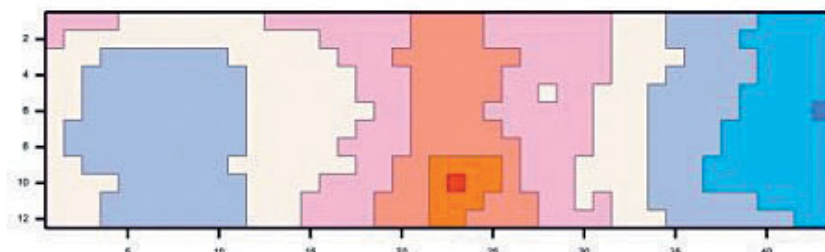
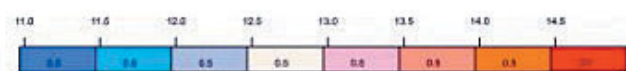


Meting van ruimtelijke verdeling van temperatuur en RV met behulp van draadloze minisensoren (Smart Dust)

Deel 3: Metingen bij praktijkbedrijven in verschillende seizoenen

J. Balendonck, E.A. van Os, R. v.d. Schoor, B.A.J. van Tuijl, L.C.P. Keizer



© 2010 Wageningen, Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek (DLO)

Alle intellectuele eigendomsrechten en auteursrechten op de inhoud van dit document behoren uitsluitend toe aan de Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek (DLO). Elke openbaarmaking, reproductie, verspreiding en/of ongeoorloofd gebruik van de informatie beschreven in dit document is niet toegestaan zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van DLO.

Voor nadere informatie gelieve contact op te nemen met: DLO in het bijzonder onderzoeksinstituut Wageningen UR Glastuinbouw

DLO is niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen die kunnen ontstaan bij gebruik van gegevens uit deze uitgave.

Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Droevendaalsesteeg 1, 6708 PB Wageningen
: Postbus 644, 6700 AP Wageningen
Tel. : 0317 - 48 60 01
Fax : 0317 - 41 80 94
E-mail : glastuinbouw@wur.nl
Internet : www.glastuinbouw.wur.nl

Inhoudsopgave

	pagina
Voorwoord	1
Samenvatting	2
Verkorte Rapportage	5
Uitgebreide Rapportage	19
1 Inleiding	19
1.1 Probleemstelling	19
1.2 Doelstelling	21
1.3 Keuzes, inpassing en randvoorwaarden	21
2 Materiaal en Methode	23
2.1 Installatie in de kas	23
2.2 Kalibratie onderlinge gelijkheid van de sensoren	25
2.3 Data van klimaatcomputer	27
3 Resultaten, observaties en analyses	29
3.1 Statistische analyse	29
3.2 Onderlinge gelijkheid RV-T sensoren	29
3.3 Tijdsanalyse ruwe meetsignalen	32
3.3.1 Observaties sensoren	33
3.3.2 Vergelijking mini-sensoren versus RV-T meetbox (Matricaria)	33
3.3.3 Variaties binnen de mini-sensoren voor alle kassen	35
3.4 Systematische horizontale variaties	37
3.5 Tijdsafhankelijke horizontale variaties	42
3.6 Sensordichtheid en nauwkeurigheden	49
4 Discussie	59
4.1 Toepassingsmogelijkheden draadloze mini-sensoren	59
4.2 Groen Label certificering	62
4.3 Terugkoppeling resultaten naar stakeholders	62
4.3.1 Matricaria	62
4.3.2 Gerbera	62
4.3.3 Komkommer	63
4.3.4 Tomaat	63
4.3.5 Draadloos Sensor Netwerk	63
4.3.6 Workshop	64
4.4 Vragen die nog niet beantwoord zijn	69
5 Conclusies	71
6 Referenties	73
6.1 Literatuur	73
6.2 Disseminatie	74

Voorwoord

De projecten reeks SMART DUST beoogt de ontwikkeling van een goedkoop en eenvoudig inzetbaar draadloos meetsysteem om in tuinbouwkassen horizontale en verticale verschillen in temperatuur en luchtvochtigheid te kunnen bepalen met een veel hogere ruimtelijke resolutie dan tot nu toegepast in de tuinbouw praktijk. Toepassing van dergelijke systemen zou kunnen leiden tot energiebesparing en een betere kwaliteit gewassen omdat telers in staat zijn koude en natte plekken eenvoudiger op kunnen sporen en daarmee gerichte maatregelen kunnen nemen.

Voor de gebruiker van een dergelijk meetsysteem is het van belang te weten dat zijn sensoren kwalitatief goed zijn, evenals hoe, wanneer en onder welke omstandigheden het netwerk van sensoren optimaal meet. In Smart Dust deel 1 en 2 is dit onderzocht voor één bedrijf, één seizoen en één verwarmingssysteem, maar het is onbekend hoe dat bij andere gewassen, andere verwarmingssystemen of seizoenen is. Er was dus te weinig algemene kennis beschikbaar om gefundeerde aanbevelingen te kunnen doen naar de praktijk hoe de systemen toe te passen.

Om een vlotte doorstroming van dit meetsysteem naar de praktijk te kunnen realiseren zijn in Smart Dust deel 3 zes metingen met 100 sensoren van in totaal 10 meetdagen op verschillende bedrijven uitgevoerd (ander seizoen, ander gewas, ander verwarmingssysteem) waarbij een statistische analyse van alle data de meetnauwkeurigheid en meetafstand van sensoren bepaald is. Metingen zijn zoveel mogelijk uitgevoerd op bedrijven die al betrokken zijn bij andere meetprojecten. Het betrof de twee groenten gewassen (komkommer en tomaat) en twee bloemen gewassen (gerbera en matricaria). In dit rapport zijn de meetgegevens en resultaten wel gerubriceerd op gewas, maar zijn de gegevens met betrekking tot de bedrijven geanonimiseerd.

Het onderhavige rapport is vrij lijvig geworden, en beschrijft op wetenschappelijke wijze in detail de metingen, de resultaten, maar ook de complexe statistische analyse. Dit rapport zal beschikbaar zijn in elektronische vorm voor de inhoudelijke lezer die diepgang zoekt. Om die reden hebben we een ook uitgebreide samenvatting opgenomen die mogelijk wat eenvoudiger en sneller te lezen is. Deze uitgebreide samenvatting zal de basis vormen een publiek rapport dat in gedrukte vorm beschikbaar zal zijn, maar ook elektronisch verspreid zal worden via de reguliere kanalen van LNV en PT.

De resultaten van het onderzoek zijn besproken met een aantal betrokkenen en de overwegingen daarbij zijn opgenomen in het stuk discussie, en moeten de basis vormen voor verdere toepassing van de resultaten in de praktijk dan wel het verdere onderzoek naar draadloze mini-sensoren. Ik hoop dat dit rapport bijdraagt tot een beter inzicht in wat de mogelijkheden en onmogelijkheden zijn van de toepassing van draadloze sensoren in de tuinbouw. Graag wil ik op deze plek alle tuinbouw bedrijven bedanken voor hun medewerking aan dit onderzoek. Ik hoop dat de resultaten hun ook meer inzicht verschaft hebben over het klimaat in hun eigen kassen.

Jos Balendonck

Samenvatting

Een homogeen klimaat in de kas leidt tot een uniform gewas. Een uniform gewas kan in een enkele handeling geoogst worden en verkocht worden voor een hoge prijs. Een homogeen klimaat draagt ook bij aan een betere kwaliteit van het gewas doordat er geen beschadigingen kunnen optreden door schimmelinfecties op vaste koude of nattere plekken in de kas. En, minder ziekten betekent ook minder gebruik van gewasbeschermingsmiddelen. Bij kleinere temperatuurgradiënten in de kas, kunnen telers om koude en natte plekken te voorkomen, ook met kleinere marges voor hun klimaatcomputer setpoints werken en daarmee energie besparen. Een bekende vuistregel is dat een 1°C lager setpoint leidt tot 10% minder energiegebruik. Het gedetailleerd kennen van de ruimtelijke verdeling van temperatuur (T) en relatieve luchtvochtigheid (RV) in kassen kan daarom aanzienlijk bijdragen aan het inkomen van de teler.

Naast grote dagelijkse en seizoensgebonden klimaat variaties in de kas die ontstaan door setpoint veranderingen, zien we kleinere variaties in T en RV die zich manifesteren als 'wandellende' natte of koude plekken in de kas. Deze effecten ontstaan door natuurlijk aangedreven krachten (klimaat setpoints, instraling, wind, buiten temperatuur e.d.) en kunnen de aanleiding vormen tot uitbraak van schimmelziekten. Telers herkennen deze fenomenen en accepteren deze, maar gebruiken doorgaans ruimere marges voor hun klimaatcomputer om schade aan het gewas te voorkomen. RV en T zijn sterk aan elkaar gecorreleerd, en in (semi-) gesloten kassen met een homogene absolute vochtigheid, is de meest bepalende factor de temperatuur.

Naast onvoorspelbare verschillen, zijn er ook statische verschillen in de horizontale klimaatsverdeling, die leiden tot een minder homogeen gewas. Deze verschillen ontstaan door verschillen in de infrastructuur van de kas en verschillen of defecten in de verwarming, ventilatie, schermen e.d. Niet zoals bij de onvoorspelbare variaties, kan juist bij deze voorspelbare variaties wat ondernomen worden om het klimaat homogener te maken door de infrastructuur aan te passen en defecten te verhelpen.

Wat acceptabele horizontale verschillen in temperatuur zijn is niet echt vastgelegd. De Groenlabel norm geeft bijvoorbeeld aan om binnen $\pm 0.75^{\circ}\text{C}$ te blijven. Met betrekking tot RV proberen tuinders doorgaans uit de buurt van verzadiging te blijven en een redelijke marge voor het vochtdeficit te hanteren door in een RV gebied van 90-95% te blijven. Tuinders gebruiken T-RV meetboxen die speciaal ontwikkeld zijn voor gebruik in kassen, waarbij de lucht actief door de box wordt gezogen (geventileerd) en waarbij de behuizing de directe instraling op de sensor elementen voorkomt. De vereiste nauwkeurigheid voor de meting van RV is door Groenlabel vastgelegd op minimaal $\pm 3\%$ in het gebied van 70-90%. Tuinders plaatsen hun meetboxen zodanig dat deze een redelijk gemiddelde waarde voor het klimaat in het kascompartiment weergeven. Het aantal meetboxen is doorgaans beperkt tot 1 per individueel regelbaar kascompartiment, en in uitzonderlijke gevallen plaatst een teler er een of enkele meetboxen bij aan de randen van het compartiment. Om een volledig beeld van de ruimtelijke variabiliteit in de kas te verkrijgen zijn echter veel meer meetpunten noodzakelijk. Omdat dit in de praktijk tot veel bekabeling en hoge kosten leidt, wordt dit niet als een praktische optie gezien. Recent zijn er miniatur draadloze RV-T sensoren op de markt gekomen die gebruik maken van solid-state sensor elementen. Deze sensoren kosten een fractie (5-10x) van de prijs voor een meetbox, en vormen daarmee een kans om ingezet te worden om de ruimtelijke klimaatverdeling in kassen te bepalen.

Met het doel om statische klimaatverschillen in de kas te corrigeren, zouden een groot aantal van deze sensoren gebruikt kunnen worden om de ruimtelijke klimaatsverdeling in kaart te brengen, bijvoorbeeld in de vorm van een Carry-in service. Tuinders zouden zo energielekken kunnen opsporen of ze zouden hun gevelverwarming kunnen afregelen. Aan de andere kant zouden de sensoren permanent geïnstalleerd kunnen worden, en gebaseerd op de online bepaalde ruimtelijke klimaatverdeling zou het klimaat plaatsafhankelijk actief gestuurd kunnen worden. Hierbij kan gedacht worden aan een rijventilatie systeem dat tegenwoordig in moderne (semi-)gesloten teelten wordt ingezet om droge koude lucht in de kas te brengen als alternatief voor raamventilatie. Dit systeem zou gestuurd kunnen worden op basis van temperatuurgradiënten in de rij of tussen de rijen.

In deze studie proberen we vast te stellen of draadloze minisensoren praktisch gebruikt kunnen worden om de ruimtelijke klimaatverdeling in kassen te bepalen met voldoende nauwkeurigheid, en of daarmee koude of natte plekken op ieder moment (t.b.v. ziekte) en voor langere termijn (gewas homogeniteit) geïdentificeerd kunnen worden. Met betrekking tot de kosten is het belangrijk te weten hoe dicht een meetnet minimaal moet zijn om dit zinvol in te kunnen zetten. Hiervoor moet er een norm gesteld worden die aangeeft wat de maximaal toegestane spreiding voor temperatuur en RV in de kas mag zijn, wat de meetnauwkeurigheid van de sensoren is, en wat de variabiliteit van het klimaat in de kas is. Met dit doel zijn meetexperimenten uitgevoerd met draadloze sensoren in een aantal typisch Nederlandse kassen onder een aantal verschillende omstandigheden en bij verschillende gewassen (matricaria, gerbera, tomaat en komkommer).

Er is met 100 draadloze RV-T sensoren (Wisensys) in een grid (ca. 15x15m) gemeten. De sensoren, die bestaan uit een klein kastje van ca. 5x5x7 cm, zijn telkens opgehangen op een manier die mogelijkheden daartoe bood vanuit de infra-structuur of de werkwijze in de kas. De sensoren werden uitgelezen met een ontvangst/zendantenne die boven in de nok in de kas opgehangen was. Een PC, die een draadloze verbinding had met de ontvanger, sloeg iedere minuut alle RV, T-data op van de sensoren. Voor het onderzoek is ook gebruik gemaakt van gegevens van de klimaatcomputers van de tuinders. Voor iedere teelt zijn de data van 10 opeenvolgende dagen statistisch geanalyseerd, waarbij gekeken is naar de onderlinge gelijkheid van de sensoren, de statische en instantane klimaatvariëaties evenals de benodigde dichtheid van het meetnet.

Het draadloze meetsysteem heeft goed gefunctioneerd en onder normale bedrijfsomstandigheden (15-25°C en RV < 95%) voldoen de sensoren voor hun doel met een gespecificeerde nauwkeurigheid van $\pm 0.4^\circ\text{C}$ en $\pm 3\%$. Deze nauwkeurigheid voldoet echter niet voor de Groenlabel norm. Overdag is er een grote invloed op de meting van T en RV door instraling, en vooral 's nacht, bij RV's groter dan 95%, worden de sensoren minder betrouwbaar voor RV. Er is een kleine onderlinge spreiding van de sensoren, en het is verstandig hiervoor te corrigeren, het liefst al bij de fabrikant. De fabrikanten worden geadviseerd een nauwkeurige versie van het sensor-element toe te passen (SHT75, Sensirion).

Bij de onderzochte kasteelten van matricaria, gerbera, komkommer en tomaat bestaat de horizontale variatie, gemeten als verschil tussen de maximale en minimale waarde (ΔT , ΔRV), uit systematische variaties ter grootte van 1.0-3,4°C en 9-40%, en in iets mindere mate ook uit toevallige variaties ter grootte van 5.6-9.0°C; 11.8-42.3%. Er zijn grotere verschillen voor de verschillende teelten, en over het algemeen zijn de kassen met groente gewassen iets homogener dan de laagblijvende bloementeelten.

De ΔT van een kas (gedefinieerd als verschil temperatuur tussen warmste en koudste plek in de kas) is sterk gerelateerd aan de verschiltemperatuur tussen binnen en buiten de kas. De experimenten bevestigen de globale vuistregel dat ΔT een factor 4-5 kleiner is dan van het verschil in temperatuur buiten en binnen in de kas, voor temperatuurverschillen tussen buiten en binnen van rond de 10°C.

Het bepalen van de ΔT en ΔRV op basis van slechts één RV-T meetbox per hectare is onmogelijk, daarvoor is de natuurlijke variatie in kassen te hoog. Door een meetnet van sensoren met een hogere dichtheid toe te passen, kan de ΔT en ΔRV met meer zekerheid bepaald worden. Voor de onderzochte kassen, en voor de specifieke perioden, is gevonden dat bij toepassing van een sensordichtheid van tenminste 9 sensoren per hectare ($33 \times 33 \text{ m}^2$), ΔT en ΔRH bepaald kunnen worden zonder dat er koude of natte plekken over het hoofd gezien worden. Een lagere onzekerheid dan $\pm 0.5^\circ\text{C}$ en $\pm 2.6\%$ is daarbij niet haalbaar omdat dat de intrinsieke nauwkeurigheid is van een verschiltemperatuur gemeten met twee sensoren die naast elkaar staan. Naarmate het meetnet wijder gezet wordt neemt de onzekerheid toe, en in de meest ongunstige situaties met $\pm 0.16^\circ\text{C}/\text{m}$ en $\pm 0.57\%/m$ voor de nachten en met $\pm 0.10^\circ\text{C}/\text{m}$ en $\pm 0.36\%/m$ voor de dagen. Het toepassen van meer dan 30 sensoren per hectare wordt echter niet zinvol geacht omdat dat niet tot een relatief hogere meetnauwkeurigheid leidt en gezien de investeringen te kostbaar zou worden.

Op basis van bovenstaande resultaten kunnen de sensoren op verschillende manieren in de praktijk toegepast worden. Het draadloze sensor netwerk kan ingezet worden om de klimaatvariaties in kassen in kaart te brengen. Met de toepassing van een meetnet krijgt de teler een systeem in handen om temperatuur en RV instellingen op de klimaatcomputer iets scherper en met meer zekerheid te kunnen instellen in relatie tot de variaties in de kas. De ruimte die hij daardoor krijgt bij het voorkomen van ziekten kan terugverdiend worden door bijvoorbeeld een reductie van de gebruikte hoeveelheid gas. Voor de groente gewassen lijkt dit in ieder geval mogelijk. Nader onderzoek is wel nodig om de potentie van de besparing te kwantificeren. Bij bloemen gewassen moet de ruimte voor investering en het terugverdienen daarvan echter vooral gezocht worden in de winst die te behalen is met de mogelijkheden om een veel homogener en gelijkmatiger gewas te telen. Daar zou het zelfs zo kunnen zijn dat door toch de temperatuur iets te verhogen, en meer gas te gebruiken, de teler een kwalitatief beter en homogener gewas aflevert wat derving kan voorkomen. Deze winsten zijn doorgaans groter dan de extra kosten voor de energie.

Toepassing zou in het kader van Groen label certificering kunnen met behulp van een Carry-In service, mits de sensoren door de leverancier aangepast worden voor de Groen-label normering. Er wordt geadviseerd om dan een hogere meetdichtheid te gebruiken van tenminste 30-40 sensoren per hectare (ca. 15-18 m grid). Bij het vinden van alleen belangrijke systematische horizontale verschillen kan de teler aanpassingen in de infrastructuur ondernemen, of hij kan de plaats van een of enkele extra RV-T meetboxen zo kiezen dat een beter inzicht wordt verkregen over de variaties om daarmee het klimaatregime aan te passen. Indien de kas ook in belangrijke mate toevallige variaties heeft is het zinvol om een meetnet met hoge dichtheden toe te passen, en te gaan regelen op de sensor met de laagste temperatuur. Toepassing zou in een drietal stappen kunnen:

Allereerst, de infra-structuur van de kas draagt sterk bij aan de (statische) inhomogeniteit van het klimaat in de kas. Door het uitvoeren van een eenmalige meting (bv. 1 week in een kritische periode) kunnen inhomogeniteiten in kaart gebracht worden, en kan de teler zijn kas zodanig aanpassen dat verschillen zoveel mogelijk automatisch genivelleerd worden. Hierbij is te denken aan het installeren of afstellen van een gevelverwarming, het aanbrengen van mechanische ventilatie, het isoleren van delen van de kas en dergelijke. Het regelmatig herhalen van de meting (bv. 1 x per jaar) maakt het ook mogelijk om defecten in de infra-structuur op te sporen, met het doel gerichte reparaties uit te voeren.

Verder kunnen in kassen ten gevolge van oncontroleerbare oorzaken koude en natte plekken ontstaan die een variabele locatie hebben ('wandelende koude plekken'). Structurele maatregelen hebben hier geen zin, maar ingrijpen moet op ieder moment mogelijk zijn. Een eerste stap op weg naar een praktische toepassing is het regelen op de standaard klimaatbox te vervangen door het regelen op de koudste en natste plek in de kas, gemeten met een dicht sensornetwerk. Om te voorkomen dat de klimaatcomputer dan automatisch gaat regelen op een toevallige koude plek die niet representatief is voor de gehele kas (b.v. nabij een vaak opengaande deur), kunnen veiligheids ingebouwd worden en kan bijvoorbeeld geregeld worden op een percentage oppervlak van de kas dat binnen een bepaalde bandbreedte moet liggen (uniformiteitsindex). Telers kunnen daarbij hun T en RV marges wat verruimen omdat er meer zekerheid zal bestaan over het werkelijke klimaat in de kas. Voorzichtige inschattingen laten zien dat energiebesparingen van 1-2% mogelijk zijn. Verder onderzoek is echter nodig om het mogelijke energiebesparing potentieel in kaart te brengen.

In voorgaande oplossing gaan we uit van het gebruik van de standaard aanwezige stuurgroepen (verwarming, ventilatie e.d.) in de kas. Een meest ver doorgevoerde regeling voor het continu homogeniseren van het kasklimaat zou gebruik kunnen maken van individueel stuurbare actoren. Het zal duidelijk zijn dat deze aanpak hogere investeringen vergen, maar toch zien we in de praktijk hier al wel aanleidingen voor. Gevelverwarming zouden hiervoor meer individueel gestuurd kunnen worden. In huidige semi-gesloten kassen wordt al veel gebruik gemaakt van horizontale of verticale ventilatie (airco-breeze). Het vergt weinig investering om deze individueel schakelbaar of regelbaar te maken. Ook geldt dit voor de lucht behandelingskasten die via de zijgevel met behulp van slangen, koude en droge lucht inblazen van onder het gewas. Alvorens deze technieken gecombineerd kunnen worden met een sensor meetnet, moet er eerst meer expertise opgebouwd worden over de manier waarop een sturingreep dan gepleegd moet worden.

Verkorte Rapportage

Introductie

Een homogeen klimaat in de kas leidt tot een uniform gewas. Een uniform gewas kan in een enkele handeling geoogst worden en verkocht worden voor een hoge prijs. Een homogeen klimaat draagt ook bij aan een betere kwaliteit van het gewas doordat er geen beschadigingen kunnen optreden door schimmelinfecties op vaste koude of nattere plekken in de kas. En, minder ziekten betekent ook minder gebruik van gewasbeschermingsmiddelen. Bij kleinere temperatuurgradiënten in de kas, kunnen telers om koude en natte plekken te voorkomen, ook met kleinere marges voor hun klimaatcomputer setpoints werken en daarmee energie besparen. Een bekende vuistregel is dat een 1°C lager setpoint leidt tot 10% minder energiegebruik (Nijs, 1997). Het gedetailleerd kennen van de ruimtelijke verdeling van temperatuur (T) en relatieve luchtvochtigheid (RV) in kassen kan daarom aanzienlijk bijdragen aan het inkomen van de teler.

Naast grote dagelijkse en seizoensgebonden klimaat variaties in de kas die ontstaan door setpoint veranderingen, zien we kleinere variaties in T en RV die zich manifesteren als 'wandelende' natte of koude plekken in de kas (Campen & de Gelder, 2007). Deze effecten ontstaan door natuurlijk aangedreven krachten (klimaat setpoints, instraling, wind, buiten temperatuur e.d.) en kunnen de aanleiding vormen tot uitbraak van schimmelziekten. Telers herkennen deze fenomenen en accepteren deze, maar gebruiken doorgaans ruimere marges voor hun klimaatcomputer om schade aan het gewas te voorkomen. RV en T zijn sterk aan elkaar gecorreleerd, en in (semi-) gesloten kassen met een homogene absolute vochtigheid, is de meest bepalende factor de temperatuur.

Naast onvoorspelbare verschillen, zijn er ook statische verschillen in de horizontale klimaatsverdeling. In het algemeen leidt deze tot een minder homogeen gewas. Vijverberg (1986) heeft laten zien dat deze verschillen ontstaan door verschillen in de infrastructuur van de kas en verschillen of defecten in de verwarming, ventilatie, schermen e.d. Niet zoals bij de onvoorspelbare variaties, kan juist bij deze voorspelbare variaties wat ondernomen worden om het klimaat homogener te maken door de infrastructuur aan te passen en defecten te verhelpen.

Wat acceptabele horizontale verschillen in temperatuur zijn is niet echt vastgelegd, maar Bloem (2000) hanteert een grens van $\pm 2^\circ\text{C}$. De Groenlabel normering (Stichting Milieukeur, 2010) geeft aan om binnen $\pm 0.75^\circ\text{C}$ te blijven. Voor de RV zijn geen echte eisen vastgelegd, maar tuinders proberen uit de buurt van verzadiging te blijven door een redelijke marge voor het vochtdeficit te hanteren door in een RV gebied van 90-95% te blijven. Tuinders gebruiken T-RV meetboxen die speciaal ontwikkeld zijn voor gebruik in kassen, waarbij de lucht actief door de box wordt gezogen (geventileerd) en waarbij de behuizing de directe instraling op de sensor elementen voorkomt. De vereiste nauwkeurigheid voor de meting van RV is door Groenlabel vastgelegd op minimaal $\pm 3\%$ in het gebied van 70-90% (Stichting Milieukeur, 2010). Tuinders plaatsen hun meetboxen zodanig dat deze een redelijk gemiddelde waarde voor het klimaat in het kascompartiment weergeven. Het aantal meetboxen is doorgaans beperkt tot 1 per individueel regelbaar kascompartiment, en in uitzonderlijke gevallen plaatst een teler er een of enkele meetboxen bij aan de randen van het compartiment. Om een volledig beeld van de ruimtelijke variabiliteit in de kas te verkrijgen zijn echter veel meer meetpunten noodzakelijk. Omdat dit in de praktijk tot veel bekabeling en hoge kosten leidt, wordt dit niet als een praktische optie gezien. Recent zijn er miniatuur draadloze RV-T sensoren op de markt gekomen die gebruik maken van solid-state sensor elementen. Deze sensoren kosten een fractie (5-10x) van de prijs voor een meetbox, en vormen daarmee een kans om ingezet te worden om de ruimtelijke klimaatverdeling in kassen te bepalen.

Met het doel om statische klimaatverschillen in de kas te corrigeren, zouden een groot aantal van deze sensoren gebruikt kunnen worden om de ruimtelijke klimaatsverdeling in kaart te brengen, bijvoorbeeld in de vorm van een Carry-in service. Tuinders zouden zo energielekken kunnen opsporen of ze zouden hun gevelverwarming kunnen afregelen. Aan de andere kant zouden de sensoren permanent geïnstalleerd kunnen worden, en gebaseerd op de online bepaalde ruimtelijke klimaatverdeling zou het klimaat plaatsafhankelijk actief gestuurd kunnen worden. Hierbij kan gedacht worden aan een rijenventilatie systeem dat tegenwoordig in moderne (semi-) gesloten teelten wordt ingezet om droge koude lucht in de kas te brengen als alternatief voor raamventilatie. Dit systeem zou gestuurd kunnen worden op basis van temperatuurgradiënten in de rij of tussen de rijen.

In deze studie proberen we vast te stellen of draadloze minisensoren praktisch gebruikt kunnen worden om de ruimtelijke klimaatverdeling in kassen te bepalen met voldoende nauwkeurigheid, en of daarmee koude of natte plekken op ieder moment (t.b.v. ziekte) en voor langere termijn (gewas homogeniteit) geïdentificeerd kunnen worden. Met betrekking tot de kosten is het belangrijk te weten hoe dicht een meetnet minimaal moet zijn om dit zinvol in te kunnen zetten. Hiervoor moet er een norm gesteld worden die aangeeft wat de maximaal toegestane spreiding voor temperatuur en RV in de kas mag zijn, wat de meetnauwkeurigheid van de sensoren is, en wat de variabiliteit van het klimaat in de kas is. Met dit doel zijn meetexperimenten uitgevoerd met draadloze sensoren in een aantal typisch Nederlandse kassen onder een aantal verschillende omstandigheden en bij verschillende gewassen.

Materiaal en methode

Ter verkrijging van praktijk meetgegevens is een observationeel experiment uitgevoerd, in de winter van 2008-2009 waarbij gedurende 10 dagen metingen verricht zijn bij praktijktelers van gerbera, matricaria, tomaat en komkommer. Alle kassen waren moderne klimaat-geregelde Nederlandse kassen uitgerust met standaard voorzieningen, waarbij de bloemengewassen ook beschikte over een Airco-breeze ventilatiesysteem (Hoogendoorn Growth Management, NL). De metingen bij Gerbera en Matricaria zijn één keer herhaald.

De metingen zijn verricht met 100 Wisensys nodes (Wireless Value, Emmen) die solid-state sensoren (SHT71, Sensirion, Zwitserland) voor temperatuur en RV bevatten. Volgens de fabrikant is de nauwkeurigheid van dit element gespecificeerd voor een breed scala aan toepassing als volgt: $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ bij 25°C , $\pm 1^{\circ}\text{C}$ van 0°C tot $+50^{\circ}\text{C}$, en $\pm 2^{\circ}\text{C}$ van -20°C tot $+80^{\circ}\text{C}$ voor temperatuur en $\pm 3\%$ van 20% tot 80% of anders $\pm 5\%$ voor RV. Sensirion verkoopt ook een versie (SHT75) met een betere specificatie. Alhoewel deze momenteel door de toeleverancier van de minisensoren al wordt gebruikt, was deze niet beschikbaar tijdens de experimenten.

De sensoren zijn voorzien van een klein wit plastic plaatje (credit card size), dat boven de sensor-elementen geplaatst is, om directe instraling zoveel mogelijk te vermijden. Datacommunicatie en -opslag is uitgevoerd met een basisstation (Wireless Value) en een (industriële) PC, met Wisensys SensorGraph software versie: R4C6. Tussen PC en basisstation is een draadloze verbinding gebruikt (Tranzeo Wireless Technologies Inc.). De proef opzet is analoog aan die gebruikt is in een eerdere studie uitgevoerd door Van Tuijl et al (2008). Bij de plaatsing van de sensoren is gebruik gemaakt van verschillende bevestigingsmethoden. Bij matricaria, tomaat en komkommer is het knijper-onderdeel van de Pelikaanhaak toegepast voor eenvoudige bevestiging aan gewasdraden (Clipr®, Pellikaan, Gemert, NL), voor komkommer een horizontale draad en bij matriaria en tomaat een verticale gewasdraad. Bij Gerbera zijn de sensoren bevestigd aan een PVC-buisje welke over een verticaal frameonderdeel van het teeltgotensysteem geschoven is (zie Figuur 1).



Figuur 1. Gebruikte sensoren en bevestigingsmethode (links: tomaat Pelikaanhaak, rechts: Gerbera, PVC-pijpje)

De 100 sensoren zijn op een regelmatig rechthoekig grid in het horizontale vlak geplaatst ter hoogte van het groeipunt (bloem of vrucht) van het gewas, overeenkomstig de hoogte waar telers hun standaard RV-T box hangen. Het grid is zo uitgelegd dat dit zich in de volle breedte van linker- naar rechterzijgevel van de kas uitstrekte, en om teelthandelingen niet te verstoren is het grid aangepast aan de lokale infra-structuur dimensies. Om voldoende statische informatie over de spatiële variatie te krijgen is bij de Gerbera teelt een aantal sensoren op een dubbele dichtheid geplaatst (6 x 6 sensoren). De gebruikte grid afmetingen zijn weergegeven in Tabel 1.

Tabel 1. Overzicht van proeven (periode oktober 2008 t/m april 2009)

	<i>Gerbera 1</i>	<i>Matricaria1</i>	<i>Gerbera 2</i>	<i>Tomaat</i>	<i>Komkommer</i>	<i>Matricaria 2</i>
Meetdagen	306-315	335-344	18-27	38-47	52-61	91-100
Meetgrid (m ²)	11.8 × 9.7	13.5 × 9.6	11.8 × 9.7	15 × 12.8	9 × 9.6	13.5 × 9.6
Meetoppervlak (m ²)	127.0 × 48.5	202.5 × 48	127.0 × 48.5	215 × 64	81 × 86.4	202.5 × 48
Sensor grid	12 × 6	16 × 6	12 × 6	16 × 6	10 × 10	16 × 6
Aantal sensoren	99	96	99	96	100	96
Sensor dichtheid (ha ⁻¹)	88	79	88	58	128	79

Data van de sensoren zijn per minuut vastgelegd, en voor de analyse is gebruik gemaakt van 10-minuten gemiddelden. Voor elke proef zijn de 10 opeenvolgende meetdagen opgesplitst in 2 perioden van elk 5 dagen, en verder opgesplitst in dag en nacht gerelateerd aan zonsopgang en ondergang. Daarnaast is ook gebruik gemaakt van uurgemiddelden van de klimaatcomputers, zoals voor de standaard RV-T-meetboxen, het binnen- en buitenklimaat en de instellingen van schermen, ventilatie en verwarming.

