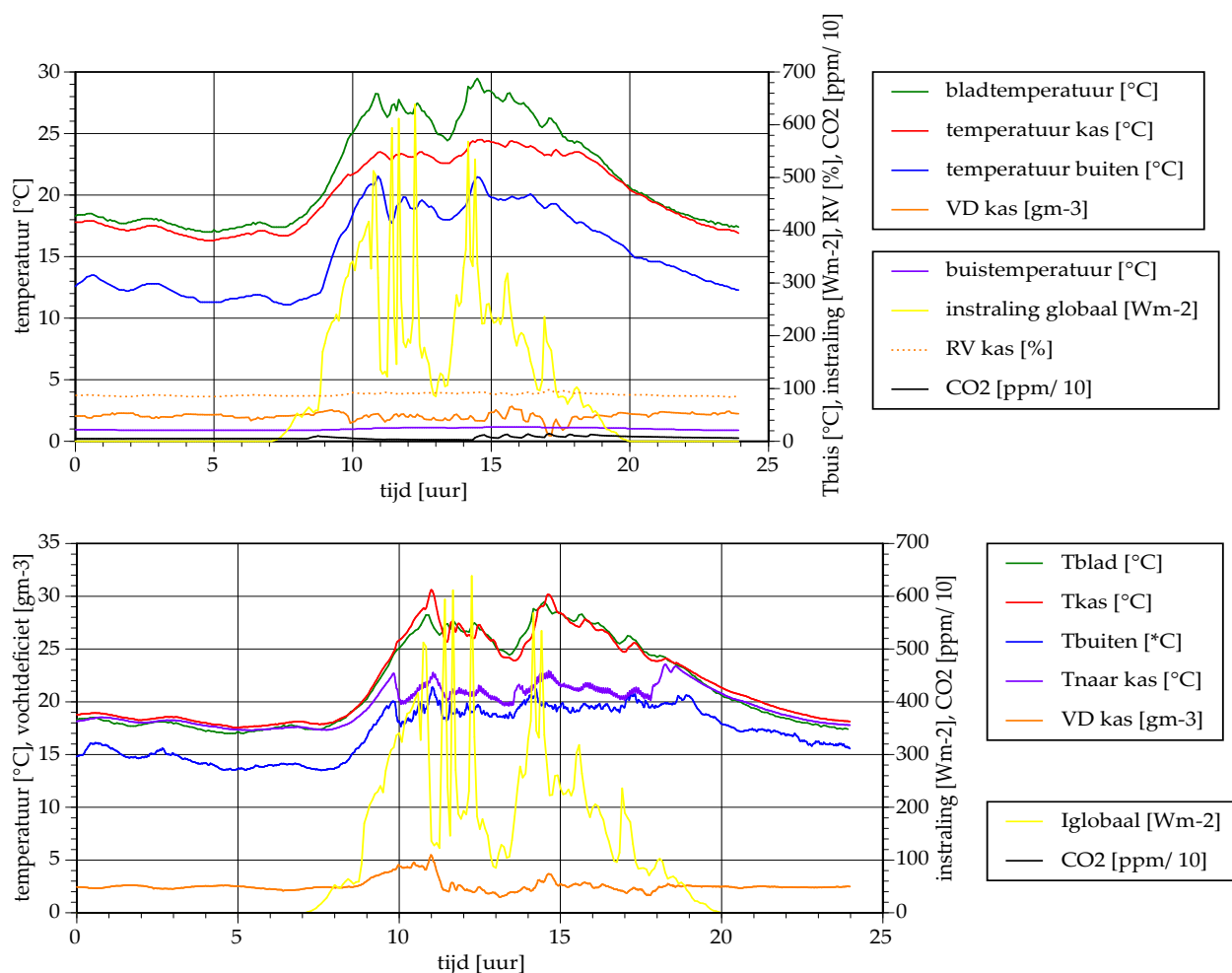
Op 18 augustus zijn er nieuwe komkommerplanten geplaatst, op 1 september waren de planten nog niet volgroeid. De temperatuur bovenin de kas is niet zo hoog als tijdens de metingen met volgroeide planten (fig 3.7 en fig 5.4). Waarschijnlijk komt de zinstraling als warmte vrij op lage plekken in de kas. De meting komt overeen met fig. 7.1, De Horti-Air zuigt de lucht bovenin de kas af (maximaal $\pm 35^\circ\text{C}$, de temperatuur tussen de planten is maximaal 29°C .)



figuur 7.2 metingen Pedak

8 15 september 2011; wisselend bewolkte dag

15 september 2011 is een dag met bewolking met soms een piek in de instraling, tot 650 Wm^{-2} . Fig. 8.1 geeft de metingen weer.



figuur 8.1 bewolkte dag 15 september 2011. Boven: meting HAS; onder: meting HortiAir

Temperatuur

De temperatuur van kaslucht is bij de meting van de HortiAir steeds iets hoger, vooral tijdens de pieken in de zoninstraling. De meting van de HAS toont aan dat de temperatuur overdag gemakkelijk onder 24 °C gehouden kan worden. De buistemperatuur is niet

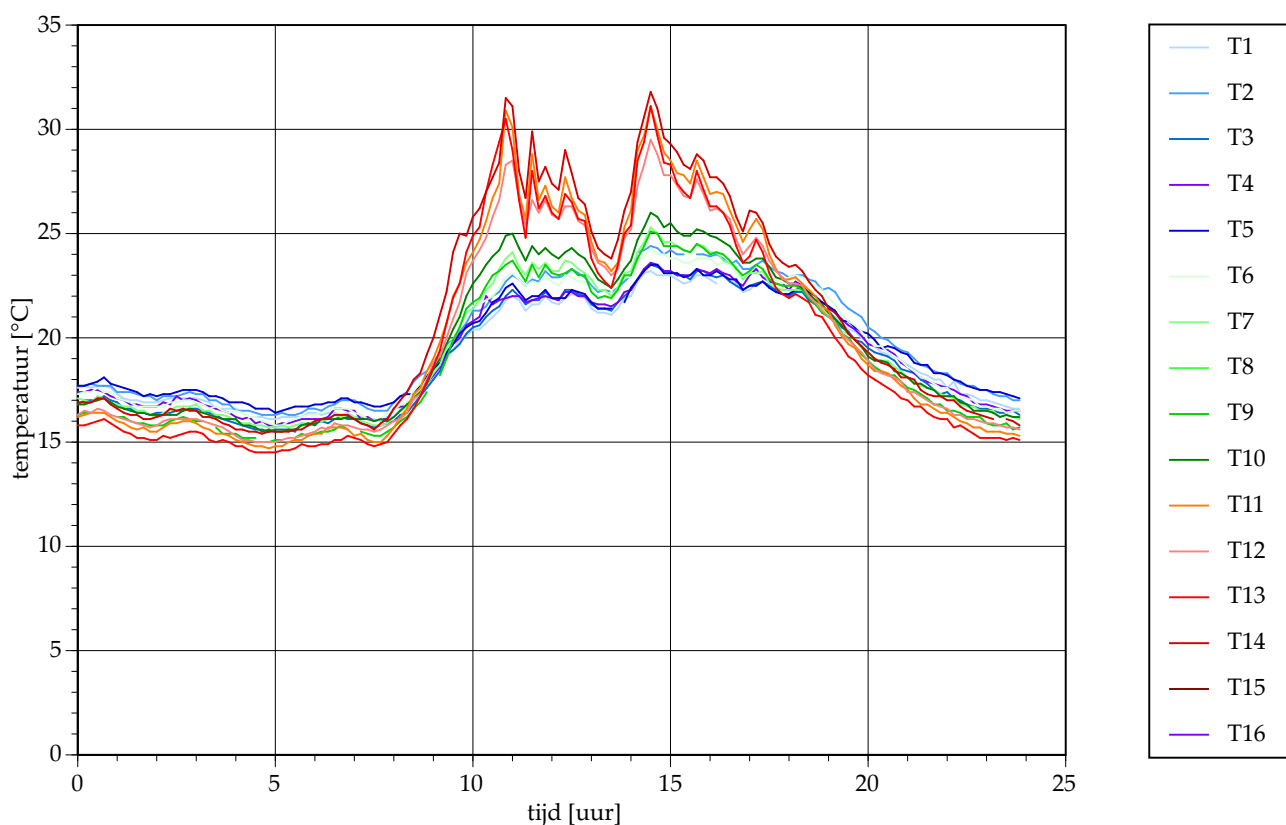
weergegeven in deze afbeelding. De temperatuur blijft 's nachts onder 20 °C, het vermogen van de verwarming (temperatuur van de buis) is te laag.

