



Tomatenteelt in de hooggeïsoleerde VenLow Energy kas

H.F. de Zwart, J. Janse en F.L.K. Kempkes

Rapport GTB-1366

Referaat

In het onderzoeksprogramma Kas Als Energiebron is als ambitie gesteld dat nieuwe kassen in 2020 energieneutraal kunnen opereren. Daarvoor is een verlaging van de energievraag belangrijk. De hoog-geïsoleerde VenLow Energy kas heeft al een aantal jaren een heel laag energieverbruik laten zien en in 2014 is onderzocht of het verbruik zonder verlies van productie onder de 10 m³ aardgas equivalenten per m² kan uitkomen. Om dit te kunnen realiseren moest het lekverlies verder worden beperkt, een goed energiescherm worden gebruikt, maar vooral een hogere luchtvochtigheid worden geaccepteerd om de verdamping af te remmen. Ook de manipulatie van de mat-EC zou het energieverbruik voor verdamping kunnen verlagen. De kas heeft in 2014 slechts 8 m³/m² laten zien bij een hoge productie. Dit was ver onder de doelstelling, maar het was dan ook een historisch warm jaar. Simulaties aan de hand van de meetresultaten geven echter aan dat ook in een gemiddeld Nederlands jaar de genomen maatregelen tot het beoogde verbruiksniveau hadden geleid. De manipulatie van de mat-EC heeft onverwacht een hogere verdamping opgeleverd. De conclusie van dit onderzoek luidt dat met de toegepaste bouwkundige maatregelen een tomatenteelt met minder dan 10 m³ aardgas equivalenten reëel is. Er moet daarbij een hoge luchtvochtigheid worden geaccepteerd en een verkort teeltseizoen (half januari tot eind november). Een tomatenras zoals Komeett kan daarbij ruim 70 kg/m² voortbrengen, mits er CO₂ uit alternatieve bron beschikbaar is, dus niet gekoppeld aan het eigen gasverbruik.

Abstract

In the research program Greenhouse as Energy Source aims at having energy-neutral operated greenhouses by 2020. Therefore, a reduction of the energy use is important. The highly insulated VenLow Energy greenhouse have shown a low energy consumption for several years and in 2014 it was attempted to bring it below 10 m³ of natural gas equivalents per m² without a lowered production. To achieve this the leakage had to be reduced further and the screen quality was improved and a high humidity control setpoint was accepted. This in order to reduce the evaporation. Also the manipulation of the EC in the slab could lower the crop transpiration related energy consumption.

The experiment showed an energy consumption of 8 m³/m² per year without a decreased crop production. This is far below target, but 2014 was a historically warm year. However, simulations showed that even in an average Dutch year the measurements taken would have met the target.

The manipulation of the EC of the slab worked adversely, meaning that it increased the crop transpiration.

The conclusion reads that the measures taken in the greenhouse make a productive tomato crop with less than 10 m³ of gas equivalents per m² per year realistic. With respect to the climate, a high humidity must be accepted and a shortened growing season running from mid-January to late November. A tomato variety like Komeett will yield at least 70 kg/m² can be expected, providing that CO₂ dosing is not related to gas consumption for heating.

Rapportgegevens

Rapport GTB-1366

Projectnummer: 32421 89900

PT nummer: 14097

Disclaimer

© 2015 Wageningen UR Glastuinbouw (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek), Postbus 20, 2665 MV Bleiswijk, Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk, T 0317 48 56 06, F 010 522 51 93, E glastuinbouw@wur.nl, www.wageningenUR.nl/glastuinbouw. Wageningen UR Glastuinbouw.

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

Adresgegevens

Wageningen UR Glastuinbouw

Postbus 20, 2665 ZG Bleiswijk

Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk

T +31 (0)317 48 56 06

F +31 (0)10 522 51 93

Inhoud

	Samenvatting	5
	Summary	7
1	Inleiding	9
2	Opdeling van de warmtevraag van de VenLow Energy kas	11
	Inleiding	11
	2.1 Simulatieresultaten	11
	2.2 EC-regeling	15
3	Resultaat van het experiment in 2014	17
	3.1 Energie en klimaat	17
	3.2 Teelt en productie	21
	3.3 Effect EC-behandeling	23
4	Effect van het uitzonderlijk warme jaar 2014	27
5	Conclusies en nabeschuiving	29
6	Literatuur	31

Samenvatting

De VenLow Energy kas is één van de onderzoekskassen van Het Innovatie en Democentrum-Energie. Het IDC-Energie heeft tot doel om nieuwe energiezuinige kasconcepten te beproeven en te demonstreren.

Een laag energieverbruik kan worden gerealiseerd door de kas een hoge isolatiewaarde te geven, in combinatie met het gebruik van een energiezuinige teeltstrategie.

De hoge isolatiewaarde van VenLow Energy kas is gerealiseerd door de toepassing van HR+ glas. Daarnaast heeft de VenLow Energy kas een ontvochtigingssysteem waarbij de voelbare warmte uit de afgevoerde vochtige kaslucht voor 80% wordt teruggewonnen.

In 2011, 2012 en 2013 heeft de VenLow Energy kas een stelselmatig dalende trend in het energieverbruik laten zien van 17.0 m³/m² naar 14.5 m³/m² bij een stabiele of zelfs toenemende productie. 14.5 m³ aardgas equivalenten per m² voor de teelt van meer dan 70 kg tomaten is erg laag, maar nog ver af van energieneutraliteit. En energieneutraliteit is de ambitie die het onderzoeksprogramma Kas Als Energiebron voor nieuw te bouwen kassen in 2020 heeft gesteld.

Nou hangt energieneutraliteit niet per definitie af van het verbruiksniveau. Bij gebruik van duurzame energiedragers blijft de onderneming energieneutraal, ongeacht het verbruiksniveau.

Een verlaging van het verbruik brengt de mogelijkheid om geheel op duurzame energiedragers te werken echter wel gemakkelijker haalbaar. Daarom is voor het onderzoeksjaar 2014 gestreefd zodanige maatregelen te nemen dat de VenLow Energy kas met maximaal 10 m³ aardgas equivalenten per m² de gebruikelijke 70 kg tomaten zou kunnen produceren. De beschikbaarheid van externe CO₂ (bijvoorbeeld van OCAP of een andere bron) werd hierbij als gegeven verondersteld zodat er geen interferentie is tussen gasverbruik voor warmte en de CO₂ dosering.

Voorafgaand aan de start van het praktijkexperiment is door middel van simulaties onderzocht op welke wijze de beoogde verlaging zonder grote nieuwe investeringen zou kunnen worden gerealiseerd. Het bleek dat het terugbrengen van het lekverlies naar waarden die voor huidige nieuwbouwkassen gebruikelijk zijn een zeer belangrijke verlaging van de warmtevraag zou opleveren. Daarnaast bleek dat de beperking van de verdamping een belangrijke bijdrage kon leveren en in de derde plaats zou het verbeteren van het scherm nog enige verlaging opleveren. Vanwege de beschikbaarheid van een balansventilatiesysteem voor de ontvochtiging zou het bestaande bandjesscherf vervangen kunnen worden door een foliescherf.

De beperking van de verdamping leidt alleen tijdens de periode van stoken en op momenten dat de kas afkoelt terwijl dat ongewenst is (in de nacht bijvoorbeeld) tot een vermindering van de warmtevraag. Als op die momenten de verdamping vermindert wordt de onttrekking van latente warmte aan de kaslucht verkleind en koelt de kas langzamer af en/of daalt de warmtevraag. Overdag, als de ramen open gaan vanwege een te hoge temperatuur wordt de verdamping door de zon wordt aangedreven en maakt het voor het energieverbruik niet uit of het gewas veel of weinig verdampt. Een dergelijke selectieve verlaging van de verdamping kan gemakkelijk worden gerealiseerd door een hogere luchtvochtigheid te accepteren. Het ontvochtigingssysteem wordt dan minder vaak gebruikt en de hogere luchtvochtigheid zorgt ook dat de verdamping wordt afgeremd. Zo snijdt dit mes aan twee kanten.

Een vierde optie waarvan een selectieve verlaging van de verdamping werd verwacht is het gebruik van een snel aanpasbare EC in de mat. Een hoger EC leidt in het algemeen tot een lagere verdamping en als de EC van de mat iedere nacht verhoogd kan worden en overdag weer verlaagd zou de nachtelijke verdamping kunnen worden geremd terwijl de totale verdamping ongewijzigd zou blijven.

De experimenten in 2014 lieten een warmtevraag van 7 m³/m² zien. Samen met 1 m³/m² die toegeschreven moet worden aan het stroomverbruik voor de luchtcirculatie, was het energieverbruik 8 m³/m². Dit verbruik ligt ver onder de doelstelling, maar 2014 was dan ook een historisch warm jaar. Daarmee was het precieze effect van de maatregelen op het energieverbruik moeilijk op grond van de metingen te bepalen.

Het effect van de maatregelen op het kasklimaat, en dan vooral op de luchtvochtigheid waren wel duidelijk waarneembaar. De gemiddelde luchtvochtigheid in de kas was in 2014 beduidend hoger dan in 2013 en de verdamping was lager, vooral in de nacht en ochtend.

De gewasproductie was in 2014 hoger dan in 2013, maar er was gedurende de teeltperiode ook iets meer licht. Al met al is gesteld dat de productie niet is beïnvloed door het vochtiger klimaat.

Het aanbrengen van variaties in de mat EC door de laatste druppelbeurten van de dag een hoge EC mee te geven en de overige druppelbeurten juist een lagere dan in de standaard praktijksituatie heeft niet geleid tot een verlaagde verdamping in de nacht. Tegen de verwachting in werd er door het gewas wat op de mat met wisselende EC groeide beduidend meer water verdampt dan door het gewas dat groeide op de mat met het standaard irrigatieprotocol. Het gewas op de mat met wisselende EC verdampte 19% meer dan het gewas dat met het standaardirrigatieprotocol water kreeg. Mogelijk heeft het feit dat de toegepaste mat een andere structuur had en de ruimere watergift die het gevolg was van de realisatie van EC-wisselingen tot een betere waterbeschikbaarheid geleid, maar dan nog is het verschil zeer groot. Extra analyses van de wateropname aan de hand van verzamelde gift- en drainagegegevens lieten echter hetzelfde beeld zien als de verdampingspatronen die met behulp van weeggoten waren bepaald. De metingen lijken daarmee zeer consistent. De twee verschillende watergeefsystemen hadden geen effect op de gewasproductie. Alleen de vruchten van de planten die op de mat met wisselende EC groeide bleven iets kleiner, maar compenseerde dat met een groter aantal.

Het lage energieverbruik dat in 2014 gemeten is voldeed aan de doelstelling, maar kan vanwege het uitzonderlijk warme jaar niet gebruikt worden als hanteerbaar onderzoeksresultaat. Daarom is met behulp van een simulatiemodel berekend wat het energieverbruik zou zijn geweest wanneer de VenLow Energy kas met de technische en teeltechnische eigenschappen van 2014 in een gemiddeld jaar zou zijn gebruikt. De modelresultaten geven aan dat het aannemelijk is dat ook dan het energieverbruik onder de $10 \text{ m}^3/\text{m}^2$ zou zijn gebleven.

De conclusie van dit onderzoek luidt dan ook dat de teelt van tomaten in een kas met een isolerend kasdek zoals dat van de VenLow Energy kas, voorzien van een goed energiescherm en zorgvuldig afgewerkt om de lekverliezen te minimaliseren in een gemiddeld Nederlands jaar ongeveer $10 \text{ m}^3/\text{m}^2$ nodig heeft. Voorwaarde hierbij is dat er een hoge luchtvochtigheid geaccepteerd wordt en dat het vocht dat ondanks dat toch nog moet worden afgevoerd via een energiezuinig balansventilatiesysteem plaatsvindt. Ook het teeltseizoen moet korter dan gebruikelijk gekozen worden, namelijk van half januari tot eind november. Bij gebruik van een tomatenras zoals Komeett kan daarbij een productie rond de $72 \text{ kg}/\text{m}^2$ worden verwacht, maar de beschikbaarheid van CO_2 uit alternatieve bron, dus niet gekoppeld aan het eigen gasverbruik, is dan een voorwaarde.

Summary

The Venlow Energy greenhouse is one of the research greenhouses of the Innovation and Demonstration Centre on Energy. The IDC Energy, located in Bleiswijk, aims to test and demonstrate new energy efficient greenhouse concepts. Such a low Energy greenhouse operation requires both a high insulation and an energy conserving growing strategy.

The high insulation value of Venlow Energy greenhouse is realized by the use of HR+ glass, a screening installation and a dehumidification system that recovers 80% of the sensible heat of the discharged humid greenhouse air.

In 2011, 2012 and 2013, the Venlow Energy greenhouse has shown a downward trend in energy consumption of 17.0 m³/m² to 14.5 m³/m² at a constant or even increasing production level. 14.5 m³ of natural gas equivalents per m² for more than 70 kg of tomatoes is very low, but still far from energy neutrality. And energy neutrality is the ambition set by the research program Greenhouse as Energy Source for new greenhouses in 2020.

It has to be said that energy neutrality depends not necessarily on the level of consumption. By definition, when using renewable energy sources, greenhouse operation will be energy neutral, regardless the amount of energy applied.

However, a reduction of consumption will help a lot to make a greenhouse to operate entirely on renewable energy. Therefore, the research in the VenLow Energy greenhouse in 2014 aimed on finding ways to further reduce the energy demand of the VenLow Energy greenhouse towards 10 m³ of natural gas equivalent per m² while keeping the 70 kg of tomatoes produced. For achieving this, external CO₂ (for example, OCAP (which is a pure CO₂-distribution system serving some 2000 ha of greenhouses) , or from some other source) was assumed to be applicable. Therefore there is no interference between gas consumption for heat and CO₂ supply.