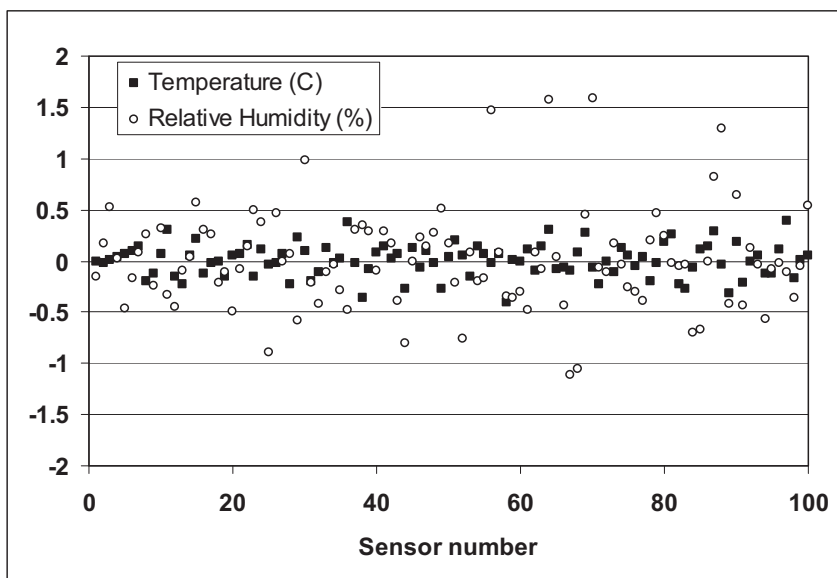
Resultaten en analyse

Onderlinge gelijkheid van sensoren: offset kalibratie

Wetende dat gebruikers van sensoren zoals telers nooit in staat zullen zijn om een absolute controle van de sensor meetwaarden te kunnen uitvoeren is een test uitgevoerd om een indruk te krijgen van de onderlinge gelijkheid van de sensoren, een relatieve meting dus.

Voor iedere proef (5 keer) zijn de sensoren onderling met elkaar vergeleken om een waarde voor de offset-correctie te kunnen bepalen. Daartoe zijn de sensoren in een kartonnen doos gelegd in het laboratorium bij standaard kamertemperatuur (19-27°C) en luchtvochtigheid (25-49%) en gedurende twee uur zijn 10-minuten gemiddelden van RV en T geregistreerd (Figuur 2). Voor iedere sensor is vervolgens de afwijking bepaald ten opzichte van het totale gemiddelde, waarbij de meetwaarden gecorrigeerd zijn voor opwarming, en de ruimtelijke temperatuurverdeling in de doos. De vijf offsetwaarden zijn gemiddeld, welke waarde vervolgens als correctie is gebruikt in de verdere analyses. Met deze test konden ook sensoren opgespoord worden die niet goed functioneerden of een slechte batterij hadden.

Figuur 2 geeft het resultaat van de onderlinge vergelijking van de sensoren. Voor temperatuur liggen de offsets tussen +0.39 en -0.41°C (st.dev. = 0.16) en voor relatieve luchtvochtigheid liggen de offsets tussen -1.12 en +1.58% (st.dev. = 0.49). Deze waarden liggen binnen de specificatie van de fabrikant, maar omdat kleine temperatuur en RV verschillen grote invloed op energieverbruik kunnen hebben, verdient het aanbeveling om voor de onderlinge gelijkheid van sensoren te controleren en eventueel te corrigeren.



Figuur 2. Onderlinge vergelijking van de offset van de sensoren voor T (in °C) en RV (in %)

Instantane en actuele klimaatvariati es

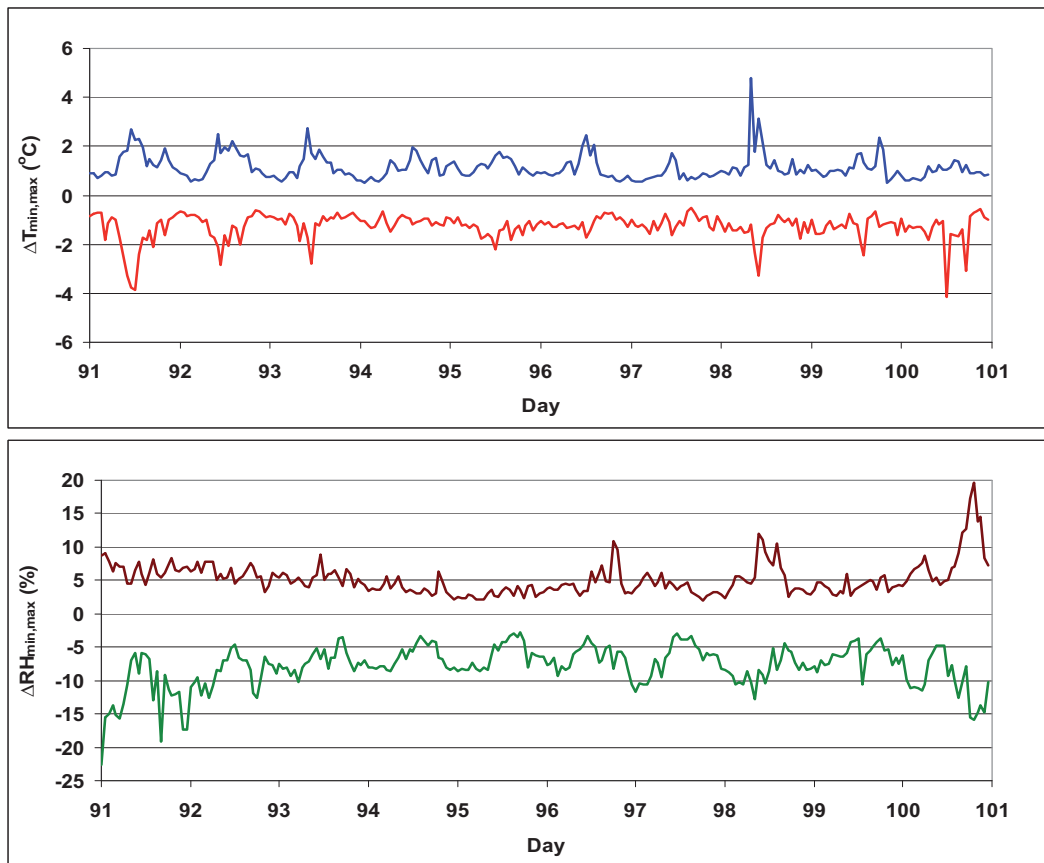
Om inzicht te krijgen in de relatieve klimaat verschillen zijn voor alle actuele minimum en maximum waarden voor T en RV over alle sensoren in alle 10-minuten intervallen het verschil bepaald met de instantane gemiddelde waarden over alle 100 sensoren gegeven als: $\Delta T_{\min}$, $\Delta T_{\max}$, $\Delta RV_{\max}$, $\Delta RV_{\min}$. Deze waarden kunnen uitgerekend worden met:

$$\Delta RV = \Delta RV_{\max} - \Delta RV_{\min}, \text{ and: } \Delta T = \Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}. \quad (1)$$

Tabel 2. Voor alle proeven, maximum en minimum T en RV verschillen als vergeleken met de gemiddelde momentane warden. De gegeven waarden zijn extremen over de meetperiode van 10 dagen

	$T(^{\circ}C)$		$RV (\%)$	
	$\Delta T_{\min}$	$\Delta T_{\max}$	$\Delta RV_{\min}$	$\Delta RV_{\max}$
gerbera 1	-3.8	5.4	-16.8	12.4
gerbera 2	-3.1	4.2	-13.0	9.0
matricaria 1	-2.8	2.8	-16.4	8.5
matricaria 2	-4.2	4.8	-22.6	19.7
tomaat	-2.8	2.8	-21.9	10.6
komkommer	-3.1	3.4	-11.4	0.4

Tabel 2 geeft de extremen over de hele meetperiode van 10 dagen voor alle proeven. In Figuur 3 worden de minima en maxima weergegeven voor alle 10 minuten intervallen, voor de matricaria 2 proef. ΔRV en ΔT zijn hier relatief groot (11.8-42.3% en 5.6-9.2 $^{\circ}C$, respectievelijk) met een oneven distributie naar hogere temperaturen en lagere RV's. Deze hoge waarden komen vooral voor gedurende de dag, en hebben extremen op de momenten met hoge instraling. De variaties gedurende de nachten is veel kleiner.

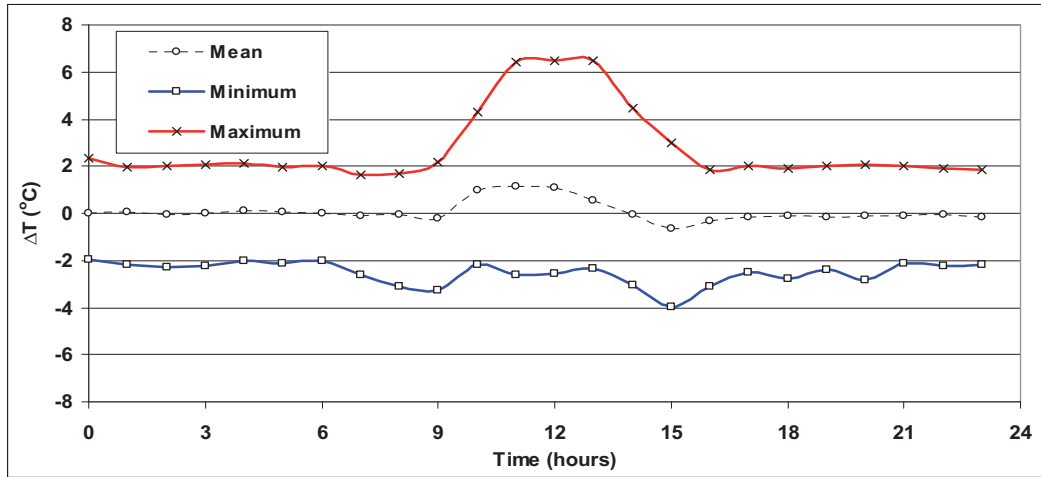


Figuur 3. Instantane verschillen voor T (boven) en RV (onder) gerefereerd aan het momentane gemiddelde over alle 100 sensoren voor de matricaria 2 proef

Het is bekend dat niet-geventileerde sensoren last hebben van directe instraling, en Van Tuijl et. Al (2008) adviseren daarom om een stralingsscherm toe te passen. Ondanks de toepassing van dit scherm, lijken de sensoren in praktische situaties toch nog last hebben van deze instraling. Daarom zijn de metingen ook absoluut vergeleken met de temperatuur waarden van de standaard RV-T-meetbox (T_{meetbox}). Als voorbeeld zijn daarvoor 5 dagen (1^{ste} periode) van het Matricaria 1 experiment genomen, waarin 4 dagen met middelmatige instraling en 1 dag relatief hogere instraling. Gemiddeld over 5 meetdagen en in blokken van 1 uur zijn zo de afwijkingen t.o.v. de meetbox van het sensor gemiddelde en ΔT_{min} en ΔT_{max} bepaald (Figuur 4).

Gedurende de nacht (18.00u-9.00u) blijft T_{gem} niet meer dan 0.2°C af te wijken van T_{meetbox} . De maximale afwijking is ongeveer $\pm 2^\circ\text{C}$ ($\sigma_T \approx 0.7^\circ\text{C}$), wat ruim meer is dan de nauwkeurigheid van de sensoren. Een groot deel van de variatie is daarom toe te schrijven aan plaatselijke verschillen in temperatuur. De meetbox geeft dus een goede maat voor de T_{gem} in de kas wat aangeeft dat de plaatsing van de meetbox representatief gekozen is. Voor een aantal sensoren hebben we grote meetfouten gevonden wanneer de RV in de buurt van 100% kwam. Alhoewel dit buiten het werkgebied van de sensoren ligt, en daarmee buiten de specificatie valt, kan deze situatie zich in de praktijk wel vaak voordoen en daarmee lastig zijn voor de teler.

Overdag (9.00u-18.00u) worden de variaties veel groter (-4°C tot +6.5°C). De $T_{\text{gemiddeld}}$ krijgt nu een positieve afwijking van 1.0°C rond 12 uur. Ook de standaard deviatie neemt toe tot 1.5°C. Omdat verwacht mag worden dat opwarming van de lucht door instraling ook door de meetbox opgemerkt wordt, en omdat de positieve afwijking het grootst is, is dit effect grotendeels toe te schrijven aan het directe instraling. Alhoewel het gemiddelde effect hier maar 1.0°C is, kunnen individuele sensoren veel hogere waarden aangeven (tot 7°C). Voor niet-geventileerde sensoren is het daarom aan te bevelen de sensoren ongevoeliger te maken voor instraling.



Figuur 4. Maximum en minimum afwijkingen op uurbasis voor temperatuur, vergeleken met de meetwaarden van de meetbox, gemiddeld over 5 dagen van de eerste periode (D1) voor de proef *matricaria 1*

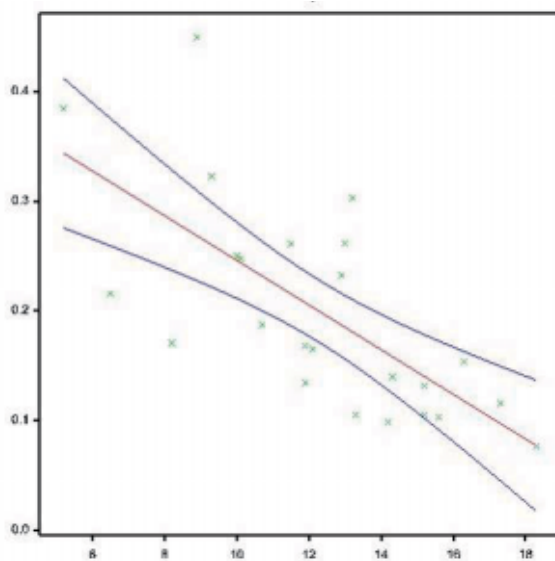
Door CFD simulaties uit te voeren, hebben Campen *et al.* (2007) laten zien dat ΔT sterk afhangt van het temperatuurverschil tussen binnen en buiten de kas, wat te omschrijven is als:

$$\Delta T_{\text{verschil}} = T_{\text{binnen}} - T_{\text{buiten}}, \text{ en: } \Delta T = f \cdot \Delta T_{\text{verschil}}, \quad (2)$$

met de factor $f = 0.20\text{--}0.25$. We hebben f voor alle proeven en perioden bepaald en f geplot als functie van $\Delta T_{\text{verschil}}$ (Figuur 5). De factor heeft een zwakke correlatie met $\Delta T_{\text{verschil}}$ ($R^2 = 0.46$), gegeven als:

$$f = 0.4497 - 0.02037 \cdot \Delta T_{\text{verschil}}, \quad (3)$$

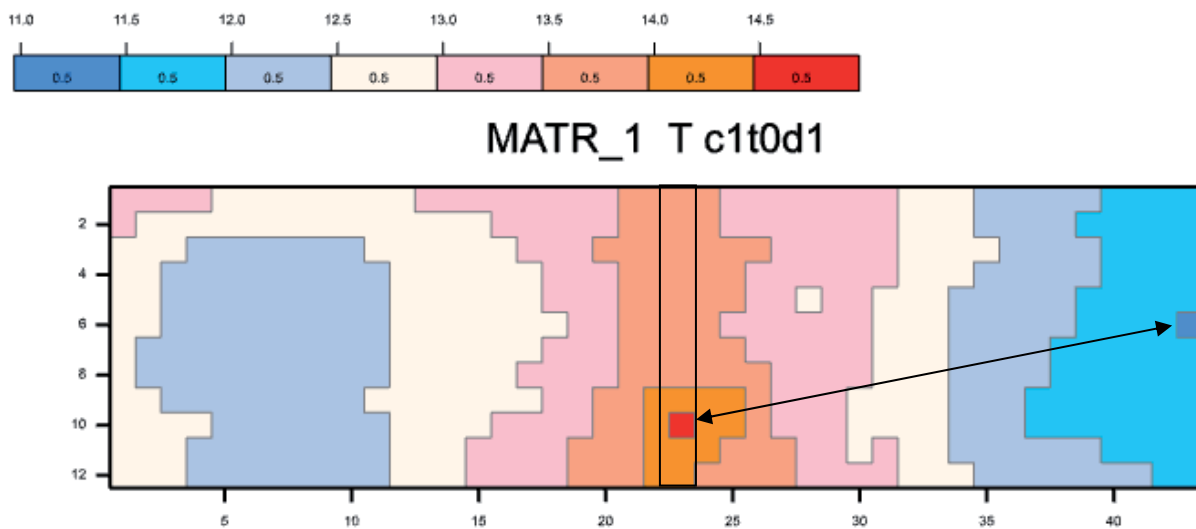
voor $5 < \Delta T_{\text{verschil}} < 20^\circ\text{C}$, wat in overeenstemming is met de resultaten van Campen *et al.* (2007) voor waarden van $\Delta T_{\text{verschil}}$ rond 10°C . Voor kleinere $\Delta T_{\text{verschil}}$ is f groter (tot 0.35), en voor grotere $\Delta T_{\text{verschil}}$, wordt deze kleiner tot 0.1.



Figuur 5. Factor f geplot als functie van $\Delta T_{\text{verschil}} (^\circ\text{C})$

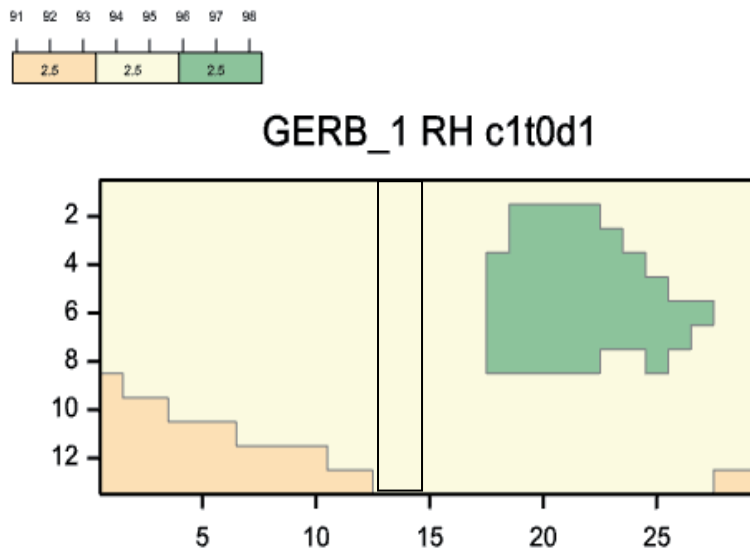
Statische klimaatvariaties

Voor alle 6 proeven, voor beide perioden (5 dagen) en voor dag zowel als nacht zijn alle horizontale lange termijn positie en layout afhankelijke variaties berekend aan de hand van een geo-statistische analyse. Deze analyse is gebaseerd op een variantie model, dat de afstanden en meetwaarden gebruikt tussen en van alle sensorparen. Kriging is gebruikt om uiteindelijk 24 2D-plots te maken voor de lange termijn, statische verdelingen van temperatuur en RV. Figuur 6 laat de temperatuur plot zien voor de matricaria 1 proef. Hier zien we een grote gradiënt (4°C) gedurende nacht tussen het middenpad en de zijgevels. Dit effect bleek ontstaan te zijn doordat de zijramen op een te wijde kier gezet waren. Het effect verdween in de matriacria 2 proef nadat de ramen op een kleiner ekier gezet waren.



Figuur 6. Statische temperatuurverdeling voor matricaria 1 (nacht periode D1). De kleuren geven gebieden aan met eenzelfde temperatuur in stappen van 0.5°C. De plot is met Kriging gemaakt met een grid grootte van 5 x 5 m², en de x- en y-as zijn in grid punten weergegeven. De pijl geeft de temperatuur gradiënt aan van middenpad (15°C) naar zijgevel (11°C)

Figuur 7 geeft de statische verdeling van RV voor de Gerbera 1 proef. In de rechtervleugel van het kascompartiment is hier een natte plek gevonden (RV = +2.5%). Alhoewel deze statische afwijking relatief klein is, heeft de teler het bestaan van deze natte plek bevestigd, en meldde regelmatig last te hebben van schimmelziekten en een slechtere kwaliteit in dit compartiment.



Figuur 7. Statische verdeling voor RV voor de gerbera 1 proef (nacht, periode D1)

Aan de hand van alle 2D-plots is een index berekend voor de uniformiteit van RV en T in de kassen ($U_{RV,T}$) welke de fractie geeft van het oppervlakte in de kas dat voldoet aan de eisen dat geldt: $\Delta T < 1.5^{\circ}\text{C}$ and $\Delta RV < 7.5\%$. Tabel 3 laat zien dat in de meeste gevallen de kassen een goede lange termijn homogeniteit hebben ($U > 0.8$), vooral voor RV en voor groenten gewassen. Behalve zoals al eerder gerapporteerd voor de matricaria 1 proef, hebben een paar kassen in een bepaalde periode (matricaria 2-D1, gerbera1-D2) een lage uniformiteit voor of RV of T gedurende de nacht. Dit geeft aan dat de teler mogelijk te maken heeft gehad met een kritisch hogere waarde voor RV of een ventilatie probleem. Op basis van de Kriging plaatjes is ook inschatting van de waarden voor ΔT en ΔRV bepaald, eveneens weergegeven in Tabel 3.

Tabel 3. Uniformiteits index ($U_{T,RV}$) voor T en RV , evenals een schatting van ΔT en ΔRV (aangegeven met een *) voor alle proeven, perioden en dag/nacht perioden.

	D1-nacht	D2-nacht	D1-dag	D2-dag	D1-nacht	D2-nacht	D1-dag	D2-dag
	U_T				U_{RV}			
gerbera 1	0.920	1.000	0.881	0.899	1.000	1.000	1.000	1.000
gerbera 2	0.844	0.546	0.992	0.942	1.000	1.000	1.000	1.000
matricaria 1	0.746	0.828	0.808	0.859	0.915	0.909	0.946	0.942
matricaria 2	1.000	1.000	1.000	0.999	0.560	0.806	0.992	1.000
tomaat	1.000	0.999	0.988	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
komkommer	1.000	1.000	1.000	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999
	$\Delta T^* (^{\circ}C)$				$\Delta RV (%)$			
gerbera 1	2.22	1.26	2.40	1.91	22.25	40.15	13.45	8.85
gerbera 2	3.25	2.21	2.40	1.96	16.64	14.54	13.45	11.26
matricaria 1	2.53	3.37	1.35	2.26	20.28	18.16	13.28	12.92
matricaria 2	0.92	1.14	1.31	0.97	15.32	17.31	12.46	11.63
tomaat	1.24	1.22	1.31	1.19	10.41	13.78	11.21	13.67
komkommer	1.06	1.14	1.10	1.12	26.45	26.29	11.16	11.25

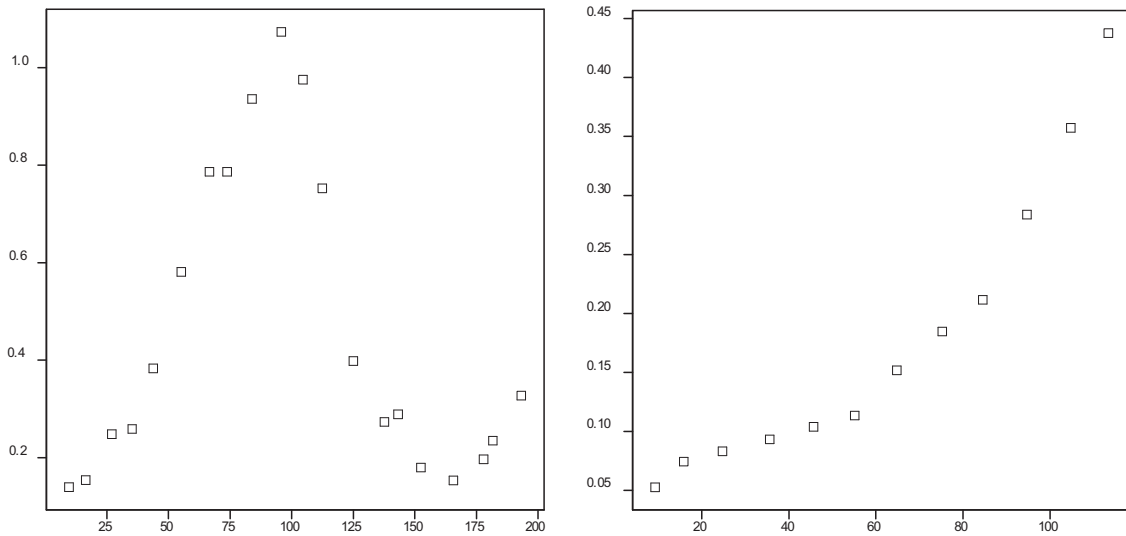
Deze tabel laat zien dat de variaties kunnen liggen tussen 1.0-3.4°C en 9-40% voor respectievelijk temperatuur en RV.

Dichtheid van het sensor meetnet

Om de dichtheid van het sensor meetnet te verkrijgen dat noodzakelijk is om geen koude of natte plekken te missen, is het belangrijk de meetnauwkeurigheid van het totale systeem te kennen evenals een norm voor de gewenste nauwkeurigheid. De meetnauwkeurigheid van de sensoren is bekend, maar deze geldt alleen voor een punt-meting, een klein meetvolume rond de sensor zelf. De meetnauwkeurigheid van het volledige systeem (in het gehele vlak) zit meer onzekerheid die samenhangt met de variabiliteit van RV en T in de kas. Om een indruk van de meet onzekerheid te hebben voor ieder willekeurig punt in de kas, kunnen variogrammen gemaakt worden. In de Figuur 8 staan twee voorbeelden afgebeeld. Hierin is de variantie van de verschillen tussen twee meetpunten als functie van de afstand afgebeeld. Voor kleine afstanden (nabij 0) gaat de variantie toe naar de meetfout van twee naast elkaar geplaatste sensoren, en naarmate de afstand groter wordt volgt deze curve de natuurlijke spreiding van het klimaat in de kas. De vorm van de curve hangt sterk af van de kas infrastructuur en ook van de klimaatomstandigheden binnen en buiten de kas. Bij Matricaria 1 is een maximum te zien bij ca. 90 m ($var. = 1.05$), wat duidt op een repeterend patroon in de kas waarbij meerdere kascompartimenten en linker en rechter vleugels zich herhalen., vooral gedomineerd door de sterke gradiënt tussen middenpad en zijvleugels. Voor de komkommerkas zien we dit patroon niet, omdat het klimaat veel homogener is in deze kleine kas.

Deze variogrammen kunnen gekarakteriseerd worden voor afstanden (d in m) kleiner dan 50 m door een lineaire functie te fitten met een snijpunt op de y-as en een helling. Een statistische analyse liet geen significant verschil zien tussen dag en nacht, en de variantie kan geschreven worden als:

$$Var(T, d) = 0.0344 + 0.0024 \cdot d \text{ en } Var(RV, d) = 1.097 + 0.0583 \cdot d. \quad (4)$$

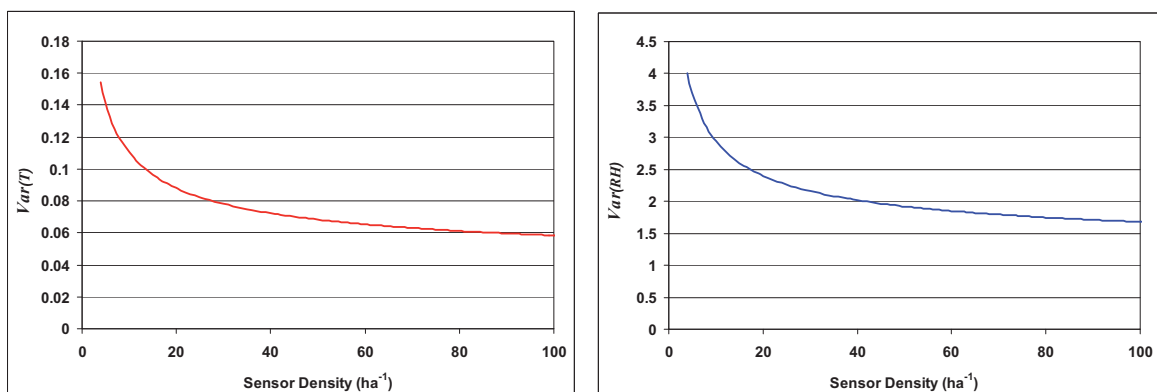


Figuur 8. Temperatuur variogrammen voor *matriacia1* (links) en *komkommer* (rechts) gedurende de nacht van periode D1. De horizontale as geeft de afstand tussen de sensoren en de verticale as geeft de variantie

We moeten ons realiseren dat deze data verzameld zijn in de winterperiode en dat in periodes met een lage $\Delta T_{\text{verschil}}$ de hellingen kleiner zullen zijn. Uit bovenstaande vergelijkingen kunnen de varianties voor een specifieke grid grootte (g) bepaald worden door de volgende relatie te gebruiken:

$$d = \sqrt{\frac{10000}{g}} \quad (5)$$

waarin g is gegeven als het aantal sensoren per hectare. Figuur 9 geeft de resultaten voor RV en T. Voor meetgrid dichtheden beneden 4 per hectare ($d = 50$ m) worden de curven niet meer betrouwbaar omdat de gefitte varianties sterk niet-lineair worden ten gevolge van de infra-structuur van de kas voor afstanden boven de 50 meter (Figuur 8). Voor zeer lage dichtheden (bv. 1 sensor per hectare) benaderen de curves de variantie van een enkele meetbox geplaatst op een arbitraire positie in de kas.



Figuur 9. Variantie voor T (links) en RV (rechts) als functie van de sensor dichtheid

Als we aannemen dat de benodigde nauwkeurigheid tenminste zo groot zou moeten zijn als de eis voor homogeniteit en we nemen daarvoor de Groenlabel eis van $\Delta T < 1.5^{\circ}\text{C}$ (Stichting Milieukeur, 2010), dan kunnen we daaraan voldoen als we tenminste 9 sensoren per hectare gebruiken. Toepassen van meer sensoren levert een hogere nauwkeurigheid en zekerheid, maar bij gebruik van meer dan 30 sensoren per hectare levert dat niet veel meer op als we de kosten voor investering in beschouwing nemen, omdat de curve daar heel vlak loopt. De figuren zijn indicatief en gebaseerd op een beperkte experimentele meetset voor een paar specifieke kassen, gewassen en perioden. Voor individuele gevallen kunnen de grafieken volledig anders uitpakken bijvoorbeeld in warmere periodes of bij andere kastypen. In ieder geval adviseren wij telers om voor hun specifieke situatie deze grafieken opnieuw te bepalen. Leveranciers van sensoren worden geadviseerd een zo hoog mogelijke meetnauwkeurigheid van de instrumenten na te streven.

Conclusie

Het draadloze meetsysteem heeft goed gefunctioneerd en onder normale bedrijfsomstandigheden ($15\text{--}25^{\circ}\text{C}$ en $\text{RV} < 95\%$) voldoen de sensoren voor hun doel met een gespecificeerde nauwkeurigheid van $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ en $\pm 3\%$. Overdag is er een grote invloed op de meting van T en RV door instraling, en vooral 's nacht, bij RV's groter dan 95%, worden de sensoren minder betrouwbaar voor RV. Er is een kleine onderlinge spreiding van de sensoren, en het is verstandig hiervoor te corrigeren, het liefst al bij de fabrikant. De fabrikanten worden geadviseerd een nauwkeurige versie van het sensor-element toe te passen (SHT75, Sensirion).

Bij de onderzochte kasteelten van matricaria, gerbera, komkommer en tomaat bestaat de horizontale variatie, gemeten als verschil tussen de maximale en minimale waarde (ΔT , ΔRV), uit systematische variaties ter grootte van $1.0\text{--}3.4^{\circ}\text{C}$ en $9\text{--}40\%$, en in iets mindere mate ook uit toevallige variaties ter grootte van $5.6\text{--}9.0^{\circ}\text{C}$; $11.8\text{--}42.3\%$. Er zijn grotere verschillen voor de verschillende teelten, en over het algemeen zijn de kassen met groente gewassen iets homogener dan de laagblijvende bloementeelten.

De ΔT van een kas is sterk gerelateerd aan de verschiltemperatuur tussen binnen en buiten de kas. De experimenten bevestigen de globale vuistregel dat ΔT een factor 4-5 kleiner is dan van het verschil in temperatuur buiten en binnen in de kas, voor temperatuurverschillen tussen buiten en binnen van rond de 10°C .

Het bepalen van de ΔT en ΔRV op basis van slechts één RV-T meetbox per hectare is onmogelijk, daarvoor is de natuurlijke variatie in kassen te hoog. Door een meetnet van sensoren met een hogere dichtheid toe te passen, kan de ΔT en ΔRV met meer zekerheid bepaald worden. Voor de onderzochte kassen, en voor de specifieke perioden, is gevonden dat bij toepassing van een sensordichtheid van tenminste 9 sensoren per hectare ($33 \times 33 \text{ m}^2$), ΔT en ΔRH bepaald kunnen worden zonder dat er koude of natte plekken over het hoofd gezien worden. Een lagere onzekerheid dan $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ en $\pm 2.6\%$ is daarbij niet haalbaar omdat de intrinsieke nauwkeurigheid is van een verschiltemperatuur gemeten met twee sensoren die naast elkaar staan. Naarmate het meetnet wijder gezet wordt neemt de onzekerheid toe, en in de meest ongunstige situaties met $\pm 0.16^{\circ}\text{C}/\text{m}$ en $\pm 0.57\%/ \text{m}$ voor de nachten en met $\pm 0.10^{\circ}\text{C}/\text{m}$ en $\pm 0.36\%/ \text{m}$ voor de dagen. Het toepassen van meer dan 30 sensoren per hectare wordt echter niet zinvol geacht omdat dat niet tot een relatief hogere meetnauwkeurigheid leidt en gezien de investeringen te kostbaar zou worden.

Op basis van bovenstaande resultaten kunnen de sensoren op verschillende manieren in de praktijk toegepast worden. Allereerst, de infrastructuur van de kas draagt sterk bij aan de (statische) inhomogeniteit van het klimaat in de kas. Door het uitvoeren van een eenmalige meting (bv. 1 week in een kritische periode) kunnen inhomogeniteiten in kaart gebracht worden, en kan de teler zijn kas zodanig aanpassen dat verschillen zoveel mogelijk automatisch genivelleerd worden. Hierbij is te denken aan het installeren of afstellen van een gevelverwarming, het aanbrengen van mechanische ventilatie, het isoleren van delen van de kas en dergelijke. Het regelmatig herhalen van de meting (bv. 1 x per jaar) maakt het ook mogelijk om defecten in de infrastructuur op te sporen, met het doel gerichte reparaties uit te voeren.

