



# De Uitstralingsmonitor

Feije de Zwart, Esteban Baeza, Bram van Breugel, Vida Mohammadkhani en Hans Janssen

Rapport GTB-1449

## Referaat

Het intensief gebruik van schermen vormt een belangrijk onderdeel van Het Nieuwe Telen. Het biedt grote mogelijkheden voor energiebesparing en leidt tot een veel homogenere temperatuurverdeling in het gewas. Vooral de temperatuur bovenin het gewas komt dichterbij de kasluchttemperatuur te liggen en daardoor wordt de kans op natslag kleiner.

Om deze effecten in beeld te brengen is een rekenmodel ontwikkeld dat het effect van schermen op de temperatuurverdeling in het gewas laat zien. Het werk aan dit model is gefinancierd door de toeleverende industrie, verenigd in de Club van 100, en door het onderzoeksprogramma Kas Als Energiebron. Dit onderzoeksprogramma is een samenwerkingsverband tussen het ministerie van Economische zaken en LTO-Glaskracht Nederland.

De temperatuuropbouw in het gewas wordt sterk bepaald door de uitstraling en daarom heeft dit rekenmodel de naam Uitstralingsmonitor gekregen.

Vergelijking van de rekenresultaten met metingen in de kas laten zien dat het model de netto uitstraling goed berekent en de temperatuuropbouw in het gewas goed voorspelt. Vooral dat het effect van het schermgebruik komt goed naar voren. Het model heeft zijn weg dan ook al gevonden naar de cursussen voor Het Nieuwe Telen.

## Abstract

Intensive use of screens is an important part of what's called the 'Next Generation Greenhouse Cultivation'. It offers great potential for energy saving and gives a much more homogeneous temperature distribution in the crop. Especially the temperature at the top of the crop will be closer to the air temperature, and therefore the risk of condensation will decrease.

To illustrate these effects, a calculation model has been developed that shows the effect of screens on the temperature distribution in the crop. The work on this model has been funded by the horticultural supply industry, united in the 'Club van 100', and through the research program 'Kas Als Energiebron'. This research program is a cooperation between the Ministry of Economic Affairs and LTO-Glaskracht Nederland.

The vertical temperature distribution in the crop is strongly influenced by the longwave radiation and therefore model has been named the 'Radiation Monitor'.

Comparison of the calculated values with measurements in a greenhouse shows that the model accurately calculates the net radiation from the crop and nicely predicts the vertical temperature distribution. Especially the effect of the screen application is convincingly simulated.

## Rapportgegevens

Rapport GTB-1449

Projectnummer: 3742215600

PT nummer: E16002

DOI nummer: 10.18174/421065

## Disclaimer

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

Wageningen UR Glastuinbouw aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

## Adresgegevens

### Wageningen University & Research, BU Glastuinbouw

Postbus 20, 2665 ZG Bleiswijk

Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk

T +31 (0)317 48 56 06

F +31 (0)10 522 51 93

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>5</b>
	<b>Summary</b>	<b>7</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Achtergrond en eisen</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>Gebruikersinterface</b>	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>Simulatiemodel beschrijving</b>	<b>19</b>
<b>5</b>	<b>Gebruikte parameters</b>	<b>33</b>
	5.1 Kasdekparameters	33
	5.2 Parameters van de schermen	34
	5.3 Parameters van het belichtingssysteem	35
	5.4 Gewasparameters	35
<b>6</b>	<b>Modelvalidatie</b>	<b>37</b>
	6.1 Validatie van de netto-stralingsberekening	37
	6.2 Temperatuurverdeling bij open en gesloten scherm	41
	6.3 Gemeten en berekende verdamping	45
	6.4 Conclusies uit de validaties	47
<b>7</b>	<b>Conclusies</b>	<b>49</b>



# Samenvatting

Experimenten met energieschermen hebben grote energiebesparingsprestaties laten zien en laten ook zien dat deze geen nadelige effecten op productie of kwaliteit hebben. Toch blijven veel tuinders terughoudend in het verhogen van het aantal schermuren en is er veel aarzeling in het installeren van extra schermen. In het buitenland worden er vaak helemaal geen schermen toegepast.

De terughoudendheid in het gebruik van schermen heeft mogelijk te maken de onbekendheid van het effect van schermen op de uitstraling vanuit het gewas, en hiermee op de verticale temperatuurverdeling. Vergroting van dit inzicht door uitleg van de theorie en de vervaardiging van een software-tool die de verschillende effecten kwantitatief in beeld brengt kan een stimulans zijn om schermen een nóg centralere plek te geven.

Dit rapport beschrijft de achtergrond, ontwikkeling, gebruik en validatie van een software applicatie die het effect van uitstraling op de gewastemperatuur en het energieverlies van de kas op een aansprekende wijze in beeld brengt. Het rekenprogramma gebruikt hiervoor allerlei inputgegevens die door de gebruiker kunnen worden ingevuld of kunnen worden geselecteerd uit voor-gedefinieerde lijstjes met opties. Het model berekent dan instantaan de temperaturen op verschillende gewashoogtes en daar waar van toepassing van de uitstekende plantonderdelen (de bloemen bij Gerbera bijvoorbeeld). Ook laat het programma het energiegebruik en de lichtintensiteit op gewashoogte zien (relevant bij gebruik van belichting of transparante schermen overdag).

Bij vergelijking van de model-output met metingen blijken de resultaten een realistisch beeld te geven van het effect van kasdekken, schermen, belichting en andere gebruikersinstellingen op de temperatuurverdeling in het gewas en de lichtintensiteit op gewaskop-hoogte. Ook worden realistische temperaturen voor schermoppervlakken en de kasdektemperatuur getoond. Berekende gewastemperaturen wijken niet meer dan een paar tienden van graden af van gemeten waarden en berekende scherm- en kasdektemperaturen wijken niet meer dan 1.5°C af van gemeten waarden.

Het hoofd-effect van het gebruik van schermen in een kas, namelijk het verlagen van het energieverbruik, het verhogen van de temperatuur van de bovenste gewaslagen en het verkleinen van temperatuurverschil tussen de boven en onder in het gewas wordt hierdoor goed in beeld gebracht, waarmee het belangrijkste doel van het simulatiemodel is gerealiseerd. De Uitstralingsmonitor wordt daarom al veel gebruikt in de cursussen over Het Nieuwe Telen.

De uitstraling op gewashoogte zoals die door een netto uitstralingsmeter wordt gemeten wordt door het model berekend met een nauwkeurigheid van + of – 10 W/m<sup>2</sup> en vooral het effect van het openen en sluiten van schermen wordt door het model goed in beeld gebracht. De effecten die in metingen worden waargenomen komen op een sterk vergelijkbare wijze terug in de berekeningsresultaten van de uitstralingsmonitor.

De ontwikkeling van het model is in overleg met representanten van de toeleverende industrie en met de onderzoek coördinatoren van Kas Als Energiebron gebeurd. Dit heeft geresulteerd in een gebruikersinterface met een relevant aantal instellingen en keuzemogelijkheden en een goed interpreteerbare output. Ook zijn hierdoor de eisen aan de verantwoording met betrekking tot de berekeningen opgeschroefd. Het model is dan ook uitvoering in dit rapport beschreven en is ook beschikbaar via de 'help-knop' van de on-line applicatie.





# Summary

Experiments with energy screens have shown that large energy savings can be achieved without negative impact on product quality and amount. Still, many growers are reluctant in increasing the number of hours with a deployed screen or hesitant in installing additional screens. And internationally, there are a lot of growers that don't even use thermal screens at all.

The restraint in the use of screens might be caused by the lack of awareness on the contribution of screens on the reduction of the radiative energy losses from the crop, and thus on the vertical temperature distribution. Enhancing this insight through explanation of the theory and the development of a software tool that quantifies the various effects can provide an important boost on screen deployment.

This report describes the theory, development, use and validation of a software application that illustrates the effect of radiation on the crop temperature and the energy loss of the greenhouse in an attractive way. The calculator uses input data that can be filled in by the user or can be selected from predefined options lists. The model then calculates the temperatures at different crop levels and, where applicable, the parts that extend out from the crop (Gerbera flowers for example). Also, the program shows the energy usage and light intensity at the top of the crop height (relevant when using shade screens or transparent screens during the day).

When comparing the model output with measurements, the results show a realistic effect of greenhouse cover, screens, illumination and other user settings on the temperature distribution in the crop and the light intensity at the top of the crop. Also, realistic temperatures for screen surfaces and the greenhouse cover temperature are shown. Calculated crop temperatures do not differ more than a few tenths of measured values, and calculated screen and cover temperatures do not differ more than 1.5°C from measured values.

The main effect of using screens in a greenhouse, namely reducing energy consumption, raising the temperature of the upper crop layers, and reducing the temperature difference between the top and bottom of the crop are hereby well-illustrated. Thus, it can be concluded that the main goal of the simulation model has been achieved. The Radiation Monitor is therefore widely used in courses on 'Next Generation Greenhouse Cultivation'.

The model computes the net radiation at top-of-crop level with an accuracy of + or – 10 W/m<sup>2</sup> and especially the effect of opening and closing screens is clearly shown.

The development of the model has been done in consultation with representatives of the Dutch Horticultural supply industry and with the coordinators of the research programme 'Kas Als Energiebron'. This has resulted in a user interface with a relevant number of settings and options and a good interpretable output. This has also increased the demands for a clear description of parameters and assumptions made in the model. Therefore, the model applied is extensively described in this report and is also provided as an on-line help document that comes with the 'help-button' of the on-line application (also in English).





# 1 Inleiding

Ondanks het feit dat uit een groot aantal proeven in onderzoek- en praktijksituaties is gebleken dat er een prima product kan worden geteeld bij intensief gebruik van schermen, blijven veel tuinders terughoudend in het verhogen van het aantal schermuren. Ook is er veel aarzeling in het installeren van extra schermen (en in het buitenland zelfs voor het installeren van het 1<sup>e</sup> scherm).

De terughoudendheid in het gebruik van schermen heeft mogelijk te maken met onbekendheid van het effect van schermen op de uitstraling vanuit het gewas. Dat een scherm energie bespaart is algemeen bekend, maar naast energiebesparing zorgt een scherm ook voor een meer homogene verticale temperatuurverdeling in de kas en hiervan lijken tuinders zich minder bewust. Vergroting van dit inzicht door uitleg van de theorie, het tonen van metingen in de praktijk en de vervaardiging van een software-tool die de verschillende effecten in beeld brengt kan een stimulans zijn om schermen een nóg centralere plek te geven.

In dit rapport wordt een software applicatie beschreven die het effect van uitstraling op de gewastemperatuur en het energieverlies van de kas op een aansprekende wijze in beeld brengt. Als input kan de gebruiker het aantal en soort schermen aangeven, het kasdek materiaal, de buiten- en kasluchtomstandigheden en een keus maken uit verschillende gewassen. Het model berekent dan instantaan de temperaturen op verschillende gewashoogtes en daar waar van toepassing van de uitstekende plantonderdelen (de bloemen bij Gerbera bijvoorbeeld). Ook laat het programma het energiegebruik en de lichtintensiteit op gewashoogte zien (relevant bij gebruik van belichting of transparante schermen overdag).

Voorliggend rapport bespreekt de gemaakte keuzes en de theorie, en ook de vergelijking van de berekeningen van het model met metingen in praktijkkassen.

Het project is op 50-50 basis gefinancierd door het samenwerkingsverband van toeleveranciers in de tuinbouw (de Club van 100) en door Kas Als Energiebron, het innovatie en actieprogramma van LTO glaskracht en het ministerie van Economische Zaken.



## 2 Achtergrond en eisen

Met de teelt van gewassen in een kas wordt beoogd om planten onder een optimaal groeiklimaat te telen om de kwaliteit en kwantiteit te vergroten. Toch hebben de buitenomstandigheden nog steeds een heel grote invloed, wat voornamelijk komt doordat het toelaten van zonlicht van grote waarde is. Zonlicht is een goedkope bron van PAR-licht voor de groei en daarom zijn kassen van transparant materiaal gemaakt.

Dit transparante materiaal heeft echter een lage isolatiewaarde waardoor het kasdek meestal een groot koud vlak vormt. De kaslucht koelt af aan dit koude vlak, waardoor er in de winter en/of 's nachts flink gestookt moet worden. Het koude kasdek resulteert daarnaast ook in direct warmteverlies van het gewas via uitstraling. In een kas met enkel glas kan de gewastemperatuur tot zo'n 2 graden onder de luchttemperatuur dalen en bij gebruik van kunststof folies als kasdek zakt de temperatuur van de bovenste gewaslagen nog verder weg. De temperatuur van de kop van het gewas kan dan gemakkelijk onder het dauwpunt zakken, met natslag tot gevolg.

Maar ook als het gewas nog niet nat slaat heeft een lage temperatuur bovenin het gewas nadelen omdat dit de lokale verdamping beperkt. En met een verlaagde verdamping stagneert ook de aanvoer van nutriënten, waarbij vooral een stagnerende calcium-aanvoer voor problemen kan zorgen.

Het gebruik dubbellaags kasdekmaterialen zoals dubbel glas of dubbele opgeblazen folies verkleint het warmteverbruik van de kas, maar ook de doorlatendheid voor zonlicht.

Het gebruik van beweegbare schermen is daarom een methode om kassen zowel een hoge lichtdoorlatendheid als een goede isolatiegraad te kunnen geven. En wanneer er twee, of zelfs drie schermen worden gebruikt neemt de isolatiegraad steeds verder toe.

Het energiebesparend effect van schermen is algemeen bekend, maar pas sinds de laatste paar jaar neemt het bewustzijn toe dat schermen ook een groot effect hebben op de temperatuurverdeling in het gewas.

Door het sluiten van één of meerdere schermen wordt de kop warmer en, in geval de verwarming vooral met de buisrail wordt gegeven, wordt het onder in het gewas minder warm. Dit betekent dus een grotere homogeniteit in het gewas.

Er zijn aanwijzingen dat een hogere koptemperatuur gunstig is voor de gewasontwikkeling en het is ook in experimenten gebleken dat het intensief gebruik van schermen niet noodzakelijkerwijs tot een te hoge kasluchttemperatuur hoeft te leiden (uitgezonderd bij het gebruik van belichting met hoge intensiteit of verduisteringsschermen, maar zelfs dan kan door middel van het gebruik van luchtverversingsventilatoren de temperatuur onder het scherm in de hand gehouden worden).

Zowel vanuit teeltkundig oogpunt, als vanuit energiebesparingsoogpunt is het gebruik van schermen dus aan te bevelen.

Feit is echter dat veel tuinders nog steeds aarzelend staan tegenover het intensief gebruik van een scherm en het scherm bijvoorbeeld pas bij een temperatuurverschil van meer dan 10 graden tussen binnen en buitentemperatuur het scherm 's nachts laten dichtlopen.

Om de ervaring vanuit praktijkproeven kracht bij te zetten en inzicht te verschaffen in de effecten van schermen onder allerlei omstandigheden is het in dit rapport besproken rekenprogramma ontwikkeld dat de energiebalans van een kas doorrekent in afhankelijkheid van een groot aantal relevante parameters.

Uiteraard zijn de belangrijkste parameters de buiten- en kasluchtomstandigheden, de kasomhulling, het aantal en soort schermen, het gewas en eventuele belichting. En uiteraard hebben de fysische eigenschappen van kasomhulling, schermen en belichting invloed op de energiestromen die berekend worden. Bij de ontwikkeling van het programma is besloten dat deze parameters wel getoond worden, maar niet gewijzigd kunnen worden. Andere eigenschappen kunnen worden ingesteld door andere kasdekken, schermen, gewassen of belichtingssystemen te selecteren, en niet door op gebruikersniveau de parameters te veranderen. Hierdoor kan worden gegarandeerd dat alleen fysisch realistische parameters kunnen worden gebruikt.

Het programma is bedoeld voor berekeningen onder lichtarme omstandigheden (minder dan  $150 \text{ W/m}^2$  buitenstraling en belichtingsintensiteiten van  $300 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$  of minder) en bij buitentemperaturen die niet minder dan  $5^\circ\text{C}$  onder de kasluchttemperatuur liggen. Het model geeft ook bij hoger lichtintensiteiten resultaten, maar de daarvoor berekende waarden zijn niet gevalideerd. Ook zullen bij die hogere stralingsbelastingen op de kas, of bij hogere buitentemperaturen de ramen meestal geopend moeten worden, wat niet zichtbaar wordt gemaakt in het plaatje (maar overigens wel in de output-tekst wordt gemeld). De berekeningen worden gestart vanuit een gebruiksvriendelijk interface en in ditzelfde interface worden de berekeningsresultaten getoond. Dit interface wordt in het volgende hoofdstuk besproken.

### 3 Gebruikersinterface

De uitstralingsmonitor is een internetapplicatie die vanuit een internet-browser kan worden benaderd. Via het adres:

[http://www.glastuinbouwmodellen.wur.nl/radiationmonitor/?user=Cv100\\_NLC](http://www.glastuinbouwmodellen.wur.nl/radiationmonitor/?user=Cv100_NLC)

en na het klikken op de knop 'Run' wordt de onderstaande pagina getoond.

Bewolgingsgraad  
Half bewolkt

Pyrgeometer 60 W/m<sup>2</sup>  
Buitenstraling 0 W/m<sup>2</sup>

Buitentemperatuur 5 °C  
Windsnelheid 4 m/s  
Kaslucht temperatuur 20 °C  
Kaslucht vochtigheid 85 %

Kasdek  
Standaard tuindersglas

Scherm ..... Raamstand 0 %  
☒ Luxous 1347 FR  
☐ Obscura 100/0 WB+B  
☐ Perf-Fclean (10x10)

Gewas  
Gerbera

0 % verwarming boven gewas  
60 % verwarming tussen gewas  
40 % verwarming onder gewas

Belichting 0 μmol/m<sup>2</sup>s  
☐ SONT Belichting (1.75 μmol/J)

-8.2 °C (hemeltemp)



5 °C 11.5 °C 5.6 °C

14.4 °C

-25.6 W/m<sup>2</sup>

18.7 °C  
19.0 °C  
19.4 °C  
19.7 °C

Dauwpunt 17.5 °C  
Verwarming 84 W/m<sup>2</sup>  
Lichtintensiteit 0 μmol  
Effectieve k-waarde 5.6 W/(m<sup>2</sup> K)  
Ventilatie 1.2 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup> uur)

Versie:  
Juni 2017


Info Run Help

GTB-1449 | 13

De linkerhelft van de pagina is gereserveerd voor de invulvelden en de rechterhelft toont de resultaten van een berekening.

Het aantal invulvelden beperkt zich tot de minimaal noodzakelijke voor zinvolle berekeningen aan het effect van schermen en geeft voldoende vrijheid om uitgangspunten te kiezen die tuinders kunnen herkennen. Speciaal voor de Amerikaanse markt is er ook de mogelijkheid geboden om te rekenen aan foliekassen, eventueel in de vorm van een opgeblazen dubbel dek. Ook kunnen temperaturen in Fahrenheit worden gekozen.

