



# Verdamping bij de kop

Feije de Zwart, Ilias Tsafaras en Hans Janssen

Rapport GTB-1450

## Referaat

In Het Nieuwe Telen wordt gestreefd naar een lagere nachtverdamping om het energieverbruik te beperken. Maar de verdamping moet wel voldoende blijven om nutriënten naar de kop van het gewas te kunnen transporteren. In dit project is onderzocht of de verdamping specifiek vanuit de kop van het gewas kan worden bepaald vanuit het beeld van een thermische camera. Immers, verdamping leidt tot een kouder blad en de bepaling van het temperatuurverschil tussen verdampend en een niet-verdampend blad geeft een maat voor de lokale verdamping. Dit blijkt mogelijk, maar alleen wanneer het camerabeeld zowel de temperatuur van het te bestuderen bladpakket laat zien als de temperatuur van een dicht bij gelegen niet-verdampend referentieblad. Hiervoor is een camerasysteem dat zowel in het zichtbare spectrum als in het infrarood spectrum beelden zonder parallax geeft om steeds de juiste pixels te kunnen selecteren.

Om de gemeten temperatuurverschillen te kunnen vergelijken met wat een normaal verdampend blad laat zien is intensief gebruik gemaakt van de Uitstralingsmonitor. Dit onlangs gepubliceerde model gaf dusdanig interessante resultaten dat de detail-informatie over de gewasverdamping nu als standaard uitvoer is toegevoegd.

Dit project is gefinancierd door Kas Als Energiebron, het onderzoeksprogramma dat wordt ondersteund door het ministerie van Economische zaken en LTO-Glaskracht Nederland.

## Abstract

The 'Next Generation Greenhouse Cultivation' aims at a lower night time crop transpiration in order to reduce the energy consumption. This transpiration however needs to stay sufficient for the transport of nutrients to the head of the crop. In this project, it was investigated whether the local transpiration of the head of the crop can be determined from the image of a thermal camera. Transpiration lowers the leaf surface temperature and by determining the temperature difference between transpiring and non-transpiring leaves a measure can be found for local transpiration.

This appeared to be possible, but only when the camera image shows both the temperature of the leaves to be studied and the temperature of a nearby non-transpiring reference surface. This requires a good camera system as it was not always easy to select the correct pixels in the images.

In order to compare the measured temperature differences with what a normal transpiring leaf can be expected to show, intensive use of the Radiation Monitor has been made. This recently published model gave that interesting results that the detailed information about crop transpiration has now been added as standard output.

The project is funded by Kas Als Energiebron, the research program supported by the Ministry of Economic Affairs and LTO-Glaskracht Nederland.

## Rapportgegevens

Rapport GTB-1450

Projectnummer: 3742224400

PT nummer: 20034

DOI nummer: 10.18174/421067

## 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](mailto:glastuinbouw@wur.nl), [www.wur.nl/plant-research](http://www.wur.nl/plant-research). Wageningen Plant Research.

Wageningen University & Research, BU 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>Theoretische achtergrond</b>	<b>11</b>
	2.1 Temperatuurverschil tussen verdampend en niet-verdampend blad	12
	2.2 Van temperatuurverschil naar verdamping	15
	2.3 Is het gebruik van kunstbladeren nodig?	16
<b>3</b>	<b>Meetopstelling</b>	<b>17</b>
	3.1 Beeldverwerking	19
<b>4</b>	<b>Resultaten</b>	<b>23</b>
<b>5</b>	<b>Conclusies</b>	<b>27</b>



# Samenvatting

Planten verdampen water en met de waterstroom vanuit de wortels naar de andere gewasdelen worden voedingsstoffen meegenomen. Overdag, wanneer er veel licht is zorgt de verdamping van water voor de koeling van de bladeren. Het overschot aan energie wat door de zon op het gewas straalt kan zo worden afgevoerd. 's Nachts gaat de verdamping op een laag niveau door. Daarmee onttrekt het gewas energie aan de kaslucht en als de kastemperatuur onder de stooklijn komt moet de energie voor de verdamping door het verwarmingssysteem worden geleverd.

In Het Nieuwe Telen, waarin naast verbetering van de teelt ook de beperking van het energieverbruik centraal staat, wordt daarom gestreefd naar het minimaliseren van die nachtelijke verdamping. Maar omdat met de beperking van de verdamping ook de aanvoer van nutriënten wordt verminderd is er een ondergrens aan die verdamping.

Vanuit theoretisch oogpunt kan het niet anders dan dat een verminderde verdamping vooral in de kop van het gewas optreedt. De kop is 's nachts immers door uitstraling altijd kouder dan de dieper gelegen plantdelen. Hierdoor is de drijvende kracht voor verdamping in de kop van het gewas het kleinst. Onvoldoende nutriëntentoevoer zal dus het eerst in de kop van het gewas optreden. Dit moet natuurlijk worden voorkomen, dus bij het telen bij een verminderde verdamping moet er gewaakt worden voor een te kleine verdamping vanuit de kop.

Vanuit theoretisch oogpunt kan worden gesteld dat de verdamping specifiek vanuit de kop van het gewas zou kunnen worden bepaald vanuit de meting van de temperatuur van de bladeren in de kop. Berekeningen geven aan dat die in groentegewassen ongeveer 0.3 tot 0.4 graden kouder zal zijn dan de temperatuur van oppervlakken die niet verdampen. De temperatuur van specifieke plantdelen kunnen worden bepaald met behulp van een thermische camera, waarbij dan natuurlijk goed moet worden aangegeven welke pixels bij het te monitoren blad horen. Maar naast deze gewastemperatuur moet ook de temperatuur bepaald worden van een niet verdampend oppervlak op (bijna) dezelfde locatie.

De Uitstralingsmonitor kan de temperaturen van verdampende en niet verdampende oppervlakken in de kas met een behoorlijke nauwkeurigheid berekenen, maar de berekende temperatuur hangt heel sterk af van de kasluchttemperatuur die in de berekening wordt gebruikt. Die kasluchttemperatuur verschilt aanzienlijk van plaats tot plaats in de kas, veel meer dan de 0.3 tot 0.4 graden verschil die door de gewasverdamping wordt veroorzaakt. Daarom voldoet een berekende temperatuur van een niet verdampend blad niet om te kunnen worden gebruikt in de bepaling van het aantal tienden van graden dat het verdampende blad in de kop van het gewas kouder zal zijn dan een niet-verdampend blad.

Bepaling van de lokale verdamping vanuit de temperatuur van het blad kan dus plaatsvinden met een thermische camera indien in hetzelfde camerabeeld ook de temperatuur van een niet verdampend referentieoppervlak kan worden bepaald. Hiermee wordt gelijk het probleem omzeild dat het meten van grootheden met verschillende meetinstrumenten al gauw statische fouten oplevert.

De meetnauwkeurigheid van de camera moet groot zijn. Het verschil tussen normaal verdampend blad en niet-verdampend blad in de kop bedraagt hooguit 0.4 °C dus om slecht verdampend te kunnen onderscheiden van niet-verdampend moet de verschilbepaling met een nauwkeurigheid van ongeveer 0.1 °C kunnen plaatsvinden. In een experimentele opstelling met een thermische camera boven een tomatengewas zijn tijdreeksen gemaakt van deze verschil-bepaling voor 13 nachten. In 3 nachten viel het gemeten verschil tussen normaal verdampend blad en niet verdampend blad vrijwel samen met het verwachte verschil. Er waren echter ook nachten waarin de match veel minder goed was, en er waren een paar nachten waar het verdampend blad zelfs warmer bleek dan niet-verdampend blad. Een verschil wat zeker niet aan de verdamping toegeschreven kan worden.

Drie nachten met een goede match uit 13 nachten is een lage score. De selectie van de pixels die tot de bladeren in de kop van het gewas gerekend moeten worden was echter geen eenvoudige zaak dus het is goed mogelijk dat er voor de bepaling van de temperatuur van de bladeren in de kop van het gewas pixels zijn aangewezen die behoren bij dieper gelegen bladeren. De kop van het gewas is namelijk een groeiend en bewegend object en, gecombineerd met een camera met een kleine scherptediepte was de selectie van pixels die tot de kop van het gewas moeten worden gerekend niet altijd even eenduidig.

Een betere camera zou dit probleem kunnen oplossen en onder de voorwaarde dat er voor de temperatuurverschilbepaling ook een niet verdampend referentieoppervlak in hetzelfde camerabeeld aanwezig is vormt de hier beproefde methode een perspectievolle methode om specifiek de verdamping vanuit de kop van het gewas te kunnen bepalen.

Zo'n camera-plus-referentieoppervlak zou in een vaste opstelling in kassen kunnen worden gebruikt, maar ook als mobiele installatie voor tijdelijk gebruik bij tuinders kunnen worden geplaatst. Hiermee zouden tuinders kunnen zien hoe groot het effect van schermen op de koptemperatuur en berekende verdamping uit de kop is en hieruit het voordeel van schermgebruik kunnen ervaren.

In de theorievorming en voor de berekening van het verwachte temperatuurverschil tussen verdampend en niet-verdampend gewas is intensief gebruik gemaakt van de Uitstralingsmonitor. Dit is een recent ontwikkelde model dat de verticale temperatuurverdeling in beeld brengt. Om die te kunnen bepalen moet het model ook de gewasverdeling per laag berekenen en omdat het gebruik van dit model in dit project interessante inzichten opleverde is deze uitvoer nu ook aan de uitvoer van de Uitstralingsmonitor toegevoegd.

Deze uitvoer laat zien dat het sluiten van het scherm de verdamping vanuit de kop van het gewas laat toenemen terwijl de totale verdamping van het gewas praktisch niet verandert. Dit effect van schermen is mogelijk een verklaring voor het feit waarom er in Het Nieuwe Telen, waarbij geïntensiveerd schermgebruik de belangrijkste sleutel is, bij veel hogere luchtvochtigheden wordt geteeld zonder dat hier negatieve effecten van worden gezien in de gewasgroei.

Mogelijk zorgt het kopverdamping bevorderende effect van het scherm ervoor dat de nutriëntentoevoer naar die kop ook bij een hogere luchtvochtigheid nog toereikend is.

# Summary

Plants evaporate water and with this water, nutrients are transported from the roots to the other parts of the crop. During daytime, when there is a lot of light, the evaporation of water provides cooling of the leaves, by which means the crop gets rid of the surplus of energy absorbed from the solar radiation. At night the evaporation continues at a low level. Then, the crop extracts energy from the greenhouse air and if the greenhouse air temperature comes below the heating setpoint, the energy required for the evaporation will have to be provided by the heating system.

In the 'Next Generation Greenhouse Cultivation' it is aimed to both improve the production, as well as to lower the energy demand. For the latter, minimizing the night's evaporation contributes significantly. However, because the reduction of the evaporation will also reduce the supply of nutrients, there is a lower limit on that evaporation.

From theoretical point of view, a reduced evaporation will be most noticed in the top of the crop. This because, the top is always colder than the deeper parts of the plant. As a result, the driving force for evaporation in the top of the crop, which makes the top the most vulnerable for insufficient nutrient supply. This must of course be prevented, so when aiming on a reduced evaporation, the top of the crop will have to be monitored. Also from theoretical point of view it can be stated that the evaporation specific from the top of the crop can be determined by the measurement of the temperature of the leaves in the top region. Calculations indicate that the head of the plant in vegetable crops it will be about 0.3 to 0.4 degrees colder than the temperature of surfaces in the same region that do not evaporate. The temperature of leaves in the top of the crop can be determined by means of a thermal camera, after a careful annotation of pixels to the leaves to be monitored. In addition to this, the temperature of a non-evaporating surface at almost the same location must be determined as well and the temperature difference of the two is a measure for the transpiration rate from these specific leaves.

