

Planttemperatuur als stuurparameter in kasklimaatregelingen

Deelverslag: Ontwikkeling plant temperatuursensor

J.B. Campen
F.L.K. Kempkes
B. Houter
E.C. Rijpsma

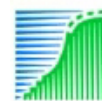
Rapport 415

Onderzoek in het kader van het Convenant Glastuinbouw en Milieu

Uitgevoerd door:



In opdracht van:



landbouw, natuur en
voedselkwaliteit

Colophon

Title	Planttemperatuur als stuurparameter in kasklimaatregelingen
Author(s)	J.B. Campen, F.L.K. Kempkes, B. Houter, E.C. Rijpsma
A&F number	415
ISBN-number	90-6754-915-0
Date of publication	2005
Confidentiality	nee
Project code.	PT 11695 A&F 6305400701

Agrotechnology & Food Innovations B.V.
P.O. Box 17
NL-6700 AA Wageningen
Tel: +31 (0)317 475 024
E-mail: info.agrotechnologyandfood@wur.nl
Internet: www.agrotechnologyandfood.wur.nl

© Agrotechnology & Food Innovations B.V.

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, hetzij mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever. De uitgever aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele fouten of onvolkomenheden.

All right reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system of any nature, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publisher. The publisher does not accept any liability for the inaccuracies in this report.

This report is authorised by: J.C. Bakker



The quality management system of Agrotechnology & Food Innovations B.V. is certified by SGS International Certification Services EESV according to ISO 9001:2000.

Tuinders samenvatting

Condensatie op het gewas geeft aanleiding tot ziektes zoals Botrytis. Condensatie gebeurt als de temperatuur van een oppervlak zich onder de dauwpuntstemperatuur van de lucht bevindt. De dauwpuntstemperatuur is afhankelijk van de luchttemperatuur en de relatieve luchtvochtigheid. De omgevingstemperatuur van de plantdelen is afhankelijk van de locatie van de plantdelen. Verticale temperatuurverschillen in de kas zorgen ervoor dat de omgevingstemperatuur afwijkt van de kasluchttemperatuur gemeten op de positie van de meetbox.

De kop van het gewas, de vruchten en de stengel van het gewas hebben de grootste potentie om nat te slaan. De bovenste delen van de plant zijn vaak in de nacht kouder dan de rest van het gewas door uitstraling naar een koud dek. De temperatuur van het bovenste gedeelte van het gewas kan het beste worden gemeten met de infrarood camera. Deze geeft in de nacht, de tijd waar het gevaar op condensatie het grootste is, de temperatuur goed weer. In de ochtend uren zal de kop van het gewas snel opwarmen door de zon en het relatief lage gewicht.

De kans op condensatie op de vruchten met een relatief grote massa is het grootste als de luchttemperatuur toeneemt. A&F heeft een sensor ontwikkeld waarmee de temperatuur van de relatief zware delen van het gewas kan worden gemeten. De gemeten temperatuur komt overeen met een echte volgroeide vrucht. De kunstvrucht sensor kan het beste worden geplaatst onder in het gewas waar de luchttemperatuur lager is en de kans op directe zonnestraling gering. Op deze locatie hangen ook de grootste vruchten en is de kans op condensatie het grootst.

De stengel van het gewas nabij de wortels heeft een verhoogde kans op Botrytis. Meting van de stengeltemperatuur laat zien dat deze afhankelijk is van de temperatuur van het voedingswater in de mat en de mate van wateropname door het gewas op een bepaald moment. Als de temperatuur van het water beneden de dauwpuntstemperatuur komt kan dit aanleiding geven tot condensatie op de stengel. Dit kan worden voorkomen door het voedingswater voor te verwarmen. Overigens laten de metingen zien dat de artificiële vrucht in de kritieke ochtenduren kouder is dan de stengel, meting van de vruchttemperatuur heeft daarom een hogere prioriteit. De metingen kunnen worden opgenomen in de klimaatregeling waardoor de luchtvochtigheid scherper kan worden geregeld. Het vochtdeficit in de kas kan worden verkleind (of het setpoint RV worden verhoogd) indien de regeling plaatsvindt op basis van de gewastemperatuur. Hierdoor zal er minder gelucht en verwarmd worden ten behoeve van de ontvochtiging wat tot een energiebesparing leidt. In een deel van het onderzoek is de temperatuur van de kunstmatige vrucht gebruikt voor de vochtregeling, dit is apart gerapporteerd.

Kortom extra metingen aan het gewas voor de klimaatregeling beperkt de kans op natslaan waardoor de vochtregeling scherper kan worden ingesteld. Hierdoor hoeft er minder te worden gelucht en verwarmd wat tot een energiebesparing leidt.

Inhoud

Tuinders samenvatting	3
1 Inleiding	5
2 Methoden	6
2.1 Literatuur onderzoek	6
2.2 Fabricage van de artificiële vrucht	8
2.3 Fabricage van de artificiële stengel	9
2.4 Testopstelling	10
2.5 Infrarood camera	11
3 Resultaten	12
3.1 Metingen met artificiële vrucht bij geconditioneerde toestand	12
3.2 Meting met artificiële stengel	13
3.3 Metingen met artificiële vrucht in een kasafdeling	15
3.4 Meting met artificiële vrucht in klimaatexperiment Naaldwijk	17
3.5 Meting in de kas met de artificiële stengel	19
3.6 Bladtemperatuur	23
3.7 Bepaling van de relatieve luchtvochtigheid	25
3.8 Artificiële vrucht op verschillende hoogtes	25
4 Conclusies	30
Referentie	31

1 Inleiding

De huidige infrarood planttemperatuurmeter wordt gebruikt om de gemiddelde gewastemperatuur boven in het gewas te bepalen. Het voorkomen van condensatie op het gewas is één van de hoofddoelen voor de toepassing van planttemperatuur metingen. Daarom is het van belang, naast meting van de gewastemperatuur boven in het gewas, een methode te ontwikkelen om de gewastemperatuur onder in het gewas te bepalen. Condensatie vindt echter vooral plaats op de vruchten en de stengels omdat deze bij opwarming in temperatuur achterblijven door een relatief grote warmtecapaciteit. Condensatie leidt vaak tot problemen in de vorm van Botrytis (Elad *et al.*, 2004)

De huidige IR meters zijn door hun grote beeldoppervlak niet geschikt om stengel- en vruchttemperatuur te meten (vanwege de invloed van buizen, kasdelen en achtergrondruis op de metingen) terwijl individuele IR spotmetingen kostbaar zijn en onvoldoende gedistribueerde informatie opleveren. Met een alternatieve sensor kunnen de condities van de vruchten en de stengel worden gemeten. Een eis is dat de sensoren weinig onderhoud nodig hebben. Uiteindelijk zal de informatie over de temperatuur van de plantdelen zorgen voor energiebesparing omdat er minder vocht wordt afgevoerd. Een tuinder kan een hoger vochniveau aanhouden in de kas zonder risico op condensatie.

Het project *Planttemperatuur als stuurparameter in kasklimaatregelingen* bestaat uit 2 delen:

1. ontwikkeling van low cost plantsensoren. (Dit rapport)
2. kasexperiment waarin enerzijds op basis van IR-planttemperatuur het kasklimaat en anderzijds op basis van low cost plantsensoren vocht geregeld wordt. (Dit is apart gerapporteerd)

2 Methoden

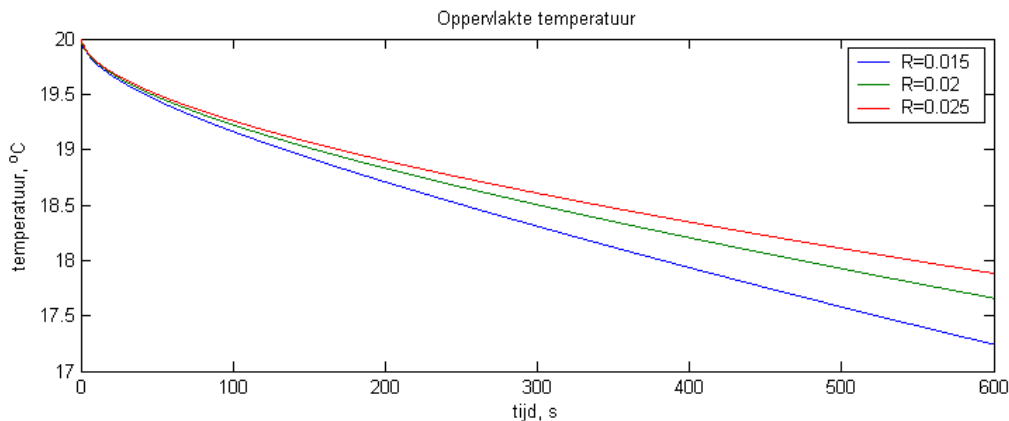
De temperatuur van de vruchten en de stengel kunnen direct worden gemeten op de plant met een sensor. Nadeel van deze methode is dat de sensoren regelmatig moeten worden verplaatst omdat de plant groeit en de vruchten worden geplukt. Verder is er een dagelijkse controle nodig of de sensoren nog wel op plant zitten, zeker als erop geregeld wordt. Artificiële plantdelen kunnen dit probleem voorkomen. Een artificiële vrucht en stengel moeten dezelfde thermische eigenschappen hebben als de echte vrucht om een realistische temperatuur te geven.

2.1 Literatuur onderzoek

Het temperatuurverloop van een bol met een homogene temperatuur \bar{T} die in een koude of warme ruimte wordt geplaatst wordt gegeven door:

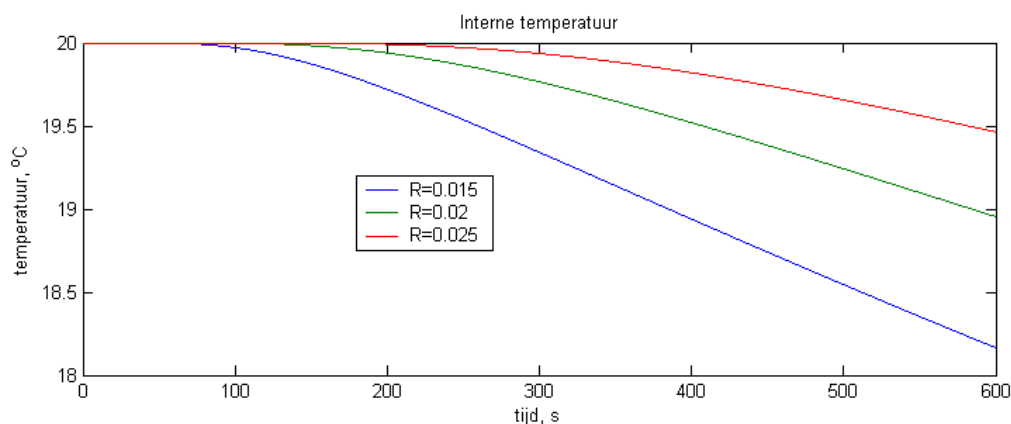
$$\bar{T}(t) - T_\infty = [\bar{T}(t=0) - T_\infty] e^{-\frac{3\alpha}{\rho c_p R} t}$$

waarin T_∞ de omgevingstemperatuur is in K; α is de warmteoverdrachtscoëfficiënt aan de buitenzijde van de bol in $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$; ρ is dichtheid van de bol in kg m^{-3} ; c_p is de soortelijke warmte van de bol in $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$; en R is de straal van de bol in m. Deze formule geldt alleen als de thermische geleidbaarheid in de bol λ/R ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$) groot is ten opzichte van de externe geleidbaarheid α . Met de warmtegeleidingcoëfficiënt van water $0.60 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$, een straal van 2.5 cm en een warmteoverdrachtscoëfficiënt van $10 \text{ W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ wordt deze verhouding 2.4 zodat bovenstaande formule een redelijk beeld geeft van het temperatuurverloop. Om echter hogere nauwkeurigheid te halen is de temperatuur iteratief opgelost waarbij de bol in schillen wordt verdeeld. Vooral als de interne warmtegeleiding gering is en de tijdsperiode groot, schiet de exponentieel benadering te kort. De geleiding tussen de schillen wordt berekend in de tijd en aan de buitenzijde van de bol wordt de warmteoverdracht vastgesteld op basis van het temperatuurverschil op dat moment. De warmteoverdrachtscoëfficiënt naar de omgeving en de warmtegeleiding coëfficiënt in de tomaat moeten middels experimenten worden vastgesteld maar zullen qua ordegrrootte overeenkomen met die van water.