Prior to the start of the practical experiment it has been examined by means of simulations in which way the desired reduction could be achieved without large additional investments. The results showed that the reduction of the leakage to values typically achieved by newly built modern greenhouses reduced the heat consumption significantly. A second measure that seemed to result in an important reduction was to limit the crop evaporation. In the third place, the improvement of the screen would contribute for some additional reduction in energy use. The availability of forced ventilation system made that the screen could be made from an air tight plastic foil.

From energy consumption point of view, limitation of crop evaporation is only relevant during heating or in the beginning of the night when the greenhouse cools down. If reduced, in those periods the extraction of latent heat from the greenhouse air is reduced and the greenhouse cools down more slowly, and/or decreases the heat demand. During the day, when the windows are opened to carry off an excess of heat, evaporation is driven by the sun and then the amount of evaporation is irrelevant for the heat consumption, which is 0. Such a selective reduction of the crop evaporation can be easily realized by accepting a higher humidity. The dehumidification system will then be used less often, and the higher humidity also tempers the evaporation. So this knife cuts both ways.

A fourth option which was expected to result in a selective reduction of the evaporation is the use of a rapidly adjustable EC in the slab. A higher EC of the slab during the night would reduce the crop evaporation and a rapid lowering of the EC during the day would allow for an easy water uptake during the day, resulting in a diurnal total evaporation similar to the reference watering strategy with a constant EC.

The experiments in 2014 showed a heat demand of 7 m³/m². Together with 1 m³/m² attributed to the electricity consumption for air circulation, the energy consumption was 8 m³/m². This figure is far below the target, but in 2014 was a historical warm year. Therefore it is difficult to determine the precise effect of the measures taken on the energy consumption based on the bare measurements.

The effect of the measures on the greenhouse climate, and especially the humidity were quite evident. The average humidity in the greenhouse in 2014 was significantly higher than in 2013 and the evaporation was lower, especially in the night and morning.

Crop production was higher in 2014 than in 2013, but there was also slightly more light over the cultivation period. All in all, it was stated that the production was not affected by the humid climate.

The application of variations in the mat EC by giving high EC water in the last one or two shots of the day and the other shots a lower than normal EC has not led to a decreased evaporation in the night. Even the contrary was found, meaning that the crop on the slab with varying EC evaporated significantly more water (19%) than the plants that grew on the slab watered with the standard irrigation protocol. Possibly this was caused by the different structure of the slab used for the varying EC treatment. It was a smaller slab having different water retention characteristics, but it is not likely that this can have such a large effect. Additional analyses on the water absorption basis on the collected drain and supply data, however, showed the same picture as the evaporation patterns that were determined by means of weighing gutters. The measurements thus seem very consistent.

The two different watering systems had no effect on crop production. Only the fruits of the plants which have been grown on the slab with varying EC remained slightly smaller, but were compensated for that with a larger number.

The low energy consumption measured in 2014 met the target, but cannot be used as an unambiguous result because of the exceptionally warm year. Therefore, the help of a simulation model was used to calculate the expected energy consumption for the VenLow Energy Greenhouse with technical and horticultural characteristics of 2014, but an average year. The model results showed that even in an average year the energy consumption would have ended up below 10 m³/m².

The conclusion of this study, therefore, is that the cultivation of tomatoes in a greenhouse with an insulating greenhouse cladding like the VenLow Energy Greenhouse, equipped with a good energy screen and properly furnished to minimize the leakage would need not more than 10 m³/m² of gas equivalents in a typical Dutch year.

This can be achieved when a high humidity is accepted and that the moisture that still has to be withdrawn is removed through an energy efficient balanced ventilation system. Also, the growing season should be somewhat shorter than usual, from mid-January to late November. When using a tomato variety like Komeett a production around 72 kg/m² can be expected, but the availability of CO₂ from alternative source, not linked to the gas consumption for heating, is a prerequisite for that.

1 Inleiding

De verduurzamingsambities van de tuinbouwsector¹ zijn hoog en het onderzoeksprogramma Kas als Energiebron, gefinancierd door het ministerie van Economische zaken en LTO glaskracht, zet daarom veel middelen in om nieuwe ontwikkelingen die hierbij nodig zijn gestalte te geven en uit te dragen. Het Innovatie en Democentrum (IDC) vormt hierbij één van de instrumenten. Dit centrum is vanaf de zomer van 2008 actief en toont nieuwe concepten voor energiezuinige kassystemen op semi-praktijkschaal.

Één van die concepten is de VenLow Energy kas. Deze kas kenmerkt zich door een kasdek met een heel hoge isolatiewaarde en gebruikt een energiezuinig ontvochtigingssysteem. In 2013 gebruikte deze kas 14.5 m³ aardgas equivalenten per m² (13 m³ voor de verwarming, 1.5 m³ voor de productie van 5 kWh elektriciteit voor de luchtcirculatieventilatoren). De kas produceerde dat jaar 72 kg tomaten, zodat het specifiek verbruik op 0.2 m³ aardgas equivalenten per kg tomaten uitkwam. Dit is de helft ten opzichte van de realisaties die in de praktijk worden behaald (bij vergelijkbare rassen).

Een gasverbruik van 14.5 m³/(m² jaar) is laag, maar nog lang niet energieneutraal, tenzij alle energie in de vorm van groene stroom of groen gas zou worden ingekocht.

Om de voor de toekomst geambieerde energieneutraliteit binnen handbereik te brengen zal het primaire energieverbruik dus nog verder moeten worden teruggebracht. Het voorliggende rapport is het verslag van een strategie om die warmtevraag onder de 10 m³/(m² jaar) te brengen. Bij een dergelijk lage warmtevraag is het niet moeilijk om deze met behulp van een warmtepomp te realiseren en zodoende de kas tegen beperkte kosten door middel van groene stroom te kunnen verwarmen.

Hoofdstuk 2 bespreekt de aanpak die gekozen is om de beoogde verlaging van de warmtevraag te realiseren. Het bleek vooral belangrijk om de verdamping-tijdens-stoken zoveel mogelijk te beperken. Daarnaast bleek het verlagen van de lek van de kas en de verbetering van het scherm bij te kunnen dragen aan de beperking van de warmtevraag.

Hoofdstuk 3 toont het resultaat van de maatregelen die genomen zijn in de teelt van 2014. Het verbruik kwam uit op 7 m³/m² voor de verwarming en 1 m³/m² dat toegerekend kan worden aan het stroomverbruik van de ventilatoren voor de kaslucht-ontvochtiging. Samen is dit 8 m³/m² en daarmee ruim onder de beoogde 10 m³/m².

Een deel van het zeer lage energieverbruik moet echter toegeschreven worden aan het historisch warme jaar 2014. Ook bleken niet alle maatregelen even effectief. De watergeef-strategie door op een kleine substraatmat met wisselende EC te werken heeft de verdamping juist verhoogd in plaats van verlaagd en de beoogde verlaging van het lekverlies is slechts ten dele gelukt.

Toch blijkt uit de berekeningen die in hoofdstuk 4 gepresenteerd worden dat een verbruik van 10 m³/m² voor een zeer productieve tomatenteelt in een kas zoals de VenLow Energy kas reëel is.

Hoofdstuk 5 bespreekt de belangrijkste conclusies uit dit onderzoek.

¹ De concrete ambities voor 2020 zijn:

(a) Nieuw te bouwen kassen zijn in 2020 energieneutraal

(b) en reductie van de jaarlijkse CO₂-emissie naar 3.6 Mton (dat is een reductie van 48% t.o.v. 1990) en

(c) de verhoging van het aandeel duurzame energie naar 20%

2 Opdeling van de warmtevraag van de VenLow Energy kas

Inleiding

De VenLow Energy kas heeft in de drie voorgaande jaren een telkens dalend energieverbruik laten zien. In 2011 was de energievraag 17.0 m³ aardgas equivalenten per m² per jaar. In 2012 was dat 15.9 m³ per m² per jaar (Kempkes, 2013) en in 2013 14.5 m³/(m² jr). Met energievraag wordt hier het verbruik voor verwarming plus het verbruik dat toegerekend kan worden aan de elektriciteit voor de aandrijving van de ventilatoren voor de ontvochtiging bedoeld. Bij de omrekening van het verbruik in kWh naar aardgas equivalenten wordt gesteld dat het Nederlands elektriciteitsnet gemiddeld 3.9 kWh per m³ aardgas equivalenten produceert.

De drie achtereenvolgende jaren laat een gestage daling zien. Deze daling is vooral gerealiseerd door de stookstrategie aan te passen, de groeibuis weg te halen en het aantal uren van de luchtcirculatie ventilator te verlagen, wat mogelijk was doordat voorheen de luchtcirculatie niet alleen voor de ontvochtiging, maar ook voor de verwarming werd gebruikt.

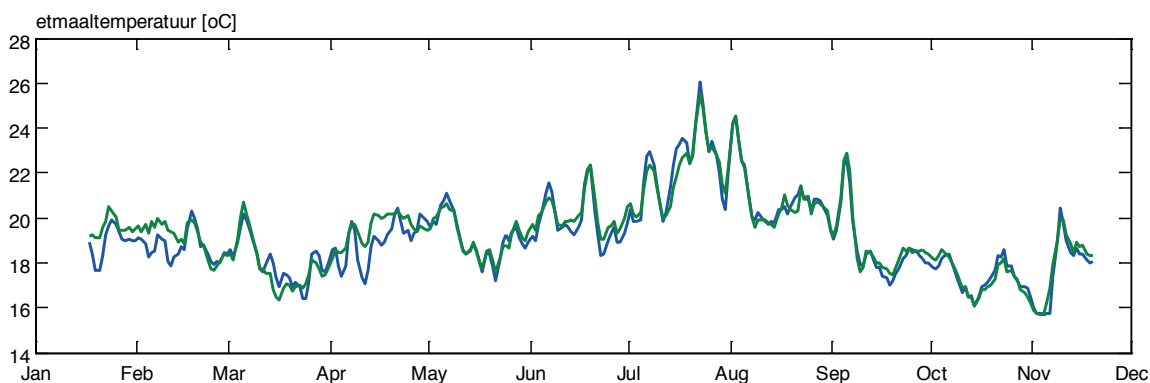
Voor het voorliggende project werd de uitdaging geformuleerd om deze neergaande lijn versneld door te zetten en het energieverbruik van de VenLow Energie kas onder de 10 m³/(m² jaar) te brengen. Mogelijkerwijs zou dit kunnen door een extra scherm aan te brengen of nóg beter glas, maar het vermoeden dat juist bij zo'n hoog geïsoleerde kas het energieverbruik voor de verdamping een substantieel deel van de warmtevraag zou zijn, maakte dat voor aanvang van het project eerst berekeningen met een simulatiemodel zijn gedaan om uit te zoeken waar het energieverbruik van de VenLow Energy kas eigenlijk precies zat.

De resultaten van deze berekeningen worden getoond en besproken in de volgende paragraaf.

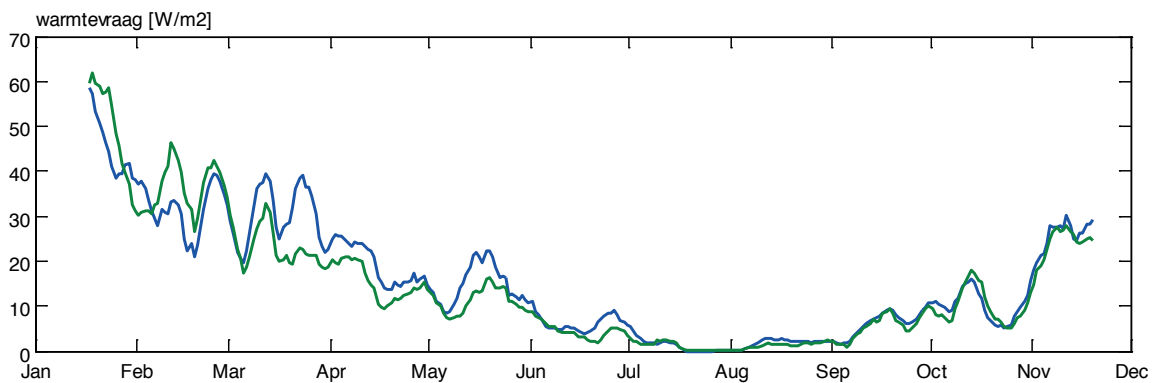
2.1 Simulatieresultaten

Voor aanvang van het voorliggend project is de gevoeligheid van het energieverbruik voor verschillende aanpassingen van de VenLow Energy kas berekend. Zo'n berekening kan alleen plaatsvinden met een model dat een goede beschrijving geeft van de fysische relaties rond het kasklimaat. Het door Wageningen UR Glastuinbouw ontwikkelde model KASPRO is zo'n model. Dit model berekent op grond van de buitenomstandigheden, de kas- en gewaseigenschappen en de regelinstellingen van de klimaatcomputer het energieverbruik en het kasklimaat.

Onderstaande figuren tonen de resultaten van het simulatiemodel in de beschrijving van het kasklimaat en het energieverbruik van de VenLow Energy kas in 2013.