Vochtdeficiet

Het vochtdeficiet blijft bij de meting van de Hortiair de gehele dag tussen 2 en 4 gm^{-3} , er is slechts 1 uitschieter naar 5 gm^{-3} . In de meting van de HAS schommelt het vochtdeficiet de gehele dag rond 2 gm^{-3} , de periodes waarin het vochtdeficiet kleiner is dan 2 gm^{-3} kunnen voorkomen worden door minder te verdampen. Doordat de Hortiair nu niet op dit vochtdeficiet regelt gebeurt dit hier niet.

8.2 metingen Pedak

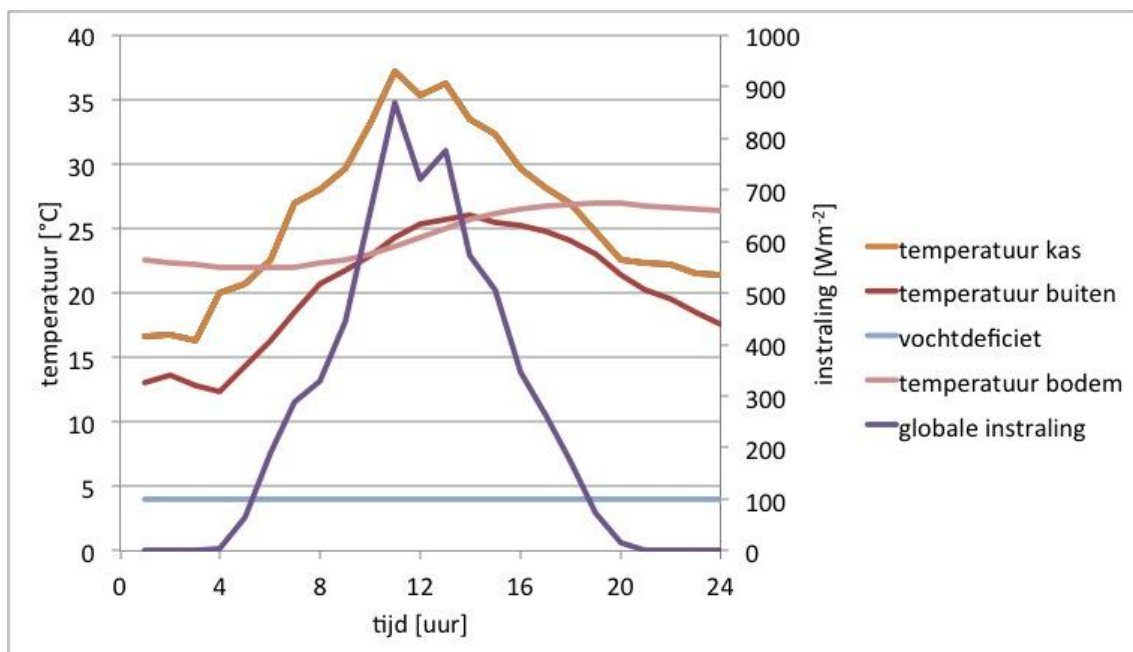
Bij weinig zoninstraling is de temperatuur over de gehele kas constant. Fig 8.2 geeft aan dat alleen bij pieken in de zoninstraling de temperatuur bovenin de kas toeneemt ten opzichte van de temperatuur tussen de planten.



figuur 8.2 metingen Pedak

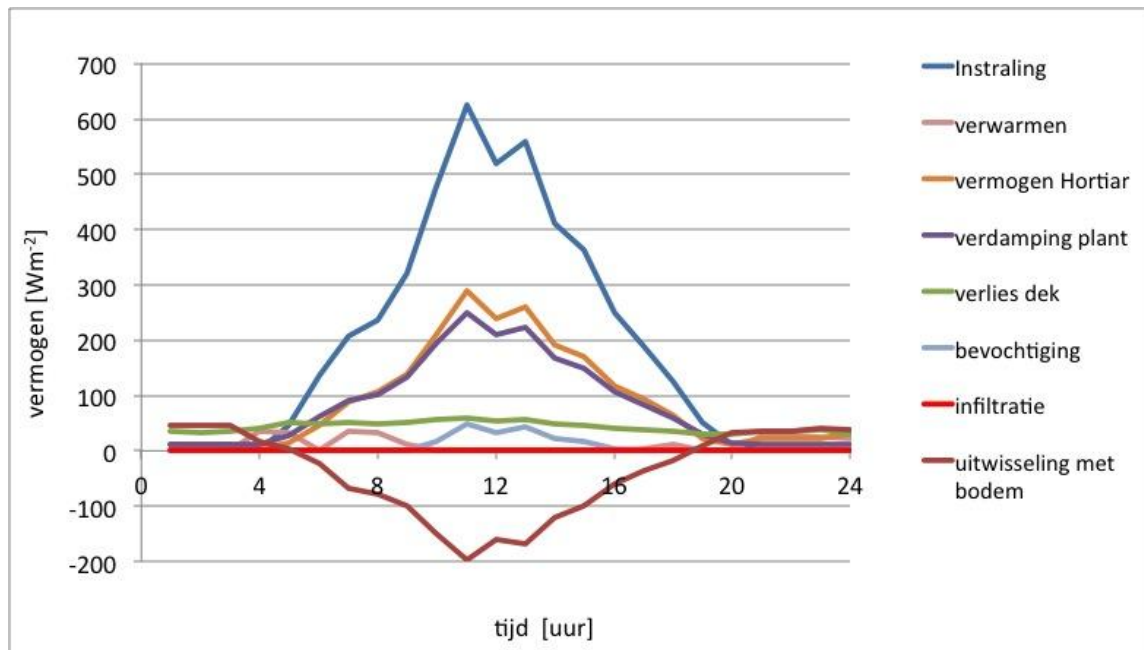
9 berekende dag; veel instraling

Van koude dagen, en van dagen met heel veel instraling zijn geen volledige metingen beschikbaar. Wel zijn er berekeningen beschikbaar. Het eerste voorbeeld is een dag met veel instraling, maximaal is de globale instraling 860 Wm^{-2} . In de berekening is uitgegaan van andere uitgangspunten dan in de eerdere voorbeelden. Het vochtdeficiet wordt geregeld tussen 4 en 8 gm^{-3} , de temperatuur wordt 's nachts op minimaal 16°C , overdag op minimaal 20°C . Er wordt rekening gehouden met een massa van de kas (de bodem) waar een gedeelte van de instraling op valt waardoor de temperatuur toeneemt, de energie wordt dan in een latere fase, als het in de kas weer kouder is afgegeven. Bovendien beschikt deze kas over een energiedek voor 's nachts. Fig. 9.1 geeft de kas –en buitentemperatuur en de instraling weer. Ook de temperatuur van de bodem is weergegeven. De temperatuur van de bodem stijgt in 24 uur met 4°C , de dag voor deze dag was dan ook een dag met duidelijk lagere temperaturen en minder instraling. Door de temperatuur van de bodem mee te nemen in de berekeningen worden de uitschieters in temperatuur wat gedempt.



figuur 9.1 condities voor de berekeningen

Fig. 9.2 geeft de energiestromen in de kas weer. De instraling is een stuk lager dan de globale instraling, voor de reflectie van het kasdek wordt een waarde van 0,72 aangehouden. Het glas heeft een reflectie van ongeveer 0,82. De constructie en vervuiling/condensatie zorgen voor 0,1 verlaging van de gemiddelde transmissie