The Radiation Monitor, a recently developed on-line model that computes the temperature profile in a greenhouse crop, can calculate the temperatures of evaporating and non-evaporating surfaces in the greenhouse with proper accuracy. However, the calculated temperatures depend strongly in the greenhouse air temperature and it is known that this temperature differs a lot from place to place in the greenhouse. Much more than the 0.3 to 0.4 degree difference caused by the evaporation rate. Therefore, a calculated temperature of a non-evaporating leaf will not be accurate enough to be used in the computation of a temperature difference which will not be more than a few tenths of a degree.

Determination of the local temperature difference between evaporating and non-evaporating leaves can therefore be determined only when the a thermal image of the camera contains the temperatures of both the evaporating and non-evaporating surfaces. This directly eliminates the problem that taking measurements with different measuring instruments will easily result in static errors due to offsets.

The accuracy of the thermal camera must be high. The difference between normal transpiring leaves and a non-evaporating surface in night time conditions is not more than 0.4 °C. Therefore, in order to be able to distinguish poorly transpiring from non-transpiring leaves, the temperature difference must be measured with an accuracy of about 0.1 °C.

In an experimental setup with a thermal camera above a tomato crop, time series have been made of this temperature difference over 13 nights. In 3 nights, the measured difference between evaporating leaf and a non-evaporating surface almost coincided with the expected difference. However, there were also nights in which the match was much less, and there were a couple of nights where the evaporating surface was even warmer than non-evaporating leaf. Such a difference can certainly not be attributed to the evaporation.

Three nights with a good match out of 13 nights is a low score. However, this might be largely caused by the difficulties encountered in selecting the pixels that were attributed to the leaves belonging to the head of the crop. The crop's head is a growing and moving object and, combined with a camera that was difficult to focus, the selection of pixels that were annotated as the head of the crop was not always as unambiguous.

A better camera could solve this problem and, provided that there is also a non-evaporating reference surface in the same camera image, the method tested here gives the possibility to determine the evaporation from specific parts of the crop such as the head of the crop.

Such a camera-plus-reference surface could be used in greenhouses as a part of the permanent equipment, but also as a mobile installation for temporary use. The latter would allow growers to see the big effect of thermal screens on the temperature in the head of the crop and to experience the benefit of screen application.

For the description of the theory used in this project, and for the calculation of the expected temperature difference between evaporating and non-evaporating leaves, the Radiation Monitor has been intensively used. In order to show transpiration, this recently developed model had to be extended. This extension provided that much interesting insights that the transpiration output has now also been added as standard output from this on-line tool.

The model clearly shows that the deployment of the screen increases the evaporation from the crop's head while the total evaporation of the crop is not notably changed. This effect of screens may explain why it shows to be quite possible to grow at higher humidities without negative effects of crop growth when using the 'Next Generation Greenhouse Cultivation'. The intensive application of screens in this new way of growing is likely to promote the evaporation from the head of the crop to such extent that the nutrient supply to the fast growing parts (the head) stays sufficient at a higher humidity.



# 1 Inleiding

Verlaging van het energieverbruik van kassen door betere isolatie en/of het frequenter gebruik van schermen leidt tot een hogere luchtvochtigheid. Indien deze hogere luchtvochtigheid niet wordt toegestaan moeten maatregelen worden genomen die de luchtvochtigheid verlagen en daarmee wordt een deel van de potentiële energiebesparing weer teniet gedaan. Dit geldt vooral wanneer er een ontvochtigingssysteem zonder warmte terugwinning wordt gebruikt, wat bij verreweg de meeste tuinders het geval is.

Één van de redenen waarom tuinders aarzelen een hoge luchtvochtigheid te accepteren is de zorg om voldoende verdamping. Om er zeker van te zijn dat de verdamping op peil blijft wordt de luchtvochtigheid dan laag gehouden. Immers, hoe vochtiger de kaslucht, hoe kleiner het dampdrukverschil tussen de verdampende onderdelen van het gewas en de kaslucht en hoe kleiner de gewasverdamping.

Bij de zorg om voldoende verdamping richt die zorg zich vooral op de kop van het gewas. Enerzijds omdat de kop het snelste afkoelt en dus met het kleinste dampdrukverschil als drijvende kracht te maken heeft, en anderzijds omdat het groeipunt van het gewas zich in de kop bevindt. De kop heeft dus grote behoefte aan nutriënten die met het verdampende ater meekomen.

Een sensor die de verdamping in de kop (het groeipunt) c.q. in de bovenste laag van het gewas in beeld brengt zou deze zorg kunnen wegnemen. Daarmee zou het pad geëffend kunnen worden voor een brede acceptatie van hogere luchtvochtigheden, met name in de groenteteelt.

In dit project is onderzocht in hoeverre het gebruik van een beeldvormende thermische camera de mogelijkheid biedt om specifiek de verdamping in de kop van het gewas te bepalen. De verdamping wordt daarbij afgeleid uit het verschil in de gemeten temperatuur van bladeren in de kop en de temperatuur van een niet verdampend blad onder dezelfde omstandigheden. Hoe lager de gemeten temperatuur van het echte blad ten opzichte van het niet-verdampend blad, hoe groter de verdamping. De theorie voor deze bepaling van de verdamping wordt besproken in hoofdstuk 2.

De ontwikkeling van de meetmethode en de beoordeling van de kwaliteit ervan heeft plaatsgevonden in een tomatenkas met een volgroeid gewas waar een beeldvormende thermische camera boven geplaatst is. Behalve de bladeren van het echte gewas waren er ook steeds twee kunstbladeren in het beeld van de camera. Één van die kunstbladeren was voorzien van een PT-100 temperatuurvoeler ter controle van de temperatuur die door de camera werd bepaald.

Hoofdstuk 3 beschrijft de meetopstelling en de kwaliteit daarvan.

De thermische camera leverde prima beelden zolang de scherpstelling goed was. Deze focussering bleek echter lastig omdat de camera een regelmatige scherpstelling nodig had (het gewas groeit) en niet op afstand bediend kon worden. Omdat de scherpstelling vaak te wensen over liet is het aantal dagen met bruikbare data beperkt tot 14 dagen, verspreid over een periode van 2 maanden. De resultaten van de metingen met de thermische camera worden getoond en beschreven in hoofdstuk 4.

Ondanks het feit dat er een beperkt aantal dagen kon worden gebruikt geven de experimenten een heel goed beeld van de mogelijkheden en beperkingen van de meetmethode. In hoofdstuk 5 kunnen dan ook duidelijke conclusies worden getrokken en aanbevelingen worden gedaan voor de verdere ontwikkeling.



## 2 Theoretische achtergrond

Verhoging van het luchtvochtigheidssetpoint is de makkelijkste manier om direct energie te besparen in de glastuinbouw. Onderzoek met behulp van het simulatiemodel KASPRO geeft aan dat als vuistregel kan worden gesteld dat het verhogen van het RV-setpoint 1 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup> jr) energiebesparing oplevert per %-punt verhoging van het RV-setpoint.

Deze vuistregel geldt voor een kas waar de ontvochtiging plaatsvindt door de toevoer van buitenlucht zonder warmteterugwinning<sup>1</sup> rond een luchtvochtigheidssetpoint van 85% RV. De energiebesparing komt deels doordat het voelbaar warmteverlies dat gepaard gaat met de afvoer van vocht relatief kleiner wordt bij toenemende RV, maar ook omdat de verdamping van het gewas afneemt bij toenemende luchtvochtigheid.

Tijdens de momenten van stoken, en dat is vooral 's nachts en onder omstandigheden met weinig licht, betekent een verminderde verdamping ook een verminderde latente warmteopname van het gewas. En wat het gewas minder onttrekt, hoeft de verwarming minder te stoken.

De directe warmteonttrekking van het gewas voor de verdamping is een substantieel deel van het energieverbruik. Een gewas wat 30 gram vocht per m<sup>2</sup> per uur verdampt onttrekt daarvoor 20 W/m<sup>2</sup> en als er geen (zon)licht aanwezig is wordt deze energie aan de kaslucht onttrokken. Afgezet tegen de warmtevraag van een kas die in de winter al gauw 60 W/m<sup>2</sup> bedraagt vertegenwoordigt de gewasverdamping dus meer dan 30% van de warmtevraag van groentegewassen. Als door de verhoging van de RV de verdamping naar bijvoorbeeld 20 gram per m<sup>2</sup> per uur zou kunnen worden verlaagd dan zou dat direct 7 W/m<sup>2</sup> aan energiebesparing opleveren door de verlaagde onttrekking van latente warmte en daarnaast nog ongeveer 5 W/m<sup>2</sup> verlaging van de warmtevraag doordat er minder geventileerd hoeft te worden. De warmtevraag van de kas zou dan zo met 10 tot 15% kunnen afnemen.

Verschuillende onderzoeken hebben laten zien dat in de groententeelt de luchtvochtigheid flink kan worden verhoogd zonder dat er een toename van ziekten werd waargenomen. Niet alleen in onderzoekskassen is de instelling van een luchtvochtigheidssetpoint rond de 90% RV (of rond de 1.5 gr/m<sup>3</sup>) al lang geen uitzondering meer; ook verschillende tuinders die gemonitord zijn in het monitoringsproject laten zien dat zij de luchtvochtigheid waarbij zij hun gewassen kweken hebben laten oplopen<sup>2</sup> Mogelijk speelt de homogeniserende werking van schermen op de temperatuurverdeling hierbij een belangrijke rol.

Naast het voorkomen van ziekten speelt echter de zorg over voldoende verdamping ook mee in de overweging van tuinders om de luchtvochtigheid niet te hoog op te laten lopen.

Tijdens lichtrijke periodes heeft de gemiddelde tuinder via de vergelijking van watergift en drain een goed inzicht in zijn gewasverdamping, maar bij weinig licht en 's nachts is die terugmelding er in de regel niet of nauwelijks. Alleen tuinders met een weeggoet hebben inzicht in de nachtelijke wateropname. Met een meer uitgebreid systeem zoals de ProDrain kan ook de echte verdamping worden berekend uit de wateropname minus de groei. Zo'n verdampings- of wateropnamegetal wordt echter voor een heel gewas gemeten en geeft niet de verdamping specifiek in de kop.

De laatste jaren neemt de ontwikkeling van beeldvormende thermische camera's een grote vlucht waardoor deze binnen bereik komen om gebruikt te kunnen worden voor de bepaling van lokale gewastemperaturen. De vergelijking van de temperatuur van een verdampend blad met de temperatuur van vlakbij gelegen niet verdampend blad zou dan als maat gebruikt kunnen worden voor de lokale verdamping.

Bovenstaande zinsnede geeft aan dat het de vergelijking is van de temperatuur van een verdampend en een niet verdampend blad wat de aanwijzing kan geven voor de lokale verdamping. De vraag is natuurlijk hoe groot die verschillen in temperatuur zijn en of zulke temperatuurverschillen ook met voldoende nauwkeurigheid kunnen worden gemeten.

In onderstaande tekst wordt eerst langs theoretische weg bepaald welke temperatuurverschillen verwacht mogen worden en vervolgens wordt gekeken of het aannemelijk is dat dit met een camera kan worden gedetecteerd.