Figuur 1 Temperatuur aan het oppervlak van de bol waarbij de straal is gevarieerd als functie van de tijd. $\alpha=10 \text{ W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ $\Delta T=10 \text{ K}$

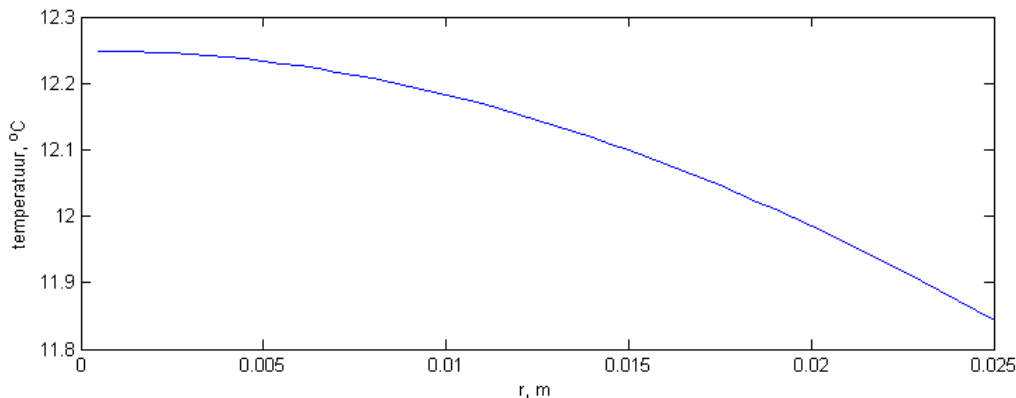
De berekende temperatuur aan het oppervlak van de bol voor verschillende diameters is te zien in Figuur 1. Uiteraard koelt de bol met de kleinste diameter sneller af. Voor een vrucht met een diameter van 5 cm is na ongeveer 10 minuten de oppervlaktetemperatuur 2 graden gedaald terwijl de omringende lucht 10 graden is gedaald. Dit een relatief grote verandering van temperatuur maar het geeft een goede indicatie over de traagheid van de vrucht. Overigens maakt het voor deze berekeningen niet uit of de vrucht nu wordt gekoeld of opgewarmd, het verloop van de temperatuur zal gelijk zijn alleen tegengesteld.



Figuur 2 Temperatuur in het centrum van de bol met een verschillende diameter (m) als functie van de tijd. $\alpha=10 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ $\Delta T=10 \text{ K}$

De interne temperatuur reageert langzaam op een externe temperatuurverandering. Deze temperatuur vormt op zich geen probleem maar bepaalt wel de temperatuur aan het oppervlak van de vrucht. Het exponentiële model geeft voor een bol met een straal van 2 cm na 600 s een temperatuur van 18°C, iets hoger dan de oppervlakte temperatuur in Figuur 1. Dit model kan dus ook met een redelijke veiligheidsmarge worden gebruikt.

Het temperatuur profiel van een vrucht met een straal van 0.025 m welke 100 minuten aan een 10 graden lagere temperatuur is blootgesteld is in onderstaande Figuur 3 weergegeven.



Figuur 3 Temperatuurprofiel in de bol als functie van de straal na 100 minuten

Pas na 5 uur verschilt de temperatuur in het centrum van de bol minder dan 0.1 K van de temperatuur van de omgeving. Dit geeft aan dat de temperatuur van een vrucht zich maar langzaam aanpast aan zijn omgeving. Het gaat uiteraard om de temperatuur van het oppervlak van de vrucht maar deze wordt mede bepaald door de temperatuur in de vrucht.

Met deze methode is het mogelijk een softsensor te maken waarmee de temperatuur van de vrucht wordt berekend.

2.2 Fabricage van de artificiële vrucht

Een softsensor waarbij de temperatuur van de vrucht wordt berekend heeft een paar nadelen. De berekende temperatuur hangt samen met de gemeten luchttemperatuur. Indien deze temperatuur op een bepaald moment verkeerd wordt gemeten zal de softsensor deze verkeerde temperatuur blijven gebruiken voor de berekening. De luchttemperatuur wordt vastgesteld middels de meetbox, de locatie van deze meting kan verschillen van de luchttemperatuur nabij de vruchten. Een meting van de vruchttemperatuur voorkomt deze problemen.

Metten aan echte tomaten is gecompliceerd. Daarom wordt een kunstvrucht ontworpen die het opwarmend gedrag van een tomaat simuleert en daarmee aangeeft wanneer het risico van natslaan optreedt. Als meetsensor in de vrucht is gekozen voor een Flat-film PT100 vanwege de nauwkeurigheid ($\pm 0.1^\circ\text{C}$ bij 0°C) en het gebruiksgemak. De temperatuur wordt bepaald aan één zijde van de flat film. PT100 sensoren met de afmetingen $2 \times 2.4 \times 1.1 \text{ mm}$ (W x L x H) en $2 \times 5 \times 1.1 \text{ mm}$ zijn gebruikt.

De dichtheid van een tomaat is $9.3 \pm 0.5 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$ (experimenteel bepaald).

Er zijn in eerste instantie twee artificiële vruchten gemaakt, een met een diameter van 50 mm en een van 60 mm. De vruchten zijn in onderstaande foto (Figuur 5) te zien. De kleur van de vruchten is niet zo zeer van belang voor de warmteoverdracht via infrarood maar de emissiecoëfficiënt van de vrucht in het infrarood gebied moet wel overeenkomen met de echte vrucht.

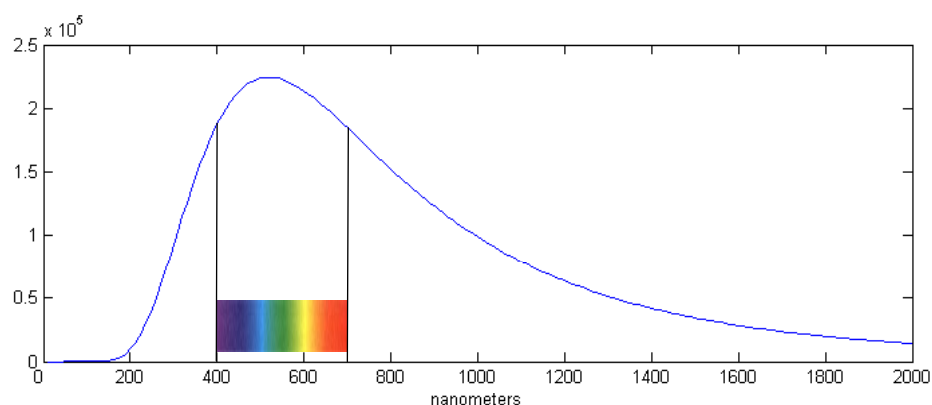
Voor de absorptie van het zonnenspectrum is de kleur van de vrucht niet van belang mits deze niet zwart of wit is.

De spectrale verdeling van de energie van zonnestraling wordt beschreven door de wet van Planck:

$$I(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

waarin h de constante van Planck is ($6.62 \cdot 10^{-34}$ Js); c is de lichtsnelheid ($2.9979 \cdot 10^8$ ms⁻¹); λ is de golflengte (m); k is de constante van Boltzmann ($1.3808 \cdot 10^{-23}$ J K⁻¹); de T is de oppervlaktetemperatuur van de zon (ca 6000K of 5762 K).

Onderstaande figuur laat deze energieverdeling van de zonnestraling over het spectrum zien. De grootste hoeveelheid straling wordt afgegeven in het zichtbare licht gebied (400 -700 m).



Figuur 4 Verdeling van de energie van zonnestraling over het spectrum

De kleur van een voorwerp wordt bepaald door het gebied van het spectrum dat door het voorwerp wordt gereflecteerd. Een rijpe tomaat reflecteert een deel van het rode spectrum. De hoeveelheid gereflecteerde straling is evenwel gering ten opzichte van het totale spectrum. De kleur van de artificiële vrucht heeft daarom geen invloed op de temperatuur van de vrucht, mits hij niet zwart is want deze kleur absorbeert het hele spectrum, en niet wit is want deze kleur reflecteert een groot deel van het spectrum.

In het experiment hebben de artificiële vruchten een natuurgetrouwe kleur gekregen maar dit is dus niet noodzakelijk.