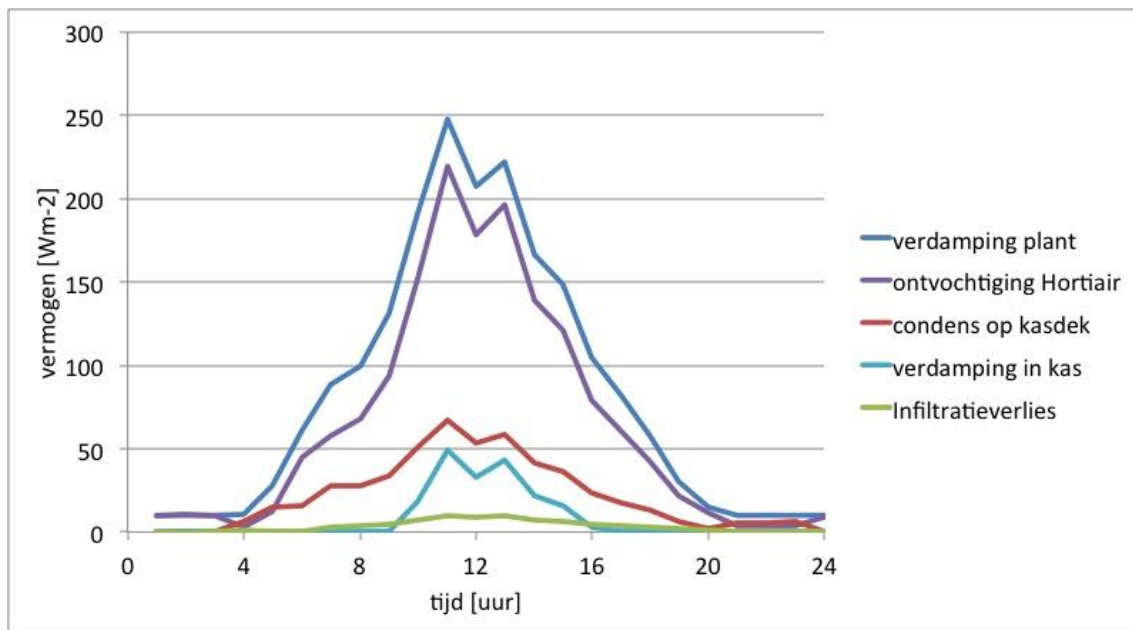


figuur 9.2 energiestromen

De hoeveelheid bevochtigen in de kas is vrij laag in vergelijking met de metingen eerder in dit verslag. Dit kan verklaard worden door:

- Er wordt geregeld op een vochtdeficiet van 4. Hierdoor ontvochtigt de HortiAir minder, en kan er ook minder bevochtigd worden.
- Er is bij een vochtdeficiet van 4 veel minder condensatie op het kasdek.
- Tijdens de uren met veel instraling wordt een gedeelte van het vermogen opgenomen door de bodem, deze heeft hierdoor ook een koelend effect.

Fig. 9.3 geeft de energiestromen door verdamping en ontvochtiging weer.

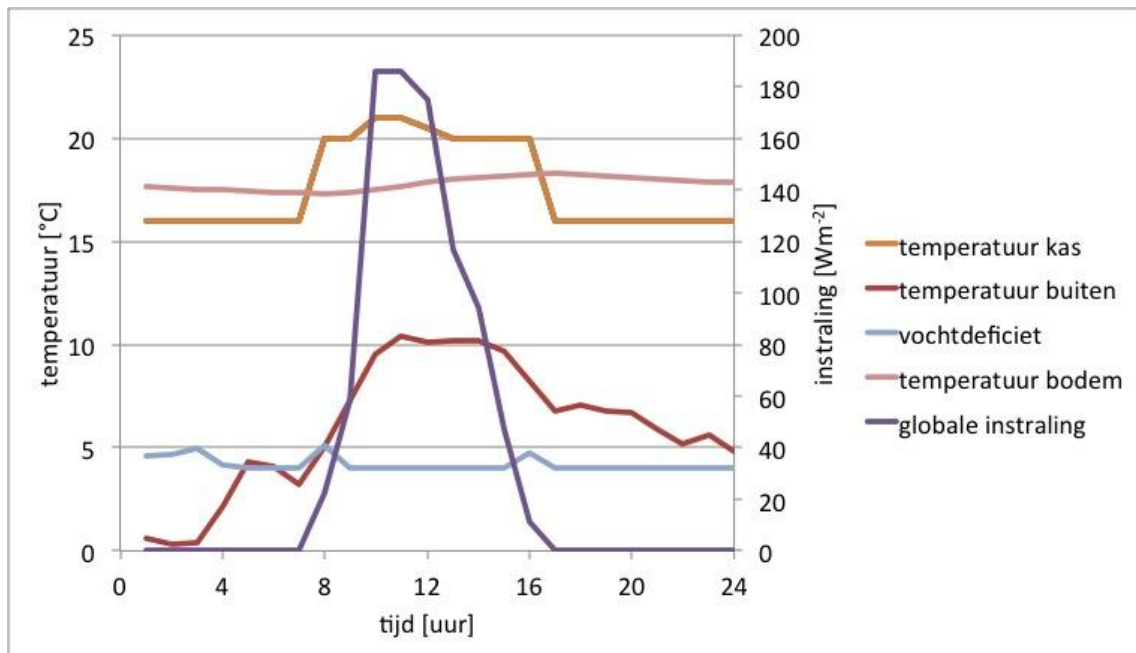


figuur 9.3 energiestromen door bevochtiging en ontvochtiging

De HortiAir voert ongeveer de gehele vochtproductie van de plant af, in de warme uren kan nog wat extra water verdampt worden.

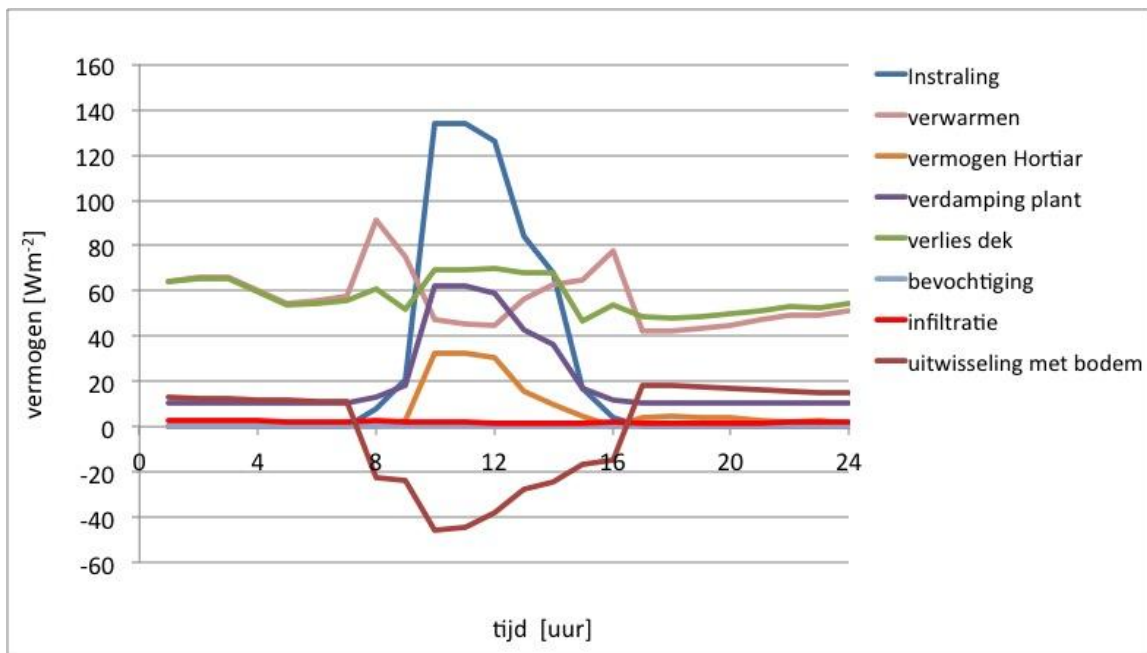
10 berekende dag; koud en weinig instraling

