



Gewasverdamping en kooptemperatuur

Feije de Zwart, Martine Brunsting en Bart van Marrewijk

Rapport WPR-1136

Referaat

Tuinders proberen met hun teelthandeling en klimaatregeling gunstige groei-omstandigheden te realiseren. Vooral in warme en koude perioden van het jaar vereist dat stuurmanskunst en in het tuinbouwonderwijs en in cursussen worden hiervoor handvatten en inzichten aangereikt.

Een van de tools hierbij is Kassim, een applicatie die de rekenresultaten van het uitgebreide dynamische kasklimaatmodel Kaspro inzichtelijk weergeeft. Bij de lancering van Kassim in 2018 gaf deze tool realistische resultaten voor de wintersituatie, maar voor zomerse situaties werden te hoge gewastemperaturen berekend. Dit doet afbreuk aan het vertrouwen en de bruikbaarheid van deze tool.

Met het nu uitgevoerde project is het simulatiemodel op dit punt verbeterd. Vergelijkingen tussen simulaties en metingen aan Tomaat, Komkommer, Gerbera en snij-Anthurium laten zien dat gewasverdamping en gewastemperatuur nu natuurgetrouw berekend worden.

De realistische berekeningen op grond van fysisch onderbouwde parameters maakt het mogelijk om met de simulatietool eindeloos veel situaties door te rekenen. Met de uitleg rond een aantal voorbeelden is getoond welke inzichten hiermee verkregen kunnen worden zodat tuinders beter onderlegd beslissingen kunnen nemen omtrent de klimaatregeling.

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

Abstract

Growers try to achieve favorable growing conditions with their cultivation practices and climate control. Especially in warm and cold periods of the year this requires steering skills and in horticultural skills. Training and education provide handles and insights for this.

One of the recently developed tools to support this is Kassim, an application with a dedicated interface to show simulation results of the extensive dynamic greenhouse climate simulation model Kaspro. When launched, back in 2018, this tool gave realistic results for the winter situation, but too high crop temperatures were calculated for summer situations. This detracts from the trust and usability of this tool.

Therefore, in this project the simulation model has been improved. This resulted in a proper matching computation of crop temperature and transpiration of Tomato, Cucumber, Gerbera and Anthurium when compared with measurements.

The realistic calculations, based on sound physical explanatory modelling and parametrizing, allows for all kind of scenarios to be analysed. The report shows a number of examples to explain which type of insights can be obtained and how this helps growers to make better informed decisions about climate control.

The project is funded by Kas Als Energiebron, a research program supported by the Ministry of Agriculture Nature and Food quality and LTO-Glaskracht Nederland.

Rapportgegevens

Rapport WPR-1136

Projectnummer: 3742293100

PT nummer: 20034

DOI: <https://doi.org/10.18174/567863>

Thema: Kasklimaat en energie

Dit project is gefinancierd vanuit het programma Kas als Energiebron, het innovatie- en actieprogramma voor energiebesparing en verduurzaming in de glastuinbouw van Glastuinbouw Nederland en het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit.

Disclaimer

© 2022 Wageningen, Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research, Business unit Glastuinbouw, Postbus 20, 2665 MV Bleiswijk T 0317 48 56 06, www.wur.nl/plant-research. Kamer van Koophandel nr.: 09098104. BTW nr.: NL 8113.83.696.B07. Stichting Wageningen Research. Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden vervoelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Stichting Wageningen Research. Stichting Wageningen Research 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

Inhoud

	Samenvatting	5
	Summary	7
	Inleiding	9
1	Theoretische achtergrond	11
	1.1 Inleiding	11
	1.2 Kassim, Kaspro en energie- en massabalansen	12
	1.3 Huidmondjesopening, verdamping en gewastemperatuur	17
2	Bepaling van modelparameters	23
	2.1 Stralingsabsorptie in tomaat, komkommer, Gerbera en Anthurium	23
	2.2 Omzetting van geabsorbeerde straling in voelbare en latente warmte	28
	2.2.1 Dagelijkse gesimuleerde en gemeten verdamping in tomaat	29
	2.2.2 Gesimuleerde en gemeten verdamping in komkommer	32
	2.2.3 Dagelijkse gesimuleerde en gemeten verdamping in Gerbera	34
	2.2.4 Dagelijkse gesimuleerde en gemeten verdamping in snij-Anthurium	36
	2.3 Gewastemperatuur	39
	2.3.1 Gewastemperatuurmeting	39
	2.3.2 Koptemperatuur in het tomatengewas	41
	2.3.3 Koptemperatuur in het komkommer	43
	2.3.4 Koptemperatuur in het Gerberagewas	44
	2.3.5 Koptemperatuur in de snij-Anthurium	46
3	Gebruik van het model in Kassim	49
4	Conclusies	57

Samenvatting

Tuinders proberen met hun teelthandeling en klimaatregeling gunstige groei-omstandigheden voor hun gewassen te creëren. Qua klimaatregeling zijn de temperatuurregeling en het lichtregime daarbij de belangrijkste factoren, maar ook luchtvochtigheid, gewasverdamping en CO₂-regime zijn belangrijk. Onder gunstige omstandigheden (frisse, zonnige voorjaarscondities) is het niet zo moeilijk om de groeiomstandigheden gunstig te krijgen, maar in koude of warme perioden van het jaar worden tuinders geconfronteerd met de grenzen van de kas-installatie. In de winter kan het energieverbruik erg hoog oplopen en in de zomer kan het veel te warm worden of het CO₂-verlies heel hoog oplopen.

Vooraf in die perioden van het jaar komt het aan op de stuurmanskunst van de tuinder en in het tuinbouwonderwijs en in cursussen wordt hen handvatten en inzichten aangereikt waarmee verstandige keuzes kunnen worden gemaakt.

In Het Nieuwe Telen worden de inzichten en strategieën benaderd vanuit de balans-gedachte. De energie- en massabalans rond de plant vormt daarbij één van de belangrijkste.

Kasgewassen hebben een kleine massa ten opzichte van hun oppervlak, waardoor de gewastemperatuur snel verandert in respons tot veranderende omgevingsomstandigheden. Het gewas is daardoor steeds al gauw in evenwicht met z'n omgeving.

Dit gewastemperatuur in dit evenwichtspunt wordt bepaald door fysische processen rond energie-opname en -afgifte. Dit is voornamelijk een passief fysisch proces met eenduidige vaste parameters, zoals absorptiecoëfficiënt en uitdovingscoëfficiënt voor licht in het gewas en de langgolvlige optische parameters. Er is echter één belangrijke parameter die zich moeilijk in een mechanistische beschrijving laat vangen en dat is de huidmondjesweerstand. Deze varieert gedurende het etmaal, mogelijk gedurende het seizoen en zeker ook per gewas.

De combinatie van omgevingsomstandigheden, de vaste fysische gewasparameters en de variabele huidmondjesweerstand bepalen de overtemperatuur van de bladeren ten opzichte van de omgeving. 's Nachts zijn de bladeren kouder dan de omgeving en bij veel zonlicht zijn ze warmer.

Om inzicht te geven in deze processen is de onderwijs-applicatie Kassim ontwikkeld. Bij de lancering van Kassim in 2018 gaf het realistisch beeld van de energiebalans onder licht-arme omstandigheden, maar voor hoog-zomerse condities werd de gewastemperatuur te hoog berekend. Dit deed afbreuk aan de bruikbaarheid van deze tool.

Om dit manco te repareren is in voorliggend project in detail naar gewastemperaturen en verdampingsprocessen gekeken onder zomerse omstandigheden en is het model dat door Kassim gebruikt wordt aangepast.

Vanwege de centrale rol van de energiebalans in de berekeningen is het eerste Hoofdstuk van dit rapport gewijd aan de componenten in die balans en de structuur van een model dat het huidmondjes- en verdampingsgedrag van het gewas kan beschrijven.

Uit deze uiteenzetting volgt dat een juiste balansberekening begint bij een correct berekende absorptie van zonlicht door het gewas. Op grond van metingen met een naar boven en naar beneden 'kijkende' lichtsensor boven en onder het gewas kon de gewasabsorptie van vier gewassen (tomaat, komkommer, Gerbera en snij-Anthurium) worden bepaald en kon het gebruikte model zodanig worden aangepast dat de berekende gewasabsorptie overeenkomstig was.

In de evenwichtssituatie, die zoals gezegd voor een gewas met veel bladoppervlak en weinig massa vrijwel instantaan tot stand komt, wordt overdag de geabsorbeerde licht-energie afgevoerd in de vorm van latente warmte (verdamping), convectieve warmte en straling. 's Nachts is er geen energietoevoer uit licht, maar wel energie afvoer door verdamping en uitstraling, wat voor het gewas moet worden aangevoerd via convectieve warmtetoevoer. Daarvoor moet het blad kouder zijn dan de omgeving.

Van deze drie componenten is het latente warmteverlies relatief gemakkelijk te bepalen in de vorm van de wateropname van het gewas. Na de licht-absorptie door het gewas te hebben geparаметriseerd is de tweede vereiste van het model dat de verdamping goed wordt berekend. Voor teelten met een weeggoet kan dit op een kleine tijdschaal worden gedaan (kwartierwaarden), maar voor de meeste kassen is er geen nauwkeuriger bepaling dan het watergebruik gebaseerd op het verschil tussen gift en drain. Hierbij wordt ook rekening gehouden met het aandeel van de wateropname voor gewasgroei daarin.

Na toepassing van geschikte modelparameters blijkt het ontwikkelde simulatiemodel niet alleen de licht-absorptie (de energie-aanvoer), maar ook de belangrijkste energie-afvoer (latente warmte via gewasverdamping) realistisch te berekenen. Dagelijkse verdampingssommen komen goed overeen met waarnemingen en voor de komkommerteelt, waar een weeggoet aanwezig was, kon ook het verloop over de dag goed gesimuleerd worden.

Een correct berekende stralingsabsorptie en verdamping betekenen echter nog niet automatisch dat het energiebalansmodel klopt. Immers, een bepaalde verdampingssnelheid kan worden gerealiseerd bij een grote huidmondjesweerstand en een groot temperatuurverschil tussen gewas en kaslucht, maar ook door een kleine huidmondjesweerstand en een klein temperatuurverschil.

Daarom is in dit project ook gebruik gemaakt van gewas-temperatuur-metingen. De gewas-temperaturen worden daarbij steeds uitgedrukt in overtemperatuur (of ondertemperatuur). Immers, in de energiebalans heeft een gewas-temperatuur alleen een betekenis in relatie tot de omliggende kasluchttemperatuur omdat het temperatuurverschil de grootte van het energieverlies bepaalt.

Nadat de geschikte parameters voor de verschillende gewassen waren bepaald blijkt dat de overtemperaturen (overdag) en ondertemperaturen ('s nachts) in dezelfde range en met een vergelijkbaar profiel als de gemeten waarden berekend worden.

Aangezien de vergelijking tussen metingen en berekeningen een zeer goede overeenkomst toont is het in dit project nieuw ontwikkelde en geparameteriseerde model rond het gewas in het Kassim-programma ingebouwd. Hiermee levert deze onderwijs-applicatie nu niet alleen een realistische respons voor de wintersituatie, maar ook voor hoog-zomerse omstandigheden. Ter illustratie hiervan wordt in Hoofdstuk 3 de output zoals die door Kassim wordt geleverd voor de vier gewassen besproken. Hieruit komt de invloed van de gewasabsorptie, de stralingsbalans, de verdamping en het effect van schaduwschermen goed naar voren. Ook de CO₂-balans wordt inzichtelijk getoond.

Daarnaast wordt het effect van verneveling aan de hand van voorbeelden besproken.

Hoewel de focus in dit project lag op het de gewas-temperaturen onder hoog-zomerse omstandigheden wordt in Hoofdstuk 3 ook nog ingegaan op de energiebalans in een koude, winterse nacht. Dit zijn heel andere buiten- en kasklimaatcondities, maar ook voor die omstandigheden levert het model realistische outputs en relevante inzichten.

De theoretische beschrijving van de fysische processen en de detail-uitwerking daarvan aan de hand van meetresultaten en uitgewerkte voorbeelden vormen een goed onderbouwde, kwantitatieve en inzichtelijke weergave van de energiebalans rond het gewas en de rol van de gewasverdamping daarin. Dit biedt de mogelijkheid om doelgericht te werken aan een energiezuinige, en voor het gewas gunstige regelstrategie.

Summary

With their cultivation practices and climate control, growers aim to create favourable growing conditions for their crops. In terms of climate control, temperature and light regime are the most important factors, but humidity, crop evaporation and CO₂ regime are also important. Under favourable conditions (fresh, sunny spring conditions) there are hardly limitations for get optimal growing conditions, but in cold or warm periods of the year, growers encounter the limitations of the greenhouse. In winter, energy consumption can be very high and in summer it can become much too hot or the CO₂ loss (when dosing supplementary CO₂) can become very high. Especially in those periods of the year, it comes down to the horticultural skills and in horticultural education and courses handles and insights need to be provided which helps to make the proper choices.

In 'Het Nieuwe Telen' (best translated as: 'Novel Cultivation Practice'), the insights and strategies are approached via balancing the balances. The energy and mass balance around the plant is one of the most important.

Greenhouse crops have a small heat capacity in comparison to their surface area, which means that the crop temperature changes rapidly in response to changing environmental conditions. As a result, the crop can be assumed to be practically always in equilibrium with its environment.

This crop temperature (actually the leaf temperatures) at this equilibrium point is determined by physical processes around energy gain and loss. This is predominantly a passive physical process with unambiguous fixed parameters, such as absorption and extinction coefficient for light and the long wave optical parameters. However, there is one important parameter that is difficult to capture in a mechanistic description and that is the stomatal resistance. It definitely varies during the 24 hours, possibly during the season and certainly also per crop.

The combination of environmental conditions, the fixed physical crop parameters and the variable stomatal resistance determine the excess temperature of the leaves compared to its environment. At night, the leaves are colder than the surrounding air and at high solar irradiation they are warmer.

The educational tool Kassim has been developed to provide insight in these processes. When Kassim was launched in 2018, it gave a realistic view on the energy balance under low-light conditions, but for summer conditions the crop temperature was calculated too high. This hampered the usability of the tool.

In order to fix this shortcoming, the current project looked in detail at crop temperatures and evaporation processes under summer conditions in order to be able to update the core-model used by Kassim, which is the simulation model Kaspro. Kaspro is a dynamic greenhouse climate simulation model which is developed and constantly validated by the Business Unit Greenhouse Horticulture of Wageningen UR.

Due to the central role of the energy balance in the calculations, the first chapter of this report is devoted to the components in that balance and the structure of the model that describes the stomatal and evaporation behaviour of the crop.

It follows from this explanation that a correct balance calculation starts with a correctly calculated absorption of sunlight by the crop. Based on measurements with an upwards and downwards 'looking' light sensor above and below the crop, the crop absorption of four crops (tomato, cucumber, Gerbera and Anthurium) could be determined. With the data, the model could be adjusted in such a way that observed and calculated crop absorption was similar.

In the equilibrium situation, during day time the absorbed light energy is dissipated in the form of latent heat (evaporation), convective heat and radiation. At night there is no energy supply from light, but energy is still extracted through evaporation and long wave radiation, which must be supplied to the crop via convective heat supply. Therefore, the leaf has to be colder than the environment.

From these three components, the latent heat loss is relatively easy to determine in the form of the water uptake of the crop. For crops with a weighing gutter this can be done on a small time scale (quarterly values), but for most greenhouses there is no more accurate determination of water consumption than the difference between supply and drain. Of course, in both cases the water uptake for crop growth has also to be taken into account as it is taken up, but not transpired.

After applying suitable model parameters, the developed simulation model appears to calculate not only the light absorption (energy input), but also the most important energy removal (latent heat via crop evaporation) realistically. Daily evaporation sums are in good agreement with observations and for the data on Cucumber cultivation, where a weighing gutter was present, the diurnal course could also be simulated well.

However, correctly calculated radiation absorption and evaporation do not automatically imply that the energy balance is correctly computed. A certain evaporation rate can be achieved with a large stomatal resistance combined with a large temperature difference between crop and greenhouse air, but also with a small stomatal resistance and consequently a small temperature difference.

Therefore, crop temperature measurements were also used in this project. As in an energy balance the crop temperature only has meaning in relation to the surrounding greenhouse air, these crop temperatures are expressed in temperature-difference.

After the suitable parameters for the different crops were determined, the model showed that the overtemperatures (during the day) and undertemperatures (at night) were calculated in the same range and with a comparable profile as the measured values.

Since the comparison between measurements and calculations show good agreement, the newly developed and parameterized model around the crop in this project was connected to the on-line running Kassim program. To illustrate the use and insights provided by Kassim, chapter 3 discusses the output produced for different conditions for the four crops. The results clearly show the effect of changing conditions in crop absorption, the radiation balance and evaporation. Also the interaction between crop, climate conditions and the effect of shadow screens can be nicely illustrated, together with the effect of misting. The CO₂ balance is another topic that can be studied with the tool.

Although the focus in this project was on crop temperatures under high summer conditions, chapter 3 also discusses the energy balance on a cold winter night. Also for such completely different outdoor and greenhouse climate conditions, the model provides realistic outputs and relevant insights .

The theoretical description of the physical processes and their detailed evaluation on the basis of measurements resulted in well-founded, quantitative insights in the energy balance around the crop and the role of crop evaporation. For growers and other users, this offers the helpful background for setting out an energy-efficient control strategy which is also favourable for the crop.

Inleiding

Tuinders proberen middels een zo goed mogelijk gekozen kasklimaat en teeltstrategie het gewas optimaal te laten presteren. Voor kasgewassen betekent dit dat zonlicht, vaak aangevuld met kunstlicht, zo efficiënt mogelijk door de plant moet worden omgezet in verkoopbare producten. Dit vereist kennis, inzicht en ervaring van de tuinder en het vereist dat de tuinder wordt voorzien van relevante en voldoende nauwkeurige informatie over de status van het gewas.

Kasluchttemperatuur, luchtvochtigheid, CO₂-concentratie, lichtsom en drain-percentages worden al sinds jaar en dag gemeten, maar de momentane gewasverdamping is meestal onbekend. En dat terwijl gewasverdamping één van de belangrijkste processen in de plantgroei is. De verdamping zorgt voor het watertransport, waarmee de nutriënten vanuit de wortel naar de groeiende delen worden getransporteerd. Daarnaast zorgt de verdamping voor koeling van de bladeren. De verdamping van water vanuit de bladeren onttrekt verdampingswarmte (latente warmte) aan het blad, waardoor het in de regel ook in de volle zon maar een paar graden warmer wordt dan de omgevingstemperatuur.

De meeste tuinders hebben van de verdamping een globaal idee. Door de vergelijking van de hoeveelheid drainwater die retour komt uit een teelt op goten met de hoeveelheid water die gegeven wordt, kan de opgenomen hoeveelheid water worden bepaald. Een deel van het opgenomen water gaat naar de groei, maar het merendeel verdampt. Het verschil tussen gift en drain geeft daarmee een goed beeld van de verdamping per dag.

Detail-informatie over de verdamping gedurende de dag ontbreekt over het algemeen. Alleen tuinders met een weeggoot weten de gewasverdamping in een klein interval. Een weeggoot is echter een onderhoudsgevoelig en kostbaar meetinstrument en is daarom geen gemeengoed.

Het gevolg hiervan is dat er nog maar weinig kennis is over hoe het verdampingsproces precies verloopt en dus ook nog maar weinig kennis over welk verloop 'normaal' of 'optimaal' genoemd kan worden. Daar komt bij dat de mogelijkheid die de tuinder heeft om de verdamping te beïnvloeden vrij beperkt is. De verdamping kan enigszins worden aangepast door de luchtvochtigheid anders te regelen en wordt fors beïnvloed door de hoeveelheid licht waaraan het gewas wordt blootgesteld.

Een andere mogelijkheid om de gewasverdamping te bepalen dan met weeggoten is het gebruik van de planttemperatuur als afgeleide grootte. De planttemperatuur op zichzelf zegt niets over de verdamping, maar het temperatuurverschil tussen gewas en kaslucht, in combinatie met andere kasklimaatfactoren zoals luchtvochtigheid en vooral de lichtintensiteit kunnen via een model tot een betrouwbare inschatting van de verdamping worden vertaald. Deze benadering is toegepast in het project 'verdamping bij de kop'. Hierbij werden niet alleen het temperatuurverschil tussen gewas en kaslucht de luchtvochtigheid en de lichtintensiteit gebruikt, maar ook de scherm- en kasdektemperaturen. In dat project, wat in 2017 is afgerond, bleek dat deze benadering in principe werkt, maar dat er zeer nauwkeurige metingen nodig zijn om het temperatuurverschil met voldoende precisie te kunnen uitvoeren. De goedkopere IR-camera's zijn hiervoor niet geschikt en wanneer er van duurdere IR-camera's gebruik gemaakt moet worden biedt deze methode geen voordeel meer op ten opzichte van het gebruik van een weeggoot (tenzij men geïnteresseerd is in de verdamping van een specifiek deel van het gewas, een vraag die met een weeggoot niet beantwoord kan worden).

In het project 'verdamping bij de kop' werd de interpretatie van de gemeten temperaturen uitgevoerd met behulp van de toen juist ontwikkelde 'uitstralingsmonitor'. In die applicatie vormde de warmtebalans over het blad de basis voor de berekening van de bladtemperatuur. En aangezien de verdamping vanuit het blad een zeer prominente rol in die warmtebalans speelt, worden een nauwkeurige berekening van de gewasstemperatuur en een nauwkeurige berekening van de gewasverdamping bijna synoniem.

Bij vergelijking van resultaten uit de uitstralingsmonitor met weeggoot-data bleek dat de uitstralingsmonitor het verdampingsproces, en dus ook de gewasstemperaturen, onder lichtarme omstandigheden (tot zo'n 300 µmol/(m² s)) met grote nauwkeurigheid kon bepalen. De uitstralingsmonitor was dan ook voor dat doel gemaakt. Maar bij gebruik van hetzelfde model voor gewasstemperaturen en verdamping onder zomerse omstandigheden werden de afwijkingen tussen waargenomen en berekende gewasstemperaturen erg groot. De uitstralingsmonitor berekent voor zonnige omstandigheden voor de kop van het gewas temperaturen die wel 5 tot 6°C boven de kasluchttemperatuur liggen.

Ook het vlak daarna ontwikkelde educatieve programma **Kassim**, dat een doorontwikkeling is van de aanpak die in de uitstralingsmonitor is begonnen, liet onder zonnige omstandigheden erg hoge gewastemperaturen zien.

Een simulatieprogramma dat onder lichthrijke omstandigheden resultaten berekent die niet stroken met de werkelijkheid, tast het vertrouwen in het model aan. Daarmee doet dit afbreuk aan de geloofwaardigheid van de modeluitkomsten onder andere omstandigheden, waar de afwijkingen tussen model en waarneming wél binnen acceptabele foutmarges ligt (gewastemperaturen niet meer dan een halve graad verschillend ten opzichte van metingen).

Dit vormde aanleiding om een vervolgproject uit te voeren. Dit vervolgproject heeft als doel om metingen aan de gewasverdamping over een brede range van omgevingscondities en bij verschillende gewassen te doen. Aan de hand van deze metingen kan het model dat door Kassim wordt gebruikt zodanig worden aangepast dat de resultaten voor die veel bredere range kloppen.

Dit maakt het model beter geschikt voor gebruik in het tuinbouwkundig onderwijs en in cursussen. Vooral binnen Het Nieuwe Telen III vormen de vochtbeheersing, verdamping en latente warmte kernbegrippen en de educatieve software die in die cursussen gebruikt wordt moet de balansen realistisch en inzichtelijk tonen.

In dit rapport wordt eerst de theorie achter het verdampingsproces in planten beschreven en de wijze waarop dit in het simulatiemodel is verwerkt (Hoofdstuk 1).

Vervolgens wordt voor vier gewassen beschreven hoe de typische eigenschappen van het deze teelten in het model worden verwerkt. Ook wordt getoond in welke mate waarnemingen aan het gewas overeenkomen met simulaties (Hoofdstuk 2).

In Hoofdstuk 3 wordt aan de hand van het programma Kassim getoond hoe de algemene principes van verdamping en vochtbeheersing in de berekeningsresultaten naar voren komen. Deze berekeningen geven netjes aan welke effecten er van ingrepen in de vochtbalans in de kas kunnen worden verwacht. Daarmee krijgen tuinders inzicht in hun span of control om de vocht- en warmtebalans op een gewenst niveau te krijgen.

In Hoofdstuk 4 worden de conclusies uit dit onderzoek getrokken en wordt aangegeven in welke toepassingsgebieden de ontwikkelde simulatie-techniek nog meer gebruikt kan worden.

1 Theoretische achtergrond

1.1 Inleiding

Planten hebben allerlei mechanismen waarmee ze zich kunnen aanpassen aan de omgeving. Het zijn genetisch ingebakken processen waardoor bij zorgvuldige bestudering van de gewasreactie op omgevingsfactoren, duidelijke patronen kunnen worden ontdekt. Als zulke patronen bekend zijn kan er aan de hand van modellen worden voorspeld hoe een plant onder bepaalde omstandigheden zal reageren.

Zulke modellen kunnen heel algemeen zijn, zoals een relatie die vanuit registraties over het teeltseizoen aangeeft dat een gewas bijvoorbeeld 90 mol PAR nodig heeft om 1 kg versgewicht aan tomaten te produceren. Modellen kunnen ook meer gedetailleerd zijn, door ook de onderliggende processen die resulteren in dat gemiddelde van 90 mol PAR per 1 kg beschrijven. Immers, om deze conversie van licht naar versproduct te realiseren heeft de plant bladeren en trossen moeten aanmaken. Van die aanmaaksnelheid is bekend dat die sterk afhankelijk is van de temperatuur. En de groeisnelheid van die bladeren en vruchten is weer afhankelijk van de hoeveelheid assimilaten (suikers) waarover de plant kan beschikken. Die suiker-aanmaak is op zijn beurt weer afhankelijk van de beschikbaarheid van licht en CO₂, waarbij de conversie van CO₂ naar suikers onder invloed van licht weer afhankelijk is van de gewastemperatuur en van de CO₂-concentratie in het blad. En tenslotte is de CO₂-concentratie in het blad op zijn beurt weer afhankelijk van de CO₂ concentratie van de kaslucht en van de weerstand die de CO₂ ondervindt om vanuit de kaslucht tot in de kern van het blad te diffunderen. Biochemische modellen gaan zelfs nog verder en beschrijven hoe eiwitten en enzymen de licht-fotonen omzetten in chemische halfproducten en hoe die uiteindelijk resulteren in suiker-aanmaak en verdere verwerking.

Wanneer de tuinder meer kennis heeft over de onderliggende mechanismen waarmee planten licht omzetten tot verkoopbaar versgewicht is het mogelijk om de efficiëntie waarmee dat gebeurt op onderdelen te verhogen zodat er met hetzelfde licht meer verkoopbaar product voortgebracht kan worden (of dezelfde hoeveelheid product met minder licht, waardoor er minder elektriciteit voor belichting kan worden gebruikt). Efficiëntieverbetering kan op allerlei punten in het groeiproces plaatsvinden. Het kan gaan om verbeterde rassen, betere kassen, beter teeltmanagement, verminderde derving door ziekten en plagen en door een verbeterde afstemming van de onderliggende groeiprocessen. Dat laatste wordt vaak aangeduid met het aanhouden van de juiste plantbalans.

Een juiste plantbalans betekent dat het gewas zoveel mogelijk op de temperatuur wordt gebracht of gehouden die past bij de groeikracht die vanuit de omgeving beschikbaar is. Groeikracht betekent vooral licht en kan nog iets verhoogd worden met een verhoogde CO₂-concentratie, of vermindert wanneer de CO₂-concentratie wegzakt.

In moderne kassen kan de tuinder de gewastemperatuur onder de meeste omstandigheden op het gewenste niveau krijgen door te verwarmen (idealiter in combinatie met schermen) als het te koud wordt of te ventileren als het te warm wordt. Alleen als het buiten heel koud of heel warm is loopt de kas buiten z'n regelbereik en zal de tuinder qua temperatuur concessies moeten doen.

De regeling van de kasluchttemperatuur heeft echter ook implicaties voor de luchtvochtigheid en de CO₂-concentratie. Vooral onder zomerse omstandigheden waarbij de kas volop staat te luchten verdwijnt er met de ventilatie veel CO₂ (indien er CO₂ gedoseerd wordt) en kan de luchtvochtigheid ver wegzakken. Tuinders kunnen op zulke momenten gebruik maken van verneveling om de kas te koelen en/of de ventilatie te beperken, maar het is lastig om een goed inzicht te krijgen in hoe vocht, temperatuur en CO₂-concentratie in een dynamisch evenwicht uitpakken op de gewastemperatuur, fotosynthese en gewasgroei.

Teneinde inzicht in deze dynamische evenwichten te verschaffen zijn de afgelopen jaren allerlei rekentools beschikbaar gekomen. Eerst waren er de 'rekentools Het Nieuwe Telen'. Dit zijn kleine rekenprogramma's die het energieverbruik en CO₂-verlies berekenen onder bepaalde kas- en buitenluchtcondities bij gegeven eigenschappen van de kas en de gebruikte installaties.

Daarna kwam 'de uitstralingsmonitor', waarmee soortgelijke effecten konden worden berekend, maar waarbij allerlei interacties tussen vocht- en warmtetransport worden meegenomen en waarin een duidelijk onderscheid wordt gemaakt tussen convectieve warmte-uitwisseling en warmte-uitwisseling ten gevolge van straling. Bovendien presenteerde de uitstralingsmonitor het effect van schermen en kasdekken op de verticale temperatuur-opbouw in het gewas.

De uitstralingsmonitor berekende voor licht-arme en koude buitenomstandigheden de temperatuurbalans met een goede nauwkeurigheid, maar had een onvolledige vochtbalans (wel gewasverdamping, maar geen condensatie op schermen en kasdekken en geen dynamische berekening van de luchtvochtigheid). De uitstralingsmonitor kent ook geen CO₂-balans.

