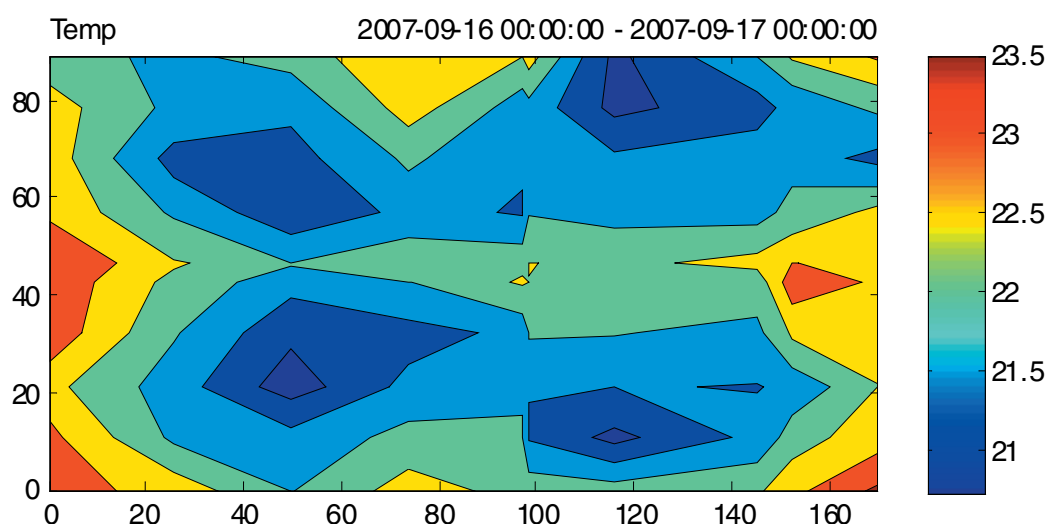


Meting van ruimtelijke verdeling van temperatuur, luchtvochtigheid en CO₂ met behulp van draadloze minisensoren

Smart Dust deel 2a en 2b

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





Meting van ruimtelijke verdeling van temperatuur, luchtvochtigheid en CO₂ met behulp van draadloze minisensoren

Smart Dust deel 2a en 2b

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

© 2008 Wageningen, Wageningen UR Glastuinbouw

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Wageningen UR Glastuinbouw

Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Bornsesteeg 65, 6708 PD Wageningen
: Postbus 16, 6700 AA Wageningen
Tel. : 0317 - 47 70 01
Fax : 0317 - 41 80 94
E-mail : glastuinbouw@wur.nl
Internet : www.glastuinbouw.wur.nl

Inhoudsopgave

	pagina
Voorwoord	1
Samenvatting	3
1 Inleiding	5
1.1 Probleemstelling	5
1.2 Doelstelling	5
1.3 Werkwijze	6
2 Gebruiksdoel meetsysteem: draadloos of met bekabeling	9
3 Perspectief CO ₂ -metingen	13
3.1 Inleiding en doelstelling	13
3.2 CO ₂ -concentratie meten m.b.v. een draadloos netwerk	13
3.3 Praktijkmetingen	18
3.4 Conclusies	23
4 Materiaal en methode praktijkproef metingen Temperatuur en Relatieve vochtigheid	25
4.1 Test sensoren in de klimaatcel	26
4.2 Communicatie-afstand tussen node - ontvanger - computer	28
4.3 Metingen in de praktijk	33
5 Resultaten Temperatuur en Relatieve Vochtigheid	39
5.1 Proef 1: gehele bedrijf, momentane waarden	39
5.2 Proef 2: hoge resolutie meetgrid langs de gevel	47
5.3 Proef 3: driedimensionale meting	50
6 Discussie	57
7 Conclusies	59
8 Literatuur	61
Bijlage I. Plaatsing van de sensoren bij de drie proeven	3 pp.
Bijlage II. Statistische analyse proef 1	10 pp.
Bijlage III. Daggemiddelden proef 1, temperatuur en RV	2 pp.

Voorwoord

Smart Dust is voorgesteld als minisensoren zo groot als stof. In dit project is deze grootte nog niet gehaald. Wat we wel zien is de enorme belangstelling voor draadloze sensoren en de snelle ontwikkelingen in het bedrijfsleven. Verschillende systemen verdringen zich al om toegepast te worden. Een waarde-oordeel over deze systemen wordt in dit project niet gegeven. Wel wordt aangegeven hoe kan worden gemeten als men een bepaalde doelstelling heeft.