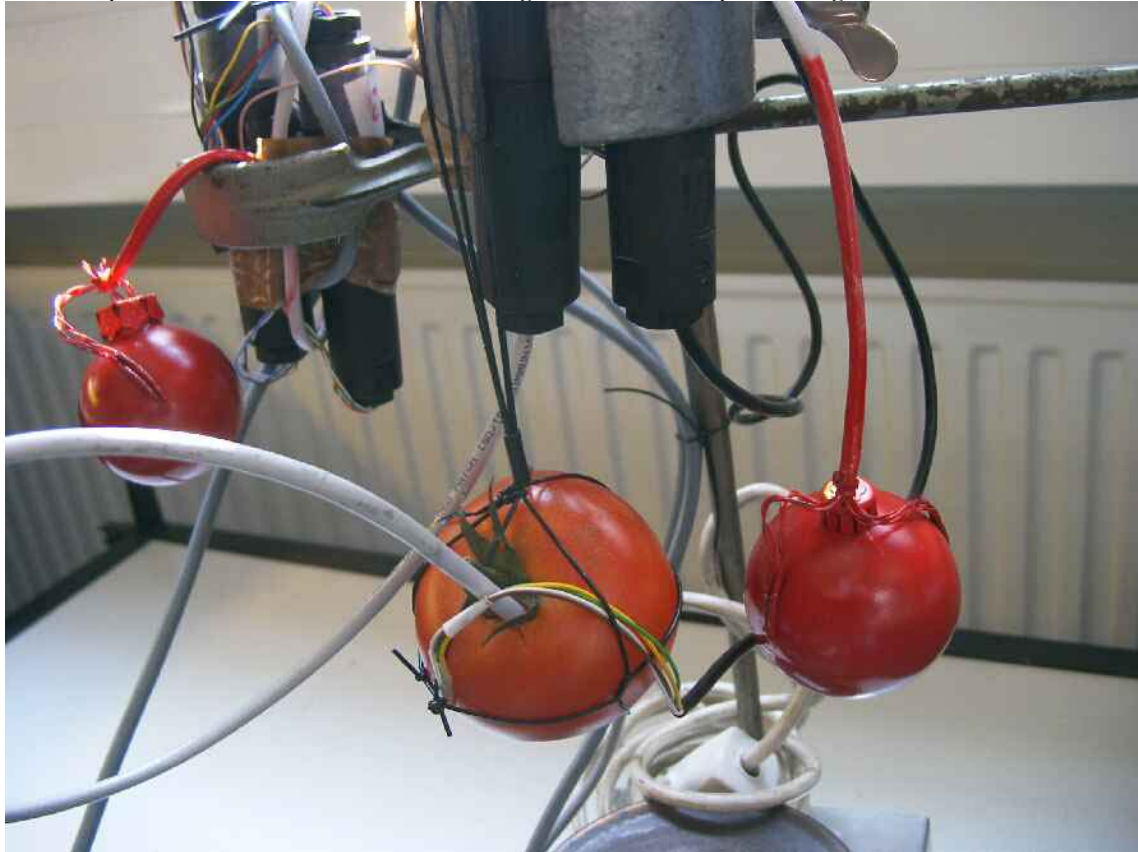
Een ander aspect is de emissiecoëfficiënt in het thermisch IR (2500-50000nm), deze bepaalt het warmteverlies door de eigen thermische uitstraling. Voor een tomaat is deze vrijwel gelijk aan 1, dit is ook het geval voor de kunstvrucht.

2.3 Fabricage van de artificiële stengel

De stengel bestaat voornamelijk uit vezels met water. De artificiële stengel is uit rockwool vervaardigd met een plastic omhulling welke groen gemaakt is. Op de stengel zijn twee PT-100's geplaatst voor het meten van de oppervlakte temperatuur.

2.4 Testopstelling

De thermische eigenschappen van de vruchten worden bepaald door deze aan een verandering van de omgevingstemperatuur bloot te stellen. Eerst worden de vruchten in een ruimte van 40°C geplaatst, waar ze minstens 24 uur worden geacclimatiseerd. Vervolgens worden de vruchten in een ruimte van circa 5 graden geplaatst. Zowel de oppervlaktetemperatuur van de vruchten als de luchttemperatuur rond de vruchten worden gedurende het experiment gemeten.



Figuur 5 Meetopstelling met de echte tomaat en de twee artificiële vruchten

2.5 Infrarood camera



A

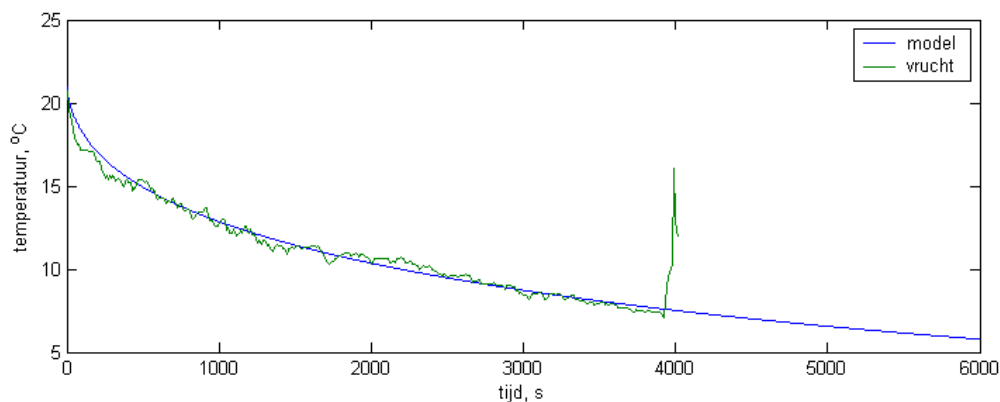
B

Figuur 6 Infrarood camera's in de kas (A) en het gezichtveld van de camera (B)

In Figuur 6 zijn de infrarood camera's te zien. Middels een koker op de camera (Heitronics, 2000) is het gezichtveld van de camera te zien. De camera 'kijkt' in het spectrum van 7 tot 15 micrometer. De gemiddelde temperatuur van de bovenste bladeren wordt met deze methode vastgesteld.

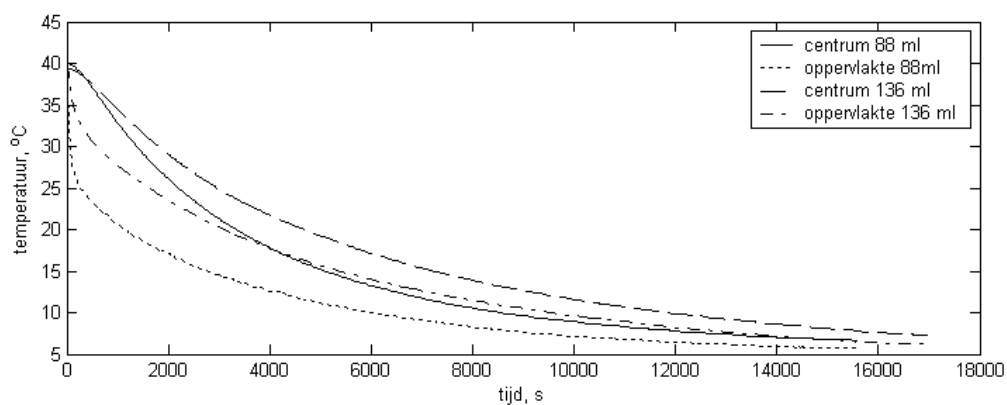
3 Resultaten

3.1 Metingen met artificiële vrucht bij geconditioneerde toestand



Figuur 7 Oppervlaktetemperatuur van de vrucht in een omgeving met een temperatuur van 2°C als functie van de tijd volgens het gekalibreerde model en volgend uit een meting met een artificiële vrucht.

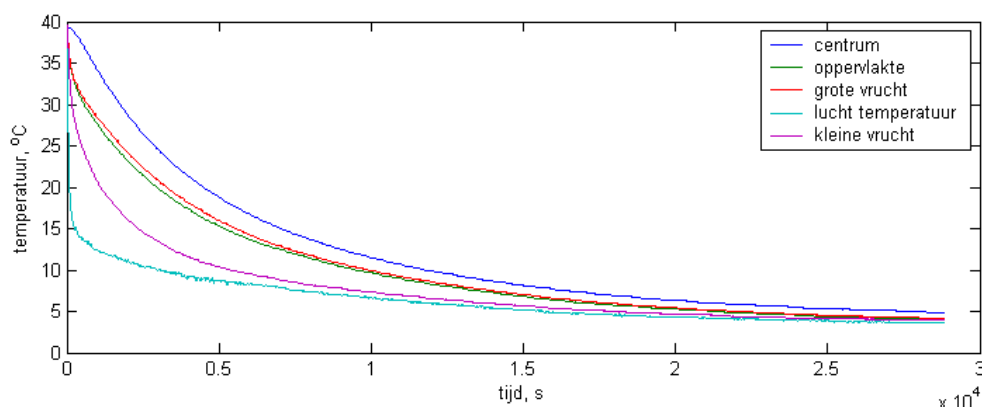
Het model is gekalibreerd met behulp van de metingen. De warmteoverdracht α is in de modelberekening op $10 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ gesteld. De warmtegeleiding in de vrucht is verlaagd naar $0.1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ i.p.v. $0.6 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ welke voor water geldt. De warmtegeleiding in de vrucht is minder dan “vast” water. De aanwezigheid van de drogestof en lucht, welke een lagere geleidingscoëfficiënt hebben, zorgen voor deze verlaging.



Figuur 8 Gemeten afkoelingscurve aan het oppervlak en in het centrum van echte tomaten van 88 ml en 136 ml.

In de echte vrucht wordt een PT100 in het centrum geplaatst. Daarnaast wordt het oppervlak van de tomaat gemeten met een PT100 welke er tegenaan wordt geklemd. Voor twee echte tomaten

met een diameter van 5.6 cm en 6.4 cm is de afkoelingscurve te zien in Figuur 8. Zoals verwacht koelt de kleine tomaat sneller af dan de grote tomaat.



Figuur 9 Meting temperatuur van een echte tomaat, twee artificiële tomaten en de omringende lucht

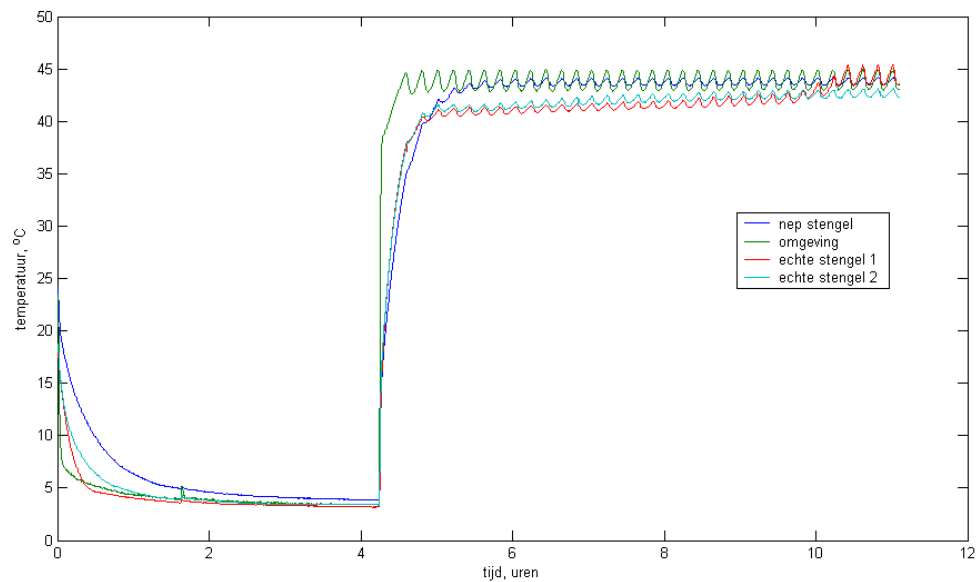
Vergelijking van metingen aan een echte vrucht van 136 ml en de grote en kleine artificiële vrucht levert op dat de oppervlaktetemperatuur van de grote artificiële vrucht vrijwel gelijk is aan die van de echte vrucht. De afkoeling van de grote artificiële vrucht komt overeen met die van de echte vrucht. De thermische eigenschappen van de artificiële vrucht (emissiecoëfficiënt voor infrarood, absorptiecoëfficiënt voor zichtbaar licht, warmtegeleiding in vrucht, warmteoverdracht door convectie aan het oppervlak, warmtecapaciteit van de vrucht) komen dus overeen met die van een echte vrucht.