Vervolgens kwam in 2018 het programma 'Kassim' beschikbaar. Kassim is een doorontwikkeling van de uitstralingsmonitor en berekent wél een volledige vocht- en CO₂-balans naast een volledige energiebalans. Wanneer in Kassim bijvoorbeeld bij een zekere CO₂-doseercapaciteit en setpoint voor de kasluchttemperatuur de hoeveelheid zonlicht groter wordt gekozen zal op een warme dag de ventilatie toenemen. De CO₂-concentratie zal dan dalen. De extra fotosynthese door de toegenomen hoeveelheid licht wordt dan kleiner dan wanneer alleen het effect van de toegenomen lichtintensiteit zou worden meegenomen. Kassim houdt dus rekening met de interactie tussen licht, ventilatie, CO₂-dosering en CO₂-concentratie op de fotosynthese. Ook zal Kassim bijvoorbeeld berekenen dat bij verlaging van het luchtvochtigheidssetpoint het afvoeren van vocht lastiger gaat. Niet alleen doordat het proces in een lastigere 'hoek' van de psychrometrische kaart moet plaatsvinden, maar ook doordat een plant in een drogere kas meer zal gaan verdampen.

Kassim is ontwikkeld als rekentool in lespakketten en cursussen rond kasklimaat in de tuinbouw. Bij de introductie van de tool bij docenten en cursusleiders (eind 2019) werd de realistische interactie tussen de verschillende balansen in de kas gewaardeerd. Het enige punt waar Kassim geen realistische berekeningen toonde was de te hoog berekende gewastemperatuur bovenin het gewas onder vol-zomerse omstandigheden. Het model berekent deze gewastemperatuur op grond van de energiebalans en kennelijk zaten hier afwijkingen in, resulterend in de geconstateerde hoge koptemperatuur.

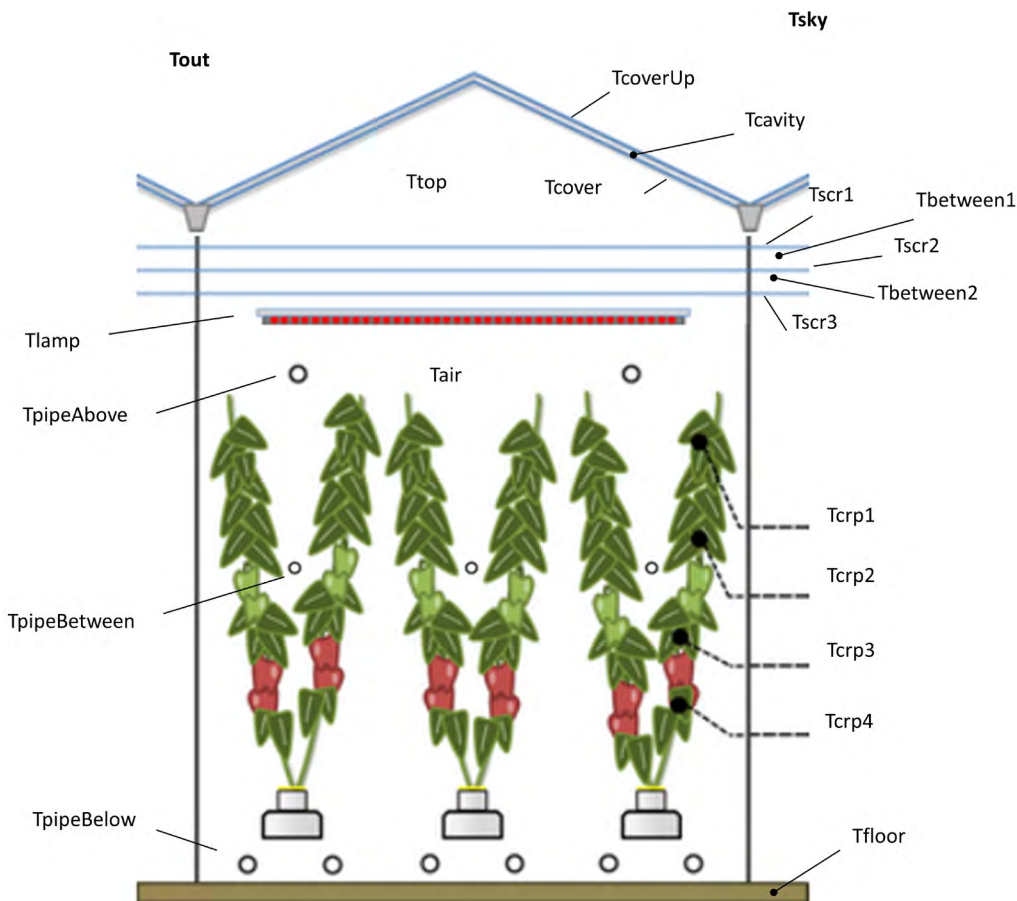
Om de rekenresultaten op dit punt te kunnen verbeteren is er in dit project opnieuw aan die gewastemperaturen en de verdamping gemeten.

In dit Hoofdstuk wordt eerst de achtergrond van het model dat in Kassim gebruikt wordt toegelicht (§ 1.2). Met deze achtergrond is het duidelijk dat de gemeten (en berekende) gewastemperatuur wordt bepaald door de verdeling van de warmte-afvoer vanaf het blad over voelbare en latente warmte en dat die verdeling wordt bepaald door de huidmondjesweerstand. Kennelijk was die in de oorspronkelijke versie van het model achter Kassim niet toereikend en moet dit op een ander manier worden vormgegeven. De keuzes die hierin gemaakt zijn worden besproken in § 1.3.

1.2 Kassim, Kaspro en energie- en massabalansen

Kassim is een gebruikersschil die de on-line toegang verzorgt tot het zeer uitgebreide kasklimaatmodel Kaspro. Kaspro is een dynamisch kasklimaatmodel met een praktijkconforme kasklimaatregelaar. Omdat Kassim een interface biedt dat dicht bij de tuinbouwpraktijk ligt, zijn de invoergegevens niet in de vorm van de kasluchttemperatuur, of de luchtvochtigheid, maar in de vorm van een stooktemperatuur, een ventilatietemperatuur, een luchtvochtigheidssetpoint en een CO₂-setpoint. Net als in een echte kas komen de uiteindelijke waarden in de buurt van de setpoints te liggen, maar zijn niet noodzakelijkerwijs hetzelfde. Immers, in de praktijk zitten er altijd grenzen aan de regelbaarheid van het kasklimaat. Zo zal in Kassim de kasluchttemperatuur onder zonnige, zomerse omstandigheden nooit 20°C kunnen worden, ook al staat de stooklijn op 16°C en de ventilatielijn op 18°C. Een gewone kas heeft immers geen andere mogelijkheid om de kasluchttemperatuur te verlagen dan de ramen open te zetten, en eventueel te vernevelen. En bij volledig geopende ramen kom je overdag in een Nederlandse zomer (25°C, 60% RV, 800 W/m² straling, 5 m/s wind), en een volgroeid tomatengewas zonder verneveling rond de 27°C uit.

Deze 27°C is in dit geval de evenwichtstemperatuur waarbij het warmteverlies door de ramen en vanaf het glas naar de omgeving precies gelijk is aan de hoeveelheid energie die de kas vanuit het zonlicht absorbeert. Samen met de 27°C voor de kasluchttemperatuur heeft het simulatiemodel voor deze omstandigheden ook berekend dat het gewas gemiddeld een halve graad warmer is. Daarbij zijn ook de temperaturen van het kasdek, het vloeroppervlak en de constructiedelen berekend. Immers, al deze oppervlakken absorberen zonlicht en staan die warmte af aan de kaslucht (via convectie) en aan de andere oppervlakken (via straling). Onderstaande Figuur toont een schetsmatige weergave van alle temperaturen die in het simulatiemodel worden berekend.



Figuur 1 De belangrijkste temperaturen die in het simulatiemodel Kaspro worden berekend.

Deze Figuur toont het maximum aantal aan berekende temperaturen. Als het model wordt gebruikt om een enkel glas kas te simuleren is er alleen een T_{cover} en wordt er geen T_{cavity} en $T_{coverUp}$ berekend. Ook de verwarmingsbuizen kunnen al dan niet in de berekeningen worden meegenomen en ook de berekening van schermtemperaturen, T_{top} , $T_{between1}$ en $T_{between2}$ en T_{lamp} zijn optioneel, afhankelijk van de case die een gebruiker doorgerekend wil hebben.

Alle oppervlakken kunnen licht onderscheppen (en bij gebruik van belichting kunnen de lampen licht máken) en warmen daardoor op. Een oppervlak wat warmer is dan de lucht er omheen zal langs convectieve weg warmte verliezen. De hoeveelheid warmte die dan wordt afgegeven hangt af van de warmteoverdracht coëfficiënt en het temperatuurverschil.

Naast convectieve warmteoverdracht wordt ook de overdracht door straling berekend. Aangezien in principe elk oppervlak met ieder ander oppervlak straling kan uitwisselen (tenzij een oppervlak volledig aan het 'zicht' is onttrokken) loopt het aantal stralingsuitwisselingen bijna kwadratisch op met het aantal oppervlakken dat in de simulatie een rol speelt. Het simulatiemodel wordt dan ook duidelijk reken-intensiever naarmate er meer installaties in de gesimuleerde kas aanwezig zijn. Dit is goed merkbaar wanneer het model wordt gebruikt om een heel teeltseizoen te simuleren. Bij gebruik van Kaspro door Kassim wordt er echter geen teeltseizoen doorgerekend maar enkel een evenwichtssituatie berekend. Dit is een relatief korte berekening zodat het verschil in benodigde rekentijd zo klein is dat een verschil in model-omvang niet opgemerkt kan worden.

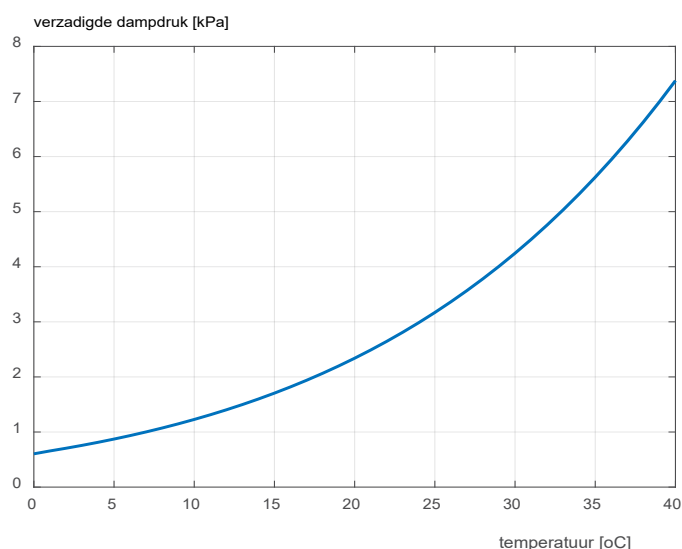
Het simulatiemodel Kaspro bestaat dus uit zo'n 10 tot 20 onderdelen, elk met een eigen temperatuur, en zo'n 50 tot 200 energie-uitwisselings-processen die die temperaturen met elkaar verbinden. Wanneer dit simulatiemodel door Kassim wordt gebruikt, wordt in een iteratief proces gezocht naar die temperatuurverdeling waarin alle processen in evenwicht zijn. Dit is het stationaire evenwicht en elk model-onderdeel verliest dan net zoveel energie aan zijn omgeving als dat het ontvangt. In technische zin gebeurt dit door de verschillende temperaturen met kleine stapjes te veranderen (ordegrootte 0.05°C) totdat de evenwichtssituatie bereikt is.

Naast energie-uitwisseling tussen de verschillende onderdelen van het simulatiemodel vindt er ook energie-omzetting plaats. De belangrijkste omzetting is die van licht naar warmte, wanneer licht door een oppervlak wordt geabsorbeerd. Kaspro heeft daarvoor een uitgebreide set van formules die berekenen hoe licht in de kas en in het gewas doordringt, waarbij onderweg steeds een deel van het licht wordt geabsorbeerd en omgezet in warmte.

Het tweede belangrijke omzettingsproces is de omzetting van warmte in waterdamp (verdamping) of, andersom, de omzetting van waterdamp in vloeibaar water (condensatie).

Voor het verdampingsproces is in de eerste plaats de beschikbaarheid van water vereist, en in de tweede plaats een drijvende kracht. Water wordt in een kassysteem aangevoerd via de wortels van het gewas of via de hoge druk nevelleiding bij gebruik van een mist-installatie. De drijvende kracht voor verdamping is een dampdruk die op het verdampende oppervlak hoger is dan de dampdruk van de lucht er omheen. Condensatie vindt plaats als de dampdruk boven een oppervlak lager is dan die van de lucht er omheen.

De dampdruk (vlak boven) een vochtig oppervlak is een fysisch gegeven en wordt beschreven door de verzadigde dampdruks-curve. De verzadigde dampdruks-curve voor lucht onder standaard luchtdruk (100 kPa, ofwel 1 bar) is weergegeven in de onderstaande grafiek.



Figuur 2 Verzadigde dampdruk van lucht onder standaard druk (100 kPa).

Indien een oppervlak nat is, en een hogere verzadigde dampdruk heeft dan de dampdruk van de omgevende lucht zal dit oppervlak waterdamp aan de lucht afstaan. Het verlies van waterdamp vanuit het oppervlak wordt vanuit het waterlaagje aangevuld doordat water daar van de vloeibare in de gasvormige fase overgaat. Voor dit proces is energie nodig (latente warmte), die onttrokken wordt aan het (waterlaagje op het) oppervlak. In geval het natte oppervlak en de lucht een afgesloten ruimte vormen, die volledig van de omgeving geïsoleerd is zal dit verdampingsproces doorgaan totdat de dampdruk van de lucht gelijk is aan de verzadigde dampdruk van het oppervlak. Er is dan immers geen drijvende kracht meer voor de verdamping. In die evenwichtssituatie zal de lucht een 100% relatieve vochtigheid hebben en het oppervlak zal iets afgekoeld zijn vanwege de onttrekking van latente warmte tijdens de verdamping.

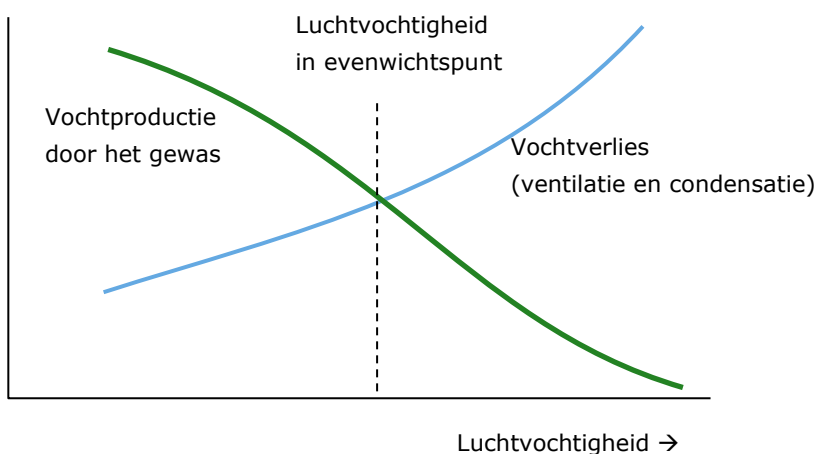
In een kas is de kaslucht echter nooit een afgesloten ruimte. Er is lek, waardoor vochtige kaslucht ontsnapt, en er is warmteverlies naar de omgeving als het buiten kouder is dan binnen, waardoor het kasdek vaak relatief koud is en vocht tegen het kasdek kan condenseren. Hierdoor blijft de luchtvochtigheid praktisch altijd onder de 100%.

Meestal is de luchtvochtigheid echter beduidend onder de 100% RV omdat de tuinder de afvoer van vocht stimuleert middels ventilatie. Het evenwichtsniveau waarop de luchtvochtigheid dan uitkomt hangt enerzijds af van de snelheid waarmee het gewas water kan verdampen en anderzijds van de snelheid waarmee de kas de waterdamp weer kwijt raakt.

Voor de verdampingssnelheid van het gewas is de drijvende kracht achter die verdamping (het dampdrucksverschil tussen het blad en de lucht) één van de twee bepalende factoren. Deze drijvende kracht achter de verdamping wordt groter naarmate de kaslucht droger wordt. De andere factor is de weerstand voor de vochtuitwisseling. Deze wordt verderop in de tekst besproken.

Ook het vochtverlies naar buiten is een proces dat door twee factoren wordt bepaald. Ook hier is er een drijvende kracht, namelijk het verschil tussen de luchtvochtigheid binnen in de kas en buiten de kas. Dit verschil in luchtvochtigheid wordt kleiner naarmate de luchtvochtigheid in de kas daalt. De andere factor voor de vocht-afvoer is het ventilatiedebiet. Bij gebruik van mechanische ventilatie is het ventilatiedebiet een duidelijke instelling, maar bij gebruik van ramen wordt het debiet bepaald door temperatuurverschillen, raamopening en windsnelheid. Al deze processen vormen een onderdeel van het simulatieprogramma, maar worden in dit project niet verder besproken.

Omdat de drijvende kracht achter de verdamping tegengesteld werkt aan de drijvende kracht voor de vocht-afvoer ontstaat er in een kas (en in het model) een evenwichtssituatie voor de luchtvochtigheid die hieronder schetsmatig is weergegeven.



Figuur 3 Schetsmatige tekening van de evenwichts-luchtvochtigheid waarbij de vochtproductie gelijk is aan het vochtverlies.

In het plaatje is het vochtverlies naar buiten als een lijn getekend die steeds steiler oploopt naarmate de luchtvochtigheid in de kas toeneemt. Dit komt door de combinatie van de lineaire relatie tussen vocht-afvoer en luchtvochtigheidsverschil, en daar bovenop een toenemende luchtuitwisseling doordat de kasklimaatregelaar meer zal gaan ventileren naarmate de kaslucht vochtiger is (de P-band op vocht). Ook zal de afvoer via condens toenemen naarmate de kaslucht vochtiger is.

De vochtproductie vanuit het gewas is ook een niet-lineair verband. Dit komt doordat in een kas met het veranderen van de vochtproductie vanuit het gewas ook de temperatuur van het gewas verandert, waarover straks meer. Daarmee verandert de dampdruk boven het gewas en verandert de drijvende kracht voor de verdamping meer dan alleen door de verandering van de dampdruk van de kaslucht. Bij hele lage luchtvochtigheden kan de vochtproductie van het gewas weer afnemen doordat de water-aanvoer vanuit de wortels beperkend kan worden, of het gewas door stress de huidmondjes sluit.

Doordat het ene proces toeneemt, en het andere proces juist afneemt bij een oplopende luchtvochtigheid, kan er een evenwichtspunt berekend worden. Zo'n evenwichtspunt is hetgeen Kassim berekent voor de door de gebruiker ingevoerde, constant gehouden, omgevingsfactoren.

Het evenwichtspunt in de luchtvochtigheid (maar een soortgelijk mechanisme treedt ook op voor de temperaturen in de kas), schuift naar links of naar rechts in afhankelijkheid van de omgevingsfactoren. Maar ook als die constant zouden zijn, schuift het evenwichtspunt naar links of naar rechts bij verandering van de kas- of gewas-eigenschappen. In een goed afgerubberde kas is het lekverlies klein en zal de blauwe lijn in Figuur 3: wat lager komen te liggen en schuift het snijpunt van de lijnen (de evenwichtsluchtvochtigheid) naar rechts. De kaslucht is dan vochtiger.

Als het gewas groter van omvang is, of makkelijker verdampt, dan schuift de groene lijn omhoog en schuift het evenwichtspunt eveneens naar rechts. Omgekeerd schuift bij een moeilijk verdampend gewas, de groene lijn omlaag en komt het evenwichtspunt meer naar links te liggen.

De luchtvochtigheid die in een kas ontstaat wordt enerzijds dus bepaald door fysische en technische factoren die de vocht-afvoercapaciteit van de kas bepalen en aan de andere kant door de fysische en biologische factoren die de verdamping vanuit het gewas bepalen. Technische en fysische factoren zijn recht-toe-recht-aan te berekenen met standaard-formules, maar voor de gewasverdamping ligt dat lastiger. In principe is ook de verdamping vanuit de plant een recht-toe-recht-aan fysisch proces, maar heeft ook een belangrijke biologische component, namelijk de huidmondjes-opening. Bij geopende huidmondjes kan de waterdamp vanuit het blad gemakkelijk afgegeven worden aan de omringende lucht (mits er natuurlijk een zeker dampdrukverschil is) en zal er dus ook relatief veel water van de vloeibare naar de gasvormige fase worden omgezet. Dit levert veel verdamping en veel latente warmte-onttrekking aan het blad.

Zijn de huidmondjes echter dicht, dan zal er weinig waterdamp vanuit het blad naar de omgeving worden afgestaan en zal de plant weinig verdampen en weinig latente warmte onttrekken.

Het fysische proces hierbij is duidelijk. Vocht wordt via de weerstand van de huidmondjes en de grenslaagweerstand van het blad aan de kaslucht afgestaan. Het biologische proces achter die huidmondjesweerstand zorgt er echter voor dat het gedrag van de huidmondjes niet met algemeen geldende relaties kan worden beschreven. De huidmondjes-eigenschappen kunnen sterk verschillen tussen het ene en het andere gewas. Ook kan het huidmondjesgedrag van één gewas variëren in de tijd. Planten kunnen zich aanpassen aan hun omgeving en daardoor in nieuwe bladeren meer of minder huidmondjes per eenheid bladoppervlak aanmaken. Ook is het bijvoorbeeld bij Roos bekend dat wanneer rozen onder continu hoge luchtvochtigheden worden gekweekt, de bladeren veel minder in staat zijn om de huidmondjesweerstand aan te passen dan een gewas dat meer afgehard is door de luchtvochtigheid tenminste een deel van de tijd laag (niet onder de 80%) te houden.

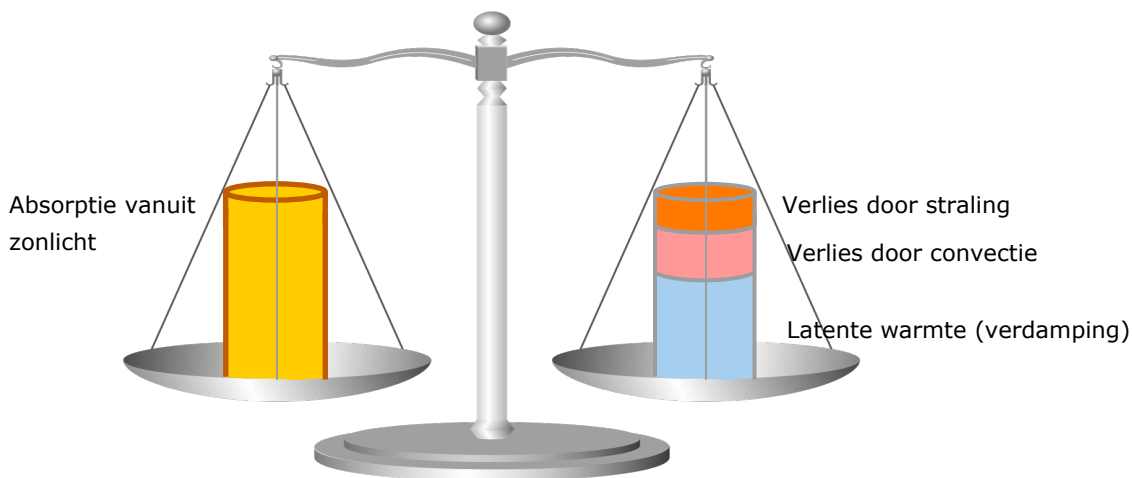
Door deze grote variabiliteit tussen rassen en gewassen en binnen een gewas, en mogelijk ook nog variabiliteit gedurende het groeiseizoen, heeft een simulatiemodel meerdere parameters nodig om tenminste het meest in het oog springende gedrag van de huidmondjesweerstand te kunnen berekenen.

In de volgende paragraaf wordt eerst dieper op de theorie achter huidmondjesgedrag, verdamping en gewastemperatuur ingegaan. In het Hoofdstuk daarna worden de resultaten met het model in de simulatie van verdamping en gewastemperatuur met vier verschillende gewassen getoond.

1.3 Huidmondjesopening, verdamping en gewastemperatuur

In de vorige paragraaf is in algemene zin uitgelegd hoe de weerstand van de huidmondjes de verdamping vanuit het blad beïnvloedt en daarmee de latente warmte die door de verdamping aan het blad wordt onttrokken. De latente warmte die aan het blad wordt onttrokken is één van de componenten die uiteindelijk de temperatuur van het blad bepalen. De andere componenten zijn de energie die vanuit het zonlicht door het gewas wordt geabsorbeerd, de convectieve warmte-uitwisseling tussen het blad en de lucht er omheen en de energie die het blad via straling met de oppervlakken in de omgeving uitwisselt. Net als bij de uitleg rond de totstandkoming van het evenwichtspunt voor de luchtvochtigheid in de vochtbalans (Figuur 3) geldt voor de energiestromen rond de temperatuurbalans van het blad dat er een evenwichtspunt bestaat waar de toevoer van energie vanuit de zon in evenwicht is met de afvoer van energie door verdamping, convectie en straling. Het zal duidelijk zijn dat hier over de situatie overdag wordt gesproken. 's Nachts is er geen absorptie van zonlicht en ziet de balans er anders uit. Hierover later meer.

De balans die overdag tot stand komt is gevisualiseerd in onderstaande schets.



Figuur 4 Schetsmatige tekening die aangeeft hoe overdag de evenwichtstemperatuur van een blad ontstaat doordat de energietoevoer uit het zonlicht gelijk is aan het energieverlies door verdamping, (langgolvlige) straling en convectie.

In deze balans is, bij een gegeven hoeveelheid zonlicht en transmissie van de kas, de energie-input naar het blad constant en zal het simulatiemodel, die temperatuur berekenen waarbij de drie verlies-posten samen gelijk zijn aan de energie input vanuit de zon. Wordt het blad te koud berekend, dan is het verlies kleiner dan de absorptie en zal het blad warmer worden. Zou het blad te warm worden berekend, dan is het verlies groter dan de energie uit de absorptie van zonlicht en zal het blad afkoelen.

Dat het energieverlies door (langgolvlige) straling afhankelijk is van de temperatuur van het blad is evident. Een warmer blad zal meer energie uitstralen naar een (kouder) kasdek dan een kouder blad. En ook voor de convectieve warmte is het duidelijk dat een blad meer energie zal afgeven aan de kaslucht naarmate dat blad warmer wordt.

Maar ook het energieverlies door verdamping hangt af van de temperatuur. Bij een toenemende temperatuur van het blad ontstaat er een hogere (verzadigde) dampdruk in de natte holtes in het blad (Figuur 2). Daardoor neemt de drijvende kracht voor de verdamping toe en dus ook de verdamping. Bij een afnemende temperatuur neemt de verdamping via hetzelfde mechanisme af.

Wanneer alle drie deze relaties bekend zijn als functie van de bladtemperatuur kan de temperatuur worden gevonden waarbij het totale energieverlies gelijk is aan de energie-input.

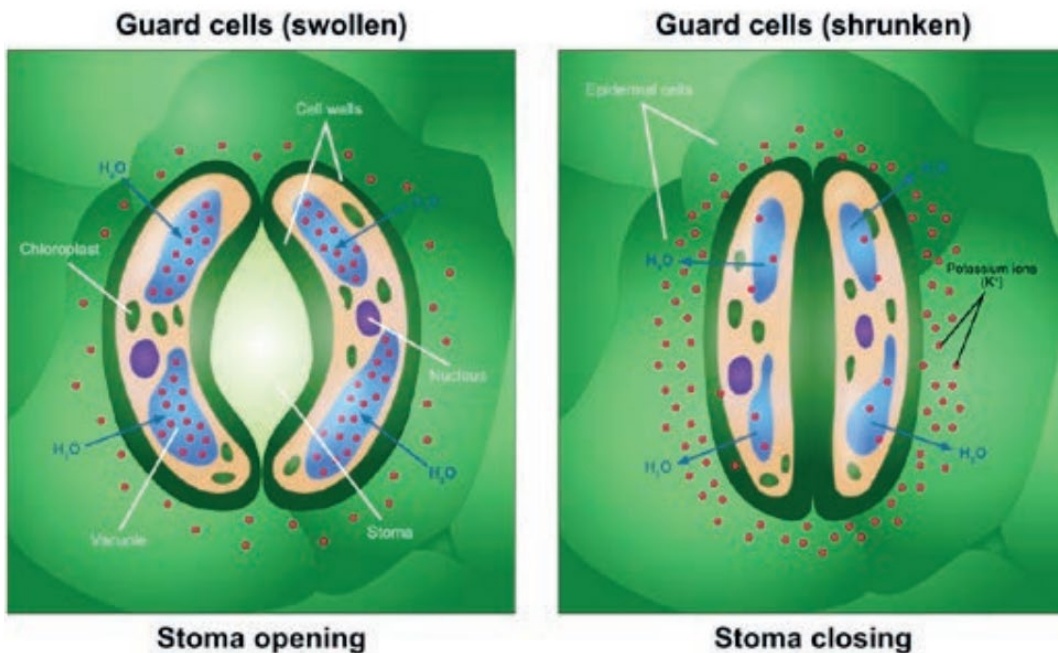
Voor de straling en de convectie geldt dat die relaties direct uit de warmte-overdrachtstheorie volgen.

De verdamping vanuit de holtes van het blad volgt eveneens de standaard warmte-overdrachtstheorie.

De temperatuur van het blad bepaalt het dampdrukverschil tussen de bladholten en de kaslucht en de daadwerkelijke vochtuitwisseling volgt dan uit dit dampdrukverschil en de weerstand voor die uitwisseling.

Die weerstand volgt echter maar voor een deel de standaard overdrachtstheorie, namelijk het deel wat de convectie vanaf een oppervalk naar de omliggende lucht beschrijft. Het andere deel wordt bepaald door de huidmondjesweerstand.