Om tot deze resultaten te komen hebben veel collega's een bijdrage geleverd in de brainstormsessies. Met enkele collega's is in gelieerde projecten nauw samengewerkt (Jan Bontsema, Ventilatievoud; Jouke Campen, Horizontale variatie). Een speciaal woord van dank is verschuldigd aan Willem Doorn, komkommerteler in Heerde, die zijn bedrijf beschikbaar stelde voor de metingen en ons terzijde stond met praktische adviezen over hoe en waar te meten en de benodigde output die hij als gebruiker zou wensen te ontvangen.

Het project is gefinancierd door het Ministerie van LNV (LNV programma BO-03-06) en Productschap Tuinbouw (PT12410, deel 1 en PT12734, deel 2) in het kader van het energieonderzoek binnen het programma Kas als Energiebron; hiervoor onze dank. Het project is bij Wageningen UR Glastuinbouw uitgevoerd onder nummer 3240315000.

Samenvatting

Het hoofddoel van dit project was de ontwikkeling van een goedkoop en eenvoudig inzetbaar meetsysteem om horizontale en verticale verschillen in temperatuur en luchtvochtigheid on-line te meten, is gedeeltelijk gerealiseerd. Door technische ontwikkelingen zijn betrouwbare sensoren en nodes door commerciële partners ontwikkeld en zijn meetsystemen te koop. Interpretatie van de meetdata is echter nog moeilijk. Momentane waarden geven grote verschillen in lokaal klimaat (tot 7°C tussen twee buursensoren op 10 m afstand gemiddeld over één uur) terwijl gemiddelde waarden over enkele dagen slechts geringe verschillen tussen sensoren aangeven. Hierbij moet in acht worden genomen dat alle sensoren voldeden aan de gestelde technische specificaties. Voor één specifieke situatie (komkommerbedrijf in de herfst met een bepaald verwarmingssysteem) is uitgerekend dat sensoren op maximaal 33 m afstand van elkaar moeten hangen om geen informatie (koude of warme plekken) te missen. Of deze afstand ook geldt in bijv. een chrysanten of een gerberagewas of bij een tomatengewas in een geconditioneerd klimaat-systeem is echter nog de vraag.

Een meetsysteem van enkele tientallen sensoren kan zowel bekabeld als draadloos worden uitgevoerd. Analyse van de toepassingsmogelijkheden voor een meetsysteem concludeert dat een bekabeld meetsysteem alleen interessant is als de sensoren niet verplaatst worden, ze worden eenmalig geïnstalleerd en blijven daar hangen. Voor het incidenteel meten van verschillen voor onderzoek, voorlichting, opsporen van storingen is een draadloos meetsysteem rendabeler.

In het huidige meetsysteem worden alleen temperatuur en luchtvochtigheid gemeten. Het is interessant om na te gaan of ook een CO₂ meting in een draadloos netwerk opgenomen kan worden. Het blijkt dat CO₂ sensoren nu nog niet praktisch zijn. Verschillende typen zijn getest en geven een goed meetresultaat, maar verschillen aanzienlijk in prijs. Het benodigd vermogen om goed te meten vraagt veel energie en dat kan met huidige batterijen slecht geleverd worden. De behuizing zou zodanig aangepast moeten worden dat natuurlijke ventilatie voldoet om goed te meten.

Metingen met 100 sensoren op een praktijkbedrijf hebben veel resultaten opgeleverd. Data kunnen probleemloos naar een basisstation worden gestuurd die met een kabel is verbonden aan een PC. Het basisstation kan het beste net onder de goot worden opgehangen. De zendafstand tussen node en basisstation mag maximaal 60m bedragen. De kabel tussen PC en basisstation is bij voorkeur een RS485. Op basis van uurgemiddelden was het temperatuurverschil tussen 100 temperatuursensoren maximaal 9°C, minimaal 1,5°C en gemiddeld 3,8°C. Statistische analyse van de meetdata geeft aan dat verschillen tussen sensoren veel kleiner zijn 1,1 -1,5°C als de afstand varieert tussen 0 en 33m. Verticale verschillen worden 's nachts veroorzaakt door het stoken van de buisrail (tot 5°C waarbij het beneden in de kas warmer is). Overdag zijn de verschillen tot 3°C op een dag met weinig straling. Op een dag met veel straling is er geen verticale gradiënt. De gevel en het middenpad hebben op dit bedrijf een gering temperatuurverhogende invloed zonder dat geconstateerd kan worden dat er grote horizontale temperatuurverschillen zijn.