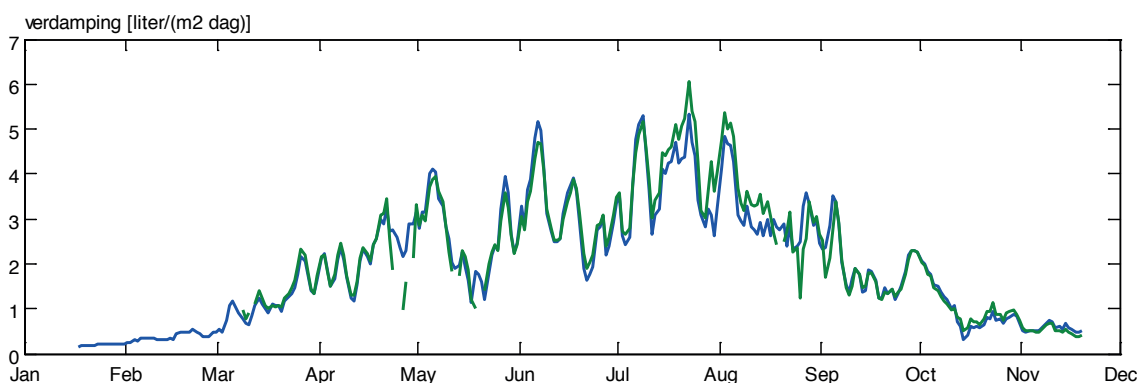
Figuur 2.1 Gemeten (groen) en gesimuleerde (blauw) etmaaltemperatuur in de VenLowKas in 2013. Om de grafiek beter leesbaar te maken is gebruik gemaakt van een voortschrijdend gemiddelde filter van 3 dagen.



Figuur 2.2 Gemeten (groen) en berekende (blauw) warmtevraag van de VenLowKas in 2013. De getoonde warmtevraag is exclusief het gevelverlies, wat in een kleine onderzoekskas als de VenLow energy kas op het IDC natuurlijk onevenredig groot is. Om de grafiek beter leesbaar te maken is gebruik gemaakt van een voortschrijdend gemiddelde filter van 7 dagen.

Simulatie en metingen komen nooit precies overeen. Deels heeft dit te maken met onvolkomenheden en vereenvoudigingen in het simulatiemodel, maar ook heeft het te maken met de instellingen van de kasklimaatcomputer die in de praktijk soms een paar keer per week worden aangepast, terwijl de variatie in klimaat-instellingen die door het simulatiemodel gebruikt worden beperkt in omvang gehouden wordt. Zo zijn er voor de stooklijn gedurende de teelt 9 verschillende instellingen gebruikt. In de eerste twee weken van de teelt een vlakke stooklijn op 19 °C, vervolgens naar de zomer toe steeds lagere voor- en nachttemperaturen. In september staat de stooklijn overdag bijvoorbeeld op 18 °C, dalend naar een voornacht op 14 °C en dan weer oplopend naar een nacht op 15 °C, beginnend 02:00 's nachts. De laatste drie weken worden de laatste vruchten afgestookt bij een vlakke stooklijn op 18 °C.

De dagelijkse gewasverdamping wordt door het model zeer nauwgezet gesimuleerd. Onderstaande figuur toont de modelresultaten (blauw), samen met de gemeten verdamping. De gemeten verdamping is bepaald aan de hand van een weegoot systeem dat op halve minuut-basis de gewichtsverandering van de mat, de drain en de gewasdraden registreert en waaruit door de formule verdamping = gift – drain – gewichtstoename Gewas de gewasverdamping wordt bepaald.



Figuur 2.3 Gemeten (groen) en berekende (blauw) gewasverdamping van de VenLowKas in 2013. Om de grafiek beter leesbaar te maken is gebruik gemaakt van een voortschrijdend gemiddelde filter van 3 dagen.

Het berekende warmteverbruik voor de VenLow Energy kas in 2013 komt op 13.1 m³/m² en de berekende verdamping op 600 liter/m².

Met het simulatiemodel kan gemakkelijk een antwoord worden gegeven op het verwachte effect van verdere verbeteringen van de kas. Het huidige dubbel glas heeft onder gebruiksomstandigheden een gemiddelde U-waarde van 1.6 W/m² K en valt daarmee onder de categorie HR+-glas. Deze warmtedoorgang zou verder verkleind kunnen worden door extra of betere low-emission coatings aan te brengen. HR++ glas, bijvoorbeeld heeft een U-waarde van 1.2 W/(m² K). In de praktijk zal zo'n lage warmtedoorgang ten koste gaan van de lichtdoorlatendheid, maar in het simulatiemodel kan gemakkelijk worden doorgerekend wat het effect van alleen zo'n verlaging van de warmtedoorgang zou opleveren. Het blijkt dat een 25% verlaging van de warmtedoorgang het verbruik van de eerder genoemde 13.1 m³/m² terug brengt naar 11.3 m³/m². De 25% verlaging van de warmtedoorgang van het kasdek geeft daarmee 14% verlaging van de warmtevraag. Hieruit blijkt duidelijk dat het warmteverlies door het kasdek zeker niet de enige verliespost is. Een andere component waar onverwacht veel warmte in gaat zitten is namelijk het lekverlies van de kas.

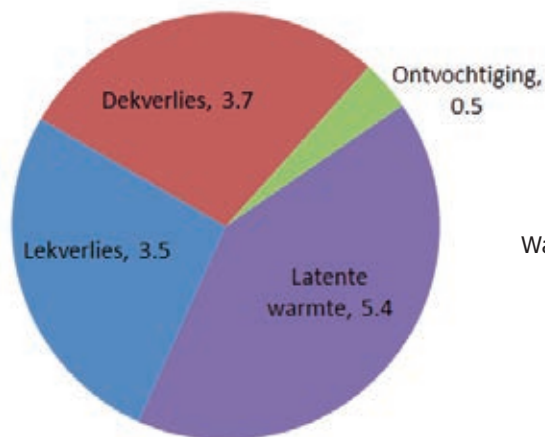
De VenLow Energy kas is in 2010 als kas met een nieuwe dek op een bestaande onderbouw neergezet; de onderbouw van de voormalige FlowDeck Kas (de Zwart, 2010). Met behulp van tracergas metingen is vastgesteld dat het lekventilatievoud bij gemiddelde windsnelheid (4 m/s) rond de 0.5 ligt, wat betekent dat er dan 3 m³/(m² uur) wordt uitgewisseld. Dit is een heel hoog lekverlies. Voor een moderne, goed afgewerkte kas mag een lekventilatievoud bij gemiddelde windsnelheid van 0.2 worden verwacht. Na verandering van het lekventilatieverlies met die realistisch factor 2/5 daalde het berekende gasverbruik van 13.1 naar 11.1 m³/m². Blijkbaar is het minimaliseren van de lek net zo effectief als de overstap van HR+ naar HR++ kwaliteit. Met het simulatiemodel kan het lekverlies ook op 0 worden gezet. Een praktisch onmogelijke waarde, maar illustratief in de analyse van de verbruikcomponenten in het warmteverbruik. Bij een lekverlies 0 daalt de berekende warmtevraag naar 9.6 m³/m².

Behalve een verhoging van de isolatiegraad van het kasdek zou het warmteverlies van de kas ook verlaagd kunnen worden door plaatsing van een extra scherm. Zo'n tweede energiescherm in de groenteteelt is meestal een gealuminiseerd scherm, type TEMPA 8570 of gelijksoortig). Het simulatiemodel berekent hiervoor een verlaging van 13.1 naar 11.3 m³/m². Dit betekent een verlaging van 1.8 m³/m².

Het feit dat de afname van energieverbruik klein is bij op het eerste gezicht grote verhogingen van de isolatie van de kas komt doordat een belangrijk deel van de warmtevraag wordt veroorzaakt door de verdamping van het gewas. De meeste verdamping is gerelateerd aan zonlicht en kost dus geen energie, maar ook gedurende de nacht en op sombere dagen verdampt het gewas water. Voor die verdamping neemt het warmte op uit de kaslucht. Het gewas is dan kouder dan de kaslucht. Een deel van deze waterdamp lekt weg met de leklucht en een deel wordt actief afgevoerd met de ontvochtiging. Met deze afvoer van waterdamp verdwijnt de latente warmte uit de kas.

Met het simulatiemodel kan de hoeveelheid stookenergie die met de verdamping gemoeid is worden berekend door in het model de verdamping te blokkeren. Dit kan gemakkelijk door de huidmondjesweerstand in het model heel hoog te maken. Voor de VenLow Energy kas met de teelt en het buitenklimaat van 2013 daalt de warmtevraag door het blokkeren van de verdamping volgens het model naar 7.2 m³/m². De gewasverdamping kost kennelijk 5.9 m³ gas per m² per jaar. Het grootste deel hiervan zit in de opname van latente warmte door het gewas en een klein deel (0.5 m³/m²) zit in het verlies van voelbare warmte tijdens ontvochtiging. De VenLow Energy kas heeft weliswaar een balansventilatiesysteem met voelbare warmteterugwinning, maar deze installatie haalt niet alle warmte terug. 20% van het temperatuurverschil tussen binnen- en buitenlucht kan tijdens de ontvochtiging niet worden teruggewonnen.

Onderstaande grafiek toont de opdeling van de warmtevraag van de VenLow Energy kas naar de verschillende componenten.



Warmtevraag VenLow Energy kas in 2013: 13.1 m³/m²

Figuur 2.4 Opdeling van de warmtevraag van de VenLow Energy kas in 2013 naar verschillende componenten.

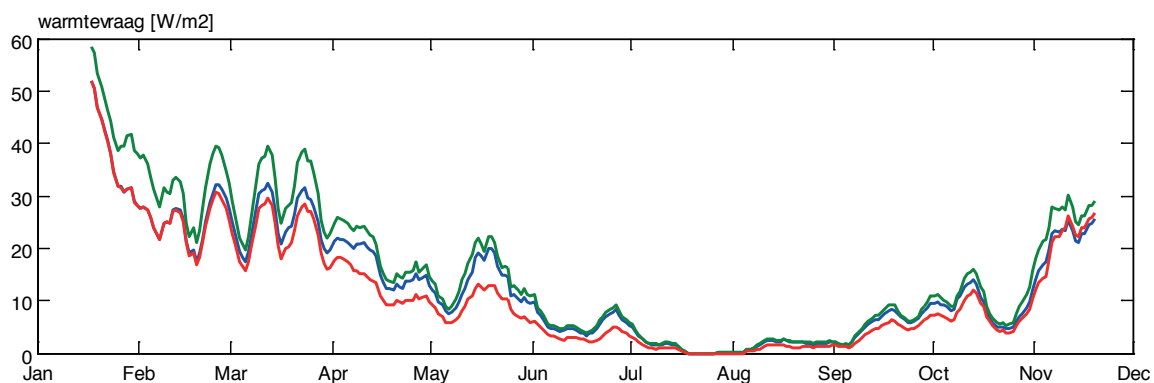
Gegeven de doelstelling om de warmtevraag van de VenLow Energy kas onder de 10 m³/m² per jaar te brengen en de analyse van de energieverbruikcomponenten, is het niet realistisch om de beoogde verlaging te zoeken in nog beter isolerend glas of een extra scherm installatie. Beide maatregelen leveren weinig besparing op in vergelijking tot de kosten die daarmee gemoeid zijn.

Het lekverlies kan echter naar verwachting wel naar een niveau worden gebracht wat voor nieuwbouw kassen goed haalbaar is, waarmee 2 m³/m² jaar bespaard zou kunnen worden.

De grootste warmteverbruikende component in de warmtevraag is echter de gewasverdamping en het lijkt daarom verstandig om te onderzoeken of die naar beneden gebracht kan worden. Mogelijkheden die hiervoor zijn genoemd in een recente bureaustudie (de Gelder, 2014) zijn het verhogen van de luchtvochtigheid in de kas en het verhogen van de EC. EC-verhoging is een algemeen bekende factor die de verdamping verlaagt. Een hogere EC geeft in de regel echter ook een verlaging van de productie, hoewel de smaak van het product vaak tegelijkertijd verbetert. Ondanks de smaakverbetering is een productieverlaging meestal ongewenst omdat de ervaring in de praktijk leert dat een betere smaak niet direct resulteert in een hogere prijs.

Van de twee genoemde opties om de verdamping te verlagen blijft dus alleen de verhoging van het luchtvochtigheidssetpoint over en samen met een verlaging van het lekverlies zou het warmteverbruik van de VenLow Energy kas onder de 10 m³/m² uit kunnen komen.

Onderstaande grafiek toont de warmtevraag zoals die voor 2013 is berekend met de kas- en klimaatinstellingen die toen zijn gehanteerd (dus een kopie van de groene lijn van figuur 2.2) en de warmtevraag na de verlaging van de lek naar de norm voor een moderne, nieuwe kas en een verhoging van het luchtvochtigheidssetpoint naar 90%.



Figuur 2.5 Verlaging van de warmtevraag door vermindering van het lekverlies (blauwe lijn) en de vermindering van het lekverlies + een verhoging van het luchtvochtigheidssetpoint naar 90% (rood). De groene lijn is een kopie van de groene lijn in figuur 2.2 en is de berekende warmtevraag van de kas zoals die was in 2013 met de daarbij behorende klimaatinstellingen. Alle lijnen gelden voor een kas exclusief gevelverlies. Om de grafiek beter leesbaar te maken is gebruik gemaakt van een voortschrijdend gemiddelde filter van 7 dagen.

