



# Het verticale temperatuurprofiel in een tomaten kas uitgerust met belichting, 2 schermen en een VentilationJet systeem

Als onderdeel van het monitorings project

Rapport GTB-817

I. Tsafaras en B.H.E. Vanthoor

## Referaat

Tijdens het huidige onderzoek werd het effect van kasklimaatregelingsapparatuur op het verticale luchttemperatuurprofiel, de tomaattemperatuur en de rookgasconcentratie bestudeerd bij Gardener's Pride. Er is waargenomen dat wanneer er sprake is van significante warmtetoevoer (straling) aan de bovenkant van het gewas, er een verticale temperatuurgradiënt ontstaat met de onderkant van het gewas kouder dan de bovenkant. Deze temperatuurgradiënt kan niet worden verminderd door alleen de onderste verticale luchtcirculatieventilators (die onder de VentilationJet hangt) te gebruiken. Deze gradiënt kan worden geminimaliseerd door extra warmtetoevoer aan de onderkant. Dit kan resulteren in overtollige warmte die moet worden afgevoerd door natuurlijke ventilatie of door het gebruik van de VentilationJets wanneer de schermen worden ingezet. Tijdens de bestudeerde periode vond ongeveer een kwart van het dagelijkse gasverbruik voor verwarming plaats op hetzelfde moment dat de VentilationJets warme en vochtige lucht afvoerden. Bij deze tuinder was het gebruik van de VentilationJets ook belangrijk om supra-optimale vochtigheidsniveaus te voorkomen. Er werd ook vastgesteld dat er minimale ventilatie nodig is (vooral op dagen met vrij weinig wind) om ervoor te zorgen dat de concentratie van NO<sub>x</sub> niet boven de aanvaardbare dag niveaus komt.

## Abstract

During the current research the effect of greenhouse climate control equipment use on vertical air temperature profile as well as on the fruit temperature and flue gas concentration was studied. It was observed that when significant heat input (radiation) at the top of the crop takes place a vertical temperature gradient exists, with the bottom of the crop being colder than the top. This temperature gradient cannot be reduced by using only the lower vertical air circulation fans but it can be minimized by additional heat input at the bottom; this may result in excess heat that has to be removed (from the top of the greenhouse) through either natural ventilation or with the use of VentilationJets when the screens are deployed. During the studied period about a quarter of the daily gas use for heating took place at the same time when the VentilationJets were removing warm and humid air from the top of the greenhouse. The use of the VentilationJets was also important to prevent supra-optimal humidity levels. It was also found that minimum a ventilation is needed (especially on not windy days) to ensure that concentration of NO<sub>x</sub> will not rise up to dangerous for the crop levels.

## Rapportgegevens

Rapport GTB-817

Projectnummer: 3742157313

DOI nummer: 10.18174/458749

Thema: Energie & Klimaat

## Disclaimer

© 2018 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](http://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 verveelvoudigd, 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

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
|          | <b>Samenvatting</b>                                   | <b>5</b>  |
| <b>1</b> | <b>Inleiding</b>                                      | <b>7</b>  |
| <b>2</b> | <b>Materiaal en methode</b>                           | <b>9</b>  |
| <b>3</b> | <b>Overzicht van klimaat en sturingen</b>             | <b>11</b> |
| <b>4</b> | <b>Resultaten en discussie</b>                        | <b>19</b> |
|          | 4.1 Verticaal temperatuurprofiel                      | 19        |
|          | 4.1.1 De periode met belichting en geen zoninstraling | 20        |
|          | 4.1.2 De dag periode (met zoninstraling)              | 23        |
|          | 4.1.3 De donker periode                               | 25        |
|          | 4.2 Bodem en substraat temperatuur                    | 27        |
|          | 4.3 Tomaat temperatuur                                | 29        |
|          | 4.3.1 Tomaten temperatuur en uitgroeiduur             | 34        |
|          | 4.4 Monitoren van de rookgas concentratie in de kas   | 34        |
| <b>5</b> | <b>Conclusies</b>                                     | <b>39</b> |
| <b>6</b> | <b>Literatuur</b>                                     | <b>41</b> |



# Samenvatting

In de winter van 2018 vond een experiment plaats in de faciliteiten van Gardener's Pride, een tomatenteler in Beetgum, met als doel het effect van het gebruik van een VentilationJet systeem, verticale circulatie-ventilatoren (onderventilator van het VentilationJet systeem) en het verwarmingssysteem op het verticale temperatuurprofiel van zowel de lucht als tomaat te bepalen. Bovendien werd het effect van de vruchttemperatuur op de uitgroeiduur bestudeerd. Verder werd de concentratie van rookgassen gemonitord om te concluderen of de algemene praktijk van het handhaven van een minimale ventilatieopening nodig is om het gewenste resultaat te bereiken en of het energie-efficiënt is. Specifiek werd het verticale temperatuurprofiel gemeten met behulp van 5 verticaal geplaatste geventileerde temperatuur- en vochtigheidssensoren op 3 locaties in de kas. De tomatentemperatuur werd gemeten met behulp van thermokoppels die in de tomaten werden geplaatst evenals met het gebruik van een infraroodcamera. Tevens is de temperatuur van kunsttomaten - met vergelijkbare thermische eigenschappen als echte tomaten - gemeten. Vervolgens is de impact van het gebruik van de klimaatregelingsapparatuur, namelijk de belichting, het verwarmingssysteem, de schermen, de VentilationJets en de verticale circulatie-ventilatoren op bovenstaande metingen geanalyseerd.

Zowel tijdens zonnige dagen als belichte periodes van de dag (wanneer significante warmtetoevoer van straling aan de bovenkant van het gewas plaatsvindt) bestaat er een verticale temperatuurgradiënt met de onderkant van het gewas kouder dan de bovenkant. Deze temperatuurverschillen bleken boven de 3°C te liggen tijdens zonnige dagen en 1°C tijdens de belichte donkere periode. Gebleken is dat het gebruik van alleen de verticale circulatie ventilatoren van de VentilationJets (onderventilatoren) geen verticale luchtbeweging creëert die in staat is om de warmte van de top naar de bodem van het gewas over te brengen. Dit resulteert dus niet in een homogeen verticaal temperatuurprofiel. De verticale temperatuurgradiënt wordt wel kleiner door extra warmtetoevoer van het verwarmingssysteem aan de onderkant van het gewas. Tijdens donkere dagen, toen intensiever gebruik van het verwarmingssysteem plaatsvond, was de temperatuur aan de bovenkant en onderkant van het gewas vergelijkbaar. Vergelijkbare resultaten werden ook gevonden tijdens de belichte donkere periode toen het verwarmingssysteem werd gebruikt in combinatie met de VentilationJets. Op dat moment werd vastgesteld dat de twee systemen in tegengestelde richting werken: door de warmtetoevoer aan de onderkant van het gewas in balans te brengen met de warmteafvoer vanaf de bovenkant kan een homogeen verticaal temperatuurprofiel worden bereikt. Er werd berekend dat de hoeveelheid warmte die werd aangevoerd door de verwarmingsbuizen -terwijl de VentilationJets de warmte afvoerden - ongeveer 26% (ongeveer 2 m<sup>3</sup> gas) van het totale dagelijkse gebruik van het verwarmingssysteem was. De gelijktijdige toevoer en afvoer van warmte uit de bovengenoemde systemen is ook nodig om ervoor te zorgen dat de relatieve vochtigheid de aanvaardbare limieten voor groei en productie van tomaten van hoge kwaliteit niet overschrijdt.

Met betrekking tot de temperatuur van de cherry tomaat bleek deze de luchttemperatuur nauwgezet te volgen met kleine vertragingen. Wanneer de luchttemperatuur op verschillende hoogten vergelijkbaar was, gebeurde hetzelfde met de tomaat temperatuur. De gebruikte kunst tomaat bleek een aanzienlijke vertragingen te hebben bij het opwarmen en afkoelen en ze bereikten ook tijdens zonnige periodes temperaturen tot 5°C boven de luchttemperatuur (zonlicht op tomaat). Dit kan worden verklaard door het verschil in grootte (resultierend in een hogere warmtecapaciteit) in vergelijking met de echte (cherry) tomaten. Er werd een verband vastgesteld tussen de gemiddelde vruchttemperatuur en de uitgroeiduur. De trossen die bij een hogere vruchttemperatuur waren geteeld hadden een kortere uitgroeiduur (ongeveer 1 week verschil tussen een gemiddelde trosttemperatuur van 19°C en 1,3°C) Er was echter geen lineair relatie gevonden tussen de graaduren en de uitgroeiduur. Ten slotte wees de monitoring van de concentratie van rookgassen erop dat door de toegepaste minimale ventilatiestrategie de C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> ruim onder de maximaal dagelijkse aanvaardbare limiet bleef. Dit gold echter niet voor de NO<sub>x</sub>-concentratie. Deze bereikte of overschreed de aanvaardbare limiet gedurende bijna de helft van de geanalyseerde periode, vooral tijdens dagen met lage windsnelheid wat aangeeft dat het belangrijk is om deze rookgassen te meten.





# 1 Inleiding

De toepassing van Het Nieuwe Telen in de afgelopen jaren in de Nederlandse kassen heeft geleid tot aanzienlijke verschillen in klimaat sturingen en tot het gebruik van nieuwe apparatuur. Het meest gebruikelijke voorbeeld is het meer gebruiken van schermen die de lucht- en vochtigheidsuitwisseling tussen het bovenste en onderste kascompartiment sterk beïnvloeden omdat ze worden gescheiden door het scherm zelf. Deze uitwisseling van lucht en vochtigheid wordt vaak gedeeltelijk beïnvloed door extra apparatuur (zoals VentilationJets) of stuur acties (zoals schermkieren). In het voorjaar van 2017 werd het effect van een schermkier op het centrale middenpad op lucht- en vochttransport en op het horizontale temperatuurprofiel bestudeerd in de kassen van Gardener's Pride in Beetgum. In juli 2017 is besproken dat de huidige klimaatbeheersingsstrategie van de teler zou worden geëvalueerd met een sterke focus op het gebruik van het verwarmingssysteem (buisrail en groeibuis) tijdens de momenten dat er al een warmteoverschot is (vooral tijdens de belichte periode). De teler ondersteunt dat de toegepaste strategie twee belangrijke voordelen heeft: namelijk het toestaan van een minimale ventilatie (raamopening) die zorgt voor het verlagen van de rookgassen concentratie ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ) in de kas en een homogenere horizontale temperatuurverdeling. Andere redenen om op deze momenten de verwarmingsbuizen in te zetten zijn: om de rijpingstijd van de tomaten te beïnvloeden, de vochtigheid te verminderen door het transport naar buiten te bevorderen en om het verticale temperatuurprofiel te beïnvloeden.

In de winter van 2018 werden metingen uitgevoerd om het effect van het gebruik van het nieuwe VentilationJet systeem, de verticale circulatie-ventilatoren (ofwel onderventilatoren) en het verwarmingssysteem op het verticale temperatuurprofiel in de kas te bestuderen. Verder werd, om de ventilatiestrategie te evalueren, de concentratie van rookgassen gemeten. Het is gebruikelijk om een minimale ventilatieopening te handhaven om zo ervoor te zorgen dat de concentratie van rookgassen niet boven de schadelijke grens komt. Het monitoren van de concentratie rookgassen en raamopening kan aangeven of de toegepaste strategie het gewenste resultaat oplevert en of het energiezuinig is.

Specifiek richt deze studie zich op het effect van de klimaatregelingsapparatuur, namelijk de belichting, het verwarmingssysteem, de schermen, de VentilationJets en de verticale circulatieventilatoren, op het verticale temperatuurprofiel. Wanneer de belichting wordt ingeschakeld en het scherm wordt gebruikt, is er meestal overtollige warmte in de kas en deze warmte wordt afgevoerd via de VentilationJets en de ramen. De studie van het verticale temperatuurprofiel zal aangeven of er een extra warmte-inbreng van het verwarmingssysteem (buisrail en groeibuis) nodig is om te voorkomen dat het onderste deel van de kas te koud wordt of dat dit leidt tot verspilling van energie. Bovendien werd de vruchttemperatuur vergeleken met de luchttemperatuur en gekoppeld aan de klimaatbeheersingsstrategie. Ook werd het effect van de vruchttemperatuur op de rijpingstijd bestudeerd.





## 2 Materiaal en methode

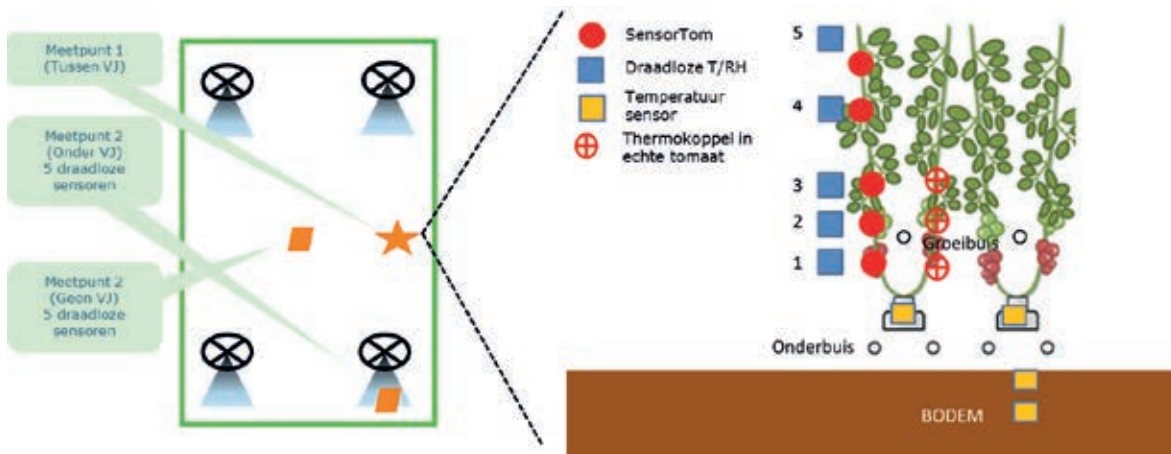
Het experiment vond plaats in de kassen van Gardener's Pride, een tomatenteler in Beetgum, Nederland. De kas waar het klimaat werd gemonitord, werd gebouwd in 2014 en is uitgerust met belichting, dubbele schermen, buisrail, groeibuis, VentilationJets (inblaasventilator) en verticale circulatieventilatoren ook wel onderventilator genoemd (meer details over de specificatie van de installaties zijn te vinden in Tabel 1). In dit kascompartiment groeide een cherrytomaat (variëteit Juanita) die geplant is in juni 2017. Het verticale temperatuurprofiel werd gevolgd met behulp van 5 verticaal geplaatste geventileerde temperatuursensoren van AgriSensys (Figuur 1). Gegevens werden geregistreerd op 3 locaties in de kas op een 5 min-frequentie van 28 januari 2018 tot 23 maart 2018. Omdat het bepalen van de impact van de VentilationJets en verticale ventilatoren op het verticaal temperatuur profiel een doel van het onderzoek was, werden de volgende locaties van de sensoren geselecteerd: onder een VentilationJet, tussen en in lijn met twee VentilationJets en zo ver mogelijk weg van VentilationJets; voor de rest van het rapport worden deze drie locaties respectievelijk "Beneden VJ", "Tussen VJ", en "Geen VJ" genoemd (Figuur 1).

De tomatentemperatuur werd gevolgd met behulp van thermokoppels die in de tomaten werden geplaatst en opnieuw werden geplaatst wanneer een tomaatje begon te rotten vanwege het kleine gaatje dat was gemaakt om het thermokoppel in te brengen. Verder werd de tomatentemperatuur gevolgd met behulp van een infraroodcamera (FLIR). Bovendien werd de temperatuur van een grotere tomat gevolgd met behulp van kunsttomaten met vergelijkbare thermische eigenschappen als de echte tomaten; de grootte van de kunsttomaten is vergelijkbaar met de grootte van een trostomaat van ongeveer 220 gram. De tomatentemperatuurmetingen vonden plaats op de meetplek tussen en in lijn met twee VentilationJets ("Tussen VJ") (Figuur 1). Ten slotte werden 2 paar temperatuursensoren gebruikt om de bodem (op 10 cm diepte) en de substraat temperatuur te meten. In Figuur 2 wordt de meetapparatuur getoond.