---

1 Bij ontvochtigingssystemen met warmteterugwinning is het energieverbruik voor ontvochtiging uiteraard kleiner.

2 H.F. de Zwart en M. Raaphorst, Intensief schermen en energiezuinig ontvochtigen met Het Nieuwe Telen in komkommer, Rapport GTB-1444, Wageningen University & Research, Wageningen

## 2.1 Temperatuurverschil tussen verdampend en niet-verdampend blad

In het rapport 'Uitstralingsmonitor'<sup>3</sup> is een uitgebreide beschrijving gegeven van de energiestromen die in een kas en rond het gewas een rol spelen in de totstandkoming van de temperatuur van de verschillende onderdelen. In dit model krijgt elk oppervlak in de kas een zodanige temperatuur dat de energie die vanuit warmere kas-delen naar dat oppervlak toestroomt gelijk is aan de energie die dat oppervlak aan de koudere delen van de kas verliest. In de 'Uitstralingsmonitor' worden al die energiestromen uitgerekend als functie van de temperatuurverschillen en wordt er iteratief een evenwichtstemperatuur bepaald. Voor de gewasverdamping wordt er in dat rapport uitgelegd dat de gewasstemperatuur de luchtvochtigheid in de bladholtes bepaalt en dat het verschil tussen de luchtvochtigheid in de bladholtes en de kaslucht de drijvende kracht is voor de verdamping. Die verdamping onttrekt latente warmte aan de bladeren, wat de temperatuur doet verlagen en daarmee ook de luchtvochtigheid in de bladholtes doet verlagen, en dus ook de drijvende kracht. Ook de bepaling van de luchtvochtigheid in het blad wordt dus in de iteratieprocedure van de Uitstralingsmonitor meegenomen.

Voor bladeren in de kop van het gewas onder donkere omstandigheden geldt dat het blad altijd kouder is dan de kaslucht doordat het energie verliest via uitstraling naar het koudere kasdek en/of scherm en door de verdamping vanaf het blad. Omdat zo'n blad in de kop van het gewas kouder is dan de kaslucht ontvangt het blad energie vanuit de kaslucht, maar ook via straling vanuit diepere gewaslagen, die warmer zijn, en ook nog een beetje vanuit de verwarmingsbuizen. Bij gebruik van alleen een buisrailnet is dit overigens maar een heel kleine hoeveelheid omdat de bovenste bladlagen maar hier een paar kleine stukjes buisrail kunnen 'zien'. Ook het bodemoppervlak zal warmer zijn dan de bovenste bladlagen dus ook daaruit ontvangen de bovenste bladeren nog enige stralingsenergie.

Normaal gesproken toont de uitstralingsmonitor alleen de resulterende temperaturen en verdampingscijfers, maar 'onder water' zijn natuurlijk ook alle verschillende energiestromen bekend.

Onderstaande figuur toont die energiestromen zoals die worden uitgerekend voor het bovenste bladlaagje onder de uitgangspunten dat de kaslucht 18 °C is en een luchtvochtigheid heeft van 85% RV. Indien er geen scherm wordt gebruikt, de buitentemperatuur 5 °C is en de pyrgeometer -20 W/m<sup>2</sup> uitstraling aangeeft berekent de uitstralingsmonitor een kasdektemperatuur van 10 °C.

In de standaard-uitgangspunten van de Uitstralingsmonitor voor tomaat wordt gerekend met een LAI=3 en wordt deze 3 m<sup>2</sup> blad over 4 lagen uitgesmeerd. Dit betekent dat er dan 0.75 m<sup>2</sup> blad in de bovenste laag zit, zoals ook in de uitvoer wordt aangegeven.

De Uitstralingsmonitor berekent dan 16.9 °C als temperatuur van de bovenste bladlaag en 18.3 °C als temperatuur van de onderste bladlaag. De temperatuurgradient is het gevolg van het feit dat de bladlagen allemaal stralingsschermen vormen die ervoor zorgen dat van boven naar beneden in het gewas de bladeren steeds minder het koude dek 'zien' en dus steeds minder stralingsenergie aan dat dek verliezen.

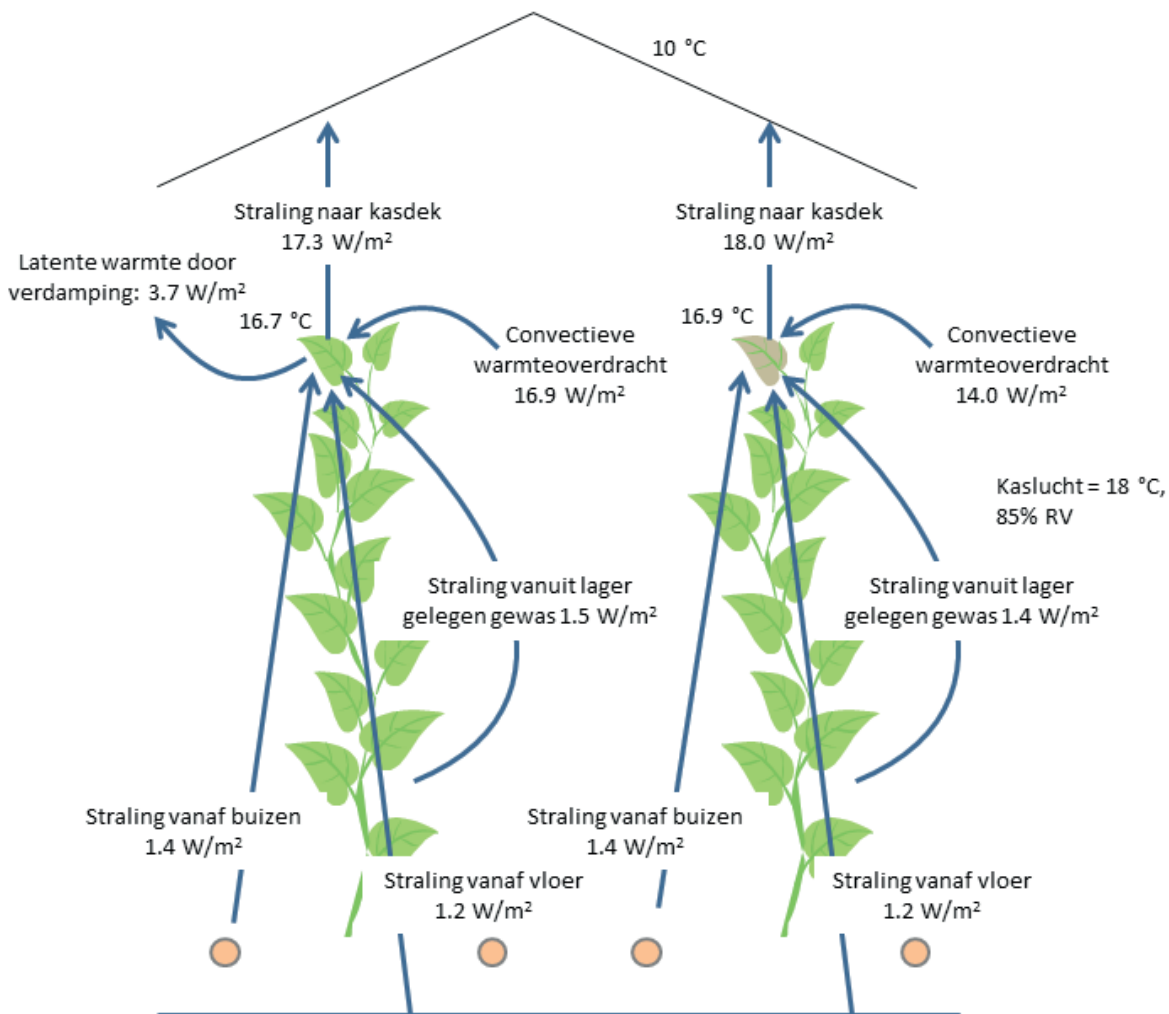
Gegeven het feit dat een gewas niet uit 4 lagen bestaat, maar uit veel meer bladlagen zal het duidelijk zijn dat de temperatuur van de bovenste blaadjes nog wat lager zal zijn dan de temperatuur die in de standaard berekening door de Uitstralingsmonitor wordt berekend. Immers, de bovenste blaadjes van de plant vormen geen oppervlak van 0.75 m<sup>2</sup> per m<sup>2</sup> kas, maar een veel kleiner oppervlak.

Om verder op die bovenste blaadjes in te kunnen zoomen is voor het kopverdampingsproject een speciale bladoppervlakte verdeling gemaakt, die verkregen wordt door bij het invulveld 'Gewas' van de uitstralingsmonitor de 'TomaatKV' te kiezen in plaats van 'Tomaat'. In dat geval wordt de totale LAI namelijk anders verdeeld over de 4 bladlagen van het model. Na kiezen van 'TomaatKV' (of 'KomkommerKV') krijgt de bovenste bladlaag een oppervlak van 0.15 m<sup>2</sup> blad per m<sup>2</sup> kas en wordt de resterende 2.85 m<sup>2</sup> blad over de overige 3 lager gelegen bladlagen wordt verdeeld. De 'kop van het gewas' wordt dus gerepresenteerd door 5% van de totale bladmassa.

Hierdoor representeert de bovenste bladlaag in het model dus meer het allerbovenste bladlaagje, de kop van het gewas. Inderdaad wordt er dan een wat lagere temperatuur voor dat bovenste bladlaagje berekend, zoals getoond wordt aan de linker kant van onderstaande figuur.

---

<sup>3</sup> H.F. de Zwart, E.B. Baeza, B. van Breugel, V. Mohammadkhani en H.J.J. Janssen, De uitstralingsmonitor, Rapport GTB-1449 Wageningen University & Research, BU Glastuinbouw, Wageningen