De vaststelling van de invulvelden heeft in overleg met vertegenwoordigers van de financiers van het project plaatsgevonden. De betekenis van alle invulvelden is als volgt:

<b>Bewolkingsgraad</b> Half bewolkt	De stralingsverliezen van en kas worden sterk beïnvloed door de bewolkingsgraad. Sommige tuinders hebben een pyrgeometer die direct het stralingsverlies van de kas toont. Deze tuinders zullen de pyrgeometer-waarde intypen om de bewolkingsgraad aan te geven. Gebruikers die de typische waarden voor zo'n meter niet weten zullen de bewolkingsgraad aangeven middels het selectieveld (Onbewolkt, half bewolkt of zwaar bewolkt). Het pyrgeometer-veld zal dan een daarbij behorende waarde krijgen.
<b>Pyrgeometer</b> -60 W/m <sup>2</sup>	De globale straling van de zon.
<b>Buitenstraling</b> 0 W/m <sup>2</sup>	
<b>Buitentemperatuur</b> 5 °C	De temperatuur kan worden ingevuld in graden of in Fahrenheit. Kiest u voor Fahrenheit dan moet de laatste C in het adres in uw browser veranderen in F (of vice versa)
<b>Windsnelheid</b> 4 m/s	
<b>Kaslucht temperatuur</b> 20 °C	 <a href="http://wmodellen.wur.nl/radiationmonitor/?user=xxxx_NLC">http://wmodellen.wur.nl/radiationmonitor/?user=xxxx_NLC</a>
<b>Kaslucht vochtigheid</b> 85 %	
<b>Kasdek</b>	Hier geeft u de stooktemperatuur. In koude omgevingsomstandigheden zal het model de benodigde verwarming berekenen om deze temperatuur te realiseren. In warme condities of in condities met veel zon of belichting zal het model de benodigde ventilatie berekenen om die temperatuur te halen.
	Hier vult u de luchtvochtigheid van de kas in. Het model berekent geen vochtbalans, maar houdt wel rekening met de verdamping (zie uitleg over gewas-selectie). De waarde die hier wordt ingevuld bepaalt de getoonde dauwpuntstemperatuur en wordt gebruikt in de verdampingsberekening.

### Opleggen van een luchttemperatuur boven het scherm

De Uitstralingsmonitor berekent de temperatuur boven het scherm, maar het is ook mogelijk om deze temperatuur aan het model op te leggen, net zoals de kasluchttemperatuur aan het model wordt opgegeven. Om het aantal invulvelden niet nog groter te maken dan het al is kan dit worden gerealiseerd door achter de kasluchttemperatuur ook de top-temperatuur in te vullen, gescheiden door een `;`

In onderstaande voorbeeld zal de kasluchttemperatuur op 18°C worden gebracht en de top-temperatuur op 10°C worden vastgezet.

Buitentemperatuur	5	° C
Windsnelheid	4	m/s
Kaslucht temperatuur	18; 10	° C
Kaslucht vochtigheid	85	%

### Inputveld (vervolg)

Kasdek	
Standaard tuindersglas	▼
Scherm ..... Raamstand 0 %	
<input checked="" type="checkbox"/>	Luxous 1347 FR ▼
<input type="checkbox"/>	Luxous 1347 FR ▼
<input type="checkbox"/>	Perf-Fclean (10x10) ▼
Gewas	
Gerbera	▼

Hier kiest u het kasdekkingsmateriaal. De lijst bevat een aantal veel gebruikte kasbedekkingen, uiteenlopend van enkel of dubbel glas tot foliekassen.

Bij elke keus horen voor dat materiaal specifieke parameters die eigenschappen in het Infrarood gebied bepalen en de lichtdoorlatendheid beschrijven.

In principe berekent het model zelf een ventilatiedebiet indien de kas bij verwarmingsvermogen 0 toch warmer zou worden dan de ingestelde temperatuur.

U kunt echter ook een ventilatie aan het model opleggen door een raamstand in te vullen anders dan 0%. Wordt er een scherm gesloten dan wordt er daarmee dus geventileerd boven een gesloten scherm.

Hier kiest het scherm waarmee de berekening wordt uitgevoerd (maximaal 3). De eigenschappen voor elk scherm dat u hier kunt selecteren zijn door het WUR Glastuinbouw lichtlab vastgesteld.

De uitstralingsmonitor kent een aantal gewassen waarvan de absorptie- en transmissie eigenschappen, volgend uit de gewasarchitectuur die door de WUR onderzoekers zijn vastgesteld. Tevens is voor ieder gewas een typisch verdampingsgedrag bepaald in de vorm van een basis-verdamping en een licht-afhankelijke verdamping. Voor alle gewassen wordt een volgroeid gewas verondersteld.



### Inputveld (vervolg)

<input type="text" value="0"/>	% verwarming boven gewas
<input type="text" value="20"/>	% verwarming tussen gewas
<input type="text" value="80"/>	% verwarming onder gewas

Belichting	<input type="text" value="0"/>	$\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$
<input type="checkbox"/>	SONT Belichting (1.75 $\mu\text{mol}/\text{J}$ )	

De verwarmingssystemen in een kas kunnen als ondernet, als groeinnet tussen het gewas of als bovennet zijn uitgevoerd.

Hier kunt u aangeven welk aandeel in het verwarmingsvermogen de verschillende netten leveren. Uiteraard moet de som van de percentages 100 zijn.

Meestal zullen er twee van de drie netten in gebruik zijn. Afhankelijk van het gewas wordt er een bepaalde aanname voor deze verdeling ingevuld, die u overigens zelf weer kan wijzigen.

Wanneer er assimilatiebelichting wordt gebruikt kunt u hier het type belichting kiezen (HPS of verschillende LED-typen) en de intensiteit (uitgedrukt in  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$  PAR).

Waar er selecties kunnen worden gemaakt is er voor gezorgd dat de parameters die bij die keuzes horen voor het type kasdek, het scherm, het gewas en de belichtingssystemen fysisch verantwoord zijn.

Voor de lichtdoorlatendheidseigenschappen van kasdekmaterialen en schermen kon voor een groot deel geput worden uit data die daarover in de afgelopen jaren door het Lichtlab van Wageningen UR glastuinbouw zijn verzameld.

De eigenschappen in het Infrarood gebied, die vooral een rol spelen in de stralingsuitwisseling rond schermen vormen echter geen standaard gemeten grootheid en zijn in het kader van dit project speciaal bepaald. Hierbij is gebruik gemaakt van de emissie meetkoffer die enige jaren geleden door TNO is ontwikkeld (Baart de la Faille e.a., 2009<sup>1</sup>).

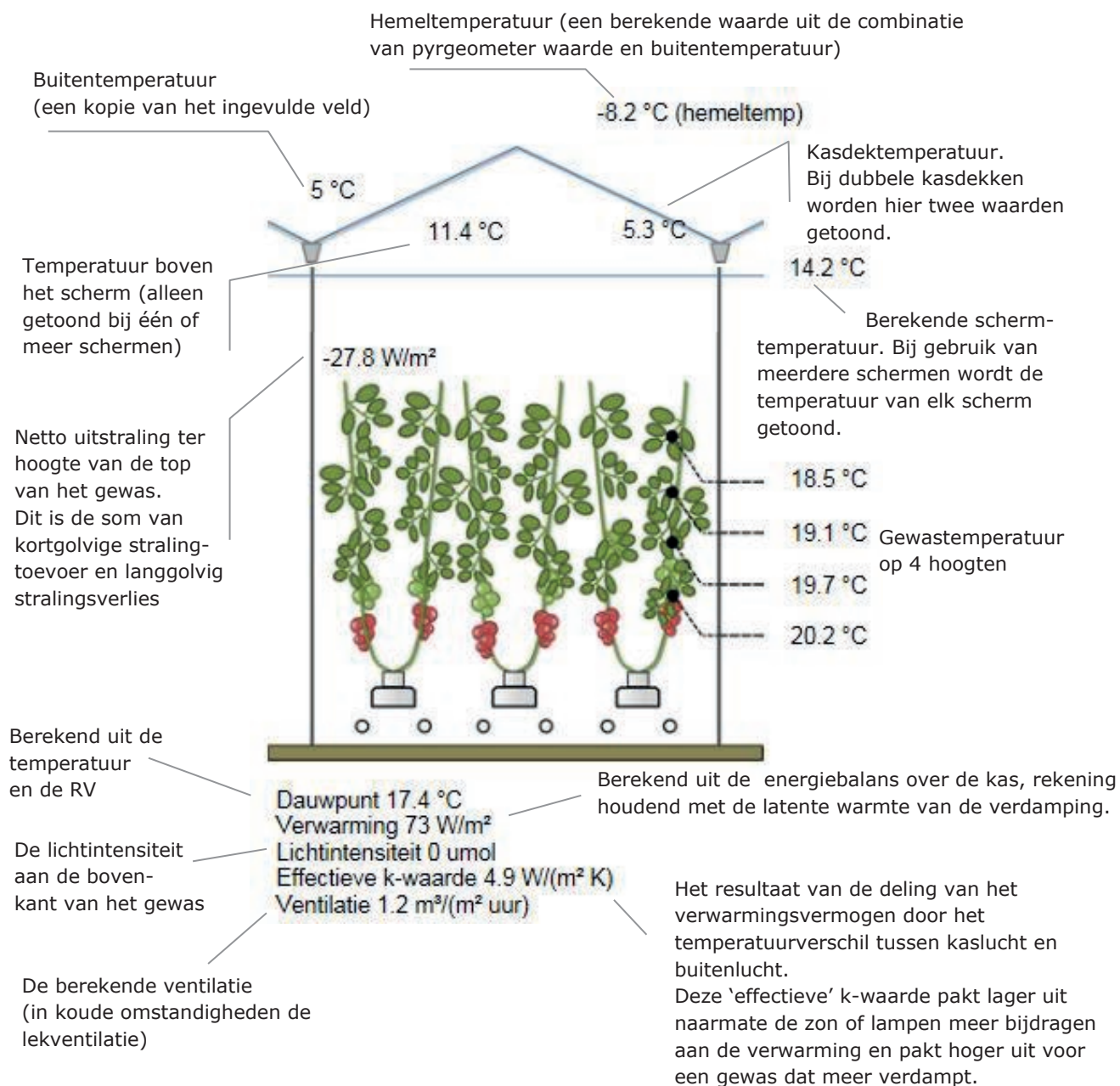
De gewaseigenschappen zoals lichtinterceptie en verdamping zijn bepaald na consultatie van gewasexperts om te komen tot aannemelijke waarden. Voor Tomaat konden de gebruikte verdampingskarakteristieken worden vergeleken met recente weeggoet-metingen.

Voor belichtingsinstallaties kan gekozen worden uit vier typen lampen.

Alle gebruikte parameters zijn verantwoord in hoofdstuk 5.

De uitstralingsmonitor geeft de volgende uitvoervelden als resultaat van de berekening.

<sup>1</sup> Baart de la Faille, L., J.B. Campen en H. Oversloot, 2009, U-waarde kas met scherm, Meetprotocol voor schermdoeken, TNO-rapport 034-DTM-2009-04659

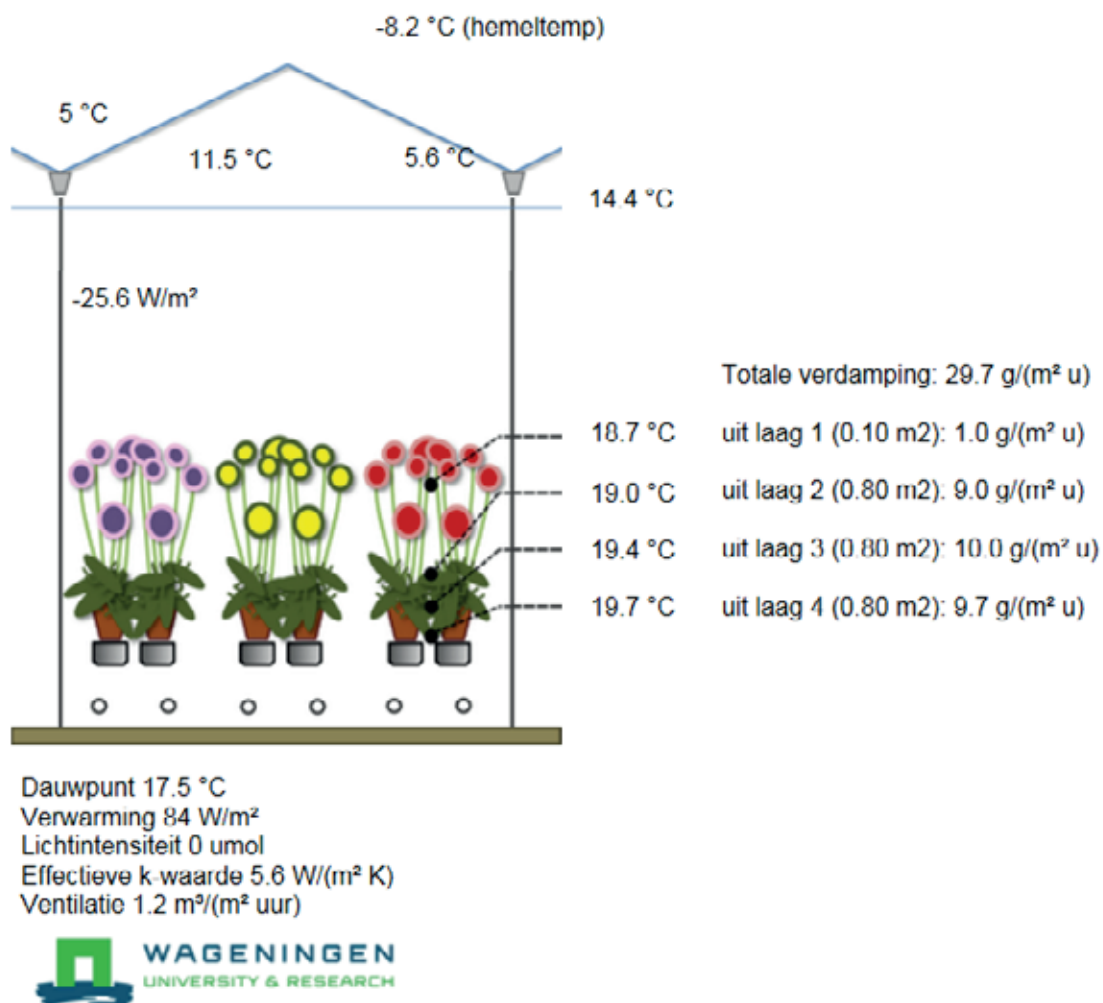


Het model kan niet alleen de temperatuurverdeling over het gewas tonen, maar geeft ook een verwachte verdeling van de verdamping over de hoogte van het gewas.

Daarvoor moet de aanroep van het programma worden uitgebreid met de toevoeging `\_ext` aan het eind van de URL.

[http://www.glastuinbouwmodellen.wur.nl/radiationmonitor/?user=Cv100\\_NLC\\_ext](http://www.glastuinbouwmodellen.wur.nl/radiationmonitor/?user=Cv100_NLC_ext)

De output wordt dan:



De berekeningsresultaten worden verkregen door het uitwerken en oplossen van de energiebalans over een kas, waarbij iteratief de evenwichtssituatie wordt berekend. De hiervoor benodigde formules en uitgangspunten zijn beschreven in hoofdstuk 4.

Berekeningsresultaten kunnen niet door het programma worden bewaard. Wanneer een gebruiker scenariostudies wil doen waarbij allerlei verschillende situaties met elkaar worden vergeleken zullen de resultaten handmatig moeten worden gekopieerd naar andere programmatuur, of kunnen meerdere browserpagina's naast elkaar worden geopend

## 4 Simulatiemodel beschrijving

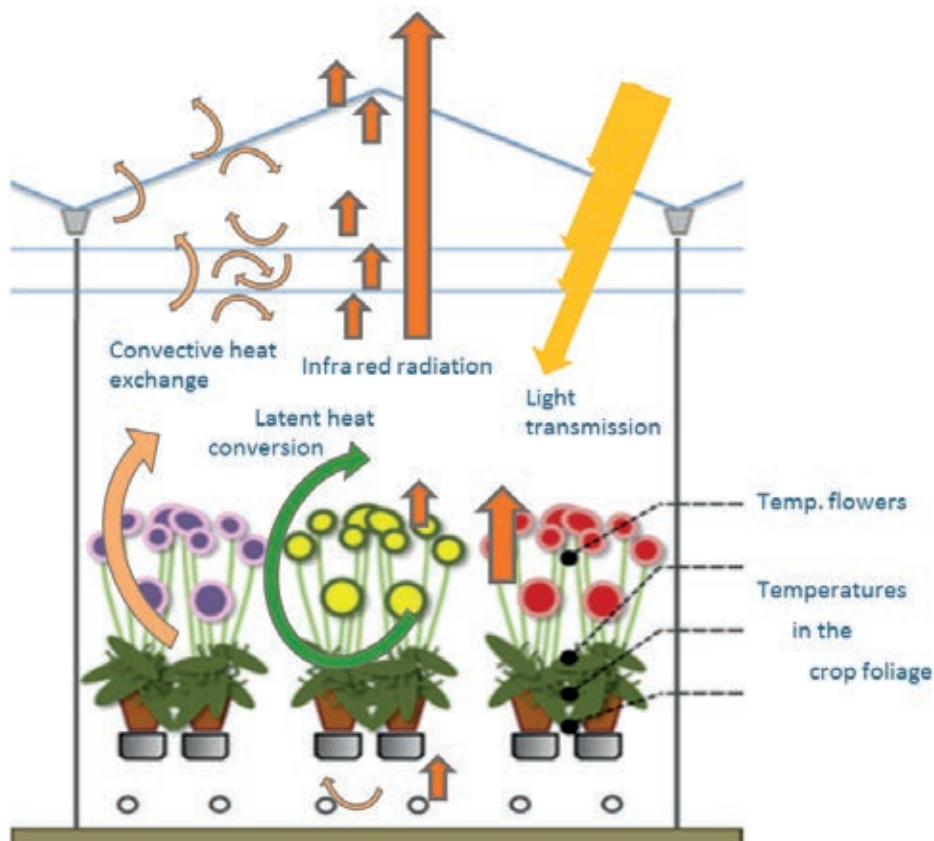
Het kasklimaat is een resultaat van de interactie tussen de buitenomstandigheden, de kas-eigenschappen en het gewas in de kas. Overdag wordt zonlicht ingevangen als het via de transparante omhulling binnenkomt, maar de warmte die bij de absorptie van zonlicht ontstaat kan de kas, zolang de ramen gesloten zijn, moeilijk verlaten.