De grafiek laat zien dat in het begin van de teelt, met een jong gewas, de verhoging van het luchtvochtigheidssetpoint geen effect heeft. Het gewas verdampt immers nog niet veel en de RV blijft daardoor vanzelf laag. Door de lage buitentemperaturen in die periode heeft het verkleinen van de lek een grote invloed. Verderop in de teelt heeft juist het verhogen van het luchtvochtigheidssetpoint een groot effect. Het berekende warmteverbruik met de buitenklimaatomstandigheden van 2013 na vermindering van de lek en verhoging van het luchtvochtigheidssetpoint komt op $9.6 \text{ m}^3/\text{m}^2$ over de teeltperiode van 17 januari tot 20 november. Als dan ook nog het bestaande bandjesscherf wordt vervangen door een goed sluitend foliescherf zakt het berekend gasverbruik verder naar $9.2 \text{ m}^3/\text{m}^2$ per jaar en zou een kas op praktijkschaal zelfs inclusief het gevelverlies op $10 \text{ m}^3/\text{m}^2$ per teeltseizoen uit kunnen komen. Daarmee zouden de genoemde maatregelen aan het gestelde doel voldoen.

2.2 EC-regeling

Een categoriale EC-verhoging is in de vorige paragraaf als onwenselijk afgedaan. Tegen de achtergrond van de doelstelling om de verdamping te beperken uitsluitend ten behoeve van de vermindering van het energieverbruik, en niet noodzakelijkerwijs ten behoeve van de vermindering van het totale waterverbruik, zou er gedacht kunnen worden aan het gebruik van wisselende EC-niveaus. Zo zou de EC gedurende de nacht verhoogd kunnen worden om de verdamping te remmen en gedurende de dag verlaagd kunnen worden om de zonlicht-aangedreven verdamping te stimuleren.

Een dergelijk experiment is nog niet eerder op semi-praktijkschaal uitgevoerd en daarom is in het kader van het onderzoek naar energiebesparing door verdampingsremming voorgesteld om in 2014 twee watergift-systemen in de VenLow Energy kas te gebruiken. Het ene systeem, op de even goten, bestaat uit de standaard 15 liter substraatmatten, matten van 15 cm breed en 10 cm hoog. Het andere systeem op de oneven goten bestaat uit matten met 8 liter inhoud, 10 cm breed en 8 cm hoog. Door de laatste druppelbeurt van de dag een hoge EC mee te geven (5 tot 5.5 dS/m) en de rest van de druppelbeurten een lage EC (2.3 tot 2.5 dS/m) kan de gemiddelde EC van de watergift gelijk worden gehouden aan die van het standaard systeem (meestal rond de 2.8 dS/m) terwijl er variatie in de EC in de mat kan worden aangebracht. Verwacht wordt dat deze EC-strategie nog een extra reductie van de verdamping in de nacht kan opleveren.

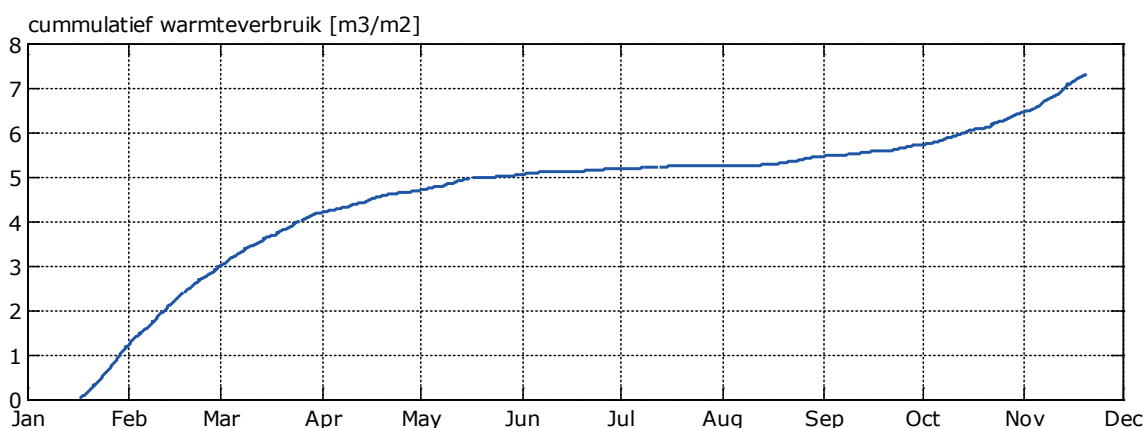
3 Resultaat van het experiment in 2014

Het experiment in de VenLow Energy kas heeft resultaten ten aanzien van energie en klimaat opgeleverd en resultaten op het gebied van de teelt. Beide aspecten worden in dit hoofdstuk beschreven.

3.1 Energie en klimaat

Het experiment in 2014 is op dezelfde datum gestart als het experiment in 2013, wat betekent dat de kas op 17 januari met het nieuwe gewas is volgezet. Vanaf die datum is de teelt 308 dagen gevolgd (tot 20 november) en zijn het energieverbruik, het klimaat en de verdamping in kaart gebracht.

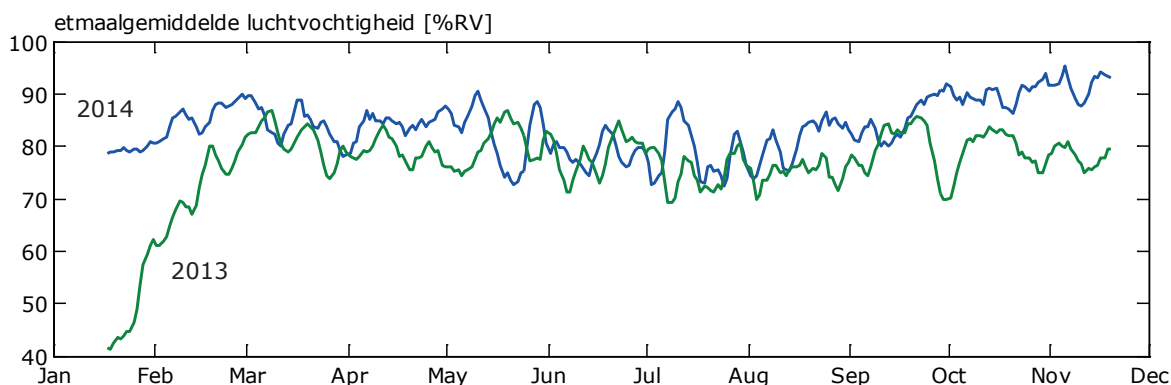
Onderstaande grafiek toont het geregistreerde warmteverbruik.



Figuur 3.1 Gemeten warmteverbruik van de VenLow Energy Kas in 2014. De getoonde warmtevraag is exclusief het gevelverlies, wat in een kleine onderzoekskas als de VenLow energy kas op het IDC onevenredig groot is.

De warmtevraag (exclusief gevelverlies) bedroeg over het teeltseizoen nog geen 7.5 m³/m². Voor een teelt op praktijkschaal, inclusief het gevelverlies zou dit een verbruik van 8.4 m³/m² betekenen, ruim onder de doelstelling van 10 m³/m² per jaar.

De vermindering van het verbruik is te danken aan de verminderde lek in de kas, het betere scherm en de hogere luchtvochtigheid, maar ook aan het uitzonderlijk warme jaar, waarover meer in het volgende hoofdstuk. De hogere luchtvochtigheid blijkt duidelijk uit onderstaande grafiek.

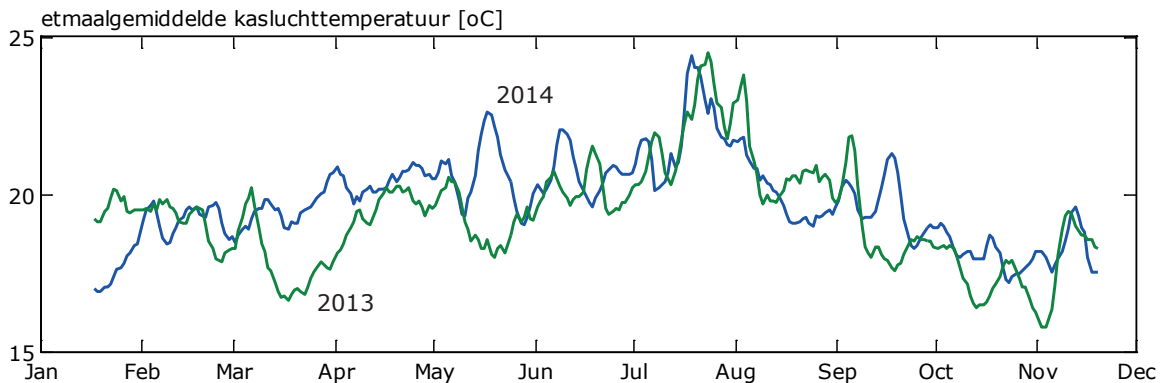


Figuur 3.2 Etmaalgemiddelde luchtvochtigheid in de VenLow Energy kas in 2014 (blauw) en in 2013 (groen). Voor een betere leesbaarheid is een voortschrijdend gemiddelde filter van 5 dagen gebruikt.

Vooral in het begin van de teelt is het verschil in luchtvochtigheid groot. In die periode verdampt het gewas weinig en wanneer het buiten koud is en de kas een groot lekverlies heeft, zoals in 2013 het geval was, blijft de luchtvochtigheid laag.

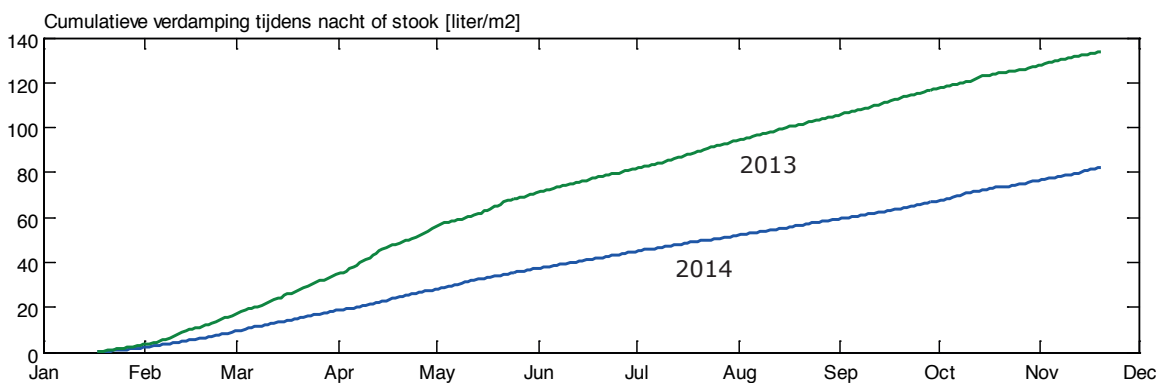
Het setpoint dat voor de luchtvochtigheid was ingesteld was een verzadigingsdeficit van 1 gram/m³ in het begin van de teelt, 2 gram/m³ vanaf mei en weer terug naar 1 gram/m³ vanaf augustus. Vanaf eind augustus werd wel elke dag rond de opstookperiode iets meer geventileerd omdat het setpoint tussen 2 uur voor zon op en 2 uur na zon op steeds naar 2 gram/m³ werd verhoogd.

De gemiddelde kasluchttemperatuur was in 2014 19.8 °C en in 2013 19.3 °C. De lagere temperatuur van 2013 kwam vooral door het koude en donkere voorjaar. Over de rest van het jaar waren teelttemperaturen goed vergelijkbaar maar lagen de uitschieters uiteraard in andere weken.



Figuur 3.3 Etmaaltemperatuur in 2014 (blauw) en in 2013 (groen). Voor een betere leesbaarheid is een voortschrijdend gemiddelde filter van 5 dagen gebruikt.

Het verwachte effect van de instelling van het hogere luchtvochtigheidssetpoint was dat de verdamping 's nachts en tijdens de momenten dat de kas gestookt werd in 2014 lager zou zijn dan in 2013. Onderstaande grafiek, die gebaseerd is op de verdamping zoals die uit de weeggoet berekend kan worden (zie paragraaf 2.1) laat zien dat dit zo lijkt te zijn. De grafiek is de cumulatie van de hoeveelheid water die 's nacht verdampt wordt (dus als er geen zonlicht is die de verdamping aandrijft) of overdag op momenten dat de verwarming meer dan 10 W/m² afgeeft.