Tabel 1

*Overzicht van de technische installaties.*

| Technische installatie   | Details   |
|--|---|
| VentilationJet capaciteit ( $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{uur}$ ) | 15  |
| Verticale luchtcirculatieventilator                              | V-FloFan  |
| Energiescherm  | LUXOUS 1347 FR                                  |
| Verduisteringsscherm   | OBSCURA 9950 FR W                               |
| Belichting ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )               | 200 (4 strengen) ( $120 \text{ W}/\text{m}^2$ ) |
| Groeibuis verwarming   | 51 mm - $0.58 \text{ m}/\text{m}^2$             |
| Buisrail verwarming  | 51 mm - $1.17 \text{ m}/\text{m}^2$             |



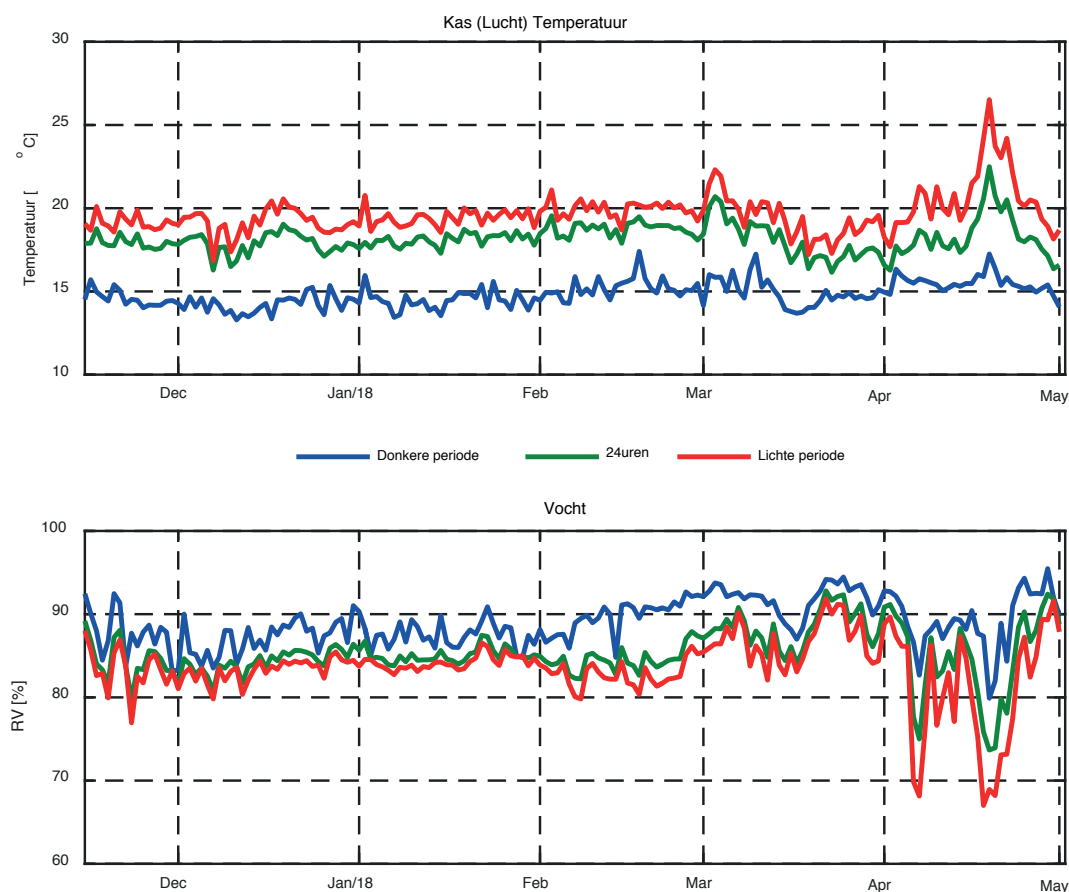
**Figuur 1** Schematische weergave van de meetopstelling.



**Figuur 2** Een deel van de geïnstalleerde meetapparatuur; geventileerde draadloze temperatuur- / vochtigheidssensoren, kunsttomaten en thermokoppels in echte tomaten zijn zichtbaar.

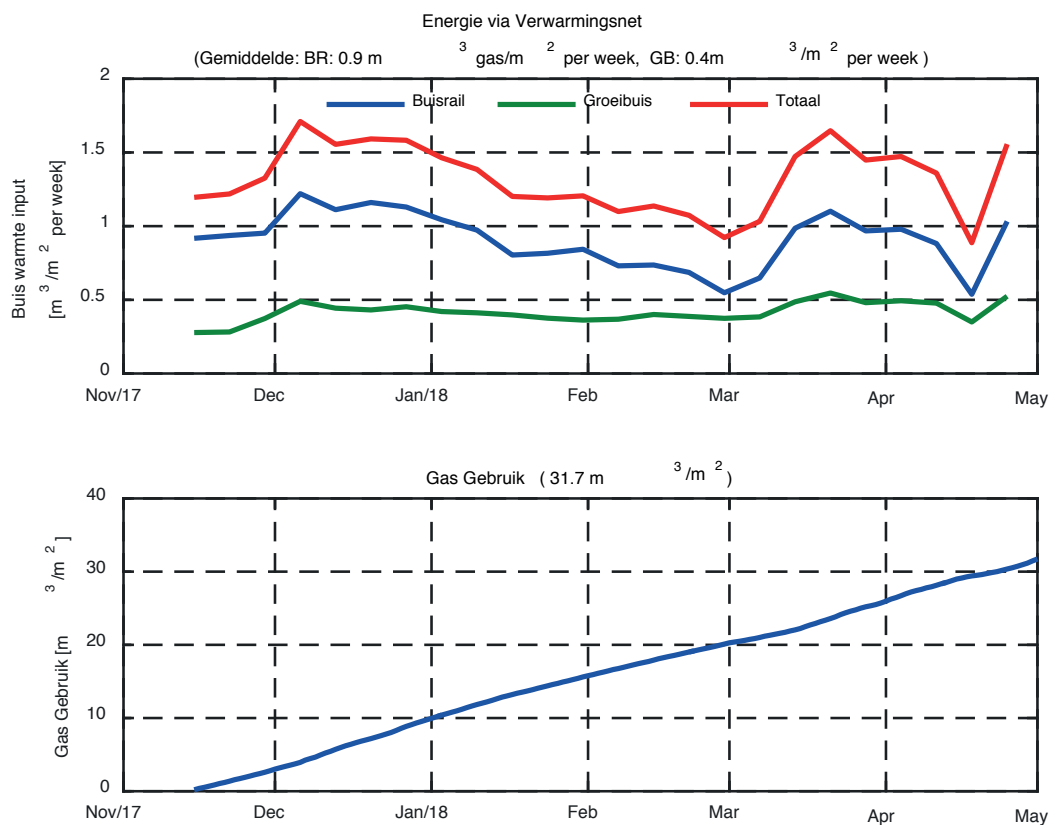
### 3 Overzicht van klimaat en sturingen

Gedurende de periode van half november 2017 tot eind april 2018 was de gemiddelde temperatuur in Gardener's Pride 18,2°C en de gemiddelde RV 85%. Tijdens de lichtperiode (ofwel licht van de zon of van belichting) was de gemiddelde temperatuur 19,6°C en de gemiddelde luchttemperatuur in de donkere periode was 14,9°C. In dezelfde periode bedroeg de gemiddelde RV respectievelijk 83,5% en 89% tijdens de licht- en de donkerperiode (Figuur 3).

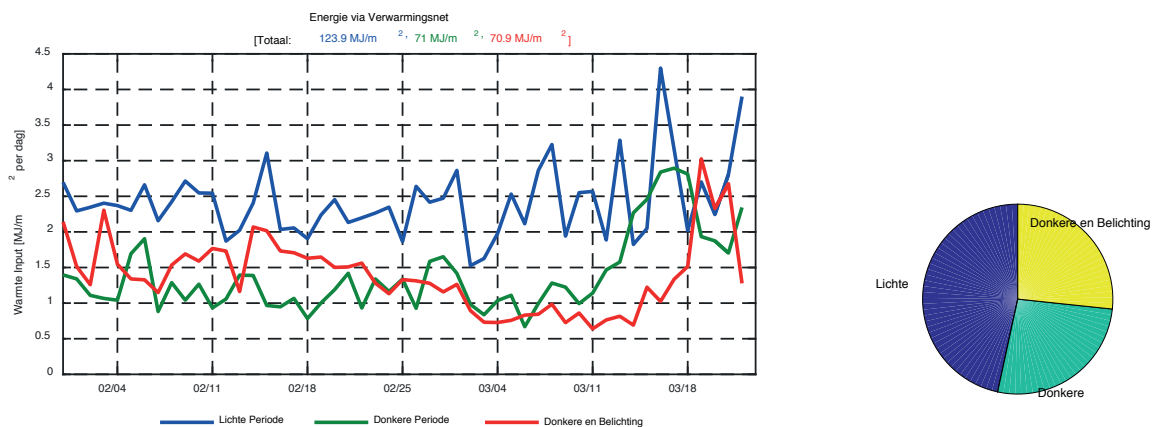


**Figuur 3** Dagelijkse waarden van de kasluchttemperatuur tijdens de lichtperiode (zon of belichting) (rode lijn), de donkerperiode (blauwe lijn) en de 24 uren gemiddelde (groene lijn).

Om het beschreven klimaat te bereiken, werd berekend dat een totale warmtetoevoer van 31,7 m<sup>3</sup> gas nodig was, geleverd met een verhouding van ongeveer 70:30 van de buisrail ten op zichte van de groeibuis wat overeenkomt met respectievelijk 3,4 MJ/m<sup>2</sup> en 1,5 MJ/m<sup>2</sup> aan warmte per dag (Figuur 4). Ongeveer 40% van de totale warmtetoevoer werd overdag gebruikt en de rest is bijna gelijk verdeeld over de donkere periode en de nachtperiode waarin ook de belichting werd gebruikt (Figuur 5). Specifiek voor de periode tussen 7 februari en eind maart werd ongeveer 60,5 MJ/m<sup>2</sup> (bijna 2 m<sup>3</sup> gas per m<sup>2</sup>) tegelijkertijd gebruikt toen de VentilationJets, de belichting en het verwarmingssysteem werden gebruikt.

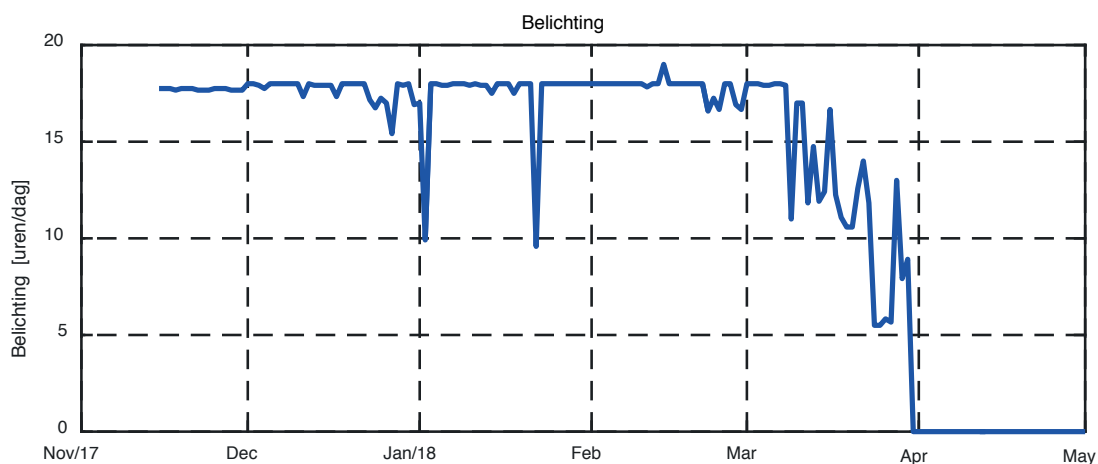


**Figuur 4** Berekende warmtetoevoer van de buisrail (BR) en groeibuis (GB) en het berekende gasverbruik in de periode van 15 november 2017 tot 30 april 2018.



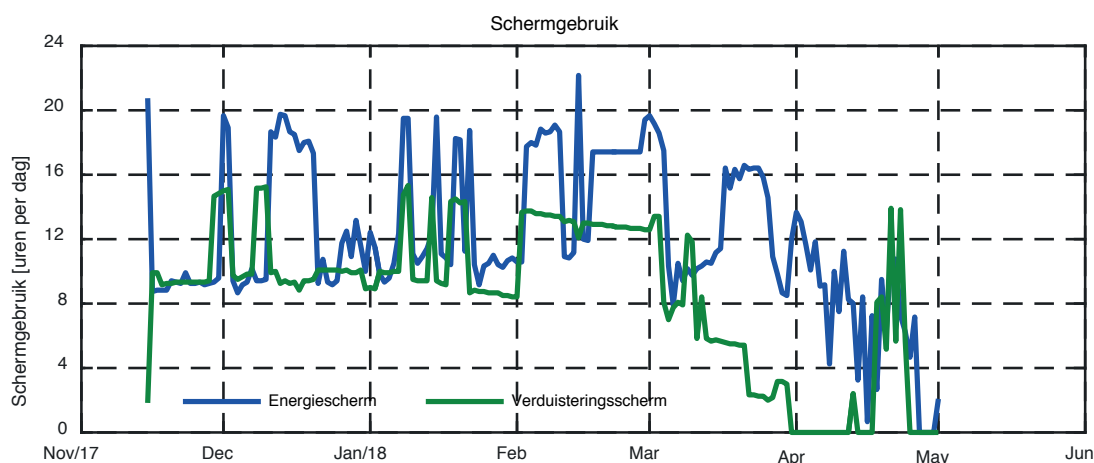
**Figuur 5** Verdeling van de warmte-inbreng van het verwarmingssysteem tussen de verschillende perioden van de dag, namelijk de lichtperiode (instraling van de zon, Lichte Periode), de donkere periode (Donkere Periode) en de donkere belichte periode (Donkere en Belichting).

De belichting was ingeschakeld (minimaal één op de vier strengen) gedurende 18 uur (van middernacht tot 18.00 uur) bijna elke dag tot begin maart. Vanaf de tweede week van maart werd de belichting minder gebruikt en na maart niet meer (Figuur 6).



**Figuur 6** Dagelijks gebruik (in uren) van de belichting (ten minste één van de strengen aan).

De schermen werden tot eind januari ongeveer tien uur per dag gebruikt, hoewel op sommige dagen het verduisteringsscherm tot 15 uur lang werd gebruikt en het energiescherm tot 20 uur per dag. In februari toen het kouder was werden zowel het energie- als het verduisteringsscherm meer gebruikt, respectievelijk 15,6 uur per dag en 12,6 uur per dag. Beide schermen werden minder gebruikt in maart en april (Figuur 7).

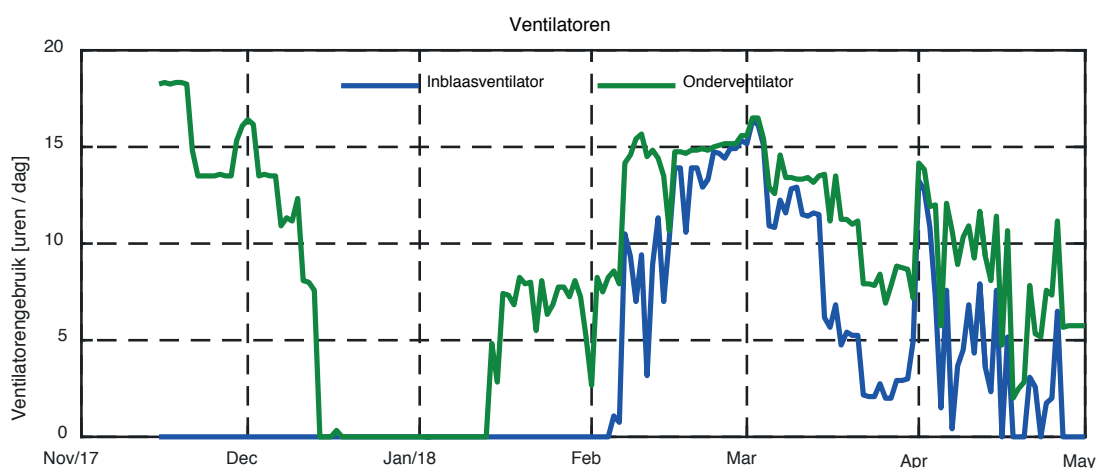


**Figuur 7** Dagelijks gebruik (in uren per dag) van de schermen. Alleen uren dat de schermstand meer dan 98% was, worden geteld en weergegeven in de grafiek.

Het (nieuwe) VentilationJet-systeem is in de tweede week van februari 2018 in gebruik genomen. Sindsdien zijn de VentilationJets gebruikt gedurende de periode dat de schermen waren gesloten (met of zonder belichting) gedurende maximaal 15 uur per dag. Het gebruik van de VentilationJets werd vanaf de tweede helft van maart verminderd. De verticale circulatie ventilatoren werden op zijn minst evenveel gebruikt als de VentilationJets, maar er waren ook periodes (bijvoorbeeld de tweede helft van november 2017 en de eerste helft van december 2018) toen alleen de onderste verticale circulatie-ventilatoren werden gebruikt (Figuur 8).