Deze huidmondjesweerstand is een biologisch bepaalde grootheid en kan ook nog eens actief door het gewas worden veranderd. Het onderstaande plaatje laat schetsmatig zien hoe de huidmondjes onder invloed van de celspanning openen of sluiten.



Figuur 5 Huidmondje. De sluitcellen (Guard cells) bevatten bladgroenkorrels (Chloroplast). Deze zorgen in het licht voor energie voor de import van K-ionen (rode puntjes) van de buurcellen. Hierdoor stijgt de druk in de vacuole en gaat het huidmondje open. Bron: Wikipedia.

Biologisch gezien wordt de opening van de huidmondjes bepaald door de osmotische waarde van de sluitcellen ten opzichte van de osmotische waarde van de omliggende cellen. Die osmotische waarde wordt geregeld door het selectief doorlaten of blokkeren van ionen en dat proces wordt door tal van factoren beïnvloed en vormt het werkveld voor biochemici. Er kan echter ook op een wat hoger abstractieniveau naar dit proces worden gekeken om te constateren dat die huidmondjesopening vooral gecorreleerd kan worden aan de hoeveelheid licht.

Fysiologisch komt dat doordat de sluitcellen ook bladgroenkorrels hebben die de energie leveren waarmee de osmotische waarde van de sluitcellen actief kan worden verlaagd waardoor ze kunnen opzwellen.

Inderdaad is bij de ontwikkeling van de uitstralingsmonitor gebleken dat voor de simulatie van de verdamping een relatie die de huidmondjesweerstand bepaalt in afhankelijkheid van uitsluitend de lichtintensiteit goede resultaten opleverde. Voorwaarde hierbij was dat het gewas in lagen werd opgedeeld en dat de energiebalans voor elke laag expliciet werd uitgerekend.

De formule voor de uitstralingsmonitor was opgesteld bleek toereikend om het huidmondjesgedrag onder lichtarme omstandigheden te berekenen (zie <http://www.glastuinbouwmodellen.wur.nl/radiationmonitor/Content/HlpNL.pdf> pagina 9). Bij hogere lichtintensiteiten (zomerse omstandigheden) bleef de huidmondjesweerstand echter te groot, wat resulteerde in te weinig verdamping en een te hoge bladtemperatuur. Daarom is de formule voor de berekening in het huidige project aangepast, maar de eenvoudige opzet is hetzelfde gehouden. De kern van de opzet is dat er voor elk gewas een maximale en een minimale huidmondjesweerstand wordt gedefinieerd, plus een parameter die aangeeft hoe de huidmondjesweerstand verlaagd wordt onder invloed van licht.

Met de inzichten die in dit voorliggend project verworven zijn wordt de huidmondjesweerstand nu beschreven met:

$$R_{\text{stomata}} = R_{\text{stomata,min}} + (R_{\text{stomata,max}} - R_{\text{stomata,min}}) * (\exp(-\text{PAR} / (\text{PAR}_{90\text{percent}}/2.4)));$$

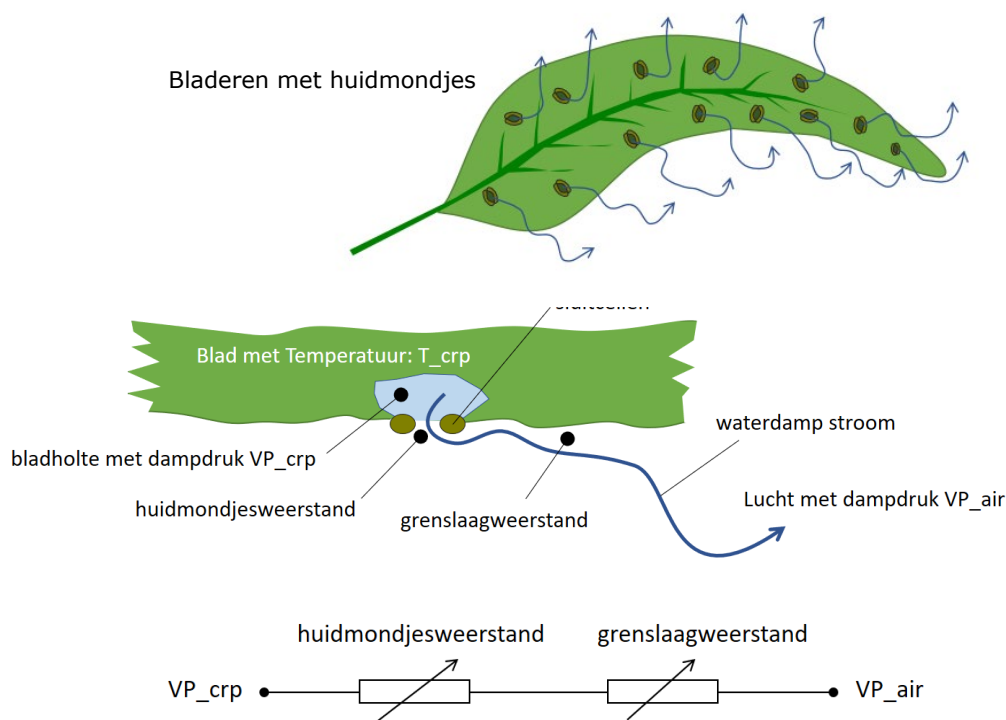
De drie parameters zijn de minimale stomataire weerstand ($R_{\text{stomata,min}}$), de maximale stomataire weerstand ($R_{\text{stomata,max}}$) en een parameter die bepaalt hoe sterk de huidmondjes reageren op licht (PAR90percent). De maximale stomataire weerstand is de weerstand die de huidmondjes in gesloten toestand bieden, dus de waarde die in donkere omstandigheden wordt gebruikt. De minimale stomataire weerstand is de waarde die de weerstand die de huidmondjes leveren wanneer ze helemaal open zijn, dus overdag. De parameter PAR90percent geeft aan bij welke intensiteit PAR-straling de huidmondjes al voor 90% open zijn, dus bijna hun minimale weerstand hebben. Is die waarde hoog, bijvoorbeeld $300 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{s})$ dan reageert het gewas kennelijk zeer passief op een toenemende licht-intensiteit en moet er behoorlijk veel licht zijn voordat de huidmondjes goed open gaan. Is die waarde laag, bijvoorbeeld $100 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{s})$, dan betekent dit dat de huidmondjes heel snel reageren op licht.

Overigens wordt in deze berekening met 'de intensiteit van de PAR-straling' de intensiteit van het licht bedoeld dat van boven op een bladlaag invalt. Ergens is dit vreemd, aangezien huidmondjes vooral aan de onderkant van het blad zitten, waar de lichtintensiteit beduidend lager is. Dat er toch voor deze definitie is gekozen komt doordat: 1) de lichtintensiteit op een horizontaal vlak in een bladlaag aansluit bij het intuïtieve gevoel van lichtintensiteit en 2) de lichtintensiteit aan de onderkant sterk gecorreleerd is met de lichtintensiteit aan de bovenkant van een bladlaag en het dus voor de bepaling van een regressieparameter niet uitmaakt welke lichtintensiteit genomen wordt.

Zolang duidelijk is hoe de lichtintensiteit gedefinieerd is kan het model gebruikt worden om de huidmondjesweerstand te bepalen.

Overigens wordt met 'huidmondjesweerstand' niet de weerstand van een individueel huidmondje bedoeld. Het is de weerstand die de huidmondjes als geheel leveren.

Het model waarlangs in het model het transport van vocht vanuit de bladeren naar de kaslucht plaatsvindt is geschetst in onderstaande Figuur.



FIGUUR 6 Schematische weergaven van het verdampingsproces vanuit de bladholte naar de kaslucht, zowel als tekening als in de vorm van een representatie met twee variabele weerstanden.

Het uitgangspunt in de berekening van de verdamping vanuit de bladeren is dat er in de bladholten een bepaalde dampdruk heerst (de verzadigde dampspanning die hoort bij de temperatuur van dat blad) die hoger is dan de dampdruk van de kaslucht. Vanwege dit dampdrukverschil zal waterdamp vanuit de bladholte naar de kaslucht stromen. Die stroomsnelheid (de verdamping) hangt af van het drukverschil en de weerstand, en die weerstand bestaat uit twee componenten. De eerste component is de reeds besproken huidmondjesweerstand die door een biologisch proces wordt bepaald. De tweede weerstand is de grenslaagweerstand. Deze grenslaagweerstand bepaalt het 'gemak' waarmee lucht die vlak rondom het blad zit uitgewisseld kan worden met de kaslucht. Dit is een convectief uitwisselingsproces waarbij energie (warmte) en massa (waterdamp, CO₂) wordt uitgewisseld. Omdat de uitwisseling van warmte en massa in een grenslaag volgens hetzelfde principe verloopt, namelijk de uitwisseling van de lucht waarvan de waterdamp en CO₂ een onderdeel vormt, kan de grenslaagweerstand voor waterdamp worden uitgerekend vanuit de grenslaagweerstand voor warmte-uitwisseling. De algemene formule hiervoor is:

$$\text{grenslaagweerstand_vocht} = Le^{2/3} \text{grenslaagweerstand_warmte} \quad [\text{s m}^{-1}]$$

waarin Le het Lewis-getal is. Voor waterdamp in lucht is het Lewis-getal 0.89. Hiermee wordt de formule voor de grenslaagweerstand voor vocht.

$$\text{grenslaagweerstand_vocht} = 0.93 \text{grenslaagweerstand_warmte} \quad [\text{s m}^{-1}]$$

De grenslaagweerstand voor warmte kan experimenteel worden bepaald met behulp van kunst-bladeren. Door hier weerstandsdraad in te verwerken en daarmee een bekende hoeveelheid warmte in het kunstblad vrij te laten komen en vervolgens te meten hoeveel warmer het kunstblad wordt ten opzichte van zijn omgeving kan de warmte-overdrachtscoëfficiënt worden berekend. In haar promotieonderzoek heeft Stanghellini verschillende experimenten met zulke kunstbladeren uitgevoerd en kwam tot de conclusie dat de (enkelzijdige) warmte-overdrachtscoëfficiënt van tomatenbladeren die twee graden warmer zijn dan de omgeving rond de 5 W/(m² K) ligt. De warmte-overdrachtstheorie geeft aan dat zo'n warmte-overdrachtscoëfficiënt toeneemt met het temperatuurverschil tussen blad en lucht (meer turbulentie). Voor vrije convectie met een turbulent karakter wordt daarbij een factor dT^{0.33} gebruikt, waarbij dT het temperatuurverschil is tussen het warmte afgevend oppervlak en de lucht.

Bij de simulatie van een tomatengewas wordt daarom in het simulatiemodel de warmte-overdrachtscoëfficiënt tussen blad en lucht berekend door

$$a_{\text{BladLucht, enkelzijdig}} = 4 * |T_{\text{blad}} - T_{\text{air}}|^{0.33} \quad [\text{W}/(\text{m}^2_{\text{enkelzijdigBlad}} \text{K})]$$

Aangezien een blad aan beide kanten warmte kan uitwisselen is de warmte-uitwisseling van een blad twee maal zo groot dus $a_{\text{BladLucht}} = 2 a_{\text{BladLucht, enkelzijdig}}$.

Een komkommengewas, wat beduidend grotere bladeren heeft, zal een wat kleinere warmte-overdrachtscoëfficiënt hebben dus in dat geval wordt er gerekend met $a_{\text{BladLucht}} = 2 * 3 * |T_{\text{blad}} - T_{\text{air}}|^{0.33} \text{ W}/(\text{m}^2_{\text{blad}} \text{K})$.

De grenslaagweerstand voor warmte volgt vervolgens uit

$$\text{grenslaagweerstand_warmte} = 1200 / a_{\text{BladLucht}} \quad [\text{s m}^{-1}]$$

waarin 1200 de volumieke warmtecapaciteit van lucht is (1.2 kg/m³ x 1.0e3 J/(kg K)).

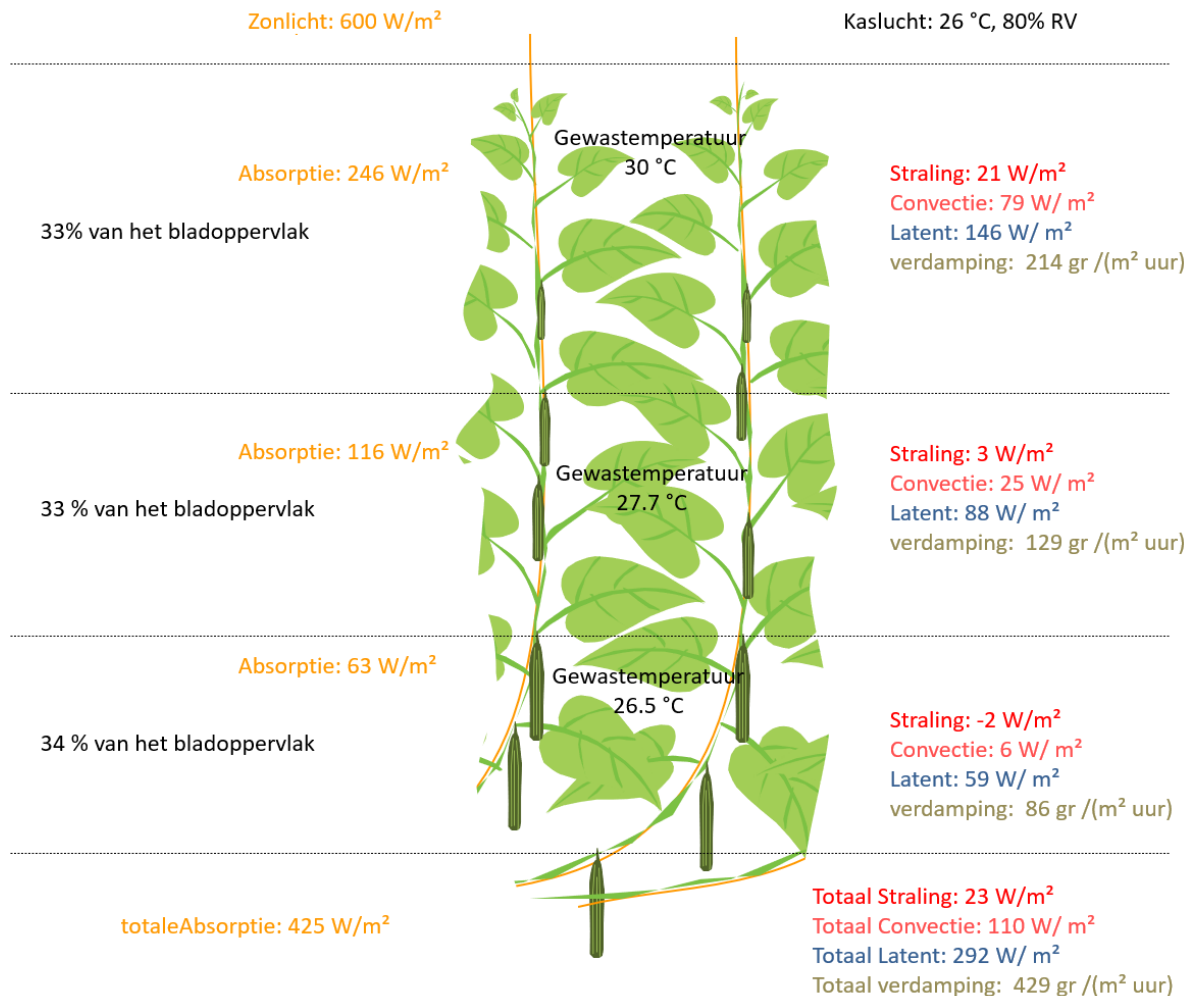
Met het gegeven dat de weerstand voor vocht $r_{b,v}$ gelijk aan is aan $0.93 * \text{grenslaagweerstand_warmte}$ kan nu worden berekend dat de verdamping uit een blad volgt uit.

$$\text{Verdamping}_{\text{blad}} = \frac{\rho c_p \text{ opp}}{\Delta H \gamma (r_{b,v} + r_{i,v})} \quad [\text{kg}/(\text{s Pa})]$$

Waarin ρ de dichtheid van lucht is (1.2 kg/m³), c_p de soortelijke warmte (1.0e3 J/(kg K)), opp de oppervlakte van het blad, ΔH de latente warmte van waterdamp (2.45e6 J/kg), γ de psychrometrische constante (65.8 Pa/K) en $r_{b,v}$ en $r_{i,v}$ de grenslaagweerstand voor vocht en de huidmondjesweerstand voor vocht.

In principe geldt deze formule voor elk blad, maar in het simulatiemodel wordt het aanwezige blad over 3 lagen (groentegewassen) verdeeld. Het oppervlak waarover de balans wordt berekend beslaat daarmee 1/3 van het in de kas aanwezige bladoppervlak per m², dus 1/3 van de LAI.

Het model berekent dan voor elk van die lagen die gemiddelde temperatuur waarbij het energieverlies door straling, convectie en verdamping gelijk is aan de absorptie van energie vanuit het zonlicht. Onderstaande plaatje toont een voorbeeld van zo'n berekende temperatuurverdeling over een komkommergewas dat blootgesteld wordt aan 600 W/m^2 straling (vlak boven het gewas gemeten) in een kas met een kasluchttemperatuur van 26°C en een luchtvochtigheid van 80%.



Figuur 7 Resultaat van de berekening van de gewastemperaturen in een komkommergewas met het simulatiemodel na parameterisatie van de verdampingseigenschappen zoals in het volgende Hoofdstuk is beschreven.

De Figuur laat zien dat onder zonnige omstandigheden het grootste deel van de energie die door het gewas geabsorbeerd wordt via latente warmte, dus via verdamping wordt afgevoerd (292 W/m^2 van de $425 \text{ W/m}^2 = 69\%$). Ook laat het plaatje zien dat niet al het licht waaraan een gewas wordt blootgesteld door het gewas wordt geabsorbeerd. Een belangrijk deel, voornamelijk afkomstig uit het Nabij Infra Rood deel van het zonnenspectrum, wordt door het gewas gereflecteerd.

Met het bovenbeschreven model kan de energiebalans over het gewas voor alle omstandigheden in beeld gebracht worden wanneer de gewasparameters voor de verschillende gewassen aan de hand van metingen zijn bepaald.

In het volgende Hoofdstuk wordt uitgelegd hoe die parameterisatie is uitgevoerd.

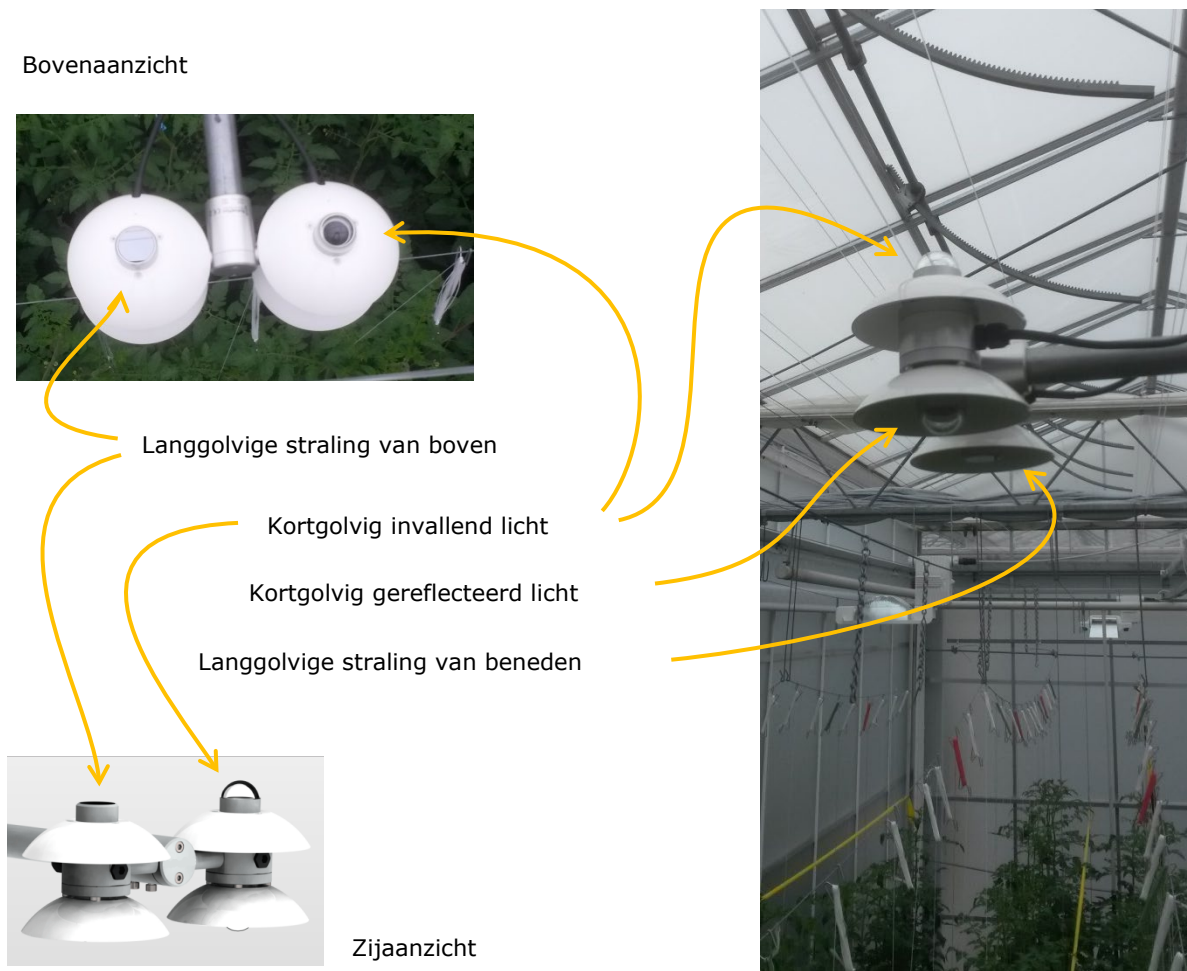
2 Bepaling van modelparameters

Vanuit de theorie m.b.t. de energiebalans over het gewas blijkt dat de belangrijkste factoren die hier een rol in spelen de stralingsabsorptie van het gewas en de huidmondjesweerstand zijn. Stralingsabsorptie is de motor voor de energie-toevoer naar het gewas en vervolgens bepalen de huidmondjes de verdeling van die energie over voelbare en latente warmte-afvoer.

Omdat de stralingsabsorptie de basis van de energiebalans vormt wordt deze in dit Hoofdstuk als eerste besproken (§ 2.1). Vervolgens wordt ingezoomd op het verdampingsgedrag en, daarmee, op de gewastemperatuur (§ 2.2). In beide gevallen wordt gekeken naar de vier teelten die in dit project nader zijn bestudeerd, namelijk tomaat, komkommer, Gerbera en Anthurium.

2.1 Stralingsabsorptie in tomaat, komkommer, Gerbera en Anthurium

In de afgelopen jaren is in verschillende experimenten op de proeflocatie Bleiswijk gebruik gemaakt van een netto-stralingsmeter die de vier componenten van deze stralingsmeting separaat afgeeft. Onderstaande foto's tonen de 4 sensoren die hierin verwerkt zijn en hun functie.



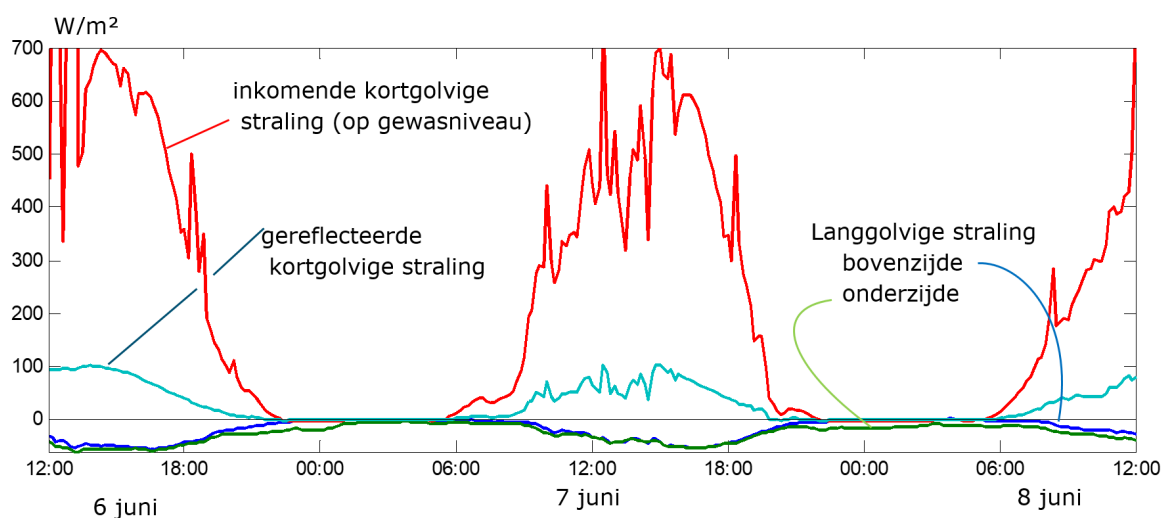
Figuur 8 Netto stralingsmeter die de 4 meetsignalen apart meet.

Aan de bovenkant zitten een pyranometer die het invallend zonlicht meet (PAR + NIR) en een pyrgeometer die de langgolvlige stralingsuitwisseling naar boven meet. De pyranometer meet overdag waarden tot zo'n 700 W/m² en 's nachts uiteraard 0 W/m², behalve wanneer de belichting aan is en er door reflecties ook wat kortgolvlige 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 stralingsensor (ook een pyranometer) meet het licht dat door het gewas en het vloeroppervlak van de kas wordt gereflecteerd. In een volgroeid tomatengewas is de intensiteit van de opgaande kortgolvlige straling rond de 13% ten opzicht van de neerwaartse kortgolvlige straling, maar in andere gewassen duidelijk hoger en soms zelfs aanzienlijk hoger. Zo'n hogere waarde kan komen door een hogere reflectie in het PAR-gebied, maar ook door een hogere reflectie in het NIR-gebied.

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 de onderste pyrgeometer een negatieve waarde geven.

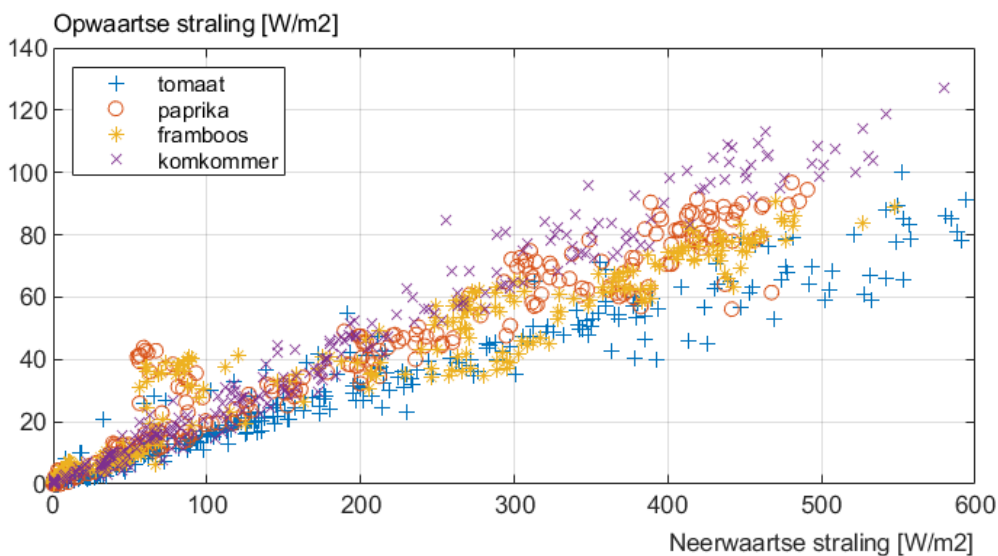
Onderstaande Figuur toont het verloop van de 4 signalen waaruit de netto straling is opgebouwd over 2 etmalen in een tomatengewas (Figuur uit rapport 'De Uitstralingsmonitor', de Zwart *et.al.*, 2017)



Figuur 9 De 4 stralingscomponenten gedurende 48 uur in een kas met een volgroeid tomatengewas zonder scherm.

De 2 pyranometers van de 4-componenten netto-stralingsmeter kunnen worden gebruikt om de kortgolvlige stralingsabsorptie van het gewas te bepalen. Immers, het verschil tussen het kortgolvlige licht aan de boven- en onderkant van de sensor is door het gewas en het vloeroppervlak geabsorbeerd.

Onderstaande Figuur laat uurgemiddelde waarden zien van de gemeten neerwaartse straling op de x-as en de daarbij gemeten opwaartse straling op de y-as in de 4 gewassen waarin deze 4-component netto-stralingsmeter de afgelopen jaren in verschillende proef-afdelingen in de proeflocatie Bleiswijk is gebruikt. In alle gevallen gaat het om volgroeide gewassen.

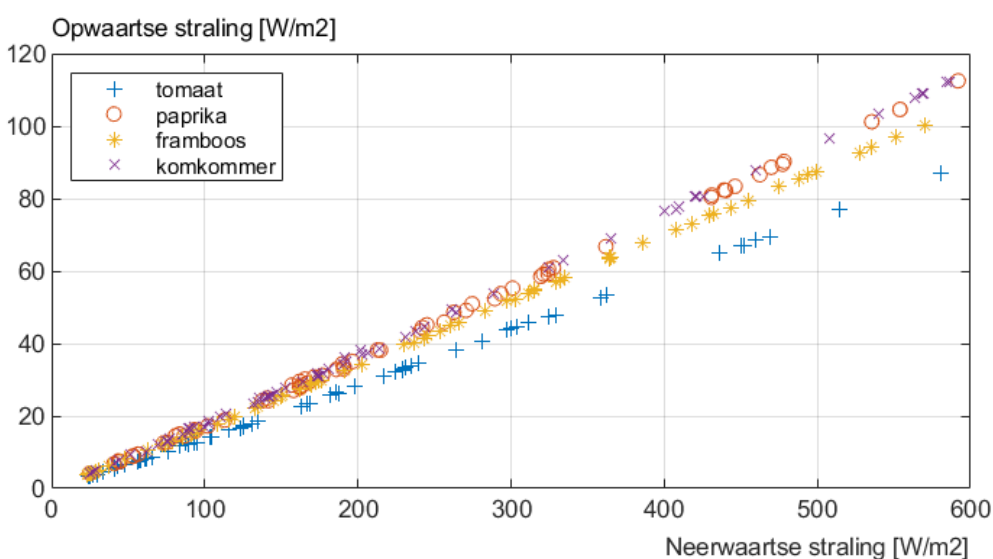


Figuur 10 Uurgemiddelde waarden van de gemeten neerwaartse kortgolvlige straling en opwaartse kortgolvlige straling in 4 gewassen, allen volgroeid.

