



# *Ruimtelijk Temperatuurmeten in Kassen met ClimaView™*

resultaten en bevindingen

W.H.J. van Schaik  
M.L.H. Schevers



Glastuinbouw en Milieu

Productschap  Tuinbouw



NOVEM projectcode 335519/0209  
PT projectcode 10704

februari 2003

Innovation Handling, Eindhoven

*Contact adres:*

Innovation Handling  
de Lismortel 3  
5612 AR Eindhoven  
the Netherlands

Tel. +31 (0)40 243 34 63  
Fax +31 (0)40 243 96 03  
email: [Innovation.Handling@iae.nl](mailto:Innovation.Handling@iae.nl)

Copyright © Innovation Handling 2003.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the copyright holder.

---

## Samenvatting

### *Inleiding*

In een ontwikkelingstraject aangevuld door onderzoek met praktijkmetingen zijn door Innovation Handling, in opdracht van NOVEM en Productschap Tuinbouw, de mogelijkheden van het ruimtelijk meten van temperatuur met laagfrequent geluid onderzocht. Hiervoor zijn geëigende meetsystemen ontwikkeld.

De akoestische metingen zijn gebaseerd op het feit dat de geluidssnelheid in lucht in grote mate afhankelijk is van de temperatuur en in mindere mate van vochtigheid, luchtsamenstelling en druk.

### *Doelstellingen*

In de praktijk bepalen of het ruimtelijk meten van temperatuur, door middel van het meten van de snelheid van geluid, in een kas mogelijk is.

Indien de bovenstaande doelstelling wordt behaald, bepalen of hiermee bezuinigingen kunnen worden gerealiseerd. Daarnaast wordt een meetsysteem verder ontwikkeld om met geluid de luchtvochtigheid te meten.

### *Werkwijze en Ontwikkelingen*

Het project is verdeeld in een aantal fasen. Deze fasen zijn: ontwikkelen, testen, praktijkmetingen en evaluatie. Gedurende het project is er continu gewerkt aan de verbetering van de concepten en de deelsystemen.

Voor het uitvoeren van de metingen in de praktijk is accommodatie beschikbaar gesteld door komkommerkwekerij 'v.o.f. T. Aerts & zonen' te Elshout. Bij deze metingen is gebruik gemaakt van de tijdens dit project ontwikkelde meetsystemen HumiTemp<sup>®</sup> en ClimaView<sup>™</sup>. De in de kas aanwezige klimaatmeetbox volgens het 'natte- droge bol' meetprincipe is gebruikt als referentie en voor evaluatie.

HumiTemp<sup>®</sup> is een meetsysteem voor de temperatuur, vochtigheid en luchtdruk. Het is ontwikkeld ter vervanging van de huidige klimaatmeetboxen en ter ondersteuning van het ruimtelijk meten. Er bestaan twee basisuitvoeringsvormen. Het ene systeem meet zowel de temperatuur als vochtigheid akoestisch, het andere meet de temperatuur elektronisch en alleen de vochtigheid akoestisch.

ClimaView<sup>™</sup> is een meetsysteem voor het ruimtelijk meten van de temperatuur. Het is opgebouwd uit een aantal subsystemen voor data-acquisitie, -verwerking en -visualisatie. De meetverwerking is gebaseerd op het meten van gemiddelde geluidssnelheden over verschillende trajecten of meetlijnen en het meten van additionele klimaatparameters. Elke meetlijn verschaft informatie over de temperatuur langs een specifiek traject. Het proces van samenvoegen van deze informatie voor het verkrijgen van een ruimtelijke temperatuurverdeling noemt men tomografie. Uit de bepaalde ruimtelijke informatie is het mogelijk 'virtuele sensoren' te definiëren, het betekent dat een willekeurig gebied in de ruimte kan worden gekozen, waarvan de gemiddelde temperatuur als invoer voor de klimaatregeling kan worden gebruikt. Door gebruik te maken van de HumiTemp<sup>®</sup> luchtvochtigheid- en drukmetingen is de ruimtelijke temperatuurverdeling nauwkeuriger te bepalen.

### *Waarnemingen en Resultaten*

Door de complexiteit van de meetsystemen, personeelsverloop en technische complicaties is het project sterk uitgelopen. De belangrijkste doelstellingen zijn echter uiteindelijk gerealiseerd.

Waarnemingen bestaan uit de HumiTemp<sup>®</sup> metingen en de gemiddelde temperaturen van de afzonderlijke meetlijnen (van het ClimaView<sup>™</sup> systeem). Hieruit wordt de temperatuurverdeling volgens de tomografische verwerking van de meetlijnen bepaald.

De evaluatie van de waarnemingen geschiedt aan de hand van de eerder genoemde klimaatmeetbox volgens het ‘natte- droge bol’ principe.

Uit de waarnemingen volgt dat beide HumiTemp<sup>®</sup>'s gelijkwaardig meten aan de referentie.

De meetverwerking van het ClimaView<sup>™</sup> systeem toont aan dat er grote verschillen optreden in de temperatuur, afhankelijk van de positie in de kas. De tomografische interpretatie van de meetlijnen verschaft een inzichtelijk beeld van de temperatuurverdeling in de kas. De gemiddelde ruimtelijke temperatuur en de ‘virtuele sensor’ (rond de referentiemeetbox) temperatuur correleren goed met de referentietemperatuur. Er zit een offset op de temperatuurmetingen, waarschijnlijk veroorzaakt door het hoogteverschil tussen de referentie en de meethoogte waarop de akoestische meetlijnen van het ClimaView<sup>™</sup> systeem zich bevinden.

De resultaten gepresenteerd in dit rapport geven een goed beeld van de mogelijkheden van ruimtelijk temperatuurmeten met behulp van akoestische technieken. Duidelijk is dat er een beter en meer integraal inzicht wordt verkregen in de klimatologische omstandigheden in de kas.

### *Algemene conclusies en aanbevelingen*

Uit de waarnemingen blijkt dat het ruimtelijk meten met laagfrequent geluid in kassen goed mogelijk is. Vervolgonderzoek wordt aanbevolen om voor het ruimtelijk temperatuurmeten een uitgekiend product met een goed gewogen prijs-prestatieverhouding in de markt te kunnen zetten en aanvullende inzichten in mogelijkheden voor het verbeteren van het kasklimaat te kunnen verwerven. Om het besparingspotentieel te kunnen kwantificeren zal een breder opgezet praktijkonderzoek met meer klimaat- en kasparameters nodig zijn. Uit onderzoek is vastgesteld dat globaal ‘elke graad die niet verstookt hoeft te worden’, een bezuiniging van 10% oplevert. Door ruimtelijk temperatuur te meten en een nieuwe regelstrategie met behulp van ‘virtuele sensoren’ toe te passen, kunnen bezuinigingen makkelijker en inzichtelijker worden gerealiseerd.

# Inhoud

	Blz.
<b>SAMENVATTING</b>	<b>III</b>
<b>1 INLEIDING</b>	<b>6</b>
1.1.    AANLEIDING	6
1.2.    DOELSTELLINGEN	7
1.3.    OPBOUW EN INDELING VAN HET RAPPORT	7
<b>2 PROJECTUITVOERING EN MEETOPZET</b>	<b>8</b>
2.1    ONTWIKKELINGEN	8
2.1.1 <i>HumiTemp<sup>®</sup> temperatuur- en luchtvochtigheidsmeetinstrument</i>	8
2.1.2 <i>ClimaView<sup>TM</sup> ruimtelijk temperatuurmeetsysteem</i>	9
2.2    MEETOPSTELLING VOOR HET RUIMTELIJK METEN	11
2.2.1 <i>De functie van het HumiTemp<sup>®</sup> meetsysteem bij het ruimtelijk meten</i>	13
2.3    KALIBRATIE VAN DE SYSTEMEN HUMITEMP <sup>®</sup> EN CLIMAVIEW <sup>TM</sup>	13
<b>3 WAARNEMINGEN EN RESULTATEN</b>	<b>14</b>
3.1    HUMITEMP <sup>®</sup> METINGEN	14
3.2    CLIMAVIEW <sup>TM</sup> METINGEN	14
3.3    CLIMAVIEW <sup>TM</sup> 2D-TEMPERATUURVELD	15
3.4    ERGONOMIE, ARBO EN ACCEPTATIE	16
<b>4 EVALUATIE VAN DE DOELSTELLINGEN</b>	<b>17</b>
4.1    MOGELIJKHEDEN VAN HET AKOESTISCH METEN	17
4.2    BESPARING OP ENERGIEVERBRUIK	17
4.3    TOEPASSEN VAN KLEINERE VERWARMINGSLUSSEN	17
4.4    TERUGVERDIENTIJD EN PRIJSINDICATIES	17
4.5    LOKAAL BIJVERWARMEN MIDDELS HET FLEXIBEL BIJSTOKEN MET GAS	18
4.6    KENNISOVERDRACHT	18
<b>5 CONCLUSIES</b>	<b>19</b>
5.1    CONCLUSIES VOOR HUMITEMP <sup>®</sup>	19
5.2    CONCLUSIES VOOR CLIMAVIEW <sup>TM</sup>	19
<b>6 AANBEVELINGEN</b>	<b>20</b>
<b>LITTERATUUR</b>	<b>21</b>
<b>LIJST VAN BIJLAGEN</b>	<b>22</b>
<i>Bijlage A    Luchtvochtigheidsmeetsystemen, een beknopte vergelijking</i>	23
<i>Bijlage B    Gebruikte apparatuur en meetapparatuur</i>	27
<i>Bijlage C    HumiTemp<sup>®</sup> metingen</i>	28
<i>Bijlage D    Meetlijnen</i>	31
<i>Bijlage E    Ruimtelijk meten</i>	34
<i>Bijlage F    Toelichting CD-Rom beeldverslag</i>	36

# 1 Inleiding

## 1.1. Aanleiding

Eerder door Novem ondersteund onderzoek [1] (*Temperatuur en luchtvochtigheid meten in kassen*), heeft een indicatie opgeleverd dat een akoestische meetmethode toegevoegde waarde kan opleveren voor een beter inzicht in klimaatcondities in de glastuinbouw.

In het onderhavige vervolgonderzoek zijn de mogelijkheden van dit innovatieve meetprincipe, namelijk het ruimtelijk meten van de temperatuur, in een praktijksituatie verder onderzocht. De ontwikkeling en het onderzoek zijn ondersteund door het Productschap Tuinbouw en Novem.

Meten met geluid is gebaseerd op het feit dat de geluidssnelheid in grote mate afhankelijk is van de temperatuur en in mindere mate van de vochtigheid, luchtsamenstelling en druk.

voor een ideaal gas geldt: 
$$V = \sqrt{\frac{\kappa RT}{M}} \quad [\text{m/s}]$$

Hierin is  $V$  de geluidssnelheid,  $\kappa$  de verhouding  $c_p/c_v$  van het gas,  $R$  de gasconstante,  $T$  de temperatuur in Kelvin en  $M$  het gemiddeld molecuulgewicht van lucht.

Akoestisch meten geschiedt met actuatoren (luidsprekers) en sensoren (microfoons).

Voor het ruimtelijk meten wordt de geluidssnelheid over een aantal afzonderlijke trajecten bepaald. De geluidssnelheid wordt bepaald uit de tijd dat een geluidssignaal nodig heeft om een bepaald traject te overbruggen. Deze tijd wordt looptijd genoemd. Daarna wordt met deze informatie een temperatuurverdeling berekend over het gemeten oppervlak. Dit wordt ook wel tomografie genoemd. In de medische wereld is dit een wijd verbreide visualisatietechniek bij non-invasieve meetmethoden als echografie, Röntgen en bij MR Imaging. Dit betekent dat er geen sensoren in het medium hoeven te worden ingebracht om meetinformatie van het medium te vergaren. Laagfrequent akoestisch ruimtelijk meten is een transitieve non-invasieve meettechniek. Er is dus geen informatieuitwisseling tussen de sensor en zijn directe omgeving. De geluidssnelheid van een akoestisch signaal dat door het medium loopt wordt beïnvloed door de lokale temperatuur die het signaal op zijn pad van luidspreker naar microfoon passeert. Men hoeft niet ter plaatse te zijn om lokale informatie te meten. Omdat ook luchtvochtigheid en druk een rol spelen bij het meten van geluidssnelheid kan, als men ook beschikt over accurate luchtvochtigheid- en drukmetingen, de temperatuur nog nauwkeuriger worden bepaald. De invloed hiervan is echter relatief klein.

Bij het meten met geluid kan gebruik worden gemaakt van een breed frequentiegebied. Laagfrequent geluid draagt over grotere afstanden, hoogfrequent geluid dempt eerder uit maar kan meer informatie bevatten in een kortere tijd.

---

In bijlage A is voor de volledigheid een aantal conventionele luchtvochtigheidsmeetsystemen op een rij gezet en vergeleken met de hier gebruikte en beschreven akoestische methode.

### **1.2. Doelstellingen**

Tijdens de aanloop van het project zijn de volgende doelstellingen opgesteld:

- In de praktijk bepalen of het ruimtelijk meten van temperatuur door middel van het meten van de snelheid van geluid in een kas mogelijk is.
- Onderzoeken of het mogelijk is het energieverbruik met 10% te verminderen m.b.v. nauwkeurige temperatuurmetingen.
- Onderzoeken of er in de kassen kleinere verwarmingslussen moeten worden geplaatst in plaats van de grote lussen die nu worden gebruikt.
- Onderzoeken of het mogelijk is het systeem een redelijke terugverdientijd heeft.
- Kennisoverdracht. De ervaringen met het project verspreiden onder andere tuinders in de glastuinbouw.