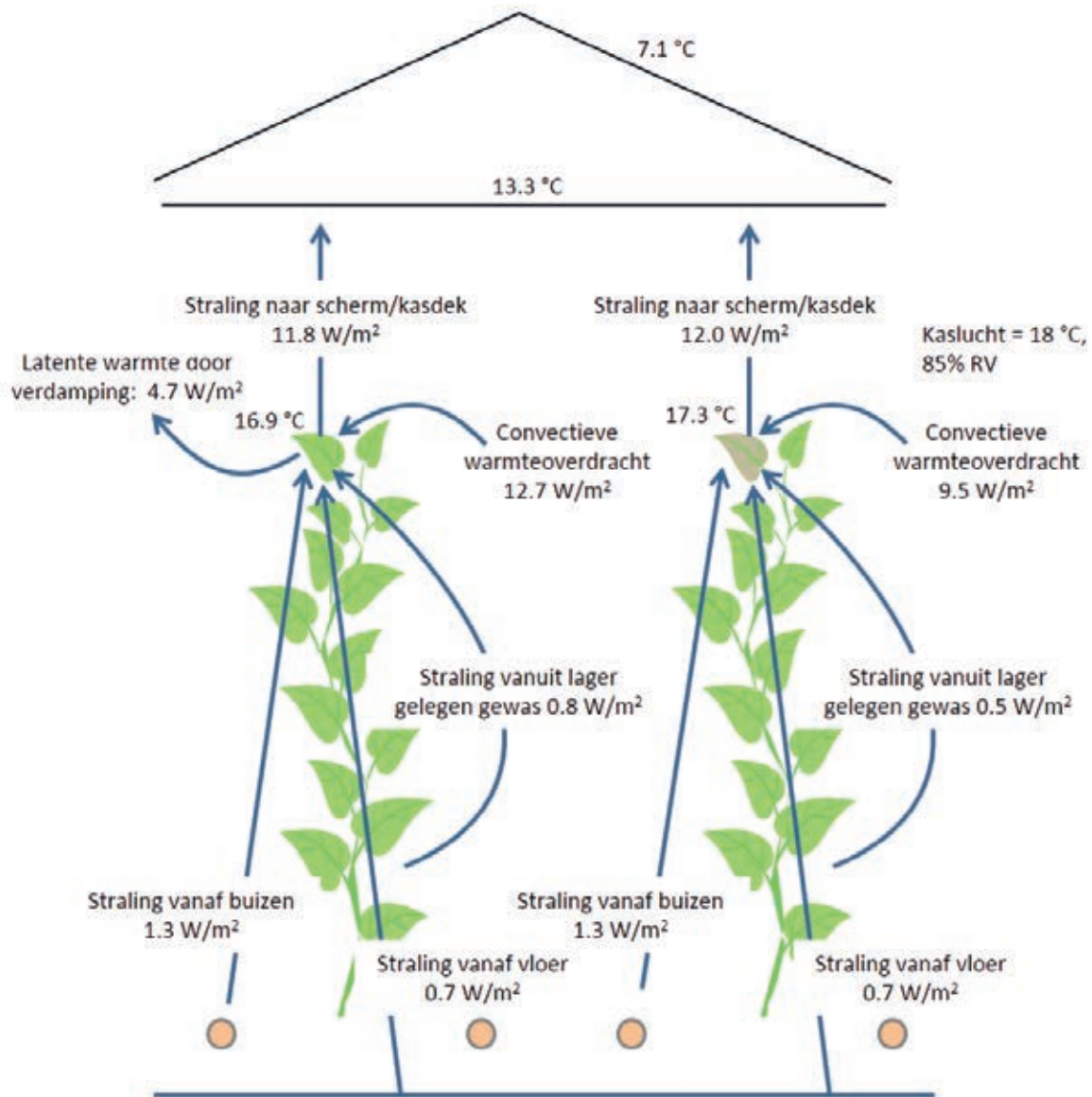


**Figuur 2.1** Temperaturen van kaslucht, kasdek en bovenste bladlaag en de energiestromen van en naar die bovenste bladlaag bij een normaal verdampend blad (links) en bij een kunstmatig, niet verdampend blad (rechts).

Het gewas verdampt volgens de uitstralingsmonitor 23 gram/(m<sup>2</sup><sub>kas</sub>) per uur. Wanneer deze verdamping evenredig over alle m<sup>2</sup> blad zou zijn verdeeld zou ieder blaadje 7.7 gram/(m<sup>2</sup><sub>blad</sub>) per uur verdampen, namelijk 23 / 3, de LAI van het gewas. De bovenste bladlaag is echter kouder dan de gemiddelde gewastemperatuur en heeft dus een lagere luchtvochtigheid in de bladholtes dan gemiddeld in het gewas. De verdamping in de kop van de kas is dus ook minder dan gemiddeld en wordt door het model op 5.4 gr/m<sup>2</sup><sub>blad</sub> berekend. In de uitvoer van de Uitstralingsmonitor komt dit naar voren als 5.4\*0.15 = 0.8 gram/uur verdamping vanuit de bovenste gewaslaag, waarbij 0.15 het fysieke bladoppervlak in de bovenste bladlaag is.

Behalve temperaturen toont Figuur 2.1 ook de energiestromen van en naar het blad, en dan is gelijk te zien dat de latente warmte die met die verdamping gemoeid is een vrij kleine energiestroom vertegenwoordigt. Het energieverlies via straling naar het kasdek is bijna 5 keer zo groot. Het feit dat de bovenste blaadjes 1.3 °C kouder zijn dan de kaslucht komt dus veel meer door het stralingsverlies dan door de verdamping. Dat blijkt ook wanneer we kijken naar de temperatuur die voor een kunstmatig, niet verdampend blad wordt berekend, zoals getoond in het rechterdeel van de figuur. Daar is in het model de verdamping van de bovenste blaadjes 0 gemaakt en volgt een temperatuur van 16.9 °C.

Eenzelfde plaatje kan worden gemaakt met een gesloten scherm. Bij gebruik van een scherm wordt het stralingsverlies kleiner en komt de temperatuur in de kop van het gewas hoger te liggen. Door die hogere koptemperatuur stijgt de luchtvochtigheid in de bladholtes en dus de drijvende kracht voor de verdamping. Onder overigens gelijke omstandigheden zien we dan ook dat de Uitstralingsmonitor bij gebruik van een scherm de verdamping van de bovenste blaadjes verhoogt van 0.8 naar 1 gram/m<sup>2</sup><sub>kas</sub>.



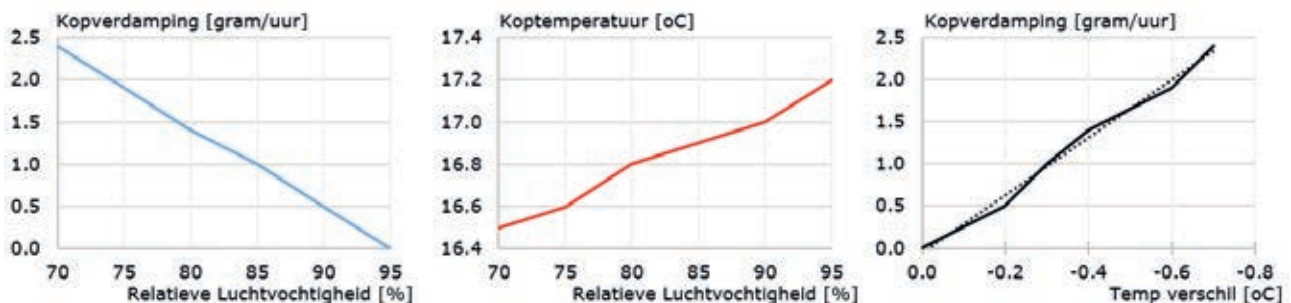
**Figuur 2.2** Temperaturen van kaslucht, kasdek, scherm en bovenste bladlaag en de energiestromen van en naar die bovenste bladlaag bij een normaal verdampend blad (links) en bij een kunstmatig, niet verdampend blad(rechts).

Figuur 2.2 laat zien dat door de toepassing van het scherm alle energiestromen kleiner worden (De temperatuurverschillen in de kas worden kleiner) behalve de latente warmtestroom vanuit de top van het gewas. Die wordt groter en is daardoor ook relatief belangrijker in de warmtebalans over de bovenste blaadjes. Hierdoor wordt het verschil in temperatuur tussen een verdampend en een niet verdampend blad groter, namelijk 0.3 °C. Overigens laat de Uitstralingsmonitor zien dat de verhoging van de verdamping vanuit de kop bij het sluiten van het scherm niet doorzet tot een verhoging van de totale gewasverdamping. Die gaat zelfs iets omlaag omdat een kas met energiescherm een lagere buistemperatuur nodig heeft. Daardoor worden de onderste bladlagen door het sluiten van het scherm juist wat kouder en zullen die wat minder gaan verdampen.

## 2.2 Van temperatuurverschil naar verdamping

De theorie geeft aan dat de gewasverdamping een weliswaar klein, maar toch duidelijk temperatuurverschil tussen een verdampend en een niet-verdampend blad laat zien. Met de Uitstralingsmonitor kan worden bestudeerd hoe deze relatie ligt. Dit kan door de luchtvochtigheid te variëren en de berekende gewas temperatuur en verdamping tegen elkaar uit te zetten in een grafiek. In onderstaande grafiek is dit gedaan voor de situatie die eerder ook gebruikt is voor Figuur 2.2, dus een kas op 18 °C met scherm in een bewolkte nacht bij een buitentemperatuur van 5 °C.

Onderstaande figuur toont als eerste de berekende verdamping in het bovenste blad als functie van de luchtvochtigheid. Daarna volgt een grafiek van de temperatuur van dat bovenste blad als functie van de luchtvochtigheid. Combinatie van die twee, en het gegeven dat de verdamping bij een luchtvochtigheid van 95% onder deze omstandigheden 0 geworden is en de koptemperatuur van een niet verdampend blad dus kennelijk 17.2 °C bedraagt, leidt tot de derde grafiek. Deze geeft de berekende verdamping vanuit de kop van het gewas (bovenste 5% van de bladmassa) als functie van een gemeten temperatuurverschil tussen het verdampend en een niet verdampend blad.



**Figuur 2.3** Relatie tussen ingestelde RV en berekende kopverdamping en koptemperatuur volgens de Uitstralingsmonitor bij gebruik van de instellingen zoals beschreven bij Figuur 2.2. De combinatie van de eerste twee grafieken leidt tot de relatie tussen het temperatuurverschil tussen verdampend en niet verdampend blad (meest rechter grafiek) en de kopverdamping.

In de meest rechter grafiek van Figuur 2.3 is rechte lijn getekend die de helling van de relatie tussen temperatuurverschil laat zien en verdamping. De helling van deze lijn is 3.4 gram/uur per °C, wat betekent dat de kop van het gewas 3.4 gram per uur verdampt als een verdampend blad in de kop van het gewas 1 graad kouder is dan een niet verdampend blad.

Op grond van bovenstaande theorie zou de bepaling van het temperatuurverschil tussen een echt blad en een niet-verdampend kunstblad een goede indicatie zijn voor de verdamping in de kop van het gewas. De bepaling van dit temperatuurverschil moet dan wel heel nauwkeurig gebeuren want als we uitgaan van een nachtelijke gewasverdamping van 30 gram/(m<sup>2</sup> uur) dan zal de kop van het gewas (5% van de bladmassa) maximaal 1.5 gram per uur verdampen. Deze 1.5 gram/(m<sup>2</sup> uur) is al een hoge waarde omdat de 30 gram/(m<sup>2</sup> uur) een hoge waarde is en er bovendien 1.5 gram per uur, 5% van de totale verdamping is bij een evenredige verdeling van de verdamping over de hele hoogte van het gewas. En uit de theorie m.b.t. verdamping van water vanuit de bladholtes weten we dat de kop van het gewas ondergemiddeld zal verdampen.

Bij 1.5 gram/(m<sup>2</sup> uur) verdamping vanuit de kop (een waarde die dus al hoog bovenin de verwachte range ligt) bedraagt de het temperatuurverschil tussen een verdampend en niet-verdampend blad in de kop  $1.5 \cdot 1/3.4 = 0.44$  °C.

Om slecht verdampende bladeren in de kop te kunnen onderscheiden van normaal verdampende bladeren moet het temperatuurverschil tussen het te observeren blad en het niet verdampende referentieblad dus met een nauwkeurigheid kunnen worden gemeten van ongeveer 0.1 tot hooguit 0.2 °C. Een forse uitdaging!