3.2 Meting met artificiële stengel

Middels dezelfde methode als gevolgd bij de vrucht zijn de eigenschappen van de artificiële stengel vergeleken met die van een los stukje van 15 cm echte stengel. Een probleem bij deze metingen is dat de echte stengel veel vocht verliest gedurende de meting. Aan het begin van de meting had de stengel een gewicht van 32.16 gram en een dikte van 11.5 mm, na 24 uur meten waarbij de stengel in de koelkast en in de stoof is geplaatst is het gewicht nog maar 17.03 gram en de dikte 8.5 mm. De verdamping vindt plaats door de uiteinden van de stengel. Door de zware krimp maken de Pt-100's na verloop van tijd geen goed contact meer met de stengel.



Figuur 10 Meting echte stengel en artificiële stengel in laboratorium.



Figuur 11 Resultaat temperatuurmeting aan een echte en een artificiële stengel

Het verdampen van water uit de stengel is duidelijk te zien in bovenstaande figuur. De stengel koelt veel sneller af dan de artificiële stengel (vanaf $t=0$) maar warmt langzamer op dan de artificiële vrucht (vanaf $t=4.2$ uur). Op moment dat de stengel is uitgedroogd, vanaf 10 uur, wordt de temperatuur van de echte stengel gelijk aan de artificiële stengel. Een vergelijking is op

basis van deze meting daarom niet te maken. Een goede vergelijking tussen de artificiële stengel en de echte zal daarom in een kasexperiment moeten gebeuren.

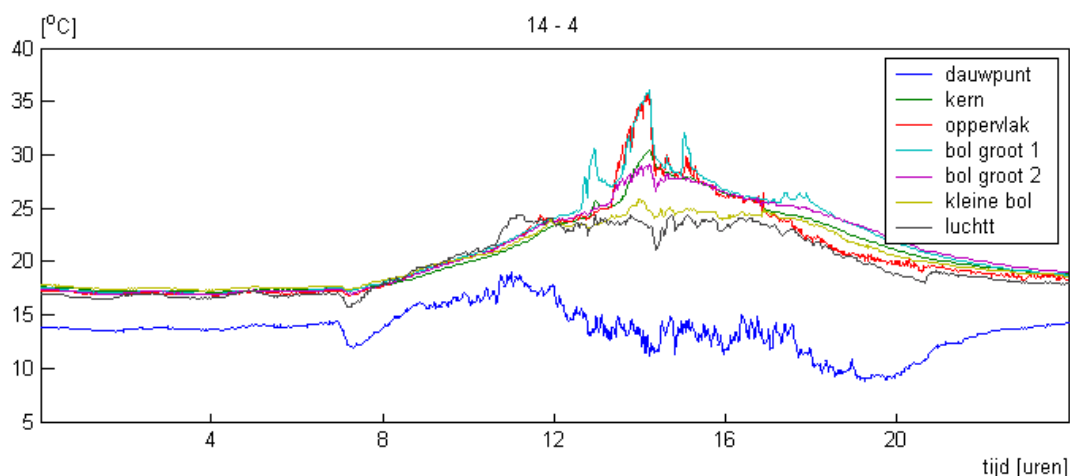
3.3 Metingen met artificiële vrucht in een kasafdeling

In de periode 9 tot en met 28 april 2004 zijn in afdeling 10.4 in het kassencomplex de HAAF van het PRI verkennende metingen met de artificiële vruchten onder praktijkomstandigheden uitgevoerd. Figuur 12 geeft een indruk van de plaatsing van de artificiële vruchten bij de tros.



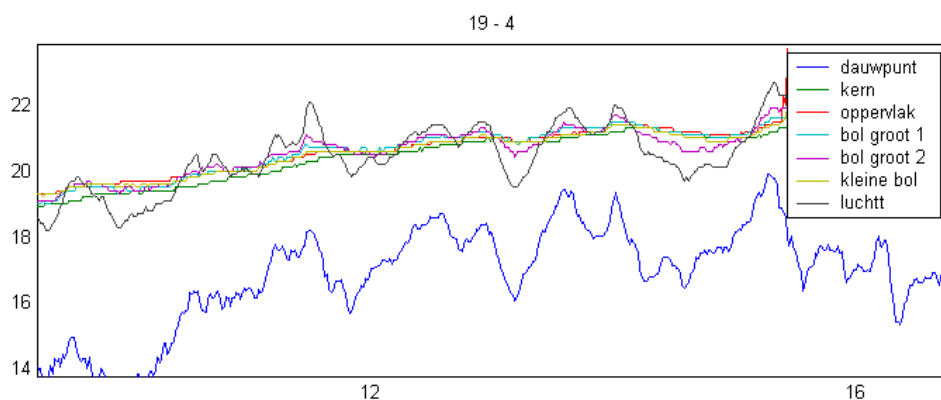
Figuur 12 Overzicht plaatsing van 2 kunsttomaten

In Figuur 13 is een vergelijk gegeven van metingen aan een echte vrucht en de artificiële vruchten. Daarnaast is, indicatief, ook de dauwpunttemperatuur van de kaslucht weergegeven.



Figuur 13 Vergelijk van werkelijke vruchttemperaturen (oppervlak en kern) en oppervlakte temperaturen van 2 artificiële vruchten (bol klein en bol groot) op 14 april.

De lokale pieken van de oppervlakte sensor op een echte vrucht en sensor 1 van de grote bol, worden veroorzaakt door directe aanstraling van de zon op die momenten. Het effect van deze aanstraling is duidelijk te zien van de metingen van de bol groot. Sensor nummer 1 hangt richting de zon en warmt rond 14 uur snel op samen met de echte oppervlakte temperatuur. Sensor 2 zit aan de andere zijde van de grote bol en warmt aanzienlijk minder snel op. De kleine bol hangt in de schaduw van een tros en blijft daardoor aanmerkelijk koeler. Gedurende deze meting blijven alle temperaturen ruim boven de dauwpuntstemperatuur en zal er daarom geen condensatie op de vrucht optreden. De temperaturen van de verschillende tomaten liggen overdag hoger dan de kaslucht temperatuur ten gevolge van de zonneïnstraling. Rond 11 uur is een periode dat de zon doorbreekt te zien, dit zijn de kritieke fases. De kasluchttemperatuur neemt snel toe en de dauwpuntstemperatuur ook t.g.v. de verdamping. De vruchten blijven achter in temperatuur en de kans op condensatie wordt groter.



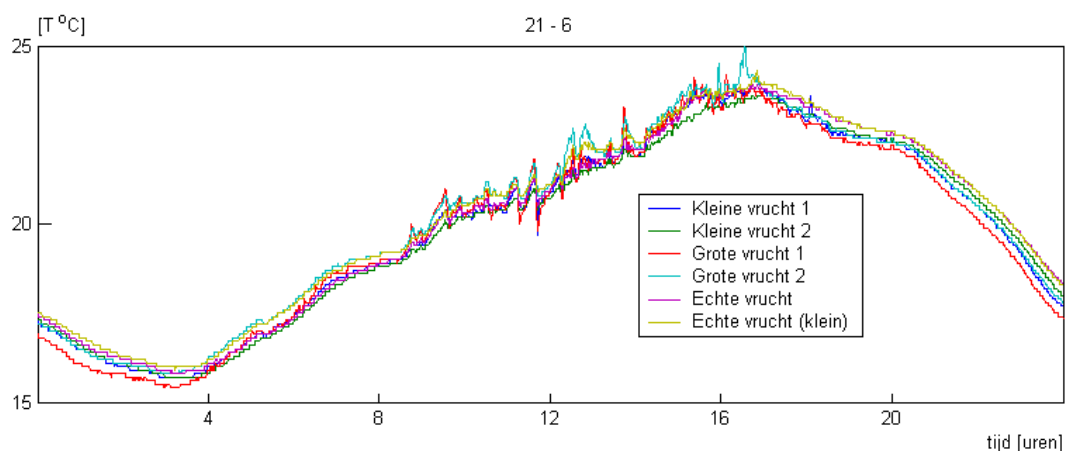
Figuur 14 Temperaturen op een dag met weinig straling

In Figuur 14 is een dag met weinig straling te zien, de temperaturen van de artificiële vruchten volgen de temperatuur van de echte vrucht. De vruchttemperatuur volgt de luchttemperatuur echter vertraagd.

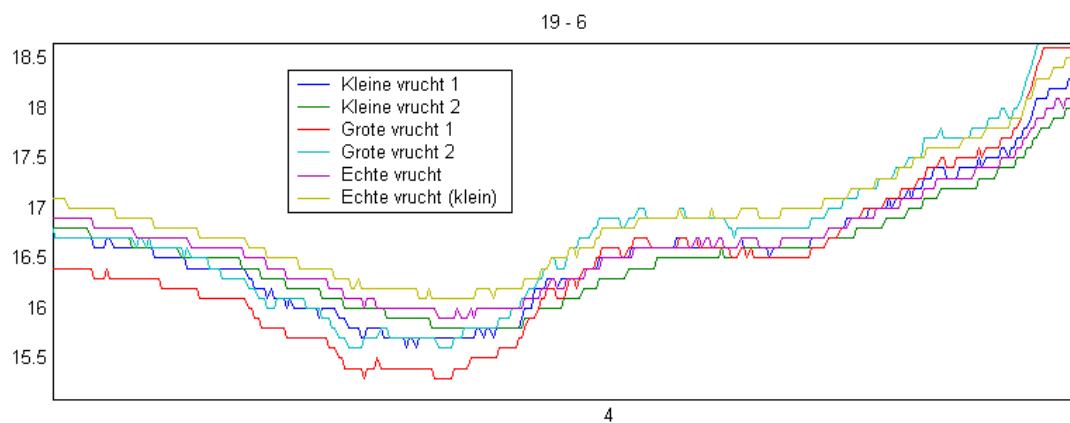
Ook in het kasexperiment komt het thermische gedrag van de artificiële vrucht goed overeen met dat van de echte vrucht.

3.4 Meting met artificiële vrucht in klimaatexperiment Naaldwijk

Een soortgelijke meting is uitgevoerd in Naaldwijk in kas 112 bij PPO waar de meting ook wordt gebruikt voor de klimaatregeling. In deze kas stonden ook tomatenplanten.