### **1.3. Opbouw en indeling van het rapport**

De werkwijze van het onderzoek en de gebruikte meetsystemen worden uiteengezet in hoofdstuk 2. In hoofdstuk 3 worden de waarnemingen en resultaten gepresenteerd. In hoofdstuk 4 worden, mede aan de hand van de waarnemingen, de doelstellingen beantwoord. De conclusies zijn in hoofdstuk 5 weergegeven, gevolgd door de aanbevelingen in hoofdstuk 6. Het rapport wordt afgesloten met een literatuurlijst en een zestal bijlagen.

## 2 Projectuitvoering en meetopzet

Het project heeft bestaan uit: ontwikkelen, bouwen, testen, praktijkmetingen, evaluatie en rapportage. Gedurende het project is er gewerkt aan de verdere ontwikkeling van de systemen, het oplossen van geconstateerde problemen c.q. afwijkingen, het ontwikkelen van produceerbare en betaalbare concepten en het opzetten, uitvoeren en uitwerken van relevante metingen.

Binnen het project zijn twee meetsystemen verder ontwikkeld namelijk HumiTemp<sup>®</sup> en ClimaView<sup>™</sup>. Met deze systemen zijn in de kas metingen uitgevoerd.

De eerste ontwikkeling richt zich op het verbeteren van de huidige meetbox in die zin, dat het een onderhoudsvrij en nauwkeurig temperatuur en vochtigheidsmeetstelsel oplevert, gebaseerd op akoestische technieken. De tweede ontwikkeling concentreert zich op het ruimtelijk meten van de temperatuurverdeling in een tuinbouwkas. Beide ontwikkelingen staan echter niet los van elkaar daar het nauwkeurig ruimtelijk meten een onderhoudsvrij en nauwkeurig vochtigheidsmeetstelsel vereist.

De praktijktest met de meetopstelling in de komkommerkas bij Aerts maakt gebruik van de tijdens dit project verder ontwikkelde meetsystemen HumiTemp<sup>®</sup> en ClimaView<sup>™</sup>. Daarnaast is als referentie gebruik gemaakt van de in de kas aanwezige conventionele meetbox ('natte- droge bol' principe). De evaluatie van de waarnemingen heeft plaatsgevonden aan de hand van deze referentiemeetbox.

In de volgende paragrafen wordt verder ingegaan op de genoemde ontwikkelingen en de meetopstelling die in de kas is aangebracht voor het verrichten van de praktijkmetingen.

### 2.1 Ontwikkelingen

Met het oog op de eerste doelstelling uit hoofdstuk 1.2 is door Innovation Handling aan de hieronder beschreven ontwikkelingen gewerkt.

#### 2.1.1 HumiTemp<sup>®</sup> temperatuur- en luchtvochtigheidsmeetinstrument

HumiTemp<sup>®</sup> [4] is een akoestisch meetstelsel voor lokale of puntmetingen van de temperatuur, vochtigheid en druk. Voor de metingen wordt gebruik gemaakt van hoogfrequent geluid. De akoestische meettechniek levert een onderhoudsarm meetinstrument wat zonder problemen tot 100% RV meet.

Het HumiTemp<sup>®</sup> systeem dient ter ondersteuning van het ruimtelijk meten maar is ook te gebruiken als vervanging van de huidige meetboxen.

Gedurende het project zijn er diverse tegenslagen geweest bij het ontwerp en kalibratie van dit meetstelsel. Dit heeft geresulteerd in diverse aanpassingen in zowel de elektronische hardware, de meetprocedure, als in het mechanisch ontwerp en het ontwerp van het akoestisch traject. Ook de kalibraties hebben de nodige tegenslagen gebracht en vraagtekens opgeroepen. De kosten van kalibraties zijn een niet te veronachtzamen kostenpost bij de ontwikkeling van prototypes. Naast verloop in personeel zijn zowel de ontwerp-aanpassingen als de kalibraties de belangrijkste oorzaak geweest voor de tijdsoverschrijding in het project.

Op het moment van deze rapportage bestaan er twee uitvoeringsvormen met verschillende nauwkeurigheden en prijsstelling voor de glastuinbouw. Beide systemen meten de luchtvochtigheid met behulp van akoestische metingen. Het ene systeem maakt gebruik van een *elektronische* temperatuursensor, het tweede (dubbel akoestische) systeem meet de temperatuur met een *akoestische* sensor. Met deze



laatste sensor kan de temperatuur zéér nauwkeurig worden gemeten. Hierdoor wordt een nauwkeurigere vochtmeting verkregen. Het systeem is evenwel duurder.

Luchtdrukveranderingen kunnen fouten geven van 1-2% RV. Deze afwijking wordt bij standaard psychrometers niet in de meetwaarde verdisconteerd. De extra optie van het elektronisch meten van de luchtdruk is in de HumiTemp<sup>®</sup> meetinstrumenten bij de praktijkmetingen bij Aerts geïmplementeerd.

De bij deze proef gebruikte HumiTemp<sup>®</sup> systemen zijn bij een kalibratiebedrijf met behulp van een klimaatkamer en referentiesensoren gekalibreerd.

Embedded software bepaalt in grote mate de functionaliteit van het meetsysteem. Het systeemontwerp is om deze reden zo uitgevoerd dat belangrijke gegevens als bijvoorbeeld kalibratieparameters en algoritmen voor meetverwerking flexibel in het systeem worden opgeslagen. Daarnaast bezit de HumiTemp<sup>®</sup> een groot aantal interface mogelijkheden, zowel digitaal als analoog. Dit verhoogt de mogelijkheid van systeemintegratie. Verder zijn er mogelijkheden voor het genereren van alarmen, zowel via het netwerk als lokaal (zowel akoestisch als optisch). Bepaalde uitvoeringen van de HumiTemp<sup>®</sup> kunnen stand alone functioneren; dataopslag in het systeem behoort tot de mogelijkheden.

### 2.1.2 *ClimaView<sup>TM</sup> ruimtelijk temperatuursysteem*

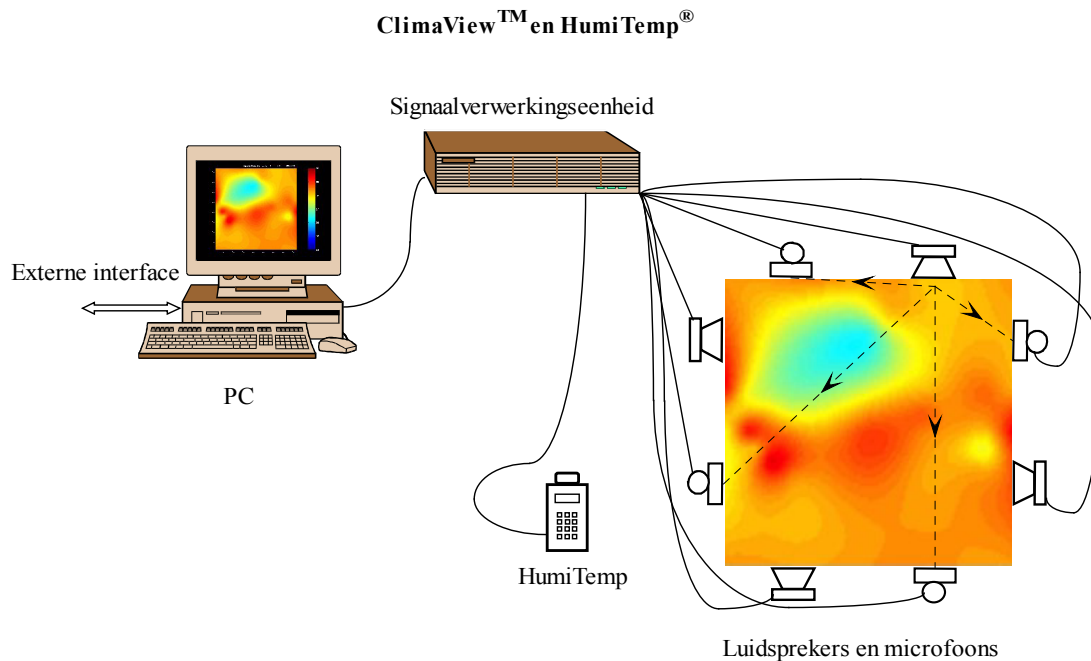
ClimaView<sup>TM</sup> is de benaming voor het ruimtelijk meetsysteem. Het bestaat uit een aantal subsystemen voor data-acquisitie, -verwerking en -visualisatie. De hoofdcomponenten zijn: een PC, een signaalverwerkingseenheid, luidsprekers, microfoons en bijbehorende versterkers. Op het systeem zijn verder nog één of meer HumiTemp<sup>®</sup>'s aangesloten.

Elke luidspreker-microfooncombinatie bepaalt een akoestische meetlijn waarlangs de geluidsnelheid wordt gemeten met de door Innovation Handling ontwikkelde signaalverwerkingseenheid. Met de geluidsnelheid en de HumiTemp<sup>®</sup> gegevens wordt de gemiddelde temperatuur langs elke meetlijn berekend. Alle meetlijnen samen worden verwerkt tot een ruimtelijk temperatuurbeeld m.b.v. een tomografisch rekenalgoritme ([3] en [9]).

Figuur 1 (p. 10) schetst een beeld van de situatie. Op de PC is de applicatiesoftware voor het ClimaView<sup>TM</sup> meetsysteem geïnstalleerd. De applicatiesoftware levert de visuele interface naar de gebruiker. Er kunnen acties worden ondernomen om het systeem aan te passen aan de gewenste meetgeometrie, de instellingen voor de virtuele temperatuursensoren, de keuze van de alarminstellingen of andere aanpassingen n.a.v. de wensen van de gebruiker. Voorbeelden van gebruikersinstellingen zijn het aanpassen van de temperatuurlegenda en het weergeven van isothermen. Via de ClimaView PC kunnen gegevens aan bijvoorbeeld een klimaatcomputer worden doorgegeven.

Een andere belangrijke mogelijkheid is het implementeren van zogenaamde 'virtuele sensoren' [2] (*Ruimtelijk Temperatuur meten met ClimaView<sup>TM</sup> in de Glastuinbouw*). Hiermee wordt bedoeld het gericht bepalen van een temperatuurwaarde voor een specifiek gebied, groot of klein, om te dienen als invoer voor de klimaatregeling. Deze mogelijkheid kan leiden tot een daadwerkelijk optimaler energieverbruik door dit geometrisch meetgebied dynamisch te kiezen binnen de kas zonder daarvoor fysiek sensoren te verplaatsen. Met de akoestische metingen kan continu de

gemiddelde, de hoogste, de laagste temperatuur en de locatie ervan worden bepaald. Een overtuigend argument hiervoor kan worden gevonden door het op de PC afspelen van de film met temperatuurinformatie gedurende een en twee dagen in afgelopen augustus (bij dit rapport meegeleverde CD). Zie eveneens de beschrijving ervan in bijlage F.



**Figuur 1.** ClimaView™ en HumiTemp®

Tabel 1 geeft een overzicht van de systemen en welke functie(s) zij vervullen.

Naam	Functie(s)	Kenmerken
HumiTemp® akoestisch T+RH	Meet T, RH en luchtdruk. Vervanging van huidige meetboxen, ondersteuning ClimaView™	Maakt gebruik van een nieuw ontwikkelde akoestische temperatuursensor
HumiTemp® akoestisch RH	Meet T, RH en luchtdruk. Vervanging van huidige meetboxen, ondersteuning ClimaView™	Als temperatuur opnemer wordt een conventionele elektronische sensor gebruikt
ClimaView™	Ruimtelijk (2D) meten van temperatuur	Er wordt gebruik gemaakt van hoorbaar laagfrequent (400Hz tot 4kHz) geluid, mogelijkheid van 'virtuele sensoren'
EnoTemp <sup>1</sup>	Meten van luchtsnelheid, T en druk. Berekent de energiestroom en debieten.	Draagbaar, real-time, akoestisch meten van zeer lage luchtsnelheden

1) wordt hier niet besproken maar is gebruikt bij verificatiemetingen (zie hoofdstuk 3.3)

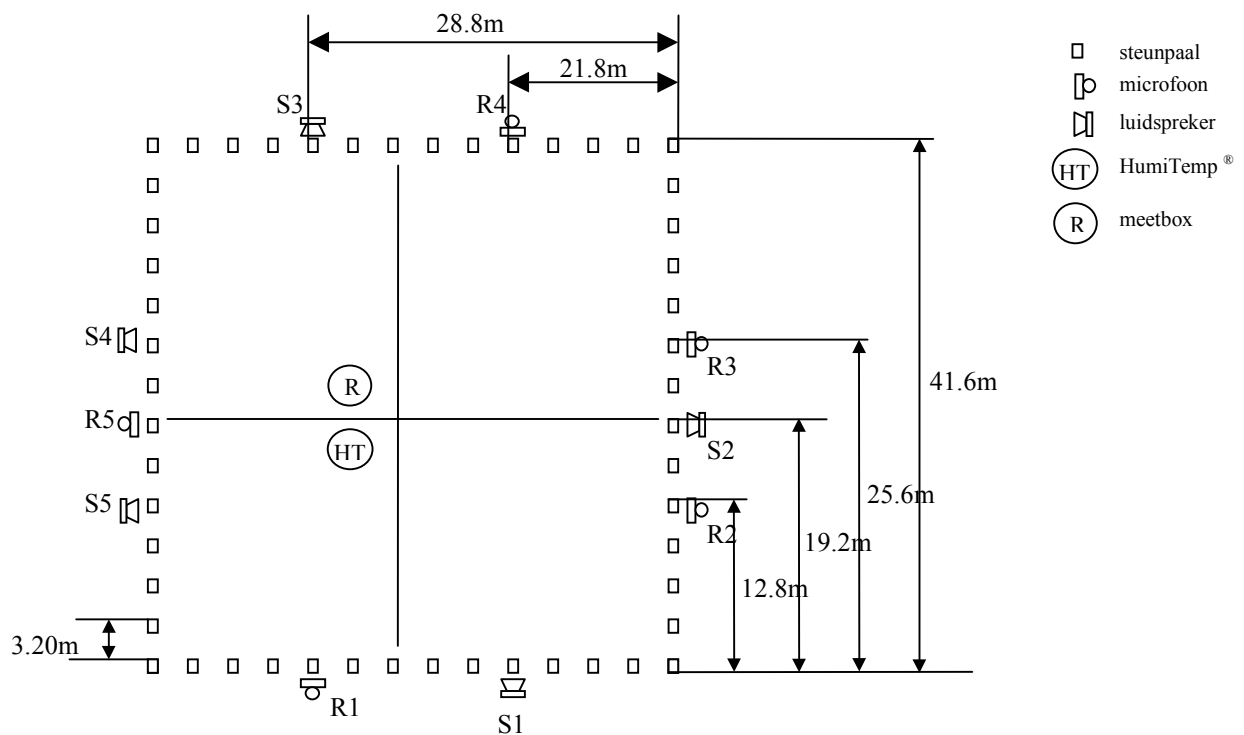
**Tabel 1.** Overzicht van meetsystemen

## 2.2 Meetopstelling voor het ruimtelijk meten

De meetopstelling voor het ruimtelijk meten is opgebouwd uit een vijftal akoestische actuatoren (luidsprekers) en evenveel sensoren (microfoons). Deze zijn gelegen aan de periferie van een areaal van 42m bij 42m.