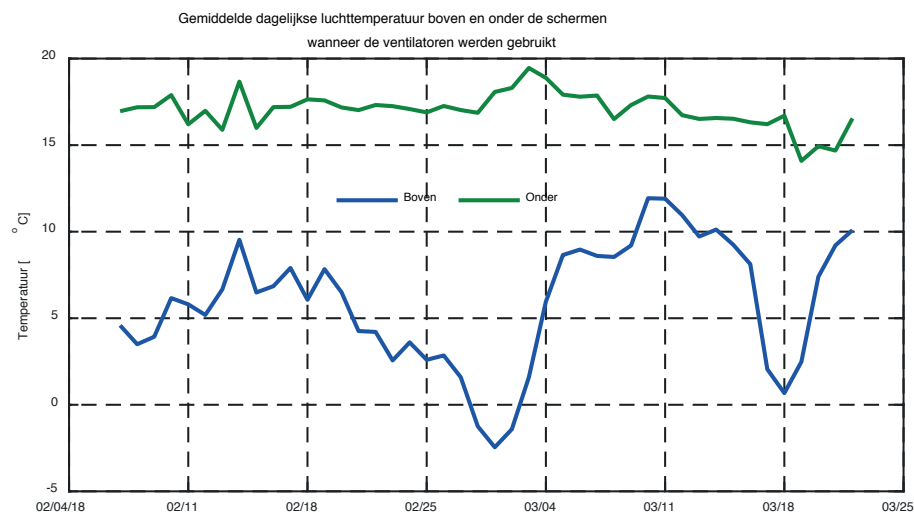
Wat betreft het effect van de VentilationJets op de energiebalans van de kas, werd berekend dat deze resulteerden in warmteverliezen van 1-3,5 MJ/m<sup>2</sup> per dag. Deze hoeveelheid energie is bijna gelijk aan de hoeveelheid warmte die het verwarmingssysteem toevoert op momenten dat de VentilationJets draaien. Met andere woorden, de VentilationJets voeren (van de bovenkant van de kas) bijna evenveel warmte af als het verwarmingssysteem toevoert (aan de onderkant van de kas) (Figuur 12, Figuur 13). Tijdens de periode vanaf 7 februari tot eind maart werd 78,5% van de warmtetoevoer van het verwarmingssysteem (op momenten dat de VentilationJets draaiden) afgevoerd door de VentilationJets als voelbare warmte. Dit werd bereikt door koude en droge lucht van 3-12°C (zelfs <0°C tijdens de koude periode eind februari) aan het lagere kas compartiment toe te voegen, oftewel lucht die 6-12°C (20°C aan de eind februari) kouder en 2 tot 9 g/kg (gemiddeld 4,7 g/kg) droger is dan de kaslucht (Figuur 9, Figuur 10). Als de latente warmteverliezen (geschat op basis van het verschil in absolute vochtigheid onder en boven de schermen en de luchtstroom door de VentilationJets) worden toegevoegd aan de voelbare warmteverliezen dan is de totale energie die met behulp van de VentilationJets uit de kas wordt afgevoerd ongeveer het dubbele van de voelbare warmteverliezen (dus 50% voelbaar en 50% latent). De som van de afgevoerde voelbare en latente energie overschrijdt met ongeveer 57% de warmtetoevoer van het verwarmingssysteem gedurende dezelfde periode. Dit komt overeen met ongeveer 77% van de totale warmtetoevoer (de som van het energieverbruik van het verwarmingssysteem en de belichting) gedurende de periode van gebruik van de VentilationJets.

Tijdens de belichte periode en gebruik van VentilationJets leverde het verwarmingssysteem ongeveer 60 MJ/m<sup>2</sup> (bijna 2 m<sup>3</sup> gas per m<sup>2</sup>). Deze hoeveelheid energie is ongeveer 26% van de totale warmtetoevoer (24 uur) van het verwarmingssysteem in deze periode. Het is opmerkelijk dat de bovengenoemde koude en droge lucht toevoer wel hoge temperaturen kan voorkomen maar niet een hoge luchtvochtigheid. Met name in de periode dat de VentilationJets werden gebruikt, overschreed de kasluchttemperatuur slechts ongeveer 10% van de tijd de 20°C (en deze overschreed nauwelijks 23°C) maar ongeveer 96% van de periode overschreed de relatieve vochtigheid 85% en bijna de helft van periode overschreed de RV 90% (Figuur 11). Dit maakt meer dan duidelijk dat het gebruik van de VentilationJets, wanneer de schermen worden ingezet, essentieel is voor ontvochtigingsdoeleinden.

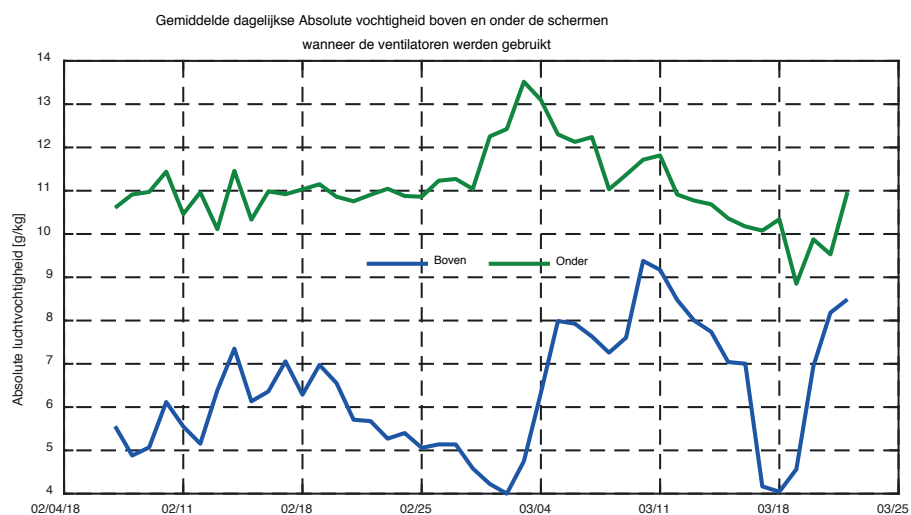


**Figuur 8** Dagelijks gebruik (in uren per dag) van het VentilationJet systeem (Inblaas ventilator) en de verticale luchtcirculatie ventilator (Onder ventilator). Tot 7 februari was het VentilationJet systeem niet operationeel.



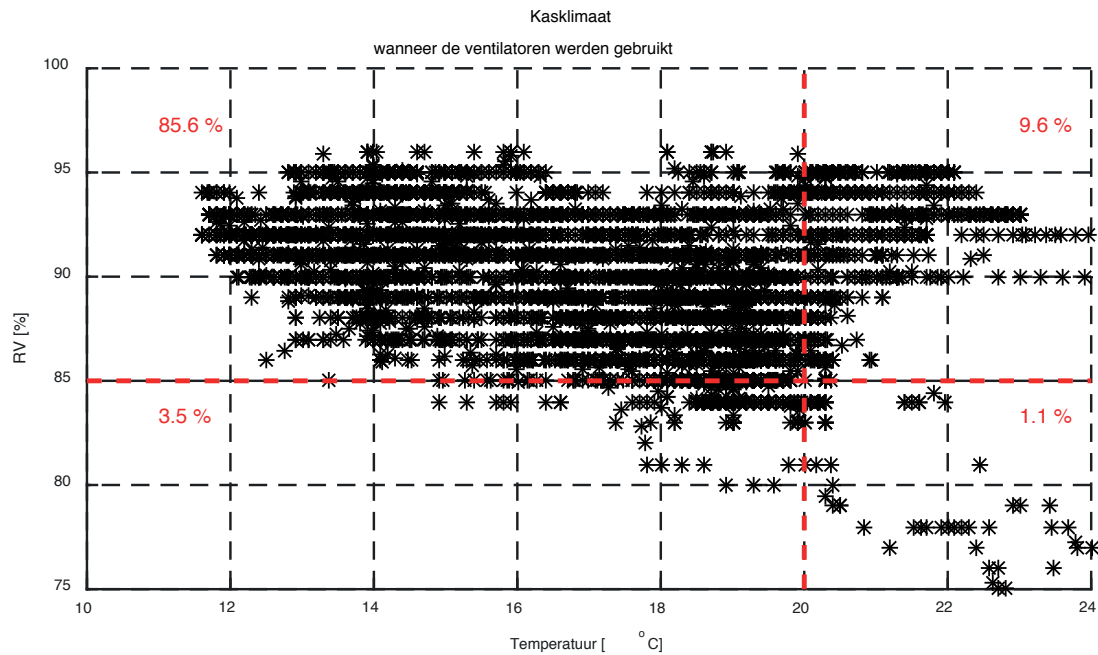


**Figuur 9** Gemiddelde dagelijkse luchttemperatuur boven en onder de schermen wanneer de VentilationJets werden gebruikt.

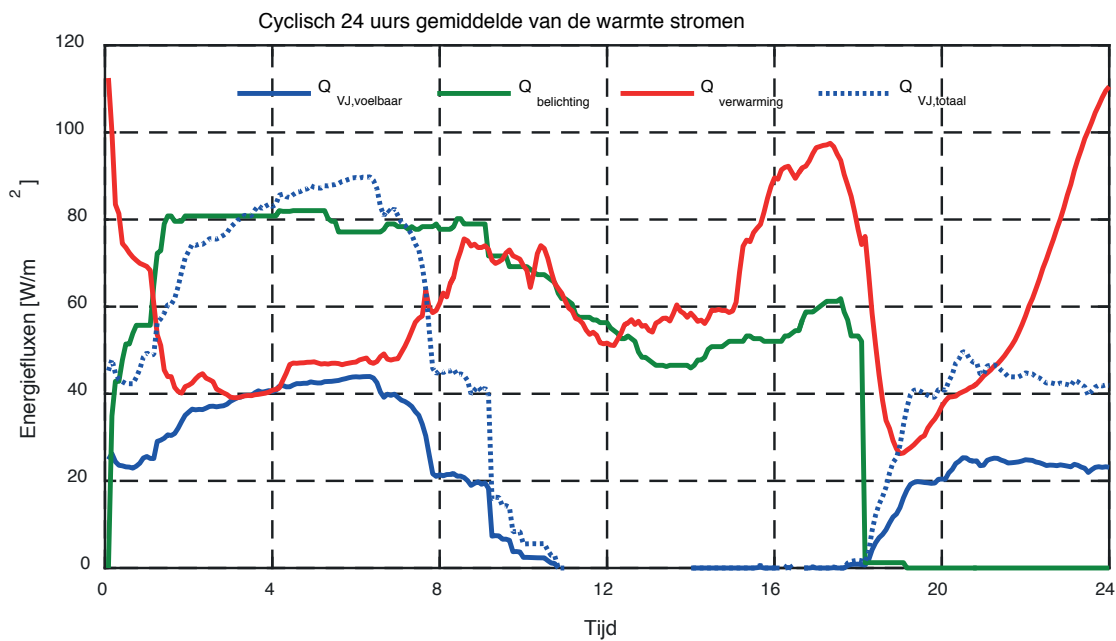


**Figuur 10** Gemiddelde dagelijkse absolute vochtigheid van de lucht boven en onder de schermen wanneer de VentilationJets werden gebruikt.

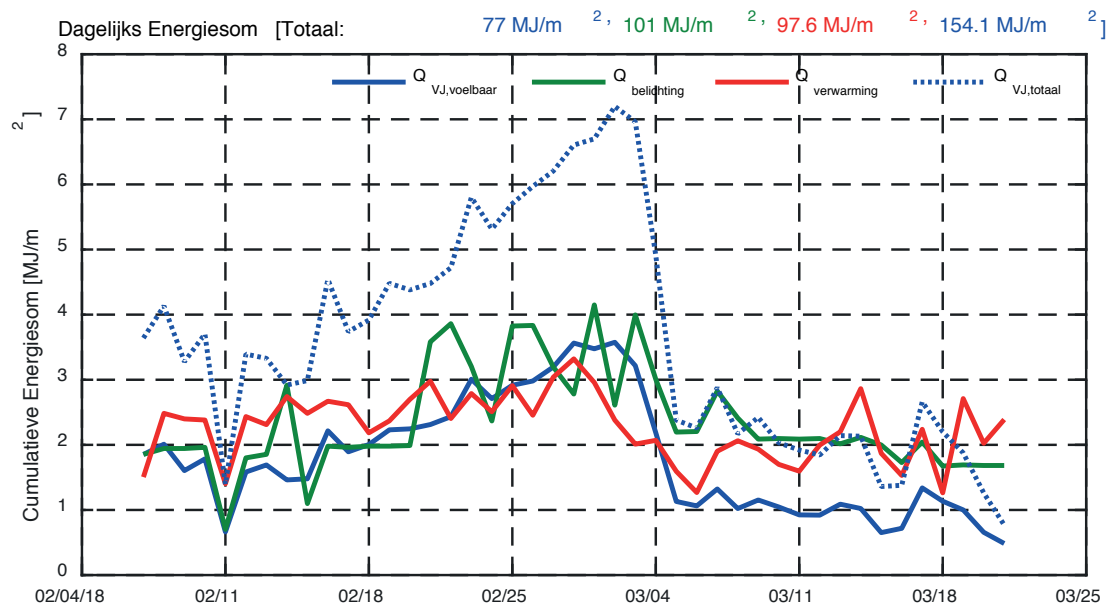




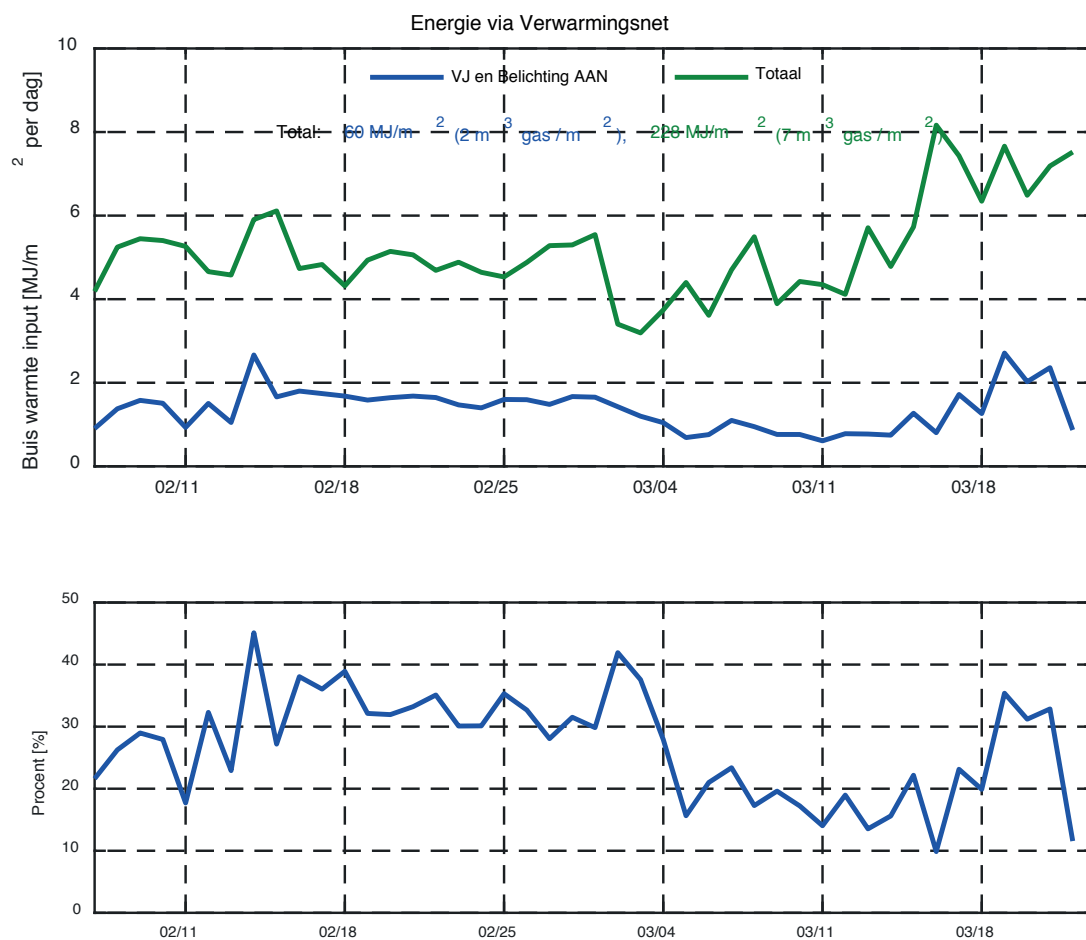
**Figuur 11** Kasklimaat (luchttemperatuur en relatieve vochtigheid) gedurende de periode dat de VentilationJets werden gebruikt.



**Figuur 12** Cyclisch 24 uurs gemiddelde (van de periode van 7 februari tot 23 maart) van de warmte stromen als gevolg van het gebruik van de volgende klimaat systemen: verwarmingssysteem  $Q_{\text{verwarming}}$ , de belichting  $Q_{\text{belichting}}$ , het voelbare warmte verlies door de VentilationJets  $Q_{\text{VJ,voelbaar}}$  en het totale warmte verlies door de VentilationJets  $Q_{\text{VJ,totaal}}$  (voelbaar en latent).



**Figuur 13** Hoeveelheden energie die dagelijks worden toegevoerd en afgevoerd door het gebruik van de volgende klimaat systemen: verwarmingssysteem  $Q_{verwarming}$ , de belichting  $Q_{belichting}$ , het voelbare warmte verlies door de VentilationJets  $Q_{VJ,voelbaar}$  en het totale warmte verlies door de VentilationJets  $Q_{VJ,totaal}$  (voelbaar en latent) tijdens de uren dat de VentilationJets worden gebruikt.



**Figuur 14** De bovenste grafiek toont de warmte-input van het verwarmingssysteem wanneer zowel de belichting als de VentilationJets werden gebruikt (blauwe lijn) en gedurende de hele dag (groene lijn). De onderstaande grafiek toont het dagelijkse warmte gebruik van het verwarmingssysteem wanneer zowel de belichting als de VentilationJets werden gebruikt als een percentage van het totale dagelijkse warmte gebruik.