Verder kunnen in kassen ten gevolge van oncontroleerbare oorzaken koude en natte plekken ontstaan die een variabele locatie hebben ('wandelende koude plekken'). Structurele maatregelen hebben hier geen zin, maar ingrijpen moet op ieder moment mogelijk zijn. Een eerste stap op weg naar een praktische toepassing is het regelen op de standaard klimaatbox te vervangen door het regelen op de koudste en natste plek in de kas, gemeten met een dicht sensornetwerk. Om te voorkomen dat de klimaatcomputer dan automatisch gaat regelen op een toevallige koude plek die niet representatief is voor de gehele kas (b.v. nabij een vaak opengaande deur), kunnen veiligheids ingebouwd worden en kan bijvoorbeeld geregeld worden op een percentage oppervlak van de kas dat binnen een bepaalde bandbreedte moet liggen (uniformiteitsindex). Telers kunnen daarbij hun T en RV marges wat verruimen omdat er meer zekerheid zal bestaan over het werkelijke klimaat in de kas. Voorzichtige inschattingen laten zien dat energiebesparingen van 1-2% mogelijk zijn. Verder onderzoek is echter nodig om het mogelijke energiebesparing potentieel in kaart te brengen.

In voorgaande oplossing gaan we uit van het gebruik van de standaard aanwezige stuurgroepen (verwarming, ventilatie e.d.) in de kas. Een meest ver doorgevoerde regeling voor het continu homogeniseren van het kasklimaat zou gebruik kunnen maken van individueel stuurbare actoren. Het zal duidelijk zijn dat deze aanpak hogere investeringen vergen, maar toch zien we in de praktijk hier al wel aanleidingen voor. Gevelverwarming zouden hiervoor meer individueel gestuurd kunnen worden. In huidige semi-gesloten kassen wordt al veel gebruik gemaakt van horizontale of verticale ventilatie (airco-breeze). Het vergt weinig investering om deze individueel schakelbaar of regelbaar te maken. Ook geldt dit voor de lucht behandelingskasten die via de zijgevel met behulp van slangen, koude en droge lucht inblazen van onder het gewas. Alvorens deze technieken gecombineerd kunnen worden met een sensor meetnet, moet er eerst meer expertise opgebouwd worden over de manier waarop een sturingreep dan gepleegd moet worden.

Uitgebreide Rapportage

1 Inleiding

1.1 Probleemstelling

Een homogeen klimaat in de kas is de ultieme wens van iedere teler. Een homogeen klimaat betekent een homogeen gewas, en dat heeft niet alleen kwaliteitsvoordelen. Van nature zijn er in kassen bijvoorbeeld horizontale verschillen in temperatuur die als drijvende kracht werken voor de menging van lucht (Campen & de Gelder, 2007), maar een homogeen klimaat maakt het leven van de teler wel een stuk eenvoudiger. Minder ziekte, meer armslag bij instellingen van de klimaatcomputer, en uiteindelijk economisch voordeel. Inzicht in de ruimtelijke verdeling van klimaat (temperatuur en luchtvochtigheid) kan daarom een belangrijke bijdrage aan het bedrijfsresultaat opleveren.

Het klimaat in de kas wordt gemeten met een klimaatbox voor RV en T. Metingen blijven veelal beperkt tot één of hooguit enkele meetposities per kascompartiment, waarbij de teler een positie voor de meetbox kiest waarbij deze een zo goed mogelijke schatting geeft voor het gemiddelde klimaat in dat compartiment. De meetbox is een speciaal voor de tuinbouw ontwikkeld instrument met een geventileerde luchtinlaat en speciale behuizing die opwarming van de lucht door instraling voorkomt. Dat laatste maakt de box relatief duur en verder heeft deze nogal wat energie nodig om de ventilator aan te drijven.

Uit ervaring, maar ook uit de literatuur weten we dat het klimaat in kassen inhomogeen is. Dit is een gegeven, het is vastgelegd vanuit de fysica en telers accepteren dit, en handelen ernaar door bijvoorbeeld hun instellingen wat ruimer te kiezen en marges te hanteren. Luchtvochtigheid en temperatuur zijn aan elkaar gerelateerd. Bij gesloten kassen waar normaal een goede homogenisering is en het absoluut vochtgehalte vrij constant is, is de temperatuur de belangrijkste variabele. Wat acceptabele horizontale verschillen in temperatuur zijn is niet echt vastgelegd, maar Bloem (2000) hanteert een grens van $\pm 2^\circ\text{C}$. Een belangrijke vuistregel is dat 1°C minder stoken, wel 10% minder energie kost, dus een enorme energiebesparing kan opleveren. Ook de meerwaarde van een homogeen gewas kan aanzienlijk zijn, doordat het product veel meer waard is, en bijvoorbeeld in een keer afgezet kan worden. Er is dus alle reden voor telers om uit kosten/opbrengst overwegingen goede keuzes te maken t.a.v. hun klimaatregime en instellingen.

In de praktijk zijn er naast toevallige oorzaken voor verschillen in horizontale temperatuur ook heel veel niet toevallige oorzaken die in principe wel door de teler aangepakt zouden kunnen worden. Door daar inzicht in te krijgen is al veel winst te behalen. Vijverberg (1986) geeft aan dat door verschillen in verwarming, ventilatie en isolatie er horizontale verschillen kunnen ontstaan. Technische oorzaken zijn bijvoorbeeld een niet regelbare padverwarming, een slechte afstemming van gevelnet, verwarming en verwarmingsgroepen, het onvoldoende sluiten of ontbreken van een gevelscherp of (kapotte) ramen, natte plekken, de locatie van RV-T meetbox en de geometrie van de kas (grootte) en de inrichting. Oorzaken van niet-technische aard zijn de wind, instraling, verstoring in de kas, de instellingen door de teler.

Om een indruk te krijgen van de ruimtelijke verdeling van het klimaat in de kas zijn veel meer meetpunten noodzakelijk. Uit het oogpunt van kosten en de intensieve bekabeling is dit voor telers niet haalbaar op basis van de huidige gebruikte meetboxen. Recent komen echter nieuwe technieken voor het meten van RV en T op de markt welke technisch het potentieel hebben om de ruimtelijke verdeling te meten, tegen veel lagere kosten. Dit zijn draadloze mini-sensoren die reeds door verschillende leveranciers voor allerlei andere toepassingen op de markt komen. De grote vraag is: 'kunnen deze nieuwe draadloze sensoren zinvol toegepast worden in de tuinbouwpraktijk om ruimtelijke klimaatverdelingen in kaart te brengen?'

De projectenreeks 'Smart Dust 1,2 en 3' beoogt de ontwikkeling van een prototype van een goedkoop en eenvoudig inzetbaar meetsysteem om continu horizontale en verticale verschillen in temperatuur en RV in kassen (het micro-klimaat) in kaart te brengen, op basis van de inzet van een groot aantal kleine RV-T meetboxen welke draadloos worden uitgelezen. De achterliggende gedachte daarbij is dat zo'n systeem het mogelijk moet gaan maken om koude en natte plekken op te sporen, zodat telers in staat zijn hun klimaat optimaler in te stellen om zodoende een energiebesparing te kunnen realiseren. Om temperatuur- en vochtverschillen op te sporen is het voor de gebruiker van het meetsysteem van belang te weten dat hij goed meet. 'Goed meten' wil enerzijds zeggen dat de kwaliteit van de sensoren en de onderlinge communicatie goed werkt, en anderzijds moet ook vastliggen 'hoe' en 'wanneer' het netwerk van sensoren optimaal meet.

Vooralsnog zou de toepassing van deze sensoren gericht kunnen zijn op het eenmalig in kaart brengen van de ruimtelijke verdeling van het klimaat in kassen (carry-in service), met als doel systematische aanpassingen in de kas aan te brengen indien het klimaat niet homogeen genoeg blijkt te zijn. Een voorbeeld is het aanleggen en afregelen van een gevelverwarmingssysteem. Anderzijds zou gedacht kunnen worden aan een permanent geïnstalleerd systeem waarbij op basis van het gemeten ruimtelijke klimaat, het klimaat continu actief beïnvloed wordt om dit te homogeniseren. Hierbij denken we bijvoorbeeld aan een rijenventilatie systeem dat actief gestuurd kan worden op basis van de temperatuurverdeling over de rij. Deze ideeën sluiten aan op de huidige ontwikkelingen in (semi-) gesloten kassen en het 'Nieuwe Telen' waarbij het binnenbrengen van koude/droge lucht gebruikt wordt als alternatief voor ontvochtiging via de ramen.

In Smart Dust - deel 1 zijn de randvoorwaarden voor zo'n systeem vastgelegd en in deel 2 zijn oriënterende praktijkmetingen uitgevoerd in een praktijkkas bij een komkommerteelt in de herfst. Meetdata van horizontale en verticale verschillen zijn in deel 2 bepaald voor één seizoen, één gewas en één teler; en er zijn indicaties gegeven voor de sensordichtheid in de praktijk. De conclusie was dat de mini-sensoren niet meer dan 30 meter (ongeveer 10 per hectare) van elkaar gezet moesten worden om geen koude of natte plekken in de kas te missen. De meetnauwkeurigheid van het systeem was daarbij ca. 1.5°C. Het verhogen van het aantal meetpunten levert een hogere meetnauwkeurigheid op, maar niet erg veel (tot maximaal 1.1°C bij naast elkaar geplaatste sensoren). Uit de analyse in deel 2 kwam ook naar voren dat 10 meetdagen voldoende zijn om goed te kunnen analyseren. Het is echter onbekend of deze conclusies bij andere gewassen, andere verwarmingssystemen of seizoenen hetzelfde blijven. Deze informatie is daarom onvoldoende om een algemene lay-out voor het meetsysteem voor alle bedrijfssituaties te adviseren. Vooralsnog bestaat er dus een risico dat met een draadloos meetsysteem voor klimaat op basis van verkeerde uitgangspunten een conclusie wordt getrokken over de klimaatverdeling klimaat in kassen.

Er bestaat vaker de opvatting dat op basis van draadloze sensoren het mogelijk zou zijn om het micro-klimaat in het gewas te kunnen bepalen. De term 'micro-klimaat' behouden we ons echter voor om het klimaat aan te duiden zeer dicht bij de plant, in de grenslagen tot bijvoorbeeld enkele micro-meters van blad, bloem of stengels. Het micro-klimaat kan dan door plantdeskundigen gebruikt worden om via modellen bijvoorbeeld de ziektedruk te bepalen door de vochtbalans, de verdamping van de plant en het bladnat te berekenen (Jewett, 2001, Slegers and de Visser, 2009). Met de hier bedoelde sensoren, eigenlijk een draadloze mini-versie van de bestaande meetboxen, is het micro-klimaat niet te bepalen, omdat de toegepaste sensor-elementen en de behuizing van deze sensoren het eenvoudigweg niet mogelijk maken om zo dicht bij de plant te komen. Zouden we het te meten klimaat met de meetbox het macro-klimaat noemen, dan zouden we door het meten met de draadloze mini-sensoren het 'meso-klimaat' kunnen bepalen, iets tussen macro- en micro-klimaat in.

1.2 Doelstelling

Algemene doelstellingen

In dit project (deel 3) zal worden geprobeerd een betere onderbouwing te geven van de randvoorwaarden van een meetsysteem voor het bepalen van horizontale temperatuur- en vochtverschillen. Het doel is om een vlotte doorstroming van dit meetsysteem naar de praktijk te kunnen realiseren. Daarvoor zijn aanvullende metingen van in totaal 10 meetdagen met ca. 100 draadloze sensoren op verschillende praktijkbedrijven nodig (ander seizoen, ander gewas, ander verwarmingssysteem) waarbij een gedegen statistische analyse van alle data (ook uit deel 2) de meetnauwkeurigheid en minimale meetafstand van sensoren kan bepalen. Het resultaat zal zijn dat de kennisoverdracht naar de praktijk betrouwbaarder wordt en dat universeel toepasbare handvaten kunnen worden gegeven over de lay-out van een meetsysteem dat vervolgens door commerciële partijen in de markt kan worden gezet. De onderliggende doelstellingen zijn als volgt:

Technische doelstellingen

Bepaling van de betrouwbaarheid en meetnauwkeurigheid van metingen op bedrijven met verschillende gewassen, verwarmingssystemen en in verschillende seizoenen zodat nauwkeuriger kan worden aangegeven hoeveel sensoren per hectare nodig zijn om horizontale verschillen vast te leggen. Deze gegevens zijn nodig om een betrouwbaar netwerk te adviseren.

Energiedoelstellingen

Een meetsysteem kan pas energiebesparing opleveren als het betrouwbaar kan worden toegepast en randvoorwaarden (universeel) duidelijk zijn. Het onderzoek is faciliterend aan de doelstellingen voor energiebesparing. Toepassing leidt tot inzicht in verschillen en daardoor oplossing hiervan. Daarna is energiebesparing het gevolg. Een goede horizontale temperatuurverdeling kan tot 10% energie besparen (Nijs, 1997), omdat altijd naar de koudste plek wordt geregeld. Telers herkennen de koudste plek als een plek met verminderde lengtegroei of als plek voor uitbraak van ziekten.

Nevendoelstellingen

Bepaling van het minimaal benodigd aantal sensoren om een betrouwbare meting uit te voeren om horizontale verschillen te signaleren. Gelijkmatiser temperatuurverdeling leidt ook tot minder ziekten en plagen en dus minder gebruik van bestrijdingsmiddelen.

Concrete resultaten

Een eindrapport met de resultaten van de metingen en de statistische analyse met daarin ten minste een uitspraak over de lay-out van een meetsysteem voor het meten van horizontale verschillen in verschillende situaties. Twee artikelen in vakpers en in *Energiek2020* waarin één ingaat op de resultaten van deel 2 en één de resultaten van deel 3 bespreekt. Een internationaal artikel zal worden voorbereid. Zo mogelijk zullen voor verschillende gewasgroepen presentaties over dit onderwerp worden gehouden.

1.3 Keuzes, inpassing en randvoorwaarden

Keuzes voor kastypen, gewassen en systeem layout

Er is voor gekozen om de metingen uit te voeren bij twee vruchtgroentengewassen (komkommer en tomaat) en twee bloemen gewassen (gerbera en matricaria). Voorgesteld is om de metingen op hetzelfde komkommerbedrijf als in deel 2 in de winter (jan/feb) uit te voeren, terwijl metingen aan gerbera en matricaria, met geheel andere verwarmingssystemen, in herfst en winter kunnen worden uitgevoerd. Deze bedrijven zijn met name interessant omdat hier ook metingen naar ventilatievoud (Bontsema, 2009) plaatsvinden en een deel van de infrastructuur al aanwezig is (basisstation en PC), maar ook al klimaatdata worden verzameld waarmee correlaties kunnen worden gelegd in de statistische analyse. Daarnaast werd op een tomatenbedrijf gemeten waar via een andere meettechniek (akoestisch) temperatuurverschillen worden vastgelegd. Randvoorwaarden voor beide technieken zullen worden vergeleken. Van belang hierbij is het feit dat akoestisch meten uitgaat van één goed gemeten referentiepunt terwijl bij Smart Dust juist op zeer veel punten wordt gemeten en verschillen worden geconstateerd.

Inpassing en effecten

Dit project past binnen het energieprogramma en valt binnen het thema monitoring. Dit onderzoek voldoet aan een groeiende vraag in de praktijk naar meer inzicht in de ruimtelijke verdeling van temperatuur en RV. Voor de uiteindelijke toepassing van deze techniek in de praktijk dient de tuinder naast het draadloze meetsystemen met grote aantallen min-RV-T-sensoren, te beschikken over een procescomputer. Het onderzoek leidt niet tot meer of minder arbeid. Wel kan door een gelijkmatiger klimaat het welzijn van de medewerkers in de kas vergroot worden.

Randvoorwaarden

Om kosten te besparen worden metingen zo veel mogelijk uitgevoerd op bedrijven die al betrokken zijn bij andere meetprojecten en waar dus al een deel van de infrastructuur aanwezig is (Zuiderwijk, gerbera; van den Beukel, matriacaria; Doorn, komkommer). De metingen zijn verricht in het najaar (2008) en in de winter (2009) gevolgd door de statistische analyse in het voorjaar/zomer 2009.

Een ander punt is de flexibiliteit van de meetopstelling. Bij een juiste meting kunnen toepassingsmogelijkheden verschillend zijn. Daarnaast wordt de analyse eenvoudiger als van één gewas in twee seizoenen data worden verzameld en wanneer de sensoren zowel in X als Y richting op gelijke afstand van elkaar hangen. Er is gekozen voor een meetdichtheid van ca. 10x10m².

De volgorde van metingen en het tijdsschema is voor een belangrijk deel afhankelijk van de betrokken telers i.v.m. risico's voor ziekteoverdracht en teeltplanning. Om een betrouwbaar inzicht te krijgen zijn 6 metingen gepland met 10 volledige meetdagen.

2 Materiaal en Methode

2.1 Installatie in de kas

Ter verkrijging van praktijk meetgegevens is een observationeel experiment uitgevoerd in 6 proeven, waarbij gedurende 2-3 weken metingen verricht zijn bij een viertal praktijktelers van Gerbera, Matricaria, Tomaat en Komkommer, gedurende het seizoen 2008-2009. De metingen bij Gerbera en Matricaria zijn één keer herhaald in het winterseizoen. Bij komkommer is eerder, in het najaar 2007, een meting uitgevoerd in SMART DUST 2. Nu is in dezelfde kas in het winterseizoen gemeten. Voor tomaat is één meting verricht in de winterperiode 2009.

De metingen zijn verricht met 100 Wisensys nodes (Wireless Value, Emmen) die sensoren voor temperatuur en RV bevatten (zie Figuur 1), en een basisstation met een (industriële) PC, met Wisensys software versie: R4C6. De sensoren zijn voorzien van een klein wit plastic plaatje, dat boven de sensor-elementen geplaatst is, om directe instraling zoveel mogelijk te vermijden. De verbinding tussen PC en basisstation is gerealiseerd met een Tranzeo draadloze verbinding (zie Figuur 2). Het meetsysteem is eerder gebruikt in het SMART DUST 2 project en als zodanig beschreven in het rapport daarvan (van Os e.a., 2008).



Figuur 1. Gebruikte sensoren



Figuur 2. Industriële PC met monitoring software van Wireless Value (links), basis station (rechts: plastic box met zwart tape en kleine zwarte antenne) en Tranzee-antenne (rechts: kleine vlakke witte doos, A4-groot, naar links gericht)

De sensoren zijn in de kassen op een regelmatig grid in het horizontale vlak geplaatst (doelstelling: ca. 10 x 10 m²), op de hoogte van het groeipunt (bloem of vrucht). Het grid is in de x-richting¹ zo uitgelegd dat dit volledig van linker- naar rechterzijgevel overspannen werd. Omdat er maximaal 100 sensoren beschikbaar waren, werd er tevens voor gezorgd dat er in de y-richting een voldoende aantal meetpunten overbleef.



Figuur 3. Ophanging van sensoren. De Pelikaan clip bij Matricaria aan de heisdraad (links) en montage wijze van de draadloze sensoren bij tomaat aan de heisdraad van de verwarming (midden), en montage op een PVC-buis geschoven over een chassisdeel van het teeltsysteem (Gerbera)

¹ In dit rapport is als assenstelsel de y-as evenwijdig gekozen met het hoofdpad in de kas, met als O-punt de plek waar men de kas (of het kascompartiment) binnenkomt. De x-as staat daar haaks op en heeft het O-punt uiterst links in de linkervleugel. 2D-tekeningen zijn in dit rapport daarom allemaal zo gepositioneerd dat de onderzijde de plek is waar men de kas binnenkomt, het hoofdpad in het midden verticaal staat en dat de linker- en rechter zijvleugel aan weerszijden geplot zijn, alsof de kijker zo de kas voor zich ziet liggen.

Omdat onder praktijkomstandigheden de mogelijkheden om sensoren te plaatsen zeer divers zijn, is er gebruik gemaakt van verschillende ophang- of bevestigingsmethoden. Enerzijds is er bij matricaria, tomaat en komkommer gebruik gemaakt van het knijperonderdeel van de Pelikaanhaak (C. Pelikaan, n.n.) voor eenvoudige bevestiging aan gewasdraden, en anderzijds (Gerbera) zijn de sensoren bevestigd aan een PVC-buisje welke over een verticaal frameonderdeel van het gotensysteem geschoven kon worden (zie Figuur 3). In de praktijk was het ook niet mogelijk om een exact vierkant grid aan te leggen, omdat teelthandelingen en het gebruik van serviceplatforms niet gestoord konden worden. In veel gevallen moest daarom uitgeweken worden naar een rechthoekig grid gebaseerd op de kapbreedte, de lokale infra-structuur of de buis-railverwarming. Bij de Gerbera1 proef is gebruik gemaakt van een dubbel grid. Daarbij is een deel van de sensoren op een tweemaal hogere dichtheid geplaatst. Dit is gedaan om bij de statistische analyse een betere onderbouwing ten aanzien van de benodigde meetdichtheid te kunnen krijgen.

Van alle 100 RV-T sensoren zijn per minuut data vastgelegd via de Wisensys software, die per dag opgeslagen zijn in CSV bestanden. Ook de kalibratiebestanden zijn in hetzelfde format opgeslagen. Om een statistisch verantwoorde analyse te kunnen maken van de mini-sensor data is in iedere proef ongeveer 2 weken gemeten. Voor elke proef zijn 10 opeenvolgende meetdagen geselecteerd, opgesplitst in 2 meetperioden van elk 5 dagen. Voor de analyse zijn de meetdata van de minisensoren gemiddeld over 10 minuten, om de hoeveelheid data en de verwerkingstijd te beperken. Onderstaande tabel geeft een overzicht van de opzet van de 6 proeven in de verschillende meetperiodes.

2.2 Kalibratie onderlinge gelijkheid van de sensoren

Alvorens de meetinstallatie geïnstalleerd werd in de kassen is in het laboratorium telkens onder gecontroleerde omstandigheden een eenvoudige vergelijkingstest van de sensoren uitgevoerd, in dit rapport verder genoemd de 'Kalibratie'. Daartoe zijn alle sensoren (100 stuks) in een kartonnen doos gelegd en zijn de meetdata bij kamertemperatuur gedurende ca. 1 dag per minuut vastgelegd. Alleen voor de proef 5 (komkommer) is geen vergelijking uitgevoerd in verband met de korte periode tussen proef 4 en 5. In het laboratorium was de temperatuur op kamer temperatuur niveau (ca. 19-27°C) en was de vochtigheid relatief laag (RV = 25-49%). Deze test is geen kalibratie in de zin dat alle sensoren volledig op specificatie getest werden, maar een mogelijkheid om de gelijkloop (offset-kalibratie) van de sensoren in te schatten, evenals de spreiding die de sensoren laten zien.



Figuur 4. Voor de uitvoering van de vergelijkingstesten zijn de sensoren in een doos geplaatst

Tabel 4. Overzicht van proeven (periode oktober 2008 t/m april 2009)

Proef	1	2	3	4	5	6
Gewas	Gerbera 1	Matricaria 1	Gerbera 2	Tomaat	Komkommer 1	Matricaria 2
Kalibratie set	27-28 okt	25 nov	14 jan	3 feb	-	18 mrt
Meet Periode	30 okt-16 nov	27 nov-12 dec	16 jan-29 jan	6 feb-16 feb	19 feb-5 mrt	20 mrt-11 apr
Meet Dagen	304-321	332-347	16-29	38-48	50-64	84-101
Analyse Periode 1	1 nov-5 nov	30 nov-4 dec	18 jan-22 jan	7 feb-11 feb	21 feb-25 feb	1 apr-5 apr
Analyse Periode 2	6 nov-10 nov	5 dec-9 dec	22 jan-27 jan	12 feb-16 feb	25 feb-2 mrt	6 apr-10 apr
Analyse Dagen	306-315	335-344	18-27	37-47	52-61	91-100
Compartimenten ²	#2 (links) en #4 (rechts)	#1,#3 (links) en #2,#4 (rechts)	#2 (links) en #4 (rechts)	#2	#3 (rechts) en #5 (links)	#5 (links) en #6 (rechts)
Meetgrid	11.8 × 9.7m ² ³	13.5 × 9.6m ²	11.8 × 9.7m ²	15 × 12.8m ² ⁴	9 × 9.6m ²	13.5 × 9.6m ²
Meetgrid (extra)	5.9 × 4.85m ²	-	5.9 × 4.85m ²	-	-	-
Meetoppervlak	127.05 × 48.5m ²	202.5 × 48m ²	127.05 × 48.5m ²	215 × 64m ²	81 × 86.4m ²	202.5 × 48m ²
Kasoppervlak	140 × 58.2m ²	211 × 57.6m ²	140 × 58.2m ²	225 × 74m ²	87.25 × 89.4m ²	211 × 57.6m ²
Sensor grid	12 × 6 + (6 × 6)	16 × 6	12 × 6 + (6 × 6)	16 × 6	10 × 10	16 × 6
Aantal sensoren	99	96	99	96	100	96
Sensor dichtheid	88 per ha.	79 per ha.	88 per ha.	58 per ha.	128 per ha.	79 per ha.
Sensor hoogte	Op bloemhoogte	Meeloop met hoogte gewas	Op bloemhoogte	130 cm boven de goot	200 cm boven de grond	Meeloop met hoogte gewas
Sensor bevestiging	Aan PVC-buisje op goot	Knijper aan verticale hefdraad buisverwarming	Aan PVC-buisje op goot	Knijper aan verticale gewasdraad	Horizontale gewasdraad op 210 cm	Knijper aan verticale hefdraad buisverwarming
Klimaatcomputer	Hogendoorn Economic	Hogendoorn Economic	Hogendoorn Economic	Hortimax	Priva Integro	Hogendoorn Economic
Klimaat data	5 min. gemiddelden #2,#4 van 29 okt t/m 18 nov.	Dag/nacht/etmaal gemiddelden #1,#2,#3 en #4 (afdruk op papier)	5 min. gemiddelden #2,#4 van 16 jan t/m 29 jan.	5 min. gemiddelden #2,#5 van 10 t/m 16 feb.	uurgemiddelden #2,#3,#4,#5	Dag/nacht/etmaal gemiddelden #5, #6 (afdruk op papier)
LetsGrow.com	ja	Ja (#5,#6)	ja	-	-	Ja (#5,#6)
Ventilatie	Airco-breeze hele kas	Airco-breeze (#1 en #3)	Airco-breeze hele kas			Airco-breeze (#1 en #3)
Verwarming	groeibuis + buis/rail	groeibuis	groeibuis + buis/rail	buis/rail	groeibuis + buis/rail	groeibuis
Gevelverwarming	?	ja	?	?	?	ja ⁵
Schermen	2	1	2	?	?	1
Assimilatiebelichting	ja	nee	ja	nee	nee	nee

² De nummering van de compartimenten is zo gekozen als die door de teler gebruikt werd.

³ Bij Gerbera is bij het pad de x-grid afstand een weinig kleiner, in plaats van 11.8m is het daar 9.05m.

⁴ In verband met de beperkte ruimte bij de zijgevels zijn bij tomaat de laatste rijen sensoren zowel links als recht op 10m van elkaar gezet in plaats van op 15m.

⁵ Gevelverwarming was tijdens de tweede meetsessie bij matricaria defect.

Voor de vergelijkingsanalyse zijn uit de kalibratiedata, 5 representatieve kalibratie datasets gemaakt door een selectie van een aaneengesloten periode van 2 uur te kiezen, en gebruik te maken van 10-minuten gemiddelden. Voor deze kalibratie sets is uiteindelijk per tijdstip een gemiddelde waarde over alle sensoren bepaald. Daarna is voor iedere sensor, per tijdstip (12 tijdstippen), individueel de afwijking ten opzichte van dit gemiddelde bepaald. Vervolgens is een schatter voor de offset per sensor bepaald door het gemiddelde te bepalen over alle afwijkingen t.o.v. het gemiddelde. Vervolgens is de variatie van alle sensoren ten opzichte van dit gemiddelde bepaald, als schatter voor de nauwkeurigheden van de sensoren. Per sensor is vervolgens een offset-correctie factor bepaald door over alle 5 sets de offset-waarden te middelen. Het resultaat is vastgelegd in een kalibratiebestand, dat later gebruikt is bij de analyse om de ruwe waarden van de sensormetingen te corrigeren.

2.3 Data van klimaatcomputer

Naast de RV-T data zijn ook per proef gegevens van de klimaatcomputer van de teler vastgelegd in elektronische vorm. Hierbij is gebruik gemaakt van de mogelijkheden die daartoe bij de telers beschikbaar waren. Soms was deze data niet elektronisch, niet volledig, niet in het juiste compartiment of alleen als uur of dag gemiddelde waarde beschikbaar. De beschikbaarheid van klimaatdata per proef is weergegeven in Tabel 4. De vastgelegde meetdata van de klimaatcomputers zijn indien nodig verwerkt tot uurgemiddelden.

3 Resultaten, observaties en analyses

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de verschillende metingen en analyses gegeven. Tevens zullen waar zinvol observaties vermeld worden, en zullen toelichtingen bij de aanpak gegeven worden.

3.1 Statistische analyse

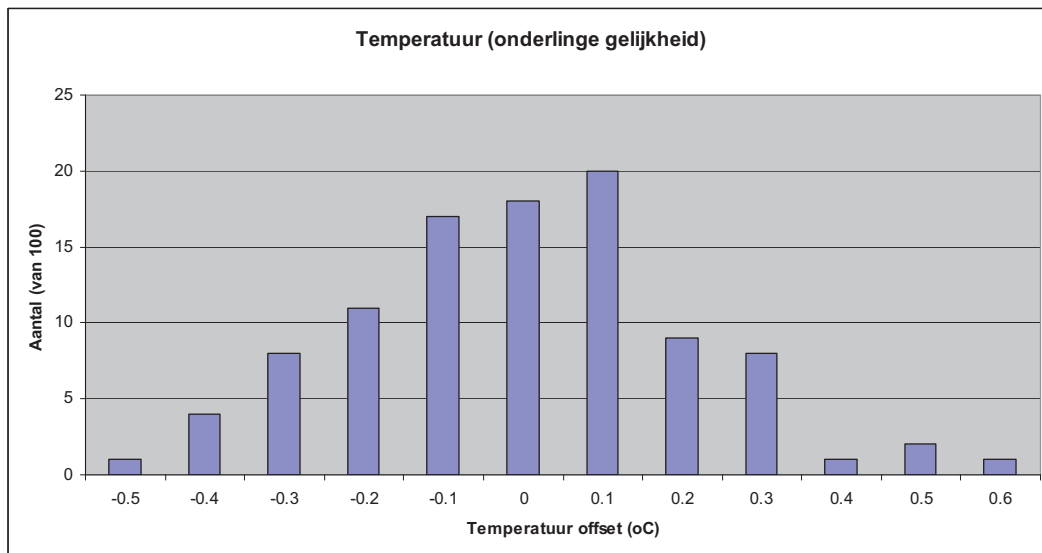
De aanpak van de analyse is in 6 stappen gebeurd:

1. Onderlinge gelijkheid sensoren, offset kalibratie.
2. Tijdsanalyse ruwe signalen RV, T (afwijkingen t.o.v. standaard RV-T meetbox).
3. Systematische horizontale variaties RV, T en AW (infra-structuur en seizoenen).
4. Tijdsafhankelijke horizontale variaties RV, T en AW (dag/nacht verschillen).
5. Sensor dichtheid en nauwkeurigheden om geen natte plekken te missen.
6. Toepassingsmogelijkheden draadloze mini-sensoren.

3.2 Onderlinge gelijkheid RV-T sensoren

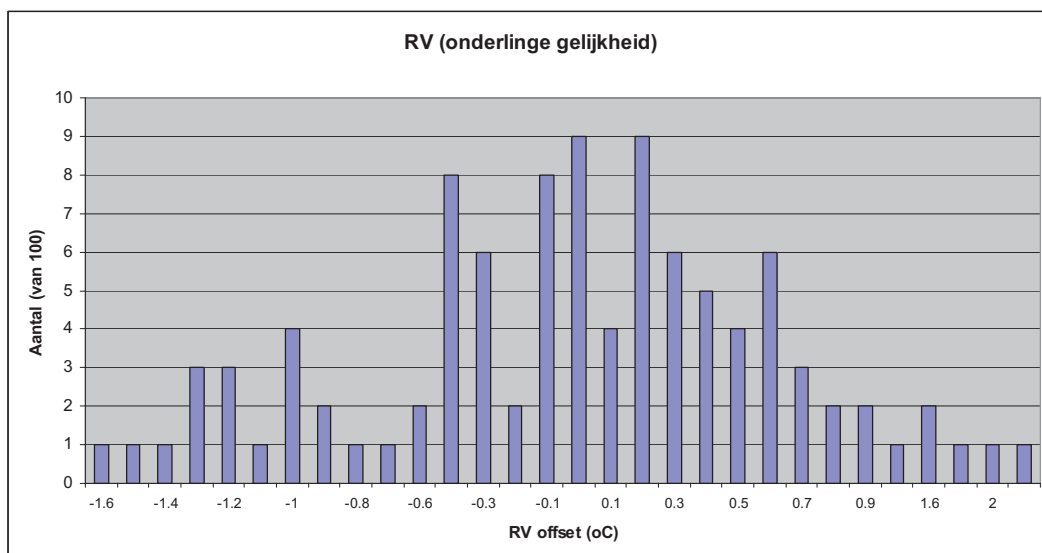
Als voorbeeld is in de volgende figuur een histogram gegeven van de verschillen van de sensor meetwaarden t.o.v. de gemiddelde temperatuur, voor alle 5 de kalibratieset. Bij de analyse is gezien dat de temperaturen in de doos per positie konden verschillen. Sensoren onder in de doos hadden een kleine systematisch hogere temperatuur dan onder in de doos (maximaal verschil: $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$). Bij de berekening van de offsets is hiervoor gecorrigeerd. Er is een nagenoeg normale verdeling te zien met een standaard deviatie van 0.20°C . Ook voor RV is dezelfde analyse uitgevoerd. In de doos voor RV trad ook een kleine plaatsafhankelijke systematische afwijking op van maximaal $\pm 0.5\%$. Hiervoor is gecorrigeerd. Bij de statistische analyse van de systematische afwijkingen voor temperatuur is gezien dat het betrouwbaarheid voor de bepaling van de offsets (l.s.d. op basis van 5 herhalingen) 0.1°C is. Voor ca. 50% van de sensoren wijkt de offset dus significant af van 0, en voor deze sensoren is het dus zinvol om een offset correctie uit te voeren.