Het meetgebied is schematisch weergegeven in figuur 2. Naast de hoofdmaten zijn ook weergegeven: de akoestische actuatoren en sensoren, steunpalen van het kasdek, de plaats van de meetbox gebruikt als referentie [R] en de HumiTemp® [HT]. De actuatoren en sensoren hangen op een hoogte van  $\pm 2.5$  meter. De meetbox en HumiTemp® hangen op een hoogte van  $\pm 1.5$  meter tussen het gewas.

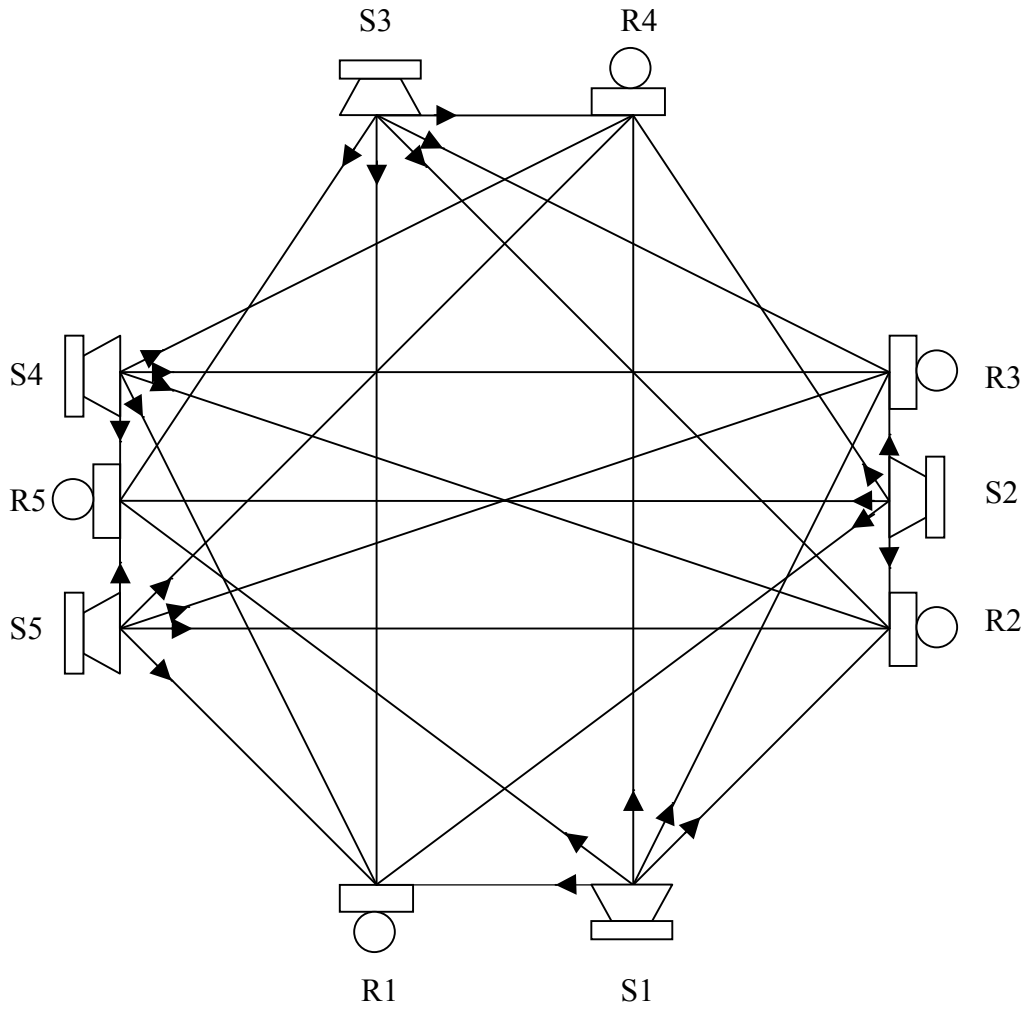
De meetbox werkt volgens het ‘natte bol-droge bol’ principe.



**Figuur 2.** Dimensies en meetopstelling lay-out

Voordat de meetopstelling in de kas is geplaatst zijn eerst haalbaarheidsmetingen uitgevoerd in en buiten het kantoor van Innovation Handling. Het kantoor bevindt zich in een plantsoenrijke omgeving, maar deze is qua plantdichtheid niet te vergelijken met de intensieve gewasdichtheid in de kas. Wel was omgevingslawaai aanwezig door een nabijgelegen drukke verkeersweg.

In figuur 3 (p. 12) is een schematisch overzicht gegeven van de meetlijnen. Uit de tekening is op te maken dat er in totaal 25 meetlijnen zijn met lengten variërend tussen de 7 en 51 meter. De pijlen geven de meetrichting aan. De meetlijnen zijn genummerd zoals in tabel 2 (p. 12) vermeld. De lengtes zijn in de tabel tussen haakjes aangegeven.



**Figuur 3.** Meetlijnenbedekking tussen luidsprekers(S) en microfoons(R)

	R1	R2	R3	R4	R5
S1	23 (7m)	24 (25m)	21 (34m)	22 (42m)	25 (35m)
S2	9 (39m)	6 (6.5m)	7 (6.5m)	8 (29m)	10 (50m)
S3	13 (42m)	14 (35m)	11 (32m)	12 (7m)	15 (35m)
S4	16 (34m)	17 (51m)	18 (50m)	19 (35m)	20 (7m)
S5	1 (25m)	2 (50m)	3 (51m)	4 (34m)	5 (7m)

**Tabel 2.** Meetlijnummering en lengte

### *2.2.1 De functie van het HumiTemp<sup>®</sup> meetsysteem bij het ruimtelijk meten*

Binnen de meetopstelling heeft het HumiTemp<sup>®</sup> meetsysteem twee functies. Enerzijds het aanleveren aan de tuinder van informatie over de locale temperatuur, vochtigheid en druk als onderhoudsarme akoestische meetbox, anderzijds functioneert de HumiTemp<sup>®</sup> als vochtreferentie voor het akoestisch meten van het temperatuurveld in de kas.

De HumiTemp<sup>®</sup> is via een netwerk verbonden met het ruimtelijk meetsysteem (zie figuur 1). De gegevens worden via het netwerk naar de PC gestuurd.

### **2.3 Kalibratie van de systemen HumiTemp<sup>®</sup> en ClimaView<sup>™</sup>**

De HumiTemp<sup>®</sup> systemen zijn gekalibreerd met behulp van een klimaatkast en referentiesensoren voor temperatuur en vochtigheid op dezelfde manier als een klassieke meetbox.

De kalibratie van een ClimaView<sup>™</sup> meetopstelling kan alleen plaatsvinden ná de installatie in de kas. Voor het kalibreren van de meetlijnen is een puntmeetsysteem gebruikt. Bij het kalibreren wordt softwarematig de lengte van elke meetlijn ingegeven en aangepast om een gemiddelde temperatuur voor de betreffende meetlijn te genereren. De lengte van de meetlijn kan met een laser worden gemeten.

### 3 Waarnemingen en Resultaten

In dit hoofdstuk worden de waarnemingen van het HumiTemp<sup>®</sup> en ClimaView<sup>™</sup> systeem beschreven. Waarnemingen bestaan uit de HumiTemp<sup>®</sup> metingen, de temperatuur van de afzonderlijke ClimaView<sup>™</sup> meetlijnen en het ClimaView<sup>™</sup> 2D-temperatuurveld volgens de tomografische verwerking van de gegevens van de meetlijnen.

De evaluatie van de waarnemingen is bepaald aan de hand van de eerder genoemde meetbox.

#### 3.1 HumiTemp<sup>®</sup> metingen

In bijlage C, figuur C.1 en C.2 is te zien dat beide HumiTemp<sup>®</sup> systemen de temperatuur gelijkwaardig aan de referentie meten. De vochtigheid correleert sterk met de referentie maar vertoont een offset. Deze offset kan worden verklaard met het niet goed bevochtigd zijn van het kousje van de referentiemeetbox. Uit de verzamelde meetgegevens blijkt dat in de periode van 30-9-'02 tot 25-10-'02 het kousje van de referentiemeter droog is geweest. De klimaatregeling maakte gebruik van de gegevens van een andere afdeling. Op verzoek van Innovation Handling heeft de tuinder daarna het kousje bevochtigd.

De ruisband op de vochtigheidsmetingen heeft te maken met de gevoeligheid en de meetsnelheid. Deze ruis kan in een nabewerking of door het aanpassen van de software in de HumiTemp<sup>®</sup> worden weggemiddeld. Ter vergelijking: van de meetwaarden van de standaard klimaatboxen wordt een lopend gemiddelde genomen over een groot aantal metingen. Hierdoor wordt een rustiger beeld verkregen.

In figuur C.3 zijn de luchtdrukmetingen weergegeven van de periode 15-10-'02 t/m 25-10-'02. De metingen zijn vergeleken met gegevens van vliegbasis Volkel afkomstig van de internetpagina [www.weeronline.nl](http://www.weeronline.nl). Hierbij meet de HumiTemp<sup>®</sup> de luchtdruk continu en de referentie slechts één maal per 24 uur. De meetgegevens correleren zeer sterk.

#### 3.2 ClimaView<sup>™</sup> metingen

Het ClimaView<sup>™</sup> meetsysteem is gebaseerd op meetverwerking van een aantal akoestische meetlijnen (zie figuur 3). Het meetgebied wordt bedekt met in totaal 25 meetlijnen. Deze meetlijnen variëren in lengte tussen de 7 en 51 meter (zie tabel 1). Tijdens de eerste praktijkmetingen bleek dat het systeem niet optimaal functioneerde. Een groot aantal van de meetlijnen werkte niet of nauwelijks. De voornaamste reden hiervoor was, na nu blijkt, dat bepaalde componenten onderbemeten waren voor de situatie in de kas. Dit gold voornamelijk voor de versterkers. Daarnaast speelt nog het effect van de lengte van de kabels. Dit heeft een negatief effect op het overdragen van vermogen naar de luidspreker. Verder spelen zaken als akoestische verstoringen (radio e.d.) in de meetomgeving en/of het blokkeren van het akoestisch traject door enerzijds vaste objecten (kasconstructie) en anderzijds door werkzaamheden in de kas ten behoeve van de komkommerproductie, een rol.

Bij verbeteringen zijn de problemen zo goed mogelijk opgelost. Hiertoe zijn zwaardere versterkers geïnstalleerd en is er gebruik gemaakt van een zogenaamde 100V leiding. Hierbij wordt het signaal voor de luidsprekers getransformeerd om het vermogensverlies te beperken; vergelijk dit met het hoogspanningsenergienet. Verder zijn de luidsprekers en microfoons zodanig opgehangen dat de meetlijnen zo min mogelijk last ondervonden van de kasconstructie. Waar mogelijk zijn de luidsprekers

en ontvangers boven een pad gehangen. Deze procedure heeft een positief effect gehad op de metingen. Uiteindelijk is slechts één meetlijn helemaal uitgevallen. Deze meetlijn had wel de 100V aanpassing, maar de meetafstand was dermate groot, en het omgevingsgeluid bij de ontvanger zo luid, dat er met deze configuratie geen metingen mogelijk waren. Er is besloten deze meetlijn binnen dit project niet verder te verbeteren.

In bijlage D, figuur D.1 zijn alle meetlijnen van 9 tot 15 augustus in een aantal grafieken afgebeeld. Alle meetlijnen hebben last van zogenaamde ‘uitschieters’ waarbij de meetwaarde plotseling veel verandert. Dit is beter te zien in figuur D.2. Er kunnen verschillende redenen zijn voor deze uitschieters waaronder tocht of storing van andere apparatuur. Een extra verbetering is aangebracht door een filter toe te passen. In bijlage D, figuur D.3 en D.4 is een filtertechniek gebruikt om bepaalde frequenties te onderdrukken. Dit heeft een positief effect op de verdere verwerking.

Als de korte meetlijnen (5, 6, 7, 20) nader worden bekeken kunnen een aantal interessante eigenschappen worden waargenomen. In bijlage D, figuur D.5.a zijn de meetgegevens van deze meetlijnen over een bepaalde periode afgebeeld. In dezelfde figuur worden ook de referentie- en buitentemperatuur afgebeeld. Figuur D.5.b toont de temperatuur van de verwarmingsbuis. De dag-nacht cyclus is duidelijk te herkennen.