Voor de tuinderspraktijk betekent dit onderzoek dat een meetsysteem met meerdere sensoren commercieel te koop is, maar dat interpretatie van de meetdata nog ongewis is. In feite kan men zo lang er geen uniforme randvoorwaarden (wanneer meet je, met hoeveel sensoren, welke hoogte, welke tijdsduur, welk type weer, als verwarmingsbuizen aanstaan of juist niet, scherm open of dicht) worden gesteld alle resultaten krijgen.

1 Inleiding

1.1 Probleemstelling

In de praktijk zijn er allerlei ideeën en vooroordelen over de ruimtelijke verdeling van de kasluchttemperatuur en -luchtvochtigheid, bijvoorbeeld: koude plekken, ventilatoren voor luchtcirculatie, koudeval bij openen van schermen, ontstaan van ziekten etc. Dit zijn zowel variaties in de horizontale als in de verticale richting van de kas, dus variaties treden op in drie dimensies (3-D). De oplossing van problemen, die hiermee zijn geassocieerd, kosten energie. Het opstellen van een programma van wensen en eisen voor het on-line meten van de ruimtelijke verdeling van temperatuur en luchtvochtigheid is opgestart omdat:

- nog steeds ventilatoren voor luchtbeweging worden verkocht;
- ziekten op bepaalde plaatsen in de kas optreden;
- de wens er is om temperatuurdifferentiatie op te lossen.

De huidige akoestische meetmethode (Van Schaik en Schevers, 2003) is in onderzoek. Toenmalige kenmerken: niet snel te installeren, nog niet goedkoop en flexibel en het kan niet tegelijkertijd op iedere plaats in een kas de temperatuur en de relatieve vochtigheid meten. Er is behoefte aan een goedkoop, eenvoudig te installeren meet-systeem, dat op ieder willekeurig punt in een kas de temperatuur en RV kan meten en dat, in tegenstelling tot andere systemen, on-line uitgelezen kan worden. Het beoogde draadloze meetsysteem voldoet hieraan en neemt zodoende de nadelen van het akoestische systeem weg.

Met een meetsysteem kunnen bijvoorbeeld de volgende invloeden worden nagegaan/bepaald:

- Wat is het technisch nut van ventilatoren en wanneer moeten draaiuren worden gemaakt ('s nachts of juist overdag)?
- Hoe is de temperatuur- en RV-verdeling met en zonder ventilatoren?
- Wat is het effect van de schermkier-regeling op het kasklimaat?

De meetresultaten kunnen leiden tot een onderbouwde aanpassing van zo'n regeling.

Een gelijkmatiger temperatuurverdeling levert energiebesparingen op van zo'n 10% (Nijs, 1997, Kempkes *et al.*, 1999, Esmeijer en Tuin, 2001). Volgens Nijs (1997) geldt dit voor meerdere gewassen.

Ook voor andere klimaatgrootheden, zoals bijvoorbeeld luchtverplaatsing en CO₂-concentratie, is inzicht in de ruimtelijke verdeling interessant. Een nieuw meetsysteem zou eenvoudig uit te breiden moeten zijn met zulke variabelen.

1.2 Doelstelling

Het project beoogt de ontwikkeling van een prototype:

- van een goedkoop en eenvoudig inzetbaar 3-D-meetsysteem
- om horizontale en verticale verschillen in temperatuur en RV on-line te kunnen meten
- en dat in de toekomst makkelijk uit te breiden is voor metingen van andere klimaatgrootheden.

Technische en teeltkundige doelstellingen

- Dit project bepaalt de technische en economische haalbaarheid van een 3-D meetsysteem, dat door de sector wordt geaccepteerd.
- Dit project levert een meetsysteem bestaande uit ongeveer 100 draadloze minisensoren, die zeer goedkoop en eenvoudig inzetbaar zijn.