## 2.3 Is het gebruik van kunstbladeren nodig?

In de voorgaande paragrafen is steeds gesproken over de bepaling van de verdamping uit het temperatuurverschil van het verdampende blad en een niet verdampend blad. Uiteraard zou het veel praktischer zijn als zou kunnen worden volstaan met een meting van de gewastemperatuur en deze te vergelijken met de kasluchttemperatuur of met een berekende temperatuur van een niet verdampend blad. Het rapport over de ontwikkeling van de Uitstralingsmonitor<sup>4</sup> laat zien dat dit model gewastemperaturen berekent met een nauwkeurigheid van 'een paar tienden van een graad'. Aangezien het effect van verdamping op de temperatuur van bladeren in de kop in dezelfde orde van grootte ligt is het dus niet mogelijk om de temperatuur van niet verdampend blad met voldoende nauwkeurigheid te berekenen. Daar komt nog bij dat de berekende gewastemperaturen, net als de gewastemperaturen in werkelijkheid bijna 1-op-1 gekoppeld zijn aan de omringende luchttemperatuur. Als de kasluchttemperatuur op de plaats van de bladeren waarvan de verdamping bepaald moet worden 0.5 °C lager is dan de kasluchttemperatuur ter plaatse van de meetbox dan zijn de gewastemperaturen op die plek sowieso al in dezelfde orde van grootte afwijkend ten opzichte van bladeren rond de meetbox. Ook de nauwkeurigheid van de temperatuurmeting van de meetbox geeft een vergelijkbare foutmarge als het temperatuurverschil dat door normaal en minder dan normaal verdampend blad in de kop wordt veroorzaakt.

Al deze factoren samen maken dat een betrouwbare bepaling van de verdamping van plant-delen met behulp van een thermische camera vereist dat de camera een niet verdampend referentie-blad in hetzelfde beeld heeft. Ter verdere bestudering van de mogelijkheden van deze meetmethode voor de bepaling van de verdamping vanuit de kop van het gewas is daarom deze methode, dus een thermische camera met kunstbladeren in hetzelfde beeld, beproefd. Hiervan wordt in het volgende hoofdstuk verslag gedaan.

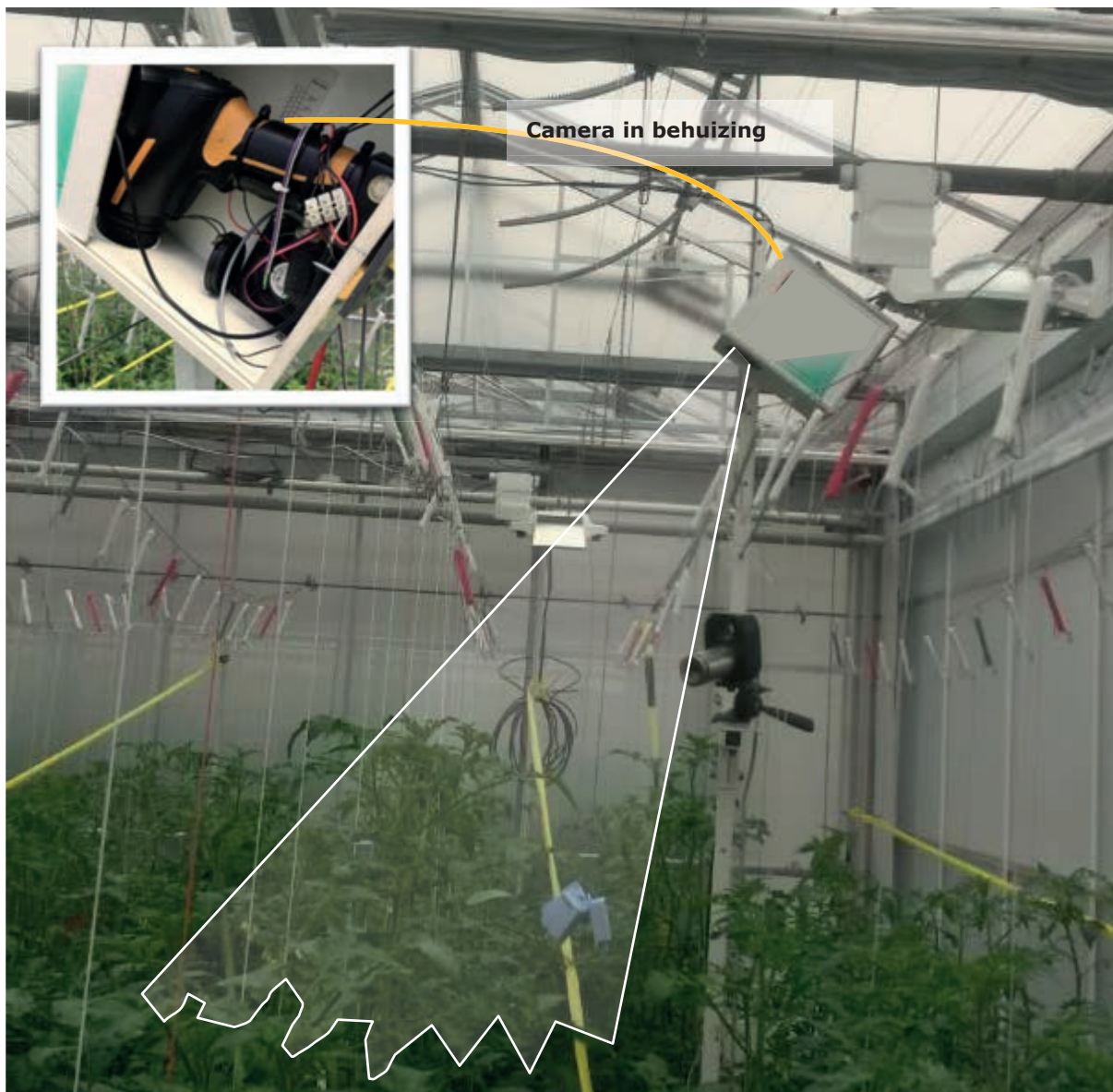
---

<sup>4</sup> H.F. de Zwart, E.B. Baeza, B. van Breugel, V. Mohammadkhani en H.J.J Janssen, De uitstralingsmonitor, Rapport GTB-1449, Wageningen University & Research, BU Glastuinbouw, Wageningen



### 3 Meetopstelling

Om de voorgestelde methode voor de bepaling van het temperatuurverschil tussen een verdampend blad en een niet verdampend blad te onderzoeken is een thermische camera boven een tomatengewas geplaatst.



**Figuur 3.1** Camera boven het gewas.

In het beeld van de camera was steeds de kop van het gewas te zien en twee kunstbladeren. De kunstbladeren hebben een vergelijkbare van vorm en afmeting als een tomatengewas.

De kunstbladeren lijken op echte bladeren maar zij toch gemakkelijk in het beeld te vinden. Voor de kop ligt dat een stuk lastiger. Ten eerste is het begrip 'kop' niet eenduidig gedefinieerd en ten tweede lijken alle bladeren in zo'n 2D beeld op elkaar. De duidelijk zichtbare gewasdraad geeft gelukkig houvast en daar waar de draad in het gewas verdwijnt hebben we de kop te pakken. De bladeren die daar dan weer min of meer horizontaal vandaan komen worden gedefinieerd als de kop-bladeren.



**Figuur 3.2** Camerabeeld in het zichtbaar-licht spectrum.

De camera nam elke 10 minuten een opname die opgeslagen werd op een geheugenkaartje. Eerst werden de resultaten één keer per week bekeken, maar toen bleek dat er veel vaker een scherpstelling van de lens nodig was werd het kaartje om de dag bekeken en de camera ook om de dag opnieuw scherp gesteld. Onscherpheid in het beeld kwam vooral doordat het gewas groeit en de kop zich dus steeds op een andere afstand tot de lens bevindt. Dit in combinatie met een kleine scherptediepte van de camera en wellicht ook enig verloop in de lensinstelling maakte dat de scherpstelling een onverwacht belangrijk aandachtspunt was.

Één van de twee kunstbladeren was aan de onderzijde voorzien van een kleine PT-100 temperatuuropmeter om te kunnen verifiëren of de temperatuurbepaling van de thermische camera klopt met de 'echte' temperatuur. Door de PT-100 met een dun lijm-laagje op het blad te bevestigen werd verzekerd dat de PT-100 nauwkeurig kon meten.

De PT-100 sensor onder het blad is vooraf tegen een nauwkeurige Rotronic temperatuursensor geijkt in een kleine ijkcel.

Behalve de metingen met camera en PT-100 werden de standaard kasklimaatmetingen in de kas uitgevoerd, zoals de buistemperatuur, de kaslucht temperatuur en luchtvochtigheid, de globale straling, de buitentemperatuur en de uitstraling volgens de pyrgeometer.

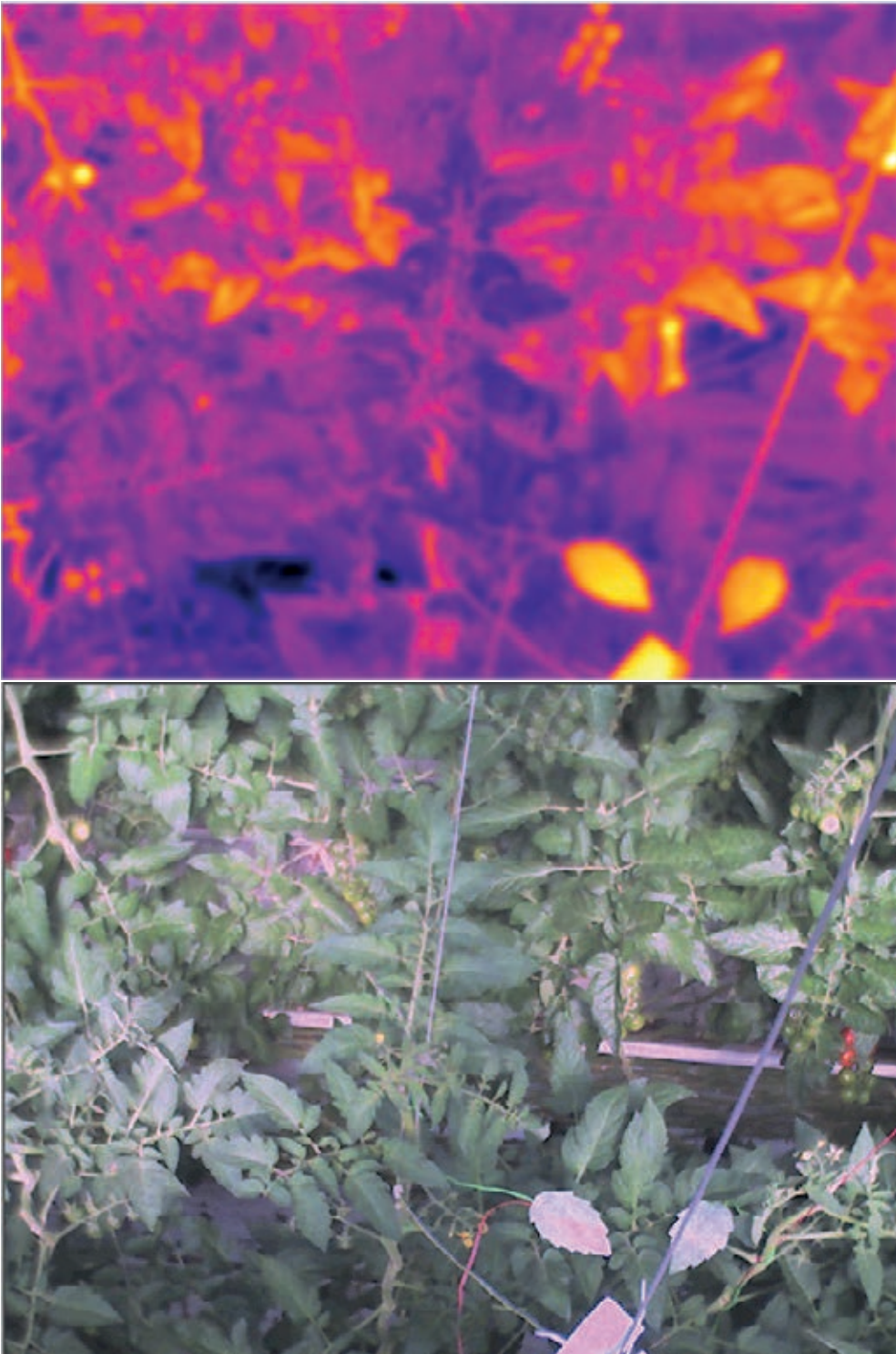


**Figuur 3.3** Foto van temperatuurvoelers samen met de Rotronic sensor, waarmee de PT-100 die tegen het kunstblad was geplakt is geijkt.