Voor alle 5 de kalibratiesets afzonderlijk zijn dezelfde analyses uitgevoerd voor temperatuur en RV. De resultaten daarvan zijn weergegeven in Tabel 5, in de kolom: 'zonder correctie'. Vervolgens is voor iedere proef, voor elke sensor afzonderlijk een offset-correctiefactor bepaald, en de meetwaarden zijn met deze factoren gecorrigeerd. De zo ontstane standaard deviaties zijn ook weergegeven in Tabel 5, in de kolom: 'met correctie'. Er is nu duidelijk te zien dat na correctie de standaard deviatie kleiner wordt, soms wel met een factor 2.



Figuur 5. Spreiding in temperatuur, analyse over 5 meetsets, en na correctie van RV-verschillen voor positie van de sensoren in de doos (st.dev = 0.20°C)

Uit de metingen blijkt dus dat de sensoren onderlinge verschillen vertonen en dat correctie zin heeft. De vraag is of we dan één vaste correctie waarde per sensor kunnen gebruiken of dat deze waarde in de tijd verloopt? Om hierover iets te zeggen zijn de vijf kalibratiesets (die over een periode van globaal 6 maanden bepaald zijn) onderling vergeleken. Daarvoor is een Multi-variate analyse op de sets uitgevoerd en zijn bi-plots (zie Figuur 7) van de residuen gemaakt. Deze analyse heeft aangegeven dat de kalibratiesets onderling verschillen en dat er in de tijd geen eenduidig verband bestaat tussen deze sets. Dat geeft aan dat de sensoren regelmatig gecontroleerd moeten worden, in ons experiment bijvoorbeeld voor elke proef. In de praktijk is dat niet zo handig en daarom is gekeken of een 'gemiddelde kalibratie set' gebruikt kan worden.



Figuur 6. Spreiding in RV, analyse over 5 meetsets, en na correctie van RV-verschillen voor positie van de sensoren in de doos (st. dev. = 0.7%)

Om te kijken of deze verschillen systematisch zijn is een residuen analyse uitgevoerd voor het verschil van alle sensoren t.o.v. het momentane gemiddelde van alle sensoren. De figuren geven afwijkingen t.o.v. gemiddelde over alle 100 sensoren voor T en RV, voor en na een correctie, gemeten onder lab omstandigheden bij $\pm 22^{\circ}\text{C}$ en $\pm 50\%$ RV. We zien dat correctie voor onderlinge verschillen wel degelijk zin heeft, zeker voor de temperatuur (zie tabel). Een schatting voor de gelijkheid van de sensoren na correctie is:

Temperatuur: $\sigma_{\text{Temp}} = 0.29^{\circ}\text{C}$ met een meetfout van ($P=0,95, 2\sigma$) : $\pm 0.6^{\circ}\text{C}$.

RV: $\sigma_{\text{RV}} = 0.71\%$ met een meetfout van ($P=0,95, 2\sigma$) : $\pm 1.4\%$.

Volgens de fabrikant is de nauwkeurigheid gespecificeerd als volgt:

Temperatuur: $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ bij 25°C , $\pm 1^{\circ}\text{C}$ van 0°C to $+50^{\circ}\text{C}$, $\pm 2^{\circ}\text{C}$ van -20°C to $+80^{\circ}\text{C}$

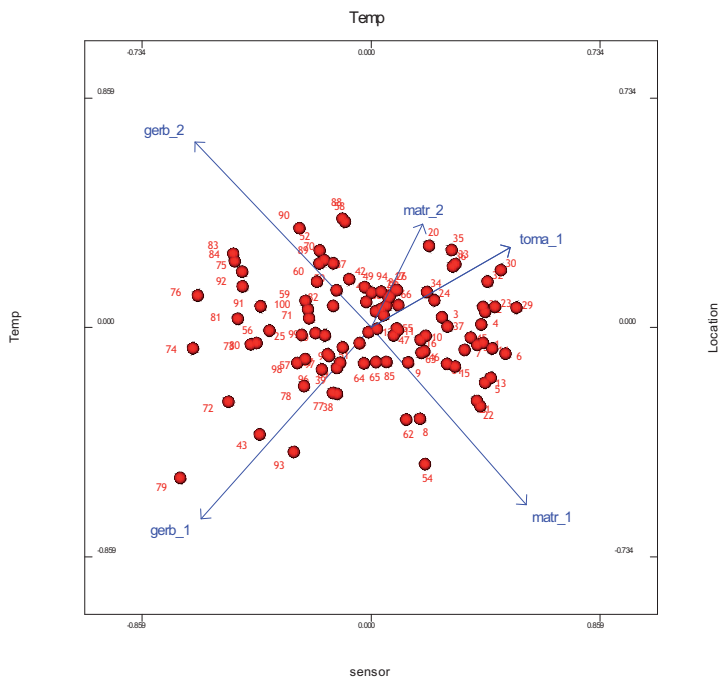
RV: $\pm 3\%\text{RV}$ van 20% to 80%RV; anders $\pm 5\%\text{RV}$

Deze schatting ligt binnen de specificaties van de fabrikant.

Tabel 5. Standaard deviatie voor temperatuur en RV zonder en met offset-correctie

<i>Standaard Deviatie</i>	<i>Zonder Correctie</i>	<i>Met Correctie</i>
Temperatuur (gemiddeld)	0.25	0.29
Gerbera 1T	0.24	0.19
Matricaria 1T	0.37	0.18
Gerbera 2T	0.22	0.21
Tomaat 1T	0.35	0.14
Komkommer 1T	*	*
Matricaria 2T	0.30	0.14
RV (gemiddeld)	0.80	0.71
Gerbera 1RV	0.51	0.84
Matriacria 1RV	1.13	0.73
Gerbera 2RV	0.60	0.51
Tomaat 1RV	1.14	0.53
Komkommer 1RV	*	*
Matricaria 2RV	1.66	1.02

De correctie is uitgevoerd bij één instelpunt ($\pm 22^{\circ}\text{C}$ en $\pm 50\%$ RV), en mag als zodanig niet gegeneraliseerd worden voor algemene nauwkeurigheid. Ook de offset correctie is natuurlijk maar bij 1 punt uitgevoerd. In de kas komen onder praktijkomstandigheden andere RV, T combinaties voor, zeker de RV waarden liggen in kassen veel hoger, tot wel boven de 90%.



Figuur 7. Voorbeeld van een bi-plot, waarin de residuen en de verschillende kalibratiesets vergeleken worden

Tabel 6. Standaard deviatie voor de onderlinge verschillen van sensoren t.o.v. het gemiddelde bij kalibratie, voor en na correctie van offsets. Schattingen voor de betrouwbaarheidsintervallen van de sensoren ($2 \times \text{st. dev. met } P=0.95$)

St. Dev.	T (°C)	RV (%)	Betrouwbaarheid T (°C)	Betrouwbaarheid RV (%)
Voor	0.28	0.83	± 0.56	± 1.66
Na	0.17	0.71	± 0.34	± 1.42

Als conclusie kunnen we stellen dat voor temperatuur de sensoren een onderlinge uniformiteit hebben met een standaard deviatie van 0.20 C. Voor RV is dat 0.7%. Wel moeten we hierbij opmerken dat dit geldt voor een vaste afwijking (offset) van sensoren t.o.v. elkaar gemeten bij kamer temperatuur (20-25°C). Bij de testen is het actuele gemiddelde over de 100 sensoren telkens als referentiewaarde gebruikt, welke op geen enkele wijze gerelateerd kan worden aan de werkelijke waarde voor temperatuur en luchtvochtigheid. De uitgevoerde meting moet dan ook niet gezien worden als een formele ijking, kalibratie of certificering van de sensoren. De meting geeft alleen een indicatie van de onderlinge gelijkheid, en zegt niets over de absolute kalibratie van de sensoren. Het is echter wel aannemelijk dat bij een formele kalibratie de sensoren niet beter zullen functioneren als in deze test gevonden.

3.3 Tijdsanalyse ruwe meetsignalen

Om globaal inzicht te krijgen in het gedrag van de sensoren is gekeken naar de meetsignalen gerelateerd aan de standaard RV-T meetbox. Deze analyse is uitgevoerd voor de Matricaria kas. Daarnaast is gekeken naar de meetsignalen t.o.v. het gemiddelde over alle 100 sensoren, om een indruk te krijgen van de variaties in alle kassen.

3.3.1 Observaties sensoren

Bij analyse van RV data is gebleken dat de sensoren met nummer 42, 63, 92 en 94 onbetrouwbare data leverden, en wel systematisch in alle proeven. Deze sensoren zijn daarom bij de verdere statistische analyse niet meegenomen. Bij nadere analyse van de specificaties van de sensoren is gebleken, ook na overleg met de leverancier, dat deze sensoren in het hoge vochtbereik (>95%) bij lage temperaturen, last kunnen hebben van condensatie op het sensorelement waardoor de sensor niet relevante RV-waarden kan geven. Doorgaans zijn deze waarden te laag, maar kunnen zelfs 0 of 100% aangeven. Deze eigenschap van het sensor element (leverancier Sensirion) is een gedocumenteerde en bekende eigenschap, en is dus niet specifiek voor de mini-sensoren van Wireless Value, maar zal in alle meetsystemen zich voordoen waar gebruik gemaakt wordt van dit type Sensirion chip, en daar waar hoge RV en lage temperaturen zich voordoen. Soortgelijke verschijnselen zijn ook waargenomen in andere door Wageningen UR Glastuinbouw uitgevoerde experimenten.

Dit probleem manifesteert zich in de praktijk regelmatig wanneer er dus hoge RV en lage temperaturen zijn, en valt alleen door het kijken naar de sensorwaarden niet meteen op. We zien dat dit verschijnsel voor sommige sensoren zich vaker voordoet dan bij anderen. Het verdient dus aanbeveling om de sensoren vooraf te controleren, en zeker bij hoge luchtvochtigheden.

3.3.2 Vergelijking mini-sensoren versus RV-T meetbox (Matricaria)

De RV-meetbox hing tijdens de eerste meetsessie in afdeling 3. De onderkant van de RV-meetbox hangt 25 cm boven de kop van de bloemen. Tijdens de teelt wordt de hoogte van de RV-T meetbox 2 keer bijgesteld. Afdeling 1 is relatief klein. Het is mogelijk dat het zwaartepunt van de metingen vooral ligt in afdeling 3. In afdeling 1 en 3 stond een ander gewas (enkelbloemigen), en dit laat een andere grond achter. Alleen in de afdelingen 1 en 3 draaien de AircoBreeze ventilatoren. Deze gaan aan/uit afhankelijk van het vochniveau in de kas.

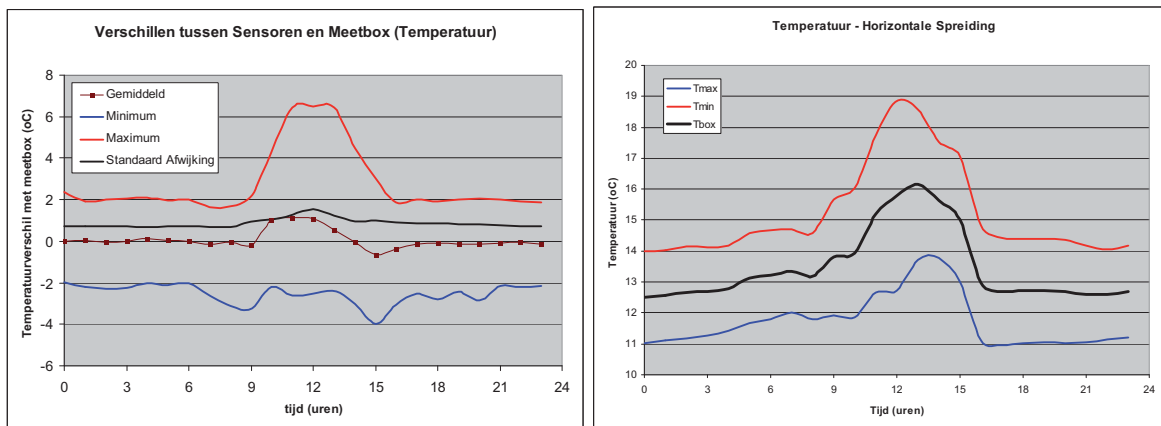
Meetdata RV-T-sensoren

Bij Matricaria is in de eerste periode een relatief grote T-gradiënt gevonden tussen middenpad en gevels. Daarom is een nadere analyse gedaan naar deze meetdata. Voor de eerste meetperiode, en de eerste 5 meetdagen zijn de sensordata van alle 100 sensoren nader geanalyseerd (GenStat) voor de verschillen tussen de gemeten data van de meetbox en de 100 sensoren te bekijken. De vergelijking is gedaan in de tijd en gemiddeld over de 5 meetdagen. Er is gekeken naar het gemiddelde verschil, het maximale en minimale verschil, en ook de standaardafwijking. De analyse is uitgevoerd voor blokken van 1 uur (24 waarden) en de resultaten voor T en RV zijn in de volgende figuren afgebeeld.

Temperatuur

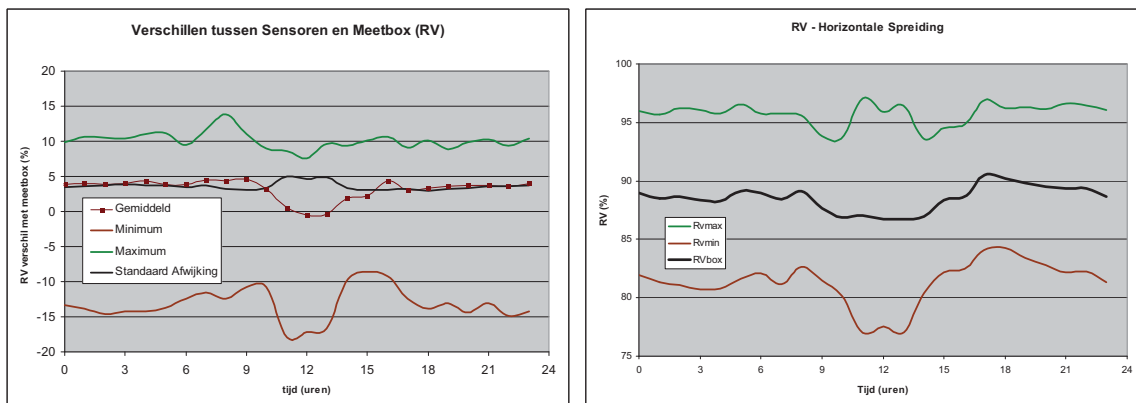
Gedurende de nacht (18.00u-9.00u) blijkt de gemiddelde temperatuur van de 100 sensoren niet meer dan 0.2°C af te wijken van de meetbox. De maximale absolute afwijking is niet meer dan 2°C. De standaard deviatie is ca. 0.7°C, wat wil zeggen dat 95% van alle sensorwaarden binnen een bereik van $\pm 1.4^\circ\text{C}$ t.o.v. de meetbox zitten. Bij de offset kalibratie is gebleken dat de onderlinge gelijkheid een st. dev. van 0.17°C heeft, dus een groot deel van de afwijkingen is in ieder geval toe te schrijven aan de plaatselijke verschillen (of andere oorzaken) tussen de sensoren. We mogen hier concluderen dat de meetbox een goede maat geeft voor de gemiddelde temperatuur in de kas, maar dat er wel degelijk verschillen tot $\pm 2^\circ\text{C}$ in de kas zijn.

Overdag (9.00u-18.00u) is de situatie anders. De variaties in de temperatuur (verschillen tussen meetbox en sensoren) worden veel groter. Maximaal meten we een positief verschil van 6.5°C en lagere waarden tot -4°C. De gemiddelde waarde krijgt nu een positieve afwijking van 1.0°C rond 12 uur. Ook de standaard deviatie neemt toe tot 1.5°C. Omdat de positieve afwijking het grootst is, is dit effect grotendeels toe te schrijven aan het directe instralingseffect op de sensoren. De negatieve verschillen rond 8 en 15 uur zijn waarschijnlijk ten gevolge van na-ijl effecten in de kas op plekken op relatief grotere afstand van de verwarmingen. We mogen hier concluderen dat de sensoren overdag - bij instraling - gemiddeld 1.0°C hogere temperatuur aangeven en dat de spreiding in de verschillende sensoren een factor 2 groter is.



Figuur 8. Spreiding van Temperatuur in relatie tot de Temperatuur gemeten met de standaard RV-T meetbox

Bij instraling geven de sensoren dus gemiddeld gezien een kleine (1.0°C) te hoge waarde aan. Sommige sensoren geven echter wel een veel hogere waarde aan (7°C). Voor de fabrikant van de sensoren is het aan te bevelen de sensoren minder gevoelig te maken voor instraling. Toch zou de meting iets verbeterd kunnen worden door de temperatuurmetingen te corrigeren met het verschil tussen de temperatuur gemeten met de RV-T meetbox en het gemiddelde over alle mini-sensoren. Hierbij moet wel aangemerkt worden dat alle sensoren dan op dezelfde hoogte hangen en evenveel kans hebben om in de zon te hangen. De standaard RV-T meetbox meting wordt daarbij dus als referentie (nulpuntjiking) gebruikt.



Figuur 9. Spreiding van Relatieve Luchtvochtigheid in relatie tot de RV gemeten met de standaard RV-T meetbox

RV

Gedurende de nacht vinden we bij Matricaria een stabiele waarde, die hier gemiddeld 4.0°C hoger ligt dan de meetbox (25 cm boven de sensoren). Overdag zakt het gemiddeld zelfs naar de waarde van de meetbox, maar hierbij moeten we aanmerken dat de mini-sensoren bij instraling een lagere waarde geven zodat de metingen van andere sensoren gecompenseerd worden.

3.3.3 Variaties binnen de mini-sensoren voor alle kassen

Voor alle proeven is naar op ieder tijdstip het gemiddelde van temperatuur en RV bepaald van alle 100 sensoren. Vervolgens is het verschil van elke sensor met die gemiddelde waarde genomen en gekeken naar de gemiddelde minimale en maximale afwijking van deze signalen over de hele meetperiode van 10 dagen. De resultaten zijn weergegeven in de volgende tabel. Om een indruk te krijgen van de standaard deviatie van het verschil is een inschatting van standaard deviatie gemaakt door het maximale verschil door 6 te delen (P=99%). Deze inschatting blijkt wat aan de pessimistische kant te zijn, omdat we gezien hebben dat de sensoren overdag last hebben van instraling, en de verdeling dus niet echt normaal is, maar scheef. Daarom is ook een inschatting van de standaard deviatie gemaakt door niet naar de maximale afwijking te kijken, maar naar een meer gemiddelde afwijking. Hiervoor is de spreiding van door 4 gedeeld (P=95%). Ook deze waarden zijn opgenomen in de tabel.

Uit de getallen zien we dat voor temperatuur met name de laagblijvende bloemen gewassen een grotere spreiding laten zien voor temperatuur. In de hoogopgaande groente gewassen is de spreiding in temperatuur kleiner tot bijna een factor twee. Ook voor RV zien we een zelfde beeld. De groenten gewassen laten globaal een factor twee minder spreiding zien dan de bloemen gewassen. Mogelijk dat de invloed van straling op de sensoren in de groenten gewassen minder sterk is doordat hier meer schaduwwerking optreedt.

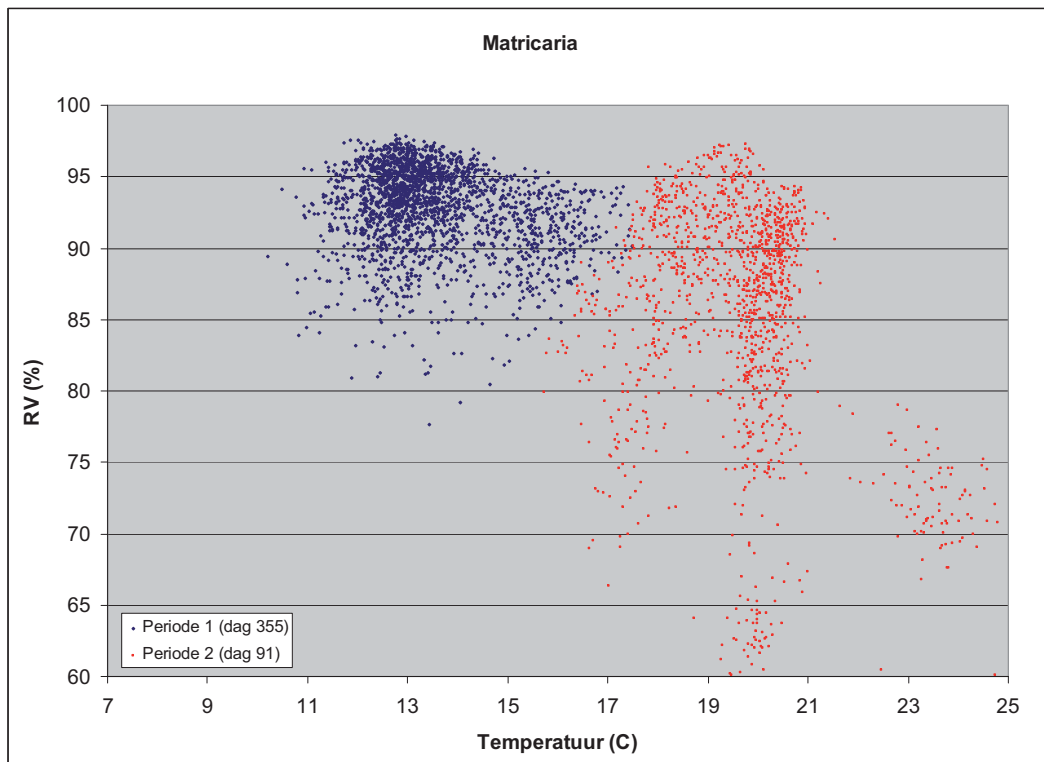
Tabel 7. Analyse over sensorwaarden t.o.v. gemiddelde voor alle 100 sensoren voor alle 10 meetdagen. Voor de schatting van standaard deviatie is gebruik gemaakt van $\sigma = ((\Delta T_{max})_{gem} - (\Delta T_{min})_{gem})/6$

	Temperatuur (°C)				RV (%)			
	ΔT_{min}	ΔT_{max}	$\sigma_{\Delta T}(P95)$	$\sigma_{\Delta T}(P99)$	ΔRV_{min}	ΔRV_{max}	$\sigma_{\Delta RV}(P95)$	$\sigma_{\Delta RV}(P99)$
Gerbera 1	-3.8	5.4	0.75	1.53	-16.8	12.4	1.85	4.86
Gerbera 2	-3.1	4.2	1.00	1.21	-13.0	9.0	1.77	3.66
Matricaria 1	-2.8	2.8	0.80	0.93	-16.4	8.5	3.55	4.15
Matricaria 2	-4.2	4.8	0.80	1.50	-22.6	19.7	3.28	7.05
Tomaat	-2.8	2.8	0.55	0.93	-21.9	10.6	1.65	5.41
Komkommer	-3.1	3.4	0.40	1.08	-11.4	0.4	1.95	1.96

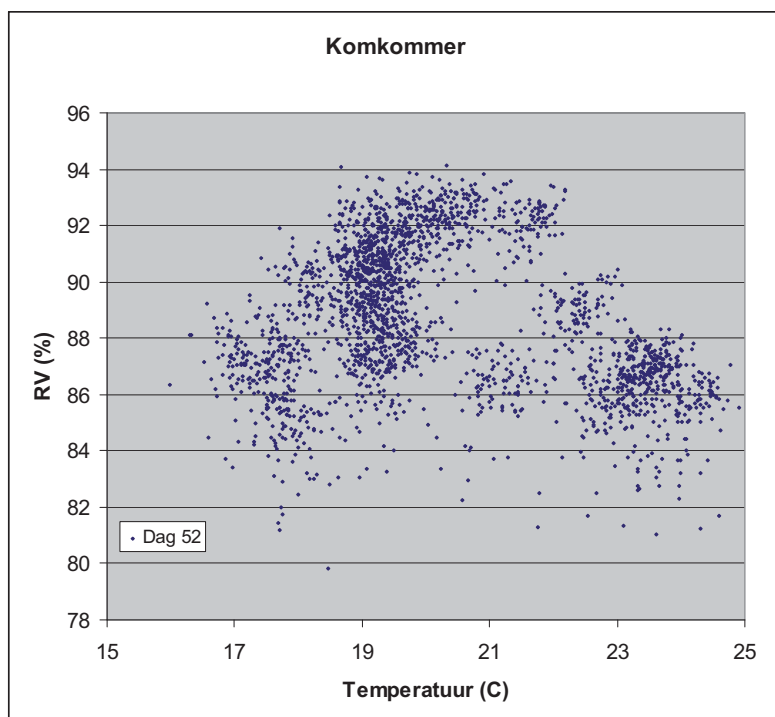
Doordat er beschikking is over alle RV-T meetdata van alle sensoren kunnen ook RV-T plaatjes gemaakt worden voor de kassen. Indien de plaatjes gemaakt worden over een hele dag, zijn deze bijzonder illustratief voor de teler om in een oogopslag te zien hoe de spreiding m.b.t. RV en T in de kas is verlopen. In principe kunnen dit soort plaatjes ook over kortere (minuten) tot langere (weken) perioden gemaakt worden. In de volgende figuur zijn plaatjes gegeven voor matricaria en komkommer als voorbeeld.

Voor de matricaria kas zijn twee plots gegeven voor telkens een dag in periode 1 en 2. Het valt op dat in periode 1 kouder is geteeld. In beide periode worden RV's gevonden tot ca. 97-98%. De tweede periode kenmerkt zich door meer instraling, en het setpoint voor de regeling was daar op 20°C gezet. De vrij lage waarden van RV (tot 60%) worden veroorzaakt doordat overdag de zon direct instraalt op de sensoren.

Voor komkommer zien we dat de RV tussen de 80 en 94% is gebleven gedurende deze dag. Gedurende de nacht is het niet kouder van 15.5°C en gedurende de dag is de maximale temperatuur 25°C. De teler zelf zou moeten beslissen of op basis van deze grafiek de set-points voor T en RV mogelijk iets aangepast zou kunnen worden.



Figuur 10. RV-T diagrammen voor *Matricaria* 1 en 2 geplot voor een dag uit elke periode

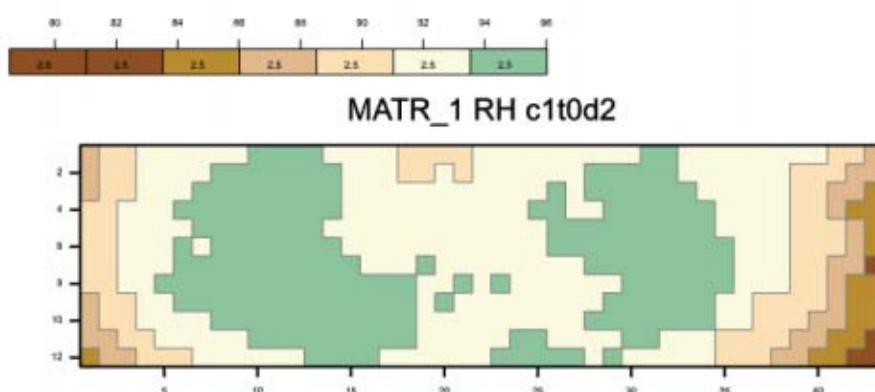


Figuur 11. RV-T diagrammen voor *Komkommer* geplot voor dag 52

3.4 Systematische horizontale variaties

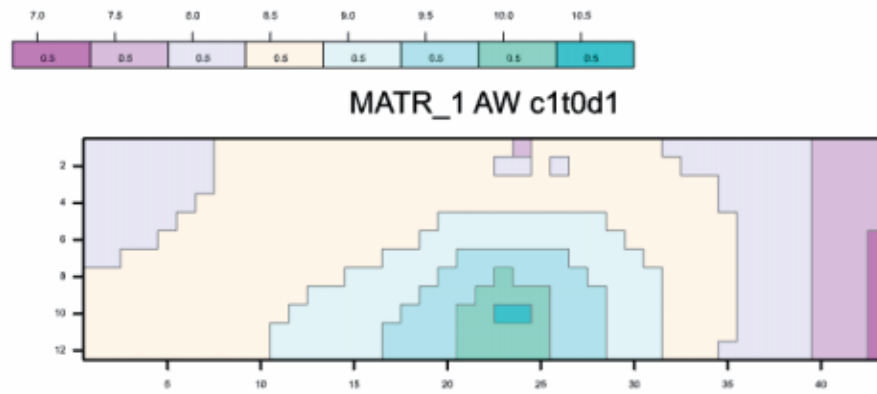
Ten aanzien van horizontale verschillen in de temperatuur van de kaslucht wordt door Stichting Milieukeur (Groenlabel, 2010) aangegeven dat dit kleiner dan 1,5°C mag zijn wanneer gemeten op een hoogte van 1,50 m; in een stookafdeling bij een vaste buistemperatuur van 60°C (of bij een lager maximum); in situatie met binnenscherm open én met binnenscherm dicht. Binnen deze rapportage gebruiken we voor dit verschil in temperatuur tussen het warmste en koudste punt in de kas (in een horizontaal vlak) op ieder moment de naam: ΔT . Ten aanzien van de horizontale variatie van de luchtvochtigheid (ΔRV) worden geen eisen gesteld. Wel worden er eisen gesteld aan de nauwkeurigheden van de toegepaste sensoren, zoals nader toegelicht in §3.2. Voor luchtvochtigheid geldt bij Groenlabel een nauwkeurigheid van $\pm 3\%$ RV in het regelgebied van 70-90% en $\pm 5\%$ RV in het regelgebied van 50-70%. Omdat we een natte plek met dit soort sensoren in ieder geval niet veel nauwkeuriger kunnen meten dan deze waarden, kiezen we hier een praktische norm van $\pm 3.75\%$ ⁶.

Voor alle 6 de experimenten, en voor beide perioden van 5 dagen en zowel voor dag als nacht (zonopgang/zons-
ondergang) zijn vervolgens gemiddelden van de gemeten temperaturen en luchtvochtigheden bepaald voor alle sensoren. In totaal levert dit $6 \times 2 \times 2 \times 2 = 48$ situaties op. Op basis van een statistisch model voor de variantie van de meting (onnauwkeurigheid) als functie van de afstand van de sensor tot het punt waar men wil meten) is door middel van Kriging voor elke situatie een 2D verdelingsplaatje gemaakt. Deze 2D-plaatjes geven een direct inzicht in de systematische afwijkingen in de kas voor T en RV. Als afgeleide van RV en T zijn ook voor Absoluut Watergehalte (AW) plaatjes gemaakt. Als voorbeeld zijn hieronder een paar plaatjes gegeven. Bij iedere figuur is een legenda gegeven welke de verdeling in stappen van 2.5% voor RV geeft, van 0.5°C voor temperatuur en een 0.5g/liter voor AW, waarbij ook de absolute schaal telkens kan variëren. In Figuur 12 en Figuur 13 zien we zo bijvoorbeeld dat de rechter zijgevel van de kas bij *matricaria* telkens droger is dan in het midden van de kas. In de Gerbera kas (Figuur 14) zien we een sterke temperatuur gradiënt van het midden van de kas naar de zijgevels van wel 3.5°C (14.5-18°C) in de nachtelijke periode. Verder zien we dat voor komkommer (Figuur 15) en tomaat (Figuur 16) de variaties over de 5 daagse periode gedurende de dag relatief klein blijven (resp. $\pm 0.5^\circ\text{C}$ en $\pm 2.5\%$ RV).

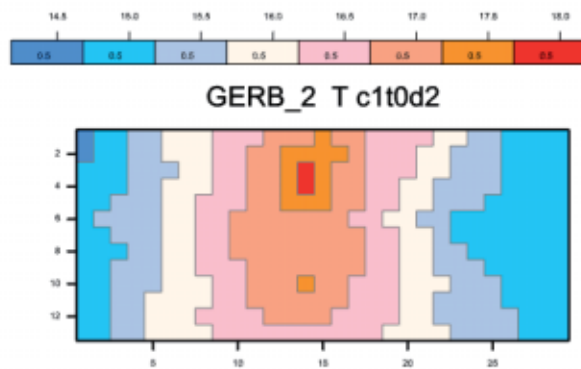


Figuur 12. *Matricaria*, RV, nacht, periode 2

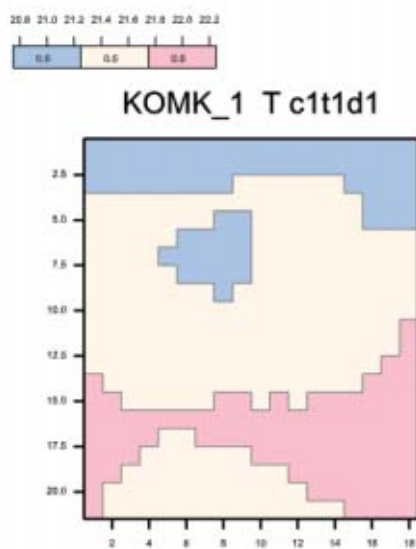
⁶ De norm van $\pm 3.75\%$ is gebaseerd op het feit dat 2D-plaatjes voor RV in dit rapport gemaakt zijn met een resolutie van 2.5%. 3 stappen vertegenwoordigen daarmee een bereik van 7.5%. In principe kan iedere andere norm gebruikt worden.