Energiedoelstellingen

De nieuwe meetmethode is faciliterend met betrekking tot energiebesparing voor zowel nieuwe als bestaande kassen. Een betere temperatuurverdeling in een kas kan een energiebesparing opleveren van 10% (Nijs, 1997).

Nevendoelstellingen

Inzicht in de ruimtelijke verdeling van temperatuur en RV ondersteunt de tuinder bij het nemen van beslissingen bij het investeren in maatregelen waarbij de 3-D verdeling van temperatuur en RV wordt verbeterd. Een gelijkmatiger temperatuurverdeling levert ook een reductie op in het gebruik van gewasbeschermingsmiddelen.

1.3 Werkwijze

In deel 1 van dit project is een literatuurstudie uitgevoerd naar de perspectieven van draadloze sensoren en is met gebruikers (telers) gesproken over de wijze van toepassing. In onderstaand tekstkader is de samenvatting uit dat rapport weergegeven.

Samenvatting 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

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

De ruimtelijke verdeling van de kasluchttemperatuur en de relatieve vochtigheid is niet gelijk. Door de verschillen ontstaan koude en warme plekken in de kas, maar kunnen ook ziekten en onregelmatige groei van het gewas optreden. In deze studie wordt verslag gedaan van een inventarisatie onder onderzoekers en telers naar de behoefte aan een on-line draadloos meetsysteem bestaande uit minisensoren waardoor klimaatverschillen gemakkelijker zijn op te sporen.

De in de literatuur bekende systemen en meetprotocollen gaan uit van off-line metingen waarbij dataloggers worden gebruikt om data te verzamelen die naderhand moeten worden uitgelezen en geïnterpreteerd. Veel tijd is nodig om de kabels voor de dataloggers uit te leggen en weer op te ruimen. Het betreft altijd incidentele metingen, meestal als onderdeel om het Groen Label certificaat te verkrijgen. Het 'smart dust' meetsysteem bestaat uit minisensoren die draadloos signalen (temperatuur, relatieve vochtigheid) versturen die vervolgens on-line op een pc of klimaatcomputer zichtbaar kunnen worden gemaakt.

Voor de ontwikkeling van het meetsysteem zijn onderzoekers en telers in verschillende brainstormsessies onder andere gevraagd aan te geven welke parameters gemeten moeten worden, waar gemeten moet worden, bij welke gewassen gemeten moet worden, wat gevolgen zijn van klimaatverschillen, hoe resultaten moeten worden gepresenteerd, wat de nauwkeurigheid van sensoren moet zijn. De resultaten zijn beoordeeld en aangevuld met data uit de literatuurstudie. Vervolgens zijn resultaten geïntegreerd en bediscussieerd en zijn conclusies getrokken.

Het blijkt dat telers grote behoefte hebben aan een continu meetsysteem voor het meten van horizontale en verticale temperatuurverschillen om de controle op teelt en klimaat te vergroten. Het liefst zou men er ook mee willen gaan sturen. Telers willen ook graag meedoen aan deel 2 van dit project (het meten op een bedrijf). Onderzoekers kijken vooral naar wat het meetsysteem moeten kunnen en hoe de resultaten moeten worden geïnterpreteerd (welke sensoren, nauwkeurigheid, meetgrid).

De algehele inventarisatie levert op dat er grote behoefte is aan een on-line draadloos meetsysteem dat in eerste instantie temperatuur en relatieve vochtigheid kan meten. Het meetbereik van de temperatuur ligt tussen 0 en 50°C op 0,2°C nauwkeurig en voor de RV is een meetbereik tussen 80 en 100% gewenst met een nauwkeurigheid van 1%. Sensoren moeten onderhoudsarm, goedkoop en robuust zijn. De behuizing moet gemakkelijk tussen het gewas te plaatsen en weer terug te vinden zijn. Een continu meetsysteem zou uit ca. 50 sensoren per ha moeten gaan bestaan waarbij de meetresultaten als een voortschrijdend gemiddelde van een uur direct op de klimaatcomputer grafisch afleesbaar zijn. Economisch heeft het meetsysteem lage kosten (ca