De data zijn allen verkregen onder zomerse omstandigheden (mei en juni) en het is duidelijk dat de verhouding tussen opwaartse en neerwaartse straling behoorlijk constant is. Alle punten liggen namelijk redelijk dicht rondom een gemiddelde lijn. De fractie gereflecteerd licht vanuit de combinatie van gewas en bodem hangt kennelijk slechts in geringe mate af van lichtintensiteit.

De helling van de lijn die voor de 4 gewassen door de puntenwolk kan worden getrokken geeft de gemiddelde reflectie van gewas+vloeroppervlak en die is het kleinst voor tomaat (14%) en het hoogst bij komkommer (19%). Paprika ligt met 18% reflectie dicht bij komkommer en framboos ligt met 17% reflectie tussen de andere gewassen in.

In het simulatiemodel Kaspro is ook een 4-component netto-stralingsmeter opgenomen die de meetwaarden van zo'n netto-stralingsmeter simuleert. Voor de vier genoemde gewassen berekent het model de onderstaande waarden voor de neerwaartse en opwaartse kortgolvlige straling onder zomerse omstandigheden in een volgroeid gewas (LAI=3 (en 4 voor Paprika)).



Figuur 11 Neerwaartse en opwaartse kortgolvlige straling zoals gesimuleerd door het simulatiemodel voor een tomatengewas, een komkommergewas, een paprikagewas en een framboos.

Het is duidelijk dat in het model de relatie tussen neerwaartse en opwaartse straling vrijwel lineair is, waar er bij metingen een duidelijke spreiding te zien is. Allerlei effecten van tijdelijk beschaduwing van de sensoren door constructiedelen, verschillen doordat het gewas met het 'zakken' wordt verhangen, verschillen doordat de zon precies in het pad schijnt of omdat er reflecties van de zon precies op sensoren vallen worden in het model niet meegenomen. Wel neemt het model de verschillen tussen het ene of het andere gewas mee. Zo is duidelijk te zien dat, net als in de metingen, een tomatengewas het meeste licht absorbeert het komkommersgewas het minste.

Voor de Gerbera en de Anthurium waren geen metingen met een 4-component pyranometer beschikbaar. In die twee gewassen is de verhouding tussen opwaartse en neerwaartse kortgolvlige straling bepaald door een pyranometer beurtelings opwaarts en neerwaarts te laten meten.



Figuur 12 Handmatige bepaling van lichtabsorptie door gewas+vloer door de neerwaartse en opwaartse kortgolvlige straling te meten.

Om de resultaten van de handmatige meting te vergelijken met de resultaten van de 4-component stralingsmeter is de bovengetoonde meetmethode ook in een tomaat en komkommengewas uitgevoerd. De resultaten worden getoond in onderstaande Tabel.

Tabel 2.1

Opgaande intensiteit van het zonlicht boven het gewas, handmatig gemeten, als percentage van de neerwaartse straling boven het gewas voor 4 gewassen. Alle gewassen zijn volgroeid.

	Gerbera	Anthurium	Tomaat	Komkommer
Neergaande straling	100%	100%	100%	100%
Opgaande straling (handm)	16%	35%	12%	18%
Opgaande straling (autom)	niet beschikbaar	niet beschikbaar	14%	18%

De Tabel laat voor komkommer dezelfde waarde zien. Voor tomaat gaf de handmatige meting een nóg grotere gewasabsorptie dan wat er met de 4-component stralingsmeter is gemeten, maar de resultaten laten wel zien dat bij gebrek aan een reeks met automatisch gegenereerde stralingsdata de handmatige meting een bruikbaar alternatief vormt.

Het verschil tussen de hoeveelheid zonlicht die op gewashoogte naar boven toe wordt afgegeven met de hoeveelheid licht die van boven invalt geeft de absorptie van zonlicht door alle oppervlakken die zich onder de sensor bevinden. Het gewas is daarin het grootste oppervlak, maar niet het enige. De goten en de vloer absorberen ook zonlicht en een deel van het niet-terugkerende zonlicht is dus onder het gewas geabsorbeerd en niet door het gewas.

Om deze hoeveelheid te bepalen is ook op goothoogte beurtelings met de pyranometer omhoog en omlaag gemeten. Het verschil tussen het meetsignaal als de pyranometer naar boven kijkt en wanneer hij naar beneden is gericht komt door de absorptie van licht ónder het gewas.

Onderstaande Tabel toont het volledige overzicht van de gemeten stralingsintensiteit, allemaal uitgedrukt als fractie van de neerwaartse stralingsintensiteit aan de bovenkant van het gewas.

Tabel 2.2

Opgaande intensiteit van het zonlicht boven het gewas en neergaande en opgaande straling aan de onderkant van het gewas als percentage van de neerwaartse straling boven het gewas. Alle waarden zijn handmatig gemeten door een pyranometer beurtelings naar boven en naar beneden te draaien. In alle gevallen zijn de gewassen volgroeid.

	Gerbera	Anthurium	Tomaat	Komkommer	
Neergaande straling boven	100%	100%	100%	100%	A
Opgaande straling boven	16%	35%	12%-14%	18%	B
Neergaande straling onder	10%	5%	12%	15%	C
Opgaande straling onder	4%	2%	4%	6%	D
Absorptie door de 'vloer'	6%	3%	8%	9%	E
Gewasabsorptie (a-b-(c-d))	78%	58%	78%-80%	73%	F

Tabel 2.2 laat zien dat de 'vloer', en daarmee worden alle oppervlakken onder de onderste gewaslagen bedoeld) gemiddeld zo'n 60% van het zonlicht dat aan de onderzijde van het gewas nog naar beneden valt absorbeert. 40% wordt gereflecteerd en heeft daarmee een 2^e kans om door het gewas te worden geabsorbeerd. Het simulatiemodel berekent niet alleen de energie-input uit licht dat van boven komt, maar ook uit licht dat van onder komt, maar de percentages die in Tabel 2.2 getoond worden laten wel zien dat de bijdrage van dat licht dat vanaf de vloer een 2^e kans krijgt klein tot zeer klein is. De Tabel laat echter ook zien dat voor bijvoorbeeld de groentegewassen de absorptie van licht door de bodem niet onbelangrijk is. De absorptie van licht ónder het gewas (rij E = rij C – rij D) bedraagt daar 8 tot 9% van het invallende licht. Verwaarlozing van de absorptie door de vloer zou dan een behoorlijke overschatting van de absorptie door het gewas geven.

Na correctie van de metingen boven het gewas door de absorptie van licht onder het gewas volgt de absorptie door het gewas. In Tabel 2.2 is dit beschreven als rij F = rij A – rij B – rij E.

De conclusie van de metingen aan de stralingsabsorptie van de verschillende gewassen is dat een tomatengewas 78% tot 80% van het zonlicht dat aan de bovenkant van het gewas wordt gemeten absorbeert, een Gerbera-gewas 78%, een komkommernewas 73% en een anthuriumgewas 58%.

Het simulatiemodel, waarvan we eerder hebben gezien dat de berekende verhouding tussen de neergaande en opgaande stralingsintensiteit goed vergelijkbaar is met wat de pyranometers van een 4-component nettostralingsmeter meten, komt ook qua gewasabsorptie op waarden die dicht bij de bepalingen liggen die in Tabel 2.2 zijn genoemd. Omdat de stralingsabsorptie door het gewas de drijvende kracht is voor de verdamping overdag worden in onderstaande Tabel de gemeten en de berekende stralingsabsorptie voor de 4 gewassen getoond.

Tabel 2.3

Gewasabsorptie van zonlicht als fractie van de intensiteit van het zonlicht zoals dat boven het gewas wordt gemeten. De Tabel toont de gemeten en de berekende waarde voor 4 volgroeide gewassen.

	Gerbera	Anthurium	Tomaat	Komkommer
Neergaande straling boven gewas	100%	100%	100%	100%
Gemeten gewasabsorptie	78%	60%	78%-80%	73%
Berekende gewasabsorptie	79%	61%	79%	72%

Het simulatiemodel geeft niet precies dezelfde waarde als die met de handmetingen bepaald zijn, maar komt in alle gevallen erg dicht in de buurt. Gezien het feit dat het simulatiemodel nooit precies de variabiliteit in die verhoudingsgetallen kan simuleren (vergelijk Figuur 10 met Figuur 11) worden de in Tabel 2.3 getoonde resultaten acceptabel verondersteld.

2.2 Omzetting van geabsorbeerde straling in voelbare en latente warmte

Het licht dat overdag door het gewas wordt geabsorbeerd wordt omgezet in warmte en die warmte wordt afgevoerd in de vorm van latente warmte (verdamping) en, indien het gewas warmer is dan de omgeving, ook in de vorm van voelbare warmte.

De verdeling van de geabsorbeerde energie per bladlaag over straling, convectie en verdamping wordt bepaald door de weerstand voor vochttransport, bestaande uit een huidmondjes- en een grenslaagweerstand. Is de totale weerstand voor de verdamping klein, dan zal de verdamping 'makkelijk' verlopen en komt de bladtemperatuur dicht bij de kasluchttemperatuur te liggen. Is de huidmondjesweerstand groot, dan zal er pas bij een hogere bladtemperatuur een voldoende groot dampdrukverschil ontstaan om een substantiële verdamping, en dus koeling te genereren. De temperatuur waarbij de afgifte van energie in evenwicht is met de absorptie van het zonlicht komt dan verder boven de kasluchttemperatuur te liggen. Meestal blijft de latente warmteafvoer overdag de belangrijkste component in de warmtebalans, maar bij gewassen met grote huidmondjesweerstand zal de balans in de richting van voelbaar warmteverlies schuiven omdat het blad dan warmer wordt. Tenminste, zolang de absorptie van zonlicht door bladeren onveranderd blijft. Een gewas zoals Anthurium, dat vanwege het vettige blad moeilijk verdampt, heeft een hoge reflectie waardoor de temperatuur niet ál te hoog oploopt ondanks de beperkte verdamping.

Bovenstaande beschrijving van het proces geeft aan dat voor een rekenmodel voor de energiebalans over een gewas drie factoren realistisch moeten worden berekend. In de eerste plaats moet de licht-absorptie kloppen, wat in de vorige paragraaf is besproken. In de tweede plaats moet de verdamping kloppen en in de derde plaats moet de temperatuur van de bladeren waarbij die verdamping wordt gerealiseerd overeenkomen.

Een grove vergelijking tussen berekende en gemeten verdamping kan worden gemaakt aan de hand van een vergelijking watergift en drain op dagbasis. Het verschil tussen gift en drain geeft de totale wateropname, waarvan in een vruchtgewas, maar ook in een bloemisterij gewas zo'n 10% in de vorm van het geoogst product wordt afgevoerd. De dagelijkse verdamping is dus ongeveer 90% van gift-minus-drain.

In het bestudeerde komkommernewas, was ook een weeggoet aanwezig. Hiermee is het mogelijk om de verdamping niet alleen op dagbasis, maar ook op kwartier-basis te bestuderen. Bovendien is het met een weeggoet mogelijk om verdamping te onderscheiden van wateropname. Het verschil tussen deze twee is de gewichtstoename van het gewas. Voor het komkommernewas kan daarom in een nog hoger detail worden ingezoomd op de berekende gewasverdamping.

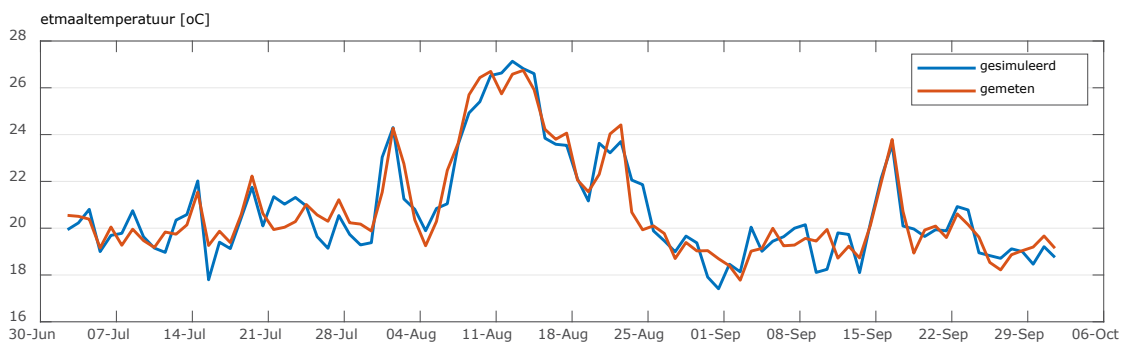
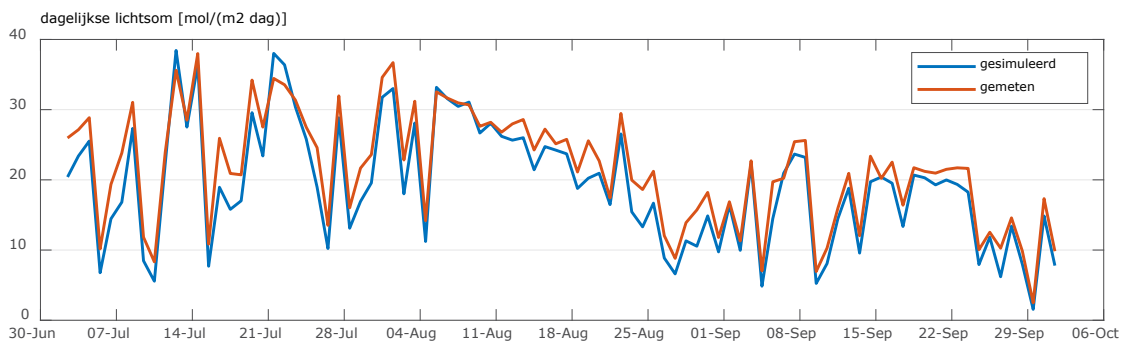
In deze paragraaf wordt eerst naar de verdamping op dagbasis gekeken. Vervolgens wordt voor het komkommernewas gekeken naar de verdamping op uur- en op kwartierbasis. En tenslotte wordt ook de berekende temperatuur in de kop van het gewas vergeleken met metingen door een InfraRood camera.

2.2.1 Dagelijkse gesimuleerde en gemeten verdamping in tomaat

Voor de evaluatie van de gewasverdamping en koeltemperatuur in de tomaat is gebruik gemaakt van data uit het experiment naar verminderde CO₂-dosering, wat in 2020 in de Bleiswijkse kasafdelingen 6.06, 6.08 en 6.09 plaatsvond. Hierbij zijn de data van afdeling 6.08 gebruikt.

De zomer van 2020 kende een hele warme periode rond 11 augustus en de meest lichtrijke dagen lagen in de week rond 14 juli en de week rond 21 juli.

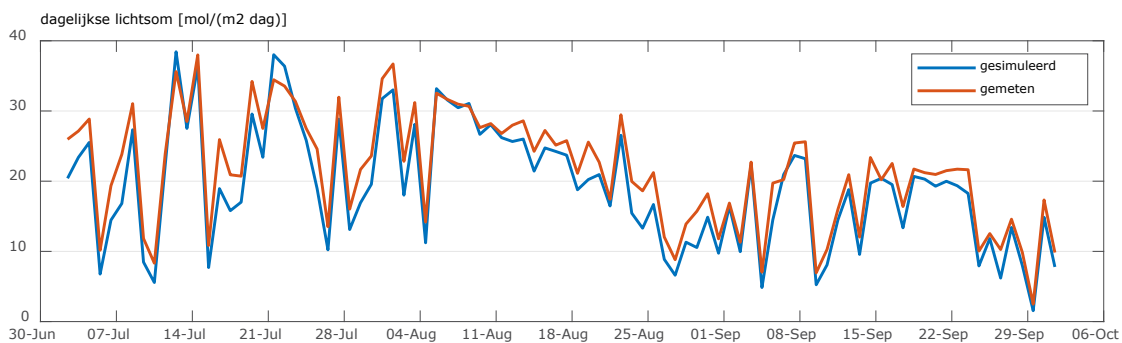
Onderstaande grafieken tonen de dagelijkse lichtsom in de kas en de gemiddelde etmaaltemperatuur.



Figuur 13 Lichtsom en etmaaltemperatuur in de teelt die gebruikt is voor de verificatie van de gewasverdamping en de kooptemperatuur in de tomaat.

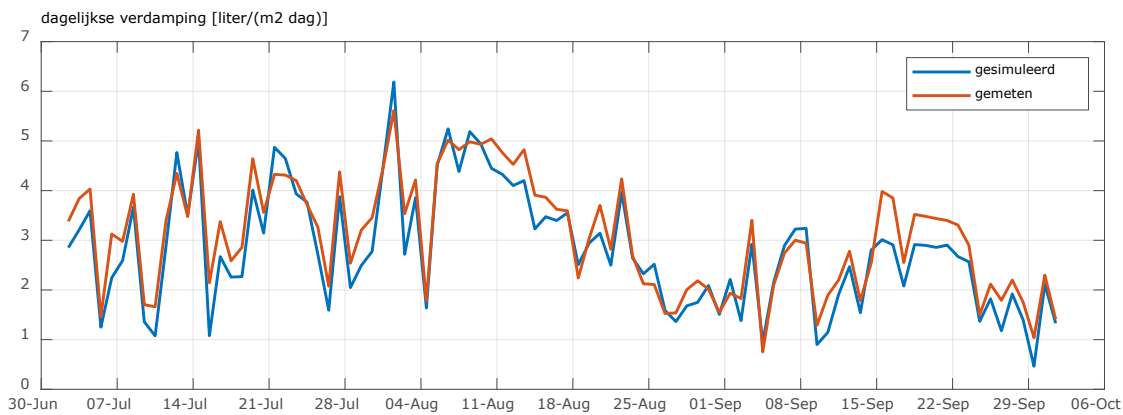
De Figuur laat zien dat de zomer van 2020 allerlei verschillende combinaties van temperatuur en straling kende en daarom een geschikte dataset biedt om te kijken hoe goed het model in staat is de gemeten verdamping te simuleren.

De tomatenkas had geen weeggoet dus de dagelijkse verdamping is hier afgeleid uit de watergift minus drain op dagbasis. Dit geeft de wateropname van het gewas en omvat dus behalve de verdamping, ook de wateropname voor de gewasgroei. Om de verdamping te bepalen moet de wateropname voor de gewasgroei van de dagelijkse wateropname worden afgetrokken. Deze wateropname voor gewasgroei kan worden ingeschat door de drogestof-productie die het model berekent te delen door het gemiddeld drogestof-percentage van het gegroeide gewas. Onderstaande grafiek toot de aldus berekende dagelijkse wateropname voor de groei.



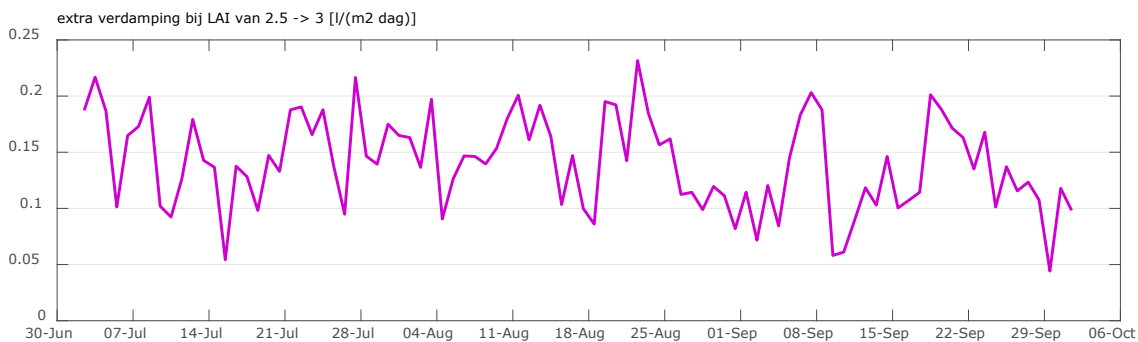
Figuur 14 Berekende wateropname voor groei, uitgaande van een gemiddeld drogestof percentage van 7%.

Na aftrek van de getoonde wateropname voor groei wordt de onderstaande grafiek voor de gemeten dagelijkse verdamping verkregen, die in een figuur geplaatst is samen met de gesimuleerde verdamping.



Figuur 15 Dagelijkse gewasverdamping zoals gesimuleerd door het model en zoals bepaald uit gift minus drain minus wateropname voor groei.

De Figuur laat zien dat het simulatiemodel de gemeten verdamping goed volgt, maar dat de twee lijnen niet strak op elkaar liggen. De ene dag berekent het model een wat hogere verdamping dan de gemeten verdamping en de andere dag een wat lagere. Dit komt uiteraard doordat een model altijd niet meer dan een benadering van de werkelijkheid geeft, maar ook omdat het model niet het precieze verloop van de LAI meeneemt. Bij de start van de teelt (in dit geval in februari) gaat het model uit van een klein plantje wat in de loop van 6 tot 8 weken uitgroeit tot een volgroeid gewas, maar daarna wordt de LAI constant verondersteld. In werkelijkheid vormt de LAI altijd een soort zaagtand omdat er ongeveer eens per week 2 of 3 bladeren per plant worden weggehaald. Twee of drie bladeren betekent dat de LAI na zo'n snoei-beurt met ongeveer $0.5 \text{ m}^2/\text{m}^2$ afneemt. Als met het model wordt berekend wat de het effect is van deze laatste halve m^2 blad op de dagelijkse verdamping dan blijkt dat dit gemiddeld zo'n 150 cc per m^2 per dag aan verdamping uitmaakt. Dit is te zien in Figuur 16 waar het berekende dagelijkse verschil in verdamping wordt getoond voor een gewas met LAI 2.5 en een gewas met LAI 3.



Figuur 16 Berekende effect van een halve LAI-punt op de wateropname in een tomatenteelt

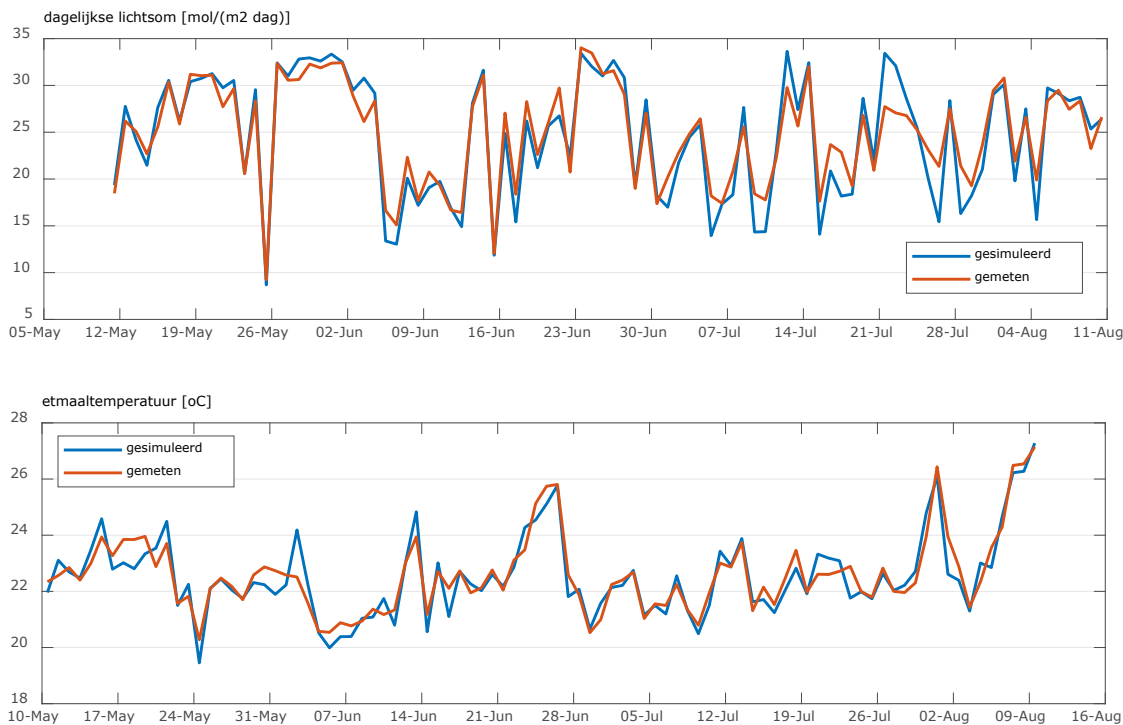
Bij de variatie die een wisselende LAI oplevert komt ook nog de variatie door de onnauwkeurigheid in de gemeten verdamping. Gift minus drain geeft een goede indicatie, maar voor iedere dag geldt dat de laatste beurt net wel of net niet worden gegeven. Als er net voor 'sluitingstijd' van de watergift nog een beurt wordt gegeven dan is de berekende watergift voor zo'n dag al gauw 200 cc meer dan wanneer er net 1 beurt minder wordt gegeven. Alleen al de variatie in LAI en het al dan niet realiseren van een gietbeurt vlak voor 'sluitingstijd' resulteert in een onzekerheid van om en nabij 300 cc.

De bovengenoemde onzekerheden in ogenschouw genomen maakt dat de verschillen tussen model en 'metingen' die in Figuur 15 getoond worden als normaal beschouwd mogen worden. 'Metingen' is hier tussen aanhalingstekens geplaatst omdat in de gemeten wateropname per dag een berekende wateropname voor gewasgroei opgenomen is en dus al deels een berekende waarde is.

2.2.2 Gesimuleerde en gemeten verdamping in komkommer

Voor de evaluatie van de gewasverdamping en kooptemperatuur in de komkommer is gebruik gemaakt van de registraties in de Winterlichtkas in de zomer van 2020. In de winterlichtkas is naast de standaard meting van gift en drain ook een weeggoot aanwezig. Voor de komkommer kan dus niet alleen naar het dagelijkse totaalplaatje worden gekeken, maar ook naar de verdamping op kwartier- schaal.

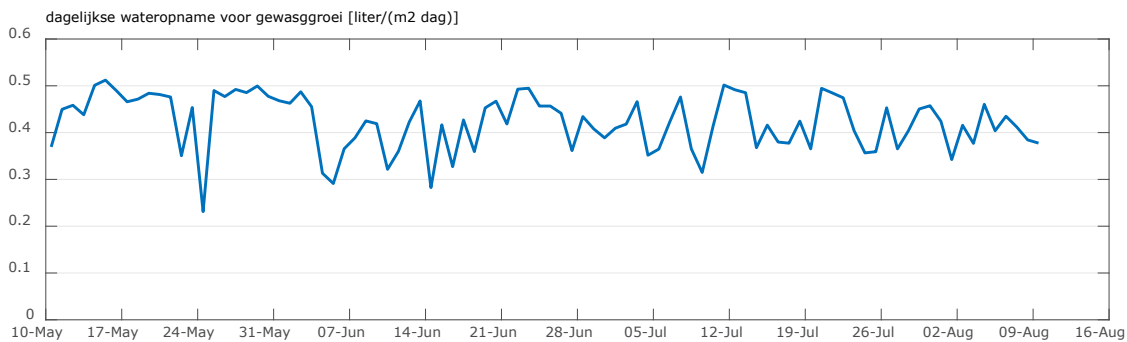
In de zomer van 2020 zijn data uit het tijdvak van 10 mei tot 10 augustus gebruikt. Onderstaande Figuur toont de dagelijkse lichtsommen en gemiddelde etmaaltemperatuur.



Figuur 17 Lichtsom en etmaaltemperatuur in de teelt die gebruikt is voor de verificatie van de gewasverdamping en de kooptemperatuur in de komkommer.

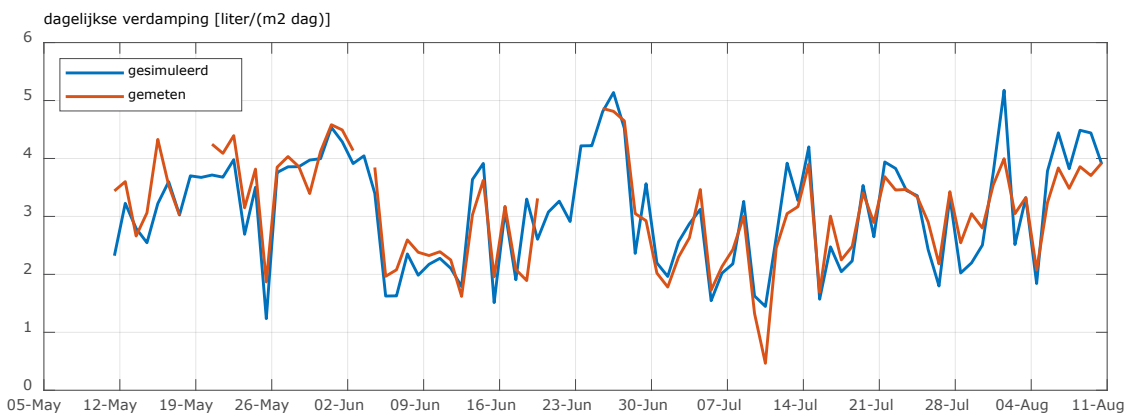
De gesimuleerde lichtsom en etmaaltemperatuur zijn verkregen met behulp van de kasklimaatregelaar van het simulatiemodel. Deze klimaatregelaar is vergelijkbaar met de klimaatregelaar van de Winterlichtkas, maar niet precies gelijk. In de feitelijke kas worden de klimaatregelaar-instellingen vaak gewijzigd, soms voor slechts een halve dag. Dit soort details worden in het simulatiemodel niet meegenomen. Het overall beeld laat echter een goede match zien tussen gesimuleerde omstandigheden in de kas en de gemeten omstandigheden.