Er vallen echter nóg een paar zaken op. Zo is te zien dat meetlijnen 6 en 7 beduidend hogere temperatuurwaarden aangeven na één uur 's nachts (01:00).

Verder valt in figuur D.5.a op, dat meetlijnen 5 en 20 meer ruis vertonen na zeven uur 's morgens (7:00).

Beide waarnemingen zijn gemakkelijk te verklaren aan de hand van de geografische posities van de meetlijnen. Lijn 6 en 7 meten vlakbij de buitenwand van de kas. Langs deze wand lopen verwarmingsbuizen. Dit verklaart de hogere temperatuur na 01:00 's nachts wanneer de buizen warm worden zoals is te zien in de grafiek.

Meetlijnen 5 en 20 zijn gepositioneerd langs het middenpad. Dit pad scheidt de verschillende sectoren in de kas. Tijdens het oogsten wordt het pad gebruikt voor transport van de komkommers van de kas naar de inpakhal. Dit transport en overige werkzaamheden veroorzaken verstoringen op de metingen en verklaren het toenemen van de ruis op de meetlijnen langs het pad rond 7:00 's morgens. Deze conclusie wordt versterkt door het feit dat meetlijnen 6 en 7 géén last hebben van toenemende ruis, dit omdat ze zich ver van het pad bevinden. Uit bovenstaande toelichting blijkt dat in horizontale richting grote verschillen in temperatuur voorkomen. Met het ClimaView™ systeem zijn deze te detecteren.

### 3.3 ClimaView™ 2D-temperatuurveld

De berekening van een 2D-temperatuurveld is gebaseerd op een wiskundige verwerking van de akoestische looptijden in het meetveld ([3] en [9]). Bij de verdeling van het akoestische meetveld in de kas wordt een bepaalde indeling gekozen waaruit de resolutie volgt. In de volgende bespreking is gekozen voor een indeling van het meetveld in 100 bij 100 delen. Dit houdt in dat het hele temperatuurveld in een matrix van 10.000 punten wordt weergegeven. Deze resolutie kan arbitrair worden gekozen met als enig criterium het aantal meetlijnen; bij een klein aantal meetlijnen is het namelijk zinloos om een zeer hoge resolutie te kiezen. Elk van de 10.000 punten kan dienen als de eerder genoemde ‘virtuele sensor’. Ook is het mogelijk om, in plaats van één punt, gebieden te selecteren waarvan de

gemiddelde waarde als ‘virtuele sensor’ kan dienen. Deze techniek geeft de tuinder meer mogelijkheden om de klimaatregeling te optimaliseren.

Met behulp van tomografische berekeningen wordt het ruimtelijk (2D) temperatuurveld bepaald. Een aantal specifieke momenten zijn omgezet in een ruimtelijk temperatuurveld en opgenomen in het rapport, weergegeven in bijlage E, figuren E.1.a t/m c. Aan de hand van de blauwe en rode kleuren is duidelijk te zien dat er in de kas temperatuurverschillen aanwezig zijn. De legenda geeft de temperatuurwaarde per kleur aan.

De resultaten van het ruimtelijk meetveld zijn op twee manieren vergeleken met de referentie. Als eerste zijn over een periode van 9 tot 14 augustus '02 gemiddelden bepaald van alle meetpunten in de matrix. Daarnaast is over dezelfde periode ook van een oppervlak van 1m bij 1m rond de referentiemeetbox de gemiddelden berekend. Dit laatste komt overeen met het implementeren van een ‘virtuele sensor’ ter plaatse van de meetbox. Beide methoden zijn in een grafiek weergegeven in bijlage E, figuur E.2. Zoals is te zien komen de waarnemingen overeen qua vorm.

Uit beide controles blijkt een constant verschil tussen de waarnemingen en de referentie aanwezig. Dit duidt op een verticale temperatuurgradiënt in de kas. Dit is, ter verificatie, aangetoond met een draagbaar EnoTemp real-time temperatuurmeetsysteem (een door Innovation Handling reeds ontwikkeld meetsysteem). Deze metingen toonden aan dat er flinke verticale temperatuurgradiënten aanwezig zijn. Figuur E.3 geeft over de periode 9 tot 14 augustus '02 de hoogste, gemiddelde en laagste temperatuur weer zoals berekend door het ClimaView™ systeem. Te zien is dat er flinke verschillen op kunnen treden in de verticale temperatuurverdeling. De positie van de warme en koude plekken is niet uit deze figuur te halen, maar is natuurlijk makkelijk te achterhalen met bijvoorbeeld het bijgeleverde filmpje (zie bijlage F).

Figuren E.4.a t/m d in bijlage E laten de mogelijkheid zien om met de ClimaView™ applicatie warmtestromen en isothermen weer te geven.

### **3.4 Ergonomie, Arbo en acceptatie**

Om laagfrequent akoestisch te kunnen meten wordt een meetgeluid, een zogenaamde chirp, uitgezonden door de zender dat door de ontvanger wordt opgevangen. Het meetgeluid was in eerste instantie een vreemde gewaarwording voor de werkers in de kas. Het feit dat gedurende de metingen de radio gewoon aan kon blijven, heeft geholpen bij de acceptatie en gewenning aan het systeem. Tijdens het meetexperiment is zoveel mogelijk meetdata vergaard en is in eerste instantie het aantal metingen per tijdseenheid hoog geweest. Aannemende dat de klimaatveranderingen langzaam plaatsvinden kan de meetsnelheid drastisch omlaag zonder informatieverlies. Het meetgeluid is voor zover bekend niet schadelijk. Na enige tijd valt het door gewenning nog nauwelijks op. Het geluidsniveau en de repetitiesnelheid zijn niet zo hoog dat het storend is.



## 4 Evaluatie van de doelstellingen

De doelstellingen uit hoofdstuk 1.2 worden geëvalueerd aan de hand van de beschikbare meetresultaten van het ruimtelijk meten, de meetresultaten van de HumiTemp<sup>®</sup> en gegevens uit de literatuur.

### 4.1 Mogelijkheden van het akoestisch meten

De resultaten gepresenteerd in dit rapport geven een goed beeld van de mogelijkheden van ruimtelijke temperatuurmeten met behulp van akoestische technieken. Duidelijk is dat er meer inzicht wordt verkregen in de klimatologische omstandigheden in de kas. De tuinder is niet meer afhankelijk van enkele sporadisch geplaatste meetpunten maar kan, op een overzichtelijke manier, de algehele actuele situatie in de kas beschouwen. Daarnaast is het verplaatsen van meetpunten ten behoeve van de klimaatregeling onbeperkt dankzij de implementatie van ‘virtuele sensoren’.

### 4.2 Besparing op energieverbruik

Uit een onderzoek [7], blijkt dat ‘elke graad die niet verstoekt hoeft te worden’, een bezuiniging van 10% oplevert. Aangezien er grote verschillen in de temperatuurverdeling in de kas optreden, is het logisch dat door de juiste keuze van de positie van de ‘virtuele sensor’, of gebruik makend van de gemiddelde temperatuur in de kas, een fikse bezuiniging mogelijk is.

### 4.3 Toepassen van kleinere verwarmingslussen

Gezien de omstandigheden in de kas, waarbij verschillen van wel 10 °C optreden afhankelijk van de locatie in de kas, lijkt het beter kleinere lussen aan te leggen zodat kan worden gereageerd op lokale situaties in de kas. Verder onderzoek naar het gedrag in de zomer en winter en de dynamica van het kasklimaat is nodig voordat redelijke conclusies kunnen worden getrokken.

### 4.4 Terugverdientijd en prijsindicaties

Binnen het project zijn twee meetsystemen gerealiseerd nl., de HumiTemp<sup>®</sup> en ClimaView<sup>™</sup>. Door adviesbureau DLV is een rapportage geschreven [7], ondersteund door het ‘Innovatiesteunpunt Wageningen’. Hierin komt naar voren dat voor dit systeem bij een reële prijsstelling de voordelen zodanig zijn dat korte terugverdientijden zijn te realiseren.

De terugverdientijd voor het ClimaView<sup>™</sup> meetsysteem moet nog beter worden onderzocht. Gezien het energiebesparingspotentieel liggen hier zeer duidelijke kansen. De te verwachten levensduur gekoppeld aan het aanvullend energiebesparingspotentieel door het inzetten van ‘virtuele sensoren’ en de mogelijke besparing, doordat in een vervolgfase de luchtcirculatie in de kas kan worden gemeten zonder aanvullende hardware voorzieningen, versterken de waarde van het meetsysteem.

HumiTemp <sup>®</sup> enkel akoestisch	1500 - 2000 €, afhankelijk van uitvoering
HumiTemp <sup>®</sup> dubbel akoestisch	2000 - 3500 €, afhankelijk van uitvoering
ClimaView <sup>™</sup>	15000 € per ha

Tabel 3: *Geschatte eindgebruikersprijs glastuinbouw.*

#### 4.5 Lokaal bijverwarmen middels het flexibel bijstoken met gas

Het lokaal bijverwarmen d.m.v. het stoken van gas kan nuttig zijn, daar waar geen kleine verwarmingslussen aanwezig zijn. Met het oog op nieuwe ontwikkelingen in de kasbouw, kan dit een goede tijdelijke oplossing zijn totdat kleinere verwarmingslussen tot de mogelijkheden behoren. De mogelijke realisatie van dit concept is niet diepgaand onderzocht.

#### 4.6 Kennisoverdracht

In het kader van kennisoverdracht zijn de volgende acties ondernomen:

- *Artikelen*
  - Telegraaf Rubriek *Overmorgen* 'Temperatuur meten met geluid', 2 maart 2002
  - Practical Hydroponics and Greenhouses, January/February 2002 'Hortifair Amsterdam'
  - Reformatorisch Dagblad, 'Thermometer waar muziek in zit', 15 januari 2002
  - Revue Horticole, Janvier 2002 no 432 p4
  - Oogstplus Tuinbouw 11 mei 2001, 'Streven naar perfect klimaat'
  - De Ingenieur 4 april 2001 'Temperatuur meten met Radio 3'
  - Culture Légumière no. 66, Novembre- Décembre 2001,
  - Vindingrijk 'De klank van warmte' november 2001
- *Presentaties*  
WTC Rotterdam, presentatie in het kader van IDNL, december 2001
- *Contacten klimaatcomputerleveranciers*  
Zowel in het binnenland als het buitenland zijn diverse besprekingen geweest met geïnteresseerde klimaatcomputerleveranciers en handelsbedrijven. Enkele klimaatcomputerleveranciers en handelsbedrijven willen de HumiTemp<sup>®</sup> in hun leveringsprogramma opnemen.  
Voor het ClimaView<sup>™</sup> meetsysteem is van verscheidene kanten (ook buiten de glastuinbouw) gerichte belangstelling. Specifiek de toekomstige mogelijkheid van het meten en visualiseren van de ruimtelijke luchtcirculatie wordt met grote interesse tegemoetgezien, o.a. door TNO-Bouw en Twaron, de oude vezeldivisie van AKZO.
- Deelname aan de *Horti Fair 2001*. Het HumiTemp<sup>®</sup> meetsysteem is gedemonstreerd op de stand van het 'Innovatiesteunpunt Wageningen'

## 5 Conclusies

De conclusies zijn voor de duidelijkheid onderverdeeld in twee delen namelijk als eerste die voor het HumiTemp<sup>®</sup> systeem en als tweede die van ClimaView<sup>™</sup>, het ruimtelijk meetsysteem.

### 5.1 Conclusies voor HumiTemp<sup>®</sup>

- Functioneert in de basisfunctionaliteit als een klassieke klimaatmeetbox. De functionaliteit van dit digitale meetinstrument kan evenwel eenvoudig worden uitgebreid met andere sensoren zoals CO<sub>2</sub>.
- Meet vergeleken met de meetbox accuraat de temperatuur, zowel elektronisch als akoestisch. De speciaal ontwikkelde akoestische temperatuursensor heeft echter een hogere terugverdiëntijd tot gevolg. Daarnaast beperkt de tijdconstante van deze sensor het applicatiegebied tot dynamisch trage processen.
- Is onderhoudsvrij; dit is een zeer groot voordeel ten opzichte van de huidige meetboxen; de referentiemeter is onderhoudsgevoelig en is regelmatig buiten werking vanwege het uitdrogen van het kousje.
- Is productierijp en in het voorjaar 2003 leverbaar.
- De vochtmeting wijkt enigszins af van de referentie. Het is onduidelijk of dit ligt aan de referentiemeter of aan de HumiTemp<sup>®</sup>. De kalibratieresultaten van de HumiTemp<sup>®</sup> systemen in de klimaatkast gaven geen afwijkingen ten opzichte van de referenties.
- De luchtdruk wordt accuraat gemeten.

### 5.2 Conclusies voor ClimaView<sup>™</sup>

- Het laagfrequent meetprincipe, toegepast in ClimaView<sup>™</sup>, blijkt zeker bruikbaar voor het ruimtelijk temperatuurmeten van grote arealen.
- Voor bepaalde meetlijnen die meer door het gewas lopen is een sterker akoestisch signaal benodigd dan met de huidige versterkers kon worden gerealiseerd. Aanpassen van de installatie op dit punt zal de meetbetrouwbaarheid verhogen.
- Met behulp van een filter kunnen onjuiste metingen worden geëlimineerd.
- Uit een tweetal eenvoudige controles blijkt dat de gemiddelde ruimtelijke temperatuur duidelijk correleert met de referentiesensor. De referentiesensor geeft echter slechts informatie over één punt in het meetareaal.
- De offset tussen de referentie en het ruimtelijk meten is te verklaren doordat er in de kas dagelijkse en tijdsafhankelijke verticale temperatuurgradiënten aanwezig zijn. De klimaatregeling op basis van de huidige positioneringsmethode van de meetbox in het gewas is dan ook zeker voor verbetering vatbaar.
- Zowel de meetlijnen op zich, alsook het berekende temperatuurveld, geven veel meer inzicht in wat er zich afspeelt in de kas dan een puntmeting alleen. Anomalieën in het temperatuurveld binnen de kas zijn goed te herkennen. De tuinder kan zich een veel beter beeld vormen van de dynamica van het klimaat in zijn kas.
- Het huidige meetgeluid is voor zover bekend fysiologisch niet schadelijk en valt na enige tijd nauwelijks nog op door gewenning. Het geluidsniveau is niet zo hoog dat het storend is.