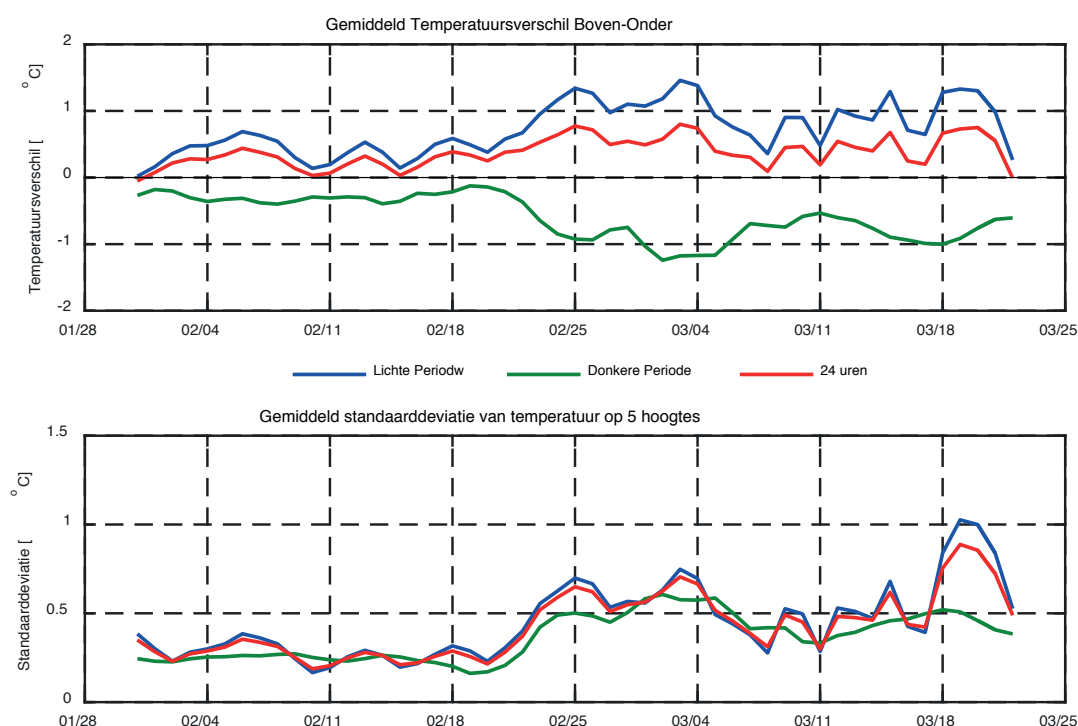
## 4 Resultaten en discussie

### 4.1 Verticaal temperatuurprofiel

Tijdens de geanalyseerde periode (31 januari 2018 tot 23 maart 2018) bleek dat de luchttemperatuur rond de bovenkant van het gewas gemiddeld  $0,4^{\circ}\text{C}$  hoger was dan de luchttemperatuur aan de onderkant van het gewas (variërend van 0 tot  $1^{\circ}\text{C}$  op dag basis). Tijdens de lichtperiode (ofwel zonnestraling of gebruik van belichting) was dit temperatuurverschil gemiddeld bijna verdubbeld ( $0,7^{\circ}\text{C}$ ) en in de donkere periode was het onderin het gewas  $0,6^{\circ}\text{C}$  warmer dan bovenin. Wat de homogeniteit van het verticale temperatuurprofiel betreft, was er geen significant verschil tussen de lichte en de donkere periode; de gemiddelde standaardafwijking van de temperatuur gemeten op 5 verschillende hoogtes bleek  $0,4^{\circ}\text{C}$  te zijn (Figuur 15). Tijdens de lichtperiode komt de belangrijkste warmtetoevoer van de zon of van de belichting wat resulteert in een hogere temperatuur aan de top. Tijdens de donkere periode (in deze tijd van het jaar) resulteerde de warmtetoevoer vanuit het verwarmingssysteem in een warmere onderkant van het gewas (Figuur 4).

Drie verschillende perioden binnen elke dag zijn gedefinieerd om meer in detail het effect van klimaatbeheersingsacties te analyseren. Deze perioden kunnen worden beschreven als:

1. De lichtperiode: wanneer er zonnestraling is.
2. De donkere periode: wanneer er geen zonnestraling is en de belichting is uitgeschakeld. Deze periode was meestal van 18:00 tot middernacht.
3. De periode met belichting, gesloten schermen en geen zonnestraling. Dit was meestal de periode van middernacht tot zonsopgang.



**Figuur 15** Daggemiddelde van het temperatuurverschil tussen de boven- en onderkant van het gewas (boven) en standaardafwijking van temperatuurmetingen op 5 hoogtes (onder) tijdens de lichte (blauwe lijn) en donkere (groene lijn) periode en gedurende de hele dag (24 uur, rode lijn) van eind januari 2018 tot eind maart 2018. De gegevens in de grafieken zijn de gemiddelde van de 3 verschillende locaties (tussen VJ, Beneden VJ en Geen VJ).

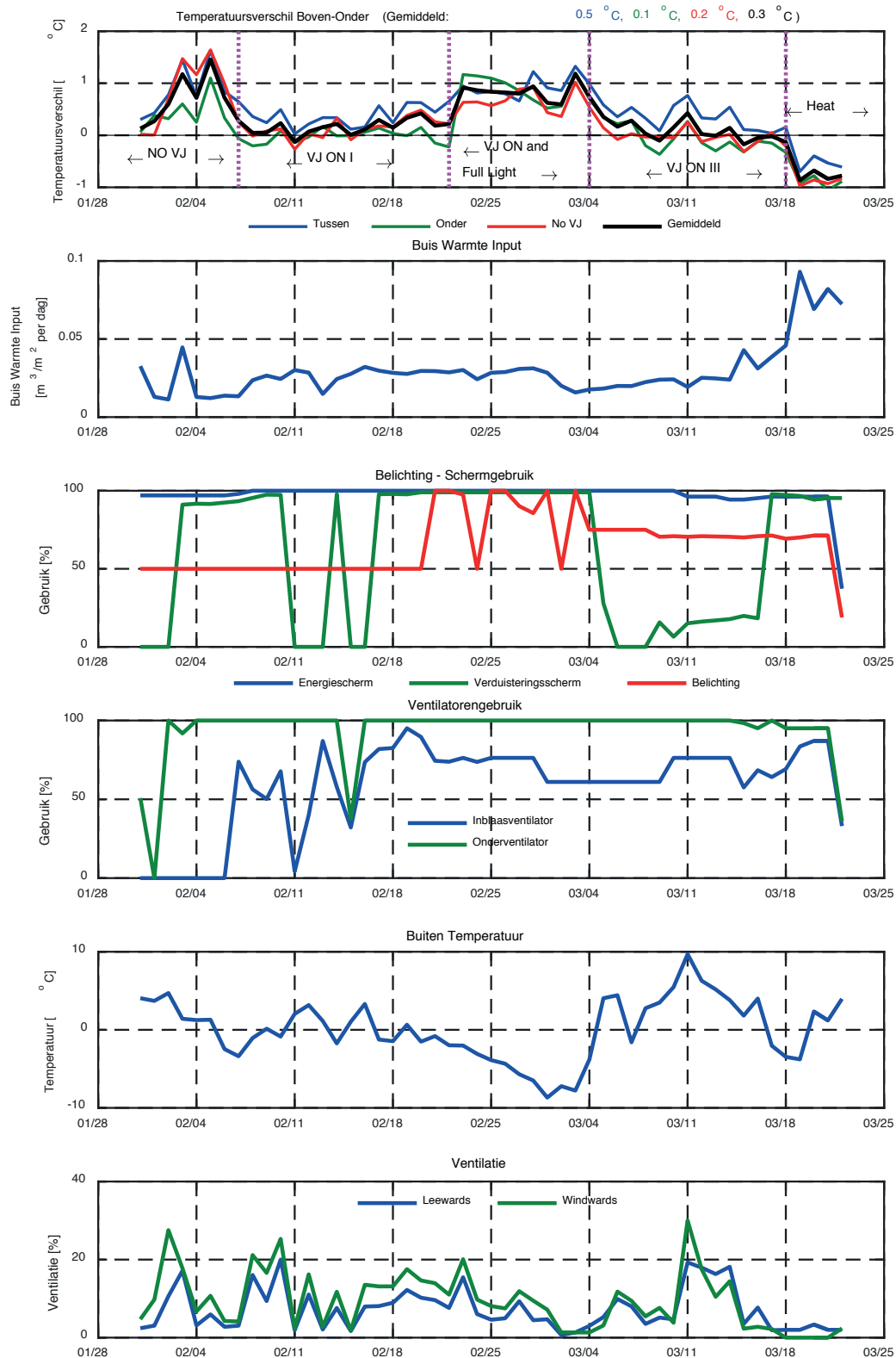
#### 4.1.1 De periode met belichting en geen zoninstraling

Dit is de periode van de dag waarop de belichting wordt gebruikt en de schermen zijn gebruikt (meestal donker buiten). Dit is de periode waarin deze studie zich voornamelijk richt, omdat het de periode is waarin de meeste klimaatbeheersingsacties plaatsvinden. Figuur 16 (bovenste grafiek) toont het temperatuurverschil tussen de bovenkant en de onderkant van het gewas, gemiddeld per dag, gedurende de uren dat de belichting aan was, ten minste één scherm werd gebruikt en er geen zonnestraling was. Tijdens de geanalyseerde periode en met betrekking tot de verticale temperatuurverschillen zijn er 5 afzonderlijke perioden te onderscheiden:

- Periode 1 - Gebruik van alleen de onderste verticale ventilator: eerste week van februari toen het temperatuurverschil groot was. In die periode was de lucht rond de top van het gewas gemiddeld  $0,8^{\circ}\text{C}$  warmer dan de lucht aan de onderkant en bereikte tijdens sommige nachten waarden tot  $1,5^{\circ}\text{C}$ . Deze periode wordt gekenmerkt door: gebruik van belichting (de helft van de totale capaciteit), lage (behalve één dag) warmtetoevoer van de buizen, gebruik van schermen, geen gebruik van de VentilationJets maar alleen gebruik van de luchtcirculatieventilatoren die onder de VentilationJet hangen. Geconcludeerd kan worden dat de warmte van de lampen niet homogeen in verticale richting naar de kas wordt verdeeld; mogelijk speelt de weerstand van het gewas tegen de luchtstroom daarbij een belangrijke rol (vooral voor de metingen die door sensoren tussen de planten werden geregistreerd). Door de verticale temperatuurverschillen op nachten te vergelijken waarbij de luchtcirculatieventilatoren werden gebruikt met nachten waarbij die niet werden gebruikt (bijvoorbeeld op 1 en 2 februari), kan worden geconcludeerd dat het gebruik van de ventilatoren de verticale temperatuurverschillen niet vermindert. Een mogelijke reden hiervoor is de weerstand van het gewas dat de warme lucht ertoe dwingt om hoofdzakelijk horizontaal en niet verticaal naar beneden te bewegen.
- Periode 2 - VentilationJet Aan I: De volgende twee weken (tweede en derde week van februari), toen het temperatuurverschil tussen de boven- en onderkant werd geminimaliseerd. Gedurende deze periode was het gemiddelde temperatuurverschil minder dan  $0,2^{\circ}\text{C}$  (van 0 tot  $0,4^{\circ}\text{C}$  op dagelijkse basis). In die periode werden de VentilationJets gebruikt en bovendien was de warmte-inbreng van het verwarmingsnet gemiddeld meer dan het dubbele dan in de eerste week van februari (geschat op gemiddeld respectievelijk  $23,5 \text{ W/m}^2$  en  $11 \text{ W/m}^2$ ). Blijkbaar was de warmte-inbreng bij de top (belichting) en de bodem (verwarmingssysteem) meer gebalanceerd, wat resulteerde in een meer homogene verticale temperatuurverdeling. We kunnen aannemen dat de toevoer van koude lucht uit de VentilationJets vrij homogeen werd verdeeld vanuit de onderste ventilatoren voor luchtcirculatie, omdat er geen grote verschillen waren in de gemeten locaties dichterbij of verder van de VentilationJets.
- Periode 3 - VentilationJet Aan en maximale belichting: de laatste week van februari en de eerste 10 dagen van maart, toen het temperatuurverschil tussen de boven- en onderkant weer werd verhoogd tot gemiddeld  $0,8^{\circ}\text{C}$ . Tijdens deze periode werd de belichting op volledige capaciteit gebruikt, wat resulteerde in een twee keer zo hoge warmtetoevoer aan de bovenkant van de kas dan in de voorgaande dagen. De warmte-inbreng onderin het gewas (verwarmingssysteem) was niet significant anders dan voorheen. De temperatuur van de buitenlucht in periode 3 was gemiddeld  $5^{\circ}\text{C}$  lager dan in periode 2 ( $-5,3^{\circ}\text{C}$  en  $-0,2^{\circ}\text{C}$ ), maar door minder raamopening was er slechts weinig extra warmteafvoer door de VentilationJets. Deze afvoer was blijkbaar niet voldoende om de extra warmte-inbreng van de belichting te compenseren. Om een orde van grootte van de hiervoor genoemde warmtefluxen te geven, aangenomen dat in periode 3 de lucht die ingeblazen werd  $2^{\circ}\text{C}$  lager was dan in periode 2, dan zou dat resulteren in een extra warmteafvoer van ongeveer slechts  $8 \text{ W/m}^2$  meer en de dubbele lichtintensiteit zorgt ervoor voor een extra warmtetoevoer van ongeveer  $30 \text{ W/m}^2$ .
- Periode 4 - Ventilatie Jet Aan III: de periode van 2 weken vanaf 5 maart, toen er weer een klein verschil in luchttemperatuur was tussen de boven- en onderkant. De belichtingsintensiteit in die periode was 75% van de totale capaciteit en bovendien werd één scherm hoofdzakelijk niet gebruikt, waardoor gemakkelijker (warme) lucht werd verwijderd naar het bovenste compartiment (boven de schermen). Gedurende die periode was het gemiddelde luchttemperatuurverschil tussen de bovenkant en de bodem slechts  $0,1^{\circ}\text{C}$ .

- Periode 5 - Warmte: de 5 dagen van de geanalyseerde periode toen de onderkant van het gewas (gemiddeld 0,8°C) warmer was dan de bovenkant. Tijdens deze periode werd de warmte-inbreng van het verwarmingssysteem met een factor 4 (vergeleken met periode 4) verhoogd als gevolg van buistemperaturen van ongeveer 50°C. Het resultaat van deze extra warmtetoevoer aan de onderkant was het bovengenoemde negatieve temperatuurverschil tussen de bovenkant en de bodem.

Samenvattend heeft het gebruik van belichting zonder warmtetoevoer van de buizen en zonder het gebruik van VentilationJets verticale temperatuurgradiënten tot gevolg omdat de bovenkant van het gewas ongeveer 1°C warmer blijft dan de onderkant. Dit temperatuurverschil kan niet worden verkleind door het gebruik van alleen de onderste verticale ventilatoren, maar het kan worden beïnvloed door de VentilationJets en het verwarmingssysteem. Specifiek, wanneer de VentilationJets een deel van de warmte van de top van de kas verwijderen en tegelijkertijd bijna dezelfde hoeveelheid warmte uit het verwarmingssysteem wordt toegevoegd, dan is de temperatuurverdeling over de verticale afmeting zeer homogeen. Er is echter een evenwicht tussen deze warmtefluxen nodig; er werd vastgesteld dat meer energietoevoer uit de lampen (periode 3) of uit het verwarmingsnet (periode 5) nog steeds kan resulteren in verticale temperatuurverschillen en respectievelijk warmere boven- of onderkant.



**Figuur 16** Daggemiddelden van de verticale temperatuurverschillen (boven) en klimaatregelingsapparatuur (zowel verwarming, de belichting, het schermgebruik, verticale ventilatoren en VentilationJets) gedurende de uren dat de belichting werd ingeschakeld en er geen zoninstraling was.