### 3.1 Beeldverwerking

De camera heeft over een periode van 6 weken elke 10 minuten een opname gemaakt.

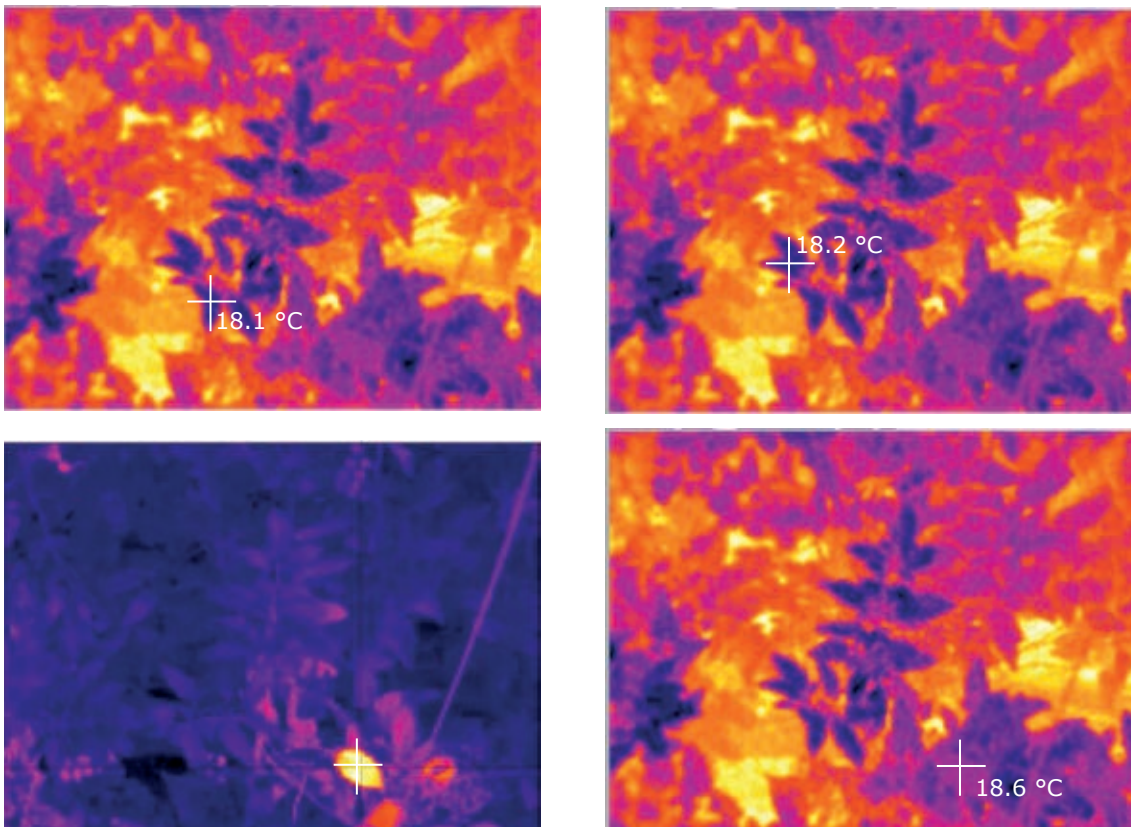
De file-datum van deze opnamen geven het tijdstip van de opname en de klok van de camera was aan het begin van de proef gelijk gezet met de echte tijd. Bij vergelijking tussendoor bleek de klok van de camera niet te verschillen ten opzicht van de tijd waarmee de andere grootheden werden gemeten. De camera maakt eigenlijk twee opnames tegelijk, namelijk een warmtebeeld-opname en een opname in het zichtbaar licht spectrum. Onderstaande foto toont deze twee beelden van een bepaald moment onder elkaar.



**Figuur 3.4** Het beeld in het zichtbare spectrum en het thermisch beeld onder elkaar.

Helaas komen de twee hierboven getoonde beelden niet via één lens in de camera binnen, maar via twee verschillende lenzen. Een grote lens voor het thermische beeld, wat daardoor een kleine scherptediepte heeft, en een klein, eenvoudig ingebouwd cameraatje voor het beeld in het zichtbare spectrum. Het feit dat de twee beelden niet uit dezelfde lens komen geeft enige parallax en maakt dat de twee beelden niet precies over elkaar heen vallen. Het beeld in het zichtbare licht kan dus niet gebruikt worden om de exacte locatie van te bestuderen pixels in het warmtebeeld te bepalen.

Het selecteren van pixels waarvan de temperatuur moest worden aangemerkt als 'koptemperatuur' en als temperatuur van een niet verdampend oppervlak heeft dus plaatsgevonden aan de hand van het thermische beeld. Onderstaande figuur geeft een indicatie van dit proces.



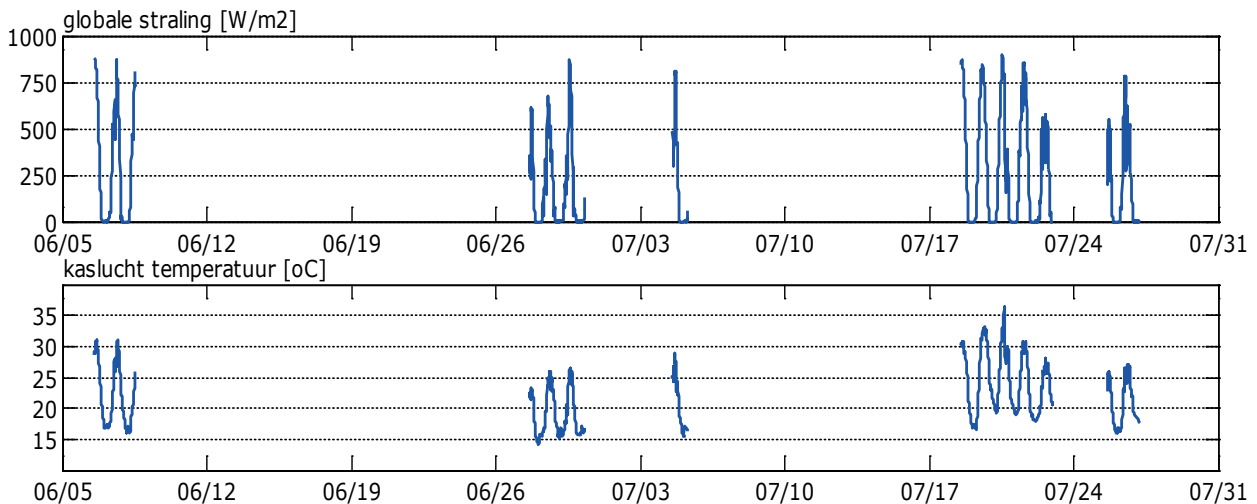
**Figuur 3.5** In dit project zijn beeld voor beeld locaties aangewezen waarvoor de temperatuur als 'koptemperatuur' (twee punten) en als referentietemperatuur zijn aangemerkt.

Uit Figuur 3.5 is te zien dat de kop van het gewas goed te onderscheiden is, waarbij natuurlijk ook gebruik gemaakt is van het beeld in het zichtbaar spectrum en ook de visuele observatie van de geometrie in de kas. In feite moet bekend zijn waar de kop 'zo ongeveer zit'. Zonder deze additionele kennis is het bijna niet mogelijk om uit dergelijke beelden vast te stellen wat de kop van het gewas is. In het geval van Figuur 3.5 wordt er gesteld dat de koptemperatuur 18.15 °C bedraagt, het gemiddelde van de twee aangewezen temperaturen. De camera legde iedere 10 minuten een beeld vast en in de tijd moeten de beelden één voor één worden bekeken omdat de kop van de plant zich steeds verplaatst. De verplaatsing verloopt geleidelijk, dus als er een paar beelden tussen zaten waarop de bladeren nauwelijks te onderscheiden zijn werd de locatie van de pixels die als koptemperatuur aangemerkt worden geïnterpoleerd uit de beelden van omliggende tijdstippen. Het kunstblad was in de beelden die 's nachts werden gemaakt nauwelijks te onderscheiden van de achtergrond. Overdag zijn deze kunstbladeren echter wel heel duidelijk te zien (foto linksonder in Figuur 3.5). Omdat deze bladeren niet bewegen kon voor locatie van de kunstblad-pixels de dag-data worden gebruikt voor het volledige etmaal. In het geval van Figuur 3.5, gemaakt op 20 juli om 05:26 was het temperatuurverschil tussen de kop van het gewas en een niet verdampend kunstblad  $18.6 - 18.15 = 0.45$  °C.



## 4 Resultaten

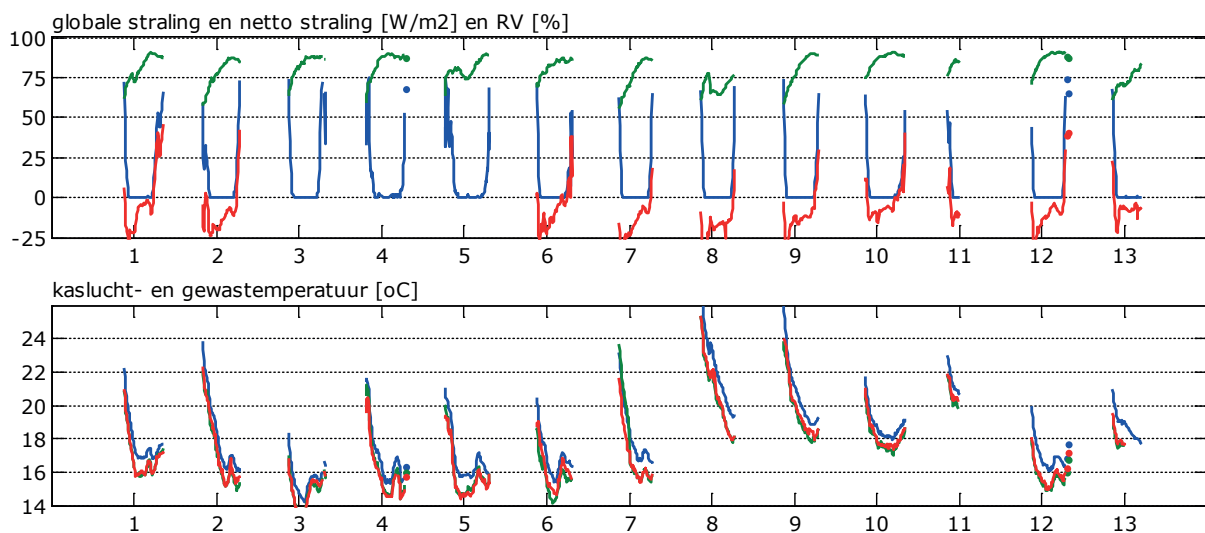
Ter beproeving en beoordeling van het meetsysteem zijn opnames met een thermische camera gemaakt over de periode tussen 7 mei en 27 juli 2016. Er werd gebruik gemaakt van een kas met een volgroeid tomatengewas. Het bleek al gauw dat het verkrijgen van goed scherpe opnames niet eenvoudig was zodat er over deze totale periode 13 bruikbare nachten gebruikt zijn voor de verdere evaluatie.