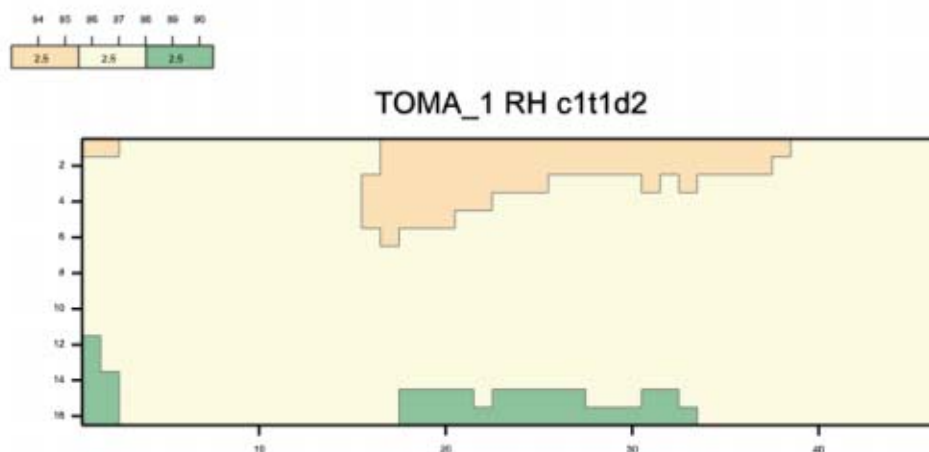
Figuur 13. *Matricaria*, AW, nacht, periode 1



Figuur 14. *Gerbera2*, T, nacht, periode 2



Figuur 15. *Komkommer*, T, dag, periode 1



Figuur 16. Tomaat, RV, dag, periode 2

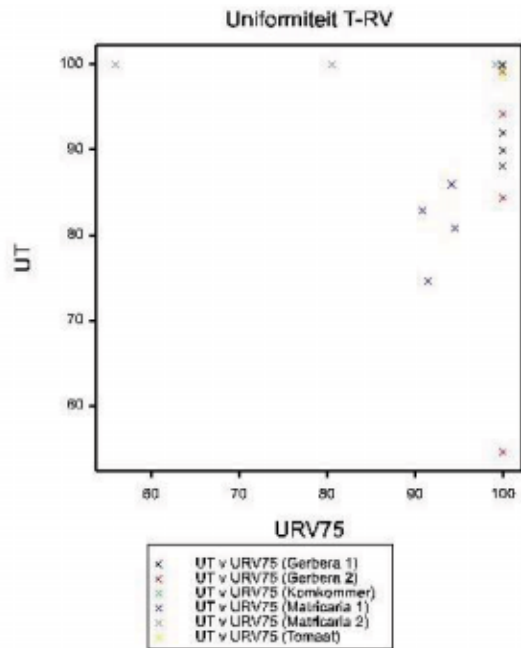
De figuren geven zo een direct grafisch inzicht in de temperatuur en RV variaties in de kassen. Om deze figuren meer hanteerbaar in de vorm van een getal te maken, introduceren wij hier een index voor de uniformiteit van de kas: U . Deze index geeft het percentage oppervlak in de kas aan dat voldoet aan de door ons gestelde norm voor die parameter. Zo kan op basis van de figuren, eenvoudig door het tellen van de gekleurde blokjes, de uniformiteitsindex bepaald worden als volgt:

- Temperatuur: kleuren lichtblauw (-0.5°C), wit (0°C) en roze ($+0.5^{\circ}\text{C}$) tellen mee als binnen de norm van 1.5°C ;
- RV: kleuren wit, geel en groen ($\pm 3.75\%$) telt mee als binnen een norm.

Het resultaat van de tellingen is weergegeven in de volgende tabel.

Tabel 8. Uniformiteitsindex (U) voor temperatuur en RV bij alle proeven voor zowel dag ($t1$) - nacht ($t0$) als de 1^{ste} en 2^{de} meetperiode (D1- D2)

U (%)	T				RV			
	Nacht		Dag		Nacht		Dag	
	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2
Gerbera 1	92.0	100.0	88.1	89.9	100	100	100	100
Gerbera 2	84.4	54.6	99.2	94.2	100	100	100	100
Matricaria 1	74.6	82.8	80.8	85.9	91.5	90.9	94.6	94.2
Matricaria 2	100.0	100.0	100.0	99.9	56.0	80.6	99.2	100
Tomaat	100.0	99.9	98.8	100.0	100	100	100	100
Komkommer	100.0	100.0	100.0	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9



Figuur 17. Uniformiteit voor RV en T geplot met de kas als parameter, en grenswaarden voor $\Delta T=1.5^{\circ}\text{C}$ en $\Delta RV=7.5\%$

Uit de grafiek van Figuur 17 zien we dat bij Matricaria in de eerste periode de uniformiteit voor RV en T laag was, dit terwijl in de tweede periode met name de temperatuur uitermate uniform was. De vochtvariatie in de kas blijft erg hoog. De Gerbera kas laat voor T grotere variaties zien in uniformiteit van 80-100% in de eerste periode.

Zowel de komkommer- als de tomatenkas hebben een hoge uniformiteit voor temperatuur en een uniformiteit voor RV welke boven de 99% blijven.

Er is een ANOVA analyse uitgevoerd voor de uniformiteit met DAG/NACHT als variabele. De gemiddelde uniformiteit voor Temperatuur is 92.7%. Alhoewel er een verschil tussen dag (94.7%) en nacht (90.7%) gevonden is, is dit verschil niet significant (l.s.d.=7.4%). Mogelijk dat dit komt door de invloed van de straling op de gemeten temperatuur van de sensoren gedurende de dag. Bij de proeven en onder de gegeven condities hebben de kassen een grote spreiding van uniformiteit voor T laten zien. Bij Matricaria was dit in de eerste meetperiode te verklaren doordat zijramen op een te grote kier waren afgesteld. In de tweede periode, waarbij dit hersteld was, was de temperatuur veel homogener.

Campen (2007) geeft aan dat de horizontale variatie van temperatuur sterk beïnvloed wordt door het verschil in temperatuur tussen de kas- en buitenlucht. Een schatting voor de horizontale temperatuur variatie in de kas is een fractie van 0.20-0.25 van dit verschil. Uit de klimaatcomputer zijn daarom ook de metingen van T_{buiten} gehaald. De verschiltemperaturen zijn opgenomen in de volgende tabel.

Tabel 9. Het verschil tussen de buiten en binnen temperatuur voor dag en nacht gemiddeld over 5 dagen per periode (D1- D2)

$T_{binnen} - T_{buiten} (^{\circ}C)$	D1-nacht	D2-nacht	D1-dag	D2-dag
Gerbera 1	10.0	8.2	12.9	11.9
Gerbera 2	10.7	12.1	13.2	16.3
Matricaria 1	8.9	9.3	11.5	10.1
Matricaria 2	14.2	11.9	6.5	5.2
Tomaat	13.3	14.3	17.3	18.3
Komkommer	15.2	13.0	15.6	15.2

Daarnaast zijn de verschiltemperaturen $\Delta T = T_{max} - T_{min}$ uit de 2D-plots gehaald en is gekeken naar de relatie met de verschiltemperatuur $\Delta T_{verschil} = T_{binnen} - T_{buiten}$. In de volgende tabel staan de waarden voor de maximale variatie van de temperatuur in de kas.

Tabel 10. Het verschil tussen de maximale en minimale temperatuur in de kas gemiddeld over 5 dagen per periode (D1- D2)

$T_{max} - T_{min} (^{\circ}C)$	D1-nacht	D2-nacht	D1-dag	D2-dag
Gerbera 1	2.5	1.4	3.0	2.0
Gerbera 2	2.0	2.0	4.0	2.5
Matricaria 1	4.0	3.0	3.0	2.5
Matricaria 2	1.4	1.6	1.4	2.0
Tomaat	1.4	2.0	2.0	1.4
Komkommer	1.6	3.4	1.6	2.0

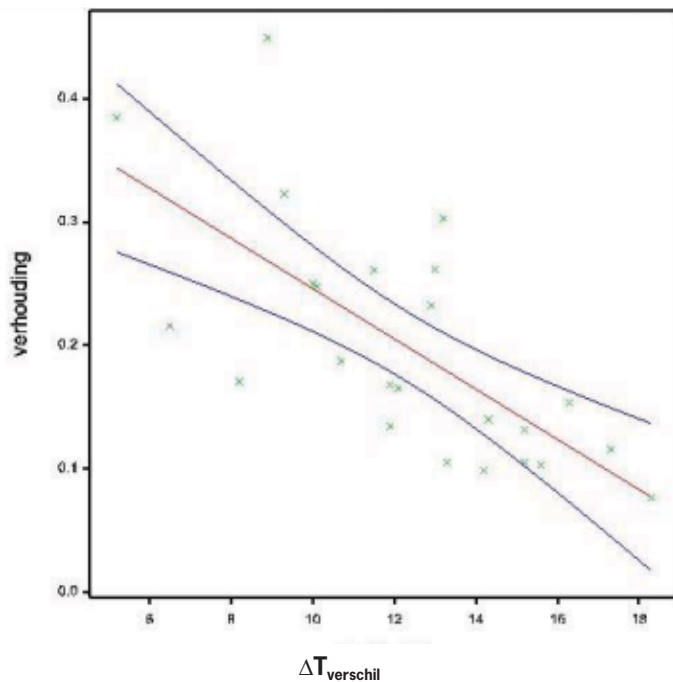
Voor elk datapunt is vervolgens de verhoudingsfactor $V = (T_{max} - T_{min}) / (T_{binnen} - T_{buiten})$ bepaald. De resultaten zijn uitgezet in de volgende figuur. Lineaire regressieanalyse geeft aan dat er bij benadering een lineair verband is met de verschiltemperatuur, bepaald met een percentage verklaarde variantie van 46.2% ($F < 0.01$). Voor grote verschiltemperaturen neemt de factor af. Het verband kan geschreven worden als:

$$V = 0.4497 - 0.02037 \Delta T_{verschil}; \quad \text{met } \Delta T_{verschil} = (T_{binnen} - T_{buiten}).$$

Hieruit kan afgeleid worden dat de systematische horizontale variatie $\Delta T = T_{max} - T_{min}$ als volgt te schatten is:

$$\Delta T = (0.4497 - 0.02037 \Delta T_{verschil}) \cdot \Delta T_{verschil}; \quad \text{waarbij: } 5 < \Delta T_{verschil} < 20^{\circ}C.$$

Deze schatting komt goed overeen met het getal (0.20-0.25) welke door Campen (2007) gegeven is. Voor een nacht waarbij de verschiltemperatuur binnen-buiten $10^{\circ}C$ is, rekent de formule een fractie van 0.246 uit. Het lijkt er dus op dat de schatting van Campen (2007) als redelijke vuistregel genomen kan worden, echter men moet zich realiseren dat in de praktijk deze factor variatie heeft en op zich afhangt van de temperatuur verschillen buiten-binnen.



Figuur 18. Verband tussen de verhouding van $V = \Delta T / \Delta T_{\text{verschil}}$ in relatie tot $\Delta T_{\text{verschil}}$.

3.5 Tijdsafhankelijke horizontale variaties

In de vorige paragraaf is gekeken naar systematische variaties in T en RV voor de kassen, over langere termijnen van enkele dagen (5 dagen). Om een betere indruk te krijgen op welke tijdschaal T en RV variëren in de kas, en om bijvoorbeeld het gedrag van 'wandelende' koude plekken in te schatten kan variatie componenten analyse uitgevoerd worden. Voor alle proeven en beide 5-daagse meetperioden is voor T, RV en Absoluut Watergehalte zo'n variantie-componentenanalyse (ANOVA) uitgevoerd voor de tijdsvariabelen Dag, Uur en 10 minuten en combinaties daarvan. Deze analyse geeft inzicht hoe veranderingen in de verschillende onafhankelijke tijdscomponenten doorwerken in de gemeten signalen van de mini-sensoren. De verschillende tijdsonafhankelijke componenten zijn:

Fdag

Deze component vertegenwoordigt de variatie van dag tot dag welke grotendeels ingegeven wordt door de seizoensinvloeden op het klimaat (instraling, buitentemperatuur, windsnelheden e.d.). Bij deze analyse worden voor de 5 meetdagen in elke periode de daggemiddelden vergeleken.

Fuur

Dit zijn de variaties gedurende de dag (op uurbasis) die in de metingen kunnen ontstaan door dag/nacht ritme verschillen zoals tengevolge van het klimaat (met name instraling en buitentemperatuur) en de dag/nacht instellingen van de klimaatcomputer. Er wordt een gemiddeld dag/nacht ritme bepaald over de 5 meetdagen, en vervolgens wordt de variatie t.o.v. dit gemiddelde bepaald.

Fdag.Fuur

Bij deze component wordt de data op een specifiek uur tijdstip van de dag vergeleken met hetzelfde tijdstip op andere meetdagen. Deze variatie component geeft met name aan welke toevallige variaties (op uurbasis binnen een dag) de metingen beïnvloeden. Daarbij kan gedacht worden aan verschillen van klimaat (instraling en voorbij drijvende bewolking, invloed van windrichting en -snelheidswisselingen) maar ook de aanpassingen van de klimaatcomputer instellingen t.g.v. een modelsturing, klimaatregeling op zich, wijzigingen in het regelbeleid door de tuinder, invloeden van openen/sluiten van ramen en schermen, en het al of niet schakelen van ventilatie (Airco-breeze) en verwarmingen.

Fuur.Fminuut

Bij deze component gaat het om zeer snelle variaties in de meetsignalen, op basis van 10 minuten waarden. Te denken valt hier aan verstoringen van de metingen ten gevolge van teelthandelingen.

Waar we in deze studie met name naar op zoek zijn, is de variatie die er in de meetsignalen kan ontstaan puur ten gevolge van de plaats van de sensor in de kas. Immers, deze variatie geeft aan of er veel warmere of koudere, natte of droge plekken in de kas te vinden zijn. Bij het maken van de 2D-verdelingsplots voor RV, T en absoluut vocht (zie §3.4) zijn de variaties ten gevolge van de bovenstaande tijdsafhankelijke componenten uiteindelijk gecompenseerd om zodoende de netto plaatsafhankelijke verschillen, gemeten met de mini-sensoren, inzichtelijk te kunnen maken.

Fsensor (systematische plaatsafhankelijke variaties)

Deze variantie component geeft aan hoe groot de sensorgerelateerde variatie is. Deze component heeft met name te maken met de plaatsafhankelijke informatie. Systematische verschillen in het klimaat ten gevolge van de positie in de kas spelen door in deze variatie.

Fdag.Fsensor (toevallige plaatsafhankelijke variaties in de dag)

Deze variantie component kijkt naar de verschillen gevonden in de meetsignalen van de sensoren t.g.v. individuele sensoren gerelateerd aan de dag waarop gemeten is. Het effect van lokale gewasbehandelingen (oogsten/plukken) zou hier tot uitdrukking kunnen komen.

Fdag.Fuur.Fsen (toevallige plaatsafhankelijke variaties in het uur)

Deze variantie component kijkt naar de verschillen gevonden in de meetsignalen van de sensoren t.g.v. individuele sensoren gerelateerd aan het dagtijdstip waarop gemeten is. Te denken valt hierbij aan bijvoorbeeld het eerder opwarmen van een gedeelte van de kas door instraling aan de zijde waar de zon opkomt.

units geeft het totale percentage onverklaarde variantie weer.

Achtereenvolgens zullen nu voor alle proeven de analyses voor T en RV gepresenteerd worden. De algemene variatie in de kas (Fdag, Fuur, Fmin) worden geacht goed door 1 RV-T klimaatbox te monitoren zijn. Wat niet door de standaard meetbox in kaart gebracht kan worden zijn de plaatsafhankelijke variaties in de kas, die wel door de mini-sensoren bemeten kan worden. Met name daarom zal gekeken worden naar het tijdsafhankelijke gedrag van de sensoren (Fsen, Fsen.Fdag en Fdag.Fuur.Fsen). De grafieken geven alleen relatieve variaties aan tussen de verschillende componenten (in %) per meetperiode. De waarden kunnen dus niet vergeleken worden voor verschillende meetperiodes. De absolute variaties zijn in andere paragrafen behandeld.

Algemene variaties

In het algemeen zien we dat tijdsafhankelijke variaties in het klimaat (T en RV) op dag en uurschaal gezocht moeten worden. Interacties op 10 minuten schaal hebben nauwelijks effect, slechts 0 tot enkele procenten. Het grootste deel van deze variaties vind zijn oorsprong in de tijdstellingen (dag/nacht) van de klimaatcomputer, dag/nacht cyclus van buitenklimaat en schermregime. Uit de grafieken zien we dat zowel algemene variaties maar ook de plaatsafhankelijke variaties beide in belangrijke mate bijdrage tot de variaties in de kas. In de tijd gezien kunnen deze variaties sterk onderling wisselen.

In Figuur 19 is te zien dat in de nachten van de eerste twee perioden D1 en D2, 20-40% van de totale variatie in temperatuur komt door plaatsverschillen. In de eerste periode D1 en in mindere mate in periode D4 zijn die verschillen ook nog sterk afhankelijk (30-35%, resp. 15%) van het tijdstip en ook per dag weer verschillend. In de eerste twee perioden (D1, D2) zijn er dus gedurende de nachten zowel vaste als wandelende koude/warme plekken in de kas. Opvallend is dat dit effect in de tweede proef (D3, D4) veel minder is. Deze observatie komt overeen met wat in overleg met de teler is vernomen dat de kierstand van de zijramen kleiner is gemaakt tussen de eerste en tweede proef.

Temperatuur (Matricaria)

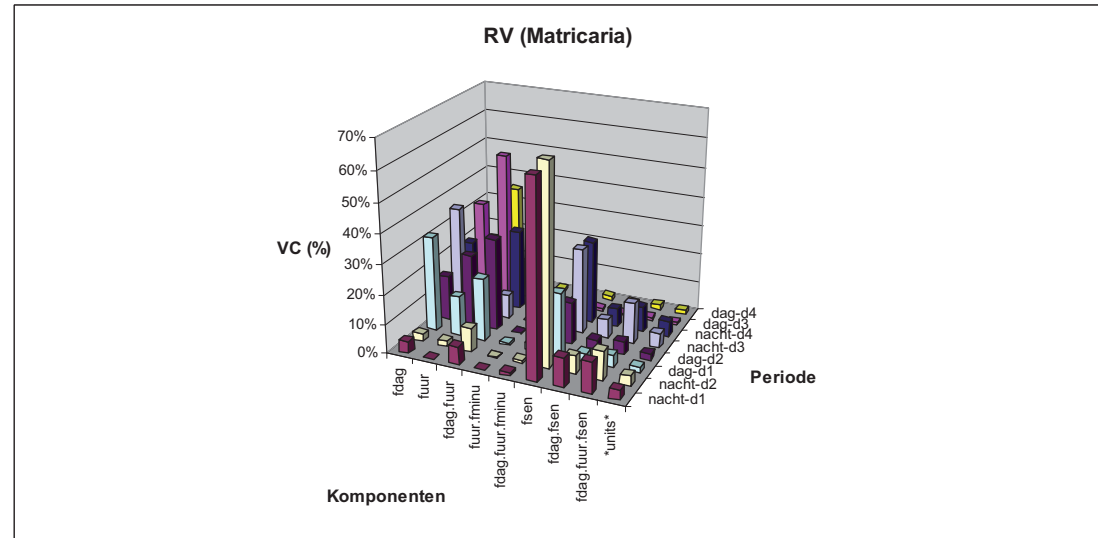
VC (%)

Periode

Komponenten

dag-d4
dag-d3
nacht-d4
nacht-d3
dag-d2
dag-d1
nacht-d2
nacht-d1

fuur
fdag.fuur
fuur.fminu
fdag.fuur.fminu
fsen
fdag.fsen
fdag.fuur.fsen
*units

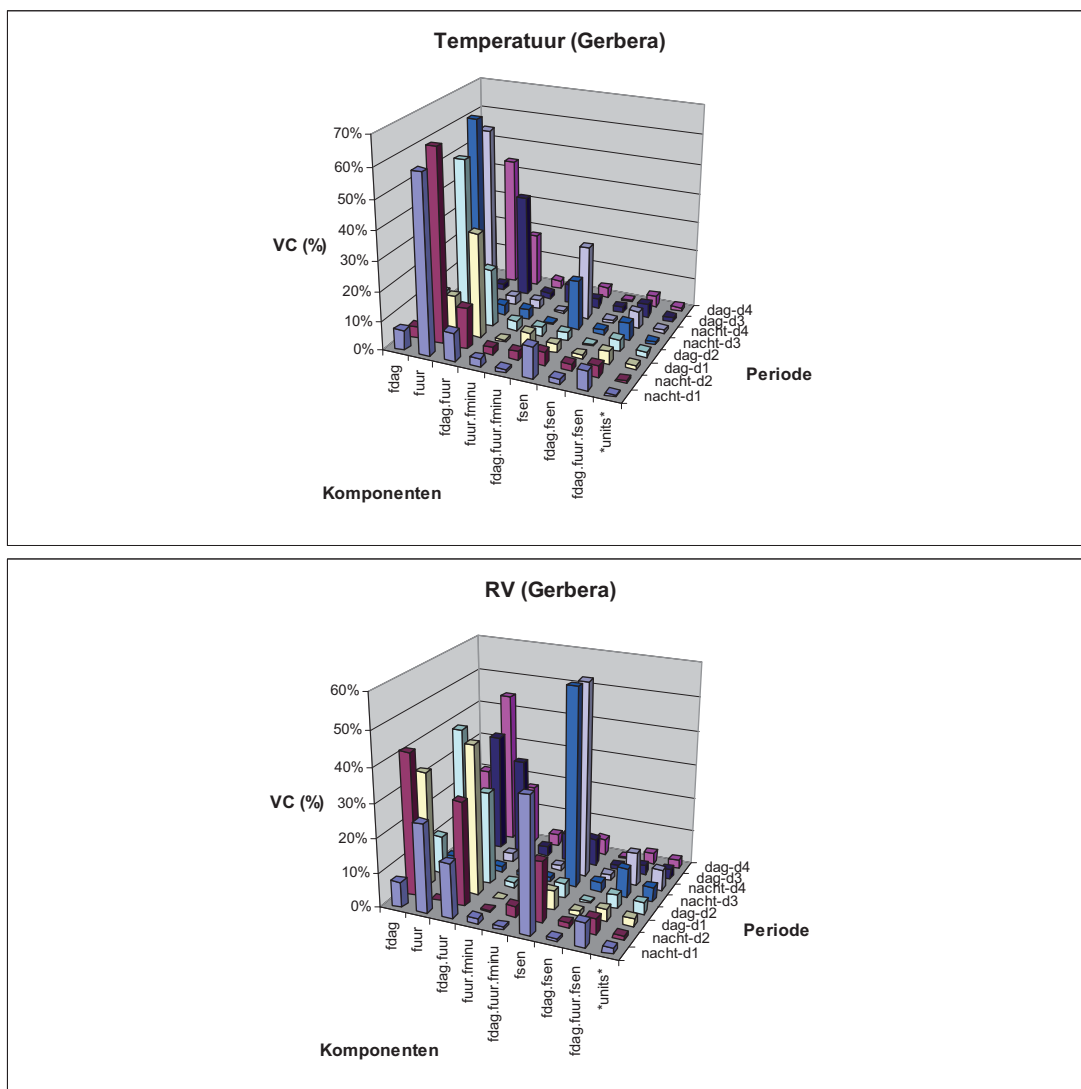


44

Gerbera

In Figuur 20 is te zien dat naar verhouding het grootste deel van de temperatuurvariatie afkomstig is van klimaatinstellingen en klimaatvariatiës. Het effect daarvan is nauwelijks zichtbaar als plaatsafhankelijke variaties, en dan nog alleen in de nachten (10-20%). De plaatsafhankelijke variaties zijn van systematische aard, en veranderen nagenoeg niet per dag (<2%). Ongeveer 5% van de totale variatie ontstaat door toevallige aard en varieert op minuten basis. Dit lijkt niet periode gebonden.

Voor de luchtvochtigheid valt direct op dat in de nachten de variatie voor 40-60% plaatsafhankelijk is. In de tweede periode (D3, D4) was dit sterker dan in de eerste periode (D1, D2). De plaatsafhankelijke RV variaties zijn ongeveer even groot als de andere variaties samen, en zijn daarom relatief groot. Het zou hier de moeite waard zijn om te kijken of er 's nachts plaatselijk potentiële natte plekken kunnen ontstaan. Indien dat het geval is, dan zou een aangepaste klimaatregeling (bv. op basis van regelen op de koudste/natste plek met gebruik van meerdere sensoren) overwogen kunnen worden.

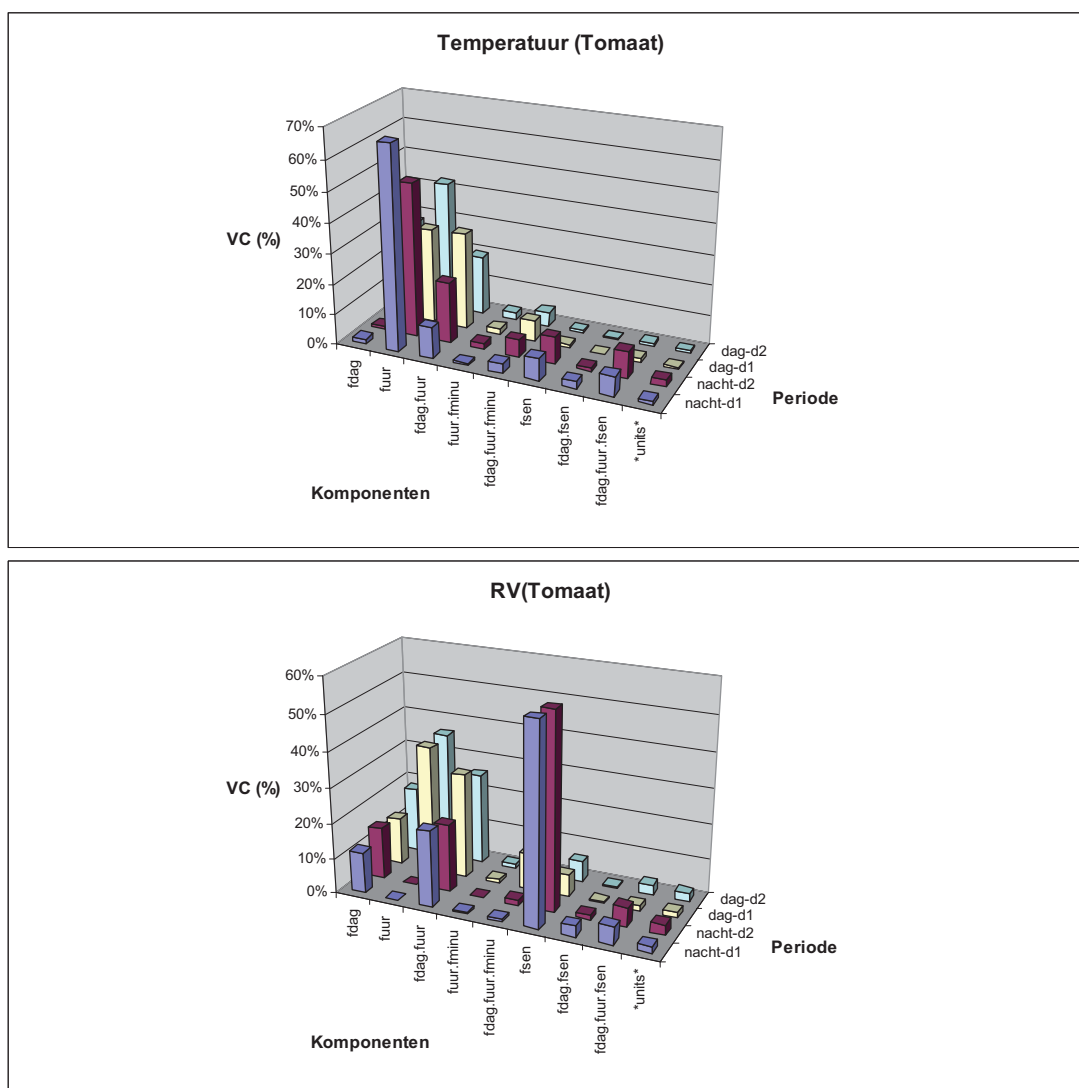


Figuur 20. Variatie componenten analyse voor Gerbera voor 4 perioden en dag/nacht. D1 en D2 zijn de twee 5-daagse perioden in de Gerbera 1 proef, en D3 en D4 zijn de twee 5-daagse perioden in de Gerbera 2 proef

Tomaat

In Figuur 21 is te zien dat nagenoeg het grootste deel van de temperatuurvariatie afkomstig is van klimaat-instellingen en klimaatvariatiës (ca. 90%). Op dagbasis is er evenwel geen verschil omdat mogelijk gebruik wordt gemaakt van temperatuurintegratie of omdat de instellingen per dag identiek waren. Het effect van plaatsafhankelijke variaties, en dan nog alleen in de nachten (<10%) is erg klein. Deze plaatsafhankelijke variaties die er nog zijn, zijn zowel van systematische als toevallige aard. Het lijkt erop of er weinig aanleiding hier is om in te grijpen om een homogenere temperatuur te maken.

Voor de luchtvochtigheid valt direct op dat in de nachten de variatie voor 40-50% plaatsafhankelijk is en maar voor slechts 5% van toevallige aard. Gedurende de dag blijven de plaatsafhankelijke variaties beneden de 10%. Er zijn dus systematische vochtigere plekken in de kas. Alhoewel dit plaatje suggereert dat er aanleiding zou zijn om hier wat aan te doen, moeten we constateren dat de absolute variaties wel klein blijven. Het bekijken van de systematische analyse (bv. Figuur 16, en soortgelijke plaatjes niet afgedrukt in dit rapport maar in de gewas specifieke bijlagen) leert dat de systematische variaties binnen een gebied van 80-94% RV blijven. De teler teelt dus 's nachts netjes binnen de veilige marges, en het is de vraag of het zinvol is om iets meer ruimte van de marge te nemen om een klein beetje energie te besparen door bijvoorbeeld een paar tienden van graden lager te stoken.

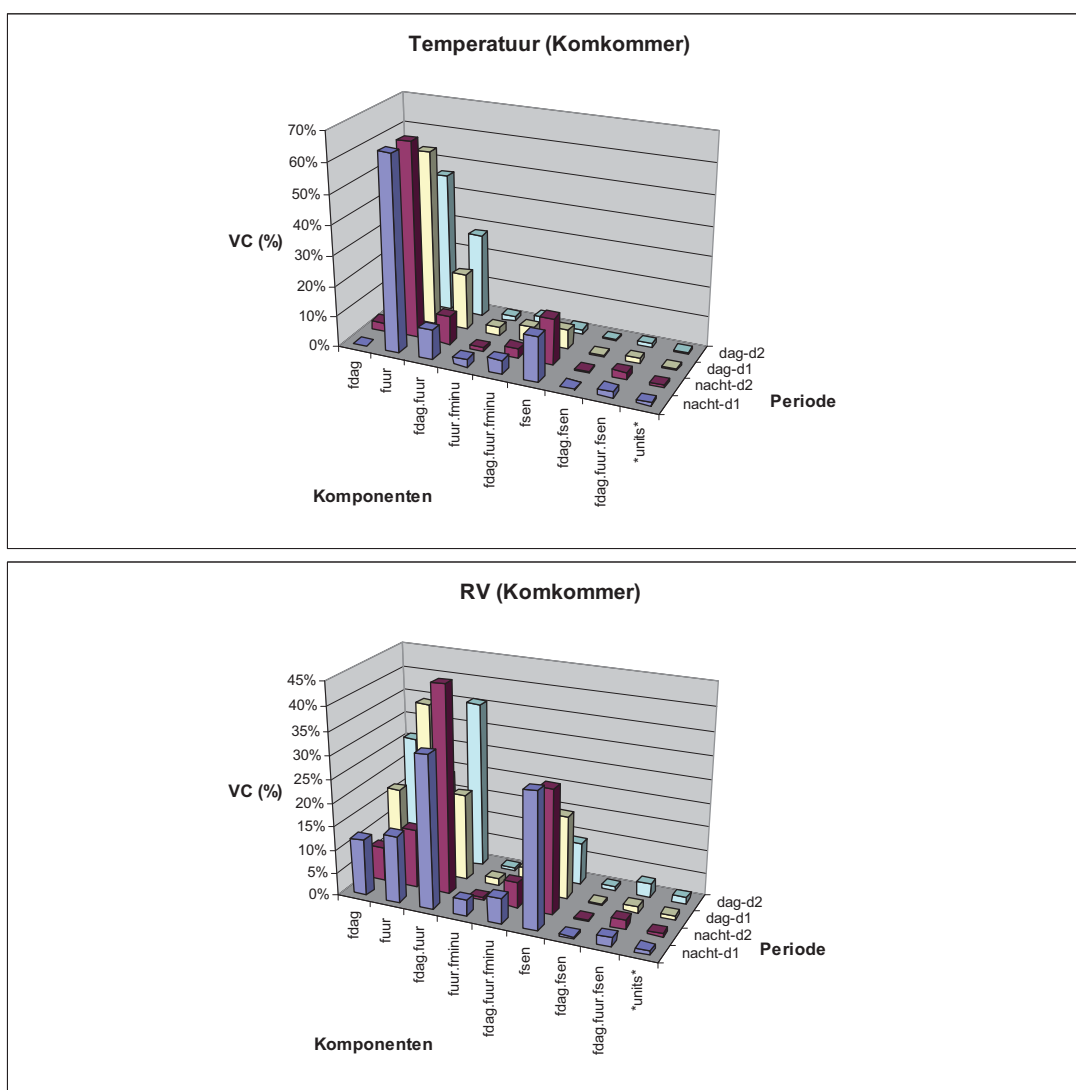


Figuur 21. Variatie componenten analyse voor Tomaat voor 2 perioden en dag/nacht

Komkommer

In Figuur 22 is te zien dat temperatuurvariaties in de komkommerkas voornamelijk (45-55%) ontstaan door instellingen en klimaatvariaties gedurende de dag op uurbasis (Fuur). De verschillen tussen de dagen (in de meetperiode) is zeer klein (Fdag, 0-5%), waarschijnlijk doordat de instellingen van de klimaatcomputer niet gewijzigd zijn en dat er gebruik wordt gemaakt van temperatuurintegratie, waardoor de gemiddelde dagtemperatuur constant blijft. De verschillen tussen de dagen op uurbasis (Fdag.Fuur) zijn wel aanwezig, maar veel kleiner (10-25%) dan de algehele variaties op uurbasis. Plaatsafhankelijke variatie is klein (10%), zien we voornamelijk gedurende de nachten en heeft een stabiele plaats. Wandelende koude of warme plekken zien we nauwelijks in deze kas (Fdag.Fsen en Fdag.Fuur.Fsen <2%).