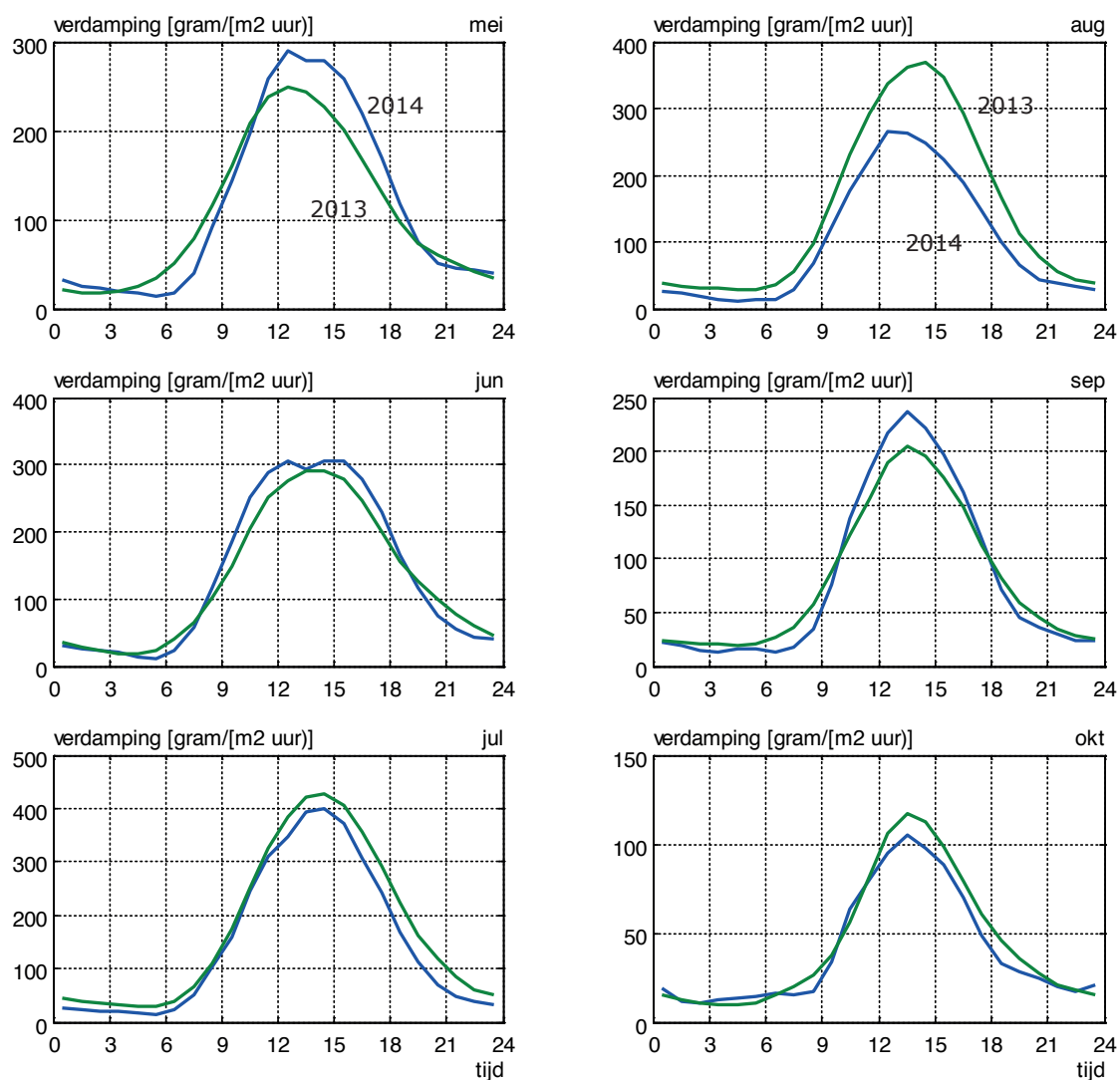


Figuur 3.4 Cumulatieve gewasverdamping in de nacht of tijdens momenten dat de verwarming meer dan 10 W/m² levert. De blauwe lijn geldt voor 2014 en de groene voor 2013.

In figuur 3.4 zijn grofweg twee delen in de grafiek te onderscheiden. In de periode tot begin mei is de verdamping tijdens de nacht of tijdens het stoken in 2013 veel groter was dan in 2014. Vanaf mei, is het verloop van de twee lijnen heel vergelijkbaar, maar is er een duidelijk hellingsverschil. In 2013 was de verdamping tijdens de nacht of tijdens stoken in die periode 0.36 liter per dag en in 2014 was die 0.26 liter per dag.

Aan het eind van de teelt van 2014 had het gewas in de nacht of tijdens stoken overdag bijna 60 liter water per m² minder verdampt dan in 2013. Ook verdamping overdag op momenten zonder verwarming was in 2014 en 2013 nagenoeg gelijk (respectievelijk 511 liter/m² en 510 liter/m²). De vermindering van de verdamping heeft dus, zoals beoogd, plaatsgevonden juist op momenten dat de verdamping energie kost, hetzij direct in de vorm van stook-energie of in de vorm van een iets sneller afkoelende kas in de nacht.

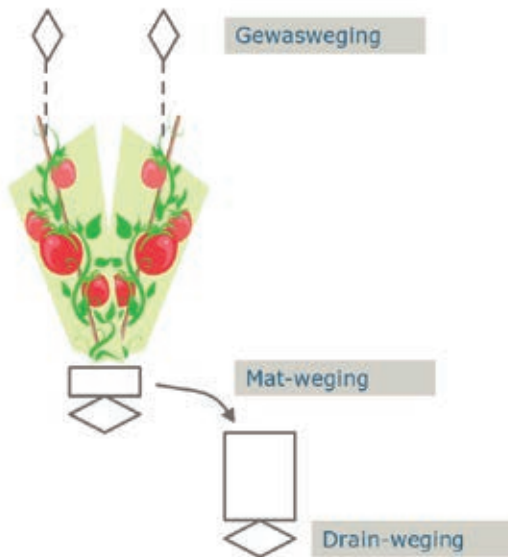
Onderstaande figuren laten dit effect op nog een andere manier zien. In de figuur is het gemiddelde patroon van de verdamping per maand voor de maanden mei t/m november getoond. Dit is de periode waarin de verdamping tijdens de nacht of tijdens stoken in 2014 stelselmatig iets lager lag dan in 2013. In de figuren is dat terug te zien doordat de blauwe lijn (2014) in de ochtend en avond steeds lager lag dan de groene lijn (2013).



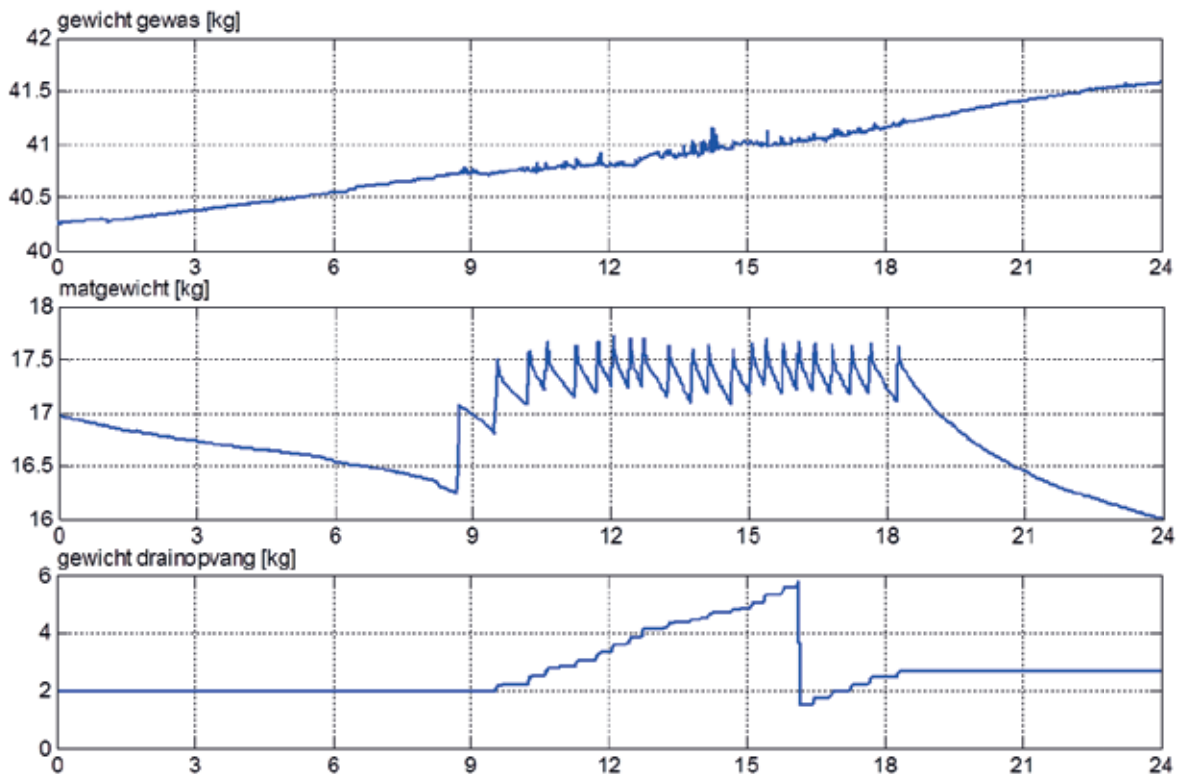
Figuur 3.5 Gemiddeld etmaalverloop van de de verdamping per maand in 2014 (blauw) en in 2013 (groen).

Bovenstaande verdampingspatronen zijn de cyclische gemiddelden van de gewasverdamping die bepaald is door het gewicht van 3 weegschalen in de tijd te volgen. Figuur 3.6 toont een schets van deze opstelling. De bovenste weegunit bestaat uit een raamwerk van 4 krachtopnemers waaraan een frame hangt waar de gewashaken aan worden opgehangen. Aangezien de stengels van een tomatengewas geen steunende functie hebben, zeker wanneer het gewas zijn hoogste punt heeft bereikt en elke week een stukje opzij wordt geschoven, geeft de bovenste weegunit goed het totale gewasgewicht weer. De middelste weegschaal geeft het gewicht van de mat plus potjes en het water wat door de mat wordt vastgehouden. De onderste weegschaal toont het gewicht van het water wat via drain uit de mat loopt.

Figuur 3.7 toont het resultaat van de weegschalen op een zonnige dag. Dat het hier een zonnige dag betreft blijkt uit het grote aantal irrigatie-momenten in de middelste grafiek. Het zijn in totaal 22 doseringen, waarvan de eerste grote puls een uitgestelde irrigatiepuls betreft en de volgende steeds na elke 110 J/cm² worden gegeven. De stralingsom over deze dag was dan ook 2350 J/cm². Uit de grafiek (matgewicht) is direct af te lezen dat de eerste puls 0.8 liter water betrof, de tweede 0.6 en de rest van de pulsen steeds 0.5 liter water gaven.



Figuur 3.6 Weegstelsel voor de bepaling van de gewasverdamping.



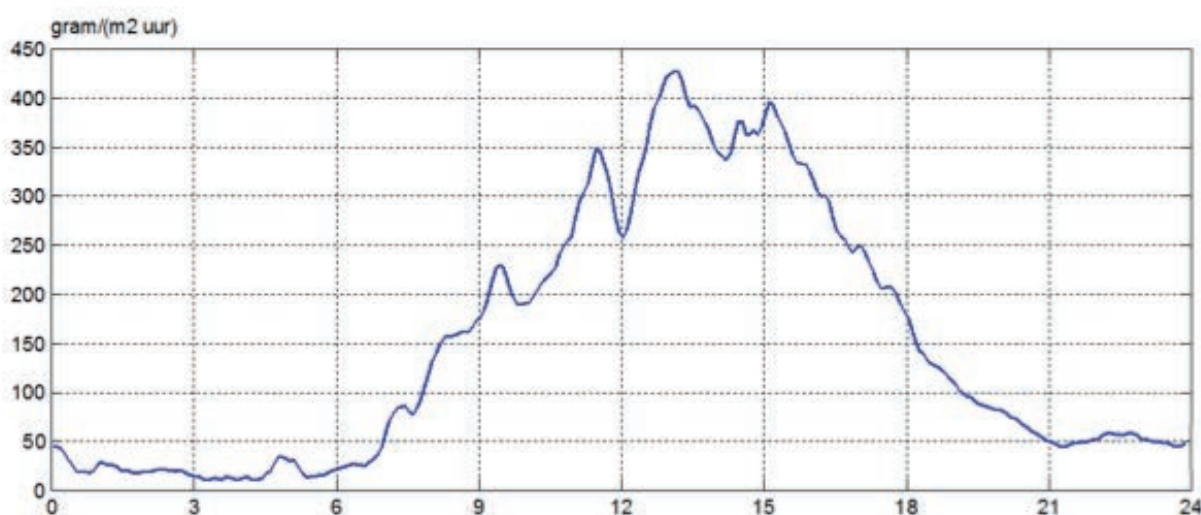
Figuur 3.7 Resultaat van de drie weegschalen van het weegstelsel op een zonnige dag (2 juli 2014).

De onderste grafiek (drain) laat zien dat de plant minder water opneemt dan er via de irrigatie wordt gegeven. Dit is bewust omdat de drain die uit de mat terug komt een praktische terugkoppeling geeft over het irrigatiebeleid. Er wordt in deze teelt gestreefd naar een drainpercentage van 30%. Zowel het waterverbruik als de watergift zijn sterk gekoppeld aan de hoeveelheid zonlicht en als dit drainpercentage min of meer constant blijft zonder de watergift-parameters te hoeven veranderen is dit een zeer bruikbare indicatie voor een evenwichtige gewasgroei.

Opvallend aan de bovenste grafiek van figuur 3.7 is de vrijwel rechtlijnige toename van het gewicht van het gewas. Kennelijk is de groei van vruchten en bladeren een proces wat gedurende 24 uur met een vrijwel gelijke tred voortgaat. De berekening van de verdamping uit de lijnen die in figuur 3.7 zijn vertoond volgt uit de stelling dat

$$\text{verdamping} = \text{gewichtsafname mat} - \text{gewichtstoename gewas} - \text{gewichtstoename drain}$$

Uiteraard kan deze formule alleen worden toegepast op de stukjes van de grafiek die niet beïnvloed worden door de watergift-pulsen (de opgaande stukjes in de middelste grafiek) en het leegpompen van de drain-opvangbak (de neergaande stukjes van de onderste grafiek). Op deze dag (2 juli) loopt het gewicht van het gewas heel constant, maar een paar keer per week zijn er ook heftige veranderingen in de bovenste grafiek te zien, namelijk bij gewashandelingen zoals zakken, oogsten, bladbreken of spuiten. Al deze abrupte veranderingen zijn echter vrij eenvoudig uit de grafieken weg te filteren en met de wetenschap dat de weeggoet 2.55 m² kasoppervlak vertegenwoordigt kan voor deze dag het onderstaande verdampingsverloop worden berekend.