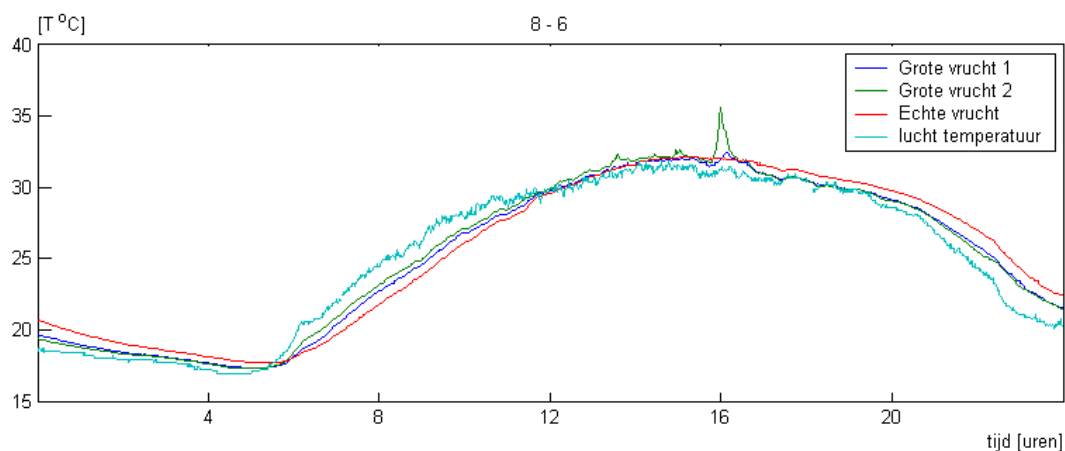
Figuur 15 Temperatuur van de kleine artificiële vrucht (2x), de grote artificiële vrucht (2x), een echte grote vrucht en een echte kleine vrucht



Figuur 16 Temperatuur van de kleine artificiële vrucht (2x), de grote artificiële vrucht (2x), een echte grote vrucht en een echte kleine vrucht ingezoomd op een bepaald tijdstip uit Figuur 15.

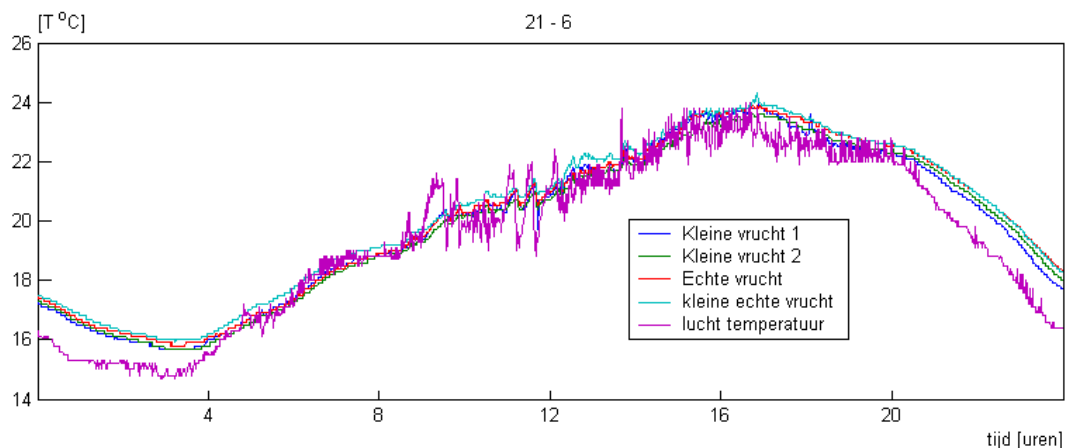
Bovenstaande figuren laten de temperatuur van een groot en een kleine artificiële vrucht zien en een vergelijkbare echte vrucht. In tegenstelling tot wat verwacht wordt reageert de temperatuur

van de grote artificiële tomaat sneller op temperatuurveranderingen dan de echte vruchten en de kleine artificiële vrucht. Dit zelfde beeld is in onderstaande figuur te zien.



Figuur 17 Temperatuur van de grote artificiële vrucht (2x), een echte grote vrucht en de luchttemperatuur

Analyse achteraf onthulde dat veel vocht uit de artificiële vrucht was verdwenen. De vrucht was niet volledig waterdicht, waardoor er gedurende het experiment water uit de vrucht is verdampt. De thermische eigenschappen kwamen daardoor niet meer overeen met die van de echte tomaat. Voor een nieuwe reeks van artificiële vruchten is een betere afdichtingmethode gebruikt om degelijke problemen te voorkomen.



Figuur 18 Temperatuur kleine artificiële vrucht (2x), de echte grote vrucht, de echte kleine vrucht en de luchttemperatuur.

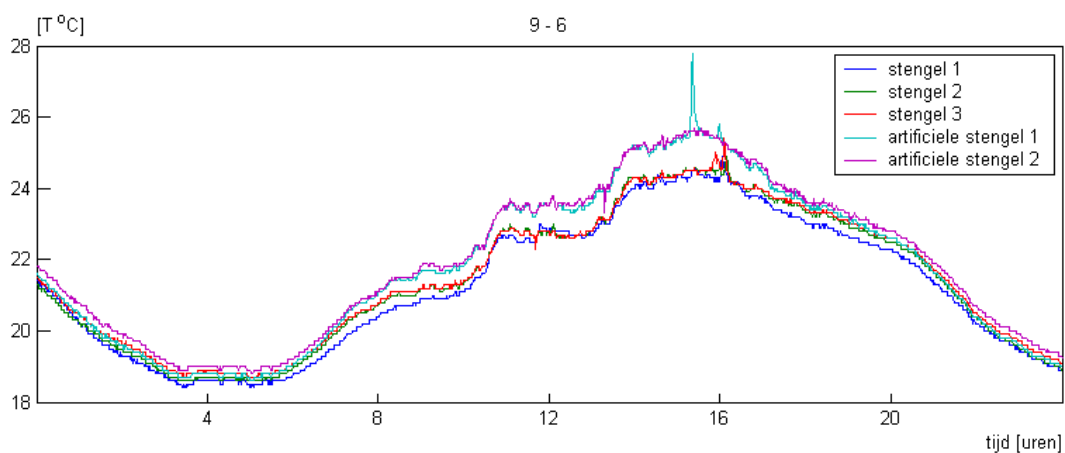
Het temperatuurverloop van de kleine artificiële vrucht komt wel goed overeen met de echte vruchten. Het vochtverlies uit deze vrucht was relatief minder dan uit de grote vrucht, maar ook hiervan was het gewicht afgenomen.

3.5 Meting in de kas met de artificiële stengel



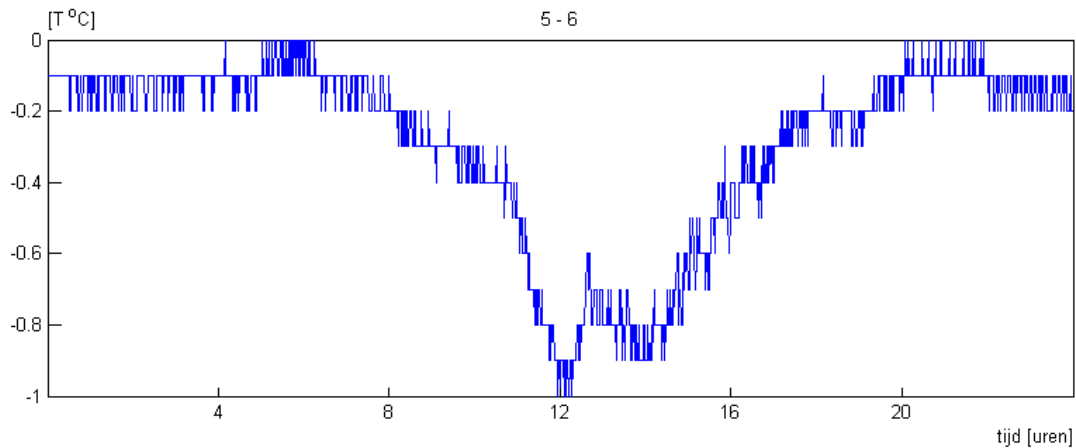
Figuur 19 Foto van de artificiële stengel naast een echte stengel met de sensoren

In een praktische uitvoering van een sensor voor de stengel zal deze in een andere kleur gemaakt worden zodat hij wat eenvoudiger kan worden teruggevonden.

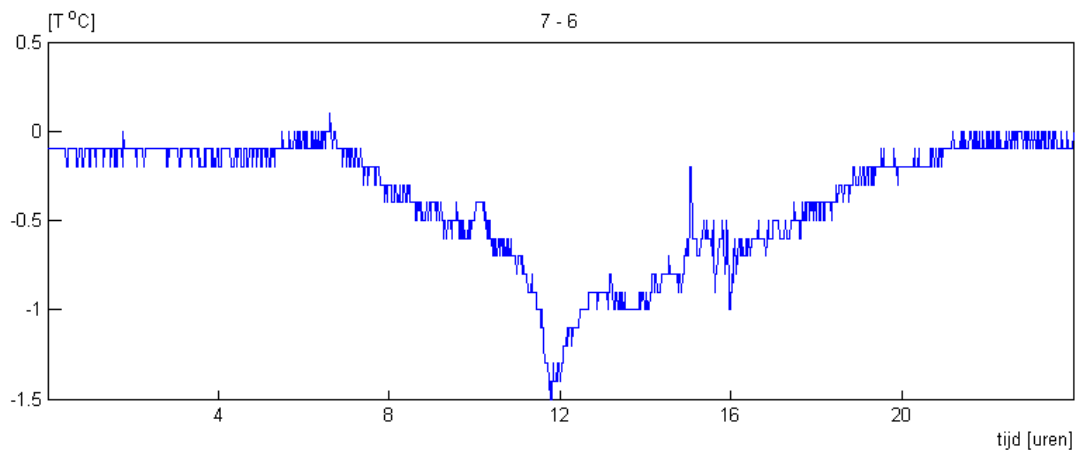


Figuur 20 Temperatuur van een echte stengel (3x) en de artificiële stengel (2x)

De artificiële stengel heeft duidelijk een hogere temperatuur gedurende de dag dan de echte stengel. In Figuur 21 en Figuur 22 is dit verschil te zien voor een koude en een warme dag.

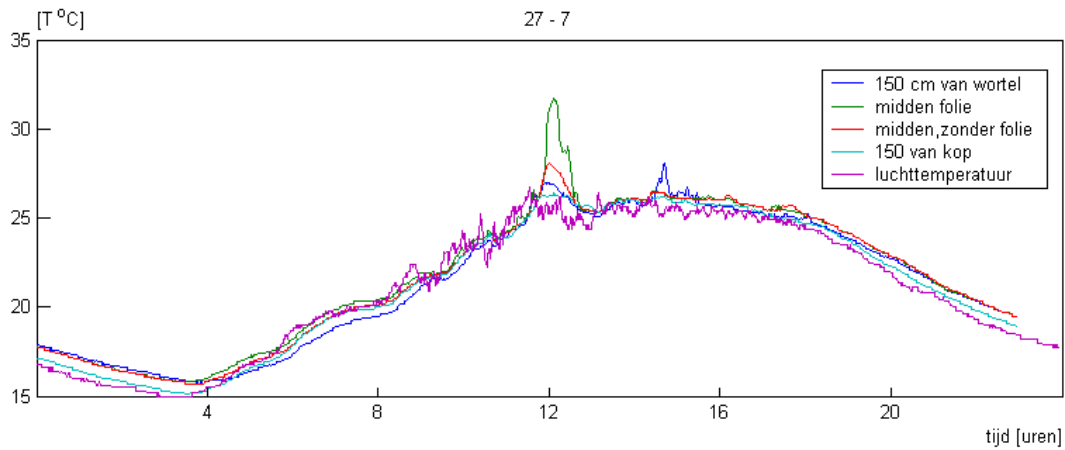


Figuur 21 Verschiltemperatuur tussen de echte en de artificiële stengel op een koude dag