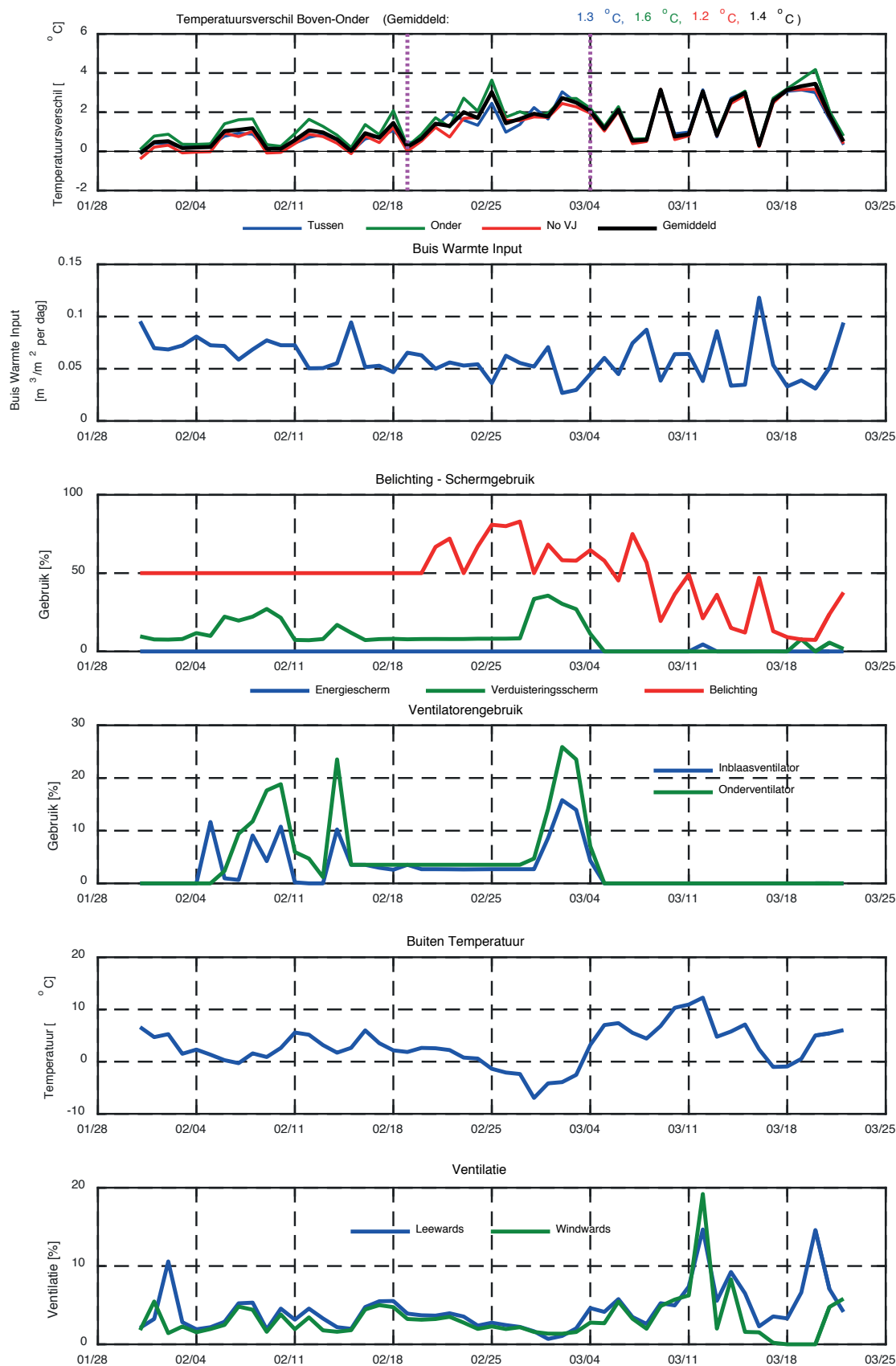


#### 4.1.2 De dag periode (met zoninstraling)

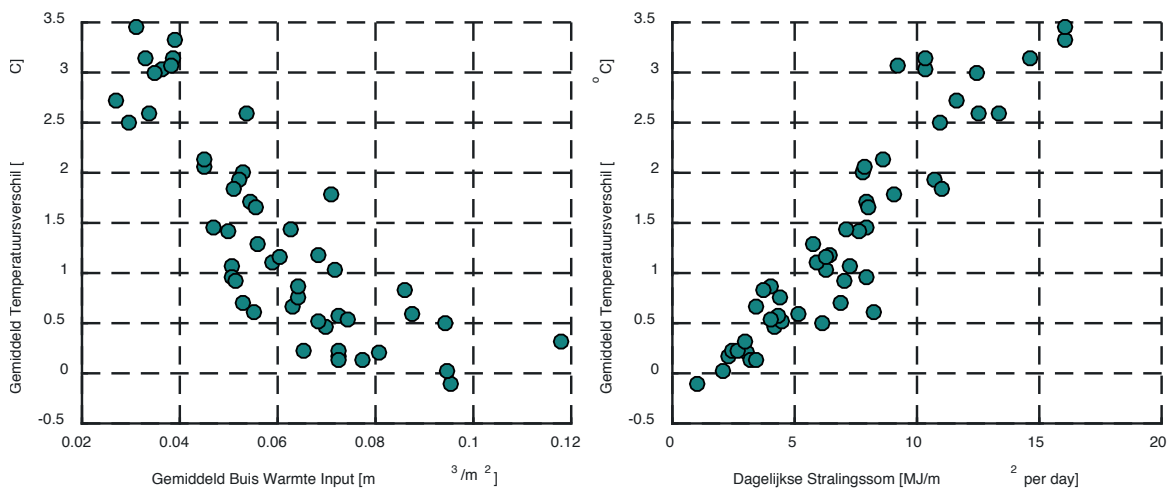
Tijdens de lichtperiode was de lucht rond de top van het gewas bijna altijd warmer dan onderin het gewas. Er kan dus worden geconcludeerd dat de door de zon en de lampen geleverde warmte relatief meer bijdraagt aan het opwarmen van de bovenkant dan aan de onderkant van de kaslucht. Rekening houdend met het feit dat een goed ontwikkeld tomatengewas (met Leaf Area Index 3.5) meer dan 90% van de directe zonnestraling absorbeert, werd het bovengenoemde resultaat verwacht. Tot half februari, toen de dagen relatief koud, kort en donker waren, werden kleinere verticale temperaturen opgetekend. De temperatuurverschillen waren iets hoger in de tweede helft van februari. In maart waren er zowel dagen met hoge en lage verticale temperatuurverschillen.

Tijdens de lichtperiode werd een sterke relatie tussen de hoeveelheid warmtetoevoer en de verticale temperatuurverschillen waargenomen. Hoe meer warmte wordt toegevoerd door de buisrail en de groeibuizen, hoe minder temperatuurverschil er is tussen de boven- en onderkant van het gewas, voornamelijk als gevolg van de warmere onderkant (Figuur 18). Dit is nog duidelijker in maart, toen tijdens de dagen met minder warmtetoevoer door het verwarmingsnet het verticale temperatuurverschil veel groter was dan tijdens de dagen met meer warmtetoevoer uit het verwarmingsnet (Figuur 17). Natuurlijk waren de dagen waarop de warmtetoevoer van de verwarmingsbuizen werd gerealiseerd ook de donkerste dagen, dus het effect van zoninstraling beïnvloedt ook de verticale temperatuurverdeling. Het kan grofweg worden geconcludeerd dat tussen zeer donkere dagen ( $<2 \text{ MJ/m}^2$  dagelijkse globale stralingssom) en dagen waarop een stralingssom van ongeveer  $17 \text{ MJ/m}^2$  per dag werd bereikt, het verticale temperatuurverschil met ongeveer  $0,2^\circ\text{C}$  toeneemt (kop warmer) per  $1 \text{ MJ/m}^2$  stralingssom (Figuur 18).

Concluderend mag worden verwacht dat op zonnige dagen een verticale temperatuurgradiënt zal bestaan. Als men deze verschillen wil minimaliseren, dan is dit goed mogelijk door het verwarmingssysteem te gebruiken. Deze extra warmtetoevoer resulteert in een overmaat aan warmte die moet worden geventileerd. Hierdoor wordt verwacht dat de verhoogde ventilatiesnelheid zal bijdragen aan een homogener verticaal temperatuurprofiel. Er moet echter wel worden geëvalueerd of een kleiner verticaal temperatuur profiel wenselijk is en of deze actie niet leidt tot te hoge temperaturen en te grote  $\text{CO}_2$  verliezen.



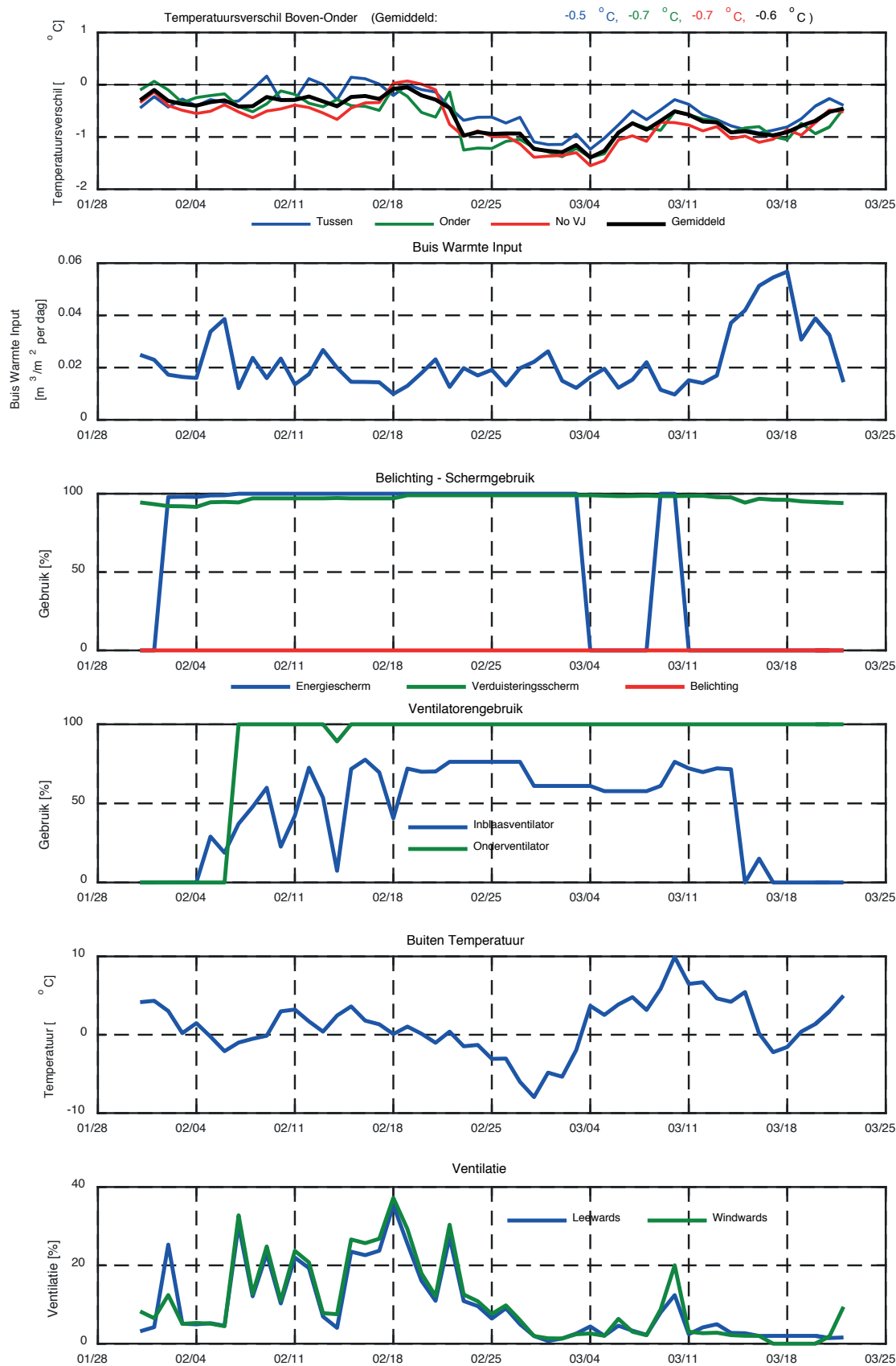
**Figuur 17** Dagelijkse gemiddelde waarden van het verticaal temperatuurverschil (bovenste grafiek) en gebruik van klimaatregelingsapparatuur (verwarmingssysteem, belichting, schermgebruik, verticale ventilatoren en VentilationJets) gedurende de uren van de dag dat er zonnestraling was.



**Figuur 18 Gemiddelde dagelijkse verticale temperatuurverschillen (boven-onder) tijdens de lichtperiode versus de warmtetoevoer van het verwarmingssysteem (links) en de dagelijkse stralingssom (rechts).**

#### 4.1.3 De donker periode

Een donker periode van ongeveer 6 uur, van 18:00 tot 00:00 werd meestal gerealiseerd in Gardener's Pride tijdens de geanalyseerde periode. Gedurende die periode werd het verwarmingssysteem bijna continu gebruikt om de gewenste temperatuur te bereiken. Dit resulteerde bijna altijd in negatieve verticale temperatuurverschillen, of met andere woorden, een warmere onderkant dan de top van het gewas. Rekening houdend met het feit dat de ramen in deze periode altijd een beetje open waren, creëerde de inlaat van koude lucht van buiten (tot 15°C kouder dan de kaslucht) in combinatie met de warmtetoevoer van het verwarmingssysteem het beschreven verschil. Het verticale temperatuurprofiel neigt te homogeniseren vanwege het drijfvermogen maar door de continue warmtetoevoer aan de onderkant en de afvoer van koude door de ramen werd het verschil gehandhaafd. Het verticale temperatuurverschil was groter (warmere onderkant van het gewas) wanneer de buitenluchttemperatuur lager was (bijvoorbeeld aan het einde van februari en begin maart) (Figuur 19).

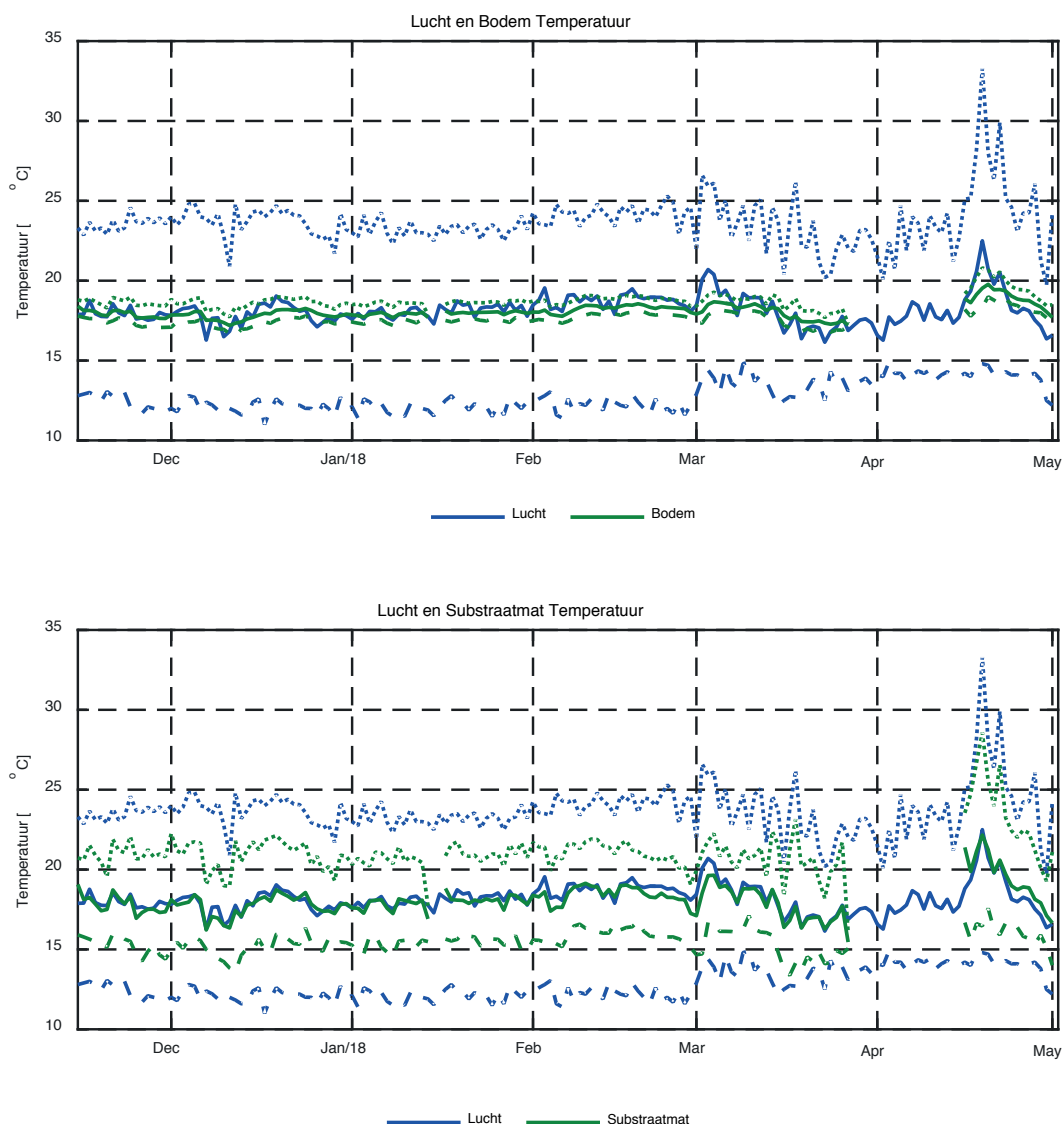


**Figuur 19** Daggemiddelden van het verticale temperatuurverschil (bovenste) en klimaatregelingsapparatuur (zowel verwarmingssysteem, de belichting, het schermgebruik, verticale ventilatoren en VentilationJets) gedurende de uren dat de belichting uit stond en er geen zonnestraling was (donkere periode).