---

## 6 Aanbevelingen

- De ruimtelijke meettechniek heeft duidelijk bewezen dat het als meetmethode bruikbaar is in de glastuinbouw. Vervolgonderzoek is nodig om een uitgekiend product met een goed gewogen prijs-prestatieverhouding in de markt te kunnen zetten.
- Om het besparingspotentieel te kunnen kwantificeren zal een theoretische grondslag moeten worden gelegd ondersteund met een breder opgezet praktijkonderzoek.
- De meetsystemen ClimaView™ en HumiTemp® zullen daadwerkelijk aan een klimaatcomputer moeten worden gekoppeld. Een aangepaste regeling zal nodig zijn om het effect van energiebesparing en kwaliteitverbetering te kunnen realiseren.
- Door koude en warme plaatsen en de horizontale luchtstromen met de bijbehorende energiestroom, in de regelstrategie van de klimaatcomputer mee te nemen, kan een ander regelgedrag worden gerealiseerd dan met de bestaande meetboxen, die alleen als punttemperatuurmeting functioneren.
- Het sterk golvende temperatuurbeeld in de kas vraagt nadere modelvorming om het energiebesparingspotentieel in combinatie met temperatuurintegratie voldoende te kunnen onderbouwen.
- Akoestische ruimtelijke luchtcirculatiemetingen zijn een logische vervolgonontwikkeling van de 2-dimensionale temperatuurmetingen.

## Litteratuur

- [1] Schaik, W.H.J. van, M.C. Reijnen, M.L.H. Schevers, *Temperatuur en luchtvochtigheid meten in kassen*, Eindhoven, 1999  
Novem projectcode: 335122/6205
- [2] Innovation Handling, *Ruimtelijk Temperatuur meten met ClimaView™ in de Glastuinbouw*, versie 3.1, Eindhoven, 2002
- [3] Mao, X., *Temperature Distribution Reconstruction with Acoustic Measurements*, Stan Ackermans Instituut Eindhoven, 2002
- [4] Innovation Handling, *HumiTemp®*, *The new method for measuring the Humidity of air and the Temperature*, versie 2.0, Eindhoven, 2002
- [5] Innovation Handling, *Akoestische Klimate systemen, Luchtsnelheid, Temperatuur, Luchtvochtigheid en Energie*, versie 1.1, Eindhoven, 2002
- [6] PBG, *Handleiding voor het opsporen en oplossen van horizontale klimaatverschillen*, Rapport 112, Naaldwijk, 2000
- [7] DLV, *Analyse van relevante invloedsfactoren en bedrijfseconomische gevolgen van de toepassing van akoestische meettechniek*, 2001
- [8] Stuurgroep Glastuinbouw en Milieu (Glami), *Convenant Glastuinbouw en Milieu 1995 – 2010*, 1997
- [9] Suurmond, R.T., *Tomographic reconstruction of temperature distributions from acoustic measurements*, ISBN 90-5282-873, Eindhoven, 1998
- [10] Bogliardi, R., *Tomographic reconstruction of velocity fields from acoustic measurements*, Eindhoven, 2000
- [11] Innovation Handling, *EnoTemp Multi-line. Industriële akoestische meetsystemen voor Luchtsnelheid Temperatuur en Energie*, versie 1.0, Eindhoven, 2003

## Lijst van bijlagen

- A Luchtvochtigheidsmeetsystemen voor de agrarische sector, een beknopte vergelijking
  
- B Gebruikte apparatuur en meetapparatuur
  
- C
  - Figuur C.1. HumiTemp<sup>®</sup> metingen;  
Temperatuur elektronisch gemeten, 5 t/m 6 november '02
  - Figuur C.2. HumiTemp<sup>®</sup> metingen;  
Temperatuur akoestisch gemeten, 8 t/m 11 november '02
  - Figuur C.3. HumiTemp<sup>®</sup> metingen;  
Luchtdruk, 15 t/m 25 oktober '02
  
- D
  - Figuur D.1. Alle meetlijnen (links boven 1, rechts onder 25)
  - Figuur D.2. Meetlijn 7
  - Figuur D.3. Gefilterde meetlijnen (links boven 1, rechts onder 25)
  - Figuur D.4. Meetlijn 7 gefilterd
  - Figuur D.5. Korte meetlijnen (5,6,7,20), van 17 op 18 oktober '02;
    - a). korte meetlijnen, referentie- en buitentemperatuur
    - b). buistemperatuur
  
- E
  - Figuur E.1. 2D-resultaat d.d. 10-aug-'02;
    - a). 's morgens; b). 's middags; c). middernacht
  - Figuur E.2. Ruimtelijk gemiddelde (zwart), 'virtuele sensor' (rood) en referentie (blauw), 9 t/m 14 augustus '02
  - Figuur E.3. Hoogste (rood), gemiddelde (zwart) en laagste (blauw) temperatuur volgens ClimaView<sup>™</sup>, 9 t/m 14 augustus '02
  - Figuur E.4. Visualisatie mogelijkheden;
    - a). & c). energiestroomlijnen; b). & d). isothermen
  
- F Toelichting CD-rom beeldverslag

**Luchtvochtigheidsmeetsystemen voor de agrarische sector,  
een beknopte vergelijking**

September 2002

Voor de tuinder is het uitermate belangrijk dat de ontwikkeling van zijn gewas optimaal verloopt. Hij heeft hiervoor zelf natuurlijk een goed inzicht in ontwikkeld. Hiernaast heeft hij behoefte aan ondersteuning door betrouwbare technische hulpmiddelen als sensoren en klimaatcomputers met regel- en stuurmechanismen. Door een voortschrijdende technologische ontwikkeling krijgen nieuwe meetmethoden, zoals meten met geluid, een kans om hun meerwaarde te bewijzen. Beschreven wordt de nieuwe methode van het op een akoestische manier meten van de luchtvochtigheid. Bij het akoestisch meten van de luchtvochtigheid wordt definitief afscheid genomen van de onderhoudsgevoelige conventionele analoge meetprincipes. De akoestische methode wordt vergeleken met de historisch gezien belangrijke conventionele meting van de standaard psychrometer, de natte en droge bol en de capacitieve metingen. Hiernaast zijn natuurlijk meer methoden voor het meten van de luchtvochtigheid beschikbaar, maar deze zijn prijstechnisch, qua bedieningsgemak, qua kwetsbaarheid of uit oogpunt van onderhoud niet interessant in een agrarische productieomgeving.

Hierna zal worden aangegeven waarom akoestisch meten nu pas ten tonele verschijnt en wat de voordelen ervan zijn. Achtereenvolgens worden de meetprincipes voor het meten van de luchtvochtigheid, die van belang zijn binnen de agrarische sector, (capacitief, psychrometrisch en akoestisch) beknopt besproken. De tuinder weet dat het meten van de luchtvochtigheid niet alleen van groot belang is voor de ondersteuning van zijn inzicht in de groei en ontwikkeling van het gewas maar ook een hulpmiddel is voor het realiseren van energiebesparing en mogelijke meeropbrengsten.

*Capacitieve vochtsensoren*

Capacitieve meetinstrumenten meten direct de relatieve vochtigheid. De capacitieve opnemer, die verschillende uitvoeringen kent, is gevoelig voor *vervuiling*, *veroudering* en *chemische aantasting*. Vervuiling van de sensor zowel door stof als door chemische stoffen kan zowel op macroscopisch als op microscopisch niveau optreden. Vocht hecht zich aan het stof dat op de sensor komt. Het veroorzaakt een microklimaat in de directe omgeving van de sensor, dat afwijkt van de meetomgeving. Ook filters om deze sensoren gaan op termijn dit effect niet tegen. Vroeg of laat treden afwijkingen op.

De capacitieve sensor meet de luchtvochtigheid via vochtuitwisseling met de omgevingslucht. Vocht diffundeert in en uit het sensormedium. Door vochtigheidsveranderingen verandert de elektrische capaciteit. De luchtvochtigheid wordt dus indirect gemeten. Chemische stoffen diffunderen er wel in maar gaan er nooit meer uit en geven dus afwijkingen.

Alle kunststof sensoren verouderen en worden aangetast door thermische effecten, zoals door deformatie, adsorptie en absorptie van chemische stoffen als gewasbeschermingsmiddelen.

Keramische sensoren gaan afwijken door chemische stoffen en vochtadsorptie aan microscopisch stof. Door deze effecten verandert de diëlektrische constante van de sensor. De capacitieve sensor gaat hierdoor in de tijd afwijken van de oorspronkelijke waarde.

Vochtmetingen met capacitieve sensoren zijn in feite puntmetingen binnen de afmetingen van de vierkante centimeter van het sensoroppervlak. De metingen hebben slechts betekenis binnen een beperkt gebied rond het sensoroppervlak.

Capacitieve sensoren zijn gevoelig voor condensatie. Condensatie treedt op bij hoge vochtigheden en dalende temperatuur. Denk hierbij aan dauw. Bij condensatie slaat vocht neer op de plant en het sensoroppervlak. De meetwaarde die de sensor weergeeft gedurende de tijd dat de sensor is 'natgeslagen', is niet representatief voor de vochtigheid van de omringende lucht. Eerst moet het vocht van het sensoroppervlak zijn verdampt voordat weer een natuurlijk evenwicht wordt bereikt tussen de vochtigheid in het sensoroppervlak en de direct aangrenzende lucht.

Condensatiegevaar betekent dat bij hoge luchtvochtigheid met capacitieve metingen problemen ontstaan en snelle veranderingen niet betrouwbaar kunnen worden gemeten. Capacitieve sensoren hebben slechts toekomst in absoluut schone omgevingen en zijn in een agrarische omgeving moeilijk toepasbaar of zeer onderhoudsgevoelig.

### *Psychrometer*

Met een psychrometer wordt een temperatuurverschil gemeten tussen de natte en droge bol. Het bekende Mollierdigram geeft een grafische weergave van het werkingsgebied van het meetinstrument. De nauwkeurigheid van het instrument hangt af van een aantal constructieve en onderhoudsfactoren. Er zijn een aantal eisen waaraan moet zijn voldaan zoals, de luchtsnelheid van de ventilator moet voldoende hoog zijn om een goede verdamping aan de natte bol te waarborgen. De psychrometer meet indirect de luchtvochtigheid via de verdamping van water.

De temperatuur van de natte bol wordt door verdamping lager dan de droge bol die de luchttemperatuur weergeeft. Het temperatuurverschil tussen beide thermometers levert met de luchttemperatuur, een waarde voor de relatieve vochtigheid.

Een aantal problemen kan optreden waardoor de nauwkeurigheid van de meting afneemt. Bekend zijn effecten van vervuiling van het water door algen of chemicaliën of door het droog komen te staan van de natte bol. In het laatste geval krijgen beide thermometers dezelfde temperatuur en het lijkt het alsof er geen water meer kan verdampen. Voor de klimaatcomputer betekent deze conditie dat er een vochtigheid zou heersen van 100% en in de kas condensatie zou gaan optreden. Er wordt dan gestookt met de ramen open!

Bij het droog komen staan van de natte bol zal reeds in een eerder stadium de schijnbare vochtigheid sterk gaan afwijken van de werkelijke waarde. Dat dit schadelijk is, is evident.

Een tweede belangrijk nadelig effect van deze meetmethode is dat bij hoge vochtigheden de temperaturen van de natte en de droge bol dan slechts minimaal verschillen. Regelmatige kalibratie van de temperatuursensoren is voor betrouwbaar meten in dit kritische gebied dan ook een vereiste. Door afwijkingen in de kalibratie tussen beide temperatuursensoren en het kleine temperatuurverschil neemt de betrouwbaarheid van de psychrometer sterk af bij hoge luchtvochtigheid. Het is de



belangrijkste reden waarom de tuinders bij hoge vochtigheden geen risico nemen en door regelacties de luchtvochtigheid omlaag brengen. Echter juist bij hoge luchtvochtigheid kan er zonder schade aan het gewas te berokkenen een enorme besparing op energie worden bereikt.

Psychrometers zijn betrouwbare meetinstrumenten als er voldoende en regelmatig onderhoud aan wordt gepleegd. Hierdoor is het bedrijfseconomisch op de lange termijn echter een extreem kostbaar instrument met een relatief lage nauwkeurigheid bij hoge luchtvochtigheid waar juist een hoge nauwkeurigheid is gewenst.

Psychrometers zijn meetinstrumenten die in de intensieve tuinbouw technisch en bedrijfseconomisch achterhaald zijn.

#### *Akoestische luchtvochtigheidsmeting*

HumiTemp<sup>®</sup> is het enige luchtvochtigheidsmeetsysteem dat nu op de markt is en wat onderhoudsvrij is. Het meet de luchtvochtigheid met geluid. Reeds omstreeks 1875 wist men dat 's winters bij lage temperatuur, de tijd tussen de inslag van de bliksem op de kerktoren en het geluid van de donder er langer over deed dan 's zomers bij een hogere temperatuur. De geluidssnelheid is bij lagere temperatuur minder, maar hangt ook af van de luchtvochtigheid. Bij een hogere vochtigheid is de geluidssnelheid groter. Geluid door lucht heeft geen enkele last van condensatie, mist, stof, chemische aantasting of vervuiling. De misthoorn in de scheepvaart is hiervan een duidelijk voorbeeld. Geluid of een geluidspatroon kan, wanneer men wil, iedere keer identiek worden gemaakt of gereproduceerd. Het afspelen van een CD, de herkenbaarheid van een stem en ook het tijdsein op de radio zijn bekende voorbeelden.