's Nachts wordt de temperatuur in modern kassen op een optimale waarde gebracht door warmtetoevoer met het verwarmingssysteem. In een afkoelende kas zal er 's nachts ook warmte afgegeven worden door de bodem. In onverwarmde kassen is dit zelfs de enige warmtebron.

Dit dynamische gedrag van kassen wordt in de uitstralingsmonitor evenwel niet meegenomen. Het is immers vooral bedoeld om het effect van schermen op de temperatuurverdeling in het gewas onder koude buitenomstandigheden in beeld te brengen. En in koude omstandigheden zijn de temperatuurverschillen tussen dag en nacht meestal klein en is de bijdrage van de bodem dus gering.

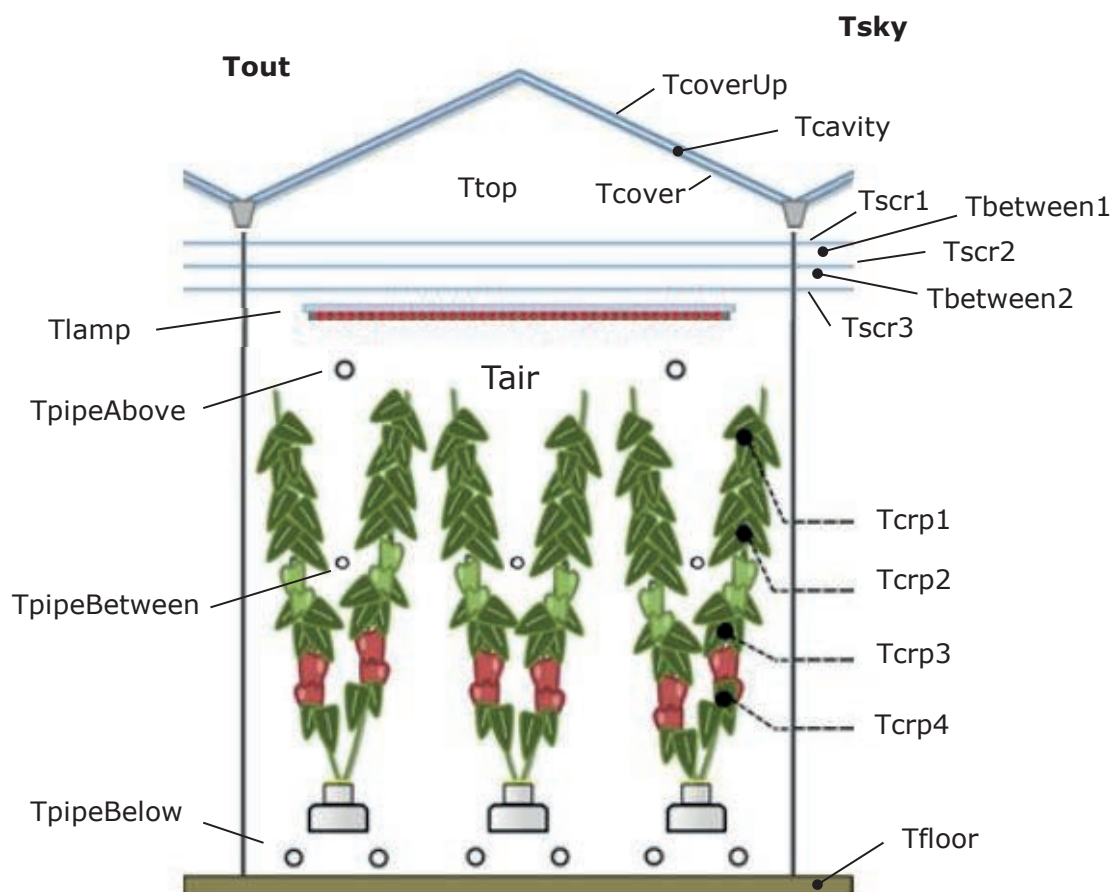
Het model berekent dus niet het dynamisch temperatuurverloop, maar de evenwichts-temperatuurverdeling uit. Hiermee wordt slechts een kleine vereenvoudiging gemaakt omdat de meeste onderdelen van de kas maar een kleine warmtecapaciteit hebben. Alleen de vloer, het verwarmingssysteem en bij sommige gewassen de vruchten laten een na-ijlend effect zien. Schermen en bladeren reageren juist snel op veranderende omstandigheden en omdat precies daarnaar in dit project de aandacht naar uit gaat volstaat het tonen van de evenwichtstemperatuur.

Het model is bedoeld voor berekeningen onder lichtarme omstandigheden (variërend van nacht tot zo'n 150 W/m<sup>2</sup> globale straling). Dit betekent dat het gewas geen droogte-stress zal ervaren en dat warmte-afvoer via de ramen het mogelijk maakt om in de kas de temperatuur te realiseren die de gebruiker opgeeft.



In een evenwichtssituatie is de som van de energiestromen naar en vanuit ieder onderdeel van het simulatiemodel nul. Die onderdelen die energie kunnen opnemen of afgeven worden toestandsgrootheden genoemd (in het Engels State variables). Als we kijken naar het plaatje hierboven betekent de evenwichtstemperatuur van het kasdek dat bij die temperatuur net zoveel warmte door het kasdek aan de buitenlucht en naar de koude hemelkoepel wordt uitgestraald als dat het kasdek aan warmte krijgt uit absorptie van zonlicht (typisch zo'n 4%), aangevuld met warmte die de kaslucht en die de warmte uitstralende delen in de kas aan het kasdek afgeeft.

De uitleg van de berekening van de dektemperatuur laat zien dat daarbij allemaal andere temperaturen berekend moeten zijn. In het onderstaande plaatje worden alle toestandsgrootheden in het model getoond. Toestandsgrootheden zijn de knooppunten in het warmteuitwisselingsnetwerk die energie accumuleren en afgeven in afhankelijkheid van de onderlinge temperatuurverschillen.



De toestandsgrootheden Tout en Tsky zijn vet gemarkeerd omdat het temperaturen zijn die als randvoorwaarden aan het model worden opgelegd. Alle andere temperaturen volgen uit een berekening waarin met kleine stapjes het benodigde verwarmingsvermogen wordt verhoogd totdat de berekende kasluchttemperatuur gelijk is aan de door de gebruiker opgegeven temperatuur.

De verschillende toestandsgrootheden wisselen energie met elkaar uit door middel van fluxen. Het model onderscheidt verschillende soorten fluxen, namelijk externe fluxen, convectieve fluxen en stralingsfluxen. Deze worden hieronder successievelijk uitgewerkt.

### Externe flux

Bij deze iteratie wordt het verwarmingsvermogen aan het model opgelegd als een externe flux. Dit betekent dat de energietoevoer naar de buis een gegeven is en de temperatuur van die buis een gevolg. Het verwarmingsvermogen wordt overigens volgens een door de gebruiker bepaalde verdeelsleutel over de verschillende netten verdeeld (als er meerdere netten zijn geselecteerd).

Naast het verwarmingsvermogen werkt ook de zon middels een externe flux in op het model, net als de elektriciteitsinput via de belichting.

Bij zonneshijn, of intensieve belichting kan het zijn dat de evenwichtstemperatuur voor de kaslucht bij gesloten ramen te hoog uitkomt, zelfs bij buisvermogen 0. In dat geval zal het model de ventilatie naar buiten vergroten. Dit wordt via het berekende ventilatiedebiet aangegeven in de tekst van de modeluitvoer.

Waar de verwarming, de zon en de belichting externe fluxen vormen die energie toevoeren is de gewasverdamping een externe flux die warmte afvoert.

### Gewasverdamping

Als planten water verdampen wordt voelbare energie omgezet in latente warmte. Bij hogere stralingsintensiteiten van de zon of uit belichting, komt de energie hiervoor vooral uit de absorptie van het kortgolvig licht, maar 's nachts moet de energie voor de verdamping aan de omgeving worden onttrokken. Dit vereist dat het blad een lagere temperatuur heeft dan zijn omgeving, en wel zoveel lager dat de toestroom van energie uit de warmere omgeving dan gelijk is aan de energie die nodig is voor de verdamping. De verdampingssnelheid wordt bepaald door het verschil in vochtgehalte tussen de lucht in de bladholten en de lucht rondom het blad. Het vochtgehalte in het blad is de verzadigde vochtinhoud van lucht bij de geldende bladtemperatuur en het vochtgehalte van de omgeving volgt uit de combinatie van temperatuur en RV die de gebruiker opgeeft.

In formulevorm wordt de verdamping beschreven door:

$$\text{Verdamping} = \text{bladopp} \times 2 \times (X_{\text{blad}} - X_{\text{lucht}}) / \text{weerstand} \text{ [gram/s per bladlaag]}$$

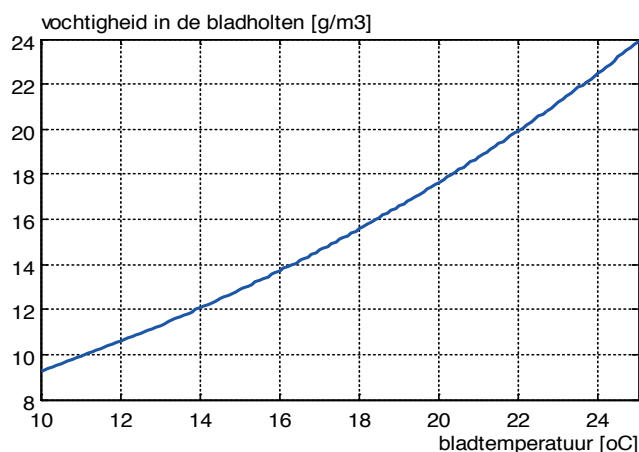
'Bladopp' is de hoeveelheid blad die door een bepaalde laag in het gewasmodel wordt gerepresenteerd. Het bladoppervlak wordt met 2 vermenigvuldigd omdat het blad twee zijden heeft. De huidmondjes zitten weliswaar voornamelijk aan de onderkant van het gewas, maar dit feit zit verwerkt in de weerstand.

$X_{\text{blad}}$  is het vochtgehalte van de lucht in het blad en  $X_{\text{lucht}}$  is het vochtgehalte in gram/m<sup>3</sup>.

Het maximale vochtgehalte van lucht bij een bepaalde temperatuur kan gemakkelijk berekend worden middels onderstaande benaderingsformule:

$$X^* = 1255 \times 10^{(7.9 \times \text{Temp}/(237 + \text{Temp})) / (273 + \text{Temp})} \text{ [gram/m}^3\text{]}$$

Deze formule berekent het maximale vochtgehalte in het temperatuurtraject tussen de 10 en 30°C met meer dan 99.6% nauwkeurigheid (vergeleken met de tabellen uit het Polytechnisch zakboek) en zelfs ver buiten dit temperatuurtraject (van 0 tot 10 en van 30 tot 50°C) wordt de verzadigde luchtvochtigheid nog met 99% nauwkeurigheid berekend. Onderstaande figuur laat zien welke luchtvochtigheden met deze formule worden berekend.





Het vochtgehalte van de lucht in het blad volgt dan door voor 'Temp' de bladtemperatuur in te vullen en het vochtgehalte voor de lucht volgt door voor 'Temp' de kasluchttemperatuur in te vullen en de dan resulterende verzadigde luchtvochtigheid te vermenigvuldigen met de RV van de kaslucht.

De weerstand voor het vochttransport van blad naar lucht is de som van de grenslaagweerstand en de stomataire weerstand.

$$\text{Weerstand} = \text{grenslaagweerstand} + \text{stomataire weerstand} \quad [\text{s m}^{-1}]$$

In het werk van Stanghellini is uitvoerig op de berekening van deze beide weerstanden ingegaan.

De grenslaagweerstand voor vochttransport is gekoppeld aan de grenslaagweerstand voor warmtetransport.

De grenslaagweerstand voor warmtetransport van bladeren is in het werk van Stanghellini uitvoerig onderzocht (1987). Aan de hand van de meetresultaten uit kunstbladeren die elektrisch verwarmd konden worden en waarvan het resulterende temperatuurverschil tussen blad en lucht kon worden gemeten kwam zij op de formule:

$$r_H = \frac{1174 \cdot l^{0.5}}{(|T_{\text{blad}} - T_{\text{lucht}}| + 207 u^2)^{0.25}} \quad [\text{s m}^{-1}]$$

waarin  $r_H$  de grenslaag weerstand is voor warmte transport  $[\text{s m}^{-1}]$ ,  $l$  de karakteristieke afmeting van bladeren (de breedte) (m) en  $u$  de lokale luchtsnelheid weergeeft (m/s). De formule laat zien dat de grenslaagweerstand afhangt van het temperatuurverschil en van de luchtsnelheid.

In kassen liggen de luchtsnelheden rond de bladeren tussen de 0.04 tot 0.1 m/s en ligt het temperatuurverschil in de regel tussen de -2 en +2 K.

Met een bladbreedte van 5 cm (0.05 m), een redelijk getal voor in de kop van het gewas, komt de grenslaagweerstand voor warmtetransport tussen de 200 en 325  $\text{sm}^{-1}$ . De laagste waarde wordt verkregen bij veel luchtbeweging en de hoogste waarde bij een lage luchtbeweging. Omdat de uitstralingsmonitor vooral bedoeld is voor de beschrijving van de situatie in kassen onder moeilijke omstandigheden, dus momenten met weinig luchtbeweging wordt voor de grenslaagweerstand voor warmtetransport een vaste waarde van 325  $\text{sm}^{-1}$  gebruikt. Als dit getal vermenigvuldigd wordt met het Lewis-getal voor waterdamp in lucht levert dit de grenslaagweerstand voor vochttransport. Het Lewisgetal voor waterdamp in lucht is 0.925, wat betekent dat de weerstand voor vochttransport iets kleiner is dan de weerstand voor warmtetransport. De theorie achter het Lewisgetal wordt beschreven in de bijlagen van de beschrijving van het kasklimaat simulatiemodel KASPRO (de Zwart, 1989).

Uitgaande van een grenslaagweerstand voor warmtetransport van 325  $\text{sm}^{-1}$  komt de grenslaagweerstand voor vochttransport op 300  $\text{sm}^{-1}$ .

De stomataire weerstand is een actief, door de plant geregelde grootheid. In de regel is de stomataire weerstand overdag laag (huidmondjes open) en 's nachts hoog (huidmondjes dicht). In het werk van Stanghellini wordt een benadering voor de stomataire weerstand van een tomatengewas gezocht door de weerstand te beschrijven als functie van kasluchttemperatuur, lichtintensiteit, dampdrukverschil en  $\text{CO}_2$ -concentratie.

Zij gebruikte de volgende empirische formule:

$$r_{i,V} = r_{\min} r(I_s) r(T) r(\text{CO}_2) r(dP) \quad [\text{sm}^{-1}]$$

$r_{\min}$  is hierin de minimale stomataire weerstand en deze wordt vermenigvuldigd met een aantal factoren die allemaal een waarde 1 of groter kunnen hebben.

$r(I_s)$  verdisconteert de stralingsinvloed,  $r(T)$  de temperatuurinvloed,  $r(\text{CO}_2)$  de invloed van  $\text{CO}_2$  en  $r(dP)$  geeft een effect van het dampdrukverschil tussen blad en omgeving.

De door Stanghellini voorgestelde functies voor deze invloedsfactoren zijn:



$$r(Is) = \frac{Is + c1}{Is + c2} \quad [-]$$

$$r(T) = 1 + c3 (T_{\text{blad}} - T_m)^2 \quad [-]$$

$$r(\text{CO}_2) = 1 + c4 (\text{CO}_2 - 200)^2 \quad [-]$$

$$r(dP) = 1 + c5 (P_{\text{blad}} - P_{\text{lucht}})^2 \quad [-]$$

In deze formules is Is de kortgolvlige stralingsflux waaraan het gewas wordt blootgesteld in W/m<sup>2</sup>. CO<sub>2</sub> is de CO<sub>2</sub> concentratie van de lucht in ppm en P<sub>blad</sub> de verzadigde dampdruk van bij de gewastemperatuur en Plucht de dampdruk van de lucht (in Pa).

De formules hebben een aantal parameters en deze zijn in het werk van Stanghellini van de volgende waarden voorzien, verkregen bij een tomatengewas;

Parameter	Dagwaarde	nachtwaarde	Eenheid
Rmin	80	660	s m <sup>-1</sup>
C1	4.3	-	W/m <sup>2</sup>
C2	0.54	-	W/m <sup>2</sup>
C3	2.3e-2	0.5e-2	K <sup>-2</sup>
Tm	25	34	°C
C4	6.1e-7	1.1e-11	ppm <sup>-2</sup>
C5	4.3e-6	5.2e-6	Pa <sup>-2</sup>

De benaderingsformules van Stanghellini zijn echter gemaakt voor een model waarin het gewas als één groot blok verdampend materiaal wordt gezien met één temperatuur en één verschil in luchtvochtigheid tussen bladholtes en kaslucht. Bovendien is er in dat model maar één stralingsintensiteit die de huidmondjesopening bepaalt en dat is de stralingsintensiteit aan de bovenkant van het gewas. In de uitstralingsmonitor zijn er 4 gewaslagen die ieder een eigen stralingsintensiteit hebben, een eigen temperatuur en een eigen dampdrukverschil. De één op één toepassing van de door Stanghellini bepaalde parameters in het lagen-model van de uitstralingsmonitor leidde dan ook tot zeer onrealistische verdampingscijfers.

Daarom is in voorliggend project een nieuwe parameterisatie uitgevoerd aan de hand recente metingen aan de verdamping vanuit een tomatengewas, een komkommernog en een gerberateelt. De data van het tomatengewas zijn verzameld in het IDC-project "Tomatenteelt in de hooggeïsoleerde VenLow Energy kas" (de Zwart, 2014) en in het project "Gewasverdamping bij de kop" (de Zwart, 2017). Dat project heeft ook data voor het komkommernog geleverd. De gerbera-gegevens zijn afkomstig uit het monitoringsproject (Vanthoor, 2017). De resultaten hiervan voor wat betreft de verdamping zijn beschreven in het rapport "Gewasverdamping bij de kop".

Uitgangspunt bij de nieuwe parameterisatie is dat alleen het hoofd-gedrag van de plant wordt gemodelleerd, namelijk dat de huidmondjes worden geopend onder invloed van licht. Door bovendien deze invloedsfactor zo te kiezen dat er geen discontinue overgang ontstaat tussen de dag- en de nachtwaarde wordt ervoor gezorgd dat er geen vreemde overgangen plaatsvinden in de ochtend.

Het gebruik van de simpele formule:

$$r_{i,V} = 30 * \frac{Is + 700}{Is + 20} \quad [\text{s m}^{-1}]$$

werd een huidmondjesgedrag verkregen dat een hoge voorspellende waarde voor de gewasverdamping vanuit een 4-lagen gewasmodel opleverde. De vergelijking tussen metingen en berekening wordt uitgebreid besproken in hoofdstuk 6.