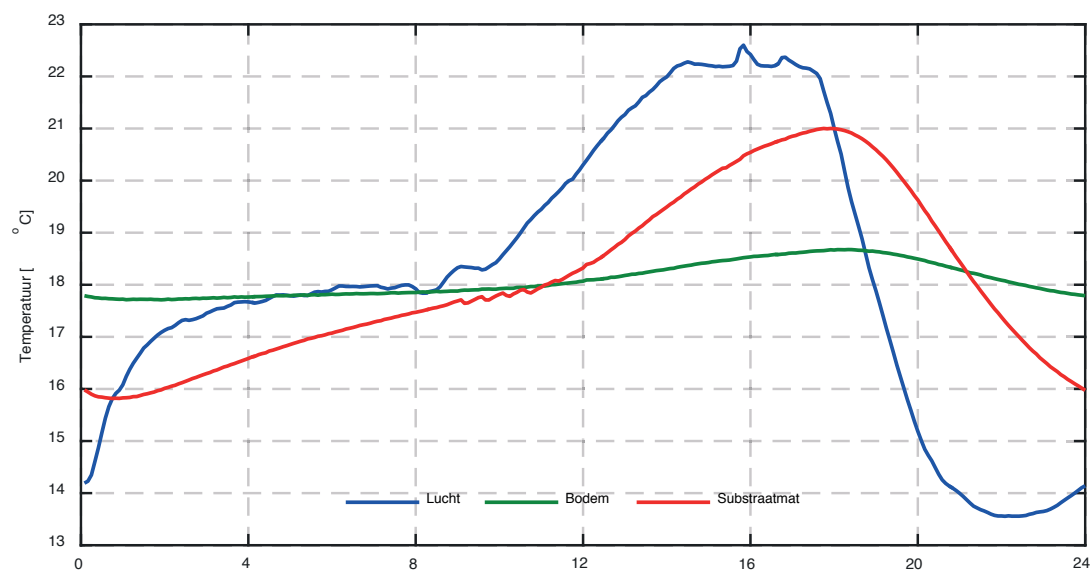
## 4.2 Bodem en substraat temperatuur

De bodem- en substraattemperatuur bleken de luchttemperatuur met een vertraging van respectievelijk ongeveer 2 en 3 uur voor het substraat en de bodem te volgen. De bodem- en substraattemperaturen fluctueerden minder dan de luchttemperatuur (verschil tussen maximum en minimumtemperatuur op dag basis), maar bijna altijd met een vergelijkbaar 24 uurs gemiddelde. De gemiddelde dag fluctuaties lagen respectievelijk binnen een bereik van 10,0°C, 5,6°C en 1,2°C voor de lucht, substraat en de bodemtemperatuur.

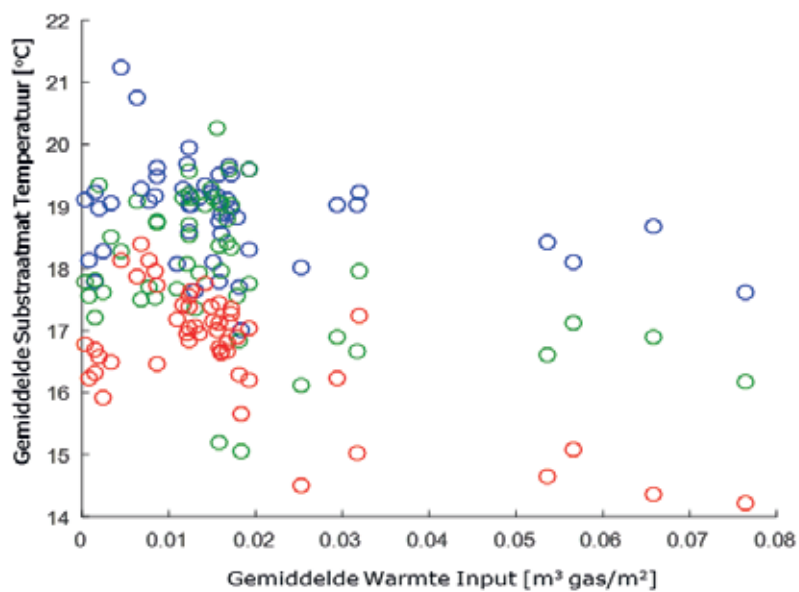
De warmte-inbreng van de buizen bleek niet direct gerelateerd te zijn aan de bodem of substraat temperatuur. De bodemtemperatuur op 10 cm diepte bleek behoorlijk stabiel met kleine fluctuaties. Met betrekking tot de substraattemperatuur is convectie het hoofdmechanisme van de warmteoverdracht, zodat de luchttemperatuur de temperatuur is die het meest van invloed is op de substraattemperatuur.



**Figuur 20** Lucht en bodem (boven) en lucht en substraat (onder) temperaturen. De doorlopende lijnen tonen het daggemiddelde, de onderbroken lijnen het dagelijkse minimum en de stippellijnen de dagelijkse maximumtemperatuur.



**Figuur 21** Cyclisch gemiddelde van de lucht, de bodem op 10 cm diepte en de substraattemperatuur tijdens de geanalyseerde periode van midden november 2017 tot eind april 2018.

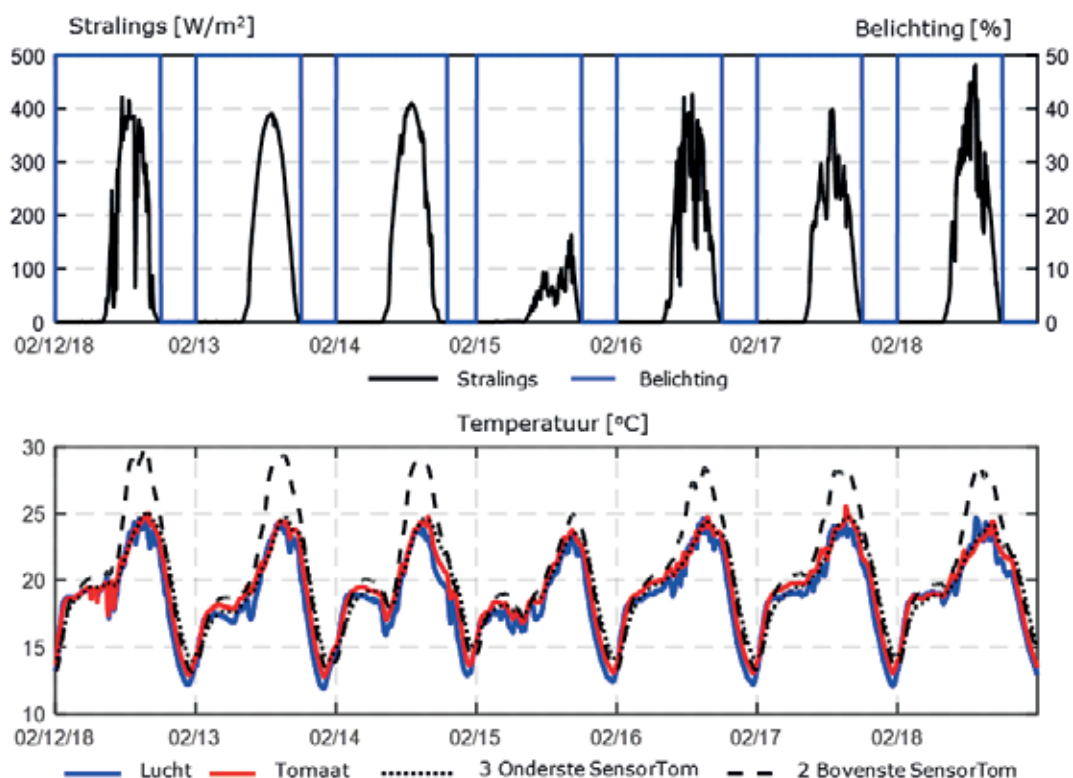


**Figuur 22** Gemiddelde substraat temperatuur versus de geschatte warmtetoevoer voor elke dag tijdens de "Dag" (zoninstraling, blauwe cirkels), "Donker" (geen instraling, groene cirkels) en de periode met belichting en geen zonnestraling (rode cirkels).

## 4.3 Tomaat temperatuur

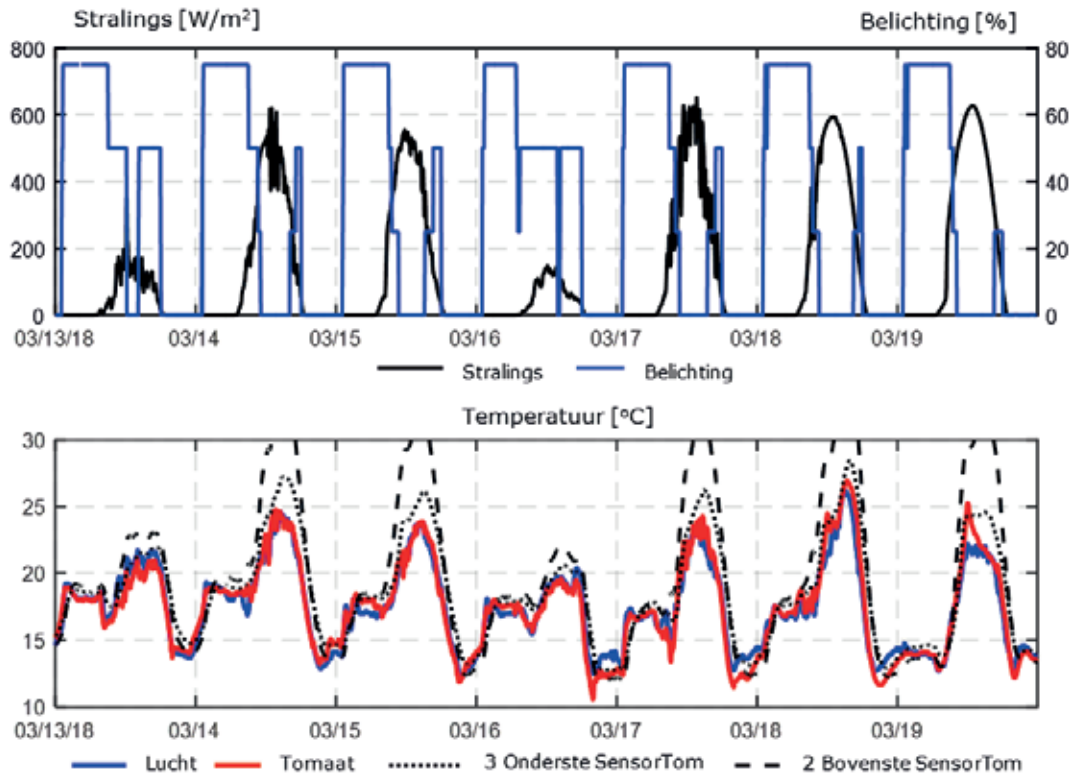
De temperatuur van de cherry tomaat verschilde nauwelijks van de luchttemperatuur (Figuur 23, Figuur 24). Zelfs tijdens de opwarmperiode in de ochtend en de afkoelperiode in de namiddag, werden kleine vertragingen in de verandering tussen de lucht- en tomatentemperatuur waargenomen. In de ochtend werden de tomaten iets sneller opgewarmd door de zon en in de middag koelden ze een paar minuten langzamer af dan de lucht. Tijdens de dag periode lag de tomatentemperatuur heel dicht bij de luchttemperatuur: slechts enkele keren op zonnige dagen overschreed de temperatuur van de tomaat de luchttemperatuur (Figuur 23). Tijdens de donkerperiode was de tomatentemperatuur meestal iets hoger dan de luchttemperatuur, vooral omdat de tomaten iets langzamer afkoelden dan de lucht. Tijdens de belichtingsperiode, was de tomaten temperatuur iets hoger dan de luchttemperatuur. Op dag basis was de gemiddelde tomatentemperatuur ongeveer 0,12°C hoger dan de gemiddelde luchttemperatuur (Figuur 26).

Over het algemeen werden er geen significante verschillen waargenomen in de tomatentemperatuur op verschillende hoogtes. De tomatentemperatuur volgde de luchttemperatuur en wanneer de luchttemperatuur op verschillende hoogten vergelijkbaar was, gebeurde hetzelfde met de tomatentemperatuur (Figuur 29, Figuur 30). Het resultaat was heel anders voor de kunsttomaten, die aanzienlijke vertragingen vertoonden bij het opwarmen en afkoelen in vergelijking met de kasluchttemperatuur. Het is duidelijk dat er een sterk effect is van de tomatenomvang (en dus de warmtecapaciteit) op de tijd die nodig is om de veranderingen in de klimaatomstandigheden te volgen. Bovendien was de temperatuur van de kunsttomaat tijdens zonnige dagen tot 5° C warmer dan de luchttemperatuur terwijl de echte cherry tomatentemperatuur zelden meer dan 1° C verschilde van de kasluchttemperatuur. Bovendien was er in die dagen een groot temperatuurverschil tussen de bovenste 2 en de onderste 3 kunsttomaten, wat het effect van directe zonnestraling op de tomatentemperatuur aantoont.

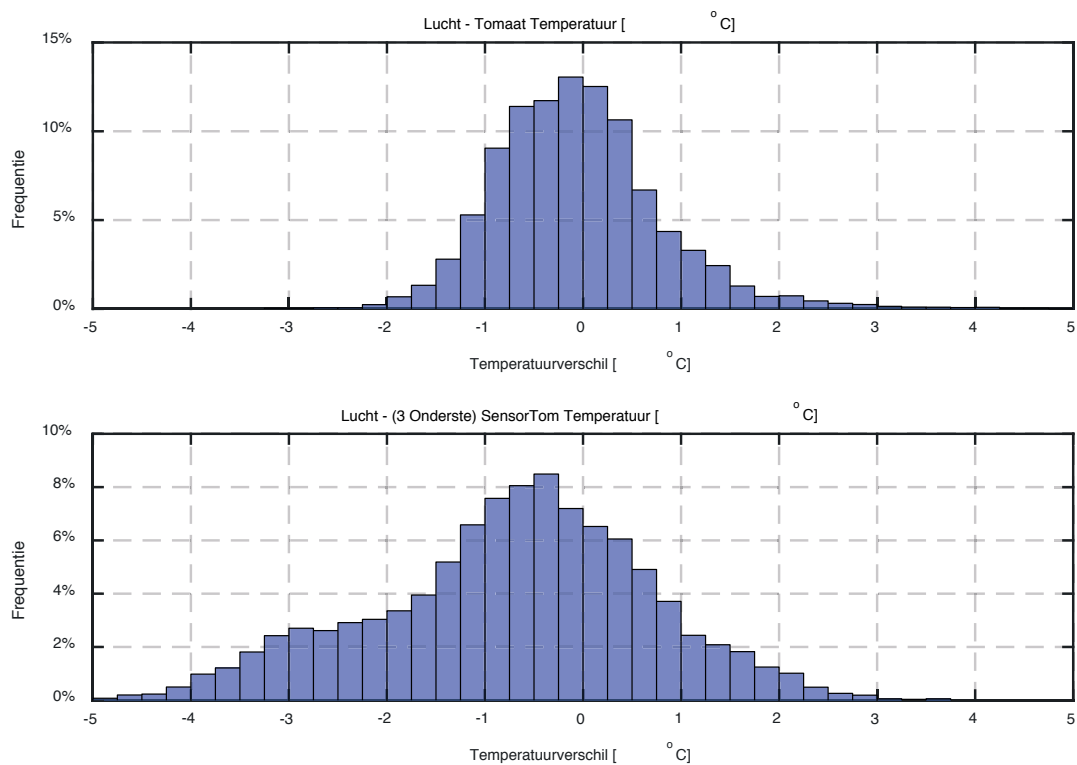


**Figuur 23** Zoninstralingsintensiteit en belichting (boven) en lucht, echte Cherry tomaat en kunstmatige (grote) tomaat temperatuur gedurende één week in februari 2018.

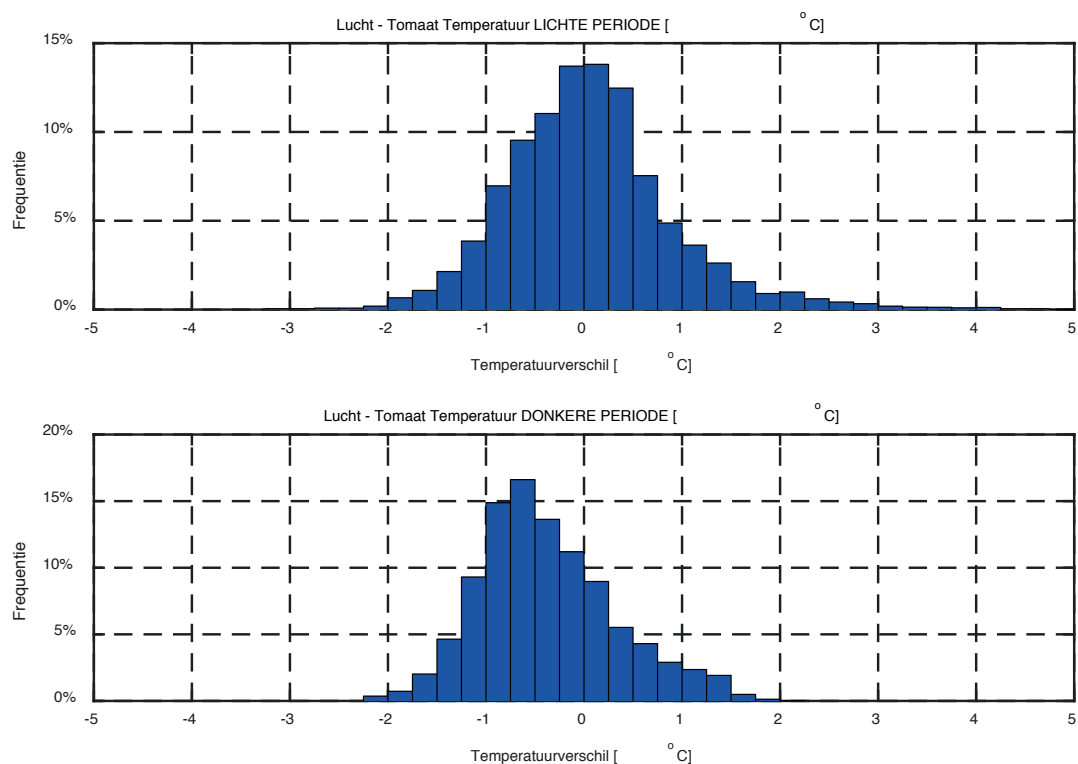




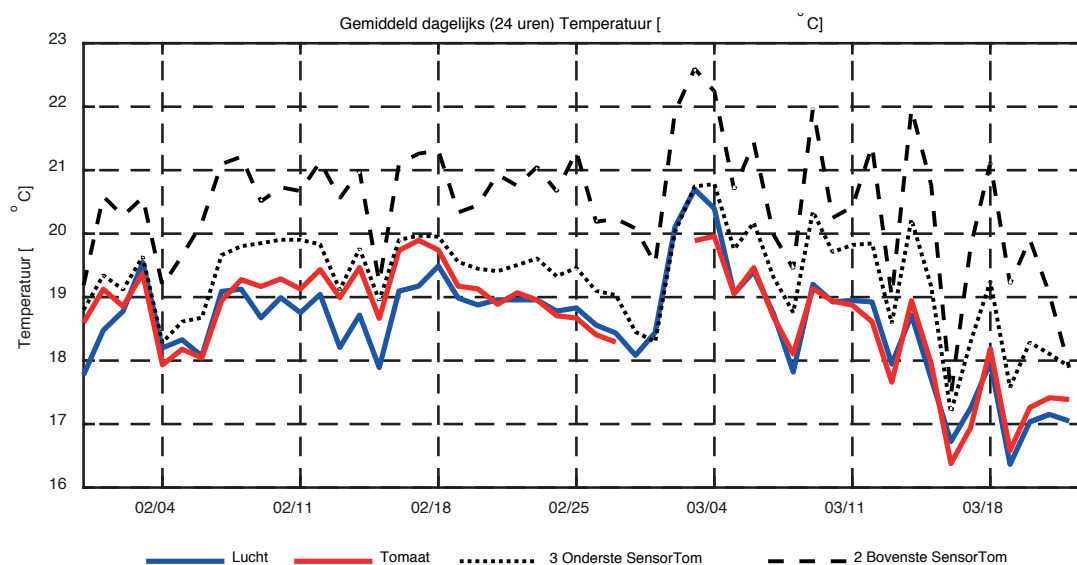
**Figuur 24** Zoninstralingsintensiteit en de inzet van belichting (boven) en lucht, echte Cherry tomaat en kunstmatige (grote) tomaat temperatuur gedurende één week in maart 2018.