Geluidsvoortplanting kent geen onderhoud. Met geluid wordt de luchtvochtigheid direct gemeten als eigenschap van de lucht. De enige hulpstof die nodig is, is de vochtige lucht die moet worden gemeten. De geluidssnelheid wordt gemeten over een traject van 'luidspreker' naar 'microfoon' en niet op een vierkante centimeter. Met geluid wordt de vochtigheid in de omgeving van een geluidstraject bepaald. Door actieve ventilatie van het meettraject wordt gewaarborgd dat op representatieve wijze de luchtvochtigheid van de omgeving wordt gemeten. De meting heeft dus meer dan alleen de lokale geldigheid van een punt. Geluidmetingen geven zodoende een betrouwbaarder beeld doordat informatie over een groter gebied wordt gebruikt.

Bij akoestische metingen neemt het snelheidsverschil tussen droge en vochtige lucht toe bij toenemend vochtgehalte. Het effect van toenemend vochtgehalte is hierdoor steeds beter en nauwkeuriger te meten. Tevens vindt compensatie voor luchtdrukveranderingen plaats wat alleen bij zeer kostbare systemen is ingebouwd. Bij de vochtmetingen via de natte en droge bol neemt de nauwkeurigheid in het belangrijkste gebied bij hogere vochtigheid juist af doordat het temperatuurverschil tussen de natte en droge bol afneemt. Met geluid kan daarentegen zeer betrouwbaar tot een relatieve vochtigheid van 100% worden gemeten. Condensatie of zelfs regen of stof vormen geen belemmering voor geluid. Vooral bij hoge vochtigheden is het akoestische meetinstrument voor de tuinder de ultieme betrouwbare partner. Een meting met geluid is qua meetsnelheid natuurlijk onovertroffen.

Nu is er voldoende snelle elektronica beschikbaar om deze metingen op betrouwbare wijze en met beter dan bestaande nauwkeurigheid te realiseren.

Voor het op de markt brengen van een meetinstrument voor de professionele sector geldt slechts één devies: de aanschafprijs moet op basis van de terugverdientijd

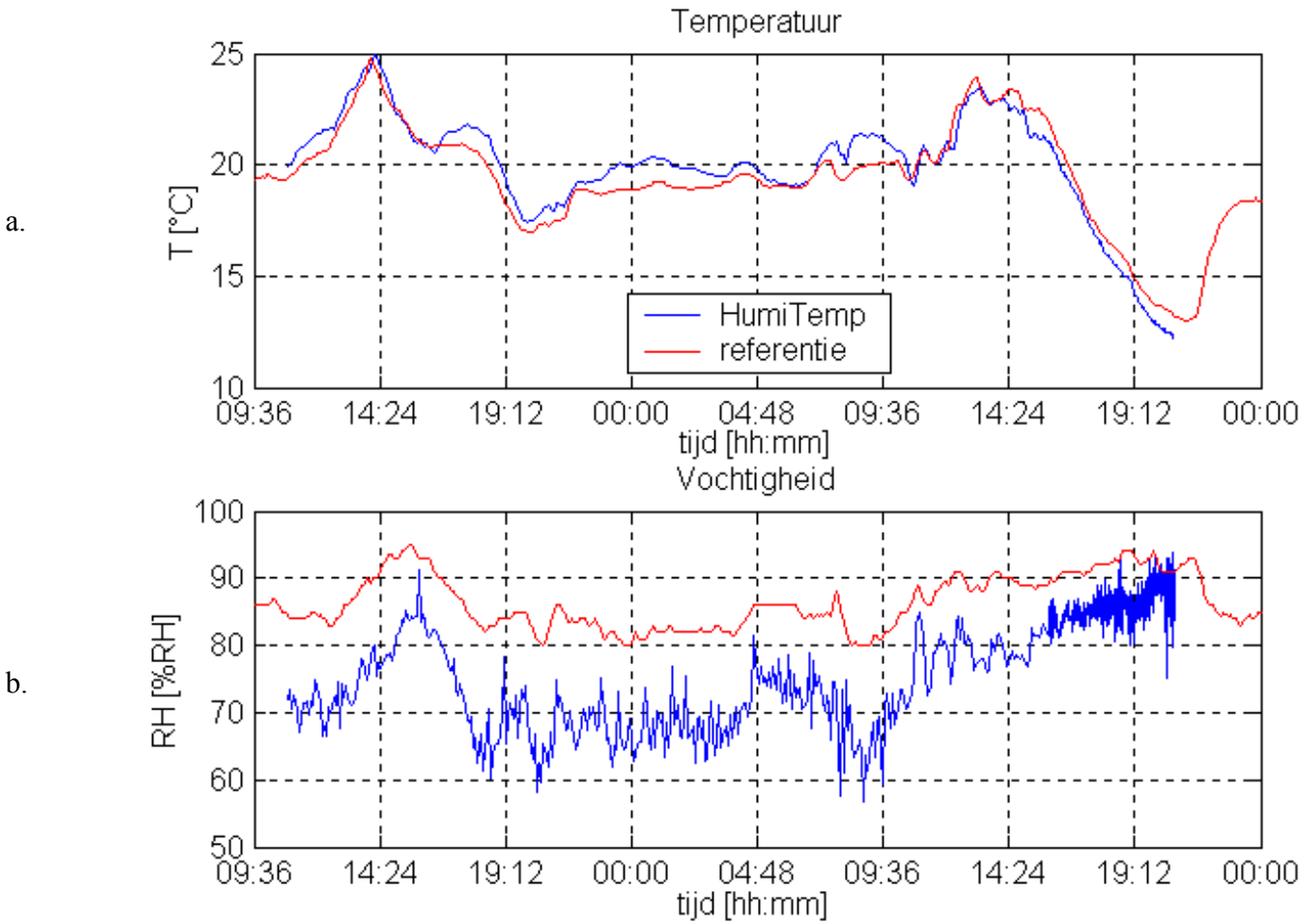
bedrijfseconomisch verantwoord zijn. De tijd hiervoor is nu duidelijk aangebroken. Verouderde concepten belemmeren momenteel de vooruitgang, de energiebesparing en de concurrentiepositie van de bedrijven. Akoestisch digitale sensoren zijn duurder, maar bedrijfseconomisch interessant door hun zeer acceptabele terugverdientijd. Ze leveren voordelen op zowel in productkwaliteit als in energiebesparing. De meerwaarde bestaat uit een betrouwbaarder, onderhoudsvrij en nauwkeuriger functioneren. Hiernaast hebben de systemen door een moderne digitale uitvoering een meer uitgebreide functionaliteit. Ze zijn geschikt voor macro- en microklimaatmetingen. Naast de meetwaarde kunnen ze, indien gewenst, statusinformatie versturen en of zelf via het netwerk alarm genereren. Conventionele analoge sensoren kunnen dit niet. De standaarduitvoering kan ook op de analoge interface van een klimaatcomputer worden aangesloten. Akoestische luchtvochtigheidsmeetsystemen worden in aangepaste uitvoeringsvormen en voor verschillende nauwkeurigheden geleverd.

*Digitaal meten met geluid heeft ook in de glastuinbouw toekomst*

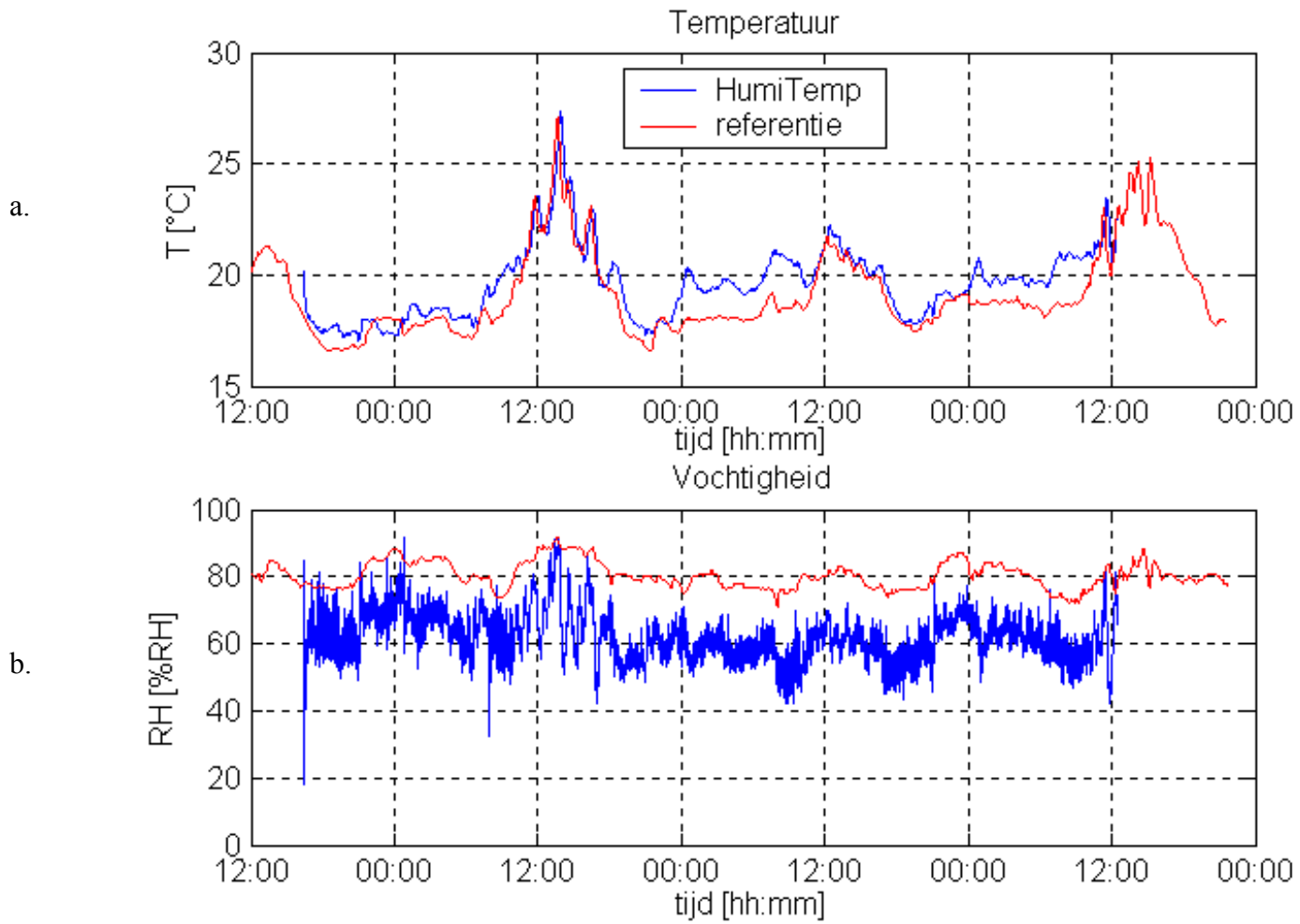
Economisch, op basis van terugverdientijd en in gebruikersgemak, presteren akoestische luchtvochtigheidsensoren beter en betrouwbaarder. De tuinder heeft geen zorg meer over een essentieel deel van zijn technische installatie. Verder is de meeropbrengst en de energiebesparing van nauwkeuriger meten duidelijk kwantificeerbaar.

*Bijlage B      Gebruikte apparatuur en meetapparatuur*

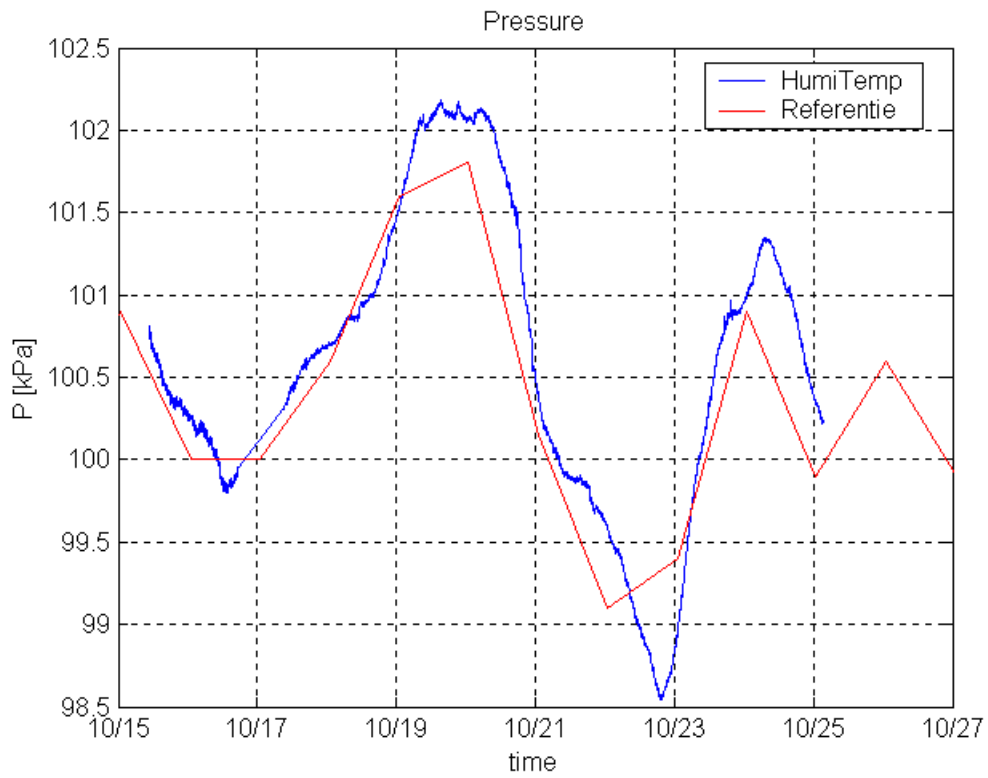
- HumiTemp<sup>®</sup> akoestische luchtvochtigheidsmeting met standaard temperatuursensor
- HumiTemp<sup>®</sup> akoestisch, zowel met een akoestische luchtvochtigheidsmeting als akoestische temperatuurmeting
- PC met Windows NT en ClimaView<sup>™</sup> applicatie geïnstalleerd
- Digitale signaalverwerkingseenheid
- 5x speakers type: SPH-135/AD (Monacor)
- 5x 20W audio versterkers
- 5x adaptieve microfoons+versterkers, ontwikkeld door Innovation Handling
- ClimaView<sup>™</sup> is de combinatie van de hierboven genoemde meetapparatuur en de bijbehorende temperatuurvisualisatie software
- Referentiemeetbox met temperatuur en luchtvochtigheidsensor, aanwezig op proeflocatie (type: droge/natte bol). De nauwkeurigheid van deze sensor is volgens de leverancier  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ . Dit betekent in het meest ideale geval voor de vochtigheid een nauwkeurigheid van  $\pm 2\% \text{RH}$ , exclusief de fout veroorzaakt door luchtdrukveranderingen. Deze meetbox beschikt niet over luchtdrukcompensatie.
- EnoTemp draagbaar real-time luchtsnelheid, temperatuur en luchtdrukmeter.