Voor RV zien we over het algemeen het zelfde beeld als voor de temperatuur. Wel zien we nu dat de dagen onderling wel meer verschillen (Fdag = 10-25%). Dit komt omdat de buitenlucht op twee dagen een vrij lage RV had, en er dus op een aantal relatief drogere lucht binnengekomen is, waardoor de gemiddelde RV op dagbasis per dag is gaan verschillen. De variatie op uurbasis blijft zowel gedurende nacht als de dag domineren met 15-40% (Fuur en Fdag.Fuur). De plaatsafhankelijkheid van RV lijkt hier wel groter dan bij temperatuur. Het percentage van de variaties is hier 10-25% voornamelijk gedurende de nacht maar ook in redelijke porties gedurende de dag. Deze variaties zijn uitsluitend plek gebonden, wandelende plekken zien we ook hier niet of nauwelijks (<2%). De grotere variaties in RV dan voor T zijn te verklaren uit het feit dat RV een afgeleide is van T en absoluut vochtgehalte. Doordat beide variaties hebben zal de resultante RV een grotere spreiding hebben dan de enkele variabelen. Verder is het mogelijk dat door instraling overdag de variatie in RV wat groter is door het instralingeffect op de sensoren.



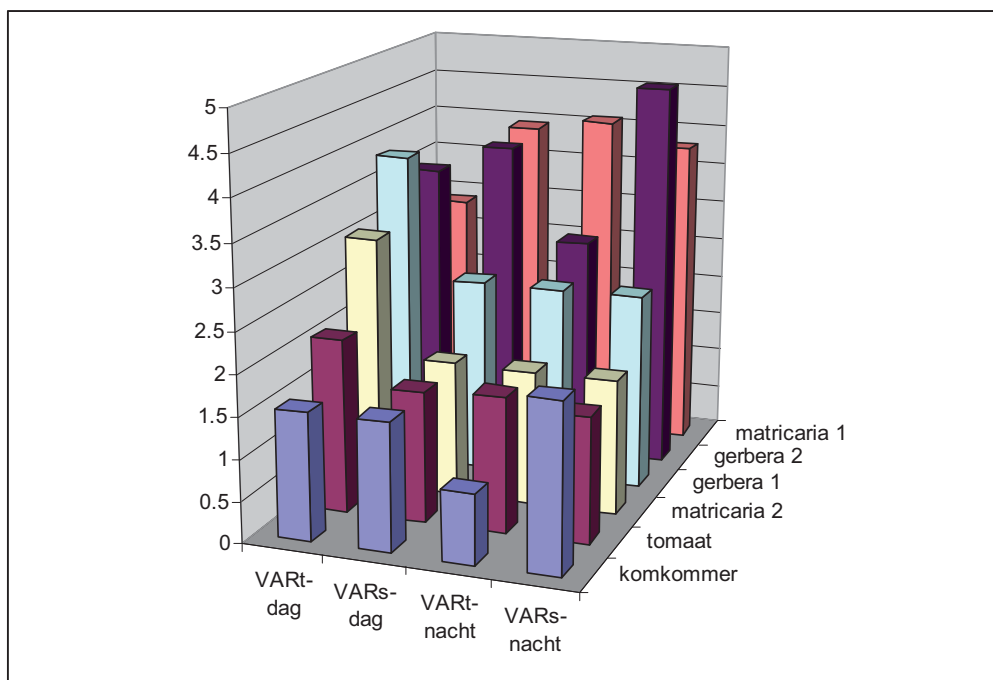
Figuur 22. Variatie componenten analyse voor Komkommer voor 2 perioden en dag/nacht

Plaatsafhankelijke variaties voor temperatuur

De vorige grafieken geven een indruk van de variaties in de kas ten gevolge van alle factoren die daar invloed op hebben. Nu kijken we alleen naar de variaties in temperatuur gerelateerd aan de plaats, en wel voor systematische variaties (Fsen) ook wel: 'vaste koude/warme plekken' en toevallige variaties of te wel 'wandelende koude/warme plekken' (Fsen.Fdag + Fsen.Fdag.Fuur). De resultaten hiervan zijn weergegeven in de volgende figuur.

We zien dat de tomaat en komkommerkas zowel 's nachts als overdag een kleine variatie hebben voor zowel de systematische als toevallige afwijkingen. Alhoewel de systematische afwijkingen in de orde van onze drempelwaarde liggen, kan op verschillende tijdstippen het verschil tussen maximum en minimum wel groter worden dan deze norm.

De matricaria kas scoort in de tweede meetperiode redelijk. Overdag kunnen echter de toevallige variaties op lopen tot 3°C. In de eerste periode scoorde matricaria kas erg slecht. Zowel overdag als 's nachts kunnen systematische en toevallige variaties wel oplopen tot 4.5°C. Dit had achteraf gezien te maken met een te wijde luchting van de zijramen. Voor de gerbera kas in beide perioden zien we voor alle componenten relatief hoge variaties variërend van 2-4.5°C.



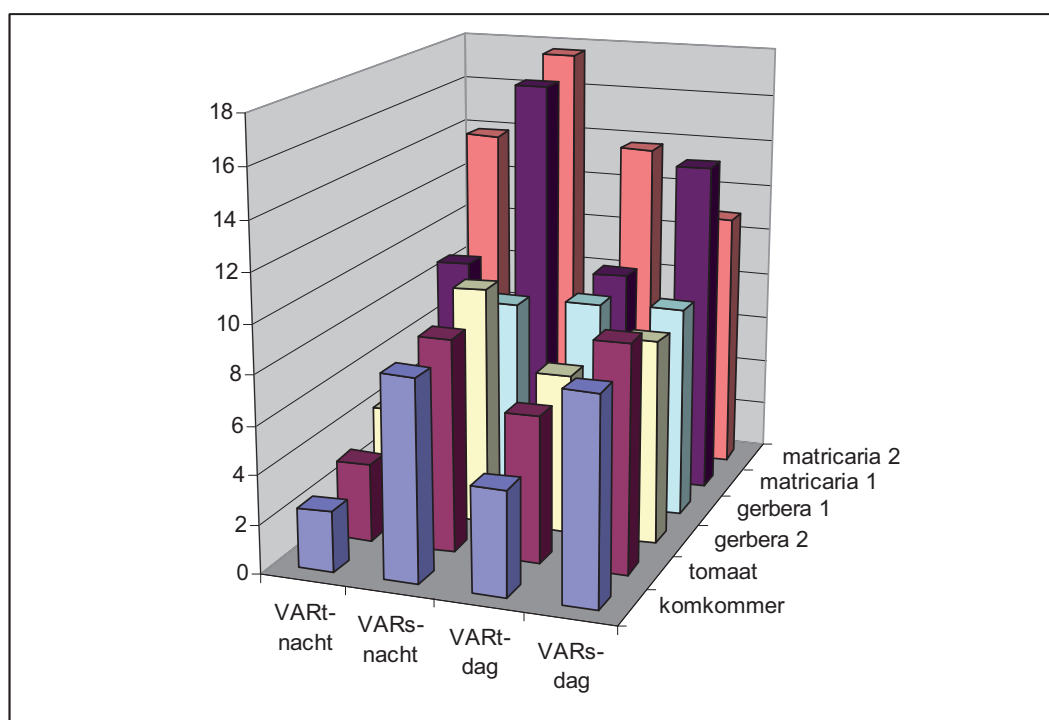
Figuur 23. Plaatsafhankelijke variaties (varianties) voor temperatuur in de nacht en dag, zowel systematisch (VARS) als toevallig (VART) voor bij alle proeven. Varianties zijn teruggerekend naar $T_{max}-T_{min}$ (in °C) waarbij 6 maal de standaarddeviatie ($P=0.99$) als maat genomen is

Plaatsafhankelijke variaties voor RV

Ook bij de RV analyses voor plaatsafhankelijkheid zien we een zelfde beeld als bij temperatuur. Het algemene beeld is dat de systematische verschillen in RV groter zijn (tot wel een factor 2) dan de toevallige variaties, in ieder geval voor de groente gewassen.

De komkommerkas en de tomatenkas scoren het beste. De systematische afwijkingen zijn bij komkommer het grootst tot 7%, terwijl de toevallige variaties niet groter zijn dan 2-3%. Bij tomaat zijn deze waarden iets groter, respectievelijk 8% en 3-5%. Gerbera volgt dan met variaties van 8-10%, in beide perioden voor zowel dag als nacht. Matricaria scoort het slechtste, voor beide perioden met variaties van 8-18%.

Wel moet hierbij opgemerkt worden dat de mini-sensoren gedurende de dag door instraling vaker een lagere RV aangeven. Dit kan effect gehad hebben op de variatie componenten voor de dag, waardoor deze te hoog ingeschat kunnen zijn.



Figuur 24. Plaatsafhankelijke variaties (varianties) voor relatieve luchtvochtigheid in de nacht en dag, zowel systematisch (VARs) als toevallig (VARt) voor bij alle proeven. Varianties zijn teruggerekend naar $RV_{max}-RV_{min}$ (in %) waarbij 6 maal de standaarddeviatie ($P=0.99$) als maat genomen is

3.6 Sensordichtheid en nauwkeurigheden

In deze paragraaf maken we gebruik van de metingen om antwoord te geven op de vraag hoeveel sensoren ingezet moeten worden om er zinvol gebruik van te kunnen maken. De vraag wordt ook wel gesteld als: 'Hoeveel sensoren moet ik per hectare inzetten om er zeker van te zijn dat ik geen koude of natte plekken over het hoofd zie?' Antwoord geven op deze vraag is niet eenvoudig en zeker niet voor de hand liggend. De hoeveelheid sensoren is namelijk afhankelijk van een aantal factoren die in de praktijk variabel zijn:

- de meetnauwkeurigheid van de sensoren,
- de maximale variatie van temperatuur en luchtvochtigheid in de kas, en
- de gewenste zekerheid omtrent de extreme waarden in de kas.

We zullen deze achtereenvolgens toelichten.

Meetnauwkeurigheid van de sensoren

Ieder meetsysteem, hoe goed het ook is, zal de exacte waarde van de meting maar met een bepaalde meetnauwkeurigheid kunnen aangeven. In de praktijk zal er dus na meting altijd een bepaalde onzekerheid blijven bestaan over de exacte waarde. De nauwkeurigheid van sensoren kan op verschillende manieren aangegeven worden, en een daarvan is bijvoorbeeld het aangeven van een betrouwbaarheidsinterval. Zo'n interval geeft dan aan dat de werkelijke meetwaarde ergens in dat interval ligt. Het interval kan ook weergegeven worden door de meetwaarde plus of min de meetfout. Statistisch gezien rekent men met de variantie (σ^2) of de standaard afwijking (σ) van de meetmethode. Hier neemt men aan dat de meting een normale kansverdeling heeft en dat de verwachte (gemiddelde) waarde een goede schatter is voor de exacte meetwaarde. In dit rapport maken we gebruik van deze statistiek, en nemen voor het gemak aan dat de meetfout van de sensoren gelijk is aan 2 maal de standaard afwijking (in werkelijkheid is deze factor 1.96). Bij deze aanname zijn we er dan 95% zeker van dat de exacte waarde binnen het gegeven interval ligt.

De meetnauwkeurigheid van de sensoren is dus een belangrijk gegeven. Naarmate de sensoren een hogere meetnauwkeurigheid hebben, des te betrouwbaarder is onze meting. In het voorgaande is al bepaald wat de meetnauwkeurigheid van de sensoren is. Nogmaals herhaald: volgens de fabrikant is de nauwkeurigheid gespecificeerd als volgt:

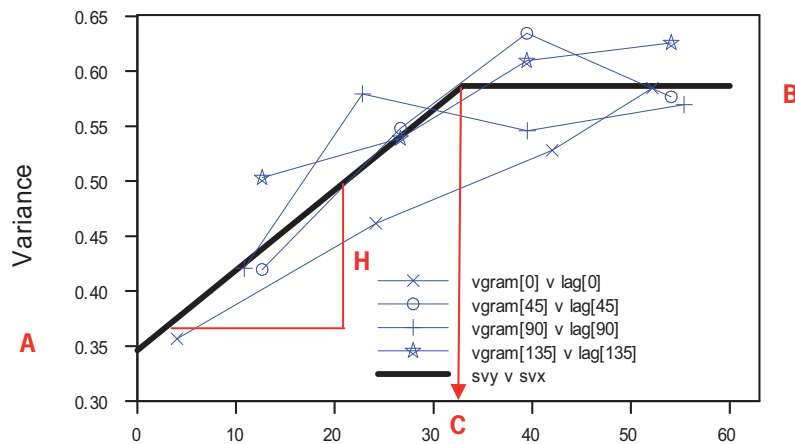
Temperatuur: $\pm 0.4^\circ\text{C}$ bij 25°C , $\pm 1^\circ\text{C}$ van 0°C tot $+50^\circ\text{C}$, $\pm 2^\circ\text{C}$ van -20°C tot $+80^\circ\text{C}$
RV: $\pm 3\%$ van 20% tot 80%; anders $\pm 5\%$

Belangrijk hier is dat de nauwkeurigheden dus afhangen van het meetgebied de sensoren. Naarmate er aan de rand van het meetbereik wordt gemeten neemt de meetfout toe. Belangrijk te weten is dat voor erg hoge RV (>95%) de meetfout toeneemt tot wel $\pm 5\%$!

Plaatselijke variaties van temperatuur en luchtvochtigheid in de kas

Met een sensor is, met een bepaalde meetfout, een schatting te geven van de temperatuur en RV op de locatie waar de sensor staat. Echter, in de kas zal het klimaat van plaats tot plaats verschillend zijn, en tevens ook nog in de tijd (systematisch of toevallig). In hoeverre een bepaalde sensor iets kan zeggen over het klimaat op een bepaalde afstand van deze sensor, hangt daarmee in sterke mate af van de variabiliteit van het klimaat. In Smart Dust 2 hebben we gezien dat er tussen naburig gelegen sensoren wel degelijk grotere verschillen in temperatuur kunnen zijn, soms tot enkele graden. Desalniettemin, een bepaalde sensor zal altijd enige informatie verschaffen over het klimaat in de directe nabijheid van de sensor, en beter dan de sensoren die verder weg liggen van het te meten punt. Immers, doordat de kas een omsloten ruimte is, en de temperatuur en RV gelimiteerd zijn en geregeld, zal iedere sensor in ieder geval een schatting kunnen geven over op zijn minst een gemiddeld klimaat in de kas. Het toepassen van de standaard RV-T-meetbox is ook op deze aanname gebaseerd. De waarde van deze sensor kan alleen een schatting geven van een gemiddelde waarde van RV en T in de kas, waarbij de onzekerheid van deze meting net zo groot is als de totale variatie van het klimaat in de kas. Bij de plaatsing van deze sensor houdt de teler er dan ook rekening mee deze op een plek te plaatsen waar naar verwachting een representatief (gemiddeld) klimaat heerst.

Uit het onderzoek van Smart Dust 2 is een indruk ontstaan over de variabiliteit van het klimaat en de onzekerheid van de metingen als de sensor op een bepaalde afstand van het meetpunt wordt gehouden. Voor de komkommerkas ontstond toen het volgende gestileerde plaatje. In de statistiek wordt deze grafiek aangeduid met de term 'Variogram', waarin de variantie van de meting als functie van de meetafstand (d) wordt weergegeven.



Figuur 25. Gestileerd variogram, bepaald voor een komkommerteelt (Smart Dust 2, Van Os et al., 2008)

In dit plaatje kunnen drie karakteristieke kenmerken worden afgelezen:

- het snijpunt met de ij-as (A), welke de meetnauwkeurigheid van de sensoren aangeeft bij $d=0$;
- de asymptoot voor hoge afstanden (B), welke een maat is voor de maximale spreiding in de kas; en
- het knikpunt in de curve, gegeven door de invloedsafstand C, welke aangeeft over welke afstand de sensoren geen extra informatie meer over de meetwaarde kunnen geven dan de gemiddelde waarde voor de hele kas.

De hierboven beschreven karakteristieken zijn een benadering van de werkelijkheid. Formeel kan de grafiek uit de verzamelde data volgens een statistische analyse en een complex model beschreven worden, maar voor de verdere analyse hier dit niet direct meerwaarde. Daarom gebruiken we hier een vereenvoudigd lineair model voor de variatie van het klimaat. Uit de grafiek lezen we dus af dat voor de meting in de komkommertkas (gemeten in het najaar) gold: de meetnauwkeurigheid (variantie) van de sensoren is $A = 0.35$ ($\sigma = 0.59$); de maximale variantie in de kas $B=0.58$ ($\sigma = 0.76$) en de invloedsafstand (C): 33 m. De helling van de grafiek (H) geeft de mate aan waarmee de variantie toeneemt per meter tot het punt C, in dit geval $ca. 0.2 \text{ per } 30 \text{ m} = 0.0066 \text{ /m}$. Het variogram is uitgezet in een andere eenheid dan de grootheden voor temperatuur en RV, immers dit gaat om gemiddelde kwadraatsommen. Deze waarden moeten dus uiteindelijk omgerekend worden naar $^{\circ}\text{C}$ en %.

De gegeven parameters (A, B, C en H) zijn in de praktijk sterk onderhevig aan variatie. Voor de proeven zijn aan de hand van de variogrammen inschattingen van de parameters bepaald voor de 6 proeven en de twee meetperioden van 5 dagen. Het resultaat staat in de volgende tabellen.

De **parameter A** geeft een indruk van de nauwkeurigheid van de verschil temperatuur meting met twee sensoren. De gepoolde variantie voor 2 sensoren geeft dan een indruk van de nauwkeurigheid. Deze waarde is de meest constante waarde in het variogram, en beschouwen we in de verdere analyse dan ook als een vaste waarde. Uit §3.2 kunnen we bepalen dat:

$$\text{Var}(T) = 2 \cdot 0.29^2 = 0.17, \text{ met: } \sigma_T = 0.41^{\circ}\text{C} \text{ in absolute zin: } \pm 0.82^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Var}(RV) = 2 \cdot 0.71^2 = 1.0\%, \text{ met } \sigma_{RV} = 1.0\% \text{ in absolute zin: } \pm 2.0\%$$

Kijkend naar alle variogrammen dan blijkt deze parameter A wel degelijk te variëren, we zien waarden tussen $A=0.03$ en $A=0.12$, zodat 0.17 een voorzichtige schatter is. Voor RV varieert de waarde van A van 1.0 tot 1.8 met een enkele uitschieter bij Gerbera 1 naar 3.6. De inschatting voor RV van $A=1.0\%$ is daarmee wat conservatiever.

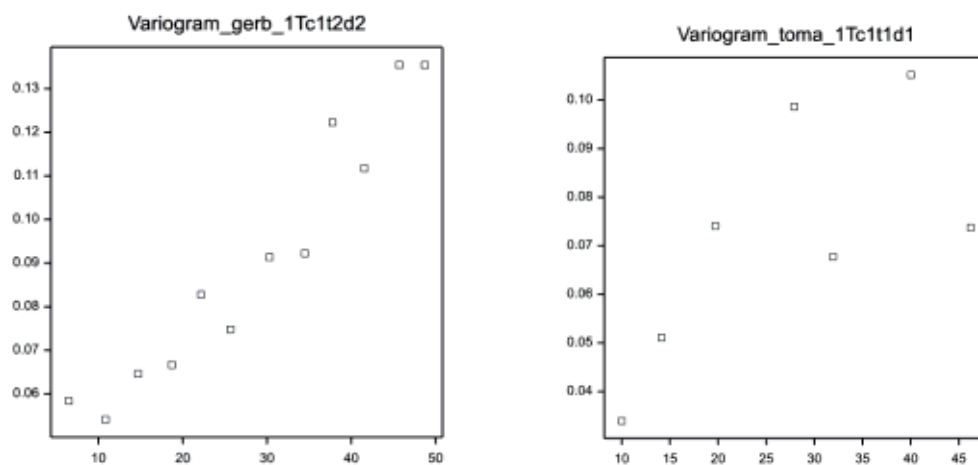
De **parameter B** hangt sterk af van de temperatuurverschillen tussen de kas en de buitenlucht. Campen en Van Gelder (2007) geven als indicatie voor de horizontale temperatuurverschillen in een ongeschermd kas een waarde van 20-25% van het kas-buitenlucht temperatuurverschil. De variabiliteit van deze factor is uitermate hoog en is sterk afhankelijk van externe factoren zoals het klimaat, de seizoenen (winter/zomer/voorjaar/herfst) maar kan ook sterk gedurende de dag wijzigen t.g.v. veranderingen in instraling en windrichting. Verder is deze factor ook sterk afhankelijk van interne factoren zoals het gebruik van de schermen, de ramen en de inzet van ventilatoren e.d. Door het hebben van een vrij gedifferentieerd meetnet van sensoren in de kas, is het overigens wel op ieder willekeurig tijdstip mogelijk een goede indruk te verkrijgen van de spreidingsparameter B. Deze informatie kan dan vervolgens gebruikt worden door de teler om de temperatuursettings van de klimaatcomputer scherper af te stellen als de klimaatvariatie in het gewas dat toelaat.

In §3.5 hebben we gezien dat de systematische variatie meestal de grotere component is, en dat toevallige variatie daar globaal de helft van is oplopend tot soms even groot. Voor verdere analyse gebruiken we hier alleen de systematische maximale variatie die bepaald is in §3.4. De relatie is:

$$\Delta T_{\text{horizontaal}} = (0.4497 - 0.02037 \Delta T_{\text{verschil}}) \cdot \Delta T_{\text{verschil}} ; \quad \text{waarbij: } 5 < \Delta T_{\text{verschil}} < 20^{\circ}\text{C}.$$

De **parameter C** (voor de komkommerkas op ca 33 m bepaald) is een lastiger te bepalen factor, die afhangt van verschillende fysische processen zoals convectie en straling. Afhankelijkheid zal er naar alle waarschijnlijkheid bestaan voor de menging van de lucht in de kas, de windsnelheden e.d. Voor een aantal variogrammen bleek de parameter C niet goed te bepalen omdat daarvoor de kas te beperkt in ruimte was, en een vlak verloop voor grote afstanden niet zichtbaar was. Boven de 50 m zagen we dat veel variogrammen een repeterend verloop hebben doordat meerdere koude/warme plekken elkaar gingen afwisselen. In dit geval heeft het variogram een maximum bij ca. 50-60m. Een dergelijk variogram geeft dan aan dat de minima en maxima van koude en warme plekken gemiddeld op een afstand van 50-60m liggen. Deze observatie komt overeen met de simulaties uitgevoerd door Campen en Van Gelder (2007). Wat op zich nog wel kan betekenen dat er lokaal kleinere minima en maxima te vinden kunnen zijn. Naar alle waarschijnlijkheid hebben deze afstanden een relatie met de dimensies van de kas, maar om daarvoor een verband af te leiden was de proef met 4 kassen te beperkt. Vooralsnog nemen we voor de onderzochte kassen aan dat de waarde van C ergens tussen de 30 en 60 meter ligt.

De **parameter H** geeft de helling van de grafiek en geeft de mate aan waarmee de variantie toeneemt per meter tot het punt C. Deze parameter is veel eenvoudiger te bepalen uit de variogrammen dan parameter C. Voor de analyse zijn de afstanden tot 45-50 m meegenomen, omdat er dan nog geen repetitie optreedt. Voor alle meetsets zijn de hellingen van de variogrammen bepaald voor T en RV, maar als voorbeeld worden er twee in de volgende figuur getoond.



Figuur 26. Voorbeeld van twee variogrammen voor Gerbera1 (overdag, D2) links, en voor Tomaat (overdag, D1) rechts

Voor temperatuur is de gemiddelde helling H over alle meetsets 0.00444. Het verband van de helling H is onderzocht in relatie tot de verschiltemperatuur binnen-buiten en de periode dag/nacht. Voor de verschiltemperatuur binnen-buiten is geen significante relatie gevonden. Wel zijn er verschillen tussen nacht ($H=0.00610$) en Dag ($H=0.00277$) gevonden. Dit verschil was echter net niet significant ($P=95\%$. I.s.d. = 0.004189).

$\text{Var}(T, \text{nacht}) = 0.00610$, met: $\sigma_{T\text{nacht}} = 0.078^\circ\text{C}/\text{m}$ en absoluut $(\pm 2 \sigma_{T\text{nacht}}) \pm 0.16^\circ\text{C}/\text{m}$ en:

$\text{Var}(T, \text{dag}) = 0.00277$, met $\sigma_{T\text{dag}} = 0.052^\circ\text{C}/\text{m}$ en absoluut $(\pm 2 \sigma_{T\text{dag}}) \pm 0.10^\circ\text{C}/\text{m}$

Tabel 11. Parameterschatting (H) voor de 6 proeven en meetperiode (1,2) aan de hand van de variogrammen analyse voor temperatuur

Temperatuur	Dag-D1	Dag-D2	Nacht-D1	Nacht-D2
Gerbera 1	0.00292	0.002726	0.002912	0.00233
Gerbera 2	0.003373	0.006692	0.017597	0.030745
Matricaria 1	0.006435	0.00471	0.008655	0.005453
Matricaria 2	0.001571	0.000503	0.001102	0.001032
Tomaat	0.001462	0.000429	0.000776	0.00071
Komkommer	0.001419	0.001025	0.00107	0.000809
Gemiddeld	0.002863	0.002681	0.005352	0.006847

Tabel 12. Parameterschatting (H) voor de 6 proeven en meetperiode (1,2) aan de hand van de variogrammen analyse voor RV

RV	Dag-D1	Dag-D2	Nacht-D1	Nacht-D2
Gerbera 1	-0.0068	-0.01884	0.01477	0.00746
Gerbera 2	0.00379	0.00662	0.02802	0.03602
Matricaria 1	0.12214	0.07315	0.1512	0.14201
Matricaria 2	0.07114	0.07517	0.27335	0.15404
Tomaat	0.0186	0.01941	0.01973	0.02026
Komkommer	0.00751	0.01021	0.00485	0.00752
Gemiddeld	0.03606	0.02762	0.08198	0.06121

Voor RV is de gemiddelde helling H over alle meetsets 0.0517. Het verband van de helling H is onderzocht in relatie tot de verschiltemperatuur binnen-buiten en de periode dag/nacht. Als we alle kassen beschouwen in de analyse dan is voor Tverschil en dag/nacht geen significant verband te vinden. De onderlinge verschillen tussen de kassen zijn daarvoor te hoog. Als we de kassen afzonderlijk beschouwen dan vinden we wel degelijk een significante relatie tussen HRV en Tverschil en Dag/Nacht (89% verklaarde variantie). Voor een verdere analyse is het in beschouwing nemen van Tverschil en alle kassen daarmee te complex en werken we met alleen dag/nacht verschillen in de helling. De gevonden waarden zijn voor nacht ($\text{HRV}=0.0716$) en Dag ($\text{HRV}=0.0318$). Dit verschil is net significant ($P=95\%$. I.s.d. = 0.031). Omgerekend naar percentages vinden we dan:

$\text{Var}(\text{RV}, \text{nacht}) = 0.0716$, met: $\sigma_{RV\text{nacht}} = 0.288\%/m$ en absoluut $(\pm 2 \sigma_{RV\text{nacht}}) \pm 0.57\%/m$ en:

$\text{Var}(\text{RV}, \text{dag}) = 0.0318$, met $\sigma_{RV\text{dag}} = 0.178\%/m$ en absoluut $(\pm 2 \sigma_{RV\text{dag}}) \pm 0.36\%/m$

Kijkend naar deze resultaten dan zien we dat de horizontale variaties relatief groot kunnen worden. Theoretisch zouden we bijvoorbeeld in de nacht op twee punten met een afstand van elkaar van 10 m een RV verschil kunnen meten van 11.4%. Overdag is dit effect bijna twee keer kleiner.

Gewenste zekerheid omtrent de metingen

Bij het instellen van de klimaatcomputer, bijvoorbeeld de gewenste temperatuur, zal de teler impliciet gebruik maken van zijn kennis omtrent de verwachte spreiding van temperatuur in zijn kas. Met andere woorden, als hij weet dat er totaal 4 graden spreiding in zijn kas is (verschil tussen koudste en warmste plek), en zijn meetbox geeft doorgaans een goede schatting voor de gemiddelde kas temperatuur, dan zal hij zijn temperatuur setpoint tenminste 2 graden (= 4/2) hoger instellen dan de temperatuur die hij minimaal in zijn kas wil hebben.

Telers zullen in de praktijk hun set-points door 'trial and error' hebben bepaald en telkens bijvoorbeeld als er natslag optrad, de set-points verhoogt hebben, of andere maatregelen hebben genomen (ventilatie regime veranderd). Het zal duidelijk zijn dat naarmate de variatie in het kasklimaat hoger is, de set-points naar verhouding hoger zullen worden, en er relatief gezien meer energie gebruikt zal worden bij het stoken. Uit energetisch oogpunt is het daarom uitermate belangrijk variaties in de kas zo laag mogelijk te houden, en in ieder geval systematische afwijkingen ten gevolge van een niet evenwichtige infrastructuur aan te pakken met structurele maatregelen. Veel telers hebben deze maatregelen al zo veel mogelijk getroffen en verdienen hun investeringen terug door energiebesparingen.

Telers houden zoals gezegd een vaste marge aan bij het instellen van de temperatuur set-points welke gebaseerd is op ervaring. De actuele spreiding in het klimaat (op elk gewenst tijdstip van de dag) behoeft echter niet hetzelfde te zijn als waar de teler vanuit gaat. Deze kan veel kleiner zijn (rustig weer, gebruik van schermen en ventilatoren e.d.), maar ook veel groter ten gevolge van bijvoorbeeld sterke weerswisselingen of defecten van apparatuur. Bij het gebruik van een vaste marge kan het eerste tot overmatig energiegebruik leiden en het tweede kan schade (door natslag, en uiteindelijk ziekte) tot gevolg hebben.

Het gebruiken van veel meer RV-T meetboxen of mini-sensoren om daarmee een actuele inschatting van de klimaatvariaties te verkrijgen en daarmee rekening te houden met de marges in de set-points van de klimaat computer zou dus een interessant middel kunnen zijn om zowel energie te besparen als ook schade aan het gewas te voorkomen. De klimaatcomputer zou dan als het ware op de koudste plek kunnen gaan regelen in de kas, en daarmee nauwkeuriger een absolute minimum temperatuur kunnen handhaven in de kas en met meer zekerheid. Omdat koude plekken kunnen wandelen in de kas (Campen en van Gelder, 2007) is er dus telkens een andere sensor die effectief de klimaat computer aanstuurt. In dit geval geeft de teler een ander set-point als doel op voor de klimaat computer, namelijk een getal dat dicht bij de vereiste minimum temperatuur ligt, eventueel verhoogd met een kleine veiligheidsmarge voor natslag t.g.v. dynamische verschijnselen (in ieder geval veel kleiner dan de volledige spreiding in de kas).

In hoeverre bovenstaande aanpak tot energiebesparing leidt is puur afhankelijk van de mate waarin de teler op zeker speelt, of met andere woorden hoeveel meer extra ruimte hij neemt om schade te voorkomen. Het is deze onzekerheidsruimte die benut kan worden voor energiebesparing in ruil voor de meer zekerheid omtrent het klimaat (en risico op ziekte) door gebruik van meerdere sensoren. De vraag die overblijft is: 'hoeveel sensoren moet ik dan hebben en welke nauwkeurigheid is gewenst om deze doelen te bereiken?'