Het tweede voorbeeld is een koude dag. De temperatuur varieert tussen de 0 en 10 °C, de instraling is maximaal 180 Wm⁻². Fig. 10.1 geeft de kas –en buitentemperatuur en de instraling weer, de bodem van de kas schommelt rond de 18 °C.



figuur 10.1 condities voor de berekeningen

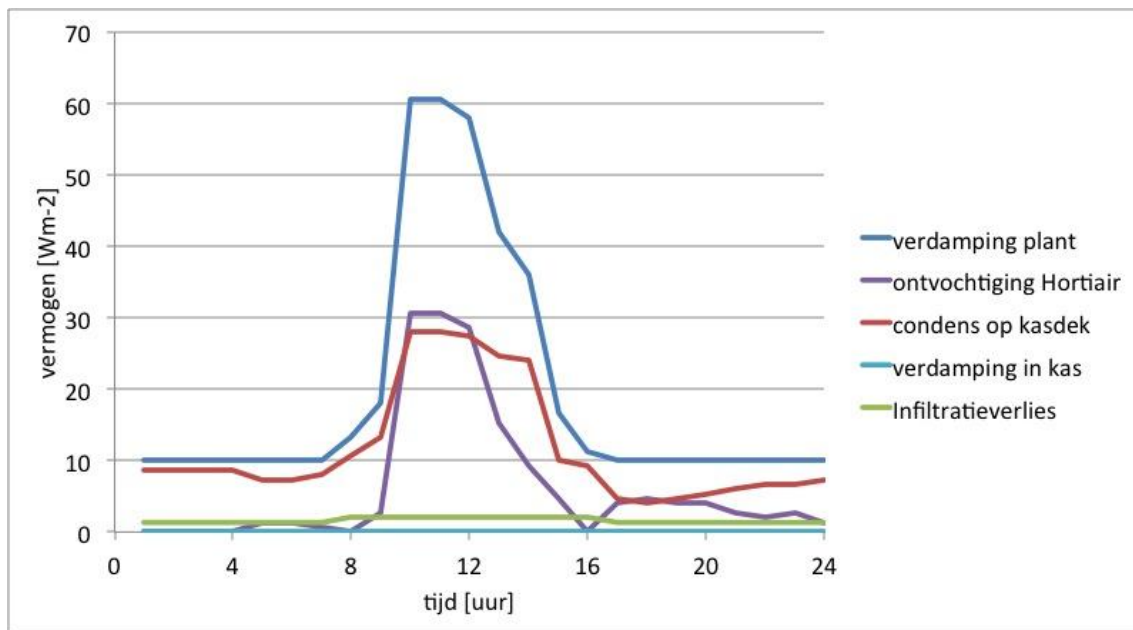
Fig. 10.2 geeft de energiestromen in de kas weer.



figuur 10.2 energiestromen

De gehele dag door moet er verwarmd worden, om de kas op resp. 16 °C en 20 °C te houden. Tijdens de piek in de zinstraling verdampt de plant zoveel (bijna 140 Wm^{-2}) dat er zelfs tot boven de 20 °C verwarmd moet worden om met de HortiAir voldoende te ontvochtigen. De HortiAir staat de hele dag in de warmteterugwinstand. Het vermogen van de HortiAir vertoont een piek in de tijd dat hij maximaal aan het ontvochtigen is omdat hier de som van het voelbare vermogen (temperatuur) en latente vermogen (ontvochtiging) weergegeven is.

Fig. 10.3 geeft de energiestromen door verdamping en ontvochtiging weer.



figuur 10.3 energiestromen door bevochtiging en ontvochtiging

De HortiAir voert ongeveer de gehele vochtproductie van de plant af, in de warme uren wordt nog wat extra water in de kas verdampt.

11 flow

In het laboratorium bij Recair in Waalwijk is de HortiAir uitgebreid getest. Tabel 11.1 geeft de resultaten weer van het volumestroom door de HortiAir bij een externe druk van 20 Pa. De luchtslang welke in Den Bosch gebruikt wordt heeft deze externe druk bij de maximale volumestroom van de HortiAir.

tabel 11.1 volumeflow door de HortiAir

	Serie kaslucht	Serie buitenlucht	Parallel kaslucht	Parallel buitenlucht
flow gemeten [kg h^{-1}]	260	340	400	430
flow gemeten [m^3h^{-1}]	215	285	335	360
Ontwerp flow [m^3h^{-1}]	240	240	380	380

Als de HortiAir in serie staat, staat de unit in de warmteterugwinstand, wel verwarmstand genoemd. Parallel is de koelstand.

12 Opbrengsten HortiAir

De opbrengsten van de HortiAir zitten enerzijds in de energiebesparingen, anderzijds in de meerproductie. Het doel van het project was niet om de besparingen en meerproductie aan te tonen. Dit is ook niet mogelijk in de kleinschalige opzet van het project.

De HortiAir levert op 3 punten winst op:

stookkosten	Voor ontvochtigen blijven de ramen dicht, de warmte wordt teruggewonnen, dit verlaagt de stookkosten
CO ₂ gebruik	De ramen blijven altijd dicht, er gaat geen CO ₂ verloren, er wordt veel minder CO ₂ toegevoerd.
meerproductie	In de periode dat er gekoeld of ontvochtigd moet worden blijven de ramen dicht, en de CO ₂ concentratie hoog. Met een maximale dosering van 100 kg ha ⁻¹ h ⁻¹ is het altijd mogelijk om de concentratie hoog te houden. Bij koelen of ontvochtigen met de ramen open gaat veel CO ₂ verloren en is het vaak niet mogelijk om de CO ₂ concentratie hoog te houden. Dit levert een meerproductie op bij de HortiAir

Hiertegenover staat een verbruik van elektriciteit voor de fan's en voor het adiabatisch koelen.

De kosten voor gas, elektriciteit, CO₂ dosering kunnen berekend worden. Uitgangswaarden voor deze berekeningen worden in bijlage D weergegeven. Hierin staan onder andere:

- de meerproductie als functie van de CO₂ concentratie
- een berekening van de hoeveelheid fotosynthese en vruchtproductie
- de hoeveelheid belichting in het geval van een belichte teelt
- plukkosten

stookkosten

Met de HortiAir wordt vooral bespaard op stookkosten in het voor en najaar. Als het buiten kouder is dan binnen, en de condensatie op het kasdek is kleiner dan de verdamping van de plant. In deze gevallen zouden de ramen geopend moeten worden voor de ontvochtiging, waardoor de stookkosten stijgen. Met de HortiAir blijven de ramen dicht, en gaat er nauwelijks warmte verloren. Hierdoor kan er vooral bij de belichte teelt be-

spaard worden. Met concepten waarbij ook warmteterugwinning toegepast wordt (bijv. het Climeco-concept) is al bewezen dat het energieverbruik aanzienlijk verlaagd (tot 35 %) kan worden.

dosering CO₂

De besparing op CO₂ is het hoogst als bij traditionele teelt de ramen veel open zouden staan voor koelen en/of ontvochtigen, bij gebruik van de HortiAir blijven de ramen dicht en gaat nauwelijks CO₂ verloren. 's Zomers als er veel instraling is wordt het meeste bespaard op het CO₂ gebruik. Bovendien is er 's zomers weinig behoefte aan stoken, en is er daardoor weinig CO₂ beschikbaar uit rookgassen. Slechts de CO₂ die door infiltratie uit de kas verdwijnt, en de CO₂ welke de plant opneemt voor de productie hoeft toegevoegd te worden. De besparing is erg afhankelijk van de teelt en condities, en kan variëren tussen 20 en 80 %.

meerproductie

Er is meerproductie als het door het openen van de ramen niet meer zou lukken om de CO₂ concentratie op de gewenste waarde van 1200 ppm te houden. Dit is voornamelijk in de zomermaanden als de ramen veel openstaan. Bij gebruik van de HortiAir zijn de ramen altijd dicht en is het eenvoudig mogelijk om de hoge CO₂ concentratie te behouden. Bovendien is het met de HortiAir mogelijk om het vochtdeficiet in de zomer laag te houden, waardoor bij hogere temperaturen de productie op gang blijft. Bij 1200 ppm is een meerproductie te halen van 30 tot 40 % ten opzichte van 390 ppm. (zie fig. D1 in bijlage D, de met de meeropbrengst als functie van de CO₂ concentratie.