Van het model moet worden verwacht dat wanneer de teeltomstandigheden goed gesimuleerd worden de berekende verdamping ook goed in de pas loopt met de metingen. Ook hier geldt weer dat wanneer op dagbasis naar de gift en de drain wordt gekeken, eerst het water wat door het gewas wordt vastgelegd moet worden afgetrokken van de watergift. Komkommer heeft een lager drogestof percentage dan tomaat dus daar waar in de tomatenteelt de wateropname werd berekend door de berekende drogestofproductie te delen door 0.07 wordt er in de komkommer een gemiddeld drogestofpercentage van 6% aangehouden. Dit resulteert in de onderstaande wateropname voor gewasgroei.



Figuur 18 Berekende wateropname door een volwassen komkommernewas voor groei, uitgaande van een gemiddeld drogestof percentage van 6%.

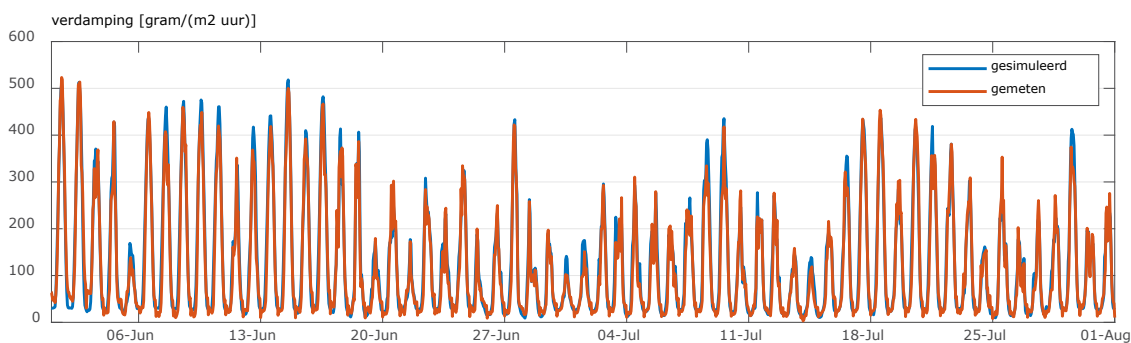
Na aftrek van de getoonde wateropname voor groei wordt de onderstaande grafiek voor de gemeten dagelijkse verdamping verkregen, die in een figuur geplaatst is samen met de gesimuleerde verdamping.



Figuur 19 Berekende gewasverdamping van een komkommernewas in de teeltcondities zoals die heersten in de Winterlichtkas in de zomer van 2020.

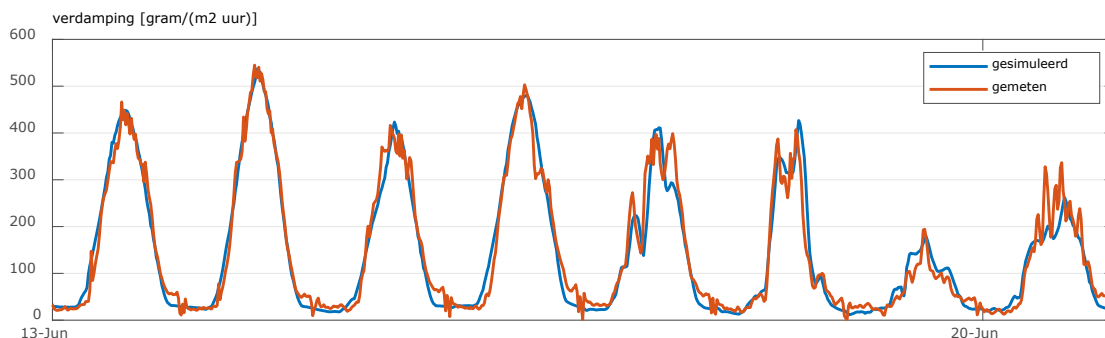
Opnieuw volgt het model gemeten gewasverdamping op dagbasis erg netjes.

Naast het gebruik van de grove bepaling van de gewasverdamping op dagbasis kan voor de Winterlichtkas ook gebruik gemaakt worden van weeggoet data. Onderstaande Figuur toont de uurlijkse verdamping dit vanuit de weeggoetdata is verkregen en de berekende waarden in juni en juli van 2021.



Figuur 20 Impressie van de verdamping door een komkommernewas per uur in de drie zomermaanden. De gemeten waarden zijn afkomstig uit een weeggoet.

De Figuur laat zien dat niet alleen de het dagelijkse verdamping goed wordt gesimuleerd, maar ook het uurlijkse verloop. Als er in deze Figuur wordt ingezoomd, bijvoorbeeld op de periode van 13 tot 21 juni wordt ook goed zichtbaar dat het model de verdamping volgt over zonnige dagen en donkere dagen.



Figuur 21 Detail-beeld van dezelfde data als getoond in Figuur 20. Het betreft de kwartierlijkse verdamping door een komkommengewas. De gemeten waarden zijn afkomstig uit een weeggoet.

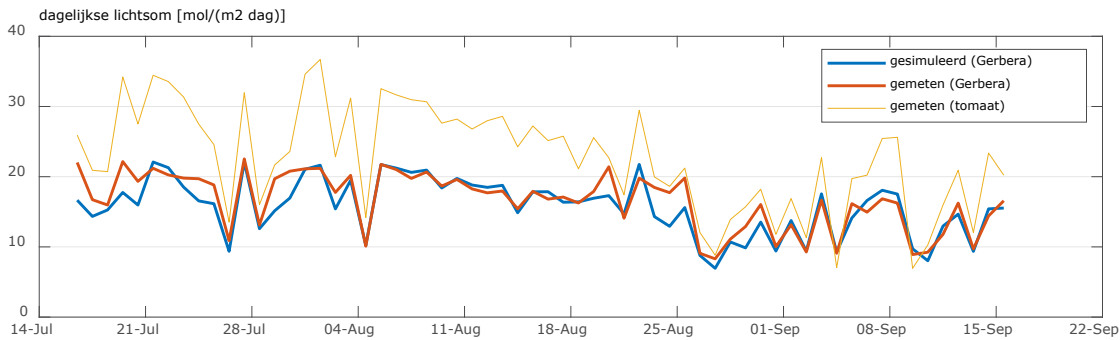
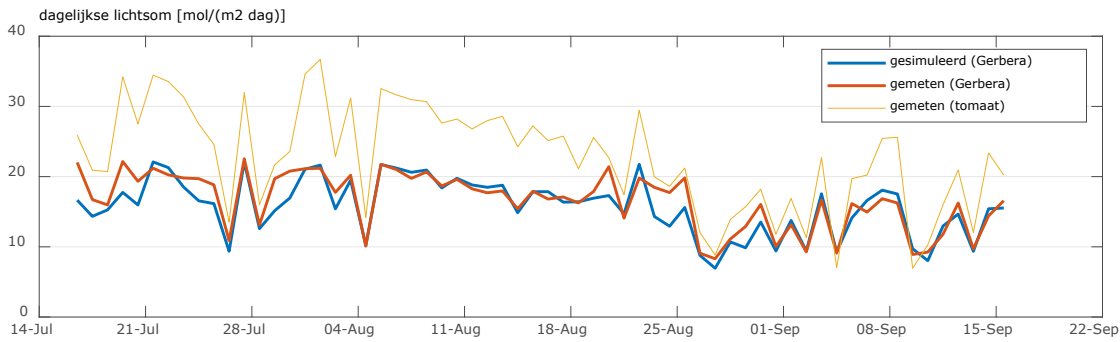
Het feit dat zowel de verdamping overdag als de verdamping 's nachts goed klopt betekent dat het gekozen model dat de huidmondjesweerstand berekent goed werkt. Dit model maakt de weerstand 's nachts hoog en overdag laag. Voor de komkommer is de maximale huidmondjesweerstand op 1600 s m^{-1} gezet. Overdag, wordt de weerstand verlaagd naar 250 s m^{-1} . De verlaging van 1600 naar 150 verloopt volgens een vloeiende lijn die bij een lichtintensiteit van $100 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ al 90% van de verlaging heeft bereikt. Deze maximale huidmondjesweerstand en de lichtintensiteit waarbij 90% van de weerstandsverlaging is bereikt is voor de komkommer gelijk aan die van de tomaat, maar de minimale huidmondjesweerstand is bij de komkommer hoger dan bij tomaat. De tomaat verdampt onder lichtrijke omstandigheden dus iets meer dan de komkommer. Opvallend in de grafiek is dat aan het eind van de dag het model een onderschatting maakt van de gewasverdamping en aan het begin van de dag een lichte overschatting. Mogelijk wordt dit veroorzaakt door wat na-ijling van het huidmondjesgedrag. In het model wordt de huidmondjesweerstand direct aangepast onder veranderende omstandigheden, maar het is goed denkbaar dat hier in werkelijkheid enige vertraging in zit.

2.2.3 Dagelijkse gesimuleerde en gemeten verdamping in Gerbera

Gerbera is een heel ander gewas dan tomaat en komkommer. Zowel qua plant als qua teelt. Er wordt beduidend minder van het gewas geoogst, het blad groeit langzamer, de daglengte wordt (in de zomer) korter gehouden en er wordt aanzienlijk geschermd. De intensieve schaduw scherming en de bekorting van de daglengte leiden tot een duidelijk lagere lichtsom.

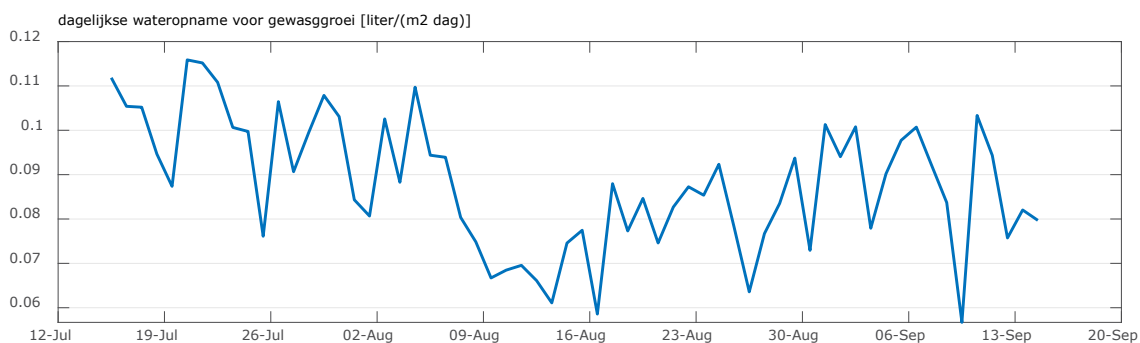
Ten behoeve van de validatie van het verdampingsmodel voor Gerbera is gebruik gemaakt van de data uit afdeling 2 van het kas2030-complex van Wageningen UR glastuinbouw in Bleiswijk.

Onderstaande grafiek toont de gemeten en gesimuleerde kasluchttemperatuur in deze Gerberakas. In de grafiek zijn, ter vergelijk ook de gelijksoortige lijnen van de eerder besproken tomatenteelt getekend.



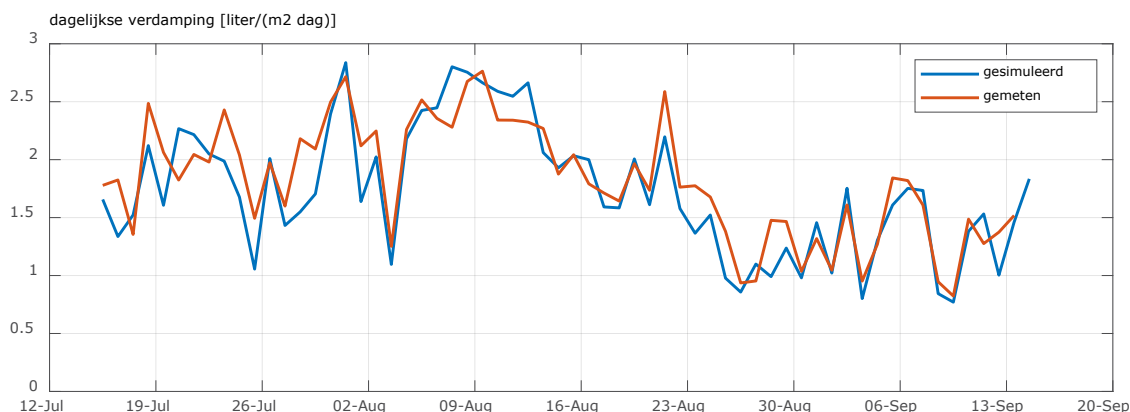
Figuur 22 Lichtsom en etmaaltemperatuur in de teelt die gebruikt is voor de verificatie van de gewasverdamping en de kooptemperatuur in de Gerbera. Ter vergelijking zijn ook de etmaaltemperatuur en lichtsom in de tomatenteelt in dezelfde periode getoond.

Op de meeste dagen is de berekende en gemeten lichtsom overeenkomstig en ook de temperaturen lopen goed in de pas. In de proefafdeling voor de Gerbera was geen weeggoot dus de dagelijkse verdamping kan alleen worden afgeleid uit de watergift minus drain minus de hoeveelheid water die in het gewas wordt vastgelegd. Ook hier is de wateropname voor gewasgroei ingeschat door de drogestof-productie die het model berekent te delen door het gemiddeld drogestof-percentage van het groeiende gewas. Een Gerberagewas heeft een beduidend hoger gemiddeld drogestofgehalte dan tomaat en komkommer. Bij aanname van 10% drogestof wordt onderstaande grafiek verkregen voor de watervastlegging per dag.



Figuur 23 Berekende wateropname voor groei, uitgaande van een gemiddeld drogestof percentage van 10%.

Na aftrek van de getoonde wateropname voor groei (wat gezien de geringe hoeveelheid nauwelijks invloed heeft) wordt de onderstaande grafiek voor de gemeten dagelijkse verdamping verkregen, die in een Figuur geplaatst is met de gesimuleerde verdamping.



Figuur 24 Berekende en gemeten gewasverdamping van Gerbera per dag. De gemeten verdamping is afgeleid uit het verschil tussen gift en drain en verminderd met de wateropname voor gewasgroei.

Net als bij de tomaat en de komkommer houdt de berekende verdamping goede tred met de gemeten verdamping. Om de berekende verdamping vergelijkbaar te krijgen zijn voor de Gerbera hogere huidmondjesweerstand gebruikt dan voor de tomaat en de komkommer.

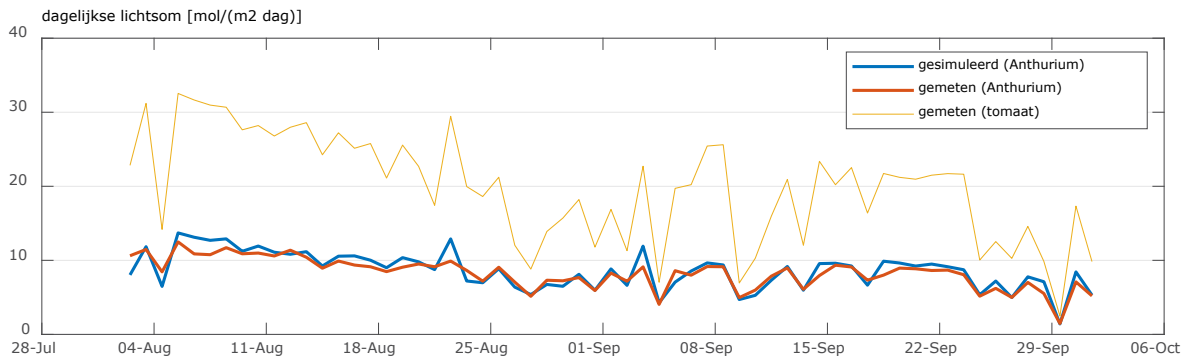
De minimale huidmondjesweerstand, dus de weerstand die het gewas in lichtrijke omstandigheden hanteert bedraagt $1500 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ en de maximale weerstand, de waarde 's nachts, bedraagt $2000 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$. Gezien het geringe verschil tussen deze twee waarden is de waarde van de parameter die de overgang van de ene naar de andere weerstand bepaalt (de lichtintensiteit waarbij 90% van het verschil tussen de dag- en nachtwaarde is gerealiseerd) nauwelijks relevant. Bovendien geeft onderzoek van Garcia et al. aan dat een goed functionerend gerberagewas door een circadiaans ritme de huidmondjesopening al vergroot vóórdat het licht wordt. Circadiaanse ritmen zijn geen onderdeel van het simulatiemodel, maar door de parameter *SWRfor90percentStomatalOpening* op $50 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ te zetten rekent het model al vroeg in de morgen met de dagwaarde voor de stomataire weerstand.

Uit het feit dat de waarden die voor de minimale en maximale huidmondjesweerstand worden voorgesteld ook hier erg ronde getallen zijn kan worden opgemaakt dat het gebruikte model als niet meer dan een goede benadering van de werkelijkheid wordt verondersteld.

Het feitelijk groeiende gewas kent tijdelijke en seizoensvariaties, perioden met dik blad en dunner blad, variaties in de kwaliteit van het wortelstelsel en mogelijk nog een hele trits aan andere factoren die invloed hebben op de verdamping. Een geautomatiseerde procedure die de drie waarden die per gewas aangepast worden zodanig optimaliseert dat gemeten en gesimuleerde verdamping nog dichter op elkaar komen te liggen zal een betere match tussen gemeten en berekende verdampingscijfers opleveren met veel minder ronde getallen. Dit suggereert in dan een zeer nauwkeurige bepaling, maar gaat voorbij gaan aan het karakter van het huidmondjesmodel, wat niet meer is dan een benadering van het proces van openen en sluiten van de stomata.

2.2.4 Dagelijkse gesimuleerde en gemeten verdamping in snij-Anthurium

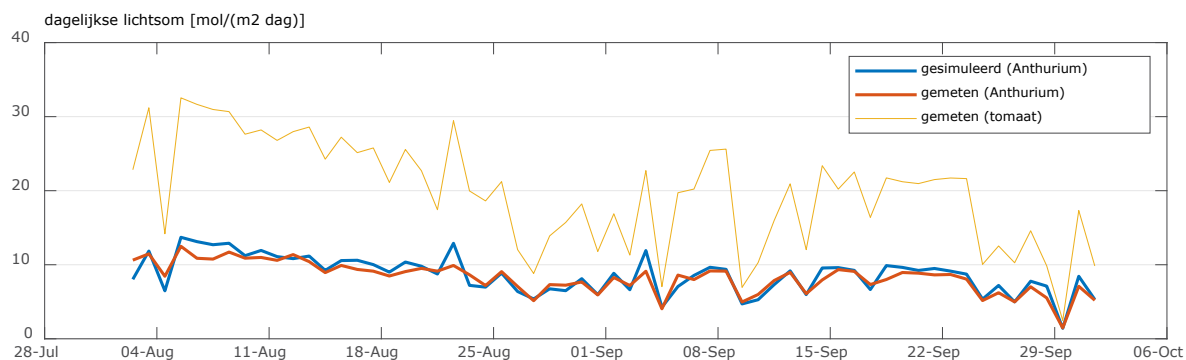
Waar Gerbera al een behoorlijk verschillend gewas is ten opzichte van de groentegewassen is snij-Anthurium nauwelijks met de andere gewassen te vergelijken. Snij-Anthurium is een zeer langzaam groeiend gewas (gemiddeld 1.5 bloem per m^2 per week), en heeft een vettig blad met weinig huidmondjes. Bovendien is van de Anthurium bekend dat die overdag bij veel licht de huidmondjes sluit. En 'veel licht' is bij de snij-Anthurium al gauw het geval. Zoals in onderstaande grafiek is te zien wordt er dan ook zwaar geschermd.



Figuur 25 Lichtsom in twee (na)zomermaanden snij de teelt van snij-Anthurium die gebruikt is voor de verificatie van de gewasverdamping en de kooptemperatuur. Ter vergelijking is ook de dagelijkse lichtsom in een tomatenteelt in dezelfde periode getoond.

Door al bij stralingsniveaus boven 250 W/m^2 globale straling te beginnen met schermen met een zwaar schaduw scherm wordt de lichtsom in de kas in de zomerperiode rond de $10 \text{ mol/m}^2 \text{ dag}$ gehouden. De maximale stralingsintensiteit in een snij-anthurium-kas komt in de regel niet boven de $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$, nauwelijks boven de $300 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ en bijna nooit boven de $400 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$.

De etmaaltemperatuur is juist beduidend hoger dan in een tomatenteelt. Dit is goed te zien in de grafiek van Figuur 26.



Figuur 26 Etmaaltemperatuur in de teelt van snij-Anthurium. Ter vergelijking is ook de etmaaltemperatuur in de tomatenteelt getoond.

Midden augustus waren de temperaturen in de tomaten- en anthuriumteelt gelijk omdat de buitenomstandigheden toen zodanig waren dat lagere temperaturen in de tomaat niet mogelijk waren. Buiten deze uitzonderlijke periode om is het in een anthurium-kas al gauw gemiddeld 2°C warmer dan in een tomatenteelt.

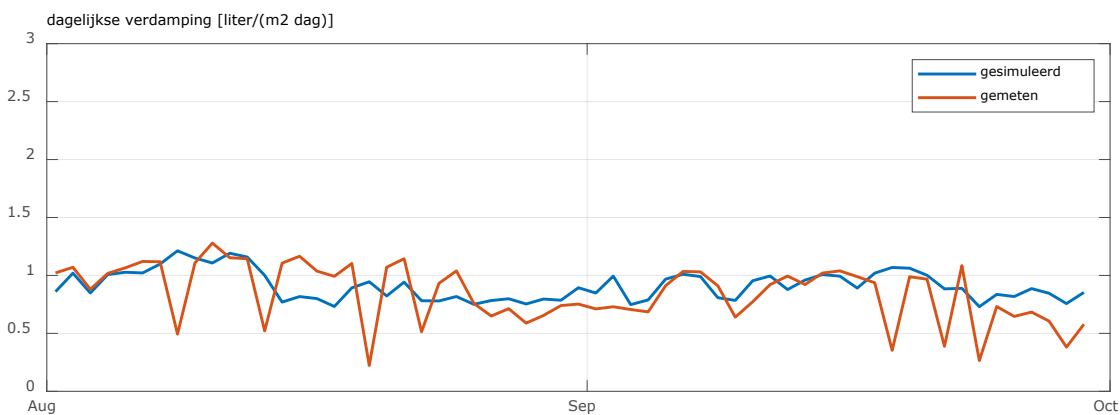
De bovenstaande twee grafieken laten zien dat berekende etmaalgemiddelde temperatuur- en lichtcondities in het simulatiemodel goed overeen komen met de gemeten waarden in de kas.

Ook de kas waarin de snij-Anthurium geteeld werd had geen weeg-systeem. Hierdoor kan er geen analyse worden gemaakt van het uurlijkse patroon in de gewasverdamping, maar alleen van de verdamping per dag. Ook hier geldt weer dat gift minus drain de wateropname van het gewas geeft, wat niet gelijk is aan de gewasverdamping. De gewasgroei is bij de snij-Anthurium echter zo klein (ongeveer 20 gram per m² per dag, nog geen 2% van de wateropname) zodat deze praktisch te verwaarlozen is. De snij-Anthurium laat echter zeer veel guttatie zien. Gewas-specialisten schatten dit op zo'n 100 gram per m² per dag. Dit is rond de 10% van de dagelijkse wateropname en daarmee een niet te verwaarlozen factor. Water dat via guttatie door de plant wordt afgegeven is geen verdamping door het gewas en onttrekt dus geen latente warmte aan het blad. Guttatie wordt ook niet door het simulatiemodel meegenomen.

Voor de vergelijking tussen de dagelijkse gemeten en berekende watergift moet de guttatie echter wel van de gemeten watergift worden afgetrokken.

Ook kent de anthuriumteelt een gestage groei van blad, wat in de zomer met een interval van 3 weken wordt teruggesnoeid. In de simulaties is er vanuit gegaan dat de LAI steeds over een periode van 4 weken van 3.5 naar 4.5 oploopt en dat die dan weer teruggesnoeid wordt naar 3.5.

Met al deze aannamen wordt onderstaande grafiek verkregen.



Figuur 27 Gemeten en berekende dagelijkse verdamping in de snij-Anthurium. De gemeten waarde komt uit gift minus drain minus 100 cc guttatie per m² per dag.

De verdamping wordt redelijk goed berekend en is erg laag in vergelijking met de 3 tot 5 liter per dag die in deze periode in bijvoorbeeld de tomatenteelt wordt gemeten (en berekend). Dit komt uiteraard voor een belangrijk deel door de veel lagere lichtsom in de kas, maar ook door de veel hogere huidmondjesweerstand die voor de Anthurium is gebruikt.

En dan vooral overdag. Anthurium is een CAM-plant wat wil zeggen dat de CO₂-opname vooral 's nachts gebeurt. In het model krijgt Anthurium dan ook juist 's nachts een lagere huidmondjesweerstand dan overdag. Om zowel de berekende dagelijkse verdamping als de bladtemperatuur (zie volgende paragraaf) in overeenstemming met metingen te krijgen is er gebruik gemaakt van een 6000 s·m⁻¹ huidmondjesweerstand overdag en 400 s·m⁻¹ 's nachts. De overgang van dag naar nacht waarde is ingesteld rond een stralingsintensiteit van 150 μmol/(m² s).

2.3 Gewastemperatuur

Wanneer de lichtabsorptie realistisch wordt berekend (§ 2.1) en de verdamping klopt met de waarnemingen (§ 2.2) is de latente warmteoverdracht bekend. In de energiebalans blijft er dan nog één term over, de voelbare warmte. Overdag, is het gewas meestal warmer dan zijn omgeving en zal het dus voelbare warmte afgeven. 's Nachts is het gewas in de regel kouder dan de omgeving (vooral in de kop van het gewas) en zal het dus voelbare warmte uit de omgeving opnemen. Zoals getoond in Figuur 4 is de voelbare warmte de som van de stralings-overdracht en convectieve warmteoverdracht. Het model berekent de verschillende soorten warmteoverdracht uit in afhankelijkheid van fysische parameters. Ter controle van dit deel van het model kan worden gekeken naar de match tussen de berekende en de gemeten gewastemperaturen. Met betrekking tot de gewas-absorptie en de verdamping is in voorgaande Hoofdstukken getoond dat deze goed in lijn met metingen liggen, en als nu ook de berekende gewastemperatuur in overeenstemming is met metingen mag gesteld worden dat het simulatiemodel in combinatie met de ingestelde parameters een goede representatie van de fysische processen in de kas geeft.

In dit Hoofdstuk wordt eerst ingegaan op de gebruikte infrarood-camera en de interpretatie van de beelden die deze camera levert. Daarna worden de resultaten in de vier gewassen besproken.

2.3.1 Gewastemperatuurmeting

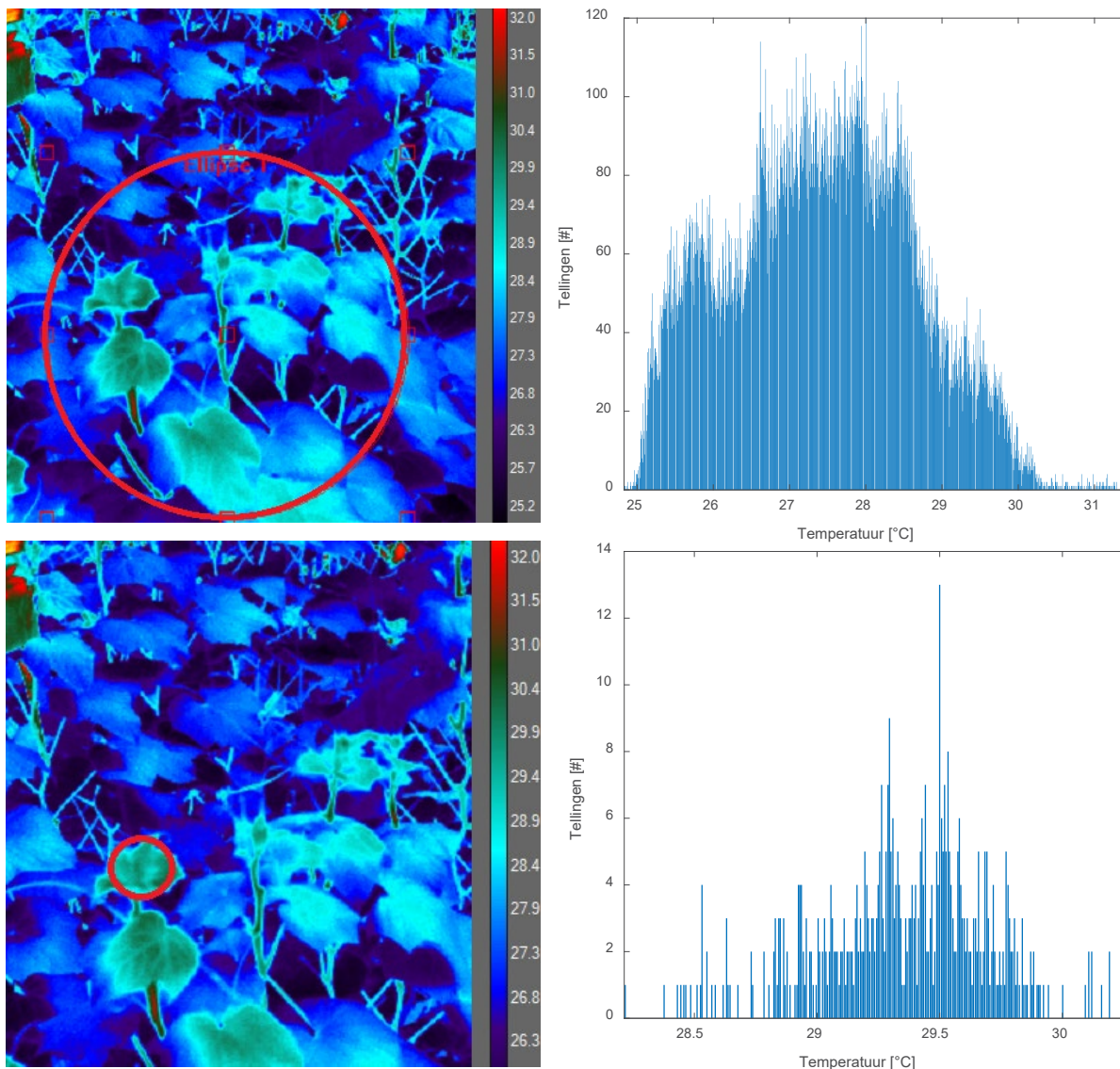
De temperatuurmetingen in de vier gewassen is gedaan met een thermische camera (Flir, type A655sc) boven het gewas. De camera nam elke 15 minuten een opname.