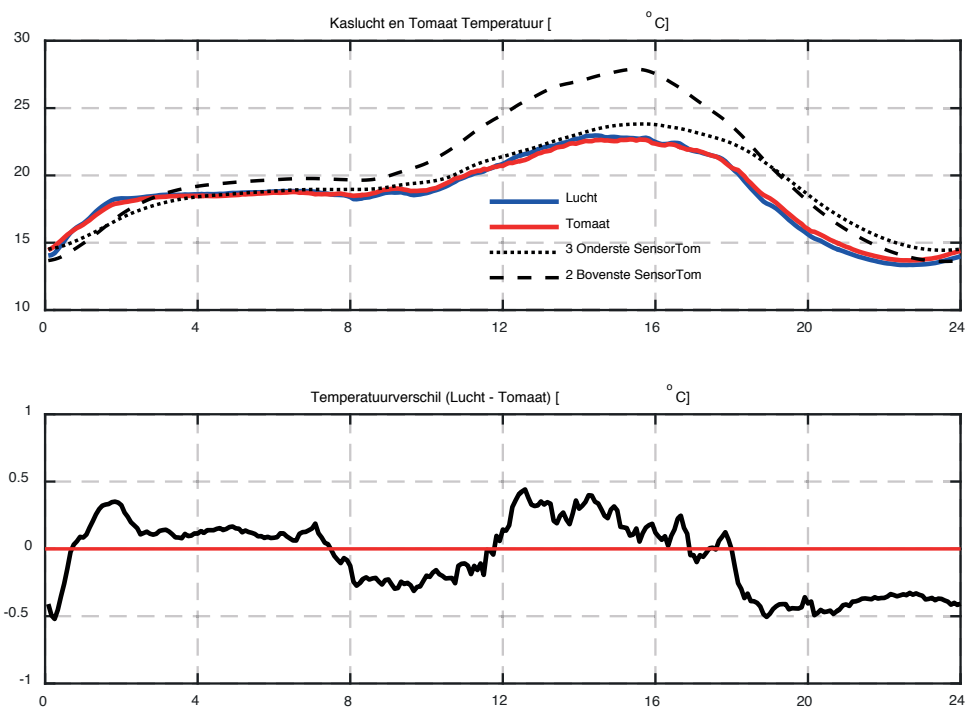
**Figuur 25** Frequentieverdeling van de temperatuurverschillen tussen de kasluchttemperatuur en de echte (cherry) tomaten (boven) en tussen de kasluchttemperatuur en de kunstmatige (grote) tomaten (onder). Voor de periode begin februari en eind mei 2018 zijn de 5 minuten gegevens weergegeven.



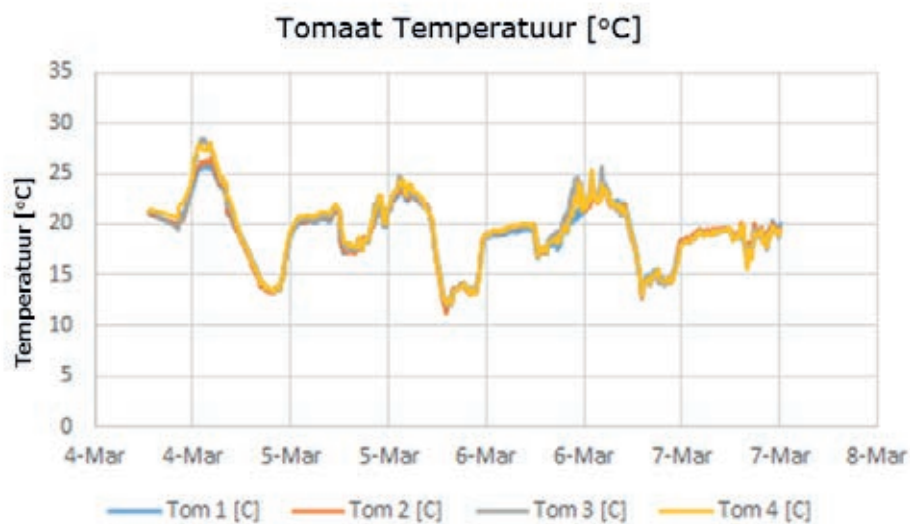
**Figuur 26** Frequentieverdeling van de temperatuurverschillen tussen de kasluchttemperatuur en de echte (cherry) tomaten tijdens de licht (boven) en donker (onder) periode.



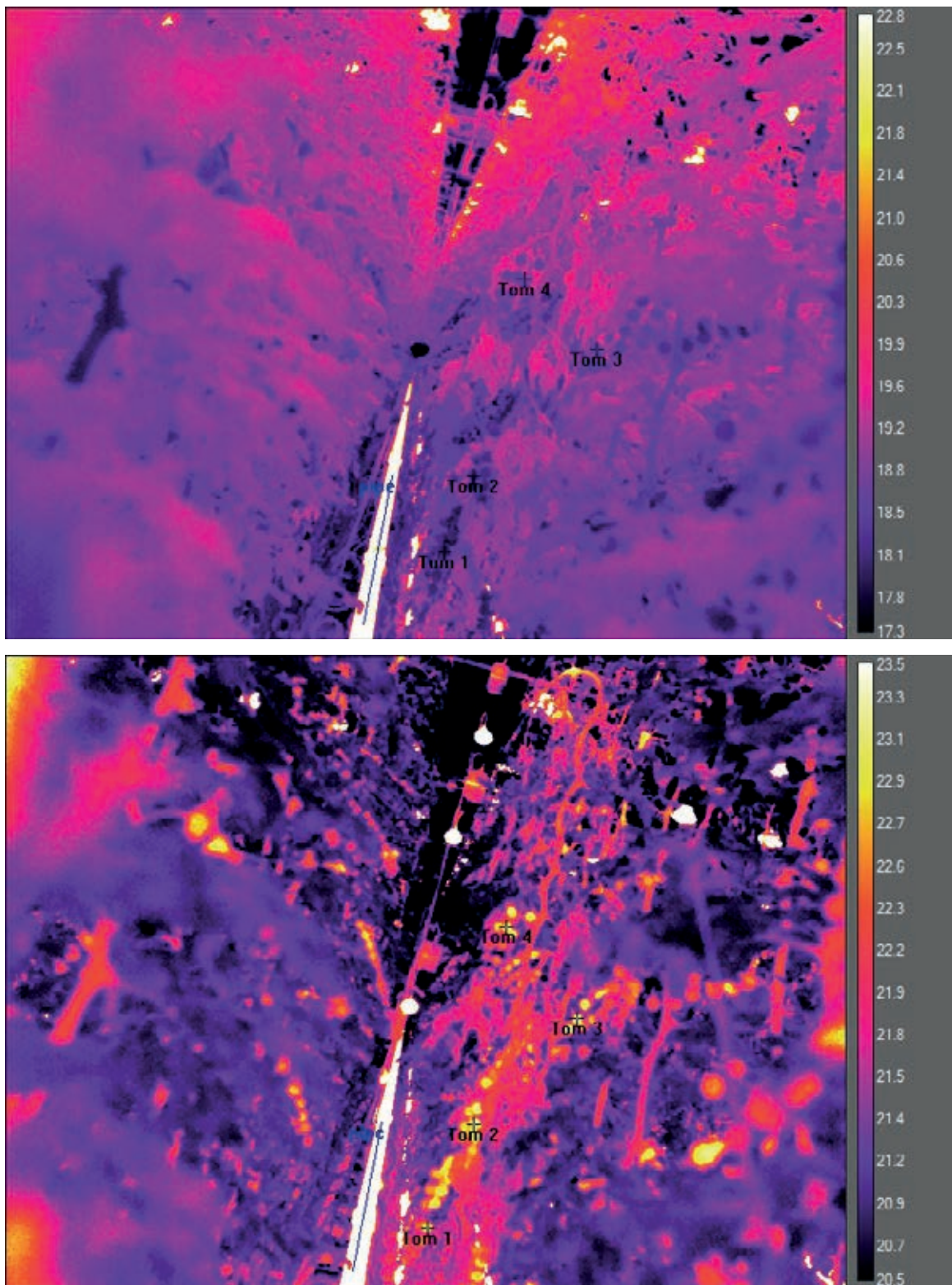
**Figuur 27** Dagelijkse gemiddelde lucht, cherry tomatat en kunstmatige tomatentemperatuur (SensorTom).



**Figuur 28** Cyclisch gemiddelde van de luchttemperatuur, de temperatuur van de echte (cherry) tomaten en de kunsttomaten (boven) en het verschil tussen de lucht temperatuur en cherry tomaat temperatuur (onder) voor de periode van 10 tot 28 februari 2018.



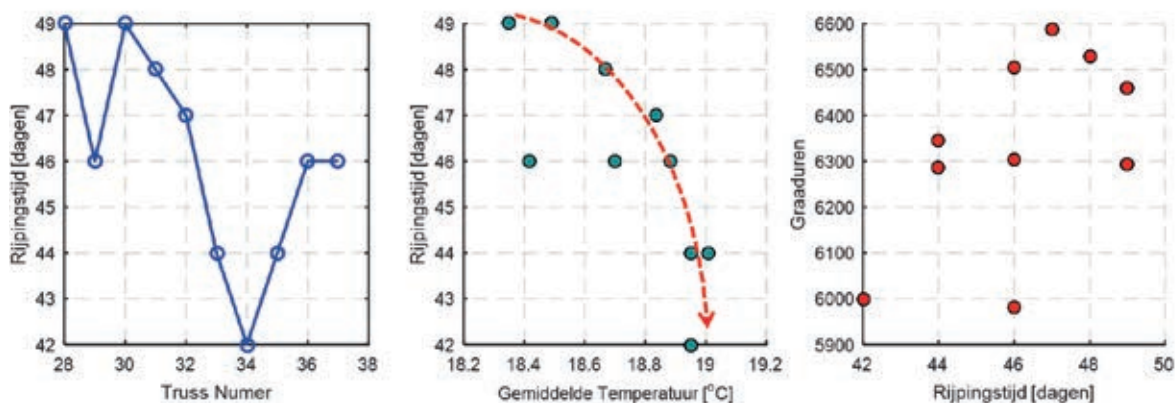
**Figuur 29** Cherry tomatentemperatuur op 4 verschillende hoogtes gedurende 3 dagen begin maart 2018.



**Figuur 30** Thermische afbeeldingen van de tomatenteelt vlak na het inschakelen van de belichting (boven) en iets later (onder). Er werd waargenomen dat tomaten (Tom 1, Tom 2, Tom 3 en Tom 4) die zich dicht bij de groeipijp bevonden een vergelijkbare temperatuur hadden als tomaten die zich hoger in het gewas bevinden.

#### 4.3.1 Tomaten temperatuur en uitgroeiduur

De trossen die werden ontwikkeld en geoogst in de periode dat de tomatentemperatuur werd gemeten (de eerste gevolgde tros werd 12 december 2017 gevormd en geoogst op 30 januari 2018, de laatste gevolgde tros werd gevormd op 7 februari 2018 en geoogst op 25 maart 2018) hadden een uitgroeiduur<sup>1</sup> van 6 tot 7 weken. Er was 1 week verschil tussen de snelste en de langzaamste gerijpte tros. De gemiddelde temperatuur van de tomaten tijdens de uitgroeiperiode varieerde van 18,3°C tot 19,0°C. De metingen wijzen op een verband tussen de gemiddelde tomaattemperatuur en de uitgroeiduur; de 3 trossen geteeld bij de hoogste gemiddelde temperatuur rijpten het snelst en de snelst gerijpte tros werd geteeld met een gemiddelde temperatuur van 19,0°C. Dit komt goed overeen met gepubliceerde onderzoeksresultaten die een positief effect van tomaattemperatuur (binnen een bepaald bereik) op verkorting van de uitgroeiduur laten zien (Adams *et al.* (2001), de Koning (1990)). Er was echter geen duidelijke relatie gevonden tussen graaduren en uitgroeiduur<sup>2</sup>; specifiek werd berekend dat de snelste gerijpte tros met 10% minder graaduren (600 graad-uren) werd geteeld dan de andere trossen. De vruchttemperatuur varieerde tijdens de geanalyseerde periode niet veel waardoor de invloed van een groot tomatentemperatuur bereik op uitgroeiduur niet kon worden geanalyseerd. Figuur 27 laat duidelijk zien dat de tomaattemperatuur tot 15 maart rond de 19°C lag en pas daarna significant lager was omdat er toen minder werd belicht.



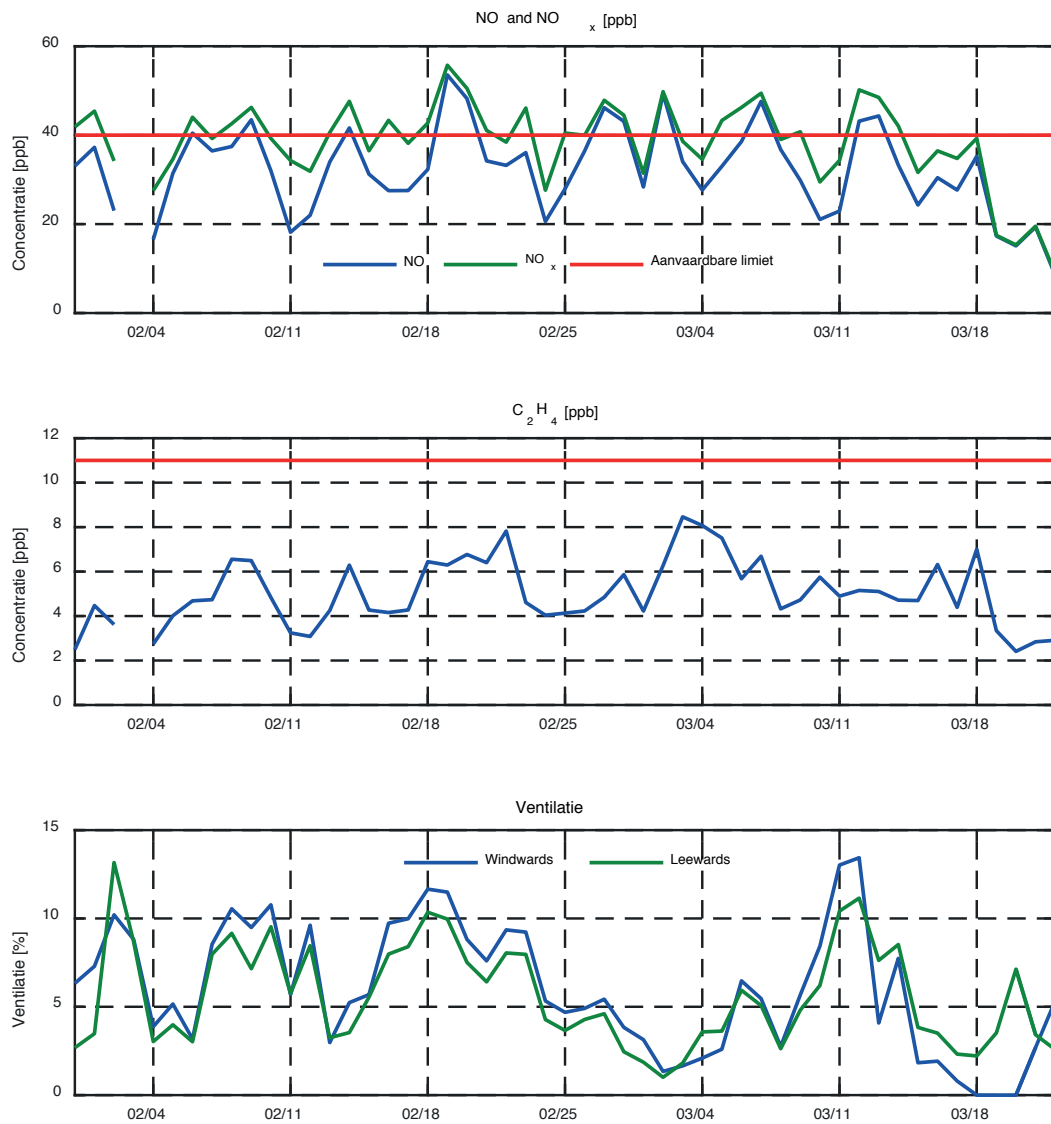
**Figuur 31** Uitgroeiduur van de tros (links) uitgroeiduur van de tros versus de gemiddelde tomaattemperatuur (midden) en de som van de graaduren versus de uitgroeiduur (rechts).