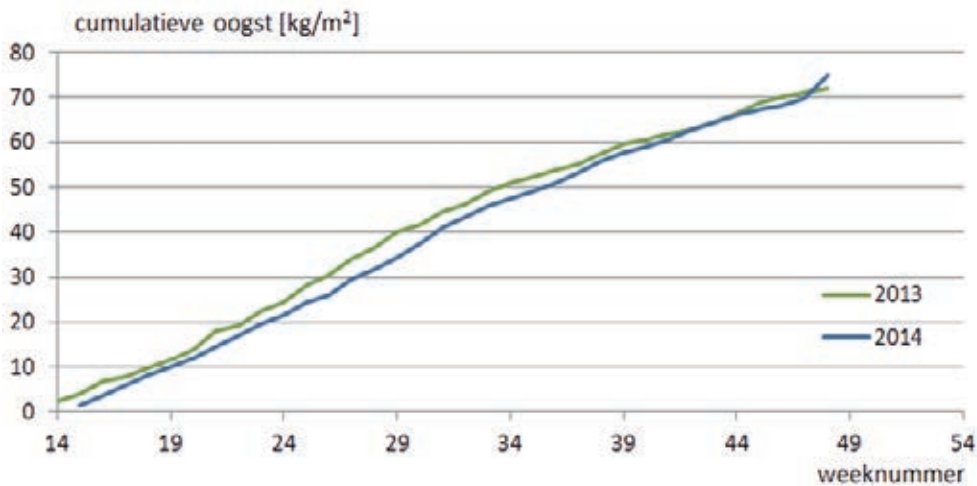
Figuur 3.8 Berekende verdamping uit de resultaten van de drie weegschalen van het weegstelsel op 2 juli 2014.

De berekening zoals hierboven uiteengezet, is voor alle dagen en voor beide meetgoten uitgevoerd. Voor de verdampingsgetallen van 2014 zijn de berekende verdampingspatronen van de twee meetgoten gemiddeld tot 1 verdampingspatroon. In 2013 zat er slechts één weegstelsel in de VenLow Energy kas.

3.2 Teelt en productie

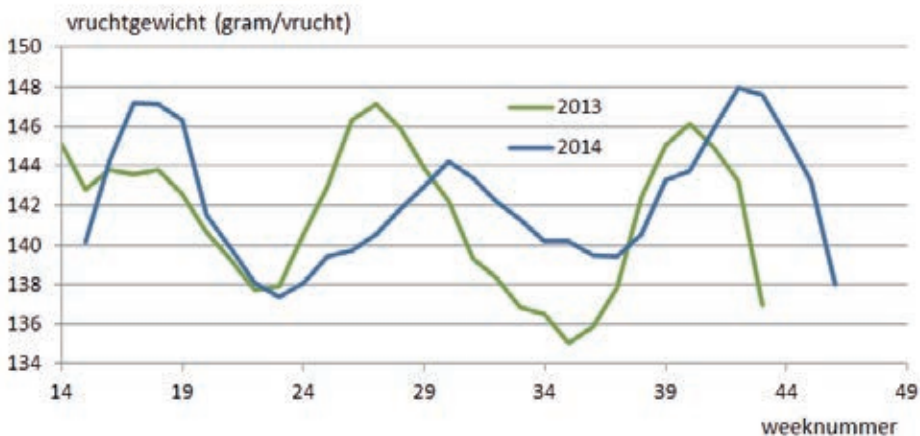
Net als in 2013 is de teelt in de VenLow Energy kas op 17 januari gestart. Een late planting betekent een duidelijke energiebesparing met een beperkt effect op de productie, hoewel de eerste oogst bij een late planting wel 1 of twee weken later in het jaar valt.

De plantdichtheid is gestart met 2.55 planten per m². In week 8 is bij de helft van de planten een extra stengel aangehouden zodat de plantdichtheid toenam naar 3.83 planten per m². Er is gebruik gemaakt van het ras Komeett en de totaalproductie kwam uit op 74.8 kg/m², wat een prima productie is.



Figuur 3.9 Cumulatieve oogst uit de VenLow Energy kas in 2013 (groen) en 2014 (blauw).

De grafiek laat zien dat de oogst in 2014 een week later begon, wat veroorzaakt werd door de kleinere planten waarmee de teelt is begonnen (de zaaidatum bij de plantenkweker lag bij de teelt van 2013 2 weken eerder dan bij de teelt in 2014). Gedurende de teeltperiode heeft het oogstverloop min of meer parallel gelopen aan de oogst in het vorig jaar, die op 72 kg/m² uit kwam. De 2.8 kg verschil in productie kwam vooral door de grote laatste oogst, maar het teeltseizoen kende ook een 3.8% hoger aanbod aan zonlicht. De oogst- en lichtverschillen tussen de twee jaren zijn zo klein dat hier gesteld wordt dat de teelt in deze twee jaren hetzelfde is verlopen. Het vruchtgewicht was ook vergelijkbaar, zoals te zien is in onderstaande grafiek.



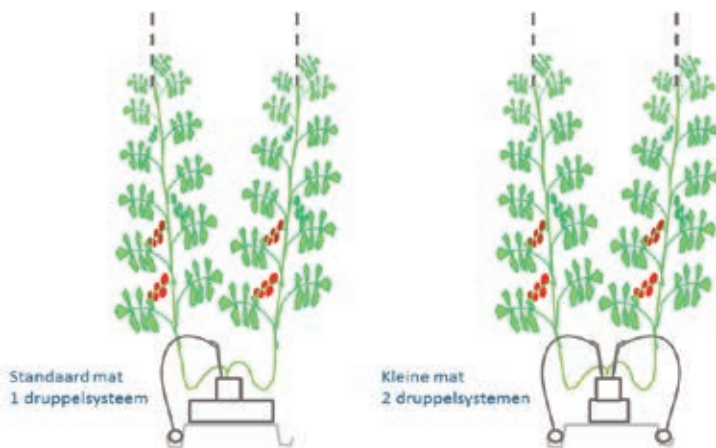
Figuur 3.10 Gemiddeld vruchtgewicht van de tomaten in 2013 (groen) en 2014 (blauw). Om de grafiek beter leesbaar te maken is er een voortschrijdendgemiddelde filter toegepast van 5 weken.

De realisatie van het gewenste vruchtgewicht vindt vooral plaats via vruchtsnoei. De beslissingsruimte is bij een grove trostomaat zoals Komeett klein (je kunt niet anders dan 4, 5, 6 en soms 7 vruchten aanhouden) en daarom is er altijd een zekere variatie in het gemiddeld vruchtgewicht. Toch lukt het ondanks deze beperking goed om het vruchtgewicht in de range van 140 tot 145 gram/vrucht te houden.

De teelt heeft geen noemenswaardige problemen met schimmelziekten vertoond, maar dat heeft ook te maken met de beschikbaarheid met Luna Privilege®. Dit gewasbeschermingsmiddel, wat nu een paar jaar op de markt is, is bij beginnende aantasting met Botrytis meegegeven met het druppelwater en leidt dan tot voldoende onderdrukking van de infectie. In de teelt van 2014 is dit twee keer toegepast, net zoals in 2013.

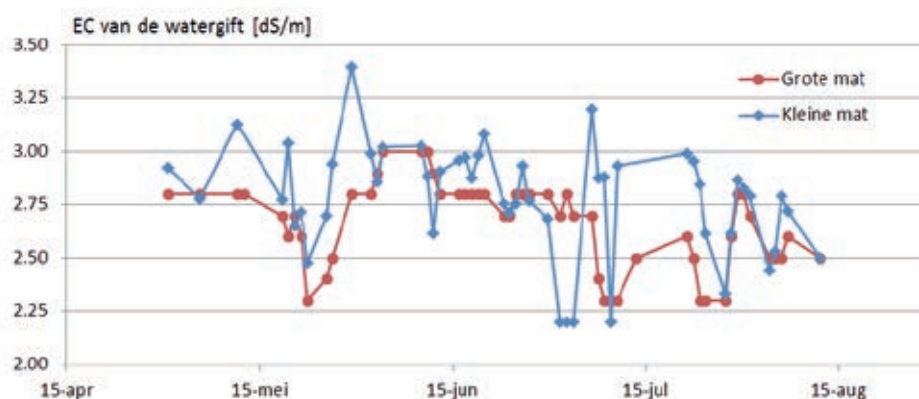
In paragraaf 2.2 is aangegeven dat een additionele verlaging van de verdamping verwacht werd van een nachtelijke EC verhoging. Het experiment hiertoe werd uitgevoerd door de goten waar een kleine substraatmat was geplaatst te voorzien van twee druppelsystemen. Gedurende de dag kreeg het gewas via het ene systeem water met een wat lagere EC dan die met het water op de even goten (met een standaardmat) werd gegeven. De laatste en soms ook de een na laatste druppelbeurt kreeg de kleine substraatmat via een ander druppelsysteem, waarin water met een hoge EC werd gegeven.

3.3 Effect EC-behandeling



Figuur 3.11 Uitvoeringswijze van het watergeef-systeem dat het mogelijk maakt om met frequent wisselende EC's water te geven.

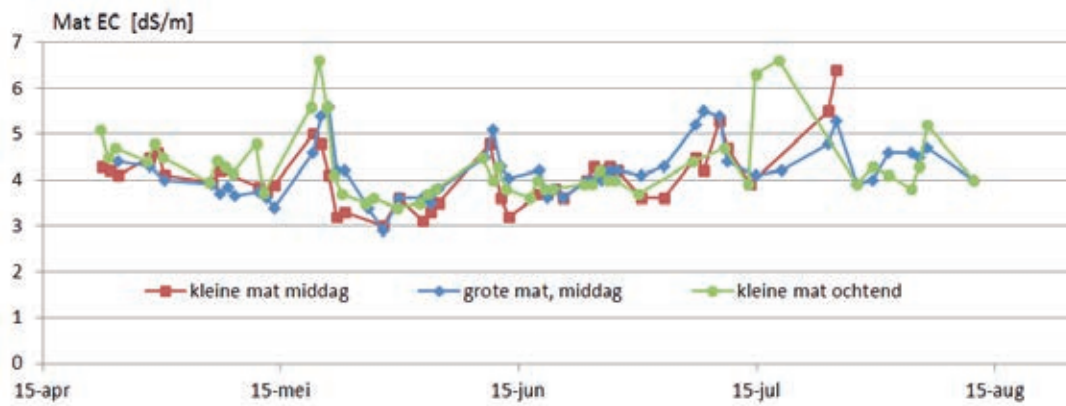
Het opgebouwde systeem was goed in staat om de gemiddelde EC van de watergift tussen de even en oneven goten vergelijkbaar te houden. Onderstaande grafiek toont het verloop van die EC over de periode van eind april tot begin augustus. In de eerste maanden kregen alle matten dezelfde EC met 1 druppelsysteem en in de resterende periode vanaf begin augustus is de regeling die in de periode daaraan voorafgaand was toegepast doorgezet.



Figuur 3.12 EC van de watergift op de grote matten (even goten) en gemiddelde EC van de watergift op de kleine matten (oneven goten).

Alleen rond 15 juli is de gemiddelde EC van het water dat aan de kleine matten werd gegeven een tijdje stelselmatig hoger geweest dan het water waarmee de grote matten werden voorzien. De gemiddelde EC, zoals getoond in de lijn voor de kleine mat is berekend uit het naar hoeveelheid gewogen gemiddelde van de EC van het water dat via de ene druppelslang werd gegeven en de EC van het water dat via de andere druppelslang werd gegeven.

De behandeling resulteerde inderdaad in een EC in de mat die 's ochtends meestal wat hoger en 's middags (gemeten rond 16:00) meestal lager was. Dit blijkt uit onderstaande grafiek.

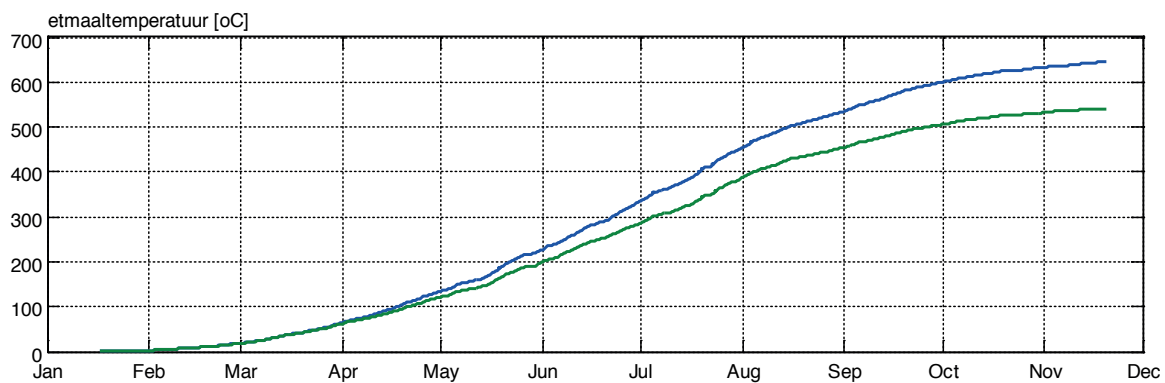


Figuur 3.13 Mat EC van de grote matten, gemeten rond 16:00 en op de kleine matten, gemeten in de middag en in de ochtend.

De EC verschillen zijn echter klein, wat achteraf niet verwonderlijk is aangezien zelfs bij een kleine mat de waterinhoud ongeveer 5 keer zo groot is als de hoeveelheid water die met de laatste twee druppelbeurten wordt gegeven. Een verhoging van de mat-EC met bijvoorbeeld 1 dS/m zou betekenen dat de EC van het druppelwater rond de 10 zou moeten liggen en dergelijk hoge EC-waarden kunnen niet gegeven worden in verband met verstoppingsgevaar.