Figuur 28 Beeldvormende thermische camera. Links wanneer gebruikt in een kortdurende meting, rechts ingebouwd in een behuizing die de camera beschermt tegen oververhitting door de zon. In dit project is de opstelling die in de rechterafbeelding is te zien steeds gedurende een aantal zomerse dagen boven de 4 gewassen gemonteerd.

In het beeld van de camera zijn altijd verschillende bladeren te zien. In het algemeen, en vooral op zonnige dagen is dan duidelijk te zien dat er een grote spreiding aan temperaturen in het beeld waargenomen kan worden. Figuur 29 toont één van de beelden die met de IR camera is gemaakt. De camera maakt geen beelden in het zichtbare lichtspectrum. De gebruiker moet dus goed weten waar de camera naar kijkt, maar in dit geval is duidelijk een komkommernewas te onderscheiden.

Daar waar een Infrarood temperatuurmeter 1 meetwaarde geeft, vertegenwoordigt het beeld van een IR camera evenveel temperatuurmetingen als dat er pixels zijn. In het geval van de A655sc zijn dat er ruim 300.000 (namelijk 640 x 480). De gemiddelde waarde van al die pixels was in het geval van de getoonde foto 26.5°C. Dit zou dus de waarde zijn die een IR-thermometer zou afgeven indien die onder eenzelfde hoek op het gewas gericht zou zijn. Op het moment dat deze foto gemaakt werd (17 juni 2020, 15:00) was de kasluchttemperatuur volgens de meetbox 28°C.



Figuur 29 Resultaat van een infrarood-opname van een komkommernewas in de volle zon. De gemiddelde temperatuur van het gehele beeld is 26.5°C. De verdeling van temperaturen in de grote cirkel (bovenste plaatje) is getoond in het histogram rechtsboven. De temperaturen in dat beeld variëren van 25 tot 30.5°C en hebben een gemiddelde temperatuur van 27.8°C. De nog kleinere uitsnede in de onderste foto betreft een bovenste blad en de temperaturen van dit bovenste blad variëren van 29 tot 29.8°C, gemiddeld 29.5°C. De kasluchttemperatuur die ten tijde van deze foto op de meetbox werd gemeten was 28°C en de stralingsintensiteit op gewasniveau was 1020 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ en de luchtvochtigheid in de kas was 63%.

De foto van Figuur 29 laat zien dat ondanks de hoge stralingsbelasting de gemiddelde temperatuur die door een Infrarood camera wordt waargenomen onder de kaslucht temperatuur ligt die op de meetbox wordt gemeten. De Figuur laat ook zien dat die lage waargenomen temperatuur zeker ook te maken heeft met de temperatuur van de niet-gewas oppervlakken. De gemiddelde gewastemperatuur ligt ietsje onder de kasluchttemperatuur en als we specifiek naar de bovenste bladeren kijken dan zien we een temperatuur die 1.5°C boven de kasluchttemperatuur ligt.

In de volgende paragrafen wordt de door het model berekende temperatuur in de kop van het gewas voor de vier gewassen steeds vergeleken met de temperaturen die door de Infrarood camera worden waargenomen. Voor deze door de IR-camera geregistreeerde temperaturen zijn de beelden van de IR-camera per kwartier handmatig beoordeeld en is er steeds een gemiddelde temperatuur gebruikt van twee kleine cirkels die gelegd zijn over de bladeren bovenin het gewas (dus zoals in de onderste foto van Figuur 29).

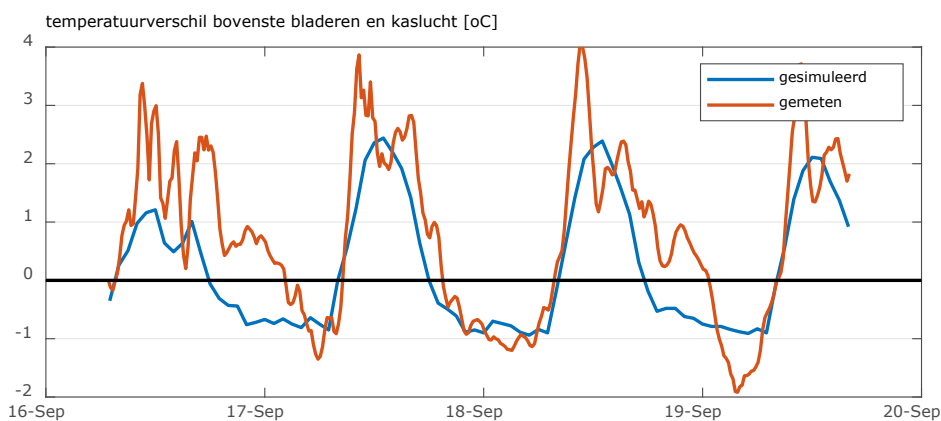
Alle waarnemingen zijn gedaan in de zomerperiode van 2020, waarbij de camera steeds een paar dagen in een kas heeft gehangen. Over de periode dat de camera in een kas stond zijn dagen met een hoge stralingsintensiteit gebruikt omdat de overschatting van de gewastemperatuur onder hoge zonbelasting de aanleiding voor dit project vormde.

2.3.2 Koptemperatuur in het tomatengewas

Voor de vergelijking van de gemeten en berekende temperatuur van de bovenste bladeren in het tomatengewas heeft de IR-camera van 16 tot 21 september in afdeling 6.08 van de proefaccommodatie in Bleiswijk gehangen. De 16^e was een minder zonnige dag (1100 J/cm²) maar de drie daarop volgende dagen was het stralend weer met maximale zonlicht-intensiteiten van 650 W/m². De dagelijkse lichtsom aan zonlicht was op die dagen 1700 J/cm².

Omdat alleen het temperatuurverschil tussen het blad en de kaslucht iets zegt over de nauwkeurigheid waarmee de energiebalans over het blad wordt berekend is voor zowel de metingen als voor de modelsimulaties de kasluchttemperatuur van de bladtemperatuur afgetrokken.

Onderstaande grafiek toont het gemeten en het gesimuleerde temperatuurverschil voor de bovenste bladeren over deze 4 dagen.



Figuur 30 Gemeten en berekend temperatuurverschil voor de bovenste bladeren in een tomatengewas.

De vergelijking laat zien dat het berekende verschil tussen blad-temperatuur en kasluchttemperatuur een patroon laat zien dat overeenkomt met de gemeten verschillen. De metingen laten grotere uitschieters zien, zowel naar boven als naar onder, maar qua trend komen de lijnen overeen. Het veel grilliger verloop in de gemeten temperatuurverschillen ten opzichte van de berekende temperatuurverschillen komt doordat een puntmeting op een willekeurig stukje kas altijd beïnvloed wordt door allerlei lokale effecten (al dan niet reflecties van zonlicht op een specifiek stukje, bladhoeken die toevallig tijdelijk meer of minder loodrecht op de zon staan, chaotisch verloopende luchtstromen onder de wijd geopende ramen (zomerse condities). Het simulatiemodel middelt zulke korte-termijn lokale effecten uit omdat het voor ieder moment van de dag rekent met de gemiddelde lichttransmissie van het kasdek, de gemiddelde oriëntatie van bladeren ten opzichte van de zon en de gemiddelde luchtuitwisseling door de ramen.

De in Figuur 30 getoonde berekende temperatuur van de bovenste bladeren wordt daarom beoordeeld op de algemene trend en om die reden als realistisch gekwalificeerd.

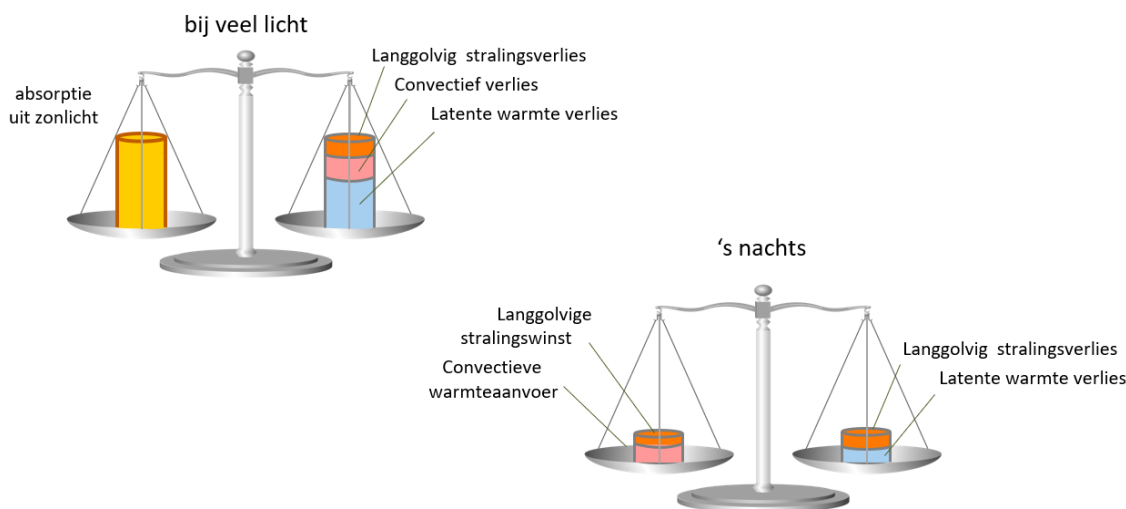
Dit betekent dat de voor een tomatengewas bepaalde set van modelparameters als toereikend worden beschouwd om in simulatieberekeningen als uitgangspunt te kunnen worden genomen. De toegepaste set van parameters is:

Tabel 2.4

Gebruikte gewasparameters in het tomatenmodel.

Modelparameter	Waarde
Extinctiecoëfficiënt voor langgolvlige straling	0.84
Emissiecoëfficiënt voor langgolvlige straling	0.85
Reflectiecoëfficiënt voor kortgolvlige licht	0.08 voor PAR-licht, 0.27 voor NIR
Extinctiecoëfficiënt voor kortgolvlige licht (diffuus)	0.85 voor PAR, 0.7 voor NIR
Extinctiecoëfficiënt voor kortgolvlige licht (direct)	0.90 voor PAR, 0.75 voor NIR
Maximale stomataire weerstand ('s nachts)	1600 s·m ⁻¹
Minimale stomataire weerstand (overdag)	100 s·m ⁻¹
Lichtintensiteit voor 90% transitie van nacht- naar dagwaarde	120 μmol/(m ² s) (aan bovenkant gemeten)
Karakteristieke afmeting van de bladeren	7 cm

Het model laat ook goed het verschil tussen de gewastemperatuur overdag en de gewastemperatuur 's nachts zien. Overdag is het gewas warmer dan de kaslucht omdat allen de latente warmte afgifte onvoldoende warmte onttrekt om alle aangevoerde energie uit de zon af te voeren. 's Nachts onttrekt de verdamping energie aan het blad die alleen kan worden aangevoerd wanneer het blad kouder is dan z'n omgeving. In onderstaande Figuur zijn de energie-balansen voor de dag- en nachtsituatie op schematische wijze getoond. De balans voor de dag-situatie is een kopie van de eerder getoonde Figuur 4.



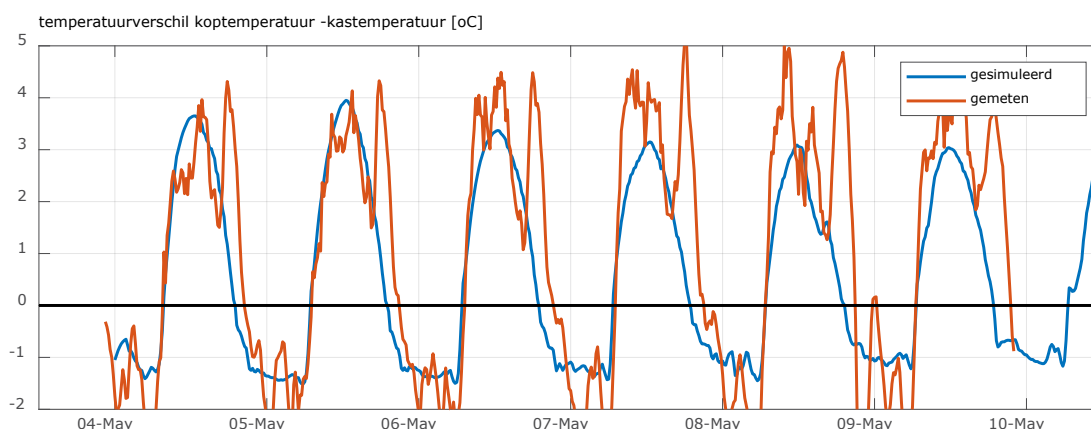
Figuur 31 Schematische weergave van de energiebalans rond de bladeren van een gewas, zowel overdag als 's nachts.

In een evenwichtssituatie, en die is bij bladeren van een gewas al gauw bereikt gezien de geringe warmtecapaciteit van bladeren, is de toevoer van energie gelijk aan de afvoer. Wat opvalt in de tekening is dat de bladeren 's nachts zowel langgolvlige stralingsenergie ontvangen als verliezen. Vooral de bovenste bladeren kunnen een relatief grote hoeveelheid stralingsenergie verliezen wanneer het kasdek koud is en er niet wordt geschermd. Stralingswinst komt er van lager gelegen bladeren die warmer zijn, of van verwarmingsbuizen. Aan het begin van de nacht zal ook het vloeroppervlak dat nog warm is uit de voorafgaande dag stralingswarmte aan het gewas kunnen afgeven.

Net als overdag bepaalt het samenspel van al die energie-uitwisselingsprocessen de evenwichtstemperatuur waarop het blad uitkomt.

2.3.3 Koptemperatuur in het komkommer

Voor de vergelijking van de gemeten en berekende temperatuur van de bovenste bladeren in het komkommernegewas heeft de in Figuur 28 getoonde IR-camera in de eerste week van mei 2020 in de Winterlichtkas van het IDC in Bleiswijk gehangen. Dit was een zeer zonnige periode met dagelijks ongeveer 2500 J/m² straling. De maximale stralingsintensiteit lag in deze periode tussen de 800 en 900 W/m². Dit is daarmee fors hoger dan de 650 W/m² waaraan het tomatengewas dat in de vorige paragraaf werd besproken werd blootgesteld. Het simulatiemodel komt dan ook met een beduidend hogere overtemperatuur van de bovenste bladeren ten opzichte van de kasluchttemperatuur. Het berekende temperatuurverschil is echter nog steeds goed in lijn met het temperatuurverschil zoals dat met de IR-camera voor de bovenste bladeren is vastgesteld. Opvallend is ook de aanzienlijk lagere temperatuur van de bovenste bladeren gedurende de nacht. Het grotere verschil (1°C of meer) komt doordat in deze periode het scherm □s nachts niet werd gesloten teneinde de etmaaltemperatuur in de hand te houden.



Figuur 32 Gemeten en berekend temperatuurverschil voor de bovenste bladeren in een komkommernegewas.

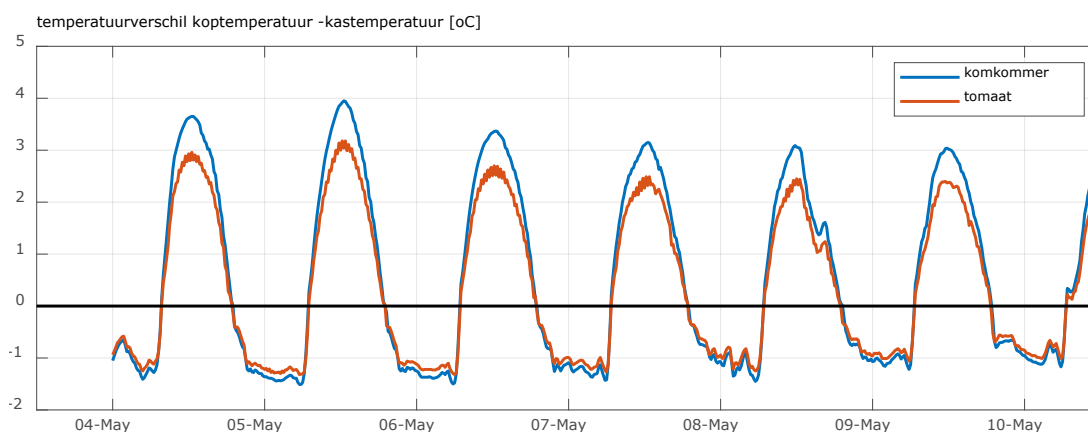
Ook hier zien we weer een veel grotere fluctuatie van de gemeten overtemperatuur dan in de berekende overtemperatuur. Uiteraard spelen de toevallige lokale verschillen ook hier weer een rol. De parameters voor de energiebalans rond het blad die het simulatiemodel heeft gebruikt bij de berekening van het bovengetoonde resultaat zijn vastgelegd in Tabel 2.5

Tabel 2.5

Gebruikte gewasparameters in het komkommernegewasmodel.

Modelparameter	Waarde
Extinctiecoëfficiënt voor langgolvlige straling	0.84
Emissiecoëfficiënt voor langgolvlige straling	0.8
Reflectiecoëfficiënt voor kortgolvlig licht	0.05 voor PAR-licht, 0.35 voor NIR
Extinctiecoëfficiënt voor kortgolvlig licht (diffuus)	0.80 voor PAR, 0.6 voor NIR
Extinctiecoëfficiënt voor kortgolvlig licht (direct)	0.90 voor PAR, 0.65 voor NIR
Maximale stomataire weerstand ('s nachts)	1600 s·m ⁻¹
Minimale stomataire weerstand (overdag)	250 s·m ⁻¹
Lichtintensiteit voor 90% transitie van nacht- naar dagwaarde	100 μmol/(m ² s) (aan bovenkant gemeten)
Karakteristieke afmeting van de bladeren	20 cm

Als deze Tabel wordt vergeleken met die van de tomaat dan valt de lagere reflectie en de sterkere extinctie van kortgolvig licht als eerste op. Deze parameters zorgen voor de hogere absorptie van zonlicht die in paragraaf 2.1 is besproken. De stomataire weerstand die 's nachts aangehouden wordt is gelijk aan die van de tomaat, maar overdag wordt een wat grotere stomataire weerstand aangehouden. Dit was nodig om de berekende verdamping in lijn te krijgen met de gemeten verdamping (paragraaf 2.1.2). Bij de karakteristieke afmeting van de bladeren is te zien dat deze bij komkommer veel groter is dan bij tomaat (in overeenstemming met de feitelijke situatie van het gewas) en groter blad leidt in het model tot een wat verminderde convectieve uitwisseling, en dus ook een wat groter verschil tussen blad-temperatuur en kasluchttemperatuur. Overigens houdt het model er wel rekening mee dat de bladeren in de bovenste bladlaag gemiddeld half zo groot zijn als de volgroeide bladeren, maar niettemin blijft het dat een komkommerblad een wat lagere convectieve warmte- en vocht uitwisseling kent dan het veel fijnmazigere tomatengewas. Het effect hiervan is goed zichtbaar wanneer met het simulatiemodel wordt berekend wat de temperatuur van de bovenste bladeren zou zijn geweest als in mei 2020 niet een komkommergewas, maar een volgroeid tomatengewas in de Winterlichtkas zou hebben gestaan.

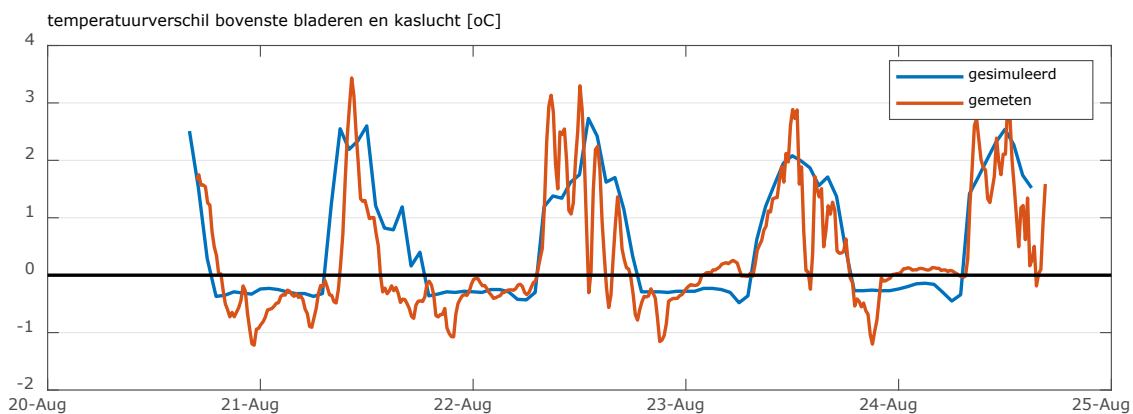


Figuur 33 Berekende overtemperatuur van de bovenste bladeren in het komkommergewas (gelijk aan getoonde lijn in Figuur 32) en de bovenste bladeren van een tomatengewas indien dat gewas in deze eerste week van mei 2020 in de Winterlichtkas zou hebben gestaan.

Voor deze berekening zijn alle instellingen, inclusief de LAI (3) waarvoor de berekeningen gemaakt zijn gelijk gehouden. Het is dus alleen de andere blad-afmeting die zorgt voor wat minder afkoeling van het blad in de nacht. Overdag worden de verschillen veroorzaakt door de combinatie van de andere lichtabsorptie, blad-afmeting en andere huidmondjesweerstand.

2.3.4 Koptemperatuur in het Gerberagewas

Behalve voor metingen in de twee groentegewassen is de IR-camera ook gebruikt voor de registratie van de temperatuur van de bovenste bladeren in de Gerbera-teelt, zoals te zien in de eerdere Figuur 28. Ook hier geldt weer dat voor de beoordeling van de kwaliteit van de berekening van de energiebalans rond de bladeren het best gekeken kan worden naar het verschil tussen bladtemperatuur en kasluchttemperatuur. De andere componenten die een rol spelen (lichtabsorptie en verdamping) zijn al gecontroleerd in de andere onderdelen van deze studie zodat alleen nog de temperatuur waarop de energiebalans z'n evenwichtspunt vindt ten opzichte van de omgeving de ontbrekende verificatie vormt. Voor de Gerbera zijn de resultaten van deze verificatie hieronder getoond.



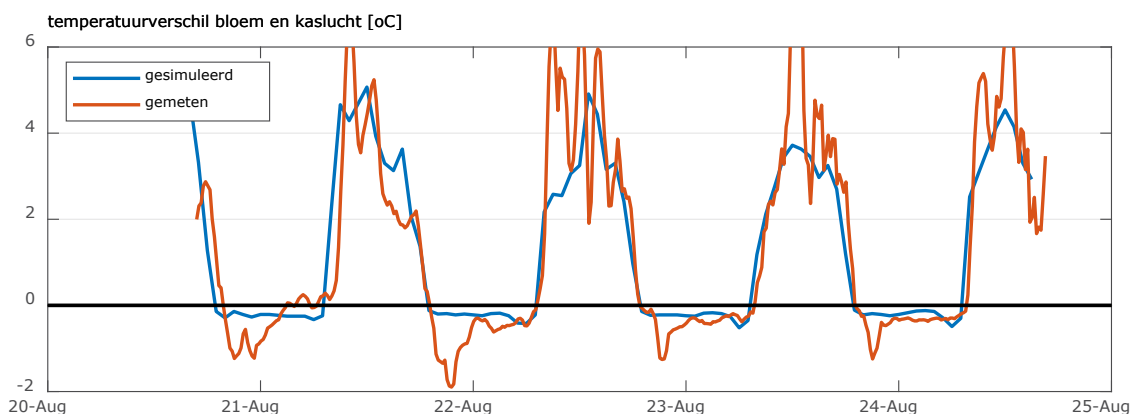
Figuur 34 Berekende en gemeten overtemperatuur van de bovenste bladeren in een Gerberagewas.

In het getoonde tijdvak was 21 augustus een zonnige dag, met een maximale stralingsintensiteit van 800 W/m². Vanwege die stralingsintensiteit liep het schaduw scherm halverwege de dag dicht, wat terug te zien is in de plotselinge daling van de temperatuur van de bovenste bladeren op die dag. De overtemperatuur zakt van 2.5°C plotseling terug naar 1°C boven de kasluchttemperatuur. De metingen laten een ook een daling zien, maar een veel sterkere daling dan wat door het model wordt berekend. Zelfs tot onder de kasluchttemperatuur (een negatieve overtemperatuur), wat als zodanig afwijkend wordt beoordeeld ten opzichte van alle andere meetresultaten die in dit project verkregen zijn dat er niet teveel waarde aan wordt gehecht.

De andere drie dagen waren dagen met wisselende bewolking en een maximale stralingsintensiteit van om en nabij 400 W/m². Op die dagen stemmen de waargenomen overtemperatuur en de berekende overtemperatuur op een acceptabel niveau overeen.

's Nachts liggen zowel de gemeten als de berekende overtemperatuur van de bovenste bladeren in het Gerberagewas dicht bij 0, wat wordt veroorzaakt door het intensieve schermgebruik in deze energiezuinige Gerberateelt (teelt in afdeling 2 van de fossielvrije kas2030 van de proeffaciliteit in Bleiswijk).

Qua gewas-structuur is een gerberagewas behoorlijk verschillend ten opzichte van de hoge draad groenteteelt gewassen omdat de bloemen heel duidelijk boven het gewas uitsteken en ook slechts een geringe verdamping vertonen. Met een beeldvormende IR-camera kan vrij gemakkelijk de bloemtemperatuur apart worden geregistreerd. Het simulatiemodel kan ook expliciet de bloemtemperatuur berekenen door de bloemen als losse, slecht verdampende oppervlakken boven de bovenste gewaslaag te veronderstellen. Uit onderstaande grafiek blijkt dat het model met deze aannamen de bloemtemperatuur op realistische wijze berekent.



Figuur 35 Berekende en gemeten overtemperatuur van de bloemen van een Gerberagewas.

Het is duidelijk dat de bloemen overdag warmer worden dan de bovenste bladeren en 's nachts minder koud. Die geringere ondertemperatuur in de nacht komt doordat de bloemen nauwelijks verdampen en dus nauwelijks latente warmte aan het bloem-oppervlak onttrekken. Bij de bloemen is het met name de uitstraling die voor de ondertemperatuur zorgt. Die uitstraling is bij een teeltstrategie die intensief gebruik maakt van schermen erg klein, wat goed terug te zien is in de metingen en simulatieresultaten.

De parameters voor de energiebalans rond het blad die het simulatiemodel heeft gebruikt bij de berekeningen aan de Gerbera zijn vastgelegd in Tabel 2.6

Tabel 2.6

Gebruikte gewasparameters in het gerberagewasmodel.

Modelparameter	Waarde
Extinctiecoëfficiënt voor langgolvlige straling	0.84
Emissiecoëfficiënt voor langgolvlige straling	0.85
Reflectiecoëfficiënt voor kortgolvlige licht	0.07 voor PAR-licht, 0.25 voor NIR
Extinctiecoëfficiënt voor kortgolvlige licht (diffuus)	0.80 voor PAR, 0.55 voor NIR
Extinctiecoëfficiënt voor kortgolvlige licht (direct)	0.85 voor PAR, 0.70 voor NIR
Maximale stomataire weerstand ('s nachts)	2000 s·m ⁻¹
Minimale stomataire weerstand (overdag)	1500 s·m ⁻¹
Lichtintensiteit voor 90% transitie van nacht- naar dagwaarde	300 μmol/(m ² s) (aan bovenkant gemeten)
Karakteristieke afmeting van de bladeren	10 cm

Bij vergelijking van Tabel 2.6 met de eerdere soortgelijke Tabellen valt op dat de stomataire weerstand voor de Gerbera veel hoger is ingesteld dan de waarden die voor de groetengewassen worden gebruikt. Ook lieten de metingen aan verdamping en overtemperatuur zien dat de overgang van de nacht- naar de dagwaarde voor de Gerbera pas bij een hogere stralingsintensiteit lijkt op te treden. Uiteraard is in eerste instantie bij het zoeken naar geschikte parameters voor het verdampingsproces gestreefd naar het gebruik van parameters in dezelfde orde van grootte als bij de groentegewassen. In dat geval kwam de berekende gewasverdamping echter te hoog uit en kwam de overtemperatuur van het gewas stevast te laag uit.

Met de bovengetoonde parameterisatie kwam het model wél op het waargenomen temperatuur- en verdampingsgedrag waardoor voor deze waarden is gekozen.

Voor de bloemen wordt verondersteld dat die samen 1.5% van het totale lichtonderscheppende oppervlak van het gewas voor hun rekening nemen en dat de verdamping door de bloemen via een dubbel zo grote weerstand verloopt als de verdamping van uit de bladeren.

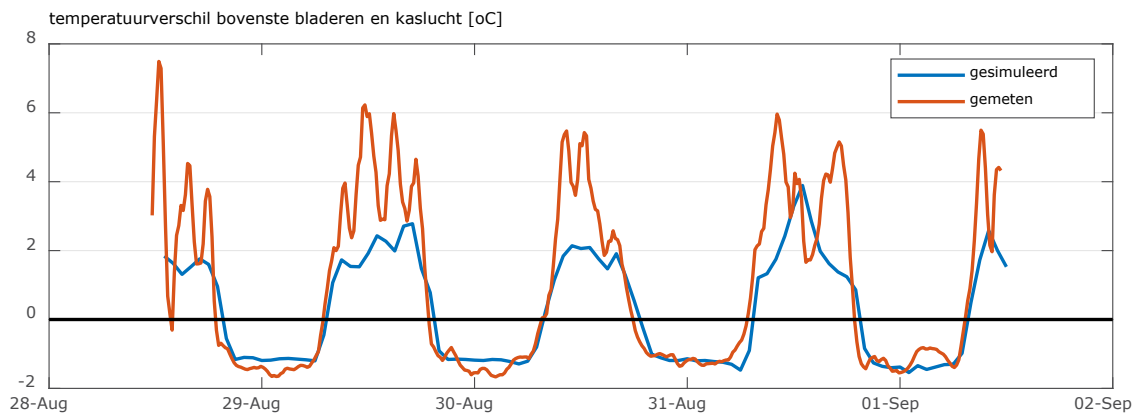
Ook wordt voor de Gerbera verondersteld dat de dieper gelegen bladeren verouderingsverschijnselen te zien geven, waardoor de middelste 1/3 deel van het totale bladpakket een met 15% gereduceerde verdamping heeft en de onderste 1/3 van het totale bladpakket een 30% gereduceerde verdampingscapaciteit heeft.