#### 4.4 Monitoren van de rookgas concentratie in de kas

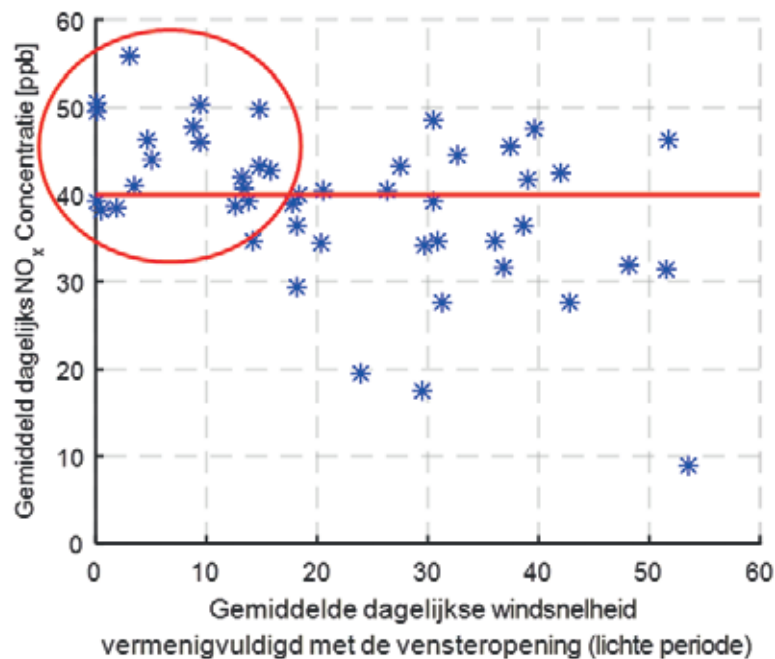
De monitoring van de rookgassen concentratie was gericht op de daggemiddelden van  $C_2H_4$ , NO en totaal  $NO_x$ . De resultaten werden geëvalueerd op basis van deze daggemiddelden in plaats van op basis van de momentane geregistreerde waarden omdat rookgas tijdelijk boven de schadelijke 24 uur grens mogen zitten. De gemeten concentratie van  $C_2H_4$  was vrij laag (gemiddeld 2-8 ppb) gedurende de geanalyseerde periode en kwam nooit in de buurt van de aanvaardbare limiet (11 ppb). De  $NO_x$  concentratie was gelijk of hoger dan de acceptabele limiet van 40 ppb gedurende bijna de helft van de geanalyseerde periode (24 van de 51 dagen) (Figuur 32).



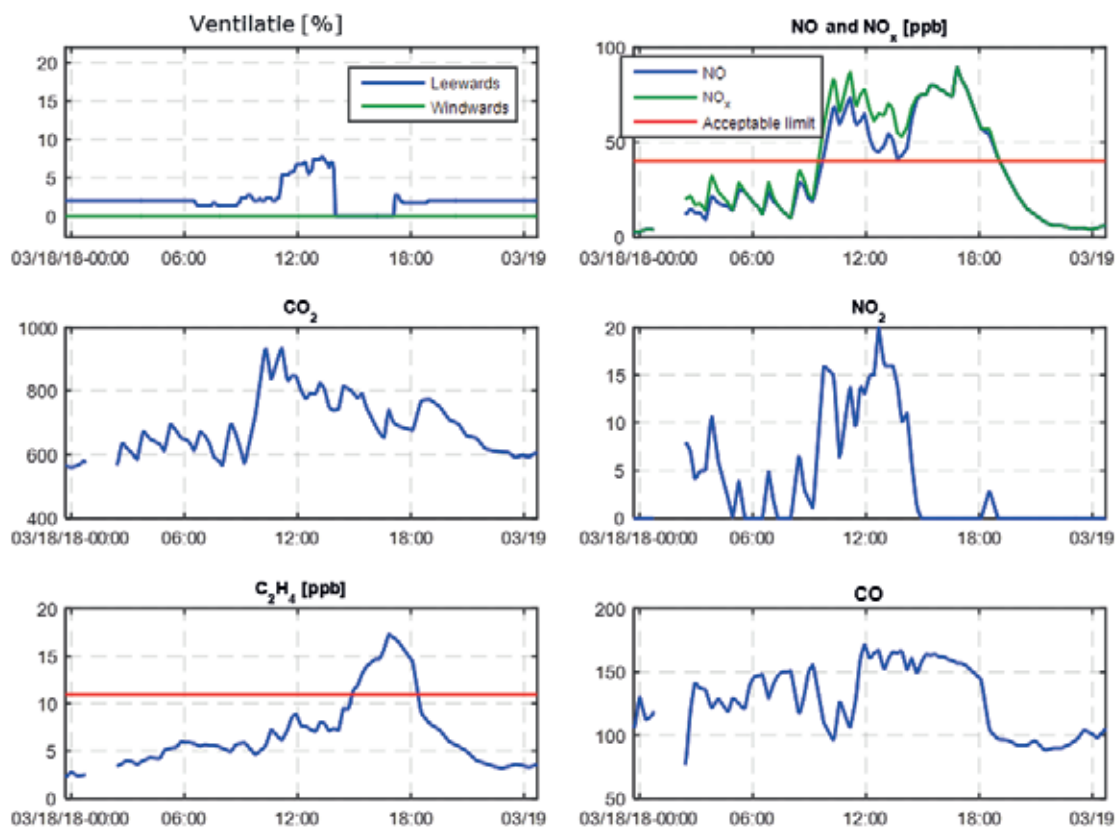
Als de concentratie van rookgassen niet wordt gemeten, dan is het lastig om van tevoren te voorspellen of een minimale ventilatieopening nodig is en of de aanvaardbare rookgas limieten worden overschreden. Zoals hierboven vermeld, werden de aanvaardbare limieten bijna de helft van de tijd overtroffen. De concentratie van rookgassen kon de maximaal aanvaardbare limiet bereiken op dagen dat de ramen genoeg uren open werden gehouden. Anderzijds werd op dagen met veel minder ventilatie - zoals op 18 maart, toen de ramen een paar uur gesloten werden gehouden (Figuur 34) - geconstateerd dat de concentratie van de rookgassen de maximaal toelaatbare limiet niet overschrijdt. Tijdens een dag wanneer hoge ventilatiesnelheden worden waargenomen, is het uiteraard gemakkelijker om de rookgassen uit de kas te ventileren, maar juist vanwege de hoge ventilatiesnelheden, zijn de  $\text{CO}_2$ -verliezen door ventilatie ook hoog, wat resulteert in meer  $\text{CO}_2$ -toevoer, dus meer invoer van rookgassen. Precies het tegenovergestelde gebeurt op dagen met lage ventilatiesnelheden; minder rookgassen worden geventileerd, maar de toevoer van rookgassen is ook kleiner omdat minder  $\text{CO}_2$  nodig is om de gewenste concentratie te bereiken. Wat uit de geregistreerde gegevens kan worden geconcludeerd, is dat op dagen met een lage windsnelheid ( $<1,5$  m/s) of geen wind of op dagen dat de ramen gesloten werden gehouden, hoge  $\text{NO}_x$ -concentraties kunnen worden verwacht (Figuur 33). Dus de ramen moeten meer open gehouden worden om schade aan het gewas te voorkomen of een andere  $\text{CO}_2$  bron moet worden gebruikt. Op een dag dat alle ramen 3 uur lang volledig waren gesloten, werd opgemerkt dat tijdens die periode de concentratie van rookgassen boven de limiet steeg. Op die dag was de gemiddelde dagelijkse concentratie nog steeds lager dan de limiet. Er moet worden benadrukt dat de bovengenoemde dag een relatief winderige dag was (Figuur 35) die in combinatie met de minimale ventilatieopening tijdens de nacht heeft bijgedragen aan de snelle afvoer van de rookgassen.



**Figuur 32** Gemiddelde dagelijkse concentratie van NO en NO<sub>x</sub> (boven) en C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> (midden) en de gemiddelde dagelijkse ventilatie opening van de ramen (onder) voor de periode 31 januari tot 23 maart.

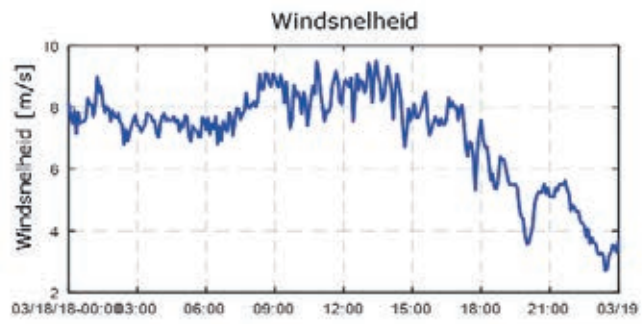


**Figuur 33** Gemiddelde dagelijkse concentratie van NO<sub>x</sub> versus de gemiddelde windsnelheid vermenigvuldigd met de raamopening tijdens de lichtperiode. De NO<sub>x</sub>-concentratie bereikte of overtrof de acceptabele limiet (40 ppb - rode lijn in de grafiek) gedurende bijna de helft van de geanalyseerde periode.



**Figuur 34** Concentratie van rookgassen op een dag dat de ramen tijdens de middag voor 3 uur gesloten bleven toen tegelijkertijd CO<sub>2</sub> werd gedoseerd.





**Figuur 35** Windsnelheid gedurende de dag dat de ramen gesloten werden gehouden.

## 5 Conclusies

In dit onderzoek zijn veel gegevens verzameld om zo duidelijk te maken hoe de toegepaste klimaat sturingen het verticale temperatuurprofiel beïnvloeden en of toevoer van extra energie resulteert in een gunstiger klimaat voor gewasgroei. In het algemeen kan worden geconcludeerd dat wanneer er behoorlijke warmtetoevoer (straling) aan de bovenkant van het gewas plaatsvindt, de onderkant van het gewas kouder blijft. Dit was duidelijk zowel tijdens de zonnige periode van de dag als tijdens de donkere belichte periode. Deze temperatuurverschillen bleken boven de 3°C te liggen tijdens de zonnige dagen en 1°C tijdens de belichte donkere periode. In het laatste geval bleek het zeer moeilijk om een verticale luchtbeweging te creëren die in staat was om de warmte van de top naar de onderkant van het gewas over te brengen. Het gebruik van alleen de onderste ventilatoren met verticale circulatie had dus geen impact op het verticale temperatuurprofiel. De verticale temperatuurgradiënt wordt kleiner door extra warmtetoevoer aan de onderkant van het gewas. Tijdens donkere dagen toen een intensiever gebruik van het verwarmingssysteem plaatsvond, was de temperatuur aan de boven- en onderkant van het gewas ongeveer gelijk. Vergelijkbare resultaten werden gevonden tijdens de belichte donkere periode toen het verwarmingssysteem meer werd gebruikt. In dat geval werden de VentilationJets gebruikt om rond de bovenkant van het gewas bijna evenveel energie af te voeren als door het verwarmingssysteem werd toegevoerd, resulterend in een homogeen verticaal temperatuurprofiel.

Ongeveer 26% (ongeveer 2 m<sup>3</sup> gas tijdens de maanden dat de VentilationJets in gebruik waren) van het totale warmtegebruik door het verwarmingsnet vond plaats op de momenten dat de belichting en VentilationJets werden gebruikt. De hoeveelheid voelbare warmte die door de VentilationJets uit de kas werd afgevoerd was ongeveer gelijk aan de hoeveelheid warmte die door de verwarmingsbuizen werd toegevoerd. Als gevolg hiervan werd een homogeen verticaal temperatuurprofiel gecreëerd. Met andere woorden, een meer homogeen verticaal temperatuurprofiel kan worden gecreëerd door meer warmtetoevoer van de verwarmingsbuizen en meer warmteafvoer door de VentilationJets. Vanuit energetisch oogpunt is dit niet slim, omdat dezelfde netto-energiebalans zou zijn bereikt zonder de warmteafvoer van de VentilationJets en zonder de warmtetoevoer van het verwarmingssysteem.

Een meer gedetailleerde observatie van de relatieve vochtigheid (die de maximaal aanvaardbare limieten voor groei en productie van tomaten van hoge kwaliteit in kassen bereikte of overschreed) laat zien dat het uitschakelen van de VentilationJets geen optie is omdat dan nog hogere relatieve vochtigheden worden behaald (ervan uitgaande dat er dan geen andere technieken worden ingezet om het overtollig vocht af te voeren). Samengevat werd de warmtetoevoer van het verwarmingssysteem dus gebruikt met als doel de relatieve vochtigheid te verlagen. Als resultaat werd het overschot aan warmte en vocht afgevoerd door de VentilationJets en werd het verticale temperatuurprofiel beïnvloed door zowel de buisverwarming als de VentilationJets.

Wetenschappelijk onderzoek aangetoond dat voor dezelfde luchttemperatuur rond de bovenkant van het gewas een eventuele verticale temperatuurgradiënt (dus lagere luchttemperatuur rond de onderkant van het gewas of behoud van dezelfde temperatuur) een minimaal effect op gewas groei en vruchtopbrengst heeft omdat de meeste fysiologische processen zoals assimilatenproductie en verdeling niet worden beïnvloed (Qian *et al.* 2010, Qian *et al.* 2015). Het belangrijkste effect wordt verwacht op de uitgroeiduur en grootte: met een iets langere uitgroeiduur en een grotere vruchtgrootte die kan worden verwacht voor vruchten die worden geteeld bij lagere temperaturen. Dit laatste werd ook bevestigd door de uitkomst van het huidige onderzoek dat een vertraging van de uitgroeiduur van ongeveer een week laat zien voor vruchten van de onderzochte variëteit, geteeld bij 18,3°C in vergelijking met vruchten geteeld bij 19,0°C.

Samenvattend, het huidige onderzoek heeft in details aangetoond hoe acties om het klimaat te sturen de verticale luchttemperatuurgradiënt kan beïnvloeden en wat de (energie) kosten zijn om een homogene temperatuur over de verticale dimensie te handhaven. Er is ook uitgelegd wanneer en hoe de toegepaste klimaatregeling van de teler resulteert in een homogeen verticaal temperatuurprofiel. Het is buiten het bereik van het huidige onderzoek om te onderzoeken of en in welke mate een homogene verticale temperatuurverdeling meer gewasgroei en opbrengst bevordert in vergelijking met een verticale temperatuurgradiënt, maar op basis van gepubliceerde onderzoeksgegevens kan worden opgemerkt dat de verticale temperatuurgradiënten binnen bepaalde grenzen geen significant negatief effect hebben op de gewasgroei maar alleen op de groeisnelheid en grootte van de tomaat. Er werd echter ook aangetoond dat bij Gardener's Pride de grote ontvochtigingsvraag geen grote veranderingen in de bovengenoemde strategie toelaat (warmtetoevoer van de buizen en warmteafvoer door de VentilationJets), tenzij er een alternatieve manier voor ontvochtiging beschikbaar komt.

## 6 Literatuur

Adams, S. R., Cockshull, K. E., & Cave, C. R. J. (2001).

Effect of temperature on the growth and development of tomato fruits. *Annals of Botany*, 88(5), 869-877.

De Koning, A. N. M. (1990).

Long-term temperature integration of tomato. Growth and development under alternating temperature regimes. *Scientia Horticulturae*, 45(1-2), 117-127.

Qian, T., Dieleman, J. A., Elings, A., De Gelder, A., Van Kooten, O., & Marcelis, L. F. M. (2010).

Vertical temperature gradients in the semi-closed greenhouses: occurrence and effects. In *XXVIII International Horticultural Congress on Science and Horticulture for People (IHC2010): International Symposium on 927* (pp. 59-66).

Qian, T., Dieleman, J. A., Elings, A., De Gelder, A., & Marcelis, L. F. M. (2015).

Response of tomato crop growth and development to a vertical temperature gradient in a semi-closed greenhouse. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 90(5), 578-584.





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



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

Rapport GTB-817

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, 5.000 medewerkers en 10.000 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.