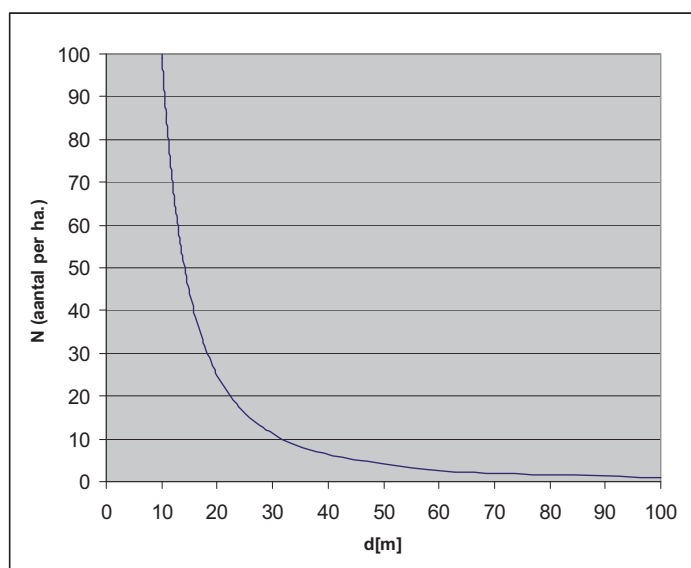
Bij het handhaven van een veiligheidsmarge moet de teler ook rekening houden met de onzekerheid van de meetmethode. Voor metingen met de draadloze mini-sensoren, ter plaatse van de sensoren, ligt deze in de orde van enkele tienden van graden, de meetnauwkeurigheid van de sensoren. Echter we weten al dat deze onzekerheid snel toeneemt naarmate we verder van de sensoren verwijderd zijn. Voor afstanden groter dan zo'n 30-50 m ligt die onzekerheid al snel op het niveau van de maximale spreiding in de kas. Ook al kunnen we met de sensoren de extremen (maxima en minima) bepalen, er blijft een mate van onzekerheid omtrent de echte minima en maxima, welke onzekerheid dus weer als marge meegenomen moet worden, en dus tot meer energiegebruik kan leiden.

Omwillen van het bovenstaande gaan we nu via een model achterhalen wat de invloed van het aantal toegepaste sensoren is op de onzekerheid, gegeven de eigenschappen van de kassen zoals bepaald in de proeven.

Voor dit doel gaan we uit van een 4-sensor model, waarbij de sensoren geplaatst zijn op de hoekpunten van een vierkant met zijden van een lengte d (in m). Als we dan in de praktijk de sensoren in een vierkant grid plaatsen dan is de sensordichtheid g (in aantallen sensoren per ha.) uit te drukken als volgt:

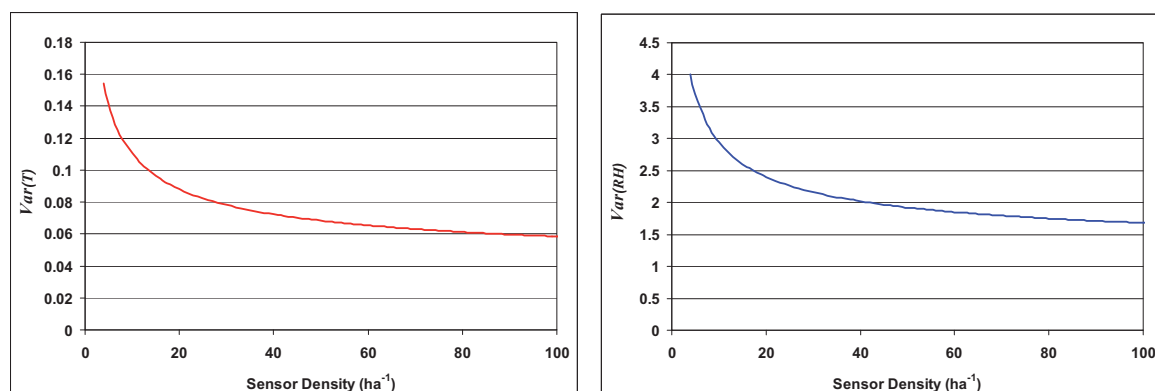
$$g = 10.000 / d^2 \text{ of andersom: } d = 100 / \sqrt{g}$$

Naarmate d kleiner wordt, nemen de sensoraantallen sterk toe. Het verband is aangegeven in de figuur. Op basis van de bij de komkommerkas gevonden waarde van $c = 33$ m voor het knikpunt (het punt waarbij de sensoren zo dicht staan dat ze meer informatie leveren dan inzicht in de gemiddelde waarde van de kas), zien we dat daarvoor ca. 10 sensoren per hectare nodig zijn.



Figuur 27. Het verband tussen afstand (d) tussen sensoren en de benodigde aantal per hectare (N) bij gebruik van een rechthoekig grid

Figuur 28 geeft de resultaten voor RV en T uitgedrukt voor de varianties. Voor meetgrid dichtheden beneden 4 per hectare ($d = 50$ m) worden de curven niet meer betrouwbaar omdat de gefitte varianties sterk niet-lineair worden ten gevolge van de infra-structuur van de kas voor afstanden boven de 50 meter. Voor zeer lage dichtheden (bv. 1 sensor per hectare) benaderen de curves de variantie van een enkele meetbox geplaatst op een arbitraire positie in de kas.



Figuur 28. Variantie voor T (links) en RV (rechts) als functie van de sensor dichtheid

Als we aannemen dat de benodigde nauwkeurigheid tenminste zo groot zou moeten zijn als de eis voor homogeniteit en we nemen daarvoor de Groenlabel eis van $\Delta T < 1.5^{\circ}\text{C}$ (Stichting Milieukeur, 2010), dan kunnen we daaraan voldoen als we tenminste 9 sensoren per hectare gebruiken. Toepassen van meer sensoren levert een hogere nauwkeurigheid en zekerheid, maar bij gebruik van meer dan 30 sensoren per hectare levert dat niet veel meer op als we de kosten voor investering in beschouwing nemen, omdat de curve daar heel vlak loopt. De figuren zijn indicatief en gebaseerd op een beperkte experimentele meetset voor een paar specifieke kassen, gewassen en perioden. Voor individuele gevallen kunnen de grafieken volledig anders uitpakken bijvoorbeeld in warmere periodes of bij andere kastypen. In ieder geval adviseren wij telers om voor hun specifieke situatie deze grafieken opnieuw te bepalen. Leveranciers van sensoren worden geadviseerd een zo hoog mogelijke meetnauwkeurigheid van de instrumenten na te streven.

Voor telers lijkt het gebruik van de variantie niet zo'n handige keuze. Daarom is ook naar de absolute variatie van T en RV (uitgedrukt als onzekerheidsinterval) gekeken bij het gebruik van verschillende grid-dimensies.

Temperatuur

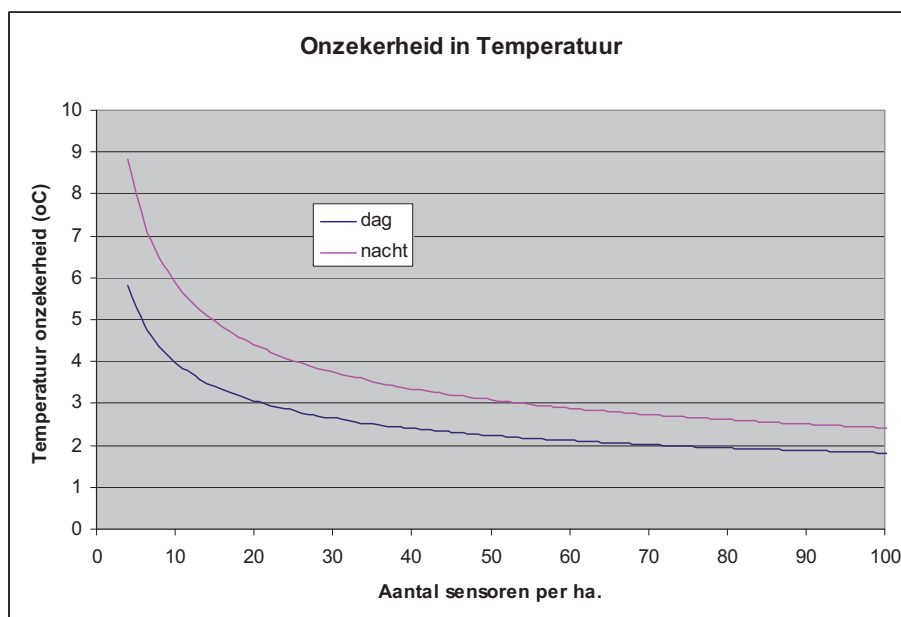
Voor afstanden kleiner dan 50 m hebben we een verband afgeleid dat geschreven kan worden als:

$$\text{T-onzekerheid (nacht)} = 0.82 + d \cdot 0.16^{\circ}\text{C}$$

$$\text{T-onzekerheid (dag)} = 0.82 + d \cdot 0.10^{\circ}\text{C}$$

Deze relaties gecombineerd met de vorige formule levert de grafiek in de volgende figuur. De grafiek is voor aantallen kleiner dan 4 per ha. (50m) afgebroken. De onzekerheid bij nog kleinere aantallen zal namelijk niet naar nog hogere waarden kunnen oplopen onder normale omstandigheden omdat de temperatuur in de kas nu eenmaal door de beperkte afmetingen gelimiteerd is. De onzekerheid, bepaald met 4 sensoren, ligt dan ook in de orde van wat met 1 standaard RV-T meetbox per ha. gehaald kan worden.

In de grafiek zien we dat om de onzekerheid met een factor 2 terug te brengen (bv. van 9 tot 4.5°C in de nacht periode) we ca. 20 sensoren (22m) zouden moeten toepassen. Ook al met 10 sensoren per ha. (33 m) kunnen we een verbetering van een factor 1.5 (3 graden verschil) bewerkstelligen. Over het algemeen is het toepassen van meer dan 30 sensoren per ha. (18 m) niet meer echt zinvol omdat de variatie in klimaat en de nauwkeurigheid van sensoren daarvoor nog zo hoog is dat niet veel meer winst te boeken is.



Figuur 29. De onzekerheid in de gemeten temperatuur als functie van het gebruikte aantal sensoren per ha. voor dag en nacht

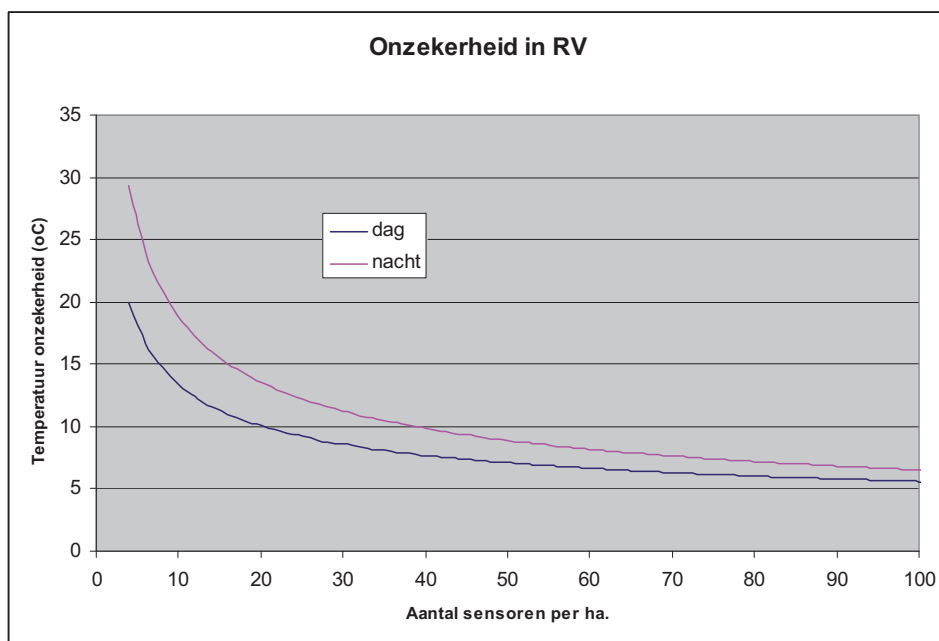
RV

Voor afstanden kleiner dan 50 m hebben we een verband afgeleid dat geschreven kan worden als:

$$\text{RV-onzekerheid (nacht)} = 2.0 + d \cdot 0.57\%$$

$$\text{RV-onzekerheid (dag)} = 2.0 + d \cdot 0.36\%$$

De grafiek laat voor lage aantallen van sensoren vrij hoge waarden van onzekerheid zien (tot 20-30%). Deze waarden zijn echter wel reëel als we kijken naar Tabel 7 in § 3.3.3. Voor *matricaria* vonden we daar RV verschillen van -22.6% tot 10.6%. Ook hier zien we dat willen we de onzekerheid van een meting met een factor twee terugbrengen van bijvoorbeeld 20% naar 10% (in de dag) dat we dan ca. 20 sensoren per ha. nodig hebben. Om deze onzekerheid dan nog eens met een factor 2 terug te dringen zouden in eens 100 sensoren per ha. nodig zijn, wat niet reëel lijkt vanwege de kosten.



Figuur 30. De onzekerheid in de gemeten RV als functie van het gebruikte aantal sensoren per ha. voor dag en nacht

4 Discussie

4.1 Toepassingsmogelijkheden draadloze mini-sensoren

In het vorige hoofdstuk is aangegeven dat monitoring met meerdere sensoren zinvol wordt als er 10-30 stuks per hectare ingezet worden. Het voordeel zit er dan met name in dat de onzekerheid over de variatie van RV en T in kas sterk verkleind kan worden, en dat daarmee er ruimte komt om set-points voor T en RV scherper af te stellen, enerzijds om energie te sparen, en anderzijds om natslag en ziekte te voorkomen. Het homogeniseren van het klimaat moet vooraleerst gezocht worden in het aanpakken van de infra-structuur. Actieve aanpak hiervan door sturing via meervoudige klimaatregelingen is alleen mogelijk indien de teler ook bereid is om meer regelpunten (actuatoren) in zijn kas toe te laten. Als we dan besluiten om sensoren in te zetten, dan is de directe vraag: 'Wat doen we met de uitkomst, en wat voor mogelijkheden heb ik om in te grijpen?' Op deze vragen willen we hier in gaan. Achtereenvolgens komen verschillende aanpakken aan de orde.

1. Uitvoeren van een klimaatanalyse met een carry-in service (JAARLIJKSE EVALUATIE)

Met behulp van veel sensoren (10-30/ha) is het mogelijk om het gedrag van de kas m.b.t. RV-T in kaart te brengen. Er zouden metingen verricht kunnen worden gedurende het najaar of voorjaar voor tenminste 10 dagen, en eventueel in verschillende seizoenen, mogelijk op verzoek van de teler. Een analyse moet uitwijzen hoe dan het statische en dynamische gedrag is (vaste of wandelende koude/warme plekken). De analyse zal dan tot een advies aan de teler leiden. Mogelijkheden zijn dan:

2. Geen noemenswaardige verschillen (GOED SYSTEEM, GEEN ACTIES)

Vooralsnog is er geen maat voor wat geen noemenswaardig verschil is. Het gebruik van de groen-label certificering voor temperatuur ($\pm 1.5^{\circ}\text{C}$) lijkt een geschikte maat. Voor RV heeft groen-label geen norm, maar een maat in de orde van $\pm 3\text{-}5\%$ RV lijkt acceptabel. Als het klimaat binnen deze normen blijft, lijkt aanpassing niet noodzakelijk.

3. Systematische plaatsafhankelijke variaties in de kas (INFRASTRUCTUUR AANPASSEN)

Indien er systematische verschillen worden gevonden buiten de norm met een infra-structurele achtergrond en die niet tijdsafhankelijk zijn, dan kunnen die het beste aangepakt worden met structurele wijzigingen in kas. Indien aanpassing niet mogelijk is, dan kan toepassing van meerdere sensorpunten in combinatie met een monitoringssysteem zinvol zijn. De teler heeft dan meer zicht op lastige plekken en kan manueel ingrijpen op zijn klimaatcomputer. Een alternatief zou kunnen zijn om de standaard RV-T meetbox op de plek te hangen die het meest kritisch is (uitkomst van het Carry-In advies), of om juist op een paar plekken een extra sensor neer te hangen (specifieke plekken, of bijvoorbeeld langs de gevels).

4. Toevallige plaatsafhankelijke variaties in de kas (KLIMAATREGELING AANPASSEN + MEER SENSOREN)

Indien er grotere variaties dan de norm in de kas gevonden zijn die niet alleen van systematische aard zijn maar ook in belangrijke mate van andere factoren afhangen zoals:

- i. het groeiseizoen (maand)
- ii. de dag (24 uur)
- iii. de dag/nacht (zon op/zon onder)
- iv. het tijdstip van de dag (uur)
- v. meetbare of bekende toevallige invloeden (windrichting/instraling/set-points/schermen e.d.)
- vi. niet verklaarbare oorzaken,

dan is het ondoenlijk voor de teler om de variaties in de kas te observeren en daarom te sturen. Dan is het zinvol om een systeem te hebben dat op ieder gewenst moment in kan grijpen op de klimaat instellingen. We denken dan met name aan een systeem dat regelt op de plek in de kas die op dat moment bijvoorbeeld de koudste is. We hebben dan een zogenaamde 'wandelende meetbox'. Afhankelijk van de variaties zou gekozen kunnen worden voor enkele standaard meetboxen te plaatsen op strategische plekken, of om een groot aantal mini-sensoren (10-30 sensoren /ha) te plaatsen in een regelmatig grid.

5. Alternatieven voor homogenisering door actieve klimaatregeling (INDIVIDUELE STURING VAN LUCHTBEHANDELING + MEER SENSOREN)

De voorgaande voorgestelde aanpakken sluiten nauw aan bij de bestaande telers praktijk met 1 RV-T-meetbox en een klimaatsturing per kas compartiment. Indien de variaties in de kas groot zijn en de teler wil zijn klimaat verder homogeniseren dan moet de infrastructuur daarop aangepast worden. De trend momenteel is daarbij uit te gaan van semi-gesloten kassystemen met meer mogelijkheden voor luchtbehandeling en individuele sturing van actuatoren zoals luchtbehandelingskasten of verwarmingssystemen. De volgende tabel geeft een schematisch overzicht van mogelijke actuatoren die in de kas voor klimaatsbeïnvloeding gebruikt zouden kunnen worden.

Voor actieve sturing van klimaat lijken vooralsnog de volgende toepassingen zinvol:

Wegnemen van verticale verschillen

1. Het innemen van droge buitenlucht met LBK's (o.i.d.) en sensoren aanbrengen op verschillende punten per LBK in de kas voor zowel horizontaal (3 stuks: begin, midden, eind) als verticaal (3: in gewas, op groeipunt, boven gewas).
2. Het mengen van de lucht met ventilatoren, bijvoorbeeld de airco-breeze, en vervolgens wederom meten op verschillende verticale en horizontale geplaatste punten.

Voor beide technieken moet onderzocht worden wat het effect op homogeniteit is wanneer actuatoren individueel geregeld gaan worden.

Wegnemen van beperkte horizontale verschillen

1. Individuele regeling van het gevelnet per kascompartiment, met monitoring van horizontale verschillen. E.e.a. kan ondersteund worden met isolatie schermen tussen de compartimenten.
2. Het wegregelen van lokale natte of koude plekken door het selectief bijverwarmen met mobiele stralers, kachels of LED-verlichting. Het gebruik van stralers is een dure oplossing en stralers hebben ook lokaal andere effecten op het gewas. Onderzocht zou moeten worden of deze aanpak energetisch zinvol is.

Tabel 13. Overzicht van mogelijk actuatoren voor klimaat homogenisering.

Ververwarming	Verwarming	Lokale verwarming stimuleert gewas tot locale vochtproductie.
	Belichting	Lokaal selectief opwarmen met belichting. Son-T voorlopig (dimbaar, deellast!), LED-verlichting is pril.
	Buisverwarming	Grote groepen, lastig om te bouwen. Er zijn 2 systemen, ondernet (buis-rail) + sneller klein capacitief systeem. Gevelnetten, vaak gecombineerd en niet apart regelbaar.
	Hete lucht kachels	Vooraf in extensieve grondteelten (sla/radijs). Goed lokaal regelbaar maar grote horizontale verschillen.
	Stralers	Deze zijn 25 jaar niet meer toegepast, maar is wel weer terug in de vorm van LEDS boven het gewas. Ze zijn licht en goed bruikbaar als regelbare lokale verwarming.
Koeling	Ventilatie	Het inlaten van droge lucht en afvoeren natte lucht. Relatie met model voor ventilatievoud schatting.
	Luchtramen (99% toepassing)	Standaard regeling voor links en rechts van nok. Gaat in grote groepen, gecombineerd op een motor. Het is een dynamisch proces en erg onvoorspelbaar. Problemen met kouval.
	Mechanische luchtverversing (semi-gesloten kas)	Betere beheersbaarheid dan ramen, maar voorlopig geen debiet regeling, behalve setpoint op RV en T (aan/uit).
	Schermen	Het energiescherm, dek- of gevelscherm kan ingezet worden in combinatie met een regelbaar gevelnet, hetgeen een goede garantie voor horizontale homogenisatie (v. Holstein, 1987) is. Schermkieren geven aanleiding voor temperatuurverschillen, wat een complex proces is. Sturing is mogelijk, maar beperkt door grotere groepen.
	Ventilatoren in de kas	Het doel van ventilatoren is het nivelleren van de temperatuur door luchtverplaatsing. Ventilatoren kunnen horizontaal of verticaal geplaatst worden. Voorbeeld is de Airco-breeze. Ventilatoren staan meestal in serie, en werken niet erg effectief. Onbekend is nog wat de effecten op het klimaat zijn indien er individueel geregeld (of geschakeld) zou worden.
	Ontvochtiging	Bijvoorbeeld door condensatie op het kasdek. Dit wordt beïnvloed via de schermen, maar is alleen regelbaar als de schermen e.d. ook individueel stuurbaar zijn.
	Luchtbehandelingskasten (LBK)	Spin-off van gesloten kassen. Inblazen van droge buitenlucht en opwarmen met kaslucht en zo afvoeren van vocht. Er is een probleem als het buiten ook nat is. Er zijn 2 soorten systemen: gevel (centraal) + slangen of decentraal in kas. De regeling is via debiet voor grotere groepen waarbij groepen worden gecombineerd uit kostenoverweging. Goede mogelijkheid van individuele regeling per LBK indien per slang meerdere meetpunten horizontaal of verticaal beschikbaar zijn. Mechanische ontvochtiging werkt in principe als een soort airco, in combinatie met na-verwarming met warme kaslucht. Het is een nieuwe veelbelovende aanpak die wordt geadviseerd door bijvoorbeeld Climeco-Engineering en ook beschreven is door Campen (2009).

4.2 Groen Label certificering

Stichting Milieukeur (2010) geeft in hun Groenlabel kas certificering eisen voor de nauwkeurigheden van de NKO-geijkte sensoren (regelvoelers) of sensoren geijkt volgens een gelijkwaardige methode. Sensoren die onder de regeling vallen zijn de sensoren voor meting van de kaslucht en luchtvochtigheid. De kasluchttemperatuur wordt daarbij in het midden van een stookafdeling bepaald, en de luchtvochtigheid op een representatieve plaats in de kas. De afwijking in de temperatuur mag in het regelgebied van 5-25°C maximaal $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ bedragen. Na correctie hebben wij een onderling verschil van maximaal $\pm 0.34^{\circ}\text{C}$ gevonden (gemeten bij 22°C), wat bijna een factor 2 groter is dan de groenlabel eis, overigens in overeenstemming met de fabrikant specificatie van $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$. Voor luchtvochtigheid geldt bij Groenlabel een nauwkeurigheid van $\pm 3\%$ RV in het regelgebied van 70-90% en $\pm 5\%$ RV in het regelgebied van 50-70%. Na correctie van de sensoren vinden wij een onderlinge gelijkheid van $\pm 1.42\%$ (gemeten bij RV = 50%), wat binnen de Groenlabel norm valt.

Het toepassen van het draadloze sensor netwerk lijkt sterk op de activiteit van Groenlabel waarbij kassen uiteindelijk op een breed scala van eisen getoetst worden. De door ons toegepaste sensoren voldoen net niet aan de eisen die Groenlabel stelt aan de meetboxen die toegepast worden om RV, T te bepalen. Verder zijn de sensoren ook op een andere wijze in de kassen geplaatst dan voorgeschreven door groenlabel. Als zodanig mogen de resultaten uit dit onderzoek ook niet gebruikt worden om een uitspraak te doen over of de onderzochte kassen al/of niet aan de groenlabel voldoen.

Wel is het zo dat, als we denken aan een eenmalige karakterisering van de kas, de systematiek die wij toegepast hebben, nauw aansluit bij de werkwijze van Groenlabel. Overleg met Groenlabel kan daarom zinvol zijn, en ook met de uitvoeringsbedrijven voor de keuring, die mogelijk nuttig gebruik kunnen maken van de in dit onderzoek ontwikkelde kennis. Hun leveringspakket zou uitgebreid kunnen worden met een extra module die statische en variabele klimaat variaties in kaart kan brengen, en advies geeft over te ondernemen acties.

4.3 Terugkoppeling resultaten naar stakeholders

De resultaten van het onderzoek zijn met een aantal betrokkenen (telers, leverancier, onderzoek en opdrachtgevers) besproken. De resultaten van deze terugkoppeling zijn hier opgenomen, en voor zover mogelijk van commentaar voorzien. Ook de resultaten van de eindbespreking zijn ook hier opgenomen.

4.3.1 Matricaria

De resultaten van de twee metingen zijn geëvalueerd met de teler. Vooral de grote temperatuurverschillen bij de eerste proef waarbij een grote gradiënt van gangpad naar zijgevel gevonden is, gaven daartoe aanleiding. Deze verschillen werden niet gevonden in de tweede periode. De oorzaak bleek achteraf een te ver op een kier staande zijgevel te zijn. Dit is door de teler na de eerste proef gerepareerd, nadat dit bij toeval ontdekt was. Op basis van alleen de RV-T meetbox kon de teler het probleem niet zien. De resultaten van de proef hebben dit wel duidelijk laten zien en de systematische analyse gaf deze resultaten weer in de 2D-plots. Indien de sensoren gebruikt waren tijdens de teelt voor controle had het probleem zich geopenbaard na enkele dagen.

4.3.2 Gerbera

De systematische analyse en metingen hebben laten zien dat er zoals bij Gerbera verwacht werd een vochtige plek zit rechts midden in het gemeten vak. Deze vondst is voorgelegd aan de teler:

'Het is zo dat ik eigenlijk geen idee heb waarom juist die plek vochtiger is. Lekkage of zoiets is de voorgaande jaren ingrijpend tegengegaan waar mogelijk, en veelal ook verholpen. Draineringen lopen ook goed voor wat we kunnen zien. Er zou denk ik meer onderzoek nodig zijn om er echt achter te komen waar het nu precies vandaan komt. Mogelijkheden worden steeds moeilijker te constateren. Met het oog is bijvoorbeeld niet te zien of de grond hier misschien meer vocht bevat. Of misschien is het een 'loop' van het vocht in de kas met de lucht mee.

Wil ik er iets aan doen: Als ik zou weten wat er effectief en haalbaar zou zijn ook qua installatie, zou ik het natuurlijk willen verhelpen. Aan de andere kant leer je zelf je eigen kas kennen, en weet je dus als iets fout dreigt te gaan dat je het eerst hier zult kunnen constateren (soort signaalvak). Beter is het als je vanuit je grafieken kunt zien wat er loos is in de gehele kas, maar dat is dus moeilijk. Als ik er zo over denk, zou op dit moment dus een optie zijn om een extra klimaatbox te installeren op zo'n plek. Zodat je uit de grafiek ook daar kunt zien wanneer iets ontstaat, of het hele jaar hetzelfde beeld geeft of alleen met een bepaalde windrichting, etc.

Er zijn dus wel mogelijkheden, maar het kost ook tijd en moeite om erachter te komen, en volgens mij hebben de meeste (zo niet alle) bedrijven in Nederland van deze plekken, soms zonder dat mensen het weten. Het lijkt een soort finishing touch, die net te veel moeite kost om op te lossen'.

4.3.3 Komkommer

Met deze teler zijn de resultaten niet teruggekoppeld. De homogeniteit van de kas heeft daartoe ook geen aanleiding gegeven. Wel heeft de teler aangegeven op zich geïnteresseerd te zijn in het meten van vochtgehalte in zijn teeltsubstraat, en mogelijk met draadloze sensoren.

4.3.4 Tomaat

Met deze teler zijn de resultaten niet teruggekoppeld. De homogeniteit van de kas heeft daartoe ook geen aanleiding gegeven.

4.3.5 Draadloos Sensor Netwerk

De resultaten m.b.t. het functioneren zijn besproken met de leverancier van het mini-sensor meetnetwerk. Vooral de volgende zaken gaven daartoe aanleiding:

Meetnauwkeurigheid

De door ons gebruikte mini-sensoren hebben gezien de groen-label certificeringsnorm een ietwat aan de krappe kant meetnauwkeurigheid. Vooral voor lage en hogere temperaturen kan deze van 0.4°C tot 1.0°C variëren. Voor hoge RV (>95%) is de nauwkeurigheid beperkt tot 5%. De toeleverancier heeft aangegeven dat in de door ons gebruikte exemplaren nog een sensor element met lagere specificaties is gebruikt. In nieuwere versies zullen sensor-elementen met wat hogere specificatie gebruikt gaan worden.

Er is een redelijke spreiding van de offset van de sensoren t.o.v. elkaar gevonden. Het is dus verstandig om de sensoren voor gebruik op elkaar af te stemmen (onderlinge ijking en offset-correctie). Dit zou door de fabrikant kunnen gebeuren. De afwijkingen bedragen ca. $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ met een standaardafwijking van 0.24°C voor de temperatuur. Volgens specificatie (bij 25°C) zou dit 0.4°C moeten zijn. Dit is dus een weinig groter, maar ligt in de buurt, en is zoals onder praktische omstandigheden verwacht mag worden. Wel zijn sensoren met een element van lagere nauwkeurigheid gebruikt. In nieuwere versies gebruikt de fabrikant een element met hogere specificatie (0.3°C).

Instraling

De directe instraling van de zon op de sensoren geeft aanleiding tot hogere meetwaarden voor T en lagere meetwaarden voor RV. Dit probleem doet zich alleen overdag voor. Het ontstaat omdat de mini-sensoren niet geventileerd zijn, en passief opwarmen. In de praktijk geven de nachten de meeste problemen met vocht en temperatuur, zodat deze problematiek in die periode niet speelt. Desondanks heeft de leverancier inmiddels een actie gestart om de behuizing aan te passen en de sensoren minder gevoelig voor instraling te maken. De gebruikte sensoren zijn overigens niet echt bedoeld voor toepassing in de glastuinbouw, maar worden vooral gebruikt in de utiliteitsbouw voor monitoring van binnenklimaat. De leverancier beoogt daarom een speciale versie voor de glastuinbouw te ontwikkelen.

Condensatie op sensor-element

Tijdens de tests is gebleken dat 4 van de 100 sensoren onder koude en hoge RV veel te lage RV-waarden aangaven. Deze sensoren zijn niet uit de kalibratiesets naar voren gekomen. Dit soort sensoren verstoren de 2D-plots enorm en werden verwijderd uit de meetset. De kalibratie zou in ieder geval over een grotere range gemaakt moeten worden bijvoorbeeld bij koud en nat en bij warm en droog.

Dit probleem is met de fabrikant besproken. Het blijkt dat bij hoge luchtvochtigheden ($RV > 95\%$) en lage temperaturen bestaat de kans dat het sensor element nat wordt. Het resultaat is dat de meting daarmee voor een langere periode (totdat de sensor weer is opgedroogd) geen betrouwbare meting levert (boven 100% of zelfs onder de nul). De oorzaak is terug te voeren op het Sensirion solid-state element. Hieraan is weinig te doen. Wel levert de Sensirion sensor-elementen die een hogere nauwkeurigheid hebben voor RV dan de sensor elementen gebruikt in de proeven. De leverancier heeft hiervan notie genomen en heeft aangegeven in de glastuinbouw versie deze sensor met betere specificaties te zullen gebruiken.

De vraag is nu of dit exemplarisch voor enkele sensoren is of dat meerdere sensoren onder deze condities hiervan last kunnen hebben. Vooralsnog zou de conclusie moeten zijn dat de sensoren niet juist kunnen meten onder hoge ($> 95\%$ RV) condities. Geverifieerd moet worden of dit voor de tuinbouwpraktijk een probleem zal opleveren. In ieder geval moet bij dataverwerking hiermee rekening gehouden worden.

Bevestigingsmogelijkheden voor sensoren

Doordat de bestaande sensoren bedoeld zijn voor wandmontage bleek dat voor de toepassing in kassen enige vindingrijkheid benodigd was. De ophangsystemen moesten voor de zeer variabele infra-structuur in kassen telkens weer anders gemaakt worden. Dit pleit voor een universeel montage systeem voor toepassing in kassen. Ook hiermee is de leverancier aan de slag.

Draadloos systeem en uitlezing

Het draadloze systeem, de computer en ontvangers hebben goed gefunctioneerd tijdens de proeven. Voor het onderzoek heeft dit perfect gewerkt, maar voor praktische toepassing bij telers zou dit mogelijk niet zondermeer geschikt behoeven te zijn. Het bestaande systeem heeft geen koppelingsmogelijkheden met de bestaande klimaatcomputers. Daarvoor zou de leverancier speciale programmatuur moeten ontwikkelen om deze koppeling te ondersteunen. De faciliteit om in 2D of zelfs 3D temperatuur en RV verdelingen te maken is wel een interessante optie voor telers, omdat daarmee op ieder gewenst moment de kritieke plekken opgespoord kunnen worden en het klimaat regime desgewenst aangepast kan worden. Ook het hebben van een eenduidige maat voor de spreiding, het verschil tussen minimale en maximale waarde in de kas, of de uniformiteit zou een interessante weer te geven grootheid kunnen zijn.

4.3.6 Workshop

Op 6 juli 2010 is bij het productschap Tuinbouw in Zoetermeer een bijeenkomst georganiseerd waarbij de resultaten van het onderzoek zijn gepresenteerd en bediscussieerd. Aanwezig bij deze bijeenkomst waren 11 personen (opdrachtgevers:1, onderzoek:4, telers: 3, toelevering en advies: 3 personen). De volgende opmerkingen en vragen kwamen daarbij aan de orde.