13 Conclusies

De HAS meet de temperatuur en het vochtdeficiet tussen het gewas. De metingen tonen aan dat, ook bij veel instraling, het vochtdeficiet tussen 2 en 4 gm^{-3} gehouden kan worden. De temperatuur komt niet vaak boven 30 °C. In deze proefopzet regelt de HortiAir op de temperatuur en vochtdeficiet bovenin de kas. Hier is, bij hoge zoninstraling, de temperatuur en het vochtdeficiet hoger ($> 30\text{ °C}$ en $> 4\text{ gm}^{-3}$). Metingen met de Pedak temperatuurmeters bevestigen dit. Het is beter om de lucht op een lager punt, bijvoorbeeld tussen het gewas, af te zuigen, of, te regelen op een temperatuurmeting en vochtdeficiet tussen het gewas. Doordat het vochtdeficiet bovenin de kas relatief hoog is, staan de vernevelaars vaak vol aan. Uit de metingen blijkt dat het vochtdeficiet tussen het gewas dan soms $< 2\text{ gm}^{-3}$ is. Als er geregeld zou worden op het vochtdeficiet tussen het gewas, zou het wel binnen de gewenste marge blijven. Metingen tijdens testen waarbij de vernevelaars niet werkten tonen aan dat het vochtdeficiet inderdaad niet onder 2 gm^{-3} komt.

In de proef is geen stralingsscherm en energiescherm toegepast. Een stralingsscherm is een vereiste om de temperatuur tijdens de warmste dagen onder 30 °C te houden.

De HortiAir kan in combinatie met bevochtigen in de kas het klimaat op de gewenste temperatuur, vochtigheid en CO₂ concentratie regelen. Hierdoor is er besparing op energie en CO₂ en zal er een meerproductie zijn. De HortiAir zal daardoor een exploitatievoordeel hebben.

Doordat de ramen het gehele jaar gesloten blijven, is ook, als er veel koeling gewenst is, de CO₂ concentratie hoog ($>1200\text{ ppm}$), de meerproductie kan hiermee oplopen tot 20 % (ten opzichte van 600 ppm). Het grootste deel van de meerproductie wordt gerealiseerd als de prijs voor het gewas het laagst is, in [€] kan de meerproductie oplopen tot 14 %.

Met de HortiAir kan het vochtdeficiet geregeld worden, ook als er veel instraling is. De plant blijft hierdoor ook bij hoge temperaturen vruchten produceren. Ook ermee wordt een meerproductie gehaald.

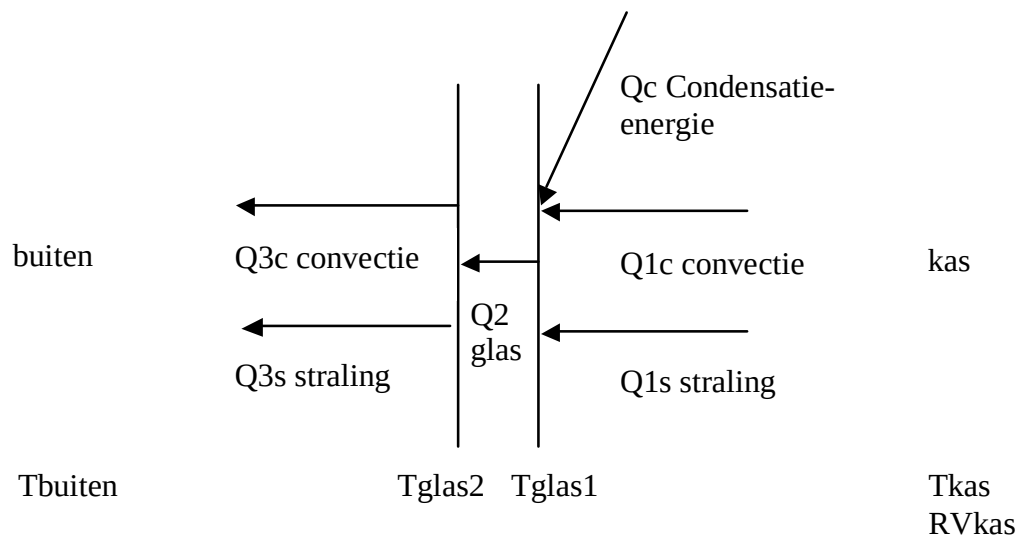
1 HortiAir per 40 m² geeft volgens berekeningen het hoogste exploitatievoordeel. Meer HortiAirs levert meer besparing en een hogere meeropbrengst. Hiertegenover staat een hogere investering. Minder HortiAirs kan een optie zijn als de investeringsmogelijkheden

beperkt zijn. Om een te hoge temperatuur te vermijden moeten dan ook de ramen regelmatig geopend worden.

Bijlage A berekening van condensatie op het kasdek en verliezen naar buiten

De hoeveelheid condensatie op het dek wordt op dezelfde manier berekend als het warmteverlies. In plaats van Nusselt is er een Diffusie coëfficiënt. Bij condenseren op het dek gaat er minder energie verloren, de condensatie-energie komt vrij op het kasdek, en vermindert de warmteverliezen uit de kas.

De energiestromen kunnen worden weergegeven in fig. A1.



figuur A1 energiestromen

Hierin is:

- Q_c de hoeveelheid energie die vrijkomt door condensatie
- Q_{1c} de energieverliezen door convectie van de kas naar het glas
- Q_{1s} de energieverliezen door straling van de kas naar het glas
- Q_2 de energieverliezen door het glas
- Q_{2c} de energieverliezen door convectie van het glas naar buiten
- Q_{2s} de energieverliezen door straling van het glas naar buiten

De laatste 5 energiestromen in Wm^{-2} kunnen uitgerekend worden m.b.v. (A1) t/m (A5), de condensatie energie wordt verderop uitgerekend.

$$Q_{1c} = a_1(T_{kas} - T_{glas1}) \quad (A1)$$

$$Q_{1s} = \epsilon \sigma (T_{kas}^4 - T_{glas1}^4) \quad (A2)$$

$$Q_{2glas} = \frac{\lambda}{d} (T_{glas1} - T_{glas2}) \quad (A3)$$

$$Q_{3c} = a_2(T_{glas2} - T_{buiten}) \quad (A4)$$

$$Q_{3s} = \epsilon \sigma (T_{glas2}^4 - T_s^4) \quad (A5)$$

hierin is:

Q		[Wm ⁻²]	energieverliezen
α_{kas}	4	[Wm ⁻² K ⁻¹]	warmteoverdrachtscoëfficiënt aan de binnenkant
α_{buiten}		[Wm ⁻² K ⁻¹]	warmteoverdrachtscoëfficiënt aan de buitenkant, afhankelijk van de windsnelheid
d	0,004	[m]	dikte van het glas
λ	0,8	[Wm ⁻¹ K ⁻¹]	warmte geleidingscoëfficiënt van glas
T _{kas}		[K]	temperatuur in de kas
T _{buiten}		[K]	temperatuur buiten
T _s		[K]	temperatuur hemelkoepel
ϵ	0,9	[-]	emissiecoëfficiënt
σ	5,67*10 ⁻⁸	[-]	constante van Stephan-Bolzman

Het is gebruikelijk bij glas in de woningbouw dat de α 's een combinatie zijn van convectorie en straling, in dit geval zijn ze opgesplitst in een convectorie -en een stralingsterm omdat bij kassen de temperatuur relatief hoger is dan in de woningbouw, en bovendien de uitstraling naar de hemelkoepel groter is.