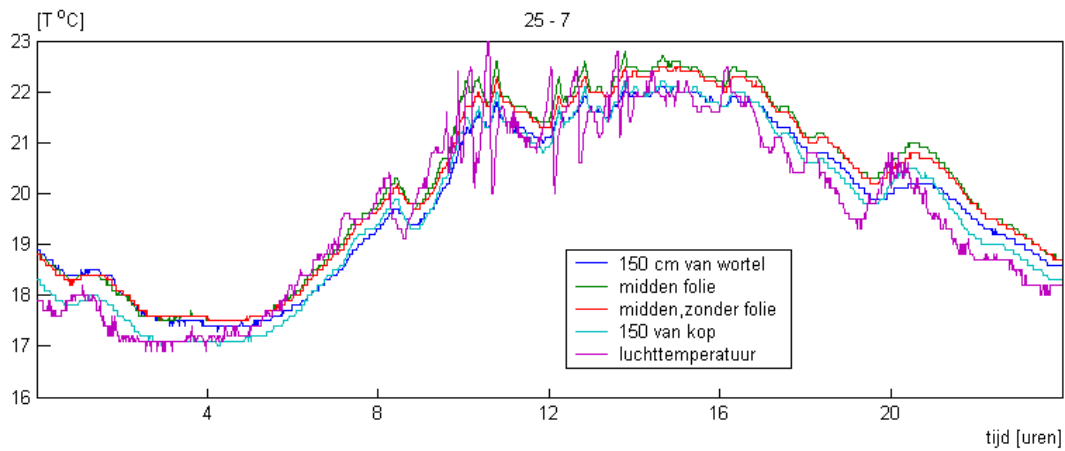


Figuur 22 Verschiltemperatuur tussen de echte en de artificiële stengel op een warme dag

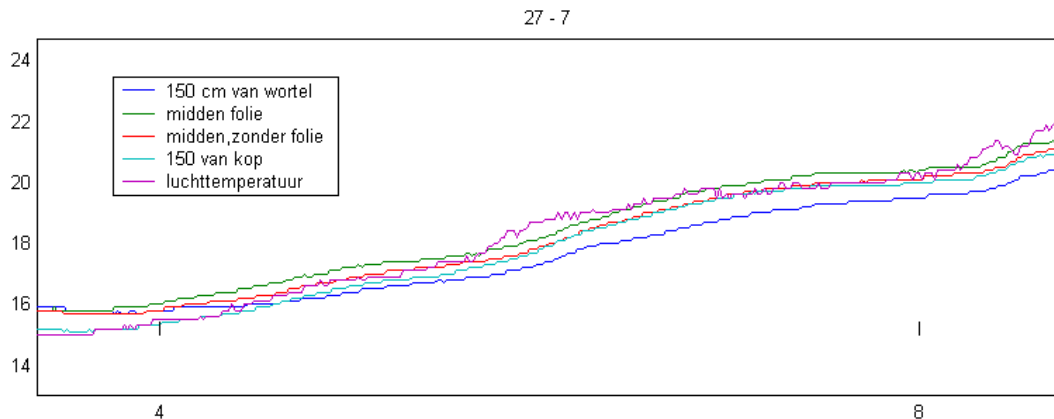
Op een warme dag waarbij de verdamping van het gewas groter is, wordt het temperatuurverschil ook groter. De oorzaak van dit verschil heeft twee mogelijke oorzaken: 1. verdamping vanuit de stengel, 2. het watertransport door de stengel. Door 3 sensoren op verschillende plekken op één stengel te plaatsen en de temperatuur bij de wortels te meten kan het effect van de waterstroom door de stengel worden vastgesteld. Het beperken van de verdamping vanuit de stengel bij één van de sensoren zonder de warmteoverdracht naar de omgeving te beïnvloeden geeft informatie over de invloed van de verdamping van de stengel. De stengel wordt hiervoor in een dun folie verpakt.



Figuur 23 Temperatuur van een echte stengel op verschillende hoogtes, waarbij één meetpunt met folie is verpakt, en de luchttemperatuur op een warme dag

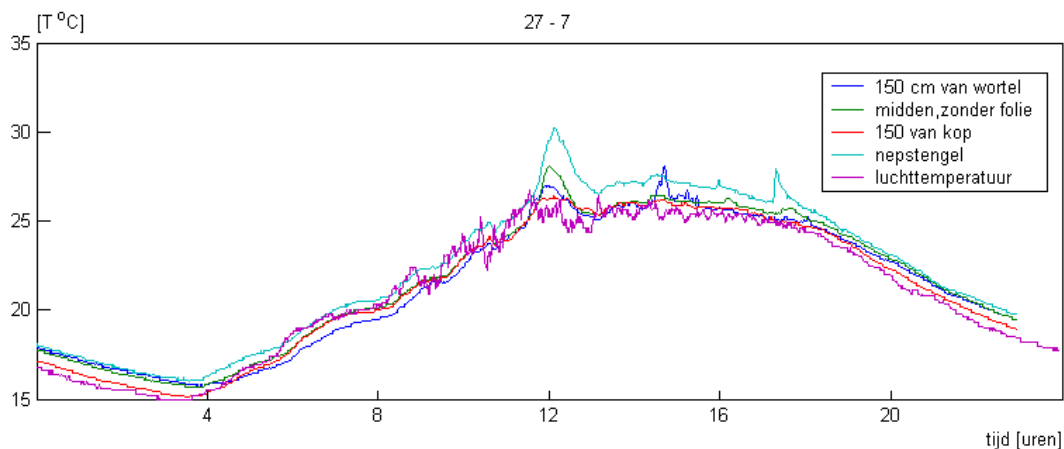


Figuur 24 Temperatuur van een echte stengel op verschillende hoogtes, waarbij één meetpunt met folie is verpakt, en de luchttemperatuur op een koude dag



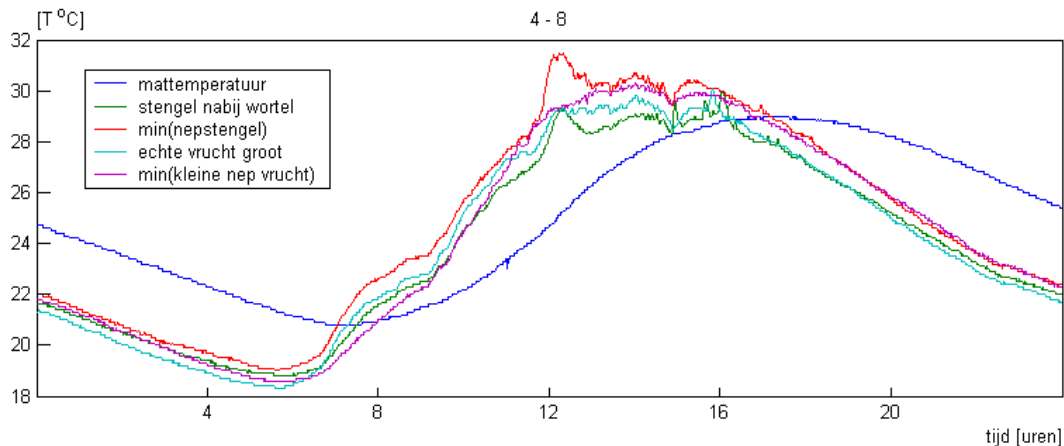
Figuur 25 Temperatuur van de stengel in de ochtend van een warme dag (Figuur 23).

In de ochtend blijft de temperatuur van de stengel dicht bij de wortel laag in vergelijking tot de andere meetpunten op de stengel. De vochtstroom zorgt voor dit verschil, niet de verdamping want dan zou dat ook voor de overige punten moeten gelden. De meetpunten in het midden van de stam hebben gedurende de meting vrijwel constant dezelfde waarde ondanks dat de ene is ingepakt in folie. Het meetpunt zonder folie heeft overdag een iets lagere temperatuur ($<0.3^{\circ}\text{C}$) dan de stengel met folie. Dit duidt erop dat verdamping van de stengel de temperatuur van de stengel nauwelijks beïnvloedt. De piek in de meting van de temperatuur van de midden sensoren (Figuur 23) wordt overigens veroorzaakt door aanstraling van de zon op dat moment. De temperatuur van de stengel in het midden is gedurende de dag hoger dan de temperatuur bij de wortel en de kop, door de hogere omgevingstemperatuur.



Figuur 26 Temperatuur van de echte stengel in vergelijking met de artificiële stengel

De artificiële stengel is onder in het gewas geplaatst nabij de goot zoals in Figuur 19 te zien is. De artificiële stengel heeft overdag een veel hogere temperatuur dan de echte stengel. In de nacht komt de temperatuur wel overeen met de temperatuur van de stengel nabij de wortel.

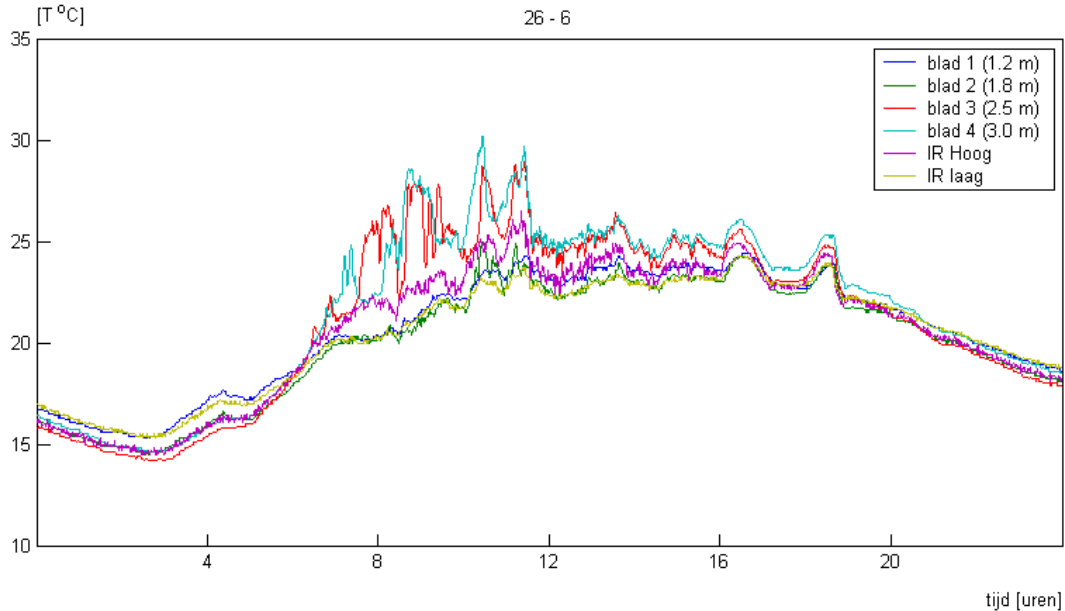


Figuur 27 Temperatuur van de mat, de stengel, de minimale temperatuur van de artificiële stengel, de echte vrucht temperatuur en de minimale kleine artificiële vrucht temperatuur als functie van de tijd.