Om verschillen in verdamping tussen de twee mat-systemen te kunnen bestuderen was de VenLow Energy kas in 2014 uitgerust met twee van de weegsystemen zoals besproken bij figuur 3.6.

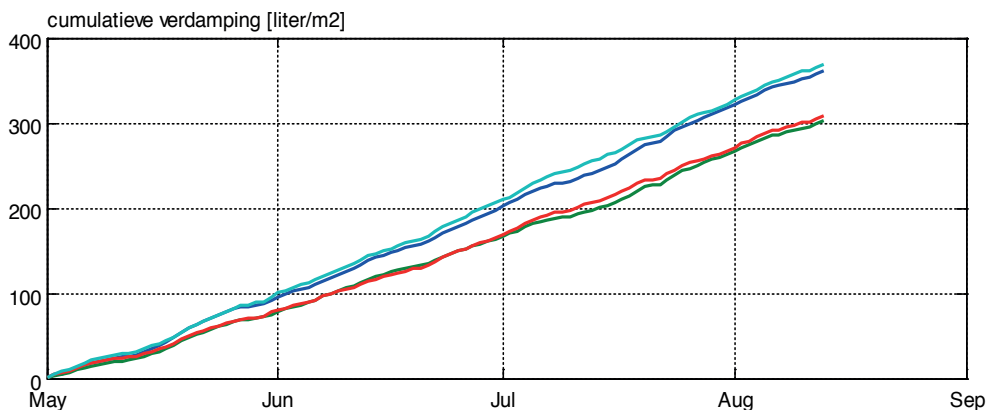
Onderstaande figuur laat de cumulatieve verdamping zien die voor de beide matten is gemeten. De twee lijnen tonen een groot verschil, namelijk een totaal van 645 liter voor de blauwe lijn en 540 liter voor de groene lijn. Tegen de verwachting in is het echter juist de kleine mat, waar het wisselende EC-regime heeft geheerst, die het meeste heeft verdampt. Ten opzichte van de grote mat, die volgens het standaard irrigatieprotocol water kreeg, verdampte het gewas op de kleine mat 19% meer.



Figuur 3.14 Cumulatieve verdamping in de kleine mat (blauw) en in de grote mat (groen).

Uiteraard is er gecontroleerd of er geen verwisseling in sensornummering heeft plaatsgevonden en of de procedure zoals beschreven rond figuur 3.7 correct heeft gewerkt. Over een deel van de periode, namelijk van 1 mei t/m 12 augustus, zijn er parallel aan de metingen van de weeggoten ook metingen gedaan aan de watergift en de drain door middel van het opvangen en registreren van de dagelijkse hoeveelheid water die via de druppelaars werd gegeven en de hoeveelheid water die via de drain werd afgepompt. De hoeveelheid water afgegeven door de druppelaars werd bepaald door van de drie watergeef systemen (de druppelleiding van de grote mat en de beide druppelleiding van de kleine mat) een extra druppelaar water te laten geven in een maatbeker die iedere dag werd geleegd nadat de verzamelde hoeveelheid water was genoteerd. De drain per goot werd bepaald door de hoeveelheid water die per dag onder de twee weeggoten werd weggepompt (zie figuur 3.6 en figuur 3.7) niet direct af te voeren maar eerst in een emmer op te vangen en dagelijks deze twee emmers te legen nadat de inhoud was bepaald en opgeschreven. De watergift over de periode van 1 mei t/m 12 augustus was gemiddeld 5.2 liter/m² per dag voor de kleine mat en 4.4 liter/m² voor de grote mat. De hogere gift (onder andere nodig om de EC in de nacht te kunnen verhogen) leidde niet tot een hoger drain percentage. Het drainpercentage van de kleine mat was met 32% zelfs kleiner dan die van de grote mat, waar gemiddeld 34% drain werd waargenomen. De wateropname door het gewas op de kleine mat was dus beduidend hoger dan dat van de grote mat.

Onderstaande figuur toont de verdamping zoals bepaald via de twee weeggoten en zoals bepaald uit de dagelijkse registratie van de wateropname uit gift minus drain. Wateropname is niet gelijk aan verdamping. Gedurende de teelt wordt ongeveer 90 kg aan plantmassa geproduceerd wat ongeveer 80 kg water is en ongeveer 10 kg droge stof. Bij een verdamping van ongeveer 600 liter/m² is de wateropname dus 680 liter/m², dus $680/600 = 1.13$ maal de verdamping. De wateropname berekend uit gift minus drain is dus door 1.13 gedeeld om de verdamping te berekenen.



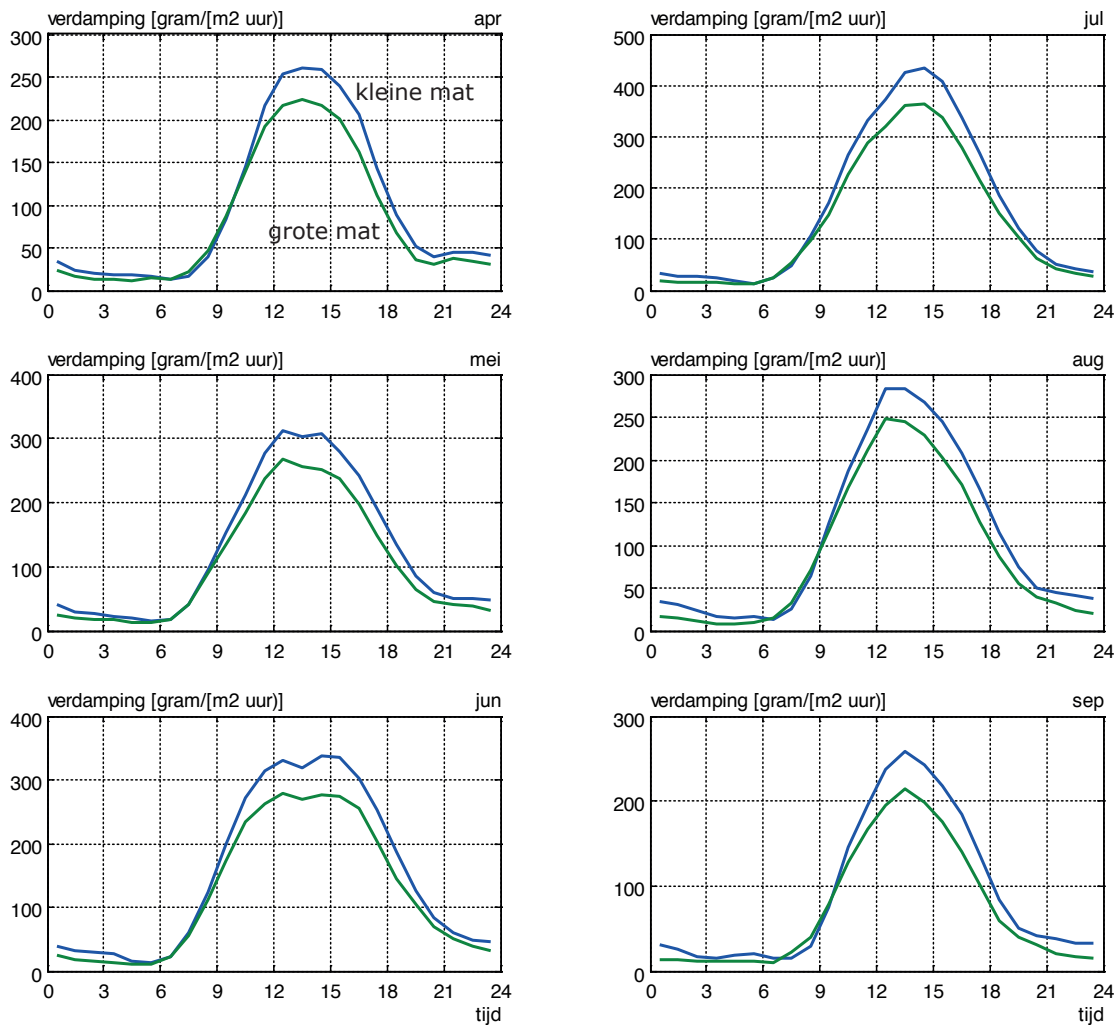
Figuur 3.14 Cumulatieve verdamping in de kleine mat (blauw) en in de grote mat (groen) zoals berekend uit de weeggoot analyse en zoals bepaald uit (gift - drain)/1.13 (turquoise en rood).

De aanvankelijke twijfels over de juistheid van de berekeningen aan de weeggoot zijn na constatering van de boven getoonde bijna perfecte match weggenomen.

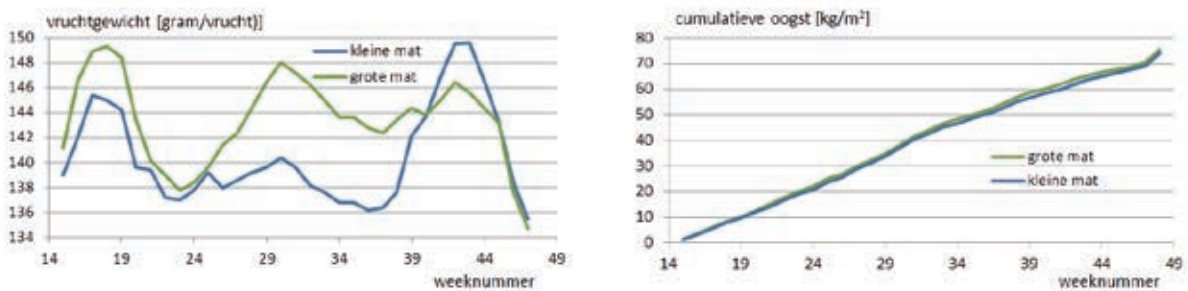
Met de constatering van de bovengetoonde verschillen is er natuurlijk nog geen oorzaak gevonden voor het enorme verschil in verdamping. Blijkbaar gaf de grotere beschikbaarheid van water in de kleine mat het gewas de mogelijkheid om gemakkelijker en meer te verdampen.

De wisselende EC van de watergift was kennelijk van zwaar ondergeschikt belang en heeft in ieder geval niet bijgedragen tot een verlaagde verdamping in de nacht. Dit is ook goed te zien aan de cyclisch gemiddelde verdampingspatronen die in figuur 3.15 worden getoond. Overdag, maar ook in de avond, tot aan de ochtend laat de kleine mat stelselmatig een hoger verdamping zien dan de grote mat.

De productie gegevens, waarvan in paragraaf 3.2 een gemiddelde over de resultaten op de kleine en op de grote mat zijn getoond en besproken, waren voor de twee matsystemen apart bijgehouden. Figuur 3.16 laat zien dat de kleine mat gedurende de zomerperiode wat fijnere vruchten heeft geproduceerd, maar dat de productiecijfers van de twee watergeefsystemen niet van elkaar te onderscheiden zijn.



Figuur 3.15 Cyclisch gemiddeld verloop van de verdamping in de kleine mat (blauw) en in de grote mat (groen) in zes opeenvolgende maanden (2014).

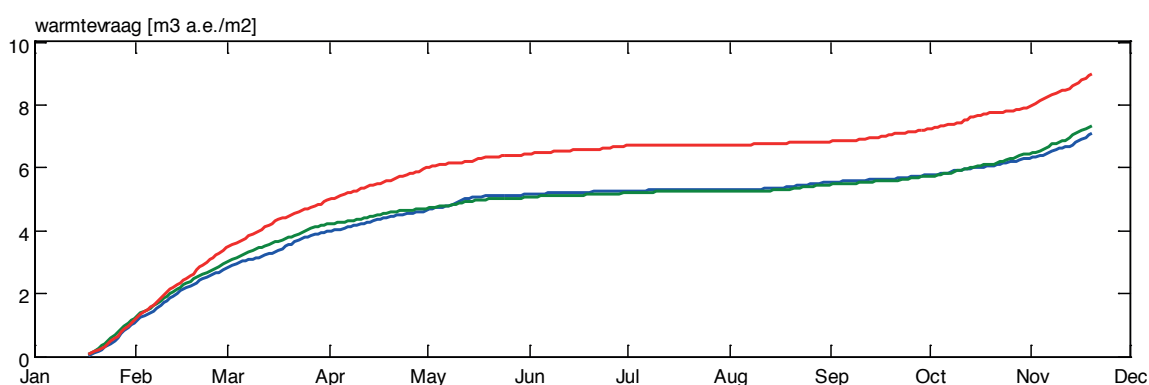


Figuur 3.16 Vruchtgewicht en cumulatieve oogst van de kleine mat (blauw) en in de grote mat (groen) in zes opeenvolgende maanden (2014). De vruchtgewicht-data zijn voor een betere leesbaarheid bewerkt met een voortschrijdend gemiddelde filter van 5 weken.

4 Effect van het uitzonderlijk warme jaar 2014

Het warmteverbruik dat in 2014 in de VenLow Energy kas is gemeten voldeed ruim aan de doelstelling, maar 2014 was een uitzonderlijk warm jaar. Als we kijken naar het aantal graaddagen² over de teeltperiode van 17 januari tot 20 november dan waren dat er in 2010 t/m 2013 gemiddeld 2150 terwijl het teeltseizoen in 2014 slechts 1630 graaddagen telde. Daarom is met behulp van het simulatiemodel berekend wat het verbruik van de VenLow Energy kas met de kwaliteit en teelt van 2014 zou zijn geweest in een gemiddeld jaar. Hiervoor is het SELjaar gebruikt waarin het karakteristieke weer in Nederland over de periode 2001 t/m 2010 is opgenomen. Het SELjaar heeft in de periode van 17 januari tot 20 november 2100 graaddagen.