α_{buiten} is afhankelijk van de wind en wordt berekend met (A6).

$$a_2 = 2,5wind^{0,8} \quad (A6)$$

wind [ms⁻¹] windsnelheid

T_s , de hemelkoepeltemperatuur kan benaderd worden met behulp van de buitentemperatuur en de luchtvochtigheid zie (A7), waarbij de luchtvochtigheid een maat is voor de hoeveelheid bewolking.

$$T_s = T_{buiten} (0,711 + 0,0056 * T_c + 0,000073 * T_c^2)^{0,25} \quad (A7)$$

T_c $[^{\circ}\text{C}]$ condensatietemperatuur van de buitenlucht

De hoeveelheid condensatie (en dus ook de condensatie-energie) wordt bepaald door de kasdektemperatuur, de kastemperatuur en de RV in de kas. De kasdektemperatuur wordt weer bepaald door de hoeveelheid condensatie energie. De hoeveelheid condensatie kan hierdoor niet in een eenvoudige formule berekend worden.

De hoeveelheid condensatie wordt op dezelfde manier berekend als de energieverliezen. Zoals α met Nusselt berekend wordt, wordt ook de massastroom van condens berekend. Zo wordt α berekend volgens (A8) en diff volgens (A9). De vormfactor Nu is hierbij gelijk aan Sh.

$$a = \frac{\overline{Nu}_L \times /_{lucht}}{L} \quad (A8)$$

$$diff = \frac{\overline{Sh}_L \times D}{L} \quad (A9)$$

Met:

α		$[\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$	warmte overdracht coëfficiënt
λ_{lucht}	0,0279	$[\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}]$	warmtegeleiding coëfficiënt van lucht
L		$[\text{m}]$	lengte van het kasdek
Nu_L		$[-]$	gemiddelde Nusselt nummer over de lengte L
Sh_L		$[-]$	gemiddelde Sherwood nummer over de lengte L
diff		$[\text{ms}^{-1}]$	massa overdracht coëfficiënt
D	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$[\text{m}^2\text{s}^{-1}]$	massa diffusie coëfficiënt
Sh_L		$[-]$	gemiddelde Sherwood nummer over de lengte L

Omdat **Sh** en **Nu** gelijk zijn (het zijn vormfactoren die op dezelfde manier berekend worden) kan **diff** na combinatie van (A8) en (A9) geschreven worden als (A10).

$$\mathbf{diff} = \frac{a \times D}{l_{lucht}} \quad (\text{A10})$$

Het grote voordeel is dat **diff** nu evenredig is met α , en **L**, **Nu** en **Sh** uit de vergelijking vallen. α is zo goed als altijd bekend, of in ieder geval een grootte waar veel mee gerekend wordt. **D** en λ zijn stofeigenschappen. Uiteraard worden de α en **diff** bepaald door **Nu**, maar die vallen weg in (A10).

Zoals de energiestroom bepaald wordt door ΔT , wordt de massastroom van damp bepaald door Δp (A11).

$$\dot{m} = \mathbf{diff} (r_{kas} - r_{glas}) \quad (\text{A11})$$

Met:

m	$[\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}]$	hoeveelheid condensatie per m^2
ρ_{kas}	$[\text{kgm}^{-3}]$	de dichtheid van damp in de kas = $f(T, RV)$
ρ_{glas}	$[\text{kgm}^{-3}]$	de dichtheid van damp aan het glas, bij 100 % RV bij de temperatuur van het glas = $f(T)$

Om de dichtheid van waterdamp te berekend is verzadigingsdruk (**SP**) van waterdamp bij een bepaalde temperatuur nodig (A12).

$$\mathbf{SP} = 100e^{\frac{17,433 - \frac{19513,7}{T}}{1,27095}} \quad (\text{A12})$$

Met **T** de temperatuur in K.

De dampdruk in de kas (**PP_{kas}**) is $RV_{kas} * SP(T_{kas})$. De dampdruk aan het glas (**PP_{glas}**) is $SP(T_{wand})$.

De mol fractie damp is dan volgens (A13), en de dichtheid volgens (A14)

$$x_{damp} = \frac{PP}{101325} \quad (\text{A13})$$

$$r_{damp} = \frac{M_{damp}}{M_{lucht}} \times x_{damp} \times r_{lucht} \quad (\text{A14})$$

Met:

SP	[Pa]	verzadigingsdruk van damp (Saturation Pressure)
PP	[Pa]	partiële druk van damp (Partial Pressure)
x_{damp}	[-]	molaire fractie van damp
ρ_{damp}	[kgm ⁻³]	de dichtheid van damp
M_{damp}	[kgmol ⁻¹]	de molaire massa van water
M_{lucht}	[kgmol ⁻¹]	de molaire massa van lucht

De hoeveelheid condens kan niet eenvoudig in één formule weergegeven worden, en moet berekend worden met een aantal iteraties. De hoeveelheid condensaat is afhankelijk van de kastemperatuur, welke weer afhankelijk is van de hoeveelheid condensaat!

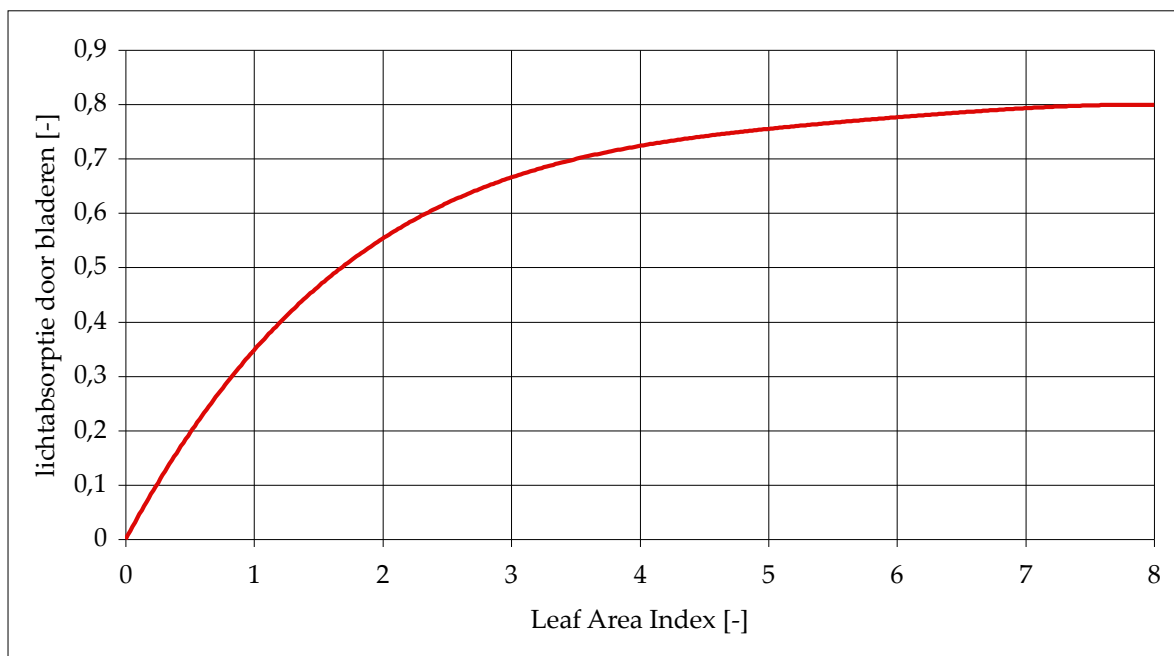
Bijlage B berekening van de instraling en de verdamping van de plant.

Niet alle instraling valt op de bladeren van de plant. Eerst is er de reflectie van het glas wat het vermogen op het blad verminderd, daarnaast valt lang niet al het licht op het blad.

Voor de reflectie (r) van het kasdek wordt een waarde van 0,72 aangehouden. Het glas heeft een reflectie van ongeveer 0,82. De constructie en vervuiling/condensatie zorgen voor 0,1 verlaging van de gemiddelde transmissie.