De artificiële vrucht is in de kritieke ochtenduren kouder dan de stengel. De temperatuur van de mat heeft een grote traagheid. Na het moment van water geven daalt de stengel temperatuur (rond 10 uur). Het moment van water geven is eerder maar het meetpunt op de stengel is 150 cm van de mat. Bij een hoge luchtvochtigheid in de kas moet er wel rekening worden gehouden met het effect van de temperatuurdaling van de stengeltemperatuur, vanwege mogelijke condensatie. Het moment van water geven is niet terug te vinden in de mattemperatuur. Wel is te zien dat de temperatuur van de mat voor een groot deel van de dag lager is dan de stengeltemperatuur.

3.6 Bladtemperatuur metingen

De methode om de planttemperatuur te meten in de praktijk is middels infrarood camera's. Experimenteel is vastgesteld of de gemeten waarde door de infrarood camera overeenkomt met de bladtemperatuur welke met een Pt-100 wordt gemeten. Er wordt gekeken naar de bladtemperatuur omdat de camera vooral bladoppervlak ziet.

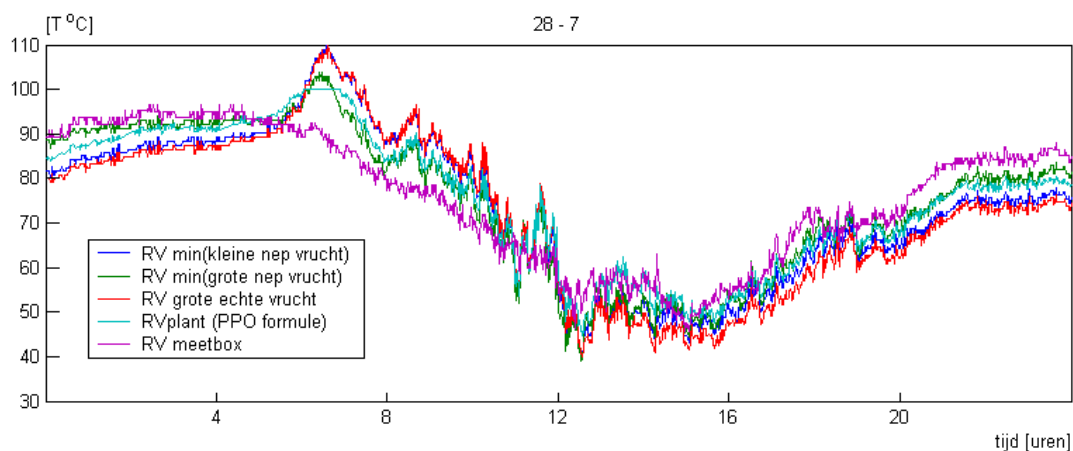


Figuur 28 Temperatuur van bladeren op verschillende hoogtes en de temperatuur van de infrarood camera omhoog en omlaag gericht

Overdag hebben de bovenste bladeren de hoogste temperatuur zoals verwacht door opwarming van de zon. En 's-nachts is dit precies omgekeerd door uitstraling naar het dek. De infrarood camera geeft voor het bovenste deel van het gewas (IR Hoog) overdag een lagere temperatuur dan de gemeten temperatuur in deze laag, omdat de camera delen van het gewas ziet die in de schaduw hangen en daardoor niet zo veel opwarmen. In de nachtperiode is de gemeten temperatuur van het blad in de bovenste lagen van het gewas vrijwel gelijk aan de temperatuur van de bovenste camera (IR Hoog). De camera is daarmee een goed middel om natslaan van de kop te voorkomen.

De infrarood camera die van onderen naar boven kijkt geeft vrijwel exact de temperatuur van de onderste bladeren weer gedurende de hele dag, en kan daarom goed worden gebruikt als een indicatie voor de temperatuur van de onderste bladeren. De kans op condensatie in het onderste gedeelte van het gewas is relatief gering waardoor deze meting niet in de vochtregeling betrokken hoeft te worden.

3.7 Berekening van de relatieve luchtvochtigheid op basis van verschillende temperaturen

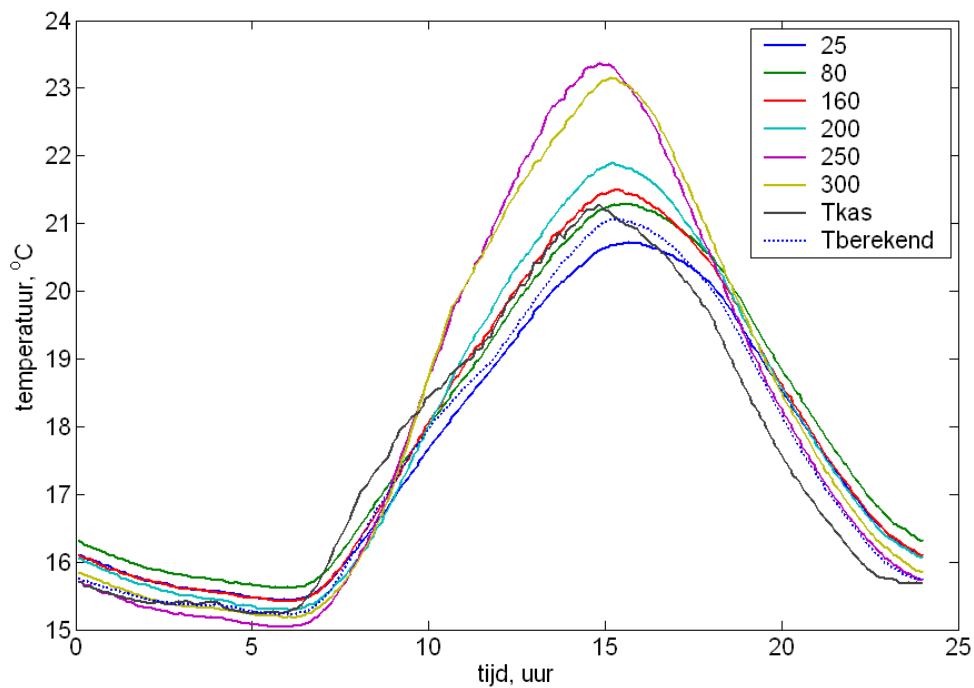


Figuur 29 De relatieve luchtvochtigheid gebaseerd op verschillende temperaturen

In Figuur 29 is de relatieve luchtvochtigheid gebaseerd op de temperatuur van de kleine artificiële vrucht, de grote artificiële vrucht, de grote echte vrucht, een berekende vruchttemperatuur de meetbox temperatuur. Voor de natte bol temperatuur, welke nodig is voor de berekening, wordt de meting in de meetbox genomen omdat de veronderstelling is dat het absolute vochniveau in de kas lokaal weinig verschilt. Een kritieke situatie is duidelijk zichtbaar rond 7 uur. De relatieve luchtvochtigheid op basis van de luchttemperatuur is laag maar de relatieve luchtvochtigheid van de vruchten is hoog en zelfs boven de 100% wat zorgt voor natslaan. Op basis van de luchttemperatuur wordt het vocht niet afgevoerd, maar indien de vruchttemperatuur wordt gebruikt voor de relatieve luchtvochtigheid bepaling wordt er wel vocht afgevoerd en daarmee condensatie voorkomen. Indien de relatieve luchtvochtigheid wordt bepaald met de berekende vruchttemperatuur dan wordt de relatieve luchtvochtigheid begrensd op 100%. De periode dat de relatieve luchtvochtigheid boven de 100% komt op basis van de berekende vruchttemperatuur is korter dan op basis van de echte grote vrucht. Blijkbaar warmt de echte grote vrucht minder snel op dan in de berekende vruchttemperatuur wordt aangenomen.

3.8 Artificiële vruchten op verschillende hoogtes

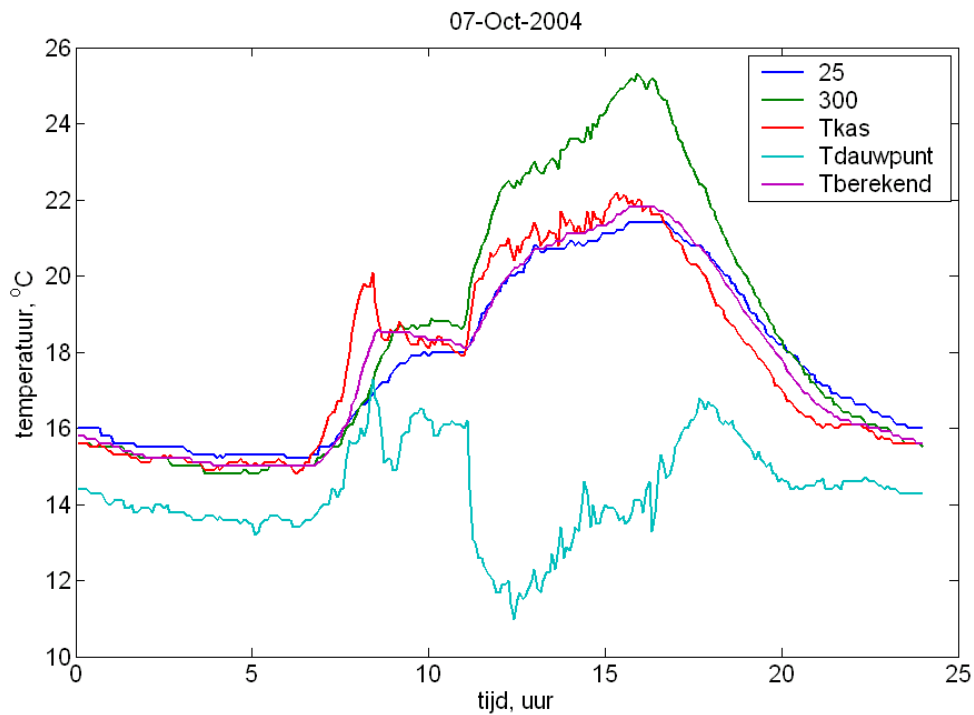
De meest geschikte locatie voor de plaatsing van de artificiële vruchten t.b.v. de meting is bepaald door gelijktijdig aan artificiële vruchten op verschillende hoogtes te meten. De hoogte was 25, 80, 160, 200, 250 en 300 cm, waarbij in een ander gewasrij in de kas ook op de hoogtes 160 en 200 cm is gemeten. De vruchten waren allemaal even groot en hadden een gewicht van 180 ± 6 gram. De temperatuur van het oppervlak wordt op twee tegenoverliggende plekken gemeten. De minimale waarde van beide wordt in de verwerking gebruikt.



Figuur 30 Temperatuur van de vruchten op verschillende hoogtes gemiddeld over 42 dagen en de kasluchttemperatuur

In Figuur 30 is de temperatuur van de vruchten op verschillende hoogtes te zien met de kasluchttemperatuur gemiddeld over 42 dagen. De onderste vrucht is gedurende de dag het koudst en de bovenste het warmst zoals verwacht. De temperatuur van de bovenste vruchten is overdag hoger dan de kasluchttemperatuur t.g.v. de aanstraling. In de nacht zijn de bovenste vruchten het koudst t.g.v. de straling naar het koude dek. In de ochtend uren is de kans op natslaan het grootst omdat de plantdelen dan koud zijn van de nacht en het vochniveau in de kas stijgt ten gevolge van de verdamping. In deze periode hebben de bovenste vruchten de meeste kans op natslaan. Echter in een echte plant hangen op deze hoogte geen grote vruchten met een grote warmtecapaciteit. De kans dat de kop van het gewas in de ochtend uren nat slaat is gering omdat deze door de straling zal worden verwarmd en veel minder massa heeft dan andere plantdelen.