Deze reducties van de verdampingscapaciteit van dieper gelegen bladeren waren nodig omdat anders de berekende gewasverdamping stelselmatig hoger dan de waargenomen verdamping.

2.3.5 Koptemperatuur in de snij-Anthurium

Als laatste gewas is ook nog naar de temperatuur van de bovenste bladeren en naar de bloem-temperatuur in de snij-anthurium gekeken. Anthurium is een sterk afwijkend ten opzichte van de andere gewassen die in dit project bestudeerd zijn. Het gewas heeft een vettig blad, waardoor het moeilijk verdampt en het wordt in zeer lichtarme omstandigheden geteeld.

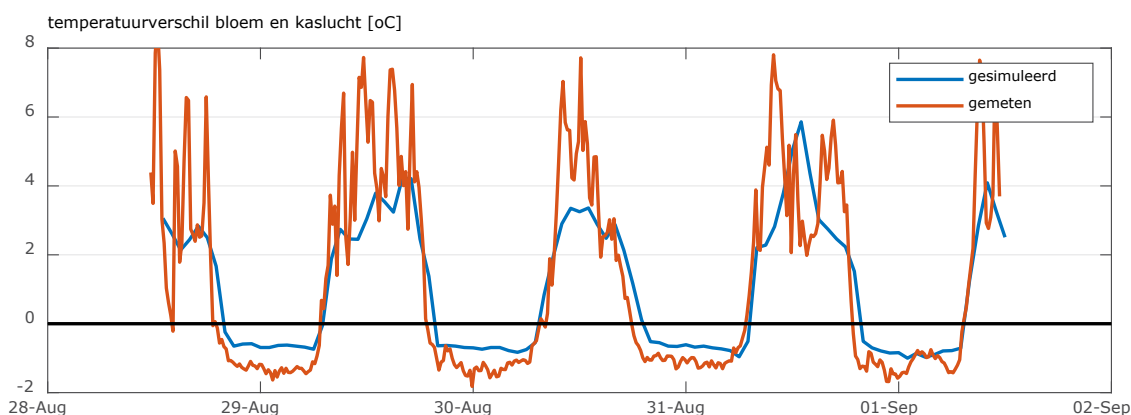
Eerder was al getoond dat het model voor het anthuriumgewas de waargenomen reflectie en absorptie van straling en de dagelijkse gewasverdamping met een redelijke nauwkeurigheid berekent. In de onderstaande grafiek wordt de berekende en gemeten overtemperatuur van de bovenste bladeren getoond.



Figuur 36 Berekende en gemeten overtemperatuur van de bovenste bladeren in de snij-Anthurium.

In vergelijking met de andere gewassen wordt de temperatuur in de kop van het gewas in de anthuriumteelt het minst nauwkeurig berekend. Het model berekent een overtemperatuur die grosso modo vergelijkbaar is met die in de Gerberateelt en de tomatenteelt terwijl de gemeten gewastemperaturen overdag meestal hoger liggen. Uiteraard is getracht de gesimuleerde temperaturen nog hoger te krijgen door de verdamping van het gewas te verminderen. In dat geval liep de totale verdamping van het gewas echter zodanig terug dat de overeenstemming tussen gemeten en berekende dagelijkse verdamping sterk verminderde. De ondertemperatuur van de bladeren in de nacht wordt wel goed door het model beschreven.

Ook het anthuriumgewas heeft een gewasopbouw met bloemen die een stuk boven het gewas uitsteken en waarvan het model een berekende temperatuur kan leveren. Dit is getoond in Figuur 36. Het is duidelijk dat de bloemen overdag warmer worden dan de bovenste bladeren en 's nachts iets minder koud. De hogere temperaturen overdag en de minder lage 's nachts worden veroorzaakt door de veel kleinere verdamping door de tot bloem getransformeerde bladeren van de Anthurium dan de reguliere bladeren het gewas. Die grotere temperatuurverschillen tussen dag en nacht worden zowel in de metingen als door het model getoond, hoewel de metingen 's nachts vaker nóg wat lagere temperaturen laten zien. De meest in het oog springende effecten worden echter realistisch door het model getoond.



Figuur 37 Berekende en gemeten overtemperatuur van de bloemen in de snij-Anthurium.

De parameters voor de energiebalans rond het blad die het simulatiemodel heeft gebruikt bij de berekeningen aan de Snij-anthurium zijn vastgelegd in Tabel 2.7

Tabel 2.7

Gebruikte gewasparameters in het anthuriumgewasmodel.

Modelparameter	Waarde
Extinctiecoëfficiënt voor langgolvlige straling	0.84
Emissiecoëfficiënt voor langgolvlige straling	0.5
Reflectiecoëfficiënt voor kortgolvlige licht	0.18 voor PAR-licht, 0.65 voor NIR
Extinctiecoëfficiënt voor kortgolvlige licht (diffuus)	0.80 voor PAR, 0.78 voor NIR
Extinctiecoëfficiënt voor kortgolvlige licht (direct)	0.80 voor PAR, 0.78 voor NIR
Maximale stomataire weerstand (overdag)	6000 s·m ⁻¹
Minimale stomataire weerstand ('s nachts)	400 s·m ⁻¹
Lichtintensiteit voor 90% transitie van nacht- naar dagwaarde	150 μmol/(m ² s) (aan bovenkant gemeten)
Karakteristieke afmeting van de bladeren	30 cm

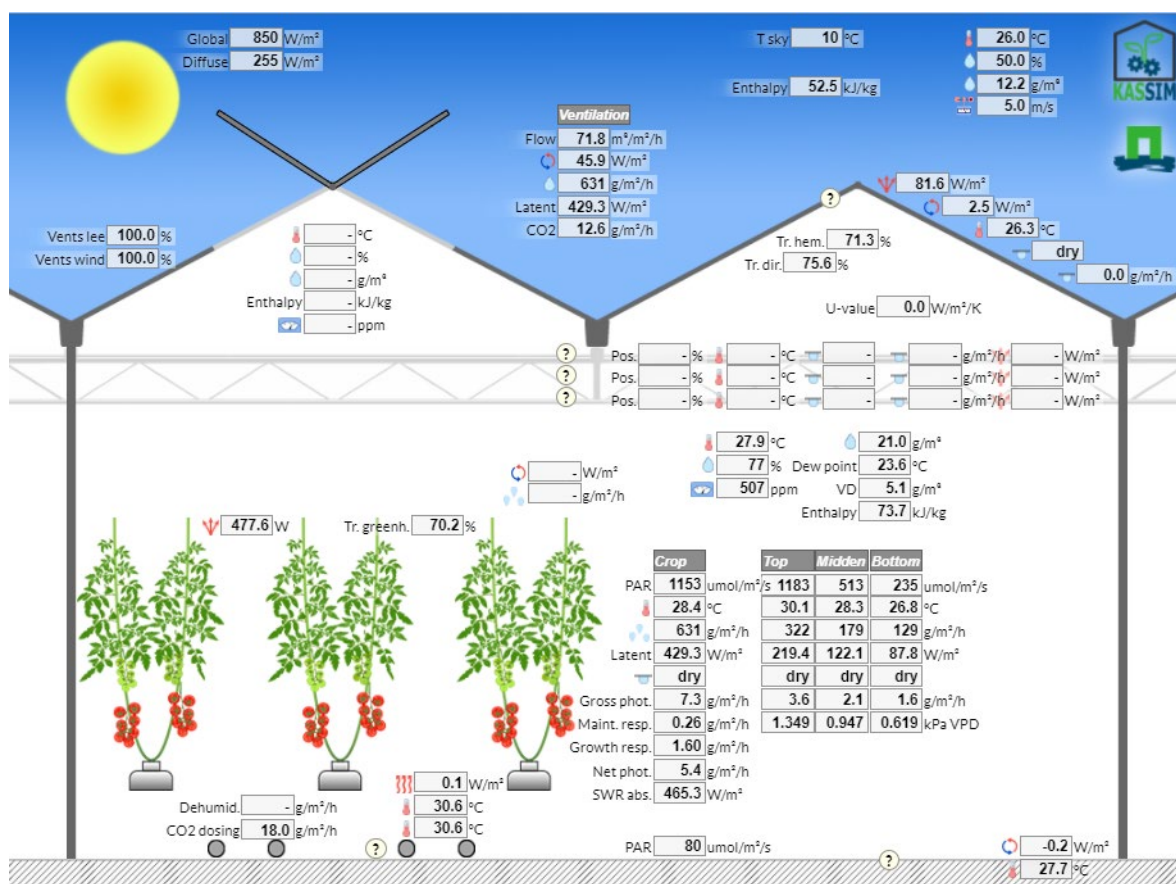
Bij vergelijking van Tabel 2.7 met de eerdere gewasparameter Tabellen valt op stomataire weerstand hoog is en vooral dat de hoge waarde juist overdag wordt gebruikt. Hiermee wordt het feit dat de Anthurium een CAM-plant is geparameteriseerd. Anders dan de meeste gewassen heeft de anthurium de huidmondjes overdag voornamelijk gesloten en 's nachts open.

Voor de rest valt de hoge reflectiecoëfficiënt voor zichtbaar licht en vooral de zeer hoge reflectiecoëfficiënt voor NIR licht op. Deze hoge waarde voor NIR-licht is gekozen om de gemeten en gesimuleerde waarde van de opgaande kortgolvlige straling vergelijkbaar te krijgen (zie § 2.1). De pyranometer maakt geen onderscheid tussen PAR en NIR, maar de hoge waargenomen reflectie van kortgolvlige licht kan haast niet anders dan in de NIR-gebied zitten aangezien het onwaarschijnlijk is dat de donkere en dikke bladeren van een snij-anthurium gewas veel meer dan de 18% van het zichtbaar licht reflecteren.

Ook voor de snij-anthurium is verondersteld dat de boven het gewas uitstekende bloemen samen 1.5% van het totale lichtonderscheppende oppervlak van het gewas voor hun rekening nemen. Voor de verdamping is verondersteld dat de bloemen slechts 10% van de verdampingscapaciteit van die van gewone bladeren hebben.

3 Gebruik van het model in Kassim

Het programma Kassim is een schil rond het simulatiemodel wat in het vorige Hoofdstuk gebruikt is de metingen via een rekenmodel te simuleren. In een echte kas is er praktisch altijd sprake van dynamiek. De kas is aan het opwarmen of aan het afkoelen. De luchtvochtigheid is aan het oplopen of juist aan het afnemen. Dit wordt in hoge mate bepaald door de buitenomstandigheden die elke keer weer nieuwe combinaties van straling, temperatuur, luchtvochtigheid en windsnelheid oplevert. In combinatie met een gewas wat elke dag een beetje anders is is het heel lastig om de invloed van één of twee factoren op het kasklimaat te bepalen. Er spelen altijd allerlei interacties een rol. Om de invloed van al die factoren te kunnen bestuderen zonder last te hebben van interacties die het zicht op de effecten vertroebelen is het programma Kassim gemaakt. Kassim berekent de evenwichtssituatie waarin een kas zou komen indien de gekozen buitenomstandigheden lange tijd constant zouden blijven. Het geeft daarmee een duidelijk zicht op de energie- en massabalans rond het gewas. Omdat de gewasparameters die in het voorliggend project voor komkommer, tomaat, gerbera en snij-anthurium zijn opgesteld inmiddels in de bibliotheek met gewaseigenschappen van het Kassim-model zijn opgenomen kan er op een zeer inzichtelijke wijze worden gekeken naar hoe de energie- en massabalans voor deze gewassen uitpakt. Ter illustratie wordt eerst een hoog-zomer situatie voor een tomatenkas getoond.



Figuur 38 Resultaat van een Kassim berekening voor een hoog-zomer situatie in tomaat.

Qua zonstraling is voor de berekening van de energiebalans in Figuur 38 bijna de maximale intensiteit die in Nederland gemeten kan worden ingesteld. Op zo'n stralende dag is het aandeel diffuus licht in het zonlicht beperkt. Het grootste deel is direct licht en door de gunstige hoek waarmee het directe licht op het kasdek valt is de transmissie hoog. De gecombineerde transmissie van diffuus en direct licht zorgt voor een PAR-intensiteit van 1153 μmol/(m² s) op gewashoogte. De bovenste bladeren worden aan zelfs nog iets meer licht blootgesteld (1183 μmols/(m² s)), aangezien er ook nog licht-reflecties van onderuit het gewas naar boven komen.

De Energiebalans voor de totale kas brengt de kasluchttemperatuur op 27.9°C, dus nog geen 2°C boven de buitentemperatuur. Deze geringe temperatuurverhoging komt doordat het grootste deel van de energie-afvoer via de verdamping van het gewas plaatsvindt. Het goed verdampende gewas (berekend op 631 gram/(m² uur)) onttrekt 429 W/m² aan latente warmte aan de kaslucht en deze 429 W/m² verlaat de kas via ventilatie met de wijd geopende ramen. In de praktijk zal het tomatengewas deze verdampingsnelheid niet voor lange tijd achtereen kunnen aanhouden omdat dit rond de grens van de aanvoercapaciteit van het wortelstelsel zit. Onder Nederlandse omstandigheden zal het gewas dit ook niet hoeven te doen omdat zulke hoge stralingsintensiteiten alleen midden op de dag voorkomen en de stralingsintensiteit al gauw weer zal afnemen.

De gemiddelde gewas temperatuur ligt een halve graad boven de kasluchttemperatuur, maar uiteraard licht de bovenste gewaslaag daar een stuk boven. Die wordt voor deze hoog-zomerse omstandigheden op 3.2°C hoger dan de kasluchttemperatuur berekend. Dit soort overtemperaturen zijn uitzonderlijk (er zijn maar 50 uur met zoveel zon), maar ligt ruim in de range van overtemperaturen die op zonnige dagen in de tomaat gemeten is (zie Figuur 30).

De onderste gewaslaag is iets kouder dan de kaslucht, wat veroorzaakt wordt door de vrij lage luchtvochtigheid in de kas. Zo'n lage luchtvochtigheid maakt dat de VPD ook onderin het gewas nog fors is.

Er wordt op zo'n warme dag niet gestookt, maar het buis-oppervlak warmt wel wat op ten opzichte van de kasluchttemperatuur doordat het zonlicht absorbeert.

Het vloeroppervlak absorbeert ook zonlicht, maar blijft qua temperatuur net onder de kasluchttemperatuur omdat de dieper gelegen bodemtemperatuur de vloertemperatuur laat na-ijlen. Voor simulaties bij weinig licht houdt Kassim een iets hogere vloertemperatuur aan. Anders dan alle andere temperaturen in de kas die vanuit een energiebalans worden berekend wordt de vloertemperatuur dus actief op een waarde dicht bij de kasluchttemperatuur gehouden.

Behalve de temperatuur en vocht-balans toont Kassim ook de CO₂-balans. De CO₂-concentratie is een evenwichtssituatie waarbij het verlies door de ramen gelijk is aan de gift minus de opname door het gewas. In Figuur 38 is te zien dat bij een concentratie van 507 ppm en de berekende luchtuitwisseling (71.8 m³/(m² uur)) het verlies 12.6 gram per m² per uur bedraagt. Dit is het verschil tussen de gift (18 g/(m² uur) = 180 kg/(ha uur)) en de gewasopname (5.4 g/(m² uur)).

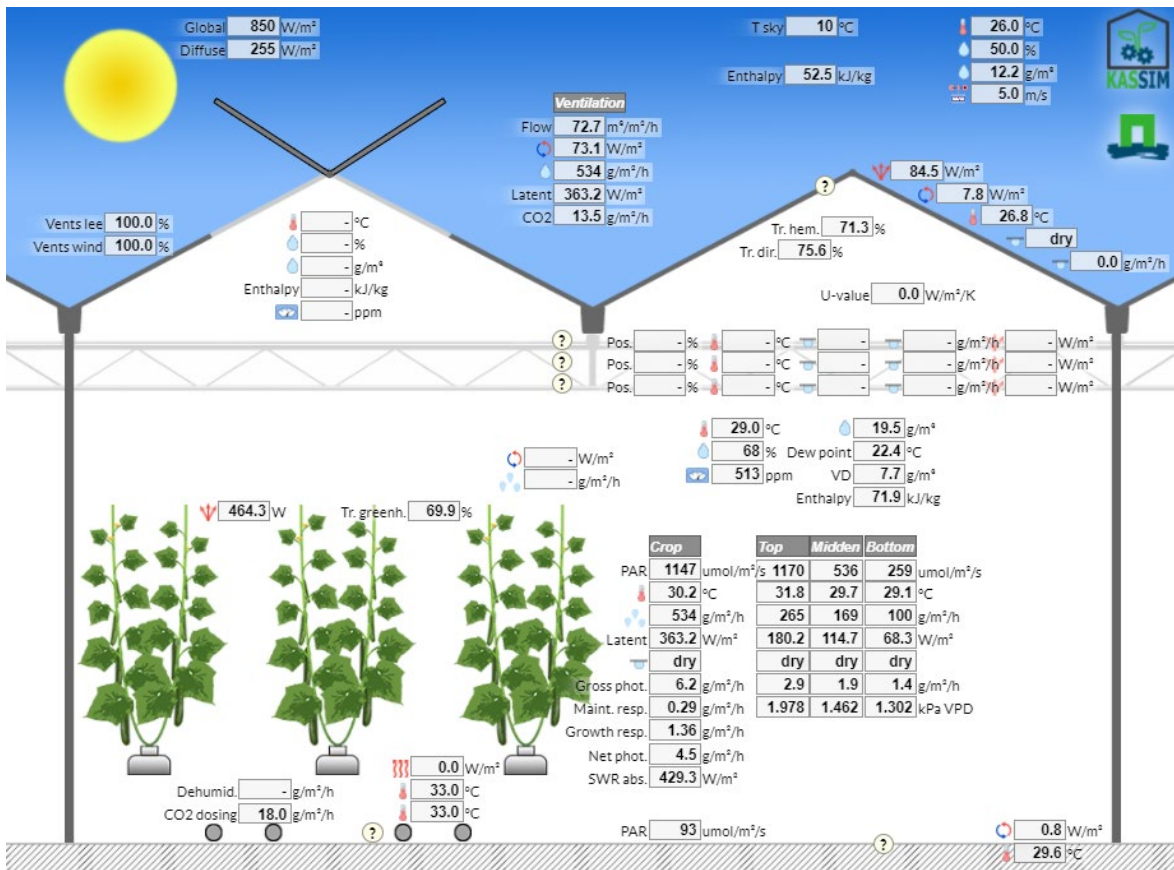
Kassim toont ook de netto stralingsbalans van het gewas en die bedraagt 477.6 W/m² op gewashoogte. Een positief getal, dus er is een grote stralingsbelasting op het gewas.

Wanneer het gewas wordt veranderd van Tomaat naar Komkommer zien we dat de berekende evenwichts-kasluchttemperatuur hoger uitkomt (Figuur 39). Dit komt vooral omdat de komkommer een kleinere verdampingscapaciteit heeft dan tomaat. Ook wordt er wat meer warmte door de vloer afgegeven omdat de absorptie van zonlicht door de vloer wat hoger is vanwege de kleinere lichtonderschepping in een komkommerngewas (uitgaande van een gelijke LAI).

De lagere verdampingscapaciteit van het komkommerngewas (het gewas verdampt 534 gr/(m² uur)) leidt tot warmere bladeren (31.8°C in plaats van 30.1°C bij de tomaat), maar de overtemperatuur is met 2.8°C iets minder dan bij de tomaat. Dit komt enerzijds doordat de absorptie van straling in een komkommerngewas iets kleiner is, (429 W/m² in het komkommerngewas in plaats van 465 W/m² in het tomatengewas), maar ook doordat de luchtvochtigheid in de kas wat lager is en dus het dampdruksverschil vooral in de kop van het gewas beduidend groter is (1.978 kPa in de komkommer en 1.349 kPa in de tomaat).

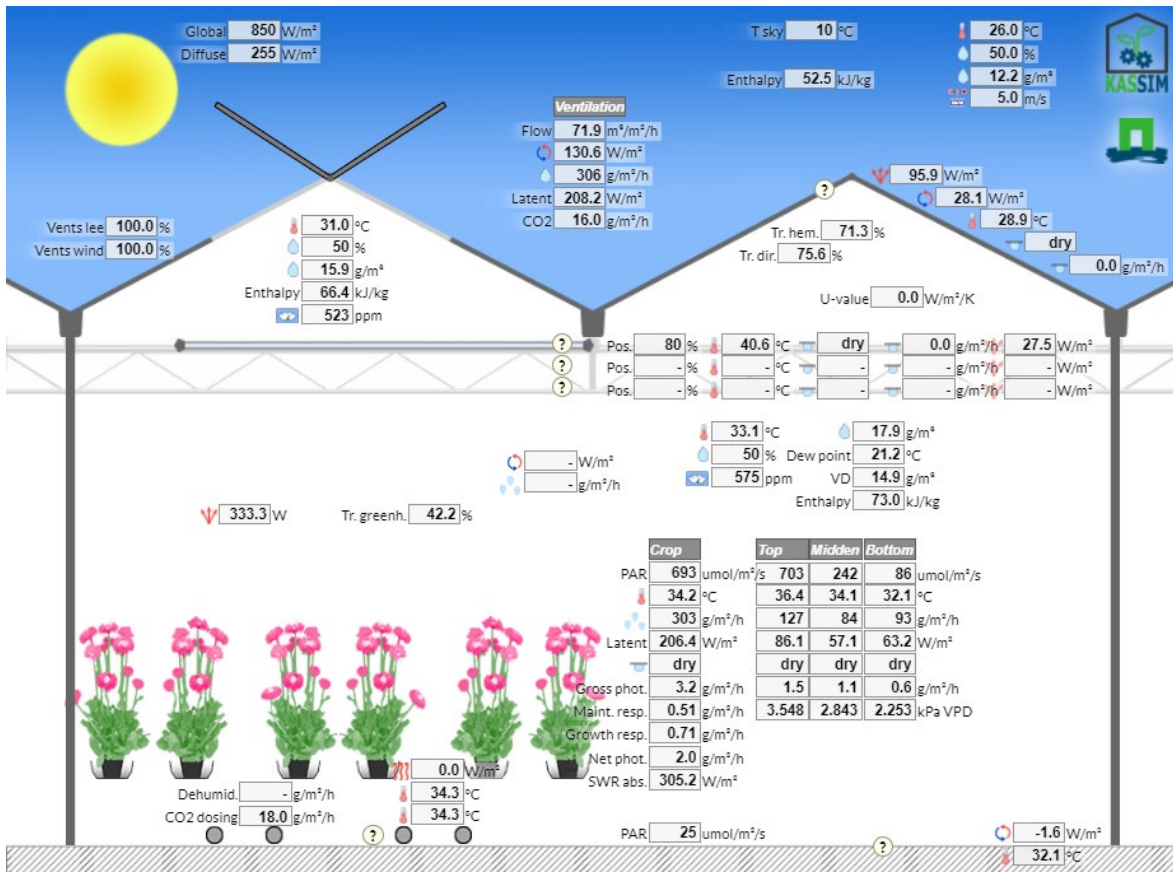
De hogere temperaturen in de kas ten opzichte van de omgeving leiden tot een groter verlies aan langgolvlige straling waardoor de netto stralingsmeter op een lagere waarde voor de netto straling komt, ondanks het feit dat de kortgolvlige stralingsbelasting vanuit de zon gelijk is.

Het warmere komkommerngewas neemt iets minder CO₂ op en verliest wat meer CO₂ aan groei- en onderhoudsademhaling, waardoor de evenwichts CO₂-concentratie iets hoger uitkomt (513 ppm in plaats van 507 ppm in de tomatenkas).



Figuur 39 Resultaat van een Kassim voor dezelfde omgevingscondities als gebruikt in Figuur 38, maar nu met een komkommernewas in plaats van tomaat.

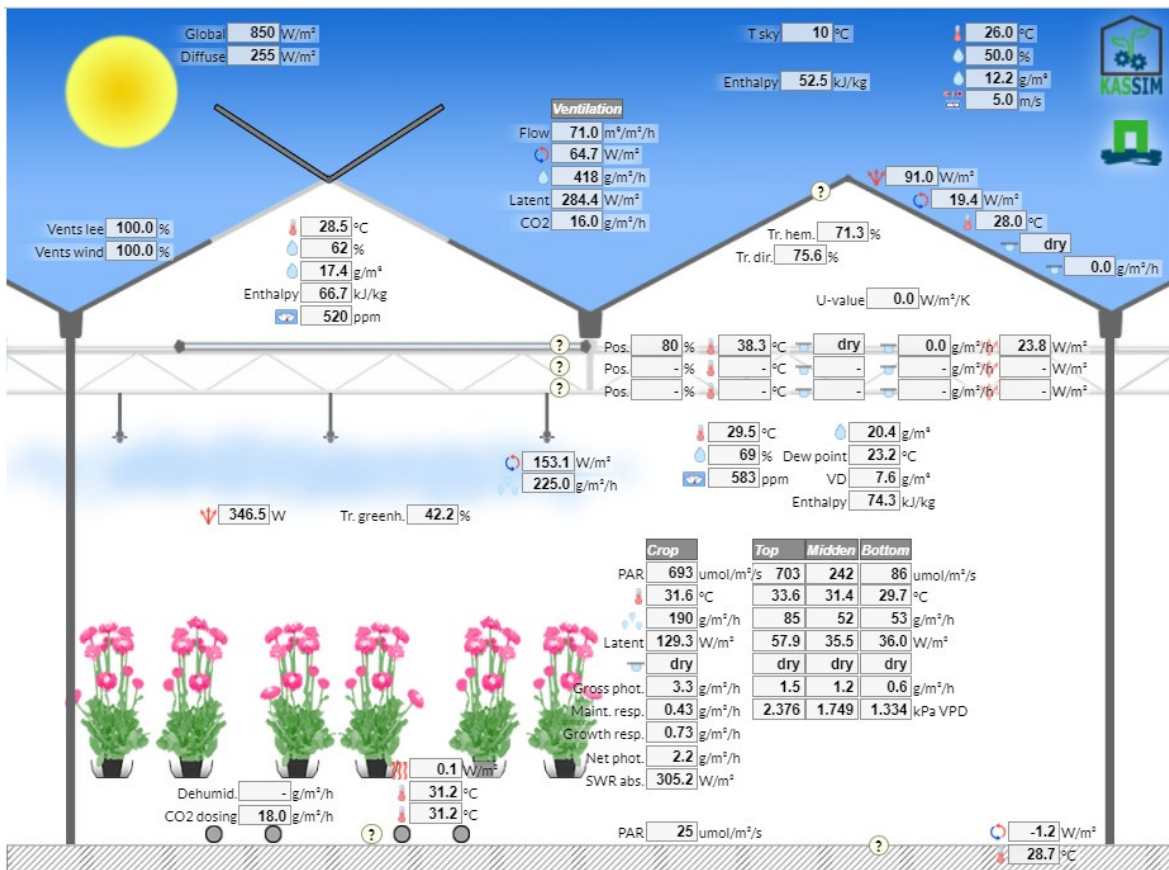
In de twee siergewassen die in dit project bestudeerd zijn zal onder deze zomerse condities (zwaar) geschermd worden. Onderstaande Figuur toont de berekende situatie voor een gerberagewas waarbij middels een schaduw scherm de lichtintensiteit op gewasniveau is teruggebracht naar 693 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$.



Figuur 40 Resultaat van een Kassim berekening voor een hoog-zomer situatie in een gerbera-teelt. Om de lichtintensiteit te verlagen is een schaduw scherm toegepast waarmee de lichtintensiteit naar $693 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ is gereduceerd. De LAI van het gerberagewas is 4.