- Welke boodschap is er nu voor de telers?

Deze boodschap is in principe verwoord in 4.1.

- Er is een boodschap naar de leveranciers maar die is niet zo expliciet neergezet. In essentie komt het er wel op neer om enkele sensoren te vinden die een paar procent afwijken, en die weg te gooien. Wat is de boodschap naar de leveranciers van minisensoren (vooraf testen en x % weggooien) en bepaalde (reeds genoemde verbeterpunten aanbrengen)?

Het advies hier is om de sensoren daarop bij de fabrikant te laten controleren en ook nauwkeurigere sensor-elementen te gebruiken. De meetsoftware zou een routine moeten bevatten die controleert of de sensoren onbetrouwbaar werken in het vochtregime rond verzadiging, omdat hier compleet irrelevante meetwaarden uit kunnen komen. Fabrikanten moeten dus testen vooraf, zowel op nauwkeurigheid, als gevoeligheid voor verzadigde lucht.

- Een onbeantwoorde vraag is wat je nu precies kunt met verfijnde metingen. Immers het hangt van de set mogelijkheden (verwarmingsgroepen e.d.) af of je geconstateerde verschillen kunt neutraliseren. En dit staat eigenlijk los van smart dust of meer gewone meetboxen.

Verfijnde metingen (toepassing van een meetnet met mini-sensoren) levert een compleet actueel beeld van de ruimtelijke (horizontale) klimaatverdeling. Enerzijds kan dit meetnet tijdelijk geïnstalleerd worden voor onderzoek/test/certificering doeleinden, en anderzijds kan een teler naar behoefte overwegen een meetnet permanent te installeren als daar aanleiding toe is. Op dit moment is het in principe al mogelijk deze sensoren te gebruiken voor karakterisering van de kas, omdat dit immers ook in dit onderzoek gebeurd is. Advies is wel dat toeleveranciers en onderzoek komen tot een beschrijving van de analyse software en implementatie daarvan.

Het meetnet kan in combinatie met een klimaatregeling gebruikt worden door het meetnet als een 'wandende meetbox' te beschouwen en te regelen naar bijvoorbeeld het koudste/natste punt, of door een kleinere marge voor vochtdeficit of dauwpunt traject te hanteren bij de regeling. Het doel is dan een weinig aan extra energie besparen en toch natslag blijven voorkomen. Deze toepassing vergt nog onderzoek naar de werkelijke energiewinst die dit kan opleveren. Verder moet voor deze toepassing de sensor leverancier de aanpassingen doorvoeren zoals voorgesteld.

Een andere mogelijke, toekomstige toepassing is het combineren van het meetnet met aansturing van individuele regelgroepen voor verwarming en ventilatie. Deze toepassing vergt vooraleerst nog verder onderzoek. Een eenvoudige vorm zou kunnen zijn het sturen van een apart gevelnet op basis van enkele (extra) standaard klimaatboxen. Een veel complexere aanpak zal het individueel sturen van ventilatoren en luchtbehandelingskasten zijn.

- Verder blijft de vraag hangen of met de opgedane kennis een teler niet een paar conventionele meetboxen extra zou moeten ophangen. Dat is bedrijfszeker en heeft minder last van instraling etc. De kennis van smart dust kan dus ook vertaald kunnen worden naar dichter bij de huidige praktijk liggende zaken.

Ja, dat kan, zeker zoals aangeven bij de regeling van een gevelnet, maar alleen als het in belangrijke mate om systematische afwijkingen in de kas gaat.

- Het is niet duidelijk waarom het klimaat in hoogopgaande gewassen gelijkmatiger is dan in laagblijvende gewassen. Dat is een boeiend puntje. Heeft dat te maken met de hoogte waarop je meet, het volume boven het gewas (ongehinderde luchtstroming) of dergelijke? Zijn er nog verschillen in teler doelgroep (lagere gewassen of grondteelten - die staan ook laag, maar hoe waar ligt de oorzaak voor laag) en hoogopgaande groenten of ligt dat aan de kas (de omvang van de lucht boven het gewas), naast natuurlijk een praktisch puntje dat een sensor tussen het gewas in de schaduw minder instraling vangt dan vrij boven het gewas. Daarnaast, en daarmee samenhangend, concludeert het rapport dat er bij groente juist meer op energie te winnen valt en bij bloemen juist meer op een betere oogst. Hoe kan dat?

Hierop is binnen het onderzoek geen antwoord gevonden, enerzijds door de keuze om in een horizontaal vlak vrij dichte metingen te verkrijgen en anderzijds door de beperking van de 4 gewassen. Bij groenten is inderdaad net in het gewas bij het groeipunt gemeten, en bij bloemen is dit bij de bloem. Deze keuze was om de plek waar de grootste kans op schade t.g.v. natte plekken zou kunnen ontstaan te nemen. Luchtstroming bij bloemen lijkt daardoor meer vrijer, waardoor mogelijk de variaties groter zijn. Meer onderzoek zou nodig zijn om bijvoorbeeld bij bloemen ook te kijken naar het (micro-) klimaat in het bladgedeelte van de planten op een wat lagere hoogte.

Groentegewassen geven regelmatig een oogstmoment, en telers hebben bijna dagelijks afzet van producten. Als een product achter blijft in groei t.g.v. een inhomogeen klimaat, wordt dit product later geplukt en een volgende keer afgezet. Bloemen daarentegen worden vaak (natuurlijk niet alle soorten) in batches geoogst, en het liefst van een uniform product, omdat de afnemer dat vraagt. Door het hebben van een homogeen klimaat kan het gewas ook homogener worden, en mogelijk het oogst moment zelfs wat beter gestuurd worden. Door het voorkomen van ziekten (natte plekken) zijn ook meer bloemen geschikt voor verkoop. Omdat naar verwachting de meer opbrengst uit het product hoger is dan de kosten op energiebesparing voor een homogener klimaat, lijkt het dat bij bloemen dus de kwaliteit van het gewas een belangrijkere impuls kan zijn om meer sensoren in de kas te hangen. Bij groente lijkt het dat energiebesparing de ruimte voor investering kan zijn.

- Welke boodschap is er ten aanzien van meten in een dichter grid.

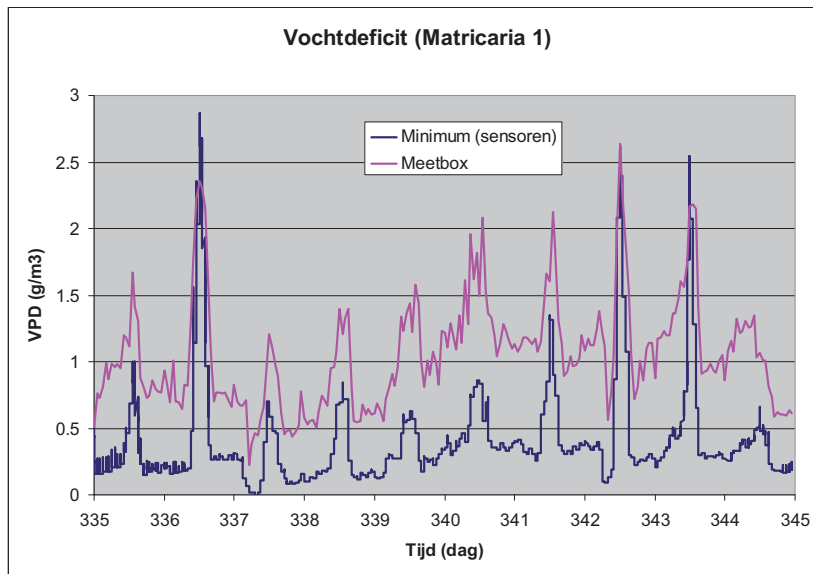
Toepassen is zinvol vanaf 9 sensoren per hectare. Vooral als we te maken hebben met wandelende plekken. Meer dan 30 sensoren per hectare toepassen is niet meer zinvol omdat dit naar verhouding van de investering niet veel meer informatie oplevert. In gevallen dat er systematische gradiënten in de kas zijn die niet van plek wijzigen en een duidelijke manifestatie hebben in horizontale x- of y-richting in de kas, maar wel in grootte orde wijzigen t.g.v. buitenklimaat, dan is het toepassen van sensoren in een minder dicht grid mogelijk. Toepassing van standaard RV-T meetboxen ligt dan voor de hand (bv. gevelverwarming).

- Wat is het voordeel van het meten met smart dust versus meetboxen.

Het voordeel van mini-sensoren is dat ze een factor 5 tot 10 goedkoper zijn dan meetboxen en dat er daarmee dus meer investeringsruimte is om met een hoger meetgrid te gaan meten. Verder voordeel is dat ze flexibel en eenvoudig opgehangen (verhangen) kunnen worden omdat ze draadloos werken. Dit is enerzijds een voordeel voor Carry-in service maar ook voor meer permanente installatie. Met een hogere meetdichtheid ben je in staat om met hoge zekerheid het volledige klimaat in beeld te brengen. Je kunt de koudste en natste plek vinden en daar op ieder moment je klimaatregime op aanpassen en optimaliseren. Toepassing vanaf 9 sensoren per hectare is zinvol. In principe ligt de prijs dan in verhouding tot 1 meetbox per hectare dan op de kosten van ca. 2 meetboxen per hectare. Nadeel van de toepassing van mini-sensoren blijft dat deze gevoelig zijn voor instraling. De verwachting is dat de leverancier de sensoren wel op een aantal punten zal verbeteren, en ook dat het instralingeffect met een factor 2-3 gereduceerd kan worden. Wat wel zo is, in het onderzoek hebben we gezien dat vooral 's nachts er winsten te behalen zijn met de toepassing van energiezuinige klimaatregeling, en dat in de nacht de sensoren juist geen last hebben van de instraling. Het punt van instraling op de sensoren is dus mogelijk niet zo relevant.

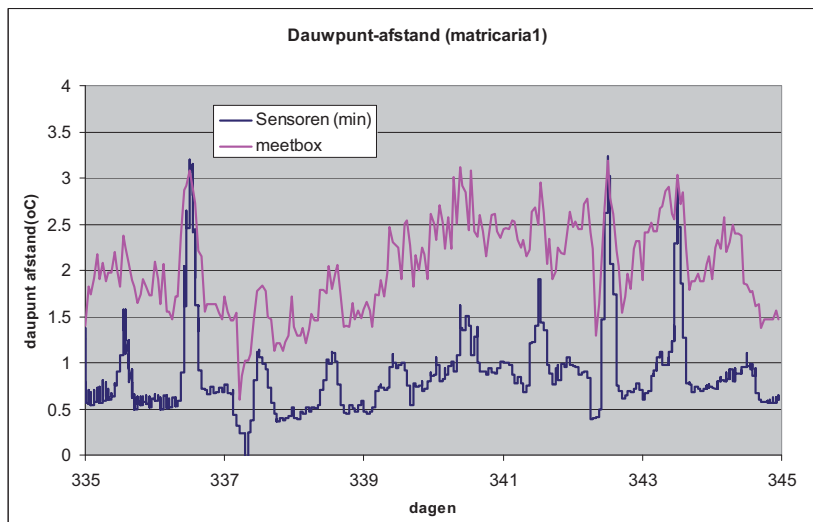
- Welke boodschap is er om geconstateerde verschillen te lijf te gaan (dat al wel kwalitatief in 4.1).

In § 4.1 is nader uitgelegd hoe de route voor toepassing van mini-sensoren zou kunnen verlopen. Het kwantificeren van een mogelijke energiebesparing bij toepassing van bijvoorbeeld een 'wandelende RV-T-meetbox, behoorde niet tot het doel van dit onderzoek. Op basis van de verzamelde data, en onder aanname van verschillende streef marges, kan de verzamelde data wel gebruikt worden om een inschatting van energiebesparing en risico op natslag berekend worden voor alle meetperiodes. Als voorbeeld is voor een teelt (matricaria 1) een analyse gemaakt van het vochtdeficit en de dauwpuntafstand, weergegeven in de volgende drie figuren.



Figuur 31. Vochtdeficit bepaald met de meetbox of via de natste plek (minio-sensoren) voor matricaria 1

In bovenstaande figuur zien we dat de teler onder alle omstandigheden zijn hele kas boven de $VPD=0$ waarde heeft gehouden. Dit heeft hij gerealiseerd door ongeveer een marge van $VPD = 0.5-1.0$ aan te houden op basis van zijn RV-T-meetbox. Echter, in veel gevallen lijken er 's nachts nog mogelijkheden te bestaan om iets meer vocht in de kas toe te laten, en dus iets minder te ventileren.

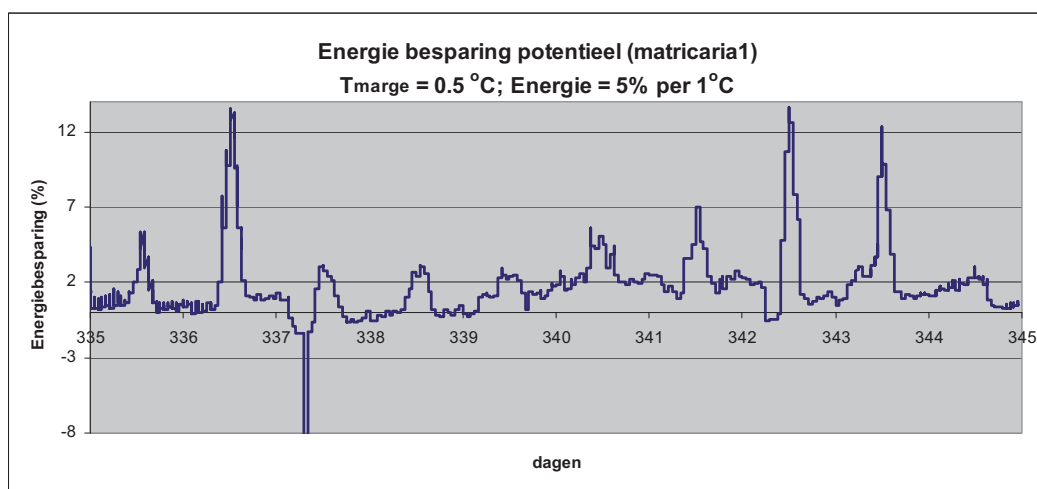


Figuur 32. Dauwpunt afstand voor matricaria 1 bepaald met RV-T-meetbox en mini-sensoren (natste plek)

In bovenstaande figuur is de dauwpuntafstand uitgezet (het temperatuur traject dat verlaagd kan worden totdat er condensatie optreedt). We zien dat de minimale dauwpuntafstand ongeveer 1°C in werkelijkheid lager is dan met de meetbox aangegeven wordt. De teler houdt daarvoor ook een marge aan van 1 tot 2°C . Gedurende dag 337 echter is op een of meerdere plekken in de kas verzadiging bereikt en de afstand tot nul teruggelopen. Op dit punt liep de teler dus natslag risico. Als hij een marge van 0.5°C wil aanhouden, dan is er gedurende de dagen 340-345 zeker nog iets ruimte om de nacht temperatuur te verlagen.

- In §4.4 staat nog de vraag dat nog niet bekend is hoeveel energie er te besparen valt. Maar globaal is toch al wel iets aangeven zoals in de doelstelling wel geformuleerd is; 10% energiebesparing als de temperatuur 1 graad verlaagd kan worden. Hoeveel precies (0.8 of 1.3°C) is iets minder van belang; het gaat om de orde grootte. Dan is de investeringsruimte (bijvoorbeeld in praktijk 5% van 40 m³ = 2 m³/m² besparing * 0,20 (gasprijs)= 0,40 euro * 5 jaar terugverdientijd => 2 euro/m² investeringsruimte + eventueel meer opbrengst. Komt dat een beetje in de buurt van de kosten voor zo'n systeem?

In onderstaande figuur is een inschatting van het energiebesparingpotentieel gemaakt op basis van een marge van 0.5°C en de aanname dat verlaging van de temperatuur met 1°C leidt tot een energie winst van 5% (voorzichtige schatting). Daarbij gaan we er vanuit dat alleen gedurende de nachten deze aanpak zinvol is, omdat overdag een heel andere klimaatstrategie gewenst is. Over de periode van 10 dagen (matricaria1) kan zo 's nachts variërend van 0 tot 2% energie bespaard worden. Verder kan de teler gedurende de nacht van dag 337 zijn klimaatcomputer wat hoger instellen of eerder luchten om natslag te voorkomen.



Figuur 33. Energie besparingspotentieel (matricaria 1)

Deze berekening is maar een voorbeeld, maar we kunnen op basis van dit plaatje een inschatting op jaarbasis maken van de mindere energiekosten als we alleen gedurende de nacht (50% van de tijd) kijken en gedurende een half jaar (herfst-winter seizoen). Over tien dagen is de gemiddelde energiewinst gedurende de nachten ongeveer 1%. Voor alleen de nachten en de winter-herfst periode betekent dat dus $\frac{1}{4} = 0.25\%$ minder energie. Bij toepassing van 1 ha. kas zijn de kosten op jaarbasis voor 0.25% gas, ($= 0.25 \cdot 40 \text{ m}^3/\text{m}^2 = 0.1 \text{ m}^3/\text{m}^2$; kostprijs = € 0.20 = € 0.02 per /m². Voor 1 ha. is dat dan $10.000 \cdot 0.02 = € 200/\text{ha}$ per jaar. Investering is 9 sensoren + systeem + installatie is naar schatting € 4000 (moet fabrikant nog aangeven). Terugverdientijd is daarmee 20 jaar. Deze tijd ligt niet in de orde van 5 jaar, maar mogelijk zijn er voorbeelden te vinden in de dataset waarbij de energiebesparing groter kan zijn, ook hebben we een conservatieve schatting van 5% per graad genomen. Daarbij zou het voorkomen van schade ook als winst meegenomen moeten worden, en dus de derving van de teler op dit moment bepaald moeten worden. Ook kan er mogelijk nog scherper geteeld worden en de veiligheidsmarge kleiner gekozen worden.

- Waar ik in eerste instantie wel wat in zie is een 'carry in service'; hoe zie jij dat als toepassing in de praktijk; zie jij daar veel voordelen, hoe denk je dat tuinders hier tegenaan kijken en hoe/door wie uit te voeren?

De leverancier van sensoren zou een kant- en klare meetset kunnen ontwikkelen (bv 10 sensoren met een basissysteem en software) die als handzame koffer als een mobiel meetsysteem ingezet kan worden. Dit systeem moet eenvoudige software bevatten om analyses uit te voeren. Deze set zou verkocht kunnen worden aan voorlichting partijen (DLV) of certificerende organisaties voor Groen-label, die vervolgens de meetsessies als service kunnen verkopen. Ook kan deze set als mobiele set aan grote telers verkocht worden die zelf op hun bedrijf regelmatig in allerlei compartimenten controles willen uitvoeren. Deze analyses kunnen telers informatie verschaffen of verdere infra-structurele aanpassingen noodzakelijk en zinvol zijn. Wageningen UR Glastuinbouw zal hiervoor nog een praktische versie van de analyse software moeten ontwikkelen.

Ook kan na analyse de conclusie zijn dat toepassing van een aangepaste klimaatregeling zinvol is. Bij eenvoudige statische gradiënten kunnen enkele meetboxen bijgeplaatst worden, en kan de regeling van bv. een extra verwarmingsgroep individueel stuurbaar gemaakt worden. Bij complexere gradiënten of in het geval van dynamische koude/natte plekken, zou een dicht meetnet van mini-sensoren permanent geïnstalleerd kunnen worden. Voordat het zover is, moeten toeleveringsbedrijven van klimaatcomputers delen van hun software aanpassen door een extra module toe te voegen voor de nieuwe regeling, mede moeten zij samen met de toeleverancier van de mini-sensoren een interface daarvoor ontwikkelen. Ook zal Wageningen UR Glastuinbouw het concept van de 'wandelende klimaatbox regeling' evenals de gevelsturing, verder moeten ontwikkelen en evalueren.

4.4 Vragen die nog niet beantwoord zijn

In dit rapport zijn verschillende resultaten gepresenteerd van de 6 proeven, en zijn suggesties gegeven voor toepassingen van RV-T draadloze mini-sensoren. Toch blijven er een aantal vragen open staan, of zijn er nieuwe bijgekomen. Ook zijn er nog acties nodig (vooral toeleveranciers) voordat grootschalige introductie van mini-sensoren gestart kan worden. Hier een opsomming.

Vragen

1. Hoeveel energie kan er effectief bespaard worden als we een fijn grid van mini-sensoren aanleggen, en hoeveel ruimte is er dan voor investeringen?
2. Hoe effectief zijn de voorgestelde methoden van klimaatsturing:
 - a. klimaatinstellingen via teleradvies,
 - b. automatische klimaat set-points via het wandelende meetbox-principe, en
 - c. individuele sturing van actuatoren, zoals de LBK's, ventilatoren of lokale verwarming?
3. Op welke wijze kunnen de resultaten van de mini-sensor metingen het beste gepresenteerd worden aan de telers, zodat zij optimaal gebruik kunnen maken van de informatie?
4. Op welke wijze moet de meetdata geanalyseerd worden om een zo goed mogelijk advies over aanpassingen te kunnen geven?

Acties

1. Het verbeteren van mini-sensoren voor toepassing in de glastuinbouw, met name de behuizing en meet-nauwkeurigheid.
2. Het ontwikkelen van een geschikte interface tussen het meetsysteem en bestaande klimaatcomputer systemen.
3. Het ontwikkelen van een goede gebruiker interface (adviesmodule) voor de teler evenals de Carry-in service organisatie.

5 Conclusies

Sensoren

De meetnauwkeurigheid van de sensoren is aan de krappe kant vooral in de extreme temperatuur bereiken (0-50°C) en voor hoge RV (>95%) ligt de nauwkeurigheid op $\pm 1.0^\circ\text{C}$ en 5%. Vooral gedurende periodes met hoge RV kan de praktijk daar last van hebben. Onder normale bedrijfsomstandigheden (15-25°C en RV < 95%) voldoen de sensoren prima voor hun doel met $\pm 0.4^\circ\text{C}$ en $\pm 3\%$.

Er is een grote invloed van de instraling op de individuele mini-sensoren waar vooral overdag rekening mee gehouden moet worden. Temperaturen worden te hoog aangegeven tot enkele graden en RV's kunnen veel lager zijn tot wel 20%.

Er is een redelijke spreiding van de offset van de sensoren t.o.v. elkaar. Alhoewel deze afwijking kleiner is dan de meetnauwkeurigheid, is het verstandig hiervoor de sensoren te corrigeren door een vergelijkingstest uit te voeren, eventueel bij de leverancier.

Bij hoge RV's in de buurt van verzadiging blijken de sensoren gevoelig voor condensatie wat in dat geval foutieve metingen oplevert. In de praktijk ontstaan deze situaties vooral gedurende de nachten met lage temperatuur en hoge RV. Omdat vanuit de sensor zelf geen melding van een fout komt, moet de gebruiker zelf voorzichtig zijn met het gebruiken van deze waarden.

Het bestaande systeem is niet zondermeer geschikt voor montage onder allerlei praktische kassystemen. Het verdient aanbeveling dat de fabrikant voorziet in een universeel toepasbaar montage systeem. Ook de behuizing moet aangepast en robuuster worden voor toepassing in de glastuinbouw praktijk.

Het draadloze meetsysteem heeft goed gefunctioneerd. Het verdient aanbeveling om een goede interface tussen het meetsysteem en de gangbare klimaatcomputers te ontwikkelen, en daarmee rekening te houden dat er een geschikte en bruikbare advies- en presentatiemodule komt voor gebruik door de teler.

Gegeven de gehaalde nauwkeurigheden voldoen de gebruikte sensoren niet aan de groen-label norm en kunnen deze als zodanig niet ingezet worden voor certificeringdoeleinden.

Toepassing

Bij de onderzochte kasteelten van matricaria, gerbera, komkommer en tomaat is gebleken dat de horizontale variatie, gemeten als verschil tussen de maximale en minimale waarde (ΔT , ΔRV), van temperatuur en RV groter kan zijn dan respectievelijk 1.5°C en 7.5% de groenlabel kas norm is vastgelegd. De uniformiteit, gedefinieerd als het percentage oppervlak in de kas dat voldoet aan de groen-label norm, varieert van 75-100%. Deze waarden zijn sterk afhankelijk van allerlei interne en externe factoren, en vooral van minder optimale bedrijfsomstandigheden die onopgemerkt (kapotte ramen e.d.) of onoplosbaar (natte plekken) blijven. Zowel systematische variaties (1.4-4.5°C; 6-18%), en in iets mindere mate ook toevallige variaties (0.8-4.0°C; 1.8-14%), zijn hiervoor verantwoordelijk. Er zijn grotere verschillen voor de verschillende teelten, en over het algemeen zijn de kassen met groente gewassen iets homogener dan de laagblijvende bloemeteelten.

De ΔT van een kas is sterk gerelateerd aan de verschiltemperatuur tussen binnen en buiten de kas. De experimenten bevestigen de globale vuistregel dat de ΔT een factor 0.20-0.25 bedraagt van de verschil in temperatuur buiten en binnen in de kas, en wel typisch voor verschillen buiten-binnen van rond de 12°C. Deze factor kan hoger zijn tot 0.40 voor lagere verschil temperaturen en tot 0.1 kleiner worden voor verschillen groter dan 12°C.

Het bepalen van de ΔT en ΔRV op basis van slechts één RV-T meetbox per hectare is onmogelijk, daarvoor is de onzekerheid te hoog door de natuurlijke variatie in de kassen. Een teler kan dan alleen vertrouwen op ervaring. Door een meetnet van sensoren met een hogere dichtheid toe te passen, kan de ΔT en ΔRV met meer zekerheid bepaald worden. Een lagere onzekerheid dan $\pm 0.8^\circ\text{C}$ en $\pm 2.0\%$ is niet haalbaar omdat dat de intrinsieke nauwkeurigheid is van een verschiltemperatuur gemeten met twee sensoren die naast elkaar staan. Naarmate het meetnet wijder gezet wordt neemt de onzekerheid toe (door natuurlijke variaties in de kas) en in de meest ongunstige situaties met $\pm 0.16^\circ\text{C}/\text{m}$ en $\pm 0.57\%/m$ voor de nachten en met $\pm 0.10^\circ\text{C}/\text{m}$ en $\pm 0.36\%/m$ voor de dagen. Om de onzekerheid omtrent de ΔT en ΔRV in kassen van de natuurlijke variatie terug te brengen met een factor 2 zijn als vuistregel ca. 20 sensoren per hectare (op 22 m van elkaar in een vierkant grid) nodig in het enkelvoudige horizontale vlak. Indien ook verticale verschillen belangrijk zijn wordt geadviseerd op 3 hoogten te meten: in het gewas, bij het groeipunt en boven het gewas. Om de onnauwkeurigheid met nog eens een factor 2 terug te brengen moeten er vervolgens ca. 100 sensoren per hectare ingezet worden.

Het draadloze sensor netwerk kan ingezet worden om de klimaatvariaties in kassen in kaart te brengen. Dit zou in het kader van Groen label certificering kunnen met behulp van een Carry-In service. Er wordt geadviseerd om dan een hogere meetdichtheid te gebruiken van tenminste 30-40 sensoren per hectare (ca. 15-18 m grid). Bij het vinden van alleen belangrijke systematische horizontale verschillen kan de teler aanpassingen in de infrastructuur ondernemen, of hij kan de plaats van een of enkele extra RV-T meetboxen zo kiezen dat een beter inzicht wordt verkregen over de variaties om daarmee het klimaatregime aan te passen. Indien de kas ook in belangrijke mate toevallige variaties heeft is het zinvol om een meetnet met hoge dichtheden toe te passen, en te gaan regelen op de sensor met de laagste temperatuur.

Op termijn zal, indien onderzoek en praktijk daarvoor meer onderzoek naar de effectiviteit verricht hebben, de toepassing van een actief klimaatregelsysteem op basis van individuele sturing van actuatoren en toepassing van een draadloos meetsysteem mogelijk kunnen worden. Kansen voor het wegnemen van verticale verschillen liggen vooral op de combinatie met luchtbehandelingskasten en ventilatoren veelal toegepast in (semi-) gesloten teeltsystemen. Voor het wegnemen van horizontale verschillen bestaan mogelijkheden om de sturing van het gevelnet in combinatie met compartimentschermen te individualiseren.

Met de toepassing van een meetnet krijgt de teler een systeem in handen om temperatuur en RV instellingen op de klimaatcomputer iets scherper en met meer zekerheid te kunnen instellen in relatie tot de variaties in de kas. De ruimte die hij daardoor krijgt bij het voorkomen van ziekten kan terugverdiend worden door bijvoorbeeld een reductie van de gebruikte hoeveelheid gas. Voor de groente gewassen lijkt dit in ieder geval mogelijk. Nader onderzoek is wel nodig om de potentie van de besparing te kwantificeren. Bij bloemen gewassen moet de ruimte voor investering en het terugverdienen daarvan echter vooral gezocht worden in de winst die te behalen is met de mogelijkheden om een veel homogener en gelijkmatiger gewas te telen. Daar zou het zelfs zo kunnen zijn dat door toch de temperatuur iets te verhogen, en meer gas te gebruiken, de teler een kwalitatief beter en homogener gewas aflevert wat derving kan voorkomen. Deze winsten zijn doorgaans groter dan de extra kosten voor de energie.

6 Referenties

6.1 Literatuur

Campen, J.B., 2009.

Mechanische vochtafvoer. Wageningen UR Glastuinbouw, 2009.

Campen, J.B. & A. de Gelder, 2007.

Horizontale variatie, Plant Research International B.V., Wageningen, Rapport 131, januari 2007.

Bontsema, J., J.O. Voogt, P.A. van Weel, J. van den Beukel, A. Zijderwijk, C.W. Labrie, F.R. van Noort & M.G.M. Raaphorst, 2009.

Energiezuinige optimalisatie van het microklimaat door luchtbeweging. Wageningen, Wageningen UR Glastuinbouw, Rapport no. 269.

Jewett, T.J. & W.R. Jarvis, 2001.

Management of the greenhouse climate in relation to disease control: a review, *Agronomie* 21 (2001) 351-366.

Nijs, L., 1997.

Handleiding voor het opsporen en oplossen van horizontale klimaatverschillen. PBG rapport 112.

Os, E.A. van, M.A. Bruins & B.A.J. van Tuijl, 2006.

Meting van ruimtelijke verdeling van temperatuur en RV met behulp van draadloze minisensoren (SMART DUST) Deel 1: programma van wensen en eisen voor het on-line meten van de ruimtelijke verdeling van temperatuur en RV met draadloze minisensoren. Plant Research International, Wageningen UR, Rapport 126, November 2006, pp.33.

Os, E.A. van, M.A. Bruins, J. Hemming, L.C.P. Keizer, G.J. Swinkels & B.A.J. van Tuijl, 2008.

Meting van ruimtelijke verdeling van temperatuur, luchtvochtigheid en CO₂ met behulp van draadloze minisensoren. SMART DUST deel 2a en 2b. Wageningen UR Glastuinbouw, Rapport 183, Mei 2008, pp.62.

Pelicaan, C. (ref. onbekend).

Knijpersysteem voor ophanging van gewas bij hogedraadteelt.

Sleegers, J. & P.H.B. de Visser, 2009.

Model helpt telers om botrytis te voorkomen: Wageningen UR Glastuinbouw ontwikkelt computermodel voor gerbera (interview met Pieter de Visser). *Vakblad voor de Bloemisterij* 64 (43). p. p. 44-45.

SMK (Stichting Milieukeur), 2010.

Certificatieschema Groen Label Kas (1 maart 2010- 1 januari 2011), Code: GLK.9-2010, Volgnummer: GLK.2, pp. 66.

Van Tuyl, B.A.J., E.A. van Os & E.J. van Henten, 2008.

Wireless sensor networks: state of the art and future perspective. *Acta Horticulturae*, 801 (ISSN 0567-7572), 547-554.

Vijverberg, E.L.M., 1986.

Horizontale temperatuurverschillen; oorzaken, gevolg en oplossingen. 's-Hertogenbosch (NL): Hogeschool Tuinbouw.

6.2 Disseminatie

Balendonck, J. & E.A. van Os, 2009.

Meten van (Micro) Klimaat met Draadloze Sensoren (Smart Dust)

Expertbijeenkomst: 'Energiebesparing in de bioglastuinbouw', Bleiswijk, 9 februari 2009.

Balendonck, J., 2010.

Presentatie en discussiebijeenkomst SMART DUST 3, Toepassing van draadloze mini RV-T-sensoren,

Productschap Tuinbouw, Zoetermeer, 6 juli 2010.

Balendonck, J., E.A. van Os, R. van der Schoor, B.A.J. van Tuijl & L.C.P. Keizer, 2010.

Monitoring Spatial and Temporal Distribution of Temperature and Relative Humidity in Greenhouses based on Wireless Sensor Technology. Abstract for: International Conference on Agricultural Engineering Towards Environmental Technologies AgEng 2010. Clermont-Ferrand, France, September 6-8, 2010.

Kierkels, T., 2008.

Gas besparen door continu meten van temperatuurverschillen, draadloos sensorsysteem Smart Dust in ontwikkeling, Interview met J. Balendonck en E.A. van Os in: Onder Glas, nummer 12, december 2008, p 62-63.

Kierkels, T., 2010.

Sturen op temperatuur- en vochtverschillen; het grote nadeel van een meetbox: het meten op één plaats. Interview met J. Balendonck in Onder Glas, nummer 5, mei 2010. p. 16-17.



Ministerie van Landbouw, Natuur en
Voedselkwaliteit

Productschap



Tuinbouw



Projectnummer: 3240315009 | PT nummer: 13341