Onderstaande figuur toont het gemeten warmteverbruik door de VenLow Energy kas in 2014, het berekende verbruik voor 2014 en het berekende verbruik wanneer het SEL-jaar in plaats van het actuele weer van 2014 als weerbestand voor de simulatieberekeningen wordt gebruikt.



Figuur 4.1 Gemeten (groen) en berekende (blauw) warmtevraag van de de VenLow Energy kas in 2014 en de berekende warmtevraag (rood) in geval de kas en de instellingen van het kasklimaat gelijk zijn aan die van 2014, maar de buitenomstandigheden van een gemiddeld jaar zouden hebben gegolden. De getoonde verbruiken zijn de verbruiken exclusief gevelverlies.

Figuur 4.1 laat in de eerste plaats zien dat model en meting goed op elkaar vallen. Dit geeft aan dat het gebruikte model een hoge verklarende waarde heeft en dat de doorrekening van het effect van een gemiddeld jaar een goede betrouwbaarheid geeft.

Het berekende verbruik blijft onder de $10 \text{ m}^3/\text{m}^2$ per jaar, maar dit is een verbruik exclusief gevelverlies en daarmee niet helemaal representatief als praktisch getal. Met het simulatiemodel kan gemakkelijk berekend worden wat het gasverbruik in een gemiddeld jaar inclusief gevelverlies zou zijn geweest. Dit komt dan uit op 10.2 m^3 a.e. per m^2 voor een teeltseizoen dat loopt van 17 januari tot 20 november. Dit is een fractie meer dan het beoogde doel, maar analyse van de lekverliezen van de VenLow Energy kas na het nalopen van kieren in de dakconstructie liet zien dat de kas in 2014 weliswaar een lager lekverlies had dan in 2013, maar dat dit nog steeds bijna twee keer hoger was dan het beoogde lekventilatievoud van 0.2 bij gemiddelde windsnelheid. Indien het simulatiemodel nog eens wordt gebruikt voor de berekening van het warmteverbruik in een gemiddeld jaar inclusief het gevelverlies, maar dan met een lekverlies wat van een moderne, nieuw gebouwde kas verwacht mag worden zakt het verbruik naar 9 m^3 aardgas equivalenten. Deze daling met meer dan één m^3 aardgas equivalenten is in lijn met de eerder berekende invloed van het lekventilatieverlies in hoofdstuk 2, waar de totale hoeveelheid warmte die middels de lek verloren gaat op 3.5 m^3 aardgas equivalenten werd berekend.

² Graaddagen zijn gedefinieerd als het verschil tussen 18 en de etmaaltemperatuur van de buitenlucht. Een dag met een etmaaltemperatuur van $3 \text{ }^\circ\text{C}$ krijgt dan 15 graaddagen. Een etmaaltemperatuur boven de $18 \text{ }^\circ\text{C}$ levert geen graaddagen.

De hoge luchtvochtigheid die met de in 2014 toegepaste instellingen in de kas wordt geaccepteerd leidt tot een forse vermindering van de hoeveelheid lucht die voor de ontvochtiging met de buitenlucht moet worden uitgewisseld. Bij gebruik van de in 2013 gehanteerde instellingen voor het kasklimaat in een gemiddeld jaar berekent het simulatiemodel een gemiddelde ventilatiebehoefte van 60 m³ per m² per dag. In totaal wordt met deze luchtuitwisseling dan 94 kg overtollig vocht afgevoerd. Bij toepassing van de hoge luchtvochtigheidsgrenzen, zoals in 2014 daalt de benodigde luchtuitwisseling naar gemiddeld 31 m³ per m² per dag en een totale vochtafvoer van 54 kg over het teeltseizoen.

Waar voor 2013 1.5 m³ aardgas equivalenten per m² per jaar werd toegerekend aan het elektriciteitsverbruik voor de ontvochtiging en luchtcirculatie zal dat bij gebruik van de hogere luchtvochtigheidssetpoints die in het afgelopen experiment zijn ingesteld dus minder dan 1 m³ per m² per jaar bedragen.

De conclusie uit deze modelberekeningen is dat de in hoofdstuk 3 genoemde maatregelen waarmee het energieverbruik naar 10 m³ a.e. per m² gebracht zou kunnen worden voor een kas zoals de VenLow Energy kas realistisch is wanneer het lekverlies naar het niveau van dat van een moderne nieuwbouwkas zou worden teruggebracht, een goede scherminstallatie wordt aangelegd (transparant doek of folie) en een heel hoge luchtvochtigheid wordt geaccepteerd.

5 Conclusies en nabeschuiving

De VenLow Energy kas heeft al een aantal jaren achtereen laten zien dat een hoog geïsoleerde kas een uitstekende productie kan opleveren bij zeer lage energieverbruiken. In vier achtereenvolgende jaren is het energieverbruik van de kas gedaald van 17.0 m³/m² naar 14.5 m³/m² bij een tomatenproductie van rond de 70 kg/m² per jaar. Hierbij moet wel vermeld worden dat de CO₂-dosering in deze kas middels de toepassing van OCAP en/of zuivere CO₂ ontkoppeld is van de warmtevraag.

De daling van het energieverbruik in voorgaande jaren werd gerealiseerd door stapsgewijze verbeteringen aan de kas en installaties en door aanpassingen van het teeltconcept. Bij dit laatste moet gedacht worden aan de verkorting van de teeltperiode, het weglaten van de minimumbuis en het weghalen van de groeibuis.

14.5 m³ aardgas equivalenten per m² voor de teelt van meer dan 70 kg tomaten is erg laag, maar nog ver af van energieneutraliteit. Energieneutraliteit hangt weliswaar per definitie niet af van het verbruiksniveau, maar een verlaging van het verbruik brengt wel de mogelijkheid om geheel op duurzame energiedragers te werken dichterbij. Daarom is het van belang goed na te gaan waar er nog mogelijkheden liggen in de verdere verlaging van de warmtevraag.

Bij analyse van het aandeel van de verschillende componenten in het energieverbruik van de VenLow Energy kas in 2013 bleek dat:

- 28% van het warmteverbruik van de VenLow Energy kas in 2013 lag in het feit dat het kasdek+scherm nooit perfect isolerend is. De warmteoverdracht via het dek+scherm geeft een warmteverlies van 3.7 m³ aardgas equivalenten per m².
- Bijna net zoveel, 3.5 m³ a.e./m², gaat verloren met het lekverlies van de kas.
- De grootste verbruikcomponent is de gewasverdamping. Indien het gewas niet zou verdampen (wat natuurlijk een zuiver theoretische veronderstelling is) zou de warmtevraag van de VenLow Energy kas in 2013 kas met 5.4 m³/m² afnemen. De gewasverdamping is daarmee verantwoordelijk voor 41% van de warmtevraag.

Het lekverlies van de VenLow Energy kas is onevenredig groot wanneer dit wordt vergeleken met het lekverlies van andere moderne kassen. Een substantiële verlaging van het warmteverlies via lek is dus goed mogelijk. Een verdere verhoging van de isolatiegraad van het kasdek is ook mogelijk, maar als dit de toepassing van nog beter glas zou betekenen is dit onevenredig kostbaar. Verbetering van het scherm heeft weliswaar een wat kleiner effect, maar is ook minder kostbaar. Afgezet tegen de inspanning geeft het verlagen van de gewasverdamping de grootste verlaging van het energieverbruik. Een verlaging van de gewasverdamping, met name gedurende de nacht en tijdens perioden van stoken, kan worden gerealiseerd door een hogere luchtvochtigheid in de kas te accepteren.

Op grond van bovenstaande analyse zijn de volgende maatregelen genomen waarvan verwacht wordt dat het energieverbruik van de VenLowEnergy kas onder de 10 m³ a.e./m² jaar) kan blijven:

- Beperking van het lekverlies tot een gebruikelijk lekventilatievoud van 0.2 onder gemiddelde omstandigheden
- Gebruik van een verbeterd scherm in de vorm van een dampdicht foliescherm
- Verlaging van de verdamping tijdens de nacht en/of de stookperiode door een hoge luchtvochtigheid te accepteren (tot een verzadigingsdeficit van 1 gram/m³)

Aan dit rijtje maatregelen is nog een extra maatregel toegevoegd, namelijk het gebruik van een substraatmat met een kleine waterinhoud zodat de EC in de nacht hoger kan worden gemaakt en overdag lager. Hiermee zou selectief de nachtelijke verdamping moeten kunnen worden verlaagd zonder de totale verdamping te verlagen.

De experimenten hebben laten zien dat:

- De warmtevraag in 2014 $7 \text{ m}^3/\text{m}^2$ bedroeg. Met nog $1 \text{ m}^3/\text{m}^2$ die toegeschreven moet worden aan het stroomverbruik voor de luchtcirculatie was het energieverbruik voor de klimatisering van de kas $8 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Dit verbruik ligt ver onder de doelstelling, maar 2014 was een historisch warm jaar. De vertaling van de meetresultaten naar een gemiddeld jaar geven echter aan dat de gestelde $10 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ jaar})$ zeker reëel is.
- Het hoger ingestelde luchtvochtigheidssetpoint (acceptatie van een verzadigingsdeficit van $1 \text{ gram}/\text{m}^3$ in het begin van de teelt, $2 \text{ gram}/\text{m}^3$ vanaf mei en weer terug naar $1 \text{ gram}/\text{m}^3$ vanaf augustus, waarbij in het najaar rond de opstookperiode iets meer ontvochtigd werd door het setpoint naar $2 \text{ gram}/\text{m}^3$ te verhogen) leidde tot een duidelijk hogere luchtvochtigheid in de kas. Deze hogere luchtvochtigheid leverde een duidelijke verlaging van de verdamping tijdens de nacht en/of tijdens stoken. Deze ging van $0.36 \text{ liter}/(\text{m}^2 \text{ dag})$ naar $0.26 \text{ liter}/(\text{m}^2 \text{ dag})$.
- De verhoogde luchtvochtigheid en verlaagde verdamping hebben geen invloed op de productie gehad. De productie lag in 2014 iets hoger dan in 2013, maar er was gedurende de teeltperiode ook iets meer licht.
- De beoogde reductie van het lekverlies is slechts ten dele gelukt. Waar de VenLow Energy kas in 2013 een lekventilatievoud van 0.5 onder gemiddelde omstandigheden liet zien was dit in 2014 teruggebracht naar 0.4, terwijl moderne nieuwbouwkassen een lekventilatievoud van 0.2 hebben. De moeizame reductie van het lekventilatieverlies van de VenLowEnergy kas is een gevolg van het feit dat het om een verbouwde kas gaat en de onderbouw en het dek niet als één systeem zijn ontwikkeld.
- De toepassing van een kleine substraatmat met een dubbel druppelsysteem om de mat-EC gedurende de nacht beduidend hoger te kunnen krijgen dan overdag heeft niet tot de verwachte daling van de verdamping geleid. Het was zelfs precies het tegenovergestelde wat er gebeurde. Het gewas op de kleine substraatmat heeft 19% meer verdampt dan het gewas dat volgens het gebruikelijke systeem water kreeg. De extra verdamping trad zowel 's nachts als overdag op. Hiervoor is vooralsnog geen goede verklaring te geven. Mogelijk leidde de ruimere waterbeschikbaarheid in de kleine mat tot een hogere verdamping.
- De forse extra verdamping op de kleine mat had geen effect op de productie. Alleen het gemiddeld vruchtgewicht was in de zomerperiode wat lager ($138 \text{ gram}/\text{vrucht}$ in plaats van $144 \text{ gram}/\text{vrucht}$ op de standaard mat).

De slotconclusie van dit onderzoek is dat de teelt van tomaten in een kas met een isolerend kasdek zoals dat van de VenLow Energy kas, voorzien van een goed energiescherm en zorgvuldig afgewerkt om de lekverliezen te minimaliseren in een gemiddeld Nederlands jaar ongeveer $10 \text{ m}^3/\text{m}^2$ nodig heeft. Voorwaarde hierbij is dat er een hoge luchtvochtigheid geaccepteerd wordt en dat het vocht dat dan nog moet worden afgevoerd via een energiezuinig balansventilatiesysteem plaatsvindt. Ook het teeltseizoen moet korter dan gebruikelijk gekozen worden, namelijk van half januari tot eind november. Bij gebruik van een tomatenras zoals Komeett kan daarbij een productie rond de $72 \text{ kg}/\text{m}^2$ worden verwacht, maar de beschikbaarheid van CO_2 uit alternatieve bron, dus niet gekoppeld aan het eigen gasverbruik, is dan een voorwaarde.

6 Literatuur

Kempkes, F.L.K. en J. Janse, 2013,

Praktijkervaringen met de Venlow energy kas 2010 – 2012, Wageningen UR Glastuinbouw,
Rapport GTB-1279

Zwart, H.F. de, 2010,

De performance van de drie demo-kassen op het Innovatie en Demo Centrum, Wageningen UR
Glastuinbouw, Rapport GTB-1030

Gelder, A. de, 2014,

Verdamping: Balans tussen noodzaak en overmaat, Wageningen UR

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



Wageningen UR Glastuinbouw
Postbus 20
2665 ZG Bleiswijk
Violierenweg 1
2665 MV Bleiswijk
T +31 (0)317 48 56 06
F +31 (0) 10 522 51 93
www.wageningenur.nl/glastuinbouw

Glastuinbouw Rapport GTB-1366

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

De missie van Wageningen UR (University & Research centre) is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen UR bundelen 9 gespecialiseerde onderzoeksinstituten van stichting DLO en Wageningen University hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 6.000 medewerkers en 9.000 studenten behoort Wageningen UR 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.