Figuur C.1. HumiTemp® metingen  
Temperatuur elektronisch gemeten, 5 t/m 6 november '02

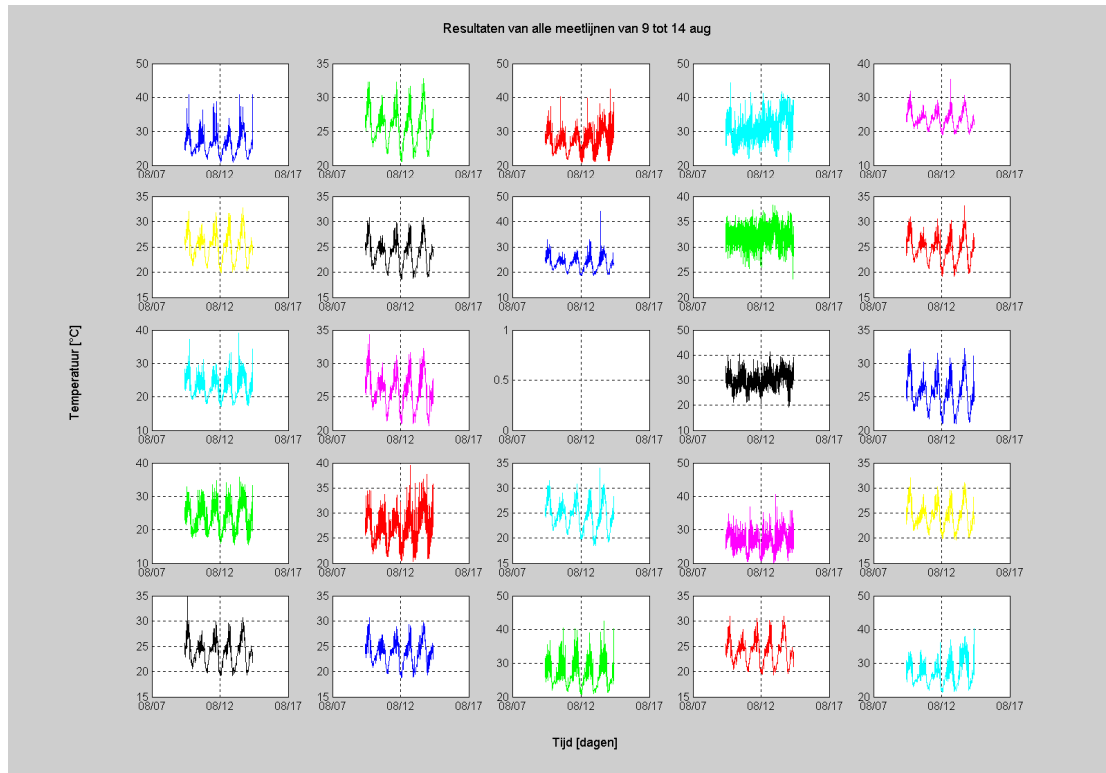


*Figuur C.2. HumiTemp® metingen  
Temperatuur akoestisch gemeten, 8 t/m 11 november '02*

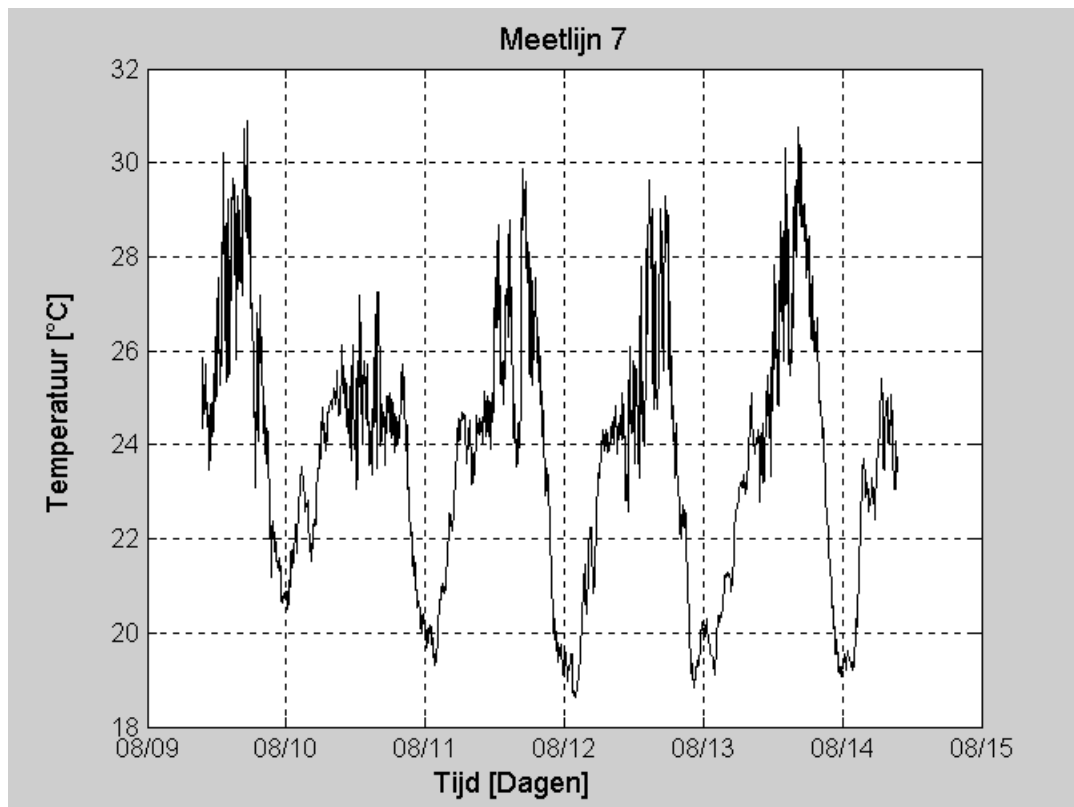


*Figuur C.3. HumiTemp<sup>®</sup> metingen  
Luchtdruk, 15 t/m 25 oktober '02*

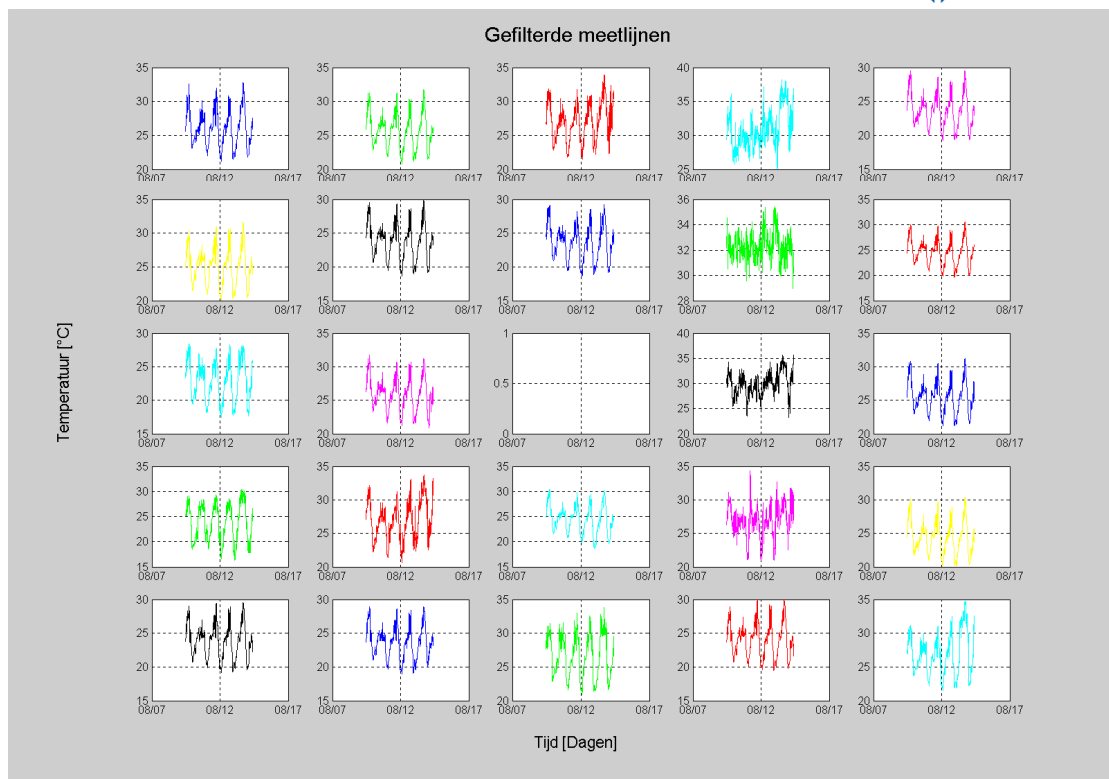
Bijlage D Meetlijnen



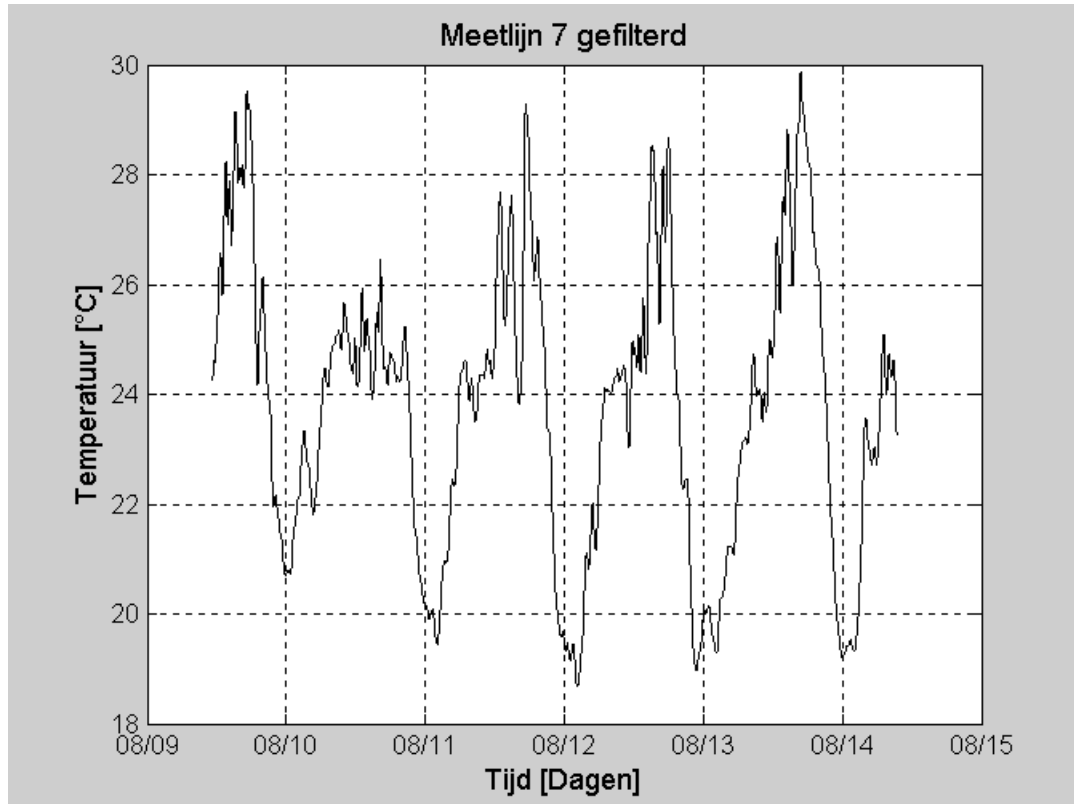
Figuur D.1. Alle meetlijnen (van links boven 1 tot rechts onder 25)