Fig. B1 geeft de fractie zonlicht die op het blad valt aan als functie van LAI, de Leaf Area Index, ofwel het aantal m² blad per m² kasoppervlak. (ref. *vochtregulatie en verdamping Stanghellini WUR*)

$$\text{lichtabsorptie} = -0,000464 \cdot \text{LAI}^4 + 0,011098 \cdot \text{LAI}^3 - 0,101501 \cdot \text{LAI}^2 + 0,439022 \cdot \text{LAI}$$



figuur B1 fractie zonlicht als functie van LAI

LAI is per plantsoort afhankelijk, voor de meeste volgroeide planten kan voor LAI 3,5 aangehouden worden, voor komkommer is dit maximaal 6.

Het gedeelte van het licht dat gebruikt wordt voor de fotosynthese wordt PAR genoemd. Gemiddeld over een jaar is PAR ongeveer 0,5. Het gedeelte van de globale instraling dat omgezet wordt in damp is (1); wat vrijkomt op de bladeren is (2); wat de bodem van de kas bereikt is (3)

$$X_{damp} = r * PAR * \text{lichtabsorptie} \quad (1)$$

$$X_{blad} = r * (1 - PAR) * \text{lichtabsorptie} \quad (2)$$

$$X_{bodem} = r * (1 - \text{lichtabsorptie}) \quad (3)$$

Daar bovenop is er gedurende zowel dag als nacht een onderhoudsverdamping van 15 gh^{-1} , ofwel 10 Wm^{-2} .

Bijlage C evaluatie Climeco

Project: Proefopstelling “HortiAir”
Nummer: 10.09
Datum: 15 november 2011
Betreft: Kort verslag bespreking “HortiAir”
Doel: Interne informatie

Aanwezig: Bart Veltkamp – Level
 Peter Hoogendoorn – Level
 Rob Wientjens - Climeco Engineering BV
 Jan Derks - Climeco Engineering BV

Door Peter wordt aan de hand van theoretische berekeningen en praktische metingen duidelijk, dat de HortiAir zijn verwachtingen kan waarmaken.
Enige verbeteringen, zoals het verder voorkomen van luchtlekkages in de omkasting van de HortiAir, zullen de resultaten verder kunnen verbeteren.
Een goed werkend bevochtigingssysteem, zowel in de kas als bij de buitenluchtaanzuiging van de HortiAir is van groot belang om het beoogde koeleffect te realiseren.

De HortiAir functioneert optimaal onder de omstandigheden, dat de temperatuur en R.V. in de kas aanzienlijk hoger is dan de buitensituatie.
Een en ander impliceert, dat sprake is van een kasklimaat met een hoge kastemperatuur eveneens een hoge RV. De vraag is of de tuinder dit accepteert, vanwege de vaak zeer slechte arbeidsomstandigheden.
De huidige tuinder stelt hoge eisen aan de gelijkmatigheid van de warmteverdeling in de kas, zowel horizontaal als verticaal. De vraag doet zich voor of met koelen via luchtslangen onder de teeltgoten aan deze eisen van de tuinder kan voldaan.

Er is sprake van een eis van een belangrijke verzekeringsmaatschappij, dat een kas sowieso moet voorzien zijn van luchtramen. Derhalve is te overwegen de HortiAir te ontwerpen met een beperkte capaciteit, te weten, dat bij verder stijgende kaastemperaturen en/of een te klein vochtdeficiet de luchtramen toch geopend zullen worden.
Ook in het kader van het beperken van de investeringskosten kan een beperking van de capaciteit een belangrijke stimulans geven te investeren in een HortiAir.

Met de HortiAir in een tomatenteelt is in combinatie met een 2^e energiescherm een energiebesparing van 12 m³/m² per jaar realiseerbaar.
De HortiAir kan het ventileren via de luchtramen fors beperken, waardoor het CO₂ percentage in de kas kan worden verhoogd. Het is alom bekend dat productieverhoging, vanwege de verhoging van de CO₂ in de kas is te verwachten.

Climeco Engineering BV
Jan Derks

Bijlage D uitgangswaarde voor de bere- keningen

In de berekeningen voor de opbrengsten van de planten is uitgegaan van de volgende waarden:

glashelling	[°]	25
lengte kas	[m]	100
breedte kas	[m]	100
hoogte	[m]	5
oppervlakte van glas	[m ²] / [m ²]	1,3034
zijanten zijn “verdeeld” over het gehele dakoppervlak		
m ² per ontvochtigingsunit	[m ⁻²]	variabel
transmissie glas	[-]	0,72
inclusief vervuiling en constructie		
kosten gas	[€m ⁻³]	0,27
kosten elektriciteit	[€kWh ⁻¹]	0,08;
kosten CO ₂	[€kg ⁻¹]	0,12
gewenste concentratie CO ₂	[ppm]	1200
maximale concentratie CO ₂	[ppm]	5000
maximale CO ₂ dosering	[kg ha ⁻¹ h ⁻¹]	100
concentratie CO ₂ buiten	[ppm]	385
effectiviteit ketel	[-]	0,95
Infiltratie	[m ³ m ⁻²]	0,5

energiescherm

In de berekeningen wordt gebruik gemaakt van een energiescherm, dit scherm wordt ingezet als de verliezen door het scherm groter zijn dan de hoeveelheid energie (zonlicht) die erdoor binnenkomt.

De energieverliezen zijn dan ongeveer 1/3 van die van enkel glas; de overgebleven instraling wordt voor de helft geweerd.

belichting

Er zijn zowel berekeningen met en zonder belichting uitgevoerd. Als er belichting aanwezig is wordt deze met 100 W aangezet op:

- 1 na dagnummer 245
- 2 voor dagnummer 120
- 3 NIET tussen 20.00 en 24.00

In totaal wordt er 4300 uren belicht waarbij 100 Wm^{-2} energie nodig is. Per jaar is dit 430 kWh, ofwel € 34,40 per m^2 per jaar

meerproductie

In de Hortiair wordt CO_2 terug gewonnen. Het voordeel is een hogere CO_2 concentratie in de kas, waardoor de opbrengsten hoger zijn.

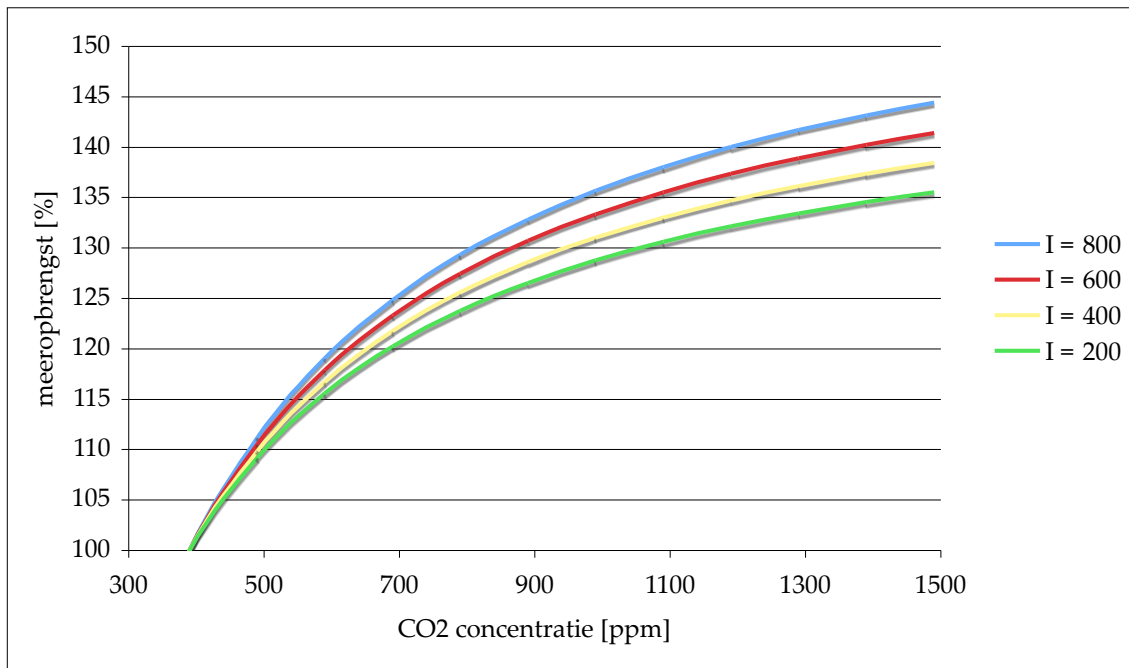
De uitgangspunten zijn een meeropbrengst bij een verhoging van 100 ppm volgens (1)

$$MO = a \left(\frac{x}{1000} \right)^2 \quad (\text{D1})$$

ref: *kasklimaat.nl* en WUR)

met:	MO	Meer opbrengst
	a	een factor, 1,3 bij weinig licht, 1,7 bij veel licht
	X	de CO_2 concentratie in ppm