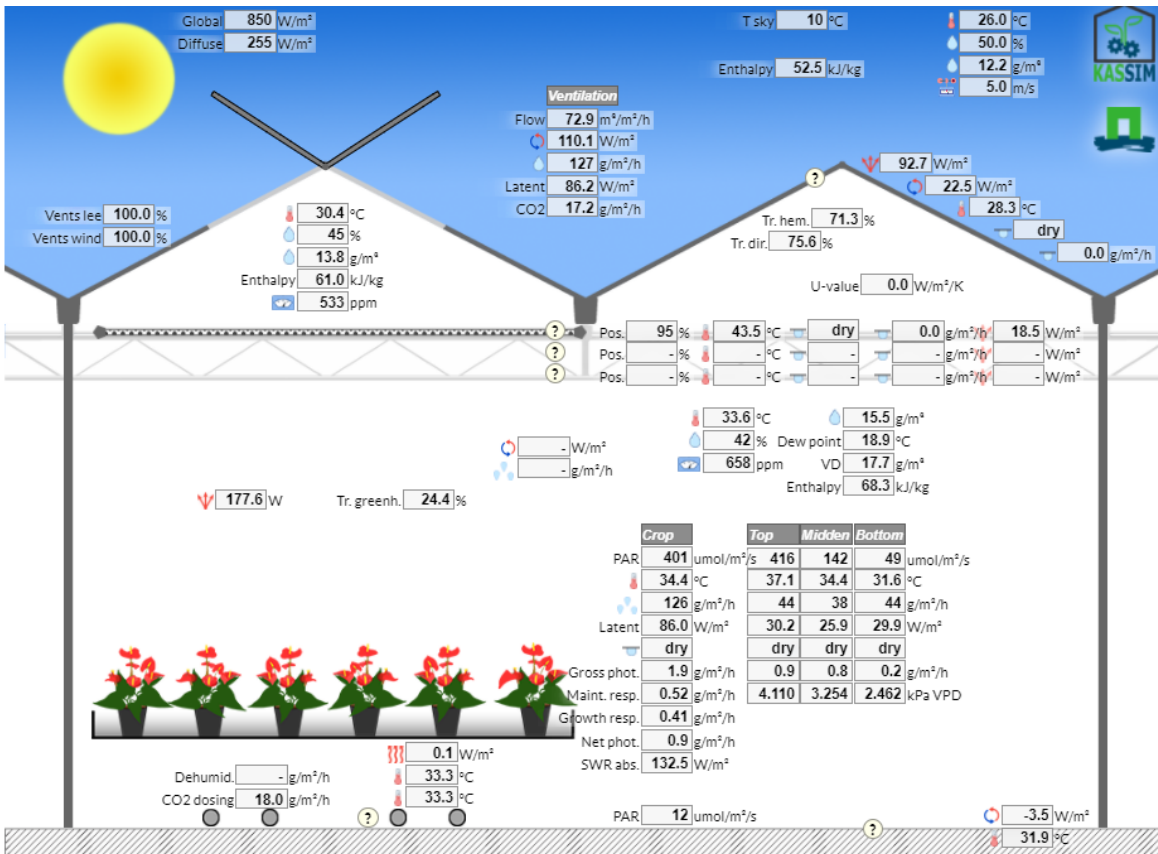
De hoge buitentemperatuur, de hoge stralingsbelasting en de lagere verdampingscapaciteit van het gerberagewas maken dat de kasluchttemperatuur nog weer hoger is dan bij de komkommerkas. De transmissie van kas+schaduw scherm is in dit geval 42.2%. voor de groentekassen was de lichttransmissie op gewashoogte 69.9%. De lichttransmissie is dus $42.2/69.9 = 60\%$. De PAR-intensiteit is met dezelfde factor afgenomen. De netto straling op het gewashoogte is echter met 333 W/m^2 slechts 72% ten opzichte van de netto straling op gewashoogte in een komkommerkas onder de (ongeschermd) omstandigheden. Het feit dat de netto straling minder sterk is afgenomen dan de kastransmissie komt doordat de warmere oppervlakken boven het gewas (warm schermdoek, warm kasdek) het stralingsverlies vanuit het gewas verminderen. De kortgolelige stralingsinput is dus naar rato verlaagd, maar het stralingsverlies wordt bij toepassing van een scherm minder, waardoor de netto straling minder afneemt dan de lichttransmissie. De Kassim-berekeningen laten overigens niet de bloem-temperatuur zien.

Een opvallend verschil tussen de situatie in de Gerberakas en de situatie in de komkommerkas is ook de aanzienlijk lagere relatieve luchtvochtigheid (50% in plaats van 68%). Dit komt door een opgeteld effect van de lagere verdamping en de hogere luchttemperatuur. Gezien de lage RV zou de toepassing van verneveling de kasluchttemperatuur kunnen laten dalen. Dit is getoond in Figuur 41. Inderdaad is met de inzet van 225 gram verneveling per m^2 per uur de kasluchttemperatuur afgenomen naar 29.5°C . Een verlaging van 3.6°C . De RV is opgelopen naar 69%. De kasluchtcondities zijn dus vergelijkbaar geworden met die van de komkommerteelt, maar de lagere verdampingscapaciteit van de Gerbera blijft onverminderd. De overt temperatuur van de bovenste bladeren blijft met 4.1°C hoog en is zelfs hoger dan in Figuur 40. Zonder verneveling was de berekende overt temperatuur 3.3°C . Het verschil komt doordat de verneveling het dampdrucksverschil tussen bladeren en kaslucht kleiner maakt (van 3.5 kPa naar 2.4 kPa) en dus de koelende werking van de gewasverdamping vermindert. Desalniettemin is het netto effect van verneveling dat niet alleen de kasluchttemperatuur afneemt, maar ook de gewas temperatuur.

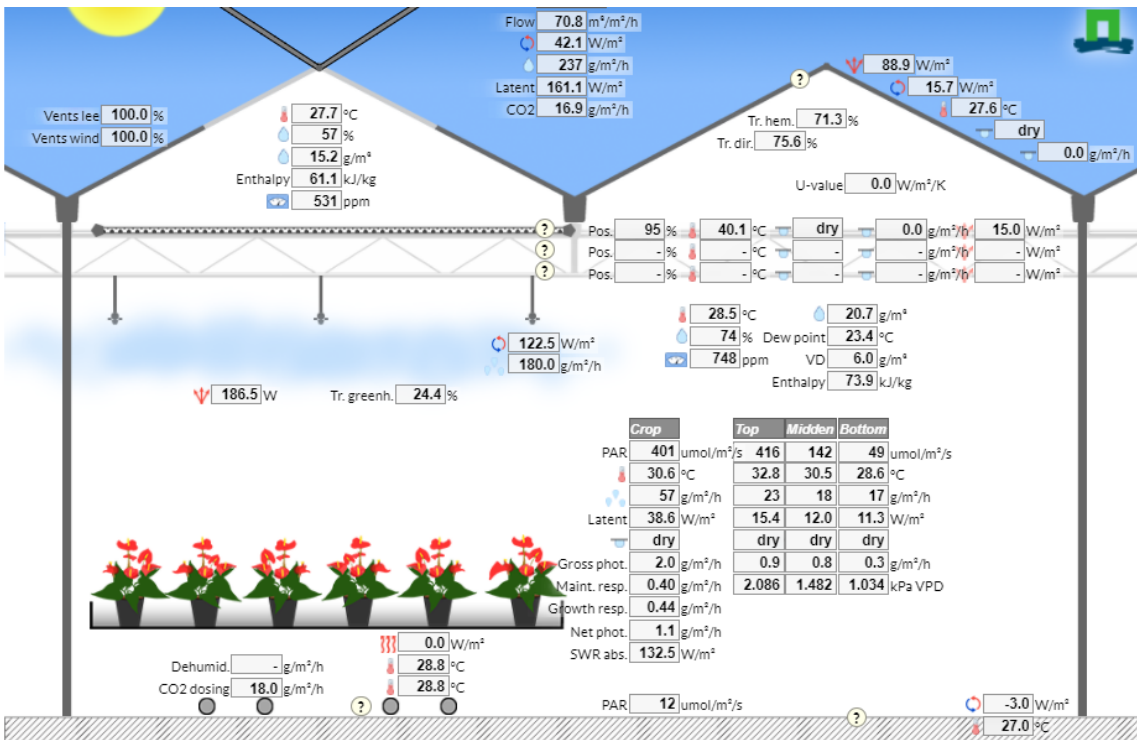


Figuur 41 De Gerberakas onder dezelfde omstandigheden, maar met de inzet van 200 gram verneveling per m² per uur. De LAI is gelijk gehouden (4).

Als laatste in de serie resultaten voor hoog-zomerse condities worden in Figuur 42 en 43 de resultaten van twee Kassim-berekeningen voor de snij-anthurium getoond. Er wordt in de snij-anthurium zwaarder geschermd dan in de Gerberateelt, wat onder deze zomerse omstandigheden betekent dat het nóg wat warmer wordt. Het donkerder schermdoek zal nog wat warmer zijn en de lucht-uitwisseling nog wat meer beperken waardoor het in de kas ondanks de veel lagere stralingsbelasting warmer wordt dan in alle vorige besproken situaties. De geringe verdampingscapaciteit van de anthurium, met name overdag zorgt in combinatie met de hoge temperatuur voor een lage relatieve luchtvochtigheid. De verdamping is slechts 126 gram per m² uur. Toch is de berekende overtemperatuur van de bovenste gewaslaag met 3.5°C niet de hoogste uit de serie rekenresultaten. Dit komt doordat de stralingslast op het gewas klein is. Dit komt door de hoge schermfactor en doordat de stralingsabsorptie door het gewas laag is vanwege de hoge reflectie in het NIR-gebied. De totale gewasabsorptie is met 132.5 W/m² nog niet de helft van de gewasabsorptie van de Gerbera en slechts een derde van de absorptie van de groentegewassen. Zo bezien is de gewasverdamping van 129 gram/(m² uur) relatief hoog, wat wordt veroorzaakt door het grote dampdruksverschil tussen gewas en kaslucht. Ook in de anthuriumteelt is er ruimte voor de inzet van verneveling. Figuur 43 laat zien dat bij de verneveling van 180 gram/(m² uur) de berekende kasluchttemperatuur daalt naar 28.5°C. De temperatuur van de bovenste gewaslaag daalt naar 32.8, maar, zoals te verwachten is de overtemperatuur nu wel hoger namelijk 4.5°C in plaats van 3.5°C.



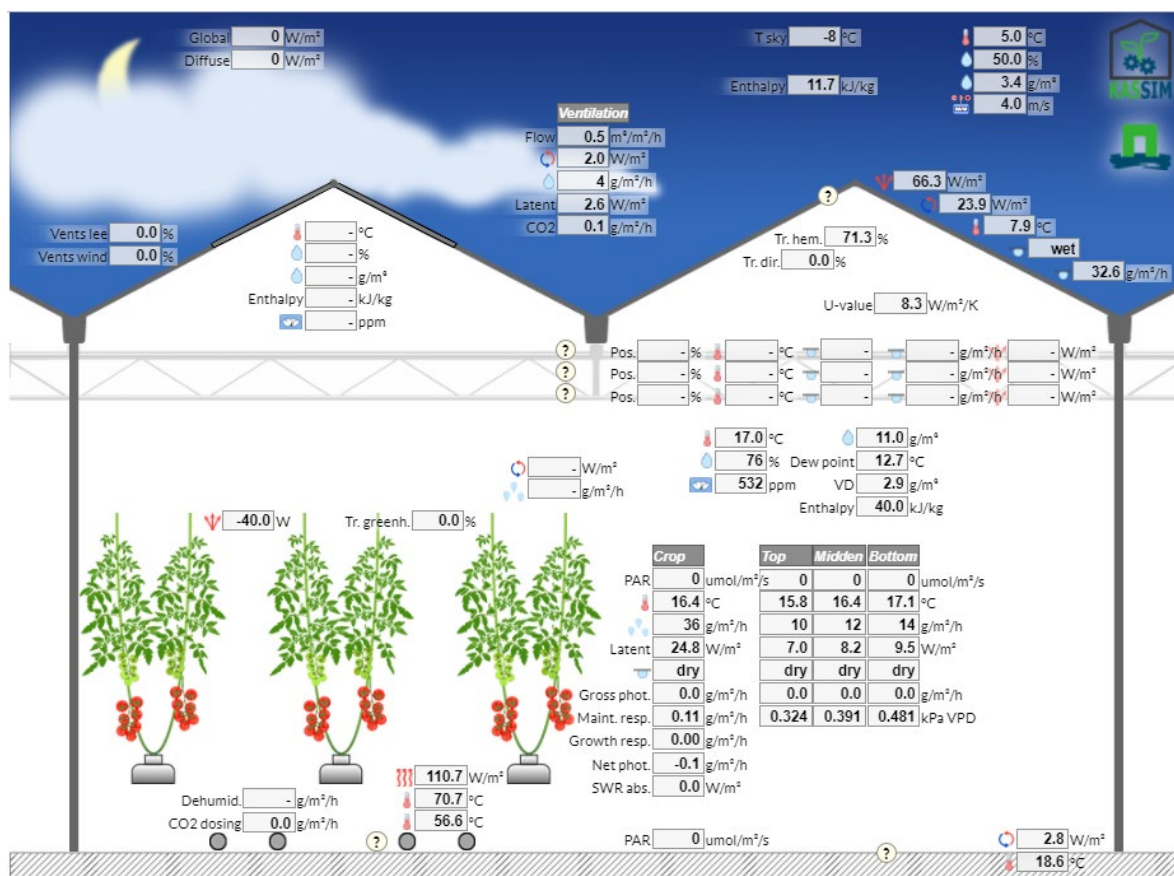
Figuur 42 Resultaat van een Kassim berekening voor een hoog-zomer situatie in een Anthurium-teelt. (de graphics tonen een pot-anthurium maar de parameters en dus ook de rekenresultaten gesden voor een snij-anthurium). Om de lichtintensiteit te verlagen is een zwaar schaduw scherm toegepast waarmee de lichtintensiteit naar 401 μmol/(m² s) is gereduceerd. De LAI van het gewas is 4.



Figuur 43 Resultaat van een Kassim berekening voor een hoog-zomer situatie in een Anthurium-teelt. met verneveling 180 g/(m² uur) verneveling.

De serie met resultaten die Kassim voor de hoog-zomercondities berekent voor de 4 gewassen die in dit project nader bestudeerd zijn laat zien dat de veel te hoge temperaturen die aanvankelijk werden berekend na de aanpassingen van het verdampingsmodel, de parameters daarin en de aanpassingen van de absorptie-karakteristieken ervoor hebben gezorgd dat het simulatiemodel realistische waardes berekent. Zowel voor het dynamisch model, waarvan de resultaten in Hoofdstuk 2 getoond zijn als voor het daarvan afgeleide statische Kassim-model.

Het huidige model is daarmee geschikt om zowel voor zonnige als voor donkere en koude omstandigheden gebruikt te worden. Ter illustratie van de model-uitkomsten voor een tomatengewas tijdens een redelijk koude nacht 5°C en een half bewolkte hemel (hemeltemperatuur -8°C).

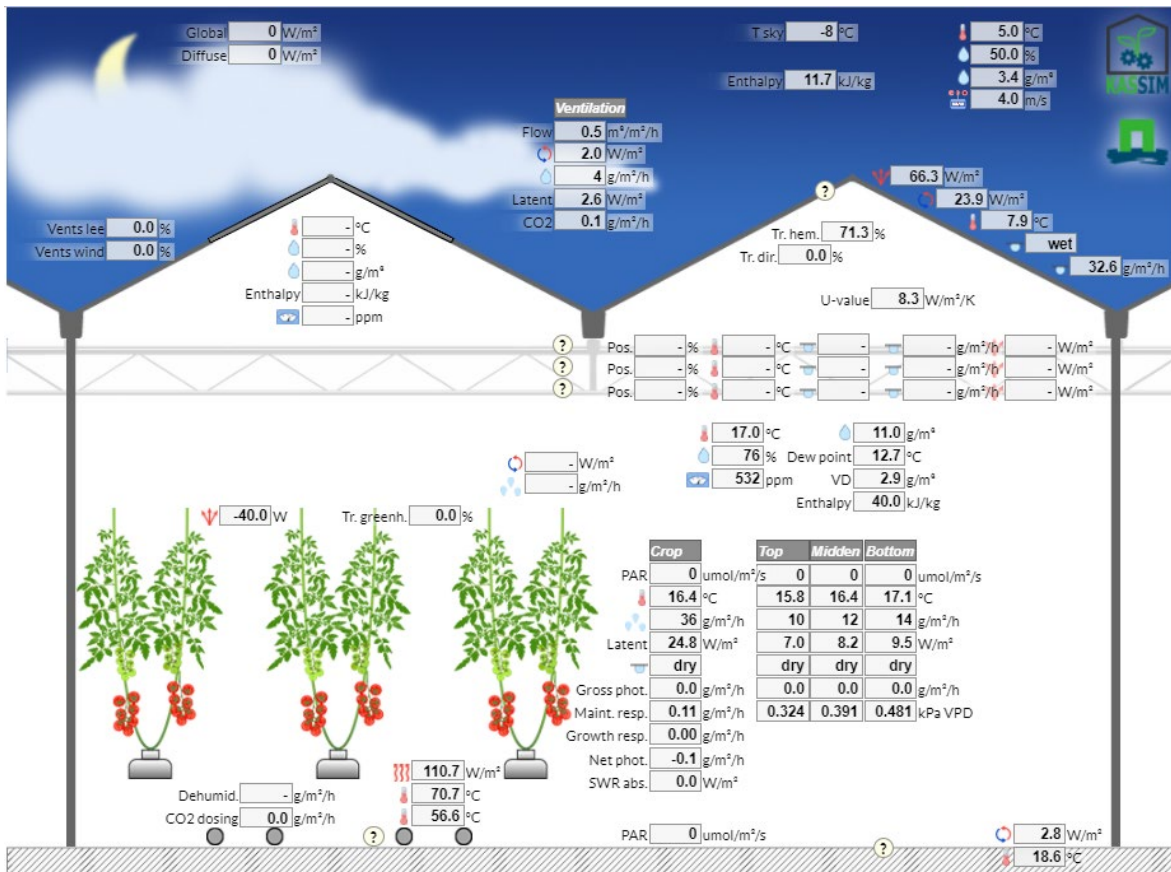


Figuur 44 Ter illustratie: resultaat van een Kassim-berekening voor een tomatengewas in een kas zonder scherm in een vrij koude nacht.

Doordat de kas in het geval van Figuur 44 geen scherm gebruikt wordt de luchtvochtigheid vrij laag en wordt er nog een behoorlijke gewasverdamping berekend (36 g/(m² uur)). Hierdoor komt de gewastemperatuur gemiddeld 0.6°C onder de kasluchttemperatuur te liggen, maar de bovenste gewaslaag ligt 2.2°C onder de kasluchttemperatuur. Er is een fors verwarmingsvermogen nodig (110.7 W/m²), waarvoor een buis met een aanvoertemperatuur van 70.7°C nodig is en een retourtemperatuur van 56.6°C zal hebben (er wordt gerekend met een 51 mm buis met een omloopsnelheid van 20 minuten).

Er is geen zonlicht en het koude kasdek zorgt voor een behoorlijk uitstraling dus komt de gesimuleerde nettostralingsmeter op een stralingsverlies van 40 W/m² op gewashoogte.

Wanneer in deze kas een energiescherm wordt dichtgetrokken gaat de gemiddelde gewastemperatuur omhoog, wordt de temperatuurgradiënt over het gewas kleiner, is er minder stralingsverlies en neemt het verwarmingsvermogen af. Dit is goed te zien in Figuur 45 waar alle modelinstellingen gelijk zijn gehouden, behalve het scherm dat gesloten is. De gewastemperatuur is nu gemiddeld 0.3°C onder de kasluchttemperatuur, de temperatuurgradiënt is afgenomen van 1.3°C naar 0.7°C en het netto stralingsverlies op gewashoogte is -15 W/m². Het verwarmingsvermogen is meer dan gehalveerd.



Figuur 45 Dezelfde kas en dezelfde omgevingscondities als gebruikt in de vorige Figuur, maar nu met een gesloten energiescherm.

Behalve dat de energiebehoefte sterk afneemt door het gebruik van een scherm is ook duidelijk te zien dat de luchtvochtigheid in de kas sterk toeneemt. De hogere luchtvochtigheid verlaagt het dampdruksverschil tussen bladeren en kaslucht, waardoor de verdamping afneemt.

Naast de directe verlaging van de warmtevraag door de verhoogde isolatiewaarde zorgt het scherm dus ook via een verminderde verdamping voor energiebesparing. Het gewas onttrekt in de situatie met scherm 14.3 W/m² aan latente warmte aan de kaslucht waar het in de situatie zonder scherm 24.8 W/m² aan latente warmte onttrok.

Dit dubbele effect van het sluiten van een scherm zien treedt vooral op onder heel koude omstandigheden. In minder koude omstandigheden, waar er zonder scherm al gelucht wordt om overtollig vocht af te voeren zal bij het sluiten van het scherm meer gelucht gaan worden om de luchtvochtigheid niet te hoog te laten oplopen. Dit effect is overigens al voor een deel te zien in Figuur 45, waar het raam een stukje is geopend om de RV op de getoonde 86% te houden. Zonder die raam-opening zou de luchtvochtigheid op 90% zijn uitgekomen, de gewasverdamping zijn gedaald naar 15 gram/(m² uur) en het verwarmingsvermogen naar 40 W/m².

Op minder koude nachten zal een scherm dus niet alleen in absolute termen een lagere besparing opleveren, maar ook het besparingspercentage zal lager zijn.

Het Kassim-programma, dat alleen momentane effecten toont, berekend uit een stationaire balans, is dan ook vooral bedoeld om het effect van installaties, buitencondities en regel-acties op de energie- en massabalans van de kas+gewas te tonen. Voor jaarrond energiebesparingsberekeningen moet de dynamische output van het model worden gebruikt.

4 Conclusies

Kasgewassen hebben een relatief kleine warmtecapaciteit (thermische massa) ten opzichte van hun oppervlak. Vooral de blad-temperatuur verandert daarom snel bij veranderende omgevingsomstandigheden. Daardoor is het gewas steeds al gauw in evenwicht met z'n omgeving, wat betekent dat de aanvoer van energie en water vrijwel gelijk is aan de afvoer. Dit ligging van dat evenwichtspunt in termen van de gewastemperatuur wordt bepaald door fysische processen rond energie-opname en -afgifte. Het is daarmee een voornamelijk passief proces met vaste, fysisch te bepalen parameters. De belangrijkste uitzondering is echter de huidmondjesweerstand. Afhankelijk van de teeltomstandigheden, en vooral afhankelijk van de plantsoort hebben of krijgen gewassen een lage of een hoge weerstand. Bovendien varieert de huidmondjesweerstand door het etmaal.

De combinatie van omgevingsomstandigheden, de vaste fysische gewasparameters, zoals absorptiecoëfficiënt voor zonlicht en de langgolvlige optische parameters, en de variabele huidmondjesweerstand bepalen de overtemperatuur van de bladeren ten opzichte van de omgeving. 's Nachts zijn de bladeren kouder dan de omgeving en bij veel zonlicht zijn ze warmer.

De on-line onderwijs-applicatie Kassim is, onder andere, ontwikkeld om deze processen te kwantificeren en op een aansprekende wijze inzichtelijk te maken. Bij de lancering van Kassim in 2018, bleken de berekende resultaten zeer realistisch voor winterse omstandigheden, maar werd de gewastemperatuur voor vol-zomerse omstandigheden duidelijk te hoog op.

Om dit manco te repareren is in voorliggend project opnieuw in detail naar gewastemperaturen en verdampingsprocessen gekeken, waarbij nadrukkelijk op de zomerse omstandigheden is ingezoomd.

Redenerend vanuit de energiebalans is het startpunt voor de berekening van gewastemperaturen de absorptie van zonlicht door het gewas. In dit onderzoek bleek dat de gewasabsorptie voor de vier bestudeerde gewassen niet gelijk was. Een volgroeid tomatengewas absorbeert 79% van de hoeveelheid zonlicht die op gewashoogte wordt gemeten. Voor het Gerberagewas werd dezelfde lichtabsorptie bepaald, maar een Gerberagewas heeft daarbij wel een hogere LAI (4 in plaats van 3). Komkommer absorbeert met 73% minder dan tomaat en Gerbera en snij-anthurium absorbeert nóg minder, 60%.

Na aanpassingen van de absorptie- en uitdovingscoëfficiënt voor kortgolvig licht in het kasklimaat simulatiemodel Kaspro, het model wat door Kassim gebruikt wordt om de berekeningen uit te voeren, kwam het simulatiemodel voor elk van de 4 gewassen die in dit project bestudeerd zijn op vrijwel de gemeten lichtabsorptiepercentages.

In de energiebalansberekening wordt deze geabsorbeerde licht-energie verdeeld over een energie-afgifte in de vorm van latente warmte (verdamping), convectieve warmte en straling. 's Nachts is de convectieve warmte-uitwisseling negatief, doordat het blad kouder is dan de kaslucht.

Van deze drie componenten is het latente warmteverlies relatief gemakkelijk te bepalen in de vorm van de wateropname van het gewas. Na correctie voor het aandeel van de gewasgroei in de totale wateropname (zo'n 10%), kan de hoeveelheid verdampt water worden bepaald en dus de latente warmte onttrekking door het gewas. Voor teelten met een weegoot kan dit op een gedetailleerde tijdschaal worden gedaan (kwartierwaarden), maar voor de meeste kassen is er geen nauwkeuriger bepaling dan het watergebruik gebaseerd op het verschil tussen gift en drain.

In § 2.2 wordt getoond dat het op de meetdata geparameteriseerde simulatiemodel een realistische dagelijkse verdamping laat zien. Één set van parameters per gewas bleek gebruikt te kunnen worden om de gewasverdamping op zowel zonnige als op sombere dagen met goede nauwkeurigheid te berekenen. De resultaten voor de simulatie van de komkommerteelt, waar een weegoot aanwezig was, laten zien dat ook door het etmaal heen de berekende verdamping goed wordt berekend.

Als berekende en gemeten stralingsabsorptie en verdamping overeenkomen dan geeft de verificatie van de gewastemperatuur uitsluitsel over de juistheid van de gehanteerde parameters voor de verdampingsweerstand. Immers, wanneer die weerstand te groot wordt verondersteld kan het gewas vrijwel diezelfde hoeveelheid water verdampen, maar bij een veel hogere bladtemperatuur. Bij een te kleine verdampingsweerstand blijft de bladtemperatuur overdag dichter bij de luchttemperatuur dan de gemeten waarden.

De verificatie die op dit punt in § 2.3 is uitgewerkt laat zien dat de in dit project ontwikkelde parameterisatie inderdaad tot overtemperaturen (overdag) en ondertemperaturen ('s nachts) leidt die in dezelfde range liggen en een vergelijkbaar profiel tonen als de gemeten waarden. Er kan niet in nauwkeuriger termen dan 'range' en 'vergelijkbaar' worden gesproken omdat de bepaling van 'de gewastemperatuur' niet eenduidig kan worden gedaan. Het beeld van een infraroodcamera laat altijd een hele range van temperaturen zien. De bovenste bladeren zijn duidelijk het warmste en onderin het gewas zijn de bladeren gemakkelijk 4°C kouder, maar het is niet eenduidig vast te stellen welke beeldpunten tot welke bladlaag gerekend moeten worden. Het simulatiemodel deelt de totale bladmassa op in drie lagen en berekent voor die drie lagen een gemiddelde temperatuur. Het simulatiemodel zal dus niet de extremen tonen die in infrarood-beelden te zien zijn, maar moet natuurlijk wel binnen de aannemelijke bandbreedte blijven.

Dit project laat zien dat na de aanpassingen die aan de hand van de verzamelde data konden worden gemaakt, de berekende verdamping en gewastemperaturen goed overeenkomen met metingen. Hierdoor kan het simulatiemodel Kaspro en de toepassing daarvan door Kassim een realistisch beeld leveren van de energiebalans over kas en gewas in alle denkbare omstandigheden voor wat betreft buitenklimaat, kasuitrusting en klimaatregel-opties. Ter illustratie hiervan zijn in Hoofdstuk 3 de kerngetallen besproken die onder hoog-zomerse omstandigheden als output door Kassim voor de vier gewassen worden geleverd. Hieruit komt de invloed van de gewasabsorptie, de stralingsbalans, de verdamping en het effect van schaduw-schermen goed naar voren. Ook de CO₂-balans wordt inzichtelijk getoond.

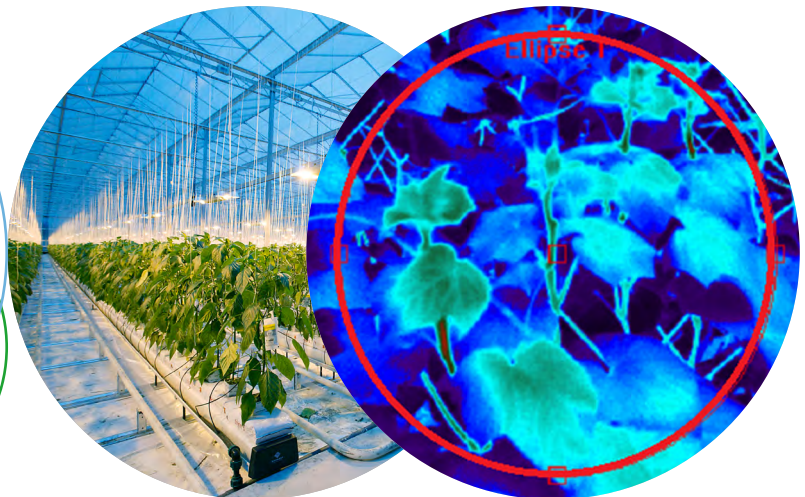
In kassen met weinig verdampende gewassen en intensief (schaduw) schermgebruik is duidelijk te zien dat de luchtvochtigheid laag kan worden. De inzet van verneveling leidt dan tot lagere kaslucht- en gewastemperaturen. En tot een lagere verdamping van het gewas.

Hoewel de focus in dit project lag op het de gewastemperaturen onder hoog-zomerse omstandigheden wordt in Hoofdstuk 3 ook nog ingegaan op de energiebalans rond kas en gewas in een koude, winterse nacht. Het koude kasdek zorgt dan voor veel condensatie en een lage luchtvochtigheid, wat de gewasverdamping en dus ook de latente warmte opname en het energieverbruik omhoog stuwt. De toepassing van schermen leidt in zulke omstandigheden tot een homogener kasklimaat (lagere buistemperaturen, kleinere temperatuurgradiënt in het gewas) en een halvering van de warmtevraag.

De voorbeelden van de energiebalansberekeningen in Hoofdstuk 3 vormen slechts een kleine greep van het onbeperkte aantal analyses die met Kassim gedaan kunnen worden. Dit kon ook al met de voorgangers hiervan (Uitstralingsmonitor en eerdere versies van Kassim), maar de informatie uit dit nu afgeronde project en de tijd die in de verbeterde parameterisatie van de gewaseigenschappen kon worden gestoken heeft ervoor gezorgd dat de rekenresultaten voor een veel breder toepassingsgebied realistisch zijn.

Het levert de gebruikers van het model (tuinders, voorlichters, studenten) kwantitatief inzicht in de effecten van de belangrijkste kasklimaat-instellingen (stooklijn, ventilatielijn, verneveling, schermstanden, CO₂-dosering), waardoor op een onderbouwde wijze gewerkt kan worden aan een energiezuinige, en voor het gewas gunstige regelstrategie.

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
www.wur.nl/glastuinbouw

Rapport WPR-1136

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 6.800 medewerkers (6.000 fte) en 12.900 studenten behoort Wageningen University & Research 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.