Figuur D.2. Meetlijn 7

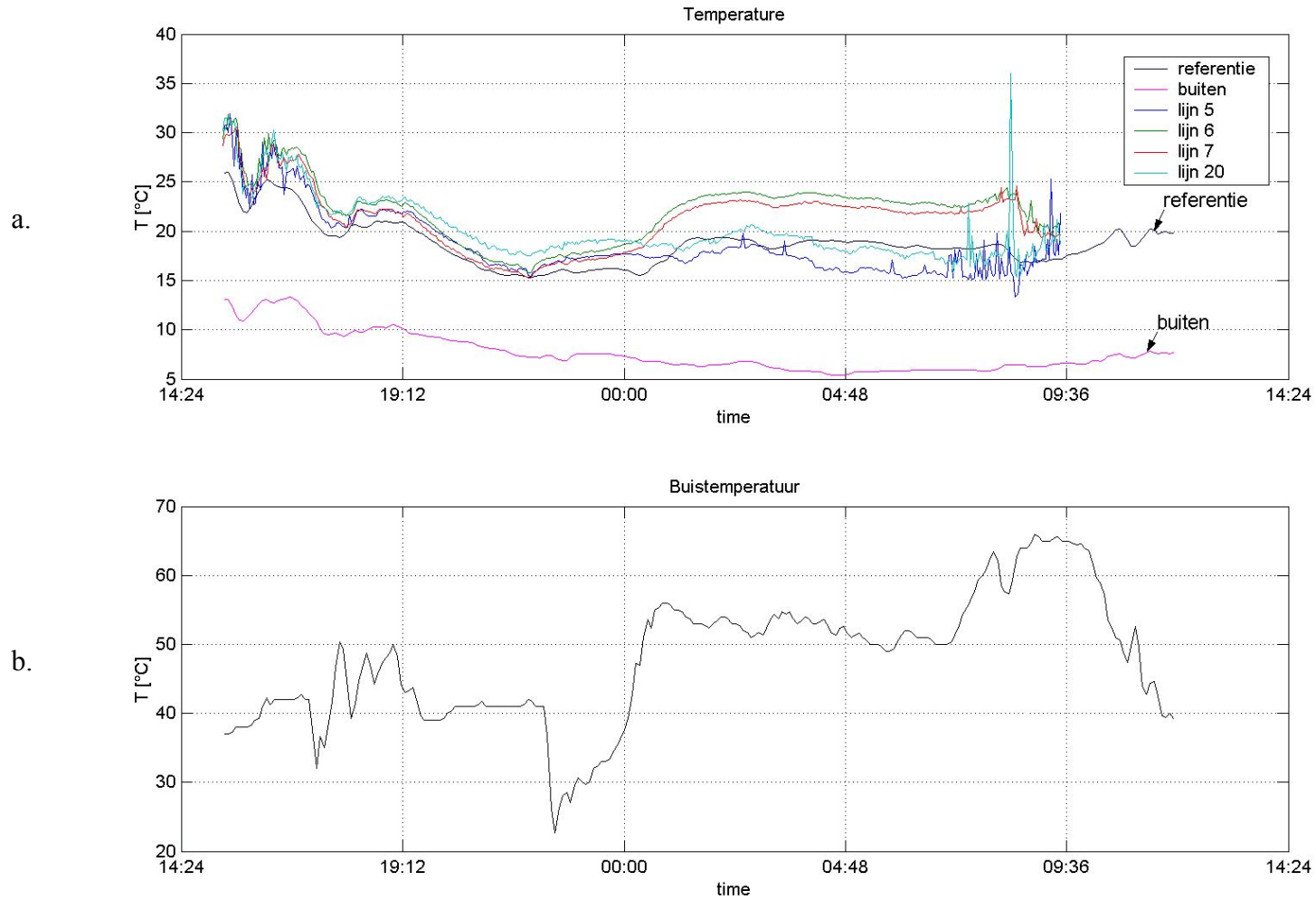


*Figuur D.3. Gefilterde meetlijnen (van links boven 1 tot rechts onder 25)*



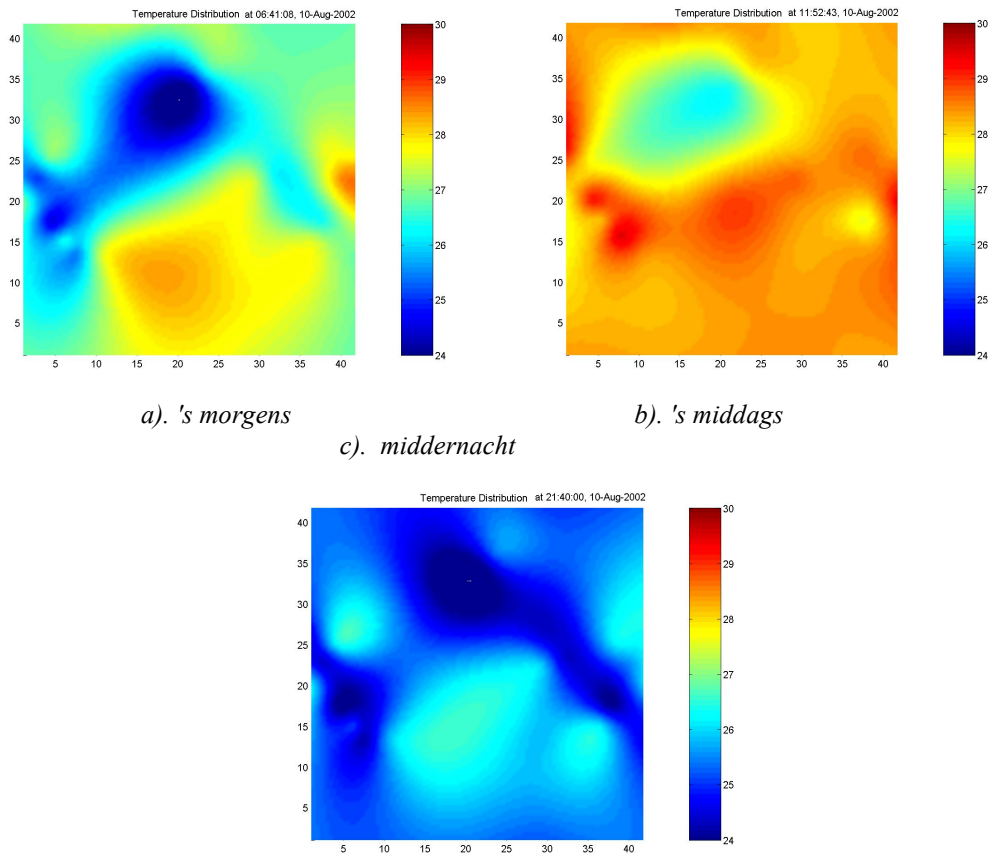
*Figuur D.4. Meetlijn 7 gefilterd*



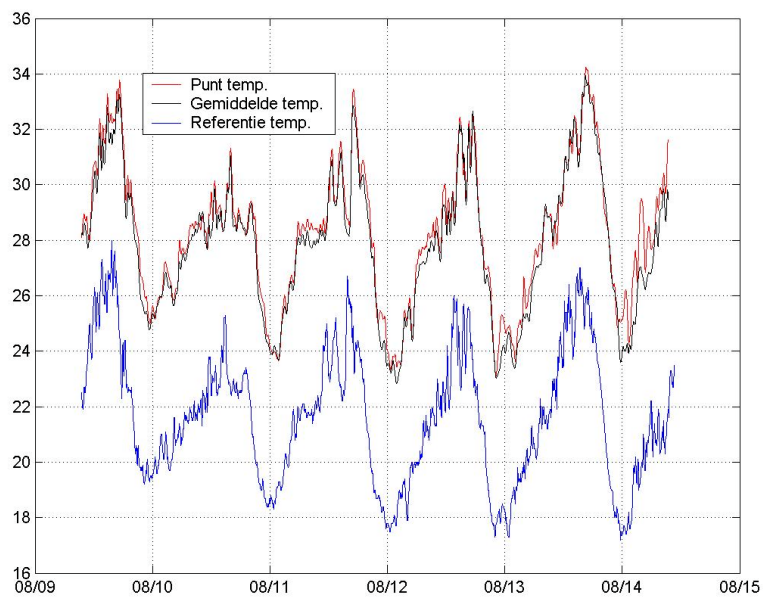


Figuur D.5. Korte meetlijnen (5,6,7,20), van 17 op 18 oktober '02;  
a). korte meetlijnen, referentie- en buitentemperatuur  
b). buistemperatuur

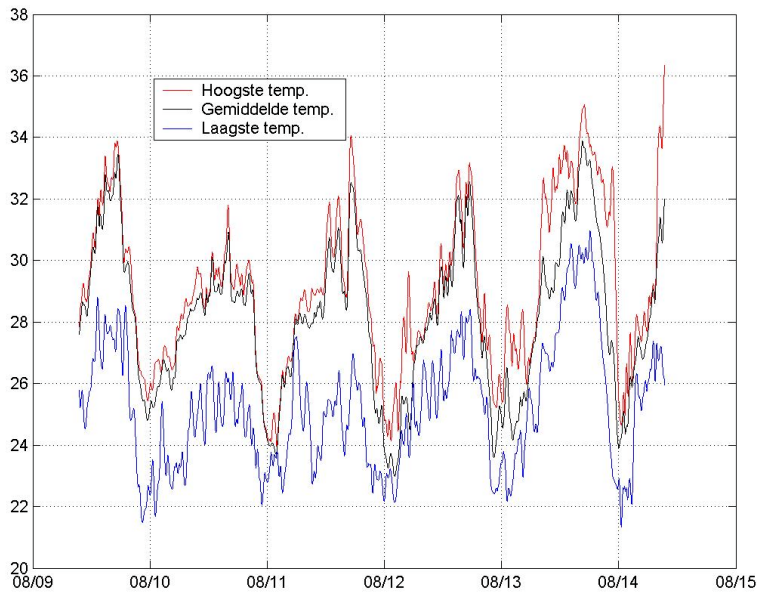
Bijlage E Ruimtelijk meten



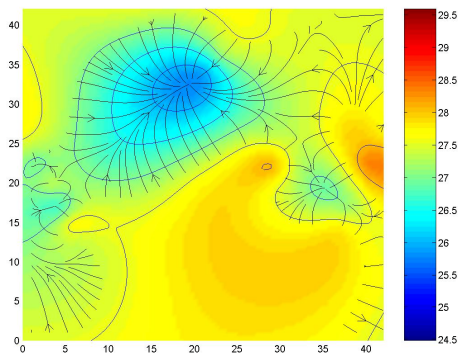
Figuur E.1. 2D-resultaat d.d 10-aug-'02



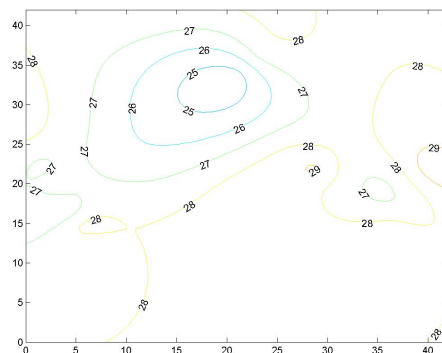
Figuur E.2. Ruimtelijk gemiddelde (zwart), 'virtuele sensor' (rood), referentie (blauw), 9 t/m 14 augustus '02



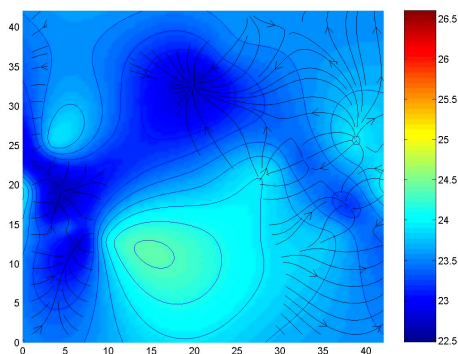
*Figuur E.3. Hoogste (rood), gemiddelde (zwart) en laagste (blauw) temperatuur volgens ClimaView™, 9 t/m 14 augustus '02*



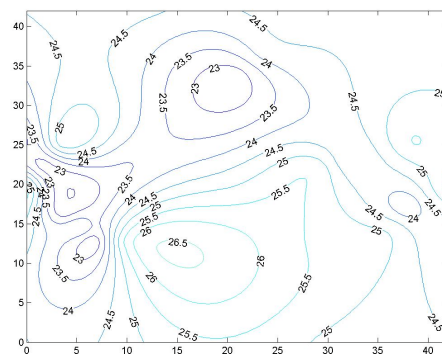
*a). energiestroomlijnen 9-aug-'02 12.30u*



*b). isothermen 9-aug-'02 12.30u*



*c). energiestroomlijnen 9-aug-'02 23.30u*



*d). isothermen 9-aug-'02 23.30u*

*Figuur E.4. Visualisatie mogelijkheden*

*Bijlage F Toelichting CD-Rom beeldverslag*

Beeldverslag van de temperatuursverdeling in de kas.

Op de bij het rapport toegevoegde CD-Rom zijn naast een aantal digitale foto's twee AVI beeldbestanden toegevoegd van het verloop van de temperatuursverdeling dat is gemeten gedurende één respectievelijk twee dagen. Het kan eenvoudig op een PC worden weergegeven door het aanklikken van het bestand met de muis. Automatisch wordt een Media Player geactiveerd.

Bij de standaard Windows Media Player kan het temperatuurbeeld tijdens het afspelen worden gestopt met CTRL P en beter worden bekeken. Na het afspelen kan men via de pijltjes toetsen voor en terug in de tijd scrollen. Met ALT-Enter wordt het volledige beeldscherm gebruikt.

De startdatum van het beeldverslag is 9 augustus 2002 om 9.30h. Bij het beeldverslag van 2 dagen is de eindtijd 10 augustus om ±23.00h.

De beeldverslagen bevatten temperatuurafbeeldingen van het meetareaal van iedere 4 minuten die sequentieel worden doorlopen.

De temperatuurlegenda die de gebruikte kleuren koppelt aan de temperatuur is niet weergegeven, maar loopt van 22 °C tot 32 °C.