In deze benaderingsformule voor de huidmondjesweerstand is Is de kortgolvlige stralingsintensiteit waaraan een gewaslaag wordt blootgesteld.

Overigens hanteert het gebruikte model per laag een toenemende huidmondjesweerstand aan, om daarmee het effect van bladveroudering te verdisconteren. De tweede laag heeft een 10% grotere huidmondjesweerstand dan de weerstand uit bovenstaande formule zou rollen. De derde gewaslaag heeft een 20% hogere weerstand en de onderste laag een 30% grotere weerstand.

De vergelijking tussen de gemeten en de berekende verdamping model is gebaseerd op een tomatengewas. In de Uitstralingsmonitor kunnen echter ook andere gewassen gekozen worden die qua huidmondjesgedrag verschillen ten opzichte van tomaat. Wageningen UR beschikt niet over betrouwbare weeggoot-data van andere gewassen dan tomaat. Daarom is voor de huidige versie van de uitstralingsmonitor gebruik gemaakt van een simpele vermenigvuldigingsfactor die de verdamping weergeeft ten opzichte van de verdamping van tomaat. In paragraaf 5.4 worden de gehanteerde vermenigvuldigingsfactoren gepresenteerd. Tomaat is de grootste verdamper en paprika is met een 15% reductie de laagste.

Met het gegeven dat het model voor elke gewaslaag de stralingsintensiteit berekent (zie volgende kopje) en ook de gewastemperatuur bepaalt kan voor elke laag de huidmondjesweerstand, de totale weerstand voor vochttransport, het verschil in luchtvochtigheid in de bladholten en de lucht en de daaruit volgende verdamping worden berekend.

Deze verdamping levert een latente warmteflux op die gemakkelijk kan worden berekend uit:

$$LCroplayer = 2.45e3 * Verdamping [W]$$

Waarin 2.45e3 de verdampingswarmte van water in J/gram is en de verdamping in gram/sec per bladlaag voorstelt.

Uiteraard is de berekening van de verdamping een onderdeel van de iteratieve berekening van alle energiestromen in het model omdat de verdamping de bladtemperatuur beïnvloedt en de bladtemperatuur de drijvende kracht bepaalt.

### **Kortgolvlige straling**

In het model zijn er twee bronnen van kortgolvlige straling (licht). Dat zijn de zon en de assimilatiebelichting. Wanneer de zon via de verschillende lagen in de kas doordringt zal iedere laag een deel van het licht absorberen, een deel reflecteren en de rest doorlaten. Het doorgelaten licht komt een volgende onderliggende laag tegen en het gereflecteerde licht gaat terug naar de vorige laag.

Dit is een typisch recursief proces waarin licht dat naar beneden gericht is steeds een stukje minder wordt en tegelijk opwaarts gerichte nieuwe licht-stromen teweegbrengt. Vanuit dat ópwaarts gericht licht komt via reflectie weer nieuw neerwaarts gericht licht.

Dit recursieve mechanisme is in onderstaande programmatuur uitgewerkt.

```

function [A, Ru]=raytrace(I, layer, t,r, A,Ru)
% I = the radiation intensity (positive is downward, negative is
% upward to a certain layer)
% layer = the layer to which the radiation is directed
% t and r = the transmission and reflection coefficient of the surface.
% the current version makes no difference between the upper and the lower
% side of the surfaces, but this can, of course easily be added later.
% A = the absorbed radiation by each layer and is passed into and out of
% the function for the house keeping on the energy flux
% Ru = the eventually upward reflected radiation (leaving the
% top-most layer

if (layer==0)      % this means that there is an upward radiation flux
                  % coming from the top-most layer. This contributes to the
                  % upward reflection out from the greenhouse system
Ru=Ru-I;    % it is always an upward flux when directed to layer 0
return;
end;

if (I>0) % downward radiation
    Iup = I*r(layer);
    Ido = I*t(layer);
else % the incoming radiation is upward
    Iup = (-I)*t(layer);
    Ido = (-I)*r(layer);
end

if (Ido> 0.0001) % there is a new meaningful downward flux
    [A, Ru]=raytrace(Ido, layer+1, t,r, A,Ru);
end
if (Iup> 0.0001) % there is a new meaningful upward flux
    [A, Ru]=raytrace(-Iup, layer-1, t,r, A,Ru);
end
A(layer)=A(layer)+abs(I)-Iup-Ido;

```

Dat het een recursief programma is blijkt uit het feit dat de functie zichzelf weer aanroept, net zolang tot er niet meer dan 0.0001 van de oorspronkelijke stralingsintensiteit over is.

Om dit programmaatje te gebruiken moet voor elke laag de transmissie en reflectie worden meegegeven (als een vector met getallen tussen 0 en 1) en moet worden aangegeven waar de initiële straling in de serie van oppervlakken intreedt. Middels een 1 voor neerwaartse straling, of een -1 voor opwaartse straling, maar er zullen niet gauw opwaarts gerichte lampen in een kas gebruikt worden), wordt de recursieve procedure gestart. Zonlicht treedt in op niveau 1 en lamplicht op niveau 7 (niveau 1 is het buitenste kasdekoppervlak, niveau 2 is het binnenste kasdekoppervlak (bij gebruik van een dubbel kasdek), niveau 3, 4, en 5 zijn de schermen, niveau 6 zijn de armaturen van de belichting, niveau 7 is het bovennet (indien aanwezig), enzovoort. Typische transmissie- en reflectiecijfers zijn in onderstaande tabel vermeld.

Niveau	transm	refl	uitleg
CoverUp	0.86	0.1	
Cover	0.86	0.1	Worden resp. 1 en 0 bij enkeldeks glas
Scr1	0.8	0.15	
Scr2	0.8	0.15	Zijn 1 en 0 als er geen scherm is
Scr3	0.8	0.15	
Lamp	0.97	0	Lampen hebben een verwaarloosbare reflectie
PipeAbove	0.96	0	buizen hebben een verwaarloosbare reflectie
Crp1	0.6	0.05	
Crp2	0.5	0.05	
PipeBetween	0.96	0	buizen hebben een verwaarloosbare reflectie
Crp3	0.4	0.05	
Crp4	0.4	0.05	
PipeBelow	0.94	0	buizen hebben een verwaarloosbare reflectie
Floor	0	0.25	

Als we uitgaan van een kas met de transmissie- en reflectieparameters die hierboven zijn genoemd krijgen we het onderstaande lichtprofiel en stralingsabsorptie per laag, alles als percentage van de buitenlicht intensiteit.

Layer	transm	refl	Als percentage van de globale straling	
			Licht intensiteit	Licht absorptie
CoverUp	0.86	0.1	100	5.0
Cover	0.86	0.1	88	4.3
Scr1	0.8	0.15	78	1.8
Scr2	0.8	0.15	71	1.6
Scr3	0.8	0.15	64	1.4
Lamp	0.97	0	58	1.7
PipeAbove	0.96	0	56	2.4
Crp1	0.6	0.05	54	19.7
Crp2	0.5	0.05	33	15.1
PipeBetween	0.96	0	17	0.7
Crp3	0.4	0.05	16	8.9
Crp4	0.4	0.05	6	3.7
PipeBelow	0.94	0	3	0.18
Floor	0	0.25	2	1.7

Als de absorptie-cijfers bij elkaar worden opgeteld volgt hieruit dat in totaal 68% van het zonlicht in de kas wordt geabsorbeerd. Aangezien de bodem niets doorlaat is de conclusie dat 32% van de straling door de kas wordt gereflecteerd. Dat lijkt veel maar dat heeft in dit voorbeeld vooral te maken met de drie boven elkaar liggende schermen die elk 15% van het licht reflecteren.

Ook kan uit de geabsorbeerde percentages worden opgemaakt dat het gewas 48% van het zonlicht absorbeert. Dit lijkt weinig, maar ook hier geldt weer dat voor dit voorbeeld een kas met een veel groter aantal lagen boven het gewas is gebruikt dan men gewoonlijk (overdag) zal aantreffen.

Als er (ook) belichting in de kas wordt gebruikt wordt een soortgelijke tabel opgesteld voor het licht dat op niveau 7 neerwaarts intreedt.

De op deze manier berekende hoeveelheid geabsorbeerd licht per laag wordt als een externe flux op de toestandsgrootheden opgelegd.

Naast de bovengenoemde externe fluxen die per berekening een constante waarde hebben berekent het model een groot aantal energiefluxen waarvan de waarde afhangt van de temperaturen van de andere toestandsgrootheden in het model. Aangezien in de iteratieve procedure de temperaturen van de toestandsgrootheden veranderen moeten deze na iedere iteratiestap opnieuw berekend worden.

Om dit gestructureerd te doen onderscheidt het model convectieve warmte-uitwisseling en stralingsuitwisseling.

Convectieve warmte-uitwisseling is gebaseerd op een stromend medium dat energie meeneemt en stralingsuitwisseling is gebaseerd op energie-uitwisseling tussen niet-transparante oppervlakken die elkaar kunnen 'zien'.

Beide typen warmtetransport en de daarbij benodigde parameters worden hieronder verder uitgewerkt.

### Convectieve warmteoverdracht

Convectieve warmte-overdracht is gebaseerd op de verplaatsing van, in het geval van dit model, lucht. Die luchtverplaatsing kan gebaseerd zijn op dichtheidsverschillen, maar ook door gedwongen verplaatsing door wind of door ventilatoren. Het eerste type heet vrije convectie en het tweede type heeft **gedwongen convectie**. Het huidige model heeft slechts één echte gedwongen convectieve flux en dat is de luchtuitwisseling door de ramen. Dit betreft meestal alleen de lekventilatie, maar bij hogere buitentemperaturen en zonlicht worden de ramen geopend om de door de gebruiker opgegeven luchttemperatuur te realiseren. Als er geen schermen gebruikt worden levert dit een energie-uitwisseling tussen buitenlucht (Tout) en kaslucht (Tair). Wordt er tenminste één scherm gebruikt dan geeft de (lek)ventilatie een energie-uitwisseling tussen buitenlucht en het top-compartiment (Ttop).

In formules met ten minste 1 scherm krijgen we dan:

$$H_{TopOut} = f_{Vent}/3600 * 1200 * (T_{top} - T_{out}) \quad [W/m^2]$$
$$H_{TopAir} = 0;$$

Wanneer er geen schermen zijn wordt de gedwongen convectieve flux:

$$H_{TopOut} = 0;$$
$$H_{TopAir} = f_{Vent}/3600 * 1200 * (T_{air} - T_{out}) \quad [W/m^2]$$

In beide vergelijkingen is,  $f_{vent}$  de luchtuitwisseling tussen binnen en buiten in  $m^3/uur$  en is 1200 de volumieke warmtecapaciteit van lucht in  $J/(m^3 K)$ .

Omdat elke kas een beetje lekt heeft  $f_{Vent}$  een minimumwaarde van  $1.2 m^3/(m^2 \text{ uur})$ . Als het harder gaat waaien zal de lek toenemen en daarom wordt  $f_{vent}$  bij windsnelheden boven de 4 m/s verhoogd. Dan wordt  $f_{Vent}$  gelijk gesteld aan  $0.3 m^3/(m^2 \text{ uur})$  per m/s windsnelheid.

In de hierboven beschreven vergelijking voor gedwongen convectie is de warmte-uitwisseling recht evenredig afhankelijk van het temperatuurverschil tussen twee toestandsgrootheden. Voor vrije convectie is dat niet zo. Een groter temperatuurverschil leidt tot een meer dan evenredig grotere warmte-overdracht.

De algemene formule voor convectieve warmteoverdracht van een warm medium naar een bovenliggend kouder medium luidt:

$$H_{WarmCold} = 1.7 * (T_{warm} - T_{cold})^{1.33} [W/m^2]$$

Deze formule geldt voor grote oppervlakken zoals schermen. Voor het kasdek, dat onder een hoek staat en daardoor een groter oppervlak heeft per m<sup>2</sup> kasoppervlak zou de factor 1.7 nog wat moeten worden vergroot. Er is echter nog een reden waarom de warmte-overdracht naar het kasdek groter zal zijn dan op grond van deze algemene formule verwacht mag worden en dat is de bijdrage van condensatie aan de effectieve warmteoverdracht naar het kasdek. Om deze bijdrage nauwkeurig te kunnen berekenen zou naast de temperatuurhuishouding ook de vochtthuishouding van de kas gesimuleerd moeten worden. Bij de opzet van het simulatiemodel is echter gesteld dat de vochtbalans niet meegenomen zou worden dus daarom wordt er een eenvoudige vergroting van de warmte-overdrachtscoëfficiënt naar het kasdek gehanteerd.

$$HAirCov = 3.25 * (T_{Air} - T_{Cover})^{1.33} [W/m^2]$$

De convectieve warmteoverdracht vanaf een verwarmingsbuis vertoont vrijwel dezelfde niet-lineariteit. Volgens het werk van de Zwart<sup>2</sup> geldt voor ronde buizen:

$$HPipeAir = D_{pipe} * L_{pipe} * 6.25 * (T_{pipe} - T_{air})^{1.32} [W/m^2]$$

waarin  $D_{pipe}$  de diameter van de buis is en  $L_{pipe}$  het aantal meters buis per m<sup>2</sup> kas. Een typisch buisrailsysteem in een Nederlandse kas heeft 10 51 mm buizen in een 8 meter tralie liggen. Dit betekent dat er 1.25 m van deze buis per m<sup>2</sup> kas ligt.

Bij gebruik van belichting wordt dezelfde soort relatie gebruikt, maar de term ( $D_{pipe} * L_{pipe}$ ) wordt dan afhankelijk gemaakt van de belichtingsintensiteit. Voor een 100 W/m<sup>2</sup> SON-T is 0.02 m<sup>2</sup> lampoppervlak per m<sup>2</sup> kas een redelijke schatting en dit getal wordt lineair doorvertaald naar andere intensiteiten. Voor LED-lampen wordt een iets andere rekenfactor gebruikt (zie paragraaf 5.3).

Natuurlijk is deze omrekening van lampintensiteit naar armatuuroppervlak slechts een benadering, maar omdat de hoeveelheid warmte die de lamp afgeeft in het model via een externe flux wordt ingebracht levert het eenvoudig berekende oppervlak van de lamp nooit een grote fout. Bij een te klein berekend oppervlak wordt de armatuurtemperatuur hoger dan in werkelijkheid en bij een te groot geschat oppervlak blijft de lamptemperatuur wat lager.

Voor kleine oppervlakken verdeeld over de kasruimte, zoals de bladeren van het gewas, is de vrije convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt nauwelijks afhankelijk van de temperatuur. Dit blijkt uit het werk van Stanghellini<sup>3</sup>. De daar gepresenteerde formules voor de warmteafgifte van bladeren geven aan dat de warmteoverdrachtscoëfficiënt veel meer bepaald wordt door lokale luchtsnelheden dan door het temperatuurverschil. Aangenomen dat de lokale luchtsnelheid bij bladeren rond de 0.1 m/s ligt blijkt de warmte-overdracht vanaf bladeren beschreven te kunnen worden door:

$$HecLeafAir = 10 * LAI * (1 + (T_{Leaf} - T_{air})/140) [W/(m^2 K)]$$

De het temperatuurverschil bepaalt slechts voor 1/140<sup>ste</sup> de overdrachtscoëfficiënt en dat is zo weinig dat dit effect in de uitstralingsmonitor wordt verwaarloosd.

In deze formule is de LAI het bladoppervlak in de verschillende bladlagen per m<sup>2</sup> kas.

Tenslotte is er nog een convectieve warmte-uitwisseling die zich niet volgens de wetten van vrije convectieve warmte-overdracht gedraagt. Dat is de convectieve overdracht van het kasdek naar de buitenlucht. Hierbij speelt vooral de windsnelheid een grote rol. In de beschrijving van het simulatiemodel KASPRO<sup>2</sup>, die deze relatie weer ontleent aan eerder beschreven werk van Bot<sup>4</sup> vinden we:

$$HecCovOut = 3.1 + 1.31 * Windsp \text{ voor een windsnelheid } < 4 \text{ m/s } [W/(m^2 K)]$$

2 H.F. de Zwart, 1996, Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model. Proefschrift Wageningen University, Nederland

3 Stanghellini, C., 1987, Transpiration of greenhouse crops: an aid to climate management. Proefschrift Wageningen University, Nederland

4 Bot, G.P.A., 1983, Greenhouse Climate, from physical processes to a dynamic model. Proefschrift Wageningen University, Nederland

en:

$$\text{HecCovOut} = 2.72 * \text{Windsp}^{0.8} \text{ voor een windsnelheid} > 4 \text{ m/s [W/(m}^2 \text{ K)]}$$

Met de hierboven beschreven drie typen van convectieve warmteoverdracht kunnen alle warmte-uitwisselingen tussen de verschillende oppervlakken en lucht die in het model worden onderscheiden worden berekend. Er is echter ook vrije convectieve warmte-overdracht van lucht naar lucht, de zogenaamde buoyancy flux. Dit is de warmte-uitwisseling die plaatsvindt door de luchtstroming dóór het scherm ten gevolge van temperatuurverschillen, en dus drukverschillen over het scherm. Deze temperatuurverschil gedreven luchtstroom wordt beschreven door:

$$F_{T1T2} = 2.3e3 * (T1 - T2) * \text{permeability [m}^3\text{/s]}$$

De permeability van de schermen die in het model gekozen kunnen worden zijn voor de verschillende schermen in het materialenlaboratorium gemeten. Voor de dichte, gewezen schermen variëren deze tussen  $1e-7 \text{ m}^3\text{/(s K)}$  en  $4e-7 \text{ m}^3\text{/(s K)}$ . De open schaduw schermen laten natuurlijk veel meer lucht door. De permeabiliteit van deze schermen ligt 20 tot 40 keer zo hoog.

Met de luchtuitwisseling die berekend is met bovenstaande formule kan de warmte-uitwisseling op dezelfde manier worden berekend als de warmte-uitwisseling door (lek)ventilatie. Voor een kas met één scherm wordt dat dus:

$$\text{HAirTop} = 2.3e3 * (T_{\text{air}} - T_{\text{top}}) * \text{permeability} * 1200 * (T_{\text{air}} - T_{\text{top}}) \quad [\text{W/m}^2]$$

De warmtestroom is hiermee dus kwadratisch afhankelijk van het temperatuurverschil. Aangezien de permeabiliteit bij energieschermen echter een klein getal is blijft zo'n buoyancy warmtestroom toch in de regel klein.

Als er met meerdere schermen moet worden gerekend komen er even zoveel buoyancy fluxen en komen er tussen-scherm temperaturen bij ( $T_{\text{between1}}$  en, bij 3 schermen ook een  $T_{\text{between2}}$ ).

### Langgolvlige stralingsuitwisseling

Naast de externe fluxen en de vrije en gedwongen convectieve fluxen berekent het model ook de langgolvlige stralingsuitwisseling. Dit is energie-uitwisseling in het golflengtegebied tussen 5 en 50  $\mu\text{m}$ .