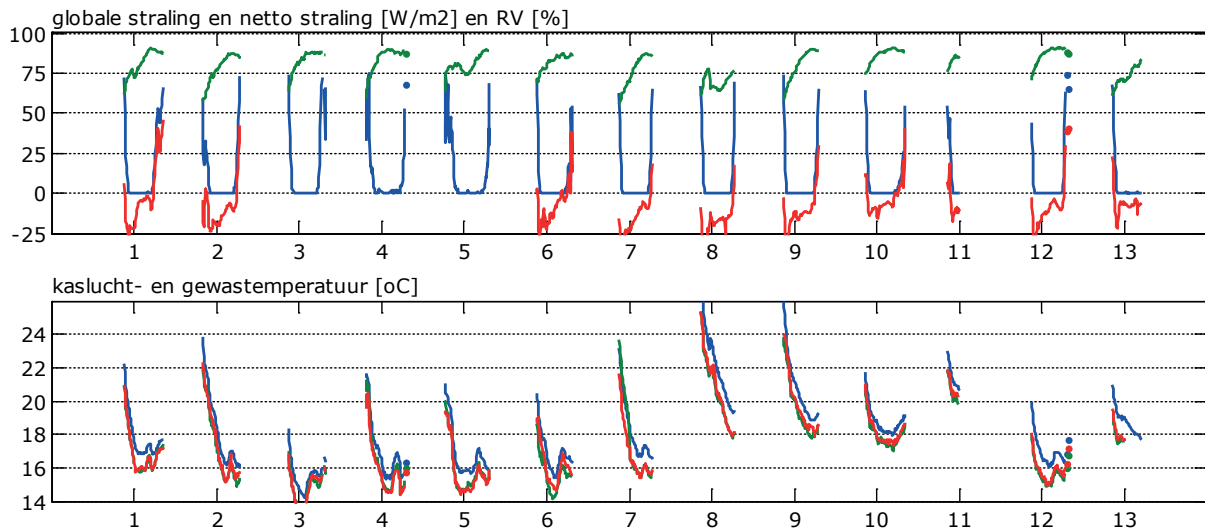
**Figuur 4.1** Delen van de meetperiode waarin de beelden van de thermische camera scherp genoeg waren om te kunnen worden gebruikt voor de verder analyse. Het betrof 13 nachten uit de periode van 7 mei t/m 27 juli 2016.

De bovenstaande grafiek laat zien dat de metingen in de zomer zijn gedaan, waarin er hoge stralingsintensiteiten overdag zijn en hoge kasluchttemperaturen.

De meetmethode is echter bedoeld voor de bepaling van de verdamping vanuit de kop in donkere situaties. Het vervolg van de analyse van de resultaten wordt daarom gebaseerd op de 13 bruikbare nachten waarvan goede camerabeelden beschikbaar zijn. In onderstaande grafiek zijn alle dagen zonder bruikbare meetdata (de 'gaten' in Figuur 4.1) uit de tijdreeks weggelaten, evenals de momenten met een hogere buitenstraling dan 75 W/m<sup>2</sup>.



**Figuur 4.2** Globale straling (blauw), netto straling (rood) en relatieve luchtvochtigheid (groen) van de kaslucht in de 13 nachten waaruit scherpe camerabeelden zijn verkregen.

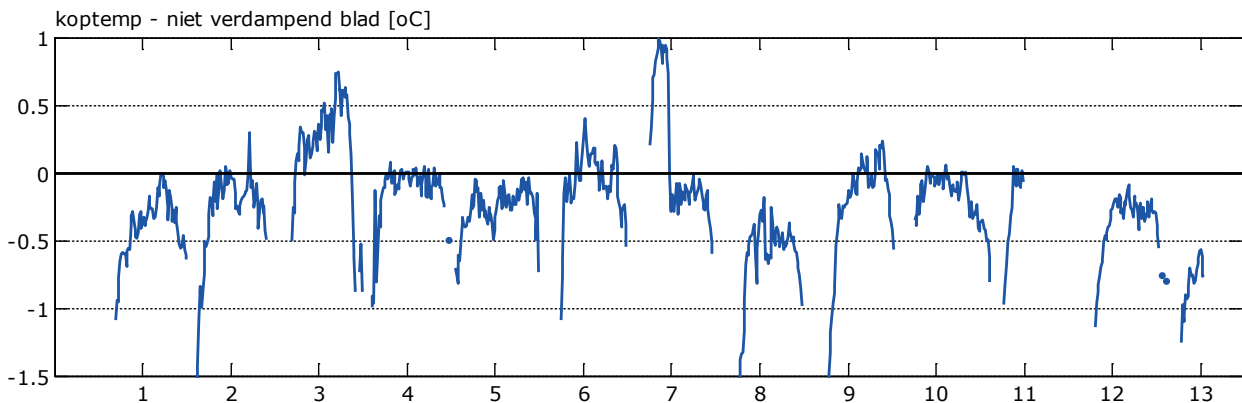


**Figuur 4.3** Kaslucht (blauw) en gewastemperaturen (rood en groen (liggen meestal op elkaar)) in de 13 nachten waaruit scherpe camerabeelden zijn verkregen.

De grafieken in Figuur 4.2 en 4.3 zijn veel te klein om goed te kunnen bestuderen en zijn dan ook alleen bedoeld om een globaal beeld te geven van de omstandigheden waaronder de camerabeelden die verder geanalyseerd worden zijn verkregen. De overzichtsgrafieken geven aan dat de luchtvochtigheid elke nacht rond 75% begon en dan gedurende de nacht opliep. Ook is te zien dat de netto straling bijna iedere nacht laag begint (rond  $-25 \text{ W/m}^2$ ) en dan gedurende de nacht oploopt en aan het eind van de nacht steeds dicht bij 0 komt te liggen. Er zit overigens een gat in de metingen van de netto stralingsmeter op de 3<sup>e</sup> t/m de 5<sup>e</sup> nacht.

Figuur 4.3 laat zien dat de gewastemperatuur in de kop zoals die door de thermische camera is bepaald in deze licht-arme omstandigheden geheel volgens verwachting steeds iets onder de kasluchttemperatuur ligt.

Zoals in hoofdstuk 2 aangegeven, gaat het in het project 'Verdamping bij de kop' echter niet in eerste instantie om de bepaling van temperatuurverschil is tussen de kop van het gewas en de kaslucht, maar om de bepaling van de extra verlaging van de koptytemperatuur ten gevolge van de verdamping vanuit die kop. Deze extra verlaging is het temperatuurverschil tussen het echte blad en een niet verdampend kunstblad. Onderstaande figuur laat voor de 12 nachten uit Figuur 4.3 het verschil tussen de temperatuur van bladeren in de kop en de temperatuur van een kunstblad dicht bij die kop op (ongeveer) dezelfde hoogte zien. De tijd-as is in deze grafiek wat 'ingedikt' door de data uit de dagperiode die niet voor de analyse gebruikt worden helemaal weg te halen.



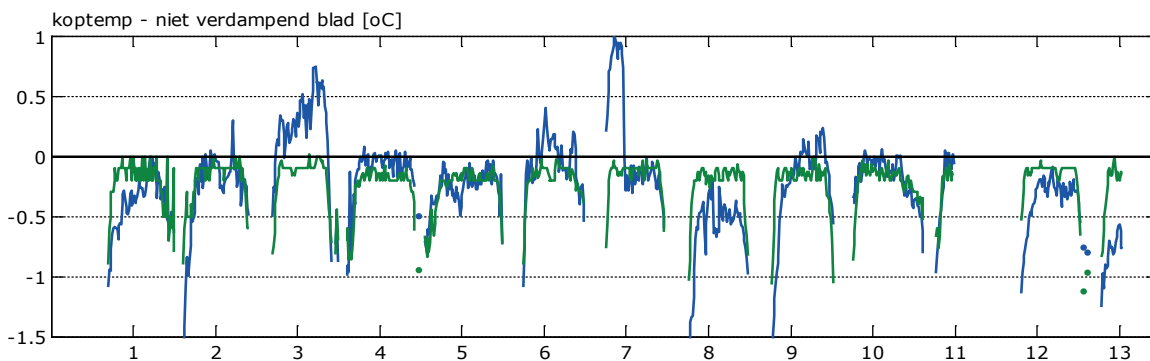
**Figuur 4.4** Gemeten verschil in temperatuur tussen verdampend en niet verdampend blad gedurende 13 nachten.



Figuur 4.4 laat zien dat het verdampende blad inderdaad meestal kouder blijkt dan het niet verdampende kunstblad, maar een paar keer geeft de meting ook aan dat de bladeren in de kop warmer zijn dan het kunstblad, soms zelfs tot meer dan een halve graad. Dit is volgens de theorie niet mogelijk aangezien de echte bladeren geen extra energie kunnen ontvangen ten opzichte van de niet verdampende kunstbladeren, alleen extra energie kunnen verliezen door de verdamping.

Aangezien de twee meetsignalen die voor de berekening van het temperatuurverschil worden gebruikt uit hetzelfde meetsysteem komen (de beelden van de thermische camera, zie bespreking van Figuur 3.5) kan zo'n onverwacht hoge temperatuur van de bladeren in de kop niet worden toegeschreven aan onnauwkeurigheden in de sensor. Wat wel goed mogelijk is, is dat ondanks de beeld voor beeld beoordeling van de camerabeelden toch niet de juiste pixels zijn aangewezen. Zo zouden pixels van dieper gelegen bladeren kunnen zijn aangezien voor pixels die bij de bladeren van de kop behoren.

Daar waar het temperatuurverschil tussen kopblad en kunstblad wél negatief is valt het op dat die temperatuurverschillen in de regel klein zijn, kleiner dan verwacht. Dit blijkt ook wanneer het gemeten temperatuurverschil tussen verdampend en niet verdampend blad wordt vergeleken met het verschil dat wordt berekend door de Uitstralingsmonitor.

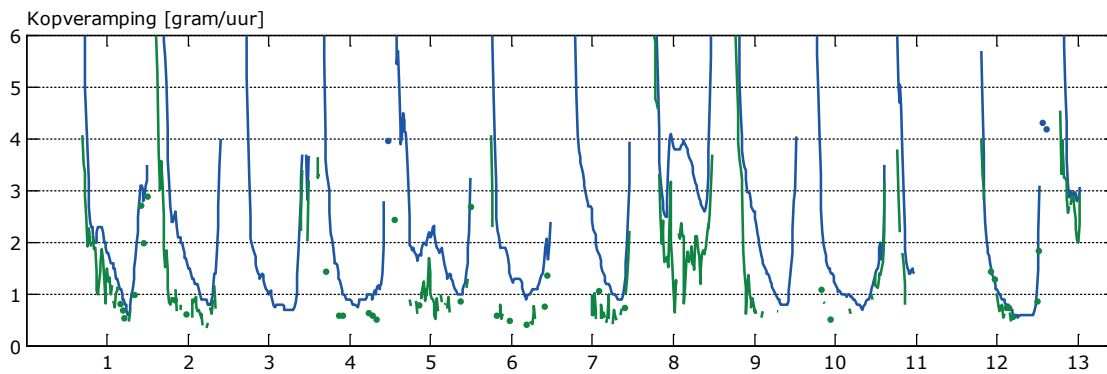


**Figuur 4.5** Gemeten verschil in temperatuur tussen verdampend en niet verdampend blad gedurende 13 nachten (blauw) en hetzelfde verschil zoals dat wordt berekend door de uitstralingsmonitor (groen).