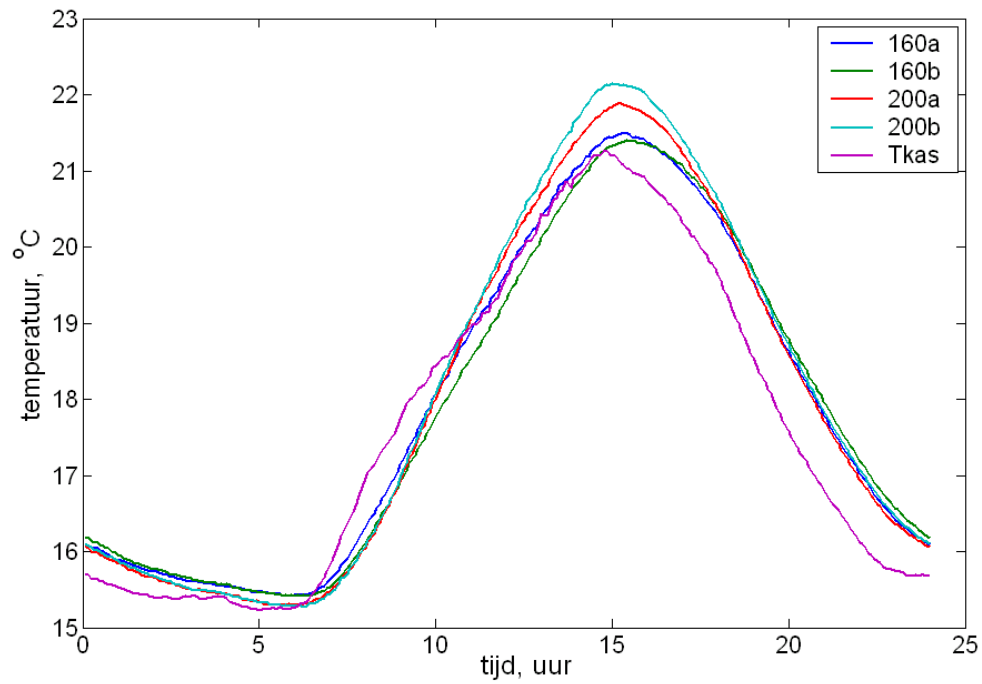
De berekende vruchttemperatuur ligt overdag tussen de temperatuur van de onderste twee vruchten in en in de nacht tussen de bovenste twee vruchten. Deze temperatuur is het direct gevolg van het verloop van de gemeten luchttemperatuur.



Figuur 31 Temperatuur van de vruchten op een hoogte van 25 cm en 300 cm en de kasluchttemperatuur en de dauwpuntstemperatuur

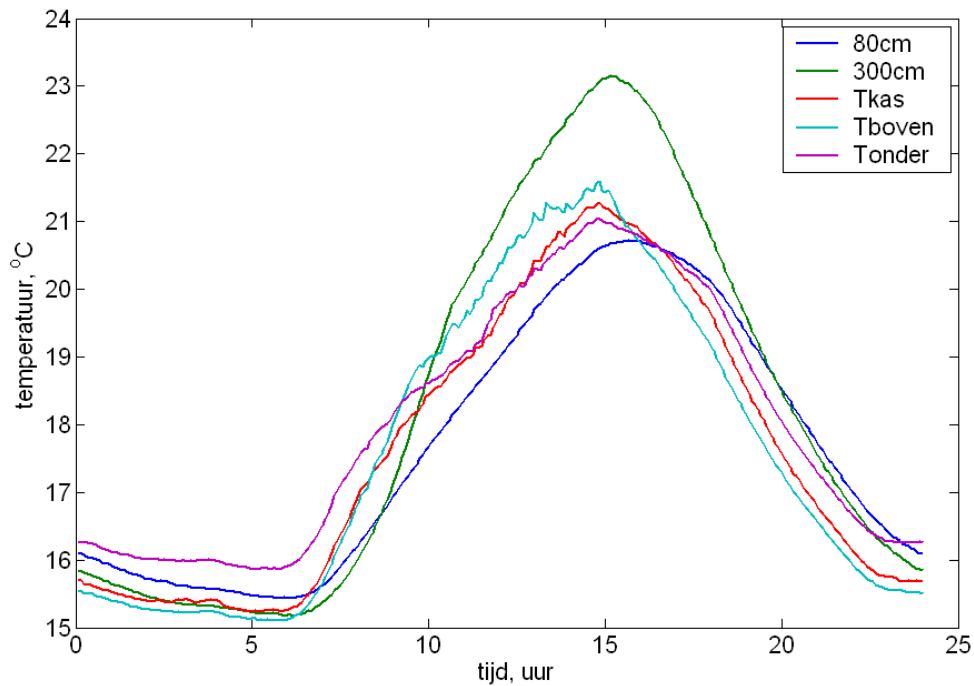
In Figuur 31 is een dag te zien dat de vruchttemperatuur vrijwel gelijk is aan de dauwpuntstemperatuur. In deze situatie kan condensatie optreden. Indien de verwarming en de ventilatie op basis van de vruchttemperatuur worden geregeld kan deze situatie worden voorkomen.

In plaats van de vruchttemperatuur te meten kan deze ook worden berekend met een voortschrijdend gemiddelde van de kasluchttemperatuur (Houter et al, 2004). In de kritische situatie weergegeven in Figuur 31 is de berekende vruchttemperatuur hoger dan de gemeten temperatuur. De traagheid van de vruchten is groter dan de berekende waarde. Verticale temperatuurverschillen kunnen er ook toe leiden dat de berekende temperatuur afwijkt van de gemeten temperatuur. De luchttemperatuur bij de kunstvrucht kan lager zijn dan de luchttemperatuur bij de meetbox waardoor de opwarming ook trager. De berekende vruchttemperatuur zou gebaseerd moeten zijn op de meest kritische (koudste) luchttemperatuur in de kas.



Figuur 32 Temperatuur van de vruchten op verschillende locaties gemiddeld over 42 dagen

Op dezelfde hoogte maar op een andere locatie in de kas zijn gelijktijdig ook metingen aan de vruchten gedaan (Figuur 32). De temperatuur van de vruchten op een hoogte van 160cm verschillen niet veel. Op een hoogte van 200 cm zijn er overdag verschillen te zien dit is waarschijnlijk het gevolg van het feit dat één van de vruchten meer in de schaduw hangt.



Figuur 33 Temperatuur van de artificiële vrucht op 80 cm en 300 cm hoogte, de kasluchttemperatuur, de temperatuur van gewas van boven met infrarood camera en temperatuur van onderen met infrarood gemiddelde over 42 dagen

De temperatuur die door de infrarood camera's wordt vastgesteld verschilt van de vruchttemperatuur. De camera die naar de onderkant van het gewas kijkt laat 's nachts een hogere temperatuur zien ten gevolge van de verwarming. Ook overdag geeft de camera die van onderen kijkt een hogere temperatuur aan dan de temperatuur van de onderste vrucht. De camera die van boven op het gewas kijkt registreert 's nachts gemiddeld een lagere temperatuur dan de bovenste vrucht die langzaam afkoelt.

4 Conclusies

- De ontwikkelde artificiële vruchten hebben dezelfde thermische eigenschappen als echte vruchten en geven daardoor goede informatie.
- Plaatsing van de artificiële sensoren dient tussen het substraat en de onderste bladeren of vruchten te gebeuren. Hier is de kans op opwarming door de verwarming gering en hier bevinden zich de plantdelen (stengels en rijpe vruchten) die de grootste kans hebben om nat te slaan. Straling van de verwarming naar de meetvrucht moet worden voorkomen aangezien de sensor hierdoor een hogere temperatuur krijgt.
- De kleur van de vrucht heeft geen invloed, mits deze niet wit of zwart is, op de thermische eigenschappen, de emissiecoëfficiënt in het infrarood gebied wel.
- De afmetingen van de kunstvrucht moet minimaal de maximale afmetingen van de echte vruchten hebben.
- De artificiële vruchten kunnen het beste met twee ver uit elkaar geplaatste temperatuursensoren worden uitgevoerd, waarbij de laagste temperatuur wordt gebruikt voor de regeling.
- De sensoren kunnen op een vaste locatie worden geplaatst en behoeven verder geen onderhoud.
- De artificiële stengel temperatuur van het prototype zoals nu gebouwd geeft niet de juiste informatie. De temperatuur van een echte stengel is altijd lager. Dit komt waarschijnlijk door de temperatuur van het voedingswater. Indien de temperatuur van het voedingswater en/of de mattemperatuur te laag is kan dit tot gevolg hebben dat er condensatie op de stengel optreedt. Een temperatuurmeting van het voedingswater en de mattemperatuur verdient daarom aanbeveling (dit wordt meestal ook al gedaan), en daarbij de mogelijkheid om deze temperatuur te beïnvloeden.
- De infrarood camera die van boven op het gewas kijkt geeft een juiste temperatuur van de bovenste laag van het gewas weer in de nacht. Deze camera kan daarom goed worden gebruikt om natslaan van de kop te voorkomen.
- Door de zonneïnstraling overdag ontstaan grote temperatuurverschillen in de bovenste delen van het gewas waar de camera een gemiddelde van maakt.
- De vruchttemperatuur kan ook worden berekend, waarbij de via het experiment bepaalde thermische eigenschappen van de vrucht kunnen worden gebruikt (soft sensor). Een luchttemperatuur dient bij voorkeur gemeten te worden op een kritische (koudste) locatie in de kas zodat de laagste vruchttemperatuur wordt berekend. Een meting met een sensor met de eigenschappen van de vrucht zal een tuinder altijd meer vertrouwen geven. Daarnaast werkt een verkeerde meting van de luchttemperatuur in de berekende vruchttemperatuur nog lang door. In het deelverslag *Planttemperatuur als stuurparameter in kasklimaatregelingen* is verder ingegaan op berekende vruchttemperatuur.

Referentie

1. Y. Elad, B. Williamson, P. Tudzynski and N. Delen (eds), *Botrytis: biology, pathology and control*, 1—9. © 2004 Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands.
2. Eric Weissteins's World of Physics <http://scienceworld.wolfram.com/physics/>
3. Heitronics 2000 Infrared radiation pyrometer KTX Operating instruction Wiesbaden.
4. Houter, Bert; Gelder, Arie de; Rijpsma, Edwin; Roos, Martijn; Paternotte, Pm; Zwart, Feije de (2004). Energiebesparing door aangepaste vochtregulatie. PPO 416.16017
5. Houter Bert, Rijpsma Edwin, Campen Jouke , Gelder, Arie de; Kempkes, Frank (2005). Planttemperatuur als stuurparameter in kasklimaatregelingen