Langgolvlige straling wordt uitgewisseld tussen de verschillende oppervlakken in de kas en naar de 'hemelkoepel'. Hoewel geen oppervlak, kan aan de hemelkoepel een virtuele temperatuur worden toegekend. Bij een heldere hemel gedraagt die hemelkoepel qua straling zich als een oppervlak dat zo'n 20°C kouder is dan de buitenlucht. Bij een zwaar bewolkte hemel gedraagt de hemelkoepel zich als een oppervlak dat gemiddeld 2 graden kouder is dan de buitenlucht.

De uitstralingsmonitor heeft maximaal 15 oppervlakken die energie via straling uitwisselen namelijk de 14 echte oppervlakken en de hemelkoepel. In principe kunnen al die oppervlakken energie met elkaar uitwisselen waardoor er maximaal 105 stralingsfluxen berekend moeten worden ( $14+13+ \dots +2+1$ ). Echter, in de praktijk zijn dit er veel minder omdat niet altijd alle oppervlakken 'in gebruik zijn'. Als er een enkel glasdek wordt gebruikt en geen 3 maar 2 schermen, vallen er al 39 mogelijke stralingsuitwisselingen weg. Belangrijker is nog dat niet alle oppervlakken doorlatend zijn voor langgolvlige straling. Een glazen kasdek is bijvoorbeeld niet transparant voor langgolvig licht zodat alle onderliggende lagen geen straling zullen uitwisselen met de hemelkoepel.

De algemene beschrijving voor langgolvlige stralingsuitwisseling luidt:

$$R_{S1S2} = \frac{\epsilon_{S1} \epsilon_{S2} F_{S1S2} A_{S1}}{1 - \rho_{S1} \rho_{S2} F_{S1S2} F_{S2S1}} \sigma (T_{S1}^4 - T_{S2}^4) \quad [\text{W}]$$



Deze vergelijking, die de netto straling van oppervlak S1 naar oppervlak S2 berekent, wordt bepaald door de optische materiaaleigenschappen en de geometrische configuratie. De materiaaleigenschappen zijn beschreven door de emissiecoëfficiënten ( $\epsilon_{S1}$  en  $\epsilon_{S2}$ ) en de infra-rood reflectie coëfficiënten ( $\rho_{S1}$  en  $\rho_{S2}$ ). De geometrische parameterisatie loopt via het stralende oppervlak ( $A_{S1}$ ) en de viewfactor, een getal tussen 0 en 1 dat aangeeft welk deel van de hemisfeer van oppervlak S1 door S2 in beslag wordt genomen.

$\sigma$  is de constant van Stefan-Boltzman ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/K}^4$ ).

De teller in deze vergelijking geeft de primaire energie-uitwisseling tussen S1 en S2. De noemer vertegenwoordigt de vermindering van de netto uitstraling door reflecties op het andere oppervlak.

Bij kleine reflectie-coëfficiënten van één van beide oppervlakken is de noemer bijna 1 en speelt die nauwelijks een rol. Wanneer echter goed reflecterende oppervlakken straling uitwisselen, zoals bij gebruik van gealuminiseerde schermen is de noemer wel belangrijk en wordt de stralingsuitwisseling belangrijk gereduceerd. Op dat moment speelt niet alleen de viewfactor voor oppervlak S1 naar oppervlak S2 een rol, maar ook de omgekeerde viewfactor, dus van oppervlak S2 naar oppervlak S1. Bij bekende afmetingen van de twee oppervlakken en één bekende viewfactor, volgt de andere viewfactor uit het reciprociteit theorema

$$F_{S2S1} = F_{S1S2} A_{S1} / A_{S2} \quad [-]$$

Uit deze relatie blijkt ook dat  $R_{S2S1}$  gelijk is aan  $R_{S1S2}$ , maar met een tegenovergesteld teken.

Wanneer de bovenbeschreven theorie wordt toegepast op het model voor de uitstralingsmonitor is, van boven naar beneden werkend, de stralingsuitwisseling tussen kasdek en hemelkoepel de eerste stralingsflux die berekend moet worden.

Per definitie heeft de hemelkoepel een emissie coëfficiënt 1 en een reflectie coëfficiënt 0.

Daarmee wordt de straling tussen kasdek en hemelkoepel eenvoudigweg:

$$R_{\text{CovSky}} = \epsilon_{\text{cov,up}} F_{\text{CovSky}} A_{\text{cov}} \sigma (T_{\text{cov}}^4 - T_{\text{sky}}^4) \quad [\text{W}]$$

Het oppervlak van het kasdek is groter dan  $1 \text{ m}^2$  per  $\text{m}^2$  kas, maar doordat het kasdek van een grote kas gedeeltelijk zichzelf ziet is het product van  $F_{\text{CovSky}}$  en  $A_{\text{cov}}$  1 zodat het stralingsverlies van het dek per  $\text{m}^2$  kas beschreven wordt met:

$$R_{\text{CovSky}} = \epsilon_{\text{cov,up}} \sigma (T_{\text{cov}}^4 - T_{\text{sky}}^4) \quad [\text{W/m}^2]$$

De term  $\epsilon_{\text{cov,up}} \sigma$ , dus het deel van de vergelijking voor het 4<sup>e</sup> machts temperatuurverschil, wordt verderop de 'radiative exchange coefficient' (REC) genoemd.

Het bovenste kasdek-oppervlak heeft maar 1 stralingsflux naar boven, maar het tweede oppervlak heeft er mogelijk twee, namelijk naar het bovenste kasdek en mogelijk ook naar de hemelkoepel. Dit hangt af van de doorlatendheid van het bovenliggende vlak voor infra-rode straling. Als het bovenliggende vlak niet doorlatend is voor infrarood dan 'ziet' het daaronder liggende vlak alleen het vlak erboven en is de viewfactor dus 1. Is het bovenliggende vlak echter voor bijvoorbeeld 40% doorlatend, dan ziet het tweede vlak voor 60% het kasdek en voor 40% de hemelkoepel.

Deze uiteenrafeling van viewfactoren voor elk vlak naar elk ander vlak wordt in het onderstaande geneste stukje programmatuur uitgevoerd.

```
% Compute the radiativeExchangeCoefficients (REC), based on
% - infra red transmission (IRtrans)
% - the emission coefficients (epsUp and epsDo),
% - the reflection coefficients (reflUp and reflDo),
% = the surface of the radiation surface (surf)

for sIndex=2:15
    remainingHemisphere=1;
    for dIndex = sIndex-1:-1:1
        hemisphere = remainingHemisphere ;
        remainingHemisphere = hemisphere*IRtrans(dIndex);
        viewfactor=hemisphere - remainingHemisphere; % this is FS1S2
        otherViewfactor = viewfactor*surf(sIndex)/surf(dIndex); % this is FS2S1
        nominator=epsUp(sIndex)*epsDo(dIndex)*viewfactor*surf(sIndex);
        denominator=1-reflUp(sIndex)*reflDo(dIndex)*viewfactor*otherViewfactor;
        REC = nominator/denominator * 5.67e-8;
    end
end
```

In deze code vormen de 14 mogelijke oppervlakken in het kasmodel (genummerd 2 t/m 15) de Source (met index sIndex) die een netto stralingsuitwisseling hebben met Destinations (dIndex). Source laag 2 kijkt alleen naar destination 1, maar source laag 4 kijkt naar destination laag 3, 2, en 1. Als er ergens een oppervlak wordt tegengekomen met IRtrans = 0 dan worden de rest van de REC's naar de daarboven gelegen oppervlakken ook 0.

Merk ook op dat voor het uitstralende oppervlak (de sIndex) steeds de eigenschappen van de bovenkant van het oppervlak worden meegenomen en voor het destination oppervlak de eigenschappen van de onderkant. Vaak zijn de parameters van onder- en bovenkant gelijk, maar voor schermen en kasdekken soms niet. Nadat met bovenbeschreven code alle radiative exchange coefficient's zijn berekend kunnen de stralingsfluxen van alle onderlinge uitwisselingen worden berekend door ze te vermenigvuldigen met het verschil in temperaturen (in K) tot de 4<sup>e</sup> macht.

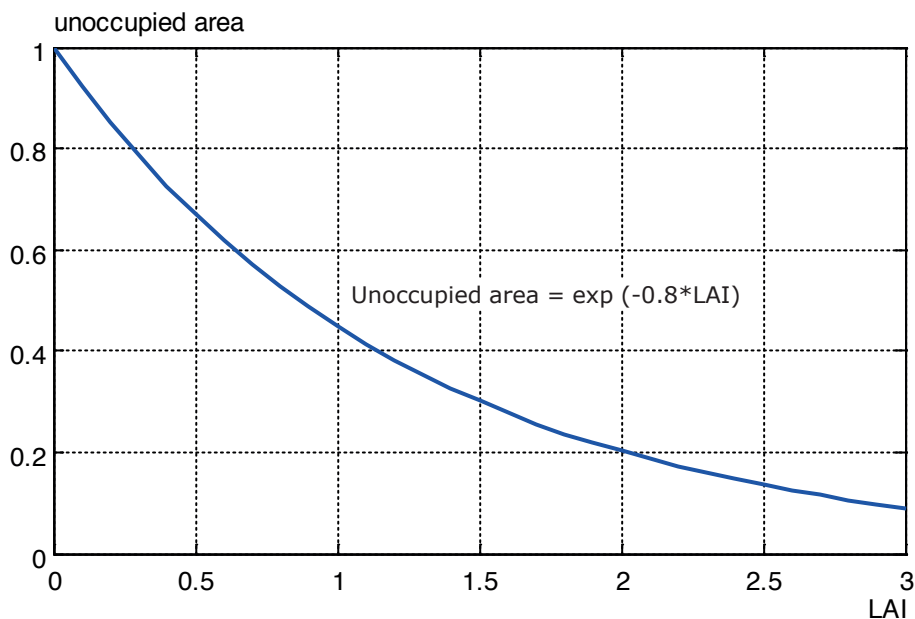
De oppervlakken waarmee gerekend moet worden liggen voor de meeste onderdelen vrij voor de hand. Voor het kasdek, de schermen en de vloer is het effectieve oppervlak 1 m<sup>2</sup>.

Voor de verwarmingsbuizen en de lampen zijn de oppervlakken veel kliner. Lampen hebben een horizontaal oppervlak in de ordegrootte van 0.02 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> en een bovennet en een ondernet heeft ongeveer 0.06 m<sup>2</sup> geprojecteerd oppervalk per m<sup>2</sup> kas. Een groeinnet is meestal beduidend kleiner dus wordt op 0.02 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> gesteld.

Voor de vier gewaslagen kan het effectieve oppervlak worden berekend aan de hand van de extinctiecoëfficiënt voor langgolvlige straling in combinatie met het bladoppervlak dat in een gewaslaag wordt verondersteld. Deze extinctiecoëfficiënt beschrijft de toename van het grondoppervlak wat door bladeren wordt afgedekt per eenheid blad. De integraal van de black-leaf extinctiecoëfficiënt geeft het verloop van het nog niet afgedekte oppervlak over de diepte van het gewas.

De black-leaf-extinction coëfficiënt voor hoge draad groentegewassen zoals komkommer of tomaat ligt tussen de 0.75 en 0.85.

Uitgaande van een extinctie coëfficiënt 0.8, toont de onderstaand grafiek de afname van het vloer-oppervlak dat nog niet door bladeren in beslag is genomen vanaf de bovenkant van het gewas (LAI=0) tot aan de onderkant van het gewas (LAI=3).



In het model worden 4 gewaslagen berekend en als die een evenredig deel van de LAI beslaan betekent dit dat iedere laag 0.75 m<sup>2</sup> weerspiegelt. Volgens de formule neemt het nog niet in beslag genomen oppervlak van 0 naar 0.75 m<sup>2</sup> af van  $\exp(-0.8 \cdot 0) = \exp(-0.8 \cdot 0.75) = 0.55$ . Dit betekent dat 45% van het oppervlak in die laag kennelijk in beslag wordt genomen door de bladeren en dus dat de doorlatendheid van zo'n laag 55%. Bedraagt.

De volgende 0.75 m<sup>2</sup> bladpakket doet hetzelfde, evenals de 3<sup>e</sup> en 4<sup>e</sup> laag en zo blijft er aan het eind nog 9% 'onbedekt' oppervlak over; het eindpunt van de curve.

In het model wordt daarom in dit geval voor iedere laag een IR transmissie van 0.55 gehanteerd en een effectief stralingsoppervlak van 0.45 m<sup>2</sup>. Dit is duidelijk kleiner dan de 0.75 m<sup>2</sup> echt bladoppervlak dat in de verschillende lagen zit, wat veroorzaakt wordt door onderlinge beschaduwing.

Ondanks het feit dat verschillende gewassen een verschillende gewasarchitectuur zullen hebben, en dus een verschillende extinctiecoëfficiënt, wordt er in dit model voor alle gewassen met 0.8 gewerkt. Wel worden er per gewas verschillende bladhoeveelheden per laag aangehouden (zie paragraaf 0).

### Energiebalansen en iteratie

Met de bovengenoemde vergelijkingen kan voor elke toestandsgrootte in het model een energiebalans worden opgesteld, bestaande uit de som van de ingaande en uitgaande energiestromen.

Met deze set van balansen zal een eenvoudige iteratieve Euler-integratie convergeren naar de evenwichtstemperatuur van alle toestandsgrootheden. Alle toestandsgrootheden krijgen hiertoe een fictieve, even grote warmtecapaciteit (1000 J/K). De iteratie wordt gestopt als bij alle toestandsgrootheden de netto warmteflux bijna 0 geworden is (<0.5 W).

## 5 Gebruikte parameters

Bij de toepassing van de formules die in hoofdstuk 4 beschreven zijn spelen veel parameters een rol. Deze hangen af van de keuzes die de gebruiker in het simulatiemodel maakt. In onderstaande paragrafen worden de parameters gepresenteerd voor alle keuzes die in het model gemaakt kunnen worden.

### 5.1 Kasdekparameters

Het model kent verschillende soorten glazen kasdekken en een aantal folie-dekken. De gebruikte parameters voor de mogelijke opties staan in onderstaande tabel.

		double	epsUp	epsDo	refUp	refDo	epsUpUp	epsUpDo	refUpUp	refUpDo	IRtrans	IRtransUp	transPAR	refIPAR
Standaard tuindersglas	0	0.89	0.89	0.05	0.05					0.00		0.82	0.13	
AR gecoat glas	0	0.85	0.85	0.05	0.05					0.00		0.90	0.05	
Dubbel glas met AR coating	1	0.85	0.85	0.05	0.05	0.85	0.85	0.05	0.05	0.00	0.00	0.85	0.10	
LE en AR gecoat glas	0	0.85	0.11	0.05	0.74					0.00		0.84	0.11	
Dubbel glas met AR en LE	1	0.85	0.85	0.05	0.05	0.17	0.85	0.68	0.05	0.00	0.00	0.78	0.20	
Folie 20% thermiciteit	0	0.60	0.60	0.00	0.00					0.40		0.78	0.15	
Folie 40% thermiciteit	0	0.60	0.60	0.00	0.00					0.30		0.76	0.18	
Dubbel opgeblazen folie 60% t	1	0.60	0.60	0.00	0.00	0.60	0.60	0.00	0.00	0.40	0.40	0.62	0.20	

Voor elk van de materialen is aangegeven of het een enkel of een dubbel kasdek betreft. Bij dubbele kasdekken krijgen de beide lagen elk hun eigen optische eigenschappen, maar de transmissie en reflectie voor zichtbaar licht zijn als één getal opgenomen.

Het model gebruikt echter deze gegevens voor beide oppervlakken dus wordt bij dubbele dekken voor de transmissie per dekvlak de wortel uit de totale PAR-transmissie genomen en wordt de reflectie evenredig over beide vlakken verdeeld.

## 5.2 Parameters van de schermen

Op dit moment zijn de volgende schermen in de Uitstralingsmonitor opgenomen.

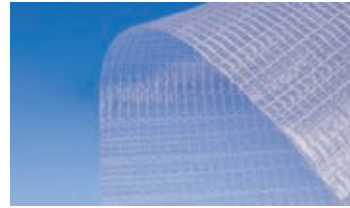
### foliescherm

Een helder EVA folie

### LUXOUS 1347 FR



### LUXOUS\_1547\_D\_FR



### HARMONY\_2947\_FR



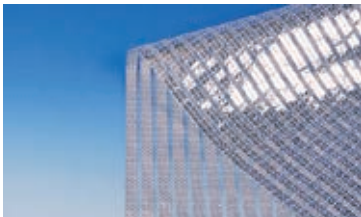
### HARMONY\_5047\_FR



### HARMONY\_7247\_FR



### TEMPA\_6965FR



### TEMPA\_8570\_FR



### Fclean

Een helder ETFE scherm

### OBSCURA\_9950\_FR



### OBSCURA\_10070\_FR\_WB+B



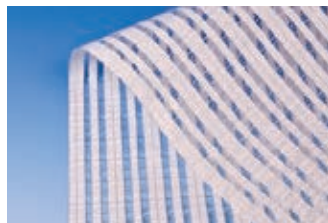
### OBSCURA\_10075\_FR\_AB+B



### HARMONY\_2515\_O\_FR



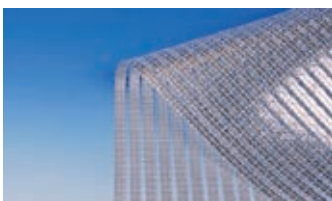
### HARMONY\_4515\_O\_FR



### HARMONY\_5220\_O\_FR



### SOLARO\_6827\_O\_FR



### SOLARO\_8430\_O\_FR



### Perf-Fclean (10x10)

Een helder ETFE scherm met een 10x10 perforatie

Voor deze schermen zijn de optische eigenschappen m.b.t. transmissie en reflectie in het zichtbaar licht, maar ook in het ver infrarood gebied bepaald in het WUR Glastuinbouw Lichtlab. Daarnaast is ook de permeabiliteit bepaald zodat de luchtuitwisseling door het scherm kan worden berekend.

Binnen één categorie van schermen (energieschermen, verduisteringsschermen) blijken de verschillen tussen verschillende schermsoorten op energieverbruik en temperatuur-opbouw in het gewas heel beperkt. Bij schaduwsschermen, waar een grote diversiteit aan reflecterende, diffuserende en absorberende eigenschappen bestaat geven de verschillende types overdag natuurlijk fors verschillende resultaten, maar 's nachts blijven de verschillen klein, zelfs bij schermdoeken die behoorlijk verschillen in het aantal open bandjes. Dit komt doordat bij open doeken de ruimte boven het schermdoek altijd dicht bij de kasluchttemperatuur blijft en dus het kasdek ook relatief warm zal blijven. Het gewas 'ziet' dan behalve de bandjes in het scherm, die ongeveer de kasluchttemperatuur hebben, ook het kasdek en dat kasdek is juist door die open structuur van het doek lang niet zo koud als bij gebruik van gesloten schermen.

## 5.3 Parameters van het belichtingssysteem

De uitstralingsmonitor kent één soort SON-T belichtingssysteem en LED-belichting met drie efficiënties. Een efficiëntie van 2.0  $\mu\text{mol/J}$  is een goed LED systeem, 2.7  $\mu\text{mol/J}$  is een LED-systeem met een heel hoge efficiency en LED's die 3.0  $\mu\text{mol PAR}$ -licht per J geven worden in de nabije toekomst verwacht.

De intensiteit van de belichting wordt in het userinterface middels de PAR flux dichtheid in  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$  ingevuld. Met de gekozen lamp-efficiency resulteert dit in een elektrisch vermogen dat door de lamp wordt opgenomen.

Dit elektrisch vermogen wordt voor een deel in PAR en voor SONT ook voor een deel in NIR omgezet en de rest komt als warmte aan de armatuur vrij. Deze zal daardoor voelbare warmte en langgolvlige straling gaan afgeven. De convectieve warmte wordt afgegeven aan de kaslucht en de stralingswarmte aan alle delen in het blikveld van de lampen (zie lang golvlige stralingsuitwisseling).

De parameters die de PAR-intensiteit via het elektriciteitsverbruik vertalen naar de fracties van het elektrisch vermogen dat langs verschillende wegen aan de kas wordt afgegeven staan in de onderstaande tabel.

Belichtingstype	efficiency	Fractie geconverteerd naar			Licht onderschepping
	( $\mu\text{mol/J}$ )	PAR	NIR	Thermisch	per 100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$
LED met 2.0 $\mu\text{mol/J}$ eff.	2.00	0.46	0	0.54	1.5%
LED met 2.7 $\mu\text{mol/J}$ eff.	2.70	0.62	0	0.38	1.5%
LED met 3.0 $\mu\text{mol/J}$ eff.	3.00	0.7	0	0.30	1%
SONT (met 1.75 $\mu\text{mol/J}$ )	1.75	0.41	0.20	0.39	1%

De laatste kolom geeft de lichtonderschepping van de armaturen. Uiteraard hangt die af van de intensiteit. Het totale armatuur-oppervlak is bij LED-systemen iets groter dan bij SONT, maar zal in de toekomst weer wat kleiner kunnen worden door de verminderde warmteproductie.

## 5.4 Gewasparameters

De gebruiker kan kiezen voor een berekening met verschillende gewassen. Een ander gewas betekent in het huidige model een iets andere verdamping en ook een andere verdeling van de LAI over de vier gewaslagen. In alle gevallen is de gewasverdamping een functie van de fysische omgeving van het blad (de gewas temperatuur, waarmee het dampdruksverschil en de grenslaagweerstand voor vochttransport wordt bepaald) en afhankelijk van het huidmondjesgedrag. Het huidmondjesgedrag is eenvoudig gemodelleerd, namelijk als een minimale weerstand die bereikt wordt bij volledige huidmondjesopening en een licht-afhankelijke sluiting van de huidmondjes (of liever gezegd: een geen-licht afhankelijke sluiting).

Er wordt over één en hetzelfde huidmondjesmodel gebruikt, maar afhankelijk van het gewas wordt de huidmondjesweerstand een beetje groter of kleiner gemaakt dan die van tomaat.



Hiervoor worden de onderstaande factoren gebruikt:

Gewas	Verdamping ten opzichte van tomaat
Tomaat	1
Komkommer	0.85
Paprika	0.75
Roos	0.95
Gerbera	0.9

De verschillende gewassen hebben niet alleen een verschillend huidmondjesgedrag, maar ook een verschillende verdeling van bladoppervlakken over de vier lagen van het model.

Voor de groentegewassen is de LAI evenredig over de gewashoogte verdeeld. Voor Roos en Gerbera is de bovenste laag gereserveerd voor de uitstekende bloemen. Die laag heeft daardoor een veel kleiner 'bladoppervlak' dan de andere lagen.

Gewas	LAI per laag
Tomaat	0.75 - 0.75 - 0.75 - 0.75
TomaatKV	0.15 - 0.95 - 0.95 - 0.95
Komkommer	0.75 - 0.75 - 0.75 - 0.75
KomkommerKV	0.15 - 0.95 - 0.95 - 0.95
Paprika	1 - 1 - 1 - 1
Roos	0.1 - 0.9 - 0.9 - 0.9
Gerbera	0.1 - 0.8 - 0.8 - 0.8

De gewascodes TomaatKV en KomkommerKV geven een iets andere bladverdeling over de 4 lagen. In de 'KV'-versie wordt slechts 5% van het bladoppervlak aan de bovenste bladlaag toegekend om op die manier het temperatuur (en verdampings) gedrag van de kop in beeld te brengen.

Voor de twee bloem-gewassen Roos en Gerbera is de bovenste gewaslaag gereserveerd voor de bloemen en daarom wordt de verdamping vanuit die gewaslaag sterk gereduceerd ten opzichte van de verdamping uit gewone gewaslagen. Dit wordt bewerkstelligd door de verdampingsweerstand van die bloem-laag 2.5 maal zo groot te maken als voor gewone bladeren.



## 6 Modelvalidatie

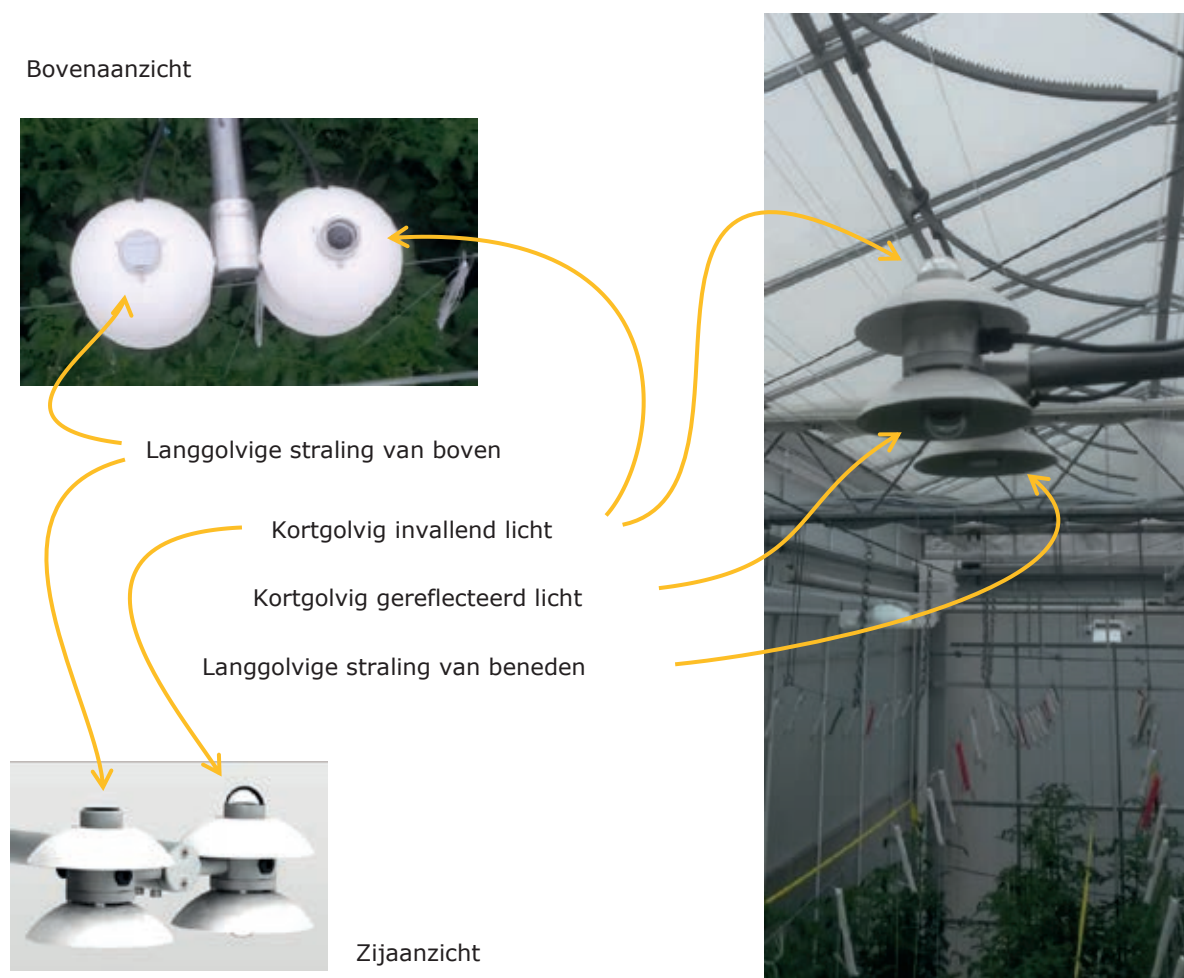
De uitstralingsmonitor is gemaakt om het effect van het gebruik van schermen op de netto uitstraling te kunnen laten zien en het effect van die uitstraling op het temperatuurprofiel. In dit hoofdstuk wordt getoond hoe dicht de berekende netto uitstraling ligt bij meetwaarden die in verschillende projecten zijn verzameld. Die uitstraling beïnvloed natuurlijk ook de temperatuuropbouw in het gewas sterk en daarom is een tweede paragraaf gewijd aan berekende en gemeten temperatuurverschillen in het gewas. De verdamping van het gewas heeft een belangrijke invloed op de temperatuur van de bladeren en daarom wordt in dit hoofdstuk ook een vergelijking gemaakt tussen de berekende en gemeten verdamping onder verschillende omstandigheden.

### 6.1 Validatie van de netto-stralingsberekening

Een aantal tuinders heeft een netto-stralingsmeter geplaatst om een continue meetsignaal te kunnen krijgen van het energieverlies vanuit de bovenste gewaslaag.

De netto straling is de som van de binnenkomende kortgolvlige straling op het sensor-oppervlak en de uitgaande langgolvlige straling vanaf die sensor.

In het project 'Gewasverdamping bij de kop' is een netto-stralingsmeter gebruikt die de 4 componenten van de straling in een kas als 4 verschillende meetsignalen verzamelt.

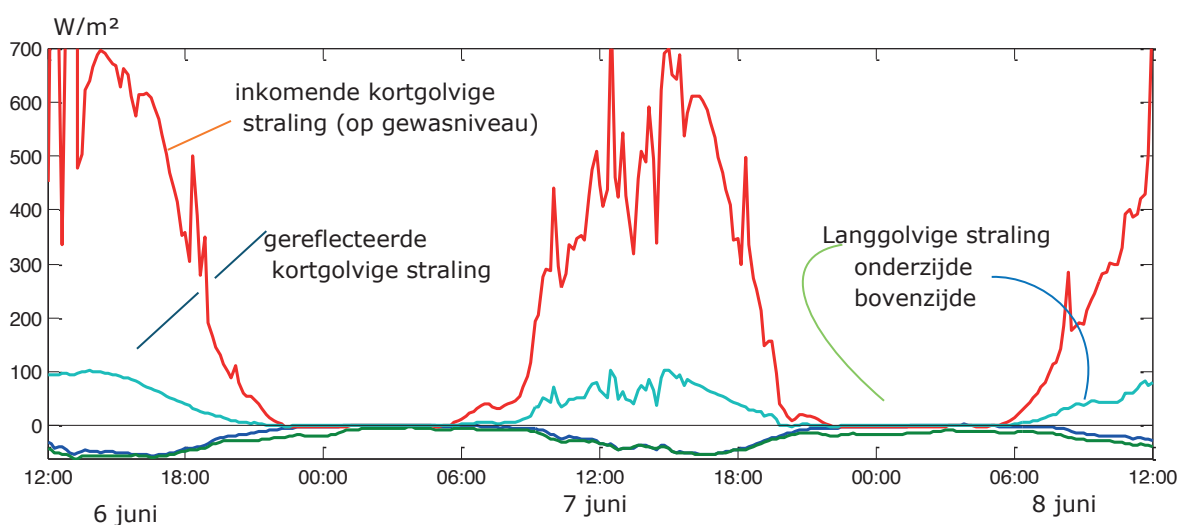


**Figuur 6.1** Netto stralingsmeter die de 4 meetsignalen apart meet.

De 4-componenten netto-stralingsmeter heeft 4 optische sensoren. Aan de bovenkant zit een pyranometer die het invallend zonlicht meet en een pyrgeometer die de langgolvlige straling van boven meet. De pyranometer meet overdag waarden tot zo'n 700 W/m<sup>2</sup> en 's nachts uiteraard 0 W/m<sup>2</sup>, behalve wanneer de belichting aan is en er door reflecties ook wat kortgolvig licht gemeten zal worden. De boven-pyrgeometer geeft vrijwel altijd een negatieve waarde (stralingsverlies) omdat de sensor in de regel warmer zal zijn dan de oppervlakken in het 'gezichtsveld' van de sensor.

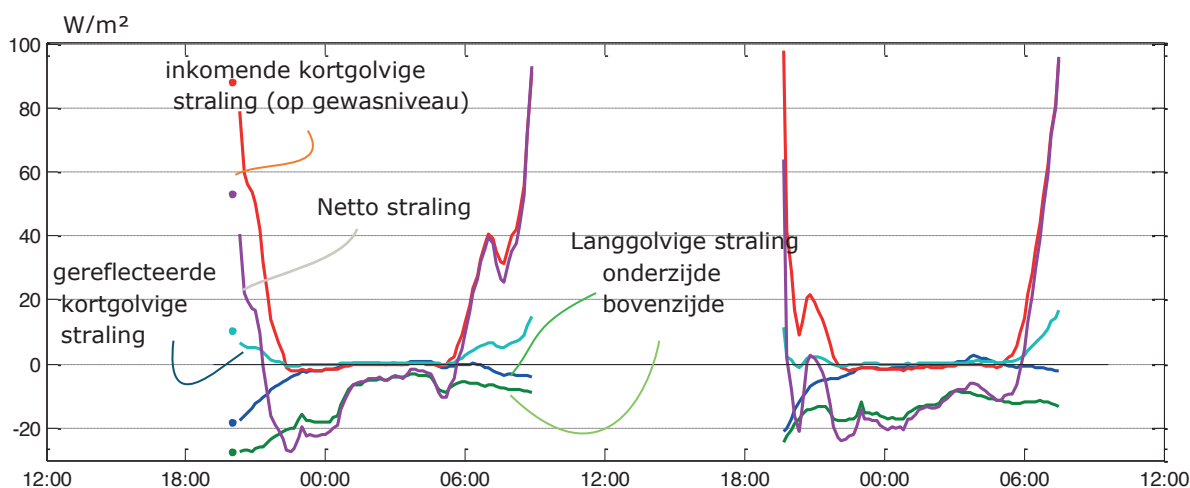
De onderste kortgolvlige stralingssensor (ook een pyranometer) meet het licht dat door het gewas en het vloeroppervlak van de kas wordt gereflecteerd. In een volgroeid tomatengewas is de reflectie ongeveer 15% van de hoeveelheid licht die door de bovensten kortgolvlige stralingssensor wordt gemeten. De onderste pyrgeometer meet de stralingsuitwisseling tussen de sensor en alles wat er onder zit. 's Nachts is de sensor soms wat kouder dan de oppervlakken onder de sensor en zal deze dus een positieve waarde geven. Er wordt dan netto straling aan de sensor afgegeven. Verdampst het gewas echter flink, of straalt het gewas sterk naar het kasdek, dan zal het gewasoppervlak kouder zijn dan de sensor-behuizing en zal ook deze pyrgeometer een negatieve waarde geven.

Onderstaande figuur toont het verloop van de 4 signalen waaruit de netto straling is opgebouwd over 2 etmalen.



**Figuur 6.2** De 4 stralingscomponenten gedurende 48 uur in een kas met een volgroeid tomatengewas zonder scherm.

De figuur laat zien dat de langgolvlige straling klein is ten opzichte van de kortgolvlige straling en dat de langgolvlige straling bijna altijd een negatief signaal is. De sensor-behuizing was in deze periode dus praktisch altijd warmer dan de gemiddelde temperatuur van de oppervlakken in het 'gezichtsveld' van de sensor. De uitstralingsmonitor is bedoeld om inzicht te geven in situaties met weinig licht, dus situaties waarin de binnenkomende kortgolvlige straling niet meer dan 100 W/m<sup>2</sup> bedraagt. Als we alleen naar die momenten kijken komt er meer detail m.b.t. de langgolvlige straling in beeld, zoals te zien is in Figuur 6.3. In die figuur is naast de 4 stralingscomponenten ook de netto straling getekend, een lijn die simpelweg de som van de 4 andere lijnen is.

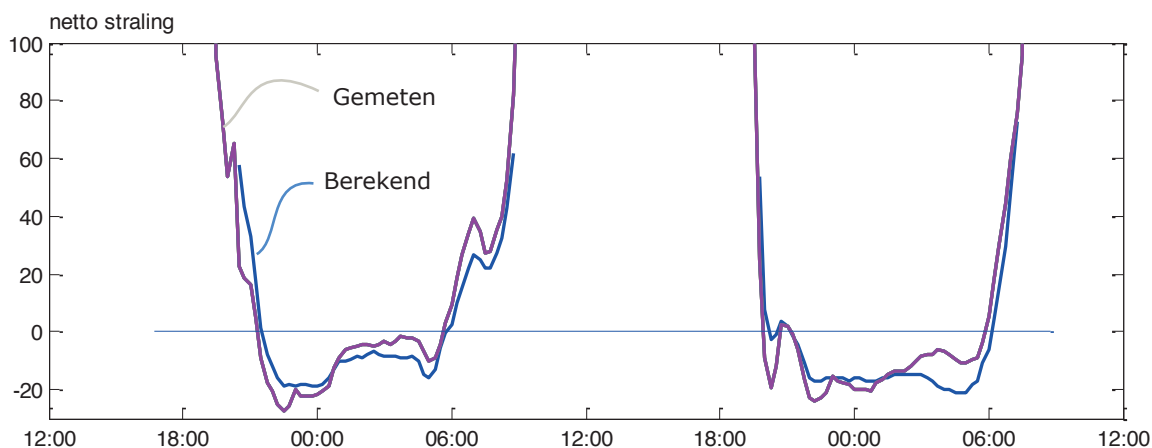


**Figuur 6.3** De 4 stralingscomponenten en de netto straling in de lichtarme omstandigheden in een kas met een volgroeid tomatengewas zonder scherm.

De grafiek laat zien dat bij enig licht de netto straling vooral bepaald wordt door het kortgolvlige licht. 's Nachts is het vooral het stralingsverlies dat aan de bovenzijde van de sensor wordt gemeten die bepalend is voor de netto straling.

De grafiek laat ook zien dat in deze periode van het jaar, waarin er geen scherm wordt gebruikt, het netto stralingsverlies in de nacht tussen de 10 en 20 W/m<sup>2</sup> ligt.

Uiteraard berekent de Uitstralingsmonitor de netto straling en deze wordt in het output-scherm weergegeven. Voor alle tijdstippen waarvoor in de grafiek die in Figuur 6.3 wordt getoond zijn alle parameters die nodig zijn voor een berekening met de uitstralingsmonitor ook bekend (kasbedekingsmateriaal (glas), buitentemperatuur, zonnestraling, windsnelheid, pyrgeometerwaarde, en voor de kaslucht de temperatuur en de luchtvochtigheid). Wanneer de Uitstralingsmonitor wordt gebruikt om voor al die tijdstippen een berekening te maken krijgen we een lijn met de berekende netto straling die vergeleken kan worden met de gemeten netto straling. Deze vergelijking is getoond in onderstaande grafiek.



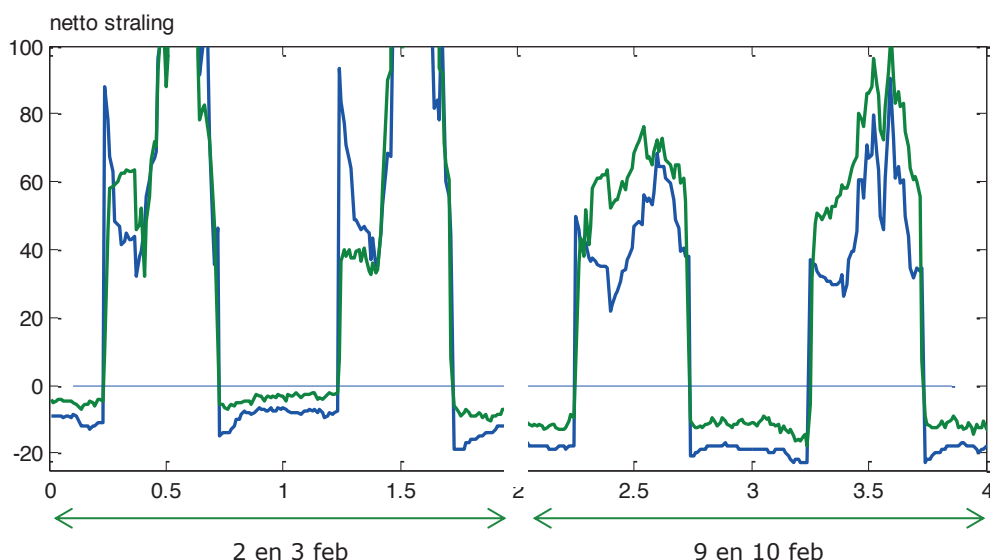
**Figuur 6.4** Gemeten (paars) en berekende (blauw) netto straling in een kas met een volgroeid tomatengewas zonder scherm in twee nachten rond 7 juni.

De grafiek laat zien dat de berekende netto-straling meestal dicht bij de gemeten netto-straling ligt en daarmee dus een heel realistisch beeld geeft.

Behalve de data uit een zomerse periode in een tomatengewas, is de berekende netto straling ook vergeleken met de gemeten netto straling bij een gerbera tuinder in de winterperiode. Deze tuinder heeft een netto-stralingsmeter die slechts één output geeft en waar dus de verschillende componenten van de netto straling in de sensor al bij elkaar opgeteld worden.

Ook hier zijn weer alle inputs voor de uitstralingsmonitor uit de kasklimaatcomputer verkregen. Het gaat dan om de buiten-omstandigheden en de kaslucht-omstandigheden, maar ook om de schermen die gebruikt worden en de belichting.

Onderstaande figuur laat de berekende en gemeten netto straling zien voor 2 achtereenvolgende dagen in een wat warmere periode (2 en 3 februari 2017 met een gemiddelde buitentemperatuur rond de 10°C) en een wat koudere week (9 en 10 februari met buitentemperaturen rond het vriespunt).



**Figuur 6.5** Gemeten (groen) en berekende (blauw) netto straling in een gerbera kas.

De berekende netto straling toont een sterke overeenkomst met de gemeten netto straling, maar ligt in de regel wel een beetje lager.

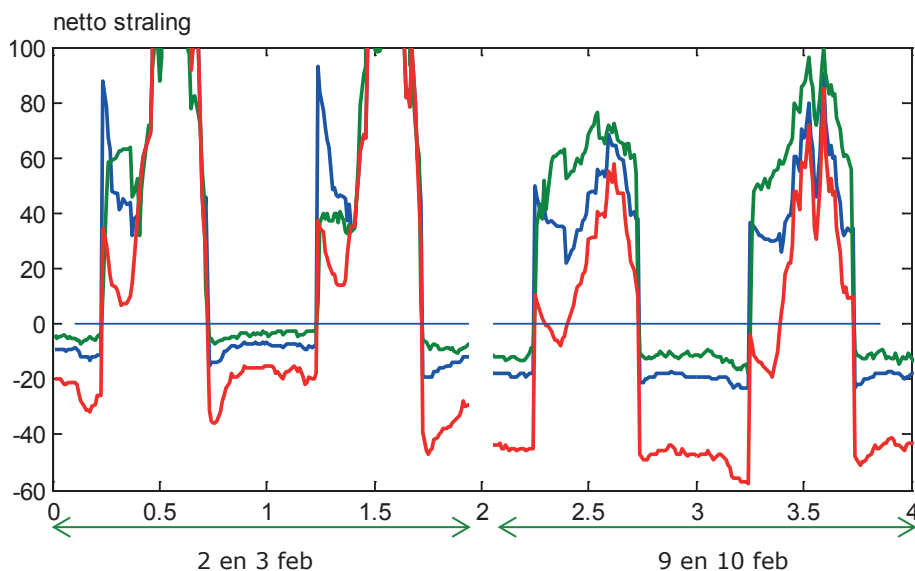
De berekende en gemeten netto-straling komt rond de 50 W/m<sup>2</sup> te liggen zo gauw de belichting aan gaat.

Overdag komt daar nog de bijdrage van het buitenlicht bij.

Daar waar in de metingen die gebruikt zijn voor grafiek 6.4 het scherm 's nachts altijd open was, was het scherm in de data die voor Figuur 6.5 's nachts altijd dicht en vaak waren er zelfs twee schermen dicht (energiescherm en verduisteringsscherm).

Uit de vergelijking van gemeten en berekende netto straling kan worden geconcludeerd dat de uitstralingsmonitor de netto straling in perioden met een negatieve netto uitstraling, dus in perioden waarin de uitstraling voor natslag zou kunnen zorgen er niet meer 10 W/m<sup>2</sup> naast zit.

Met de uitstralingsmonitor kan gemakkelijk worden berekend wat de netto straling zou zijn geweest indien er in het geval van de gerberateelt geen schermen zouden zijn gebruikt. Dit wordt getoond in onderstaande grafiek, waar naast de zelfde groene en blauwe lijn als in Figuur 6.5 ook een rode lijn is getekend.



**Figuur 6.6** Effect van openen van het scherm op de berekende uitstraling. Groen is de gemeten netto straling bij een Gerberateler, blauw de berekende uitstraling onder gelijk schermgebruik en rood is de uitstraling die berekend wordt bij alle omstandigheden gelijk, maar schermen geopend.

Het berekende effect van wel of geen scherm is veel groter dan de afwijking die er tussen de gemeten en berekende netto straling te zien is. In de wat warmere periode (2 en 3 feb) leidt het openen van het scherm tot 10 tot 15 W/m<sup>2</sup> extra uitstraling. In de koude periode, waarin het buiten rond de 0°C was wordt er 30 tot 40 W/m<sup>2</sup> extra stralingsverlies berekend door het openen van de schermen.

Het is door dit enorme effect dat er geen data beschikbaar zijn van telers met een netto stralingsmeter die perioden hebben waarbij het buiten koud is en de schermen toch geopend zijn. Dit blijkt ook in de hierna volgende paragraaf waar er wordt ingegaan op het effect van het scherm op de temperatuurverdeling in het gewas.

## 6.2 Temperatuurverdeling bij open en gesloten scherm

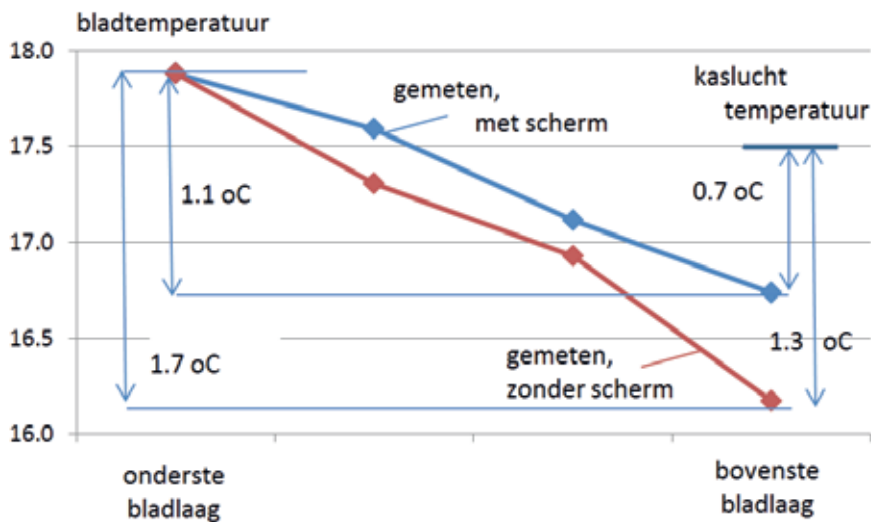
Op 17 februari 2016 is gemeten aan de temperatuurverdeling in een volgroeid tomatengewas bij en geopend en een gesloten scherm. De metingen zijn gedaan na zonsondergang in een kas waarvan de kasluchttemperatuur gestabiliseerd was. Ter plaatse van de meetbox werd 16.4°C gemeten, maar rond de planten waar gemeten werd was de kasluchttemperatuur 17.5°C. De luchtvochtigheid bedroeg 86% RV bij een gesloten scherm en 82% RV toen het scherm was geopend.

De buitentemperatuur was 0.5°C en het was windstil. De lucht was helder, wat leidde tot een pyrgeometer uitstraling van -70 W/m<sup>2</sup>, buiten de kas gemeten.

De kas gebruikte alleen het ondernet.

Tussen 19:45 en 19:55 zijn op 4 hoogten bladtemperaturen gemeten bij een gesloten scherm. Het betrof een licht-afschermingsscherm, type Obscura 9950. De bladtemperaturen zijn gemeten met een Infrarood temperatuurmeter.

Om 21:00 is het scherm geopend en tussen 21:15 en 21:25 zijn de bladtemperaturen opnieuw gemeten. Onderstaande grafiek toont het gemeten temperatuurprofiel over het gewas in beide gevallen.



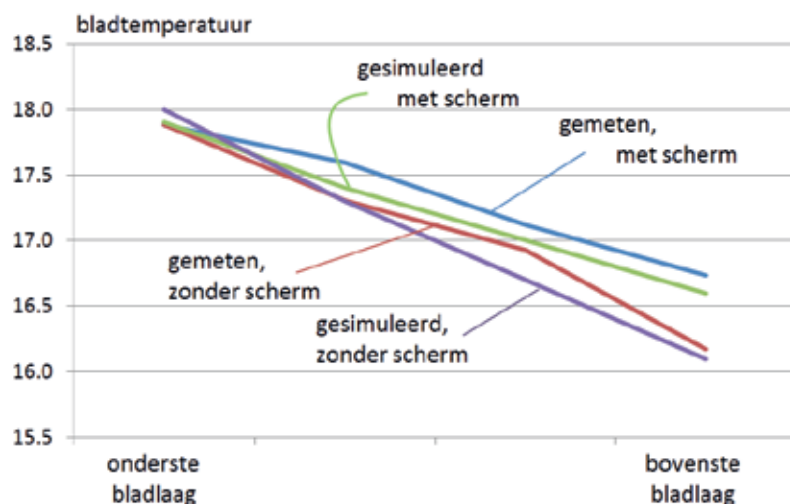
**Figuur 6.7** Gemeten temperatuurprofiel van onder naar boven in een tomatengewas (nachtelijke omstandigheden) met en zonder scherm.

De grafiek laat duidelijk zien dat bij een geopend scherm het temperatuurverschil groter wordt. Bij gesloten scherm is het gemeten temperatuurverschil tussen kop en onderkant van het gewas 1.1 °C en bij geopend scherm wordt dit 1.7 °C.

De temperaturen in de kop van het gewas liggen op 16.7 °C bij een gesloten scherm en 16.1 °C bij een geopend scherm.

De grafiek laat ook zien dat volgens de meting de temperatuur in de kop bij een gesloten scherm 0.7 °C onder de luchttemperatuur ligt en bij een geopend scherm 1.3 °C onder de kasluchttemperatuur ligt.

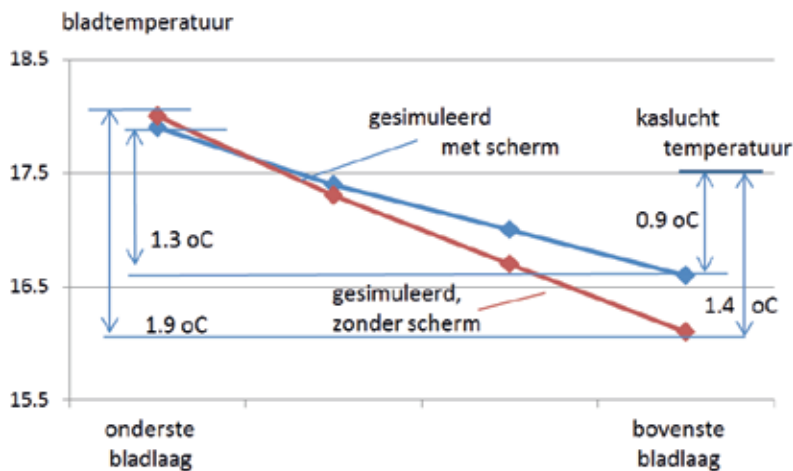
Na invulling van de bovengenoemde omgevingsparameters in de uitstralingsmonitor, waarbij de kasluchttemperatuur op 17.5 °C is gesteld, worden de onderstaande gewastemperaturen berekend, die getoond zijn samen met de gemeten gewastemperaturen.



**Figuur 6.8** Gemeten en berekende temperatuurprofielen van onder naar boven in een tomatengewas (nachtelijke omstandigheden) met en zonder scherm.

Figuur 6.8 laat zien dat metingen en berekeningen niet samenvallen, maar wel goed vergelijkbaar zijn. Het verloop van de temperatuur over de hoogte van het gewas in geval er een scherm wordt gebruikt is in metingen en berekeningen vrijwel gelijk.

Zonder scherm berekent het model een iets sterker temperatuurverschil tussen de onderkant en bovenkant van het gewas, maar dat komt vooral omdat de temperatuur van de onderste gewaslagen iets hoger berekend wordt. Dit blijkt uit onderstaande figuur, waaruit kan worden afgelezen dat het verschil tussen de temperatuur van de bovenste gewaslaag en de kaslucht nauwelijks anders is dan volgens de metingen.



**Figuur 6.9** Berekende temperatuurprofielen van onder naar boven in een tomatengewas (nachtelijke omstandigheden) met en zonder scherm.

Daar waar de metingen bij een gesloten scherm 1.1 °C temperatuurverschil aangeven tussen de bovenkant en onderkant van het gewas is dat volgens de uitstralingsmonitor 1.3 °C verschil. Bij een geopend scherm is dit respectievelijk 1.7 en 1.9 °C.

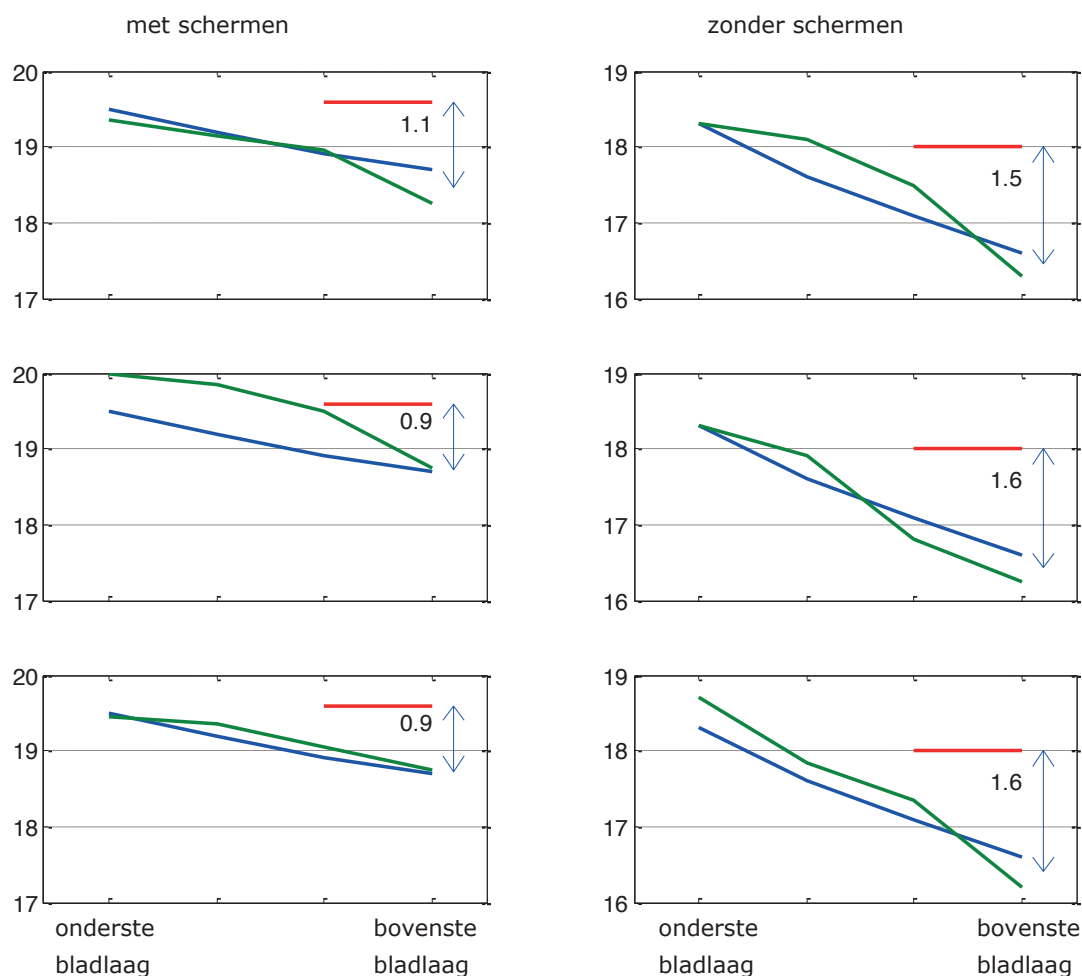
Het effect van het scherm op het temperatuurverschil tussen den onder- en bovenkant in het gewas (0.6 °C in de metingen en 0.7 °C volgens de uitstralingsmonitor) is ook heel goed vergelijkbaar.

De uitstralingsmonitor berekent bij een gesloten doek ook de schermtemperatuur en komt op 11.9 °C. Deze ligt dicht in de buurt van de gemeten schermtemperatuur (10.5 °C).

Tijdens de metingen zonder scherm kon de dektemperatuur met de infrarood-thermometer worden bepaald. Er werd 6.7 °C gemeten. Het simulatiemodel berekende onder die omstandigheden een iets hogere temperatuur, namelijk 7.2 °C.

Op 7 december 2016 is een tweede serie metingen gedaan naar de temperatuurverdeling in het gewas, nu bij een volgroeid komkommengewas in een kas met een dubbel transparant scherm.

Ten tijde van de metingen was de buitentemperatuur 2.6 °C en gaf de pyrgeometer tussen de 50 en 60 W/m<sup>2</sup> stralingsverlies aan. De luchtvochtigheid in de kas was 82% tijdens de metingen met een gesloten scherm en 74% tijdens de metingen met een open scherm. De metingen zijn opnieuw in het donker uitgevoerd en er is drie keer de temperatuur-opbouw bepaald bij gesloten schermen en drie keer bij een geopend scherm. De resultaten van deze metingen zijn getoond in onderstaande figuur.



**Figuur 6.10** Berekende temperatuurprofielen (blauw) en gemeten temperatuurprofielen (groen) van onder naar boven in een komkommergewas (nachtelijke omstandigheden) met en zonder scherm. Het rode lijntje geeft de kasluchttemperatuur.

Deze tweede serie validaties van de berekende gewastemperaturen laten opnieuw zien dat de trends die in de gewassen gemeten worden ook in de output van de uitstralingsmonitor tot uiting komen. De temperatuur in de kop van het gewas wordt binnen een paar tienden van een graad nauwkeurig berekend en het scherm-effect op de temperatuur bovenin het gewas ten opzichte van de kasluchttemperatuur is in de berekeningen vrijwel gelijk met de metingen.

Naar beneden toe in het gewas worden de verschillen groter. Dit komt doordat er in een kas niet één luchttemperatuur is, maar een temperatuurgradiënt. Vooral in een situatie zonder scherm, waarbij in een koude nacht een fors verwarmingsvermogen wordt ingezet ontstaat er zo'n gradiënt. Onderin de kas is de lucht warmer dan bovenin de kas en alleen al daardoor zullen bladeren onderin het gewas warmer zijn.

De uitstralingsmonitor heeft maar één luchttemperatuur als input, de kasluchttemperatuur zoals gemeten in de meetbox en dus bovenin het gewas. Het is dus logisch dat de uitstralingsmonitor de temperaturen onderin het gewas op het moment dat er flink gestookt moet worden zal onderschatten.

De door de uitstralingsmonitor berekende temperatuur van het onderste scherm (15.9 °C) komt heel nauw overeen met de gemeten temperatuur van het onderste scherm (16 °C).

Bij een geopend scherm was de berekende kasdektemperatuur 9.9 °C en de gemeten kasdektemperatuur 10.4 °C. In deze tweede serie metingen wordt de kasdektemperatuur dus iets te laag berekend, maar het verschil tussen berekende en gemeten zijn klein.



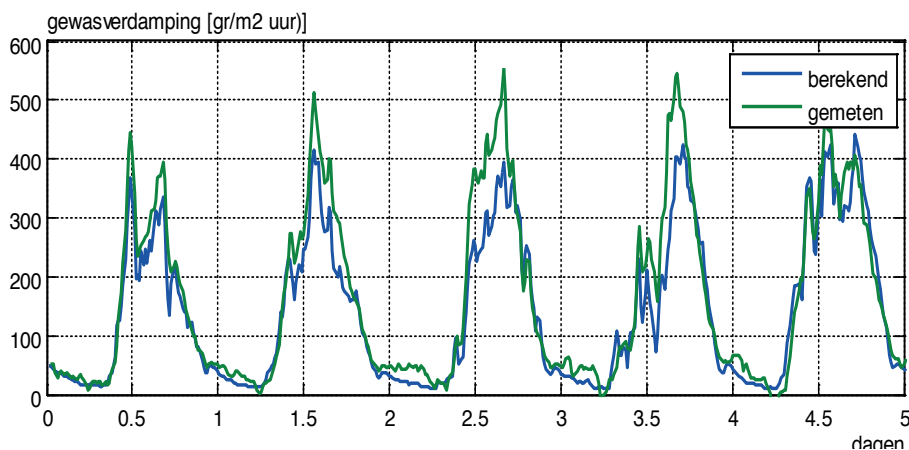
Gezien het doel van de uitstralingsmonitor, namelijk het inzichtelijk maken van het effect van schermen op de uitstraling vanuit het gewas en het effect van die uitstraling op de temperaturen van de bovenste gewasdelen wordt dit feit (de onderschatting van de temperatuur in de onderste gewaslagen) gelaten voor wat het is.

## 6.3 Gemeten en berekende verdamping

Zoals in de modelbeschrijving uiteengezet is de latente warmte die met de verdamping samenhangt een belangrijke energiestroom in een kas. Daarom is behalve naar de berekende netto straling en de temperatuurverdeling in het gewas ook naar de berekende verdamping gekeken. Hierbij is gebruik gemaakt van weeggootmetingen die in 2014 en recent aan tomatengewassen zijn gedaan.

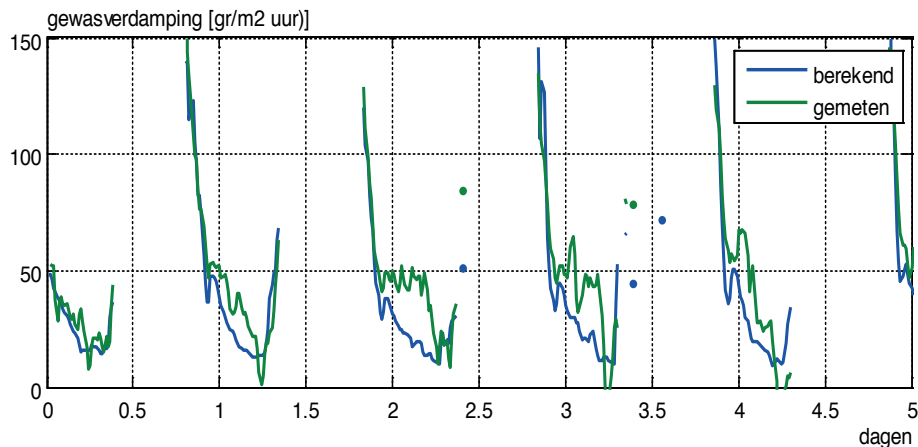
Zoals te zien op pagina 15 berekent de uitstralingsmonitor de verdamping per gewaslaag, maar voor de vergelijking kan alleen de totale gewasverdamping worden gebruikt. Dit is immers wat er met een weeggoot bepaald kan worden.

De metingen uit 2014 zijn gedaan in een dubbeldeks-kas, zodat ook in de uitstralingsmonitor voor het kasdek het type 'Dubbel glas met AR en LE' is gekozen. Dit is een hoog-isolerend kasdek. Verder zijn de gemiddelde omgevingscondities per kwartier bij het model ingevoerd, dus steeds nieuwe combinaties voor de pyrgeometerwaarde, zonstraling, buitentemperatuur, kasluchttemperatuur, luchtvochtigheid en schermgebruik). Onderstaande grafiek toont de berekende en gemeten verdamping over 5 achtereenvolgende dagen.



**Figuur 6.11** Berekende (blauw) en gemeten (groen) gewasverdamping over 5 achtereenvolgende dagen (van 27 juni t/m 1 juli 2014)

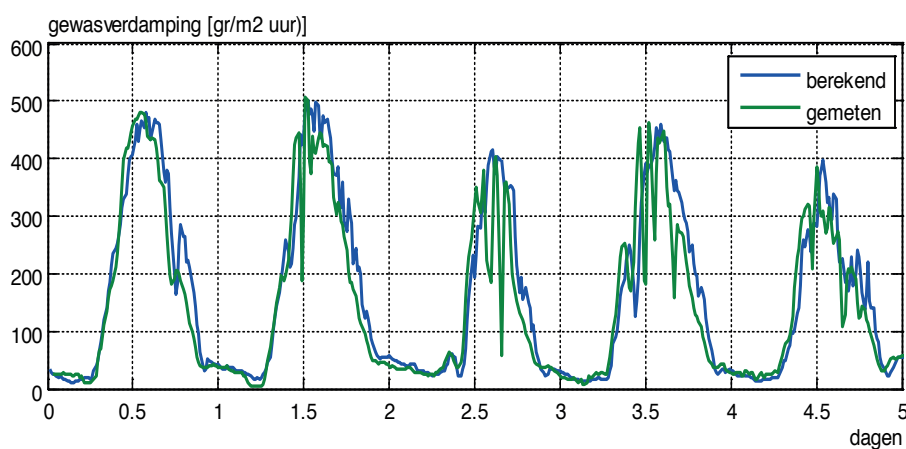
Door de bank genomen komt de berekende verdamping netjes overeen met de gemeten verdamping, maar midden op de dag, bij hogere stralingsintensiteiten, is de gemeten verdamping vaak hoger dan wat de uitstralingsmonitor berekent. Het lukte echter niet om de parameters die de verdamping bepalen (de minimale huidmondjesweerstand en de twee parameters die de invloed van de lichtintensiteit op de huidmondjesweerstand bepalen, zie pagina 21) zo te kiezen dat de verdamping 's nachts naar tevredenheid werden berekend en ook de verdamping tijdens hoge stralingsintensiteiten nog klopte. Aangezien de uitstralingsmonitor bedoeld is om simulaties te maken onder lichtarme omstandigheden is er echter prioriteit gegeven aan een redelijke match onder die omstandigheden. Onderstaande grafiek laat de berekende en gemeten waarden zien voor dezelfde periode, maar alleen voor die condities waarin er minder dan 150 W/m<sup>2</sup> straling is.



**Figuur 6.12** Berekende (blauw) en gemeten (groen) gewasverdamping over 5 achtereenvolgende dagen (van 27 juni t/m 1 juli 2014), ingezoomd op de tijdstippen waar er minder dan 150 W/m<sup>2</sup> straling was.

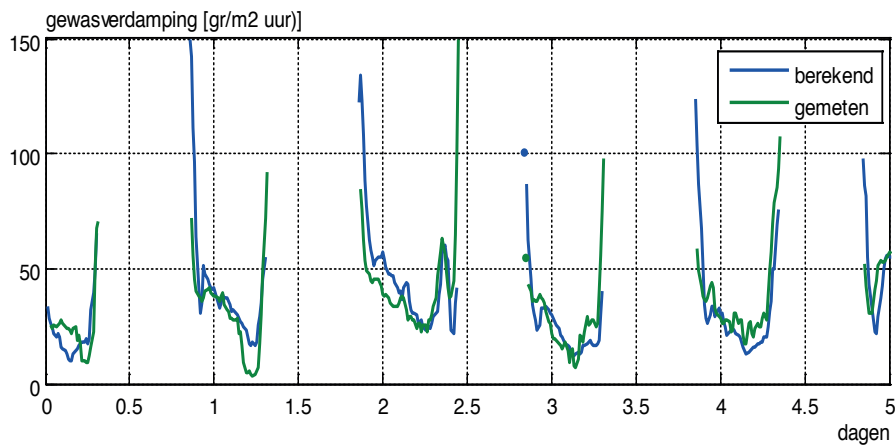
Het model geeft geen exacte match met de berekeningen, maar zit toch wel goed in de buurt, vooral op de momenten met de laagste verdampingscijfers.

Uit onderstaande grafiek blijkt dat de vergelijking van de gemeten en berekende verdamping voor data die recent in de 2SaveEnergy kas zijn verzameld tot een nog betere match laten zien, zowel in op de lichtrijke perioden van de dag als in de nacht.



**Figuur 6.13** Berekende (blauw) en gemeten (groen) gewasverdamping over 5 achtereenvolgende dagen in de 2SaveEnergy kas (van 1 juni t/m 5 juni 2017).

De goed overeenkomende match op het midden van de dag is natuurlijk mooi, maar aangezien de Uitstralingsmonitor bedoeld is om juist voor donkerder perioden inzicht te geven in de temperatuurverdeling en verdamping van het gewas is het ook hier beter om in te zoomen op juist die perioden. Onderstaande grafiek laat dan ook weer alleen de data zien voor perioden met minder dan 150 W/m<sup>2</sup> globale straling.



**Figuur 6.14** Berekende (blauw) en gemeten (groen) gewasverdamping over 5 achtereenvolgende dagen in de 2SaveEnergy kas (van 1 juni t/m 5 juni 2017), ingezoomd op de tijdstippen waar er minder dan 150 W/m<sup>2</sup> straling was.

De overeenkomst tussen meting en berekening is zodanig dat er van uit gegaan kan worden dat de latente warmteflux die met de verdamping samen hangt goed in het model wordt meegenomen.

## 6.4 Conclusies uit de validaties

De uitstraling vanuit het gewas zoals die met een netto stralingsmeter wordt gemeten wordt met een nauwkeurigheid van + of – 10 W/m<sup>2</sup> berekend.

De gewastemperaturen worden ook nauwkeurig voorspeld. De afwijkingen tussen meting en berekening is nooit meer dan een paar tienden van graden en vooral het effect van het openen of sluiten van het scherm, en daarvoor was de Uitstralingsmonitor bedoeld, wordt door het model heel goed gesimuleerd. Waar in de metingen het openen van het scherm het temperatuurverschil tussen kaslucht en de bovenste gewaslaag een halve graad deed dalen komt het model met eenzelfde verlaging.

Deze goede overeenstemming kan alleen worden gerealiseerd wanneer de verdamping van het gewas goed wordt berekend. De vergelijking van metingen en berekeningen van de verdamping laten dan ook meestal een goede overeenkomst zien.

De temperaturen van het kasdek en scherm-oppervlakken laten wat grotere verschillen zien tussen meting en berekening. Hier kunnen de gemeten temperaturen tot ongeveer 1.5°C verschillen ten opzichte van de berekende temperaturen.



## 7 Conclusies

De uitstralingsmonitor toont realistische effecten van kasdekken, schermen, belichting en andere gebruikersinstellingen op de temperatuurverdeling in het gewas en de netto straling op gewaskop-hoogte. Ook worden de temperaturen van scherm-oppervlakken en de kasdektemperatuur berekend die dicht bij gemeten waarden liggen. De kwantitatieve resultaten dragen bij aan het verkrijgen van inzicht in het effect van schermen.

De temperatuur in de verschillende gewaslagen wordt in de omstandigheden waarvoor het model bedoeld is (dus lage buitentemperaturen en weinig licht) brekend met een nauwkeurigheid die hooguit een paar tienden van graden afwijkt van gemeten waarden. En vooral het effect van het openen of sluiten van schermen komt in het model op een zeer vergelijkbare wijze naar voren.

De temperatuur-opbouw in het gewas wordt voor een belangrijk deel bepaald door de stralingshuishouding in de kas. Om hier greep op te krijgen zijn tuinders netto stralingsmeters gaan gebruiken die op gewashoogte in de kas worden gehangen. Een positieve waarde van deze sensor, die op kan lopen naar zo'n 700 W/m<sup>2</sup>, geeft aan dat het gewas netto stralingsenergie uit de omgeving ontvangt. Is de waarde negatief, wat tot ongeveer -70 W/m<sup>2</sup> kan lopen, dan verliest het gewas energie door straling.

De uitstralingsmonitor geeft een berekende waarde voor netto uitstraling op gewashoogte. Als deze berekende waarde wordt vergeleken met gemeten waarden dan blijkt dat de netto uitstraling binnen een nauwkeurigheid van + of - 10 W/m<sup>2</sup> wordt berekend. Dit geldt overigens wel voor perioden met weinig licht, de periode waarvoor de uitstralingsmonitor bedoeld is.

Het energieverbruik via de latente warmte onttrekking van de gewasverdamping is een duidelijk herkenbaar onderdeel van het model. Een lagere luchtvochtigheid leidt tot meer verdamping en dat leidt tot extra warmte-onttrekking door het gewas en extra energieverbruik.

De vergelijking tussen metingen en berekeningen van de verdamping laten zien dat de verdamping netjes wordt berekend. Het feit dat het realiseren van een lagere luchtvochtigheid betekent dat er meer moet worden geventileerd, wordt niet door het model meegenomen.

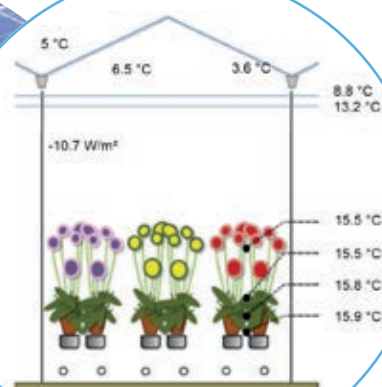
Ook houdt het model geen rekening met een verticale gradiënt in de luchttemperatuur. Hierdoor wordt de gewastemperatuur in de diepere gewaslagen in de regel wat onderschat. In een echte kas, en vooral een kas waar de verwarming voornamelijk door het ondernet wordt gerealiseerd zal het gewas onderin vaak nog wat warmer zijn dan wat de uitstralingsmonitor berekent.

Het is natuurlijk jammer dat beide genoemde effecten niet met de uitstralingsmonitor kunnen worden getoond, maar toevoeging van zulke zaken zou weinig veranderen aan de belangrijkste boodschap van de uitstralingsmonitor, namelijk dat het gebruik van schermen een duidelijke verkleining van de verticale temperatuurverschillen in het gewas oplevert en het risico op natslag in de kop verkleint. Ook laat het programma zien welke momentane energiebesparing er van het gebruik van schermen verwacht mag worden. Binnen één categorie van schermen (energieschermen, verduisteringsschermen) zijn de verschillen tussen verschillende schermsoorten op energieverbruik en temperatuur-opbouw in het gewas klein. Bij schaduwsschermen, waar een grote diversiteit aan reflecterende, diffuserende en absorberende eigenschappen bestaat geven de verschillende types overdag natuurlijk fors verschillende resultaten, maar 's nachts blijven de verschillen klein, zelfs bij schermdoeken die behoorlijk verschillen in het aantal open bandjes. Dit komt doordat bij open doeken de ruimte boven het schermdoek dicht bij de kasluchttemperatuur blijft en dus het kasdek ook relatief warm zal blijven.





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



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

Glastuinbouw Rapport GTB-1449

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

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