Het patroon in de metingen en berekeningen komt heel sterk overeen. In de regel is het temperatuurverschil aan het begin van de avond groot, en neemt het in de loop van de avond af. Op de eerste en de laatste 2 nachten is de overeenkomst tussen metingen en berekeningen treffend. Op andere nachten is er soms een stukje van de nacht waarop de meting vrijwel hetzelfde aangeeft als wat er volgens de berekeningen verwacht mag worden, maar zijn er ook delen van de nacht met grote verschillen.

Daar waar de gemeten verschillen kleiner zijn dan de berekende verschillen zou dit ook kunnen duiden op een lagere verdamping vanuit de kop dan de verdamping waar de Uitstralingsmonitor vanuit gaat.

Onderstaande grafiek toont de verdamping die de Uitstralingsmonitor berekent en de verdamping die het gewas op grond van het gemeten temperatuurverschil zou hebben.



**Figuur 4.6** De door de uitstralingsmonitor verwachte verdamping vanuit de kop (blauw) en de verdamping die teruggerekend is uit het gemeten verschil in temperatuur tussen verdampend en niet verdampend blad (groen).

Uiteraard laat Figuur 4.6 gaten zien op de plaatsen waar de metingen een hogere temperatuur voor het echte blad laten zien. Dit is immers theoretisch niet mogelijk en dus kan de programmatuur voor die momenten geen verdamping berekenen.

Zoals te verwachten viel is de berekende verdamping vanuit de kop op de eerste nacht en in de laatste twee dagen gelijk aan de verdamping die door de Uitstralingsmonitor voor de heersende omstandigheden verwacht mag worden. Immers, waar het temperatuurverschil volgens verwachting is (Figuur 4.5) is de verdamping vanuit de kop dat ook. Op alle andere momenten waarop een verdamping berekend kon worden is die lager dan de verwachte verdamping. Dit zal niet verbazen omdat de gemeten temperatuurverschillen op die momenten kleiner zijn dan de temperatuurverschillen die in een normaal verdampend gewas verwacht mogen worden. Helaas kan de berekende verdamping vanuit de kop niet worden geverifieerd met echte metingen van de verdamping vanuit de kop. In het beste geval zijn er verdampingsgegevens van een heel gewas beschikbaar. Zulke gegevens zijn gebruikt in de validatie van de berekeningsresultaten van de Uitstralingsmonitor en daaruit bleek dat de match op gewasniveau heel overtuigend was. Ook in de data die in Figuur 4.5 zijn getoond geven aanleiding om te stellen dat de berekeningen van de Uitstralingsmonitor hout snijden.

Er zijn echter ook stukken data zijn waar de verschillen groot zijn en zelfs stukken data waar de gemeten data op theoretische gronden niet kunnen kloppen.

Het is daarom niet te zeggen in welke mate de verschillen die in Figuur 4.5 te zien zijn te wijten zijn aan verkeerde meetwaarden (in dit geval verkeerd gekozen pixels in de warmtebeelden) of aan een daadwerkelijk onderpresterende kopverdamping.

Gezien de goede vergelijking tussen de trends in gemeten de en berekende temperatuurverschillen tussen verdampend en niet verdampende bladeren in de kop kan echter wel gesteld worden dat de Uitstralingsmonitor gebruikt zou kunnen worden om te alarmeren voor klimaatomstandigheden waarin de verdamping vanuit de kop wel eens heel klein zouden kunnen worden.

Indien bijvoorbeeld een grens gesteld zou worden op een minimale verdamping van 1 gram/(m<sup>2</sup> uur) vanuit de kop dan zou de uitstralingsmonitor over de nachten die in de vorige figuren getoond zijn een aantal keren hebben gewaarschuwd dat het waarschijnlijk is dat de verdampingsomstandigheden voor de kop van het gewas ongunstig worden.

Hoofdstuk 2 laat trouwens zien dat in dat geval het sluiten van het scherm waarschijnlijk de snelste en gemakkelijkste remedie is. In zomerse perioden zal dit waarschijnlijk een gedeeltelijke sluiting van het scherm betekenen (80% bijvoorbeeld) om de luchtuitwisseling tussen kaslucht en buitenlucht niet teveel te belemmeren, maar wel het stralingsverlies van het gewas te beperken.

De temperatuur van de kop loopt hierdoor op, en daarmee het vochtgehalte in de bladholtes, waardoor de verdamping vanuit de kop zal toenemen.

## 5 Conclusies

Vanuit de theorie van het behoud van energie kan worden aangetoond dat een verdampend blad in de kop van het gewas onder nachtelijke of licht-arme omstandigheden ongeveer 0.4 °C kouder zal zijn dan niet verdampende bladeren. Bepaling van het temperatuurverschil tussen verdampend en niet verdampend blad op een bepaalde plaats in de kas zou dus moeten kunnen leiden tot de bepaling van de lokale verdamping.

Ook vanuit de theorie kan verwacht worden dat de kop van het gewas, waartoe de eerste 5% van het totale bladoppervlak wordt gerekend, 0.29 °C kouder wordt per gram/(m<sup>2</sup> uur) verdamping ten opzichte van een niet verdampend kunstblad op (vrijwel) dezelfde locatie.

De temperatuur van gewasonderdelen kan goed met behulp van een beeldvormende thermische camera worden bepaald.

Bij aanvang van het project was het de vraag of deze door een camera bepaalde gewastemperatuur zou kunnen worden vergeleken met een berekende temperatuur die een niet-verdampend blad onder de geldende kasklimaatcondities zou hebben. In dat geval zou de vergelijking tussen de gemeten bladtemperatuur en een berekende temperatuur een maat kunnen vormen voor de verdamping. Omdat echter de gewastemperatuur onder donkere omstandigheden in veel grotere mate wordt bepaald door de temperatuur van de omringende lucht dan door de verdamping zou de luchttemperatuur rond het blad met een nog veel grotere nauwkeurigheid dan die 0.4 °C die door de verdamping wordt bepaald moeten kunnen worden gemeten. Omdat de horizontale en verticale temperatuurverschillen die in een kas meestal al veel groter zijn dan die 0.4 °C is het gebruik van een berekende referentietemperatuur van een niet verdampend blad echter geen optie.

De thermische camera moet dus, naast de bladeren waarvan de verdamping bepaald moet worden, ook een referentieoppervlak met vergelijkbare stralingseigenschappen, maar zonder verdamping in beeld hebben om de temperatuurverlaging ten gevolge van de verdamping te kunnen bepalen.

In dit project is aangetoond dat indien zo'n referentie-oppervlak in hetzelfde camerabeeld gebruikt wordt er inderdaad locatie-specifieke verdampingsmetingen kunnen worden uitgevoerd. Doordat de beide metingen met één camera worden uitgevoerd is er geen structurele meetfout door het gebruik van verschillende meetinstrumenten.

De beeldvormende thermische camera samen met het niet verdampende referentie-oppervlak zou als vast sensor-systeem in een kas kunnen worden geplaatst, maar ook heel goed als mobiel systeem voor tijdelijk gebruik kunnen worden ingezet. Tuinders zouden aan de hand hiervan inzicht kunnen verwerven over het gebruik van schermen en het effect daarvan op gewastemperatuur en kopverdamping.

De in dit project gebruikte camera gaf nog wel problemen met de scherpstelling en ook maakte de parallax het lastig om goed vast te kunnen stellen welke pixels precies bij het te bestuderen blad horen. Mogelijk komt het hierdoor dat er naast nachten waarin de meetmethode vertrouwenwekkende resultaten opleverde ook nachten waren waarin er resultaten werden verkregen die theoretisch gewoon niet waar kunnen zijn (verdampend blad warmer dan referentieblad). Mogelijk zijn voor deze nachten de verkeerde pixels aangewezen als pixels behorend bij de kop van het gewas. Dieper liggende bladeren zijn immers al gauw warmer.

Naast nachten waarin het gemeten temperatuurverschil tussen verdampend en niet verdampend blad in de kop zich volgens verwachting gedroegen, en nachten waar de meting overduidelijk geen betrouwbare data opleverde waren er ook nachten waarin de verdampingsbepaling met de thermische camera op een lagere verdamping dan de verwachting wees.

Helaas kan van die nachten niet worden bepaald of er op die momenten daadwerkelijk sprake was van een onverwacht verminderde verdamping, voortkomend uit onderprestatie van het gewas, of dat de lage berekende verdamping voortkomt uit meetfouten. Er zijn immers geen meetmethoden voorhanden die een tweede verdampingsbepaling uit specifieke gewasonderdelen leveren. De meest gedetailleerde informatie over de gewasverdamping komt vooralsnog uit weeggoten en die geven alleen de verdamping van een heel gewas.

Een spin-off van het onderzoek dat ten behoeve van dit project is uitgevoerd is dat de eerder ontwikkelde Uitstralingsmonitor moest worden uitgebreid met een verbeterde verdampingsberekening en dat de berekende verdamping als output moest worden getoond.

Deze uitbreiding is in dit rapport gebruikt om de berekende verdamping uit de kop als continue lijn in de tijd te kunnen bepalen in afhankelijkheid van de omgevingsfactoren. Daartoe behoort niet alleen de kaslucht temperatuur en luchtvochtigheid, maar ook de kasdek- en schermtemperatuur die een grote invloed hebben op de netto uitstraling van het gewas.

De output van de Uitstralingsmonitor laat duidelijk zien dat het scherm een grote invloed heeft op de verdamping vanuit de kop. Daarmee zou de Uitstralingsmonitor als goede indicator gebruikt kunnen worden die aangeeft dat de verdamping vanuit de kop mogelijk te laag kan worden en dat het dus tijd is om het scherm te sluiten.

Overigens laat de Uitstralingsmonitor ook zien dat het sluiten van het scherm de verdamping vanuit de onderste gewaslagen juist iets vermindert. Een scherm betekent een lagere buistemperatuur, lagere temperaturen onderin het gewas en dus ook minder verdamping onderin.

Vanwege het belang van deze inzichten is de informatie over de verdamping vanuit de verschillende gewaslagen inmiddels een standaard-uitvoer van de Uitstralingsmonitor geworden.

Naast een methodebeschrijving voor de bepaling van de lokale verdamping met behulp van een thermische camera, heeft het project dus ook goed toegankelijk illustratie- en studiemateriaal opgeleverd. Hiermee kunnen tuinders en voorlichters hun inzicht in de gewasverdamping en het effect van omgevingsfactoren hierop vergroten. Vooral wanneer data uit een (mobiele) opstelling met een thermische camera van concrete situaties op een geïnteresseerd bedrijf in kleine groepen besproken zou worden kan dit een flinke bijdrage leveren aan het nog verder gemeengoed worden van schermgebruik ter verbetering van de groeiomstandigheden.







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-1450

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.