Fig. D1 geeft de resultaten van deze berekening, hierbij is de meeropbrengst gedefinieerd ten opzichte van een CO_2 concentratie van 390 ppm. I is de instraling.



figuur D1 meeropbrengst bij hoge CO₂ concentratie (t.o.v. 390 ppm)

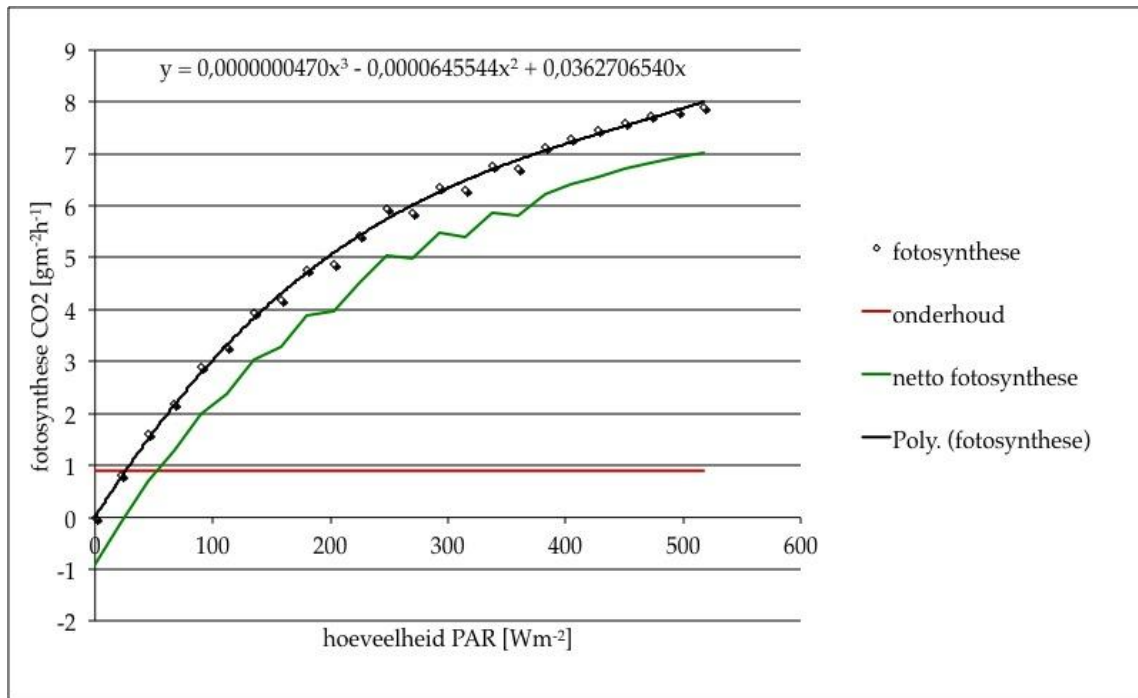
fotosynthese

De hoeveelheid fotosynthese is afhankelijk van

- instraling
- hoeveelheid PAR
- Leaf Area Index (LAI)
- concentratie CO₂.
- de grootte van de plant (volgroeid = 1)

De instraling is de hoeveelheid zonlicht die de kas binnenkomt (zie bijlage B); PAR varieert slechts weinig en is gemiddeld 0,5; de LAI wordt in bijlage B berekend.

De WUR heeft een benadering gemaakt voor de hoeveelheid fotosynthese als functie van de hoeveelheid PAR, bij een LAI van 1 voor een volgroeide plant. (zie fig. D2)



figuur D2 fotosynthese als functie van PAR

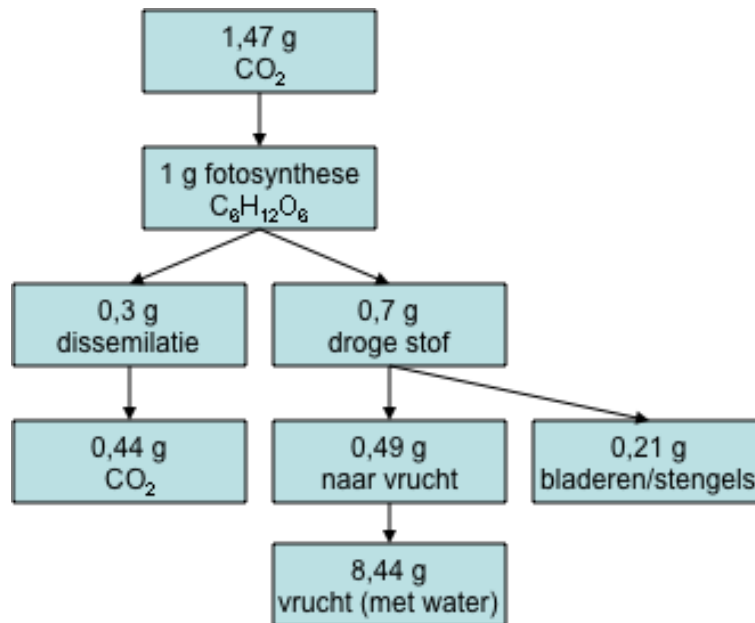
De hoeveelheid fotosynthese (bij LAI = 1; volgroeide plant) kan uitgedrukt worden in vergelijking D2.

$$fs = 4,7 * 10^{-8} * PAR^3 - 6,46 * 10^{-5} * PAR^2 + 0,0363 * PAR \quad (D2)$$

Voor de werkelijke fotosynthese moet (D2) nog vermenigvuldigd worden met LAI en verhoogd worden met (D1) (CO₂ concentratie). Bovendien is ten alle tijden een onderhoudsademhaling van 0,9 gm²h⁻¹ (bij LAI = 1; volgroeide plant). Uiteindelijk is de netto fotosynthese volgens (D3)

$$nfs = grootte\ plant \left(\left(\frac{MO}{100} * LAI * fs \right) - onderhoud \right) \quad (D3)$$

Niet al het CO₂ wordt omgezet in suikers, fig. D3 geeft schematisch aan wat er met de CO₂ uit de fotosynthese gebeurt.



figuur D3 fotosynthese

Voor 1 g suikers, $C_6H_{12}O_6$ is 1,47 g CO_2 nodig. Hiervan wordt 70 % gebruikt voor de aanmaak van droge stof, en hiervan weer 70 % voor de aanmaak van de vrucht.

Ieder soort vrucht bevat voornamelijk water en heeft een specifieke hoeveelheid aan droge stof. Voor komkommer is dit 3,18%. Voor andere gewassen:

tomaat	5,8 %
paprika	8,75 %
komkommer	3,18 %
aubergine	7 %

Er is pas vruchttoename als gemiddeld over een dag genomen er een positieve netto fotosynthese is. Een plant herstelt overdag eerst zijn "schade" van de onderhoudsademhaling van de nacht. Pas als het verlies aan gewicht door de onderhoudsademhaling is aangevuld worden er vruchten aangemaakt.

grootte plant

Een komkommerplant is volgroeid na ongeveer 40 MJ aan globale instraling, voor tomaten is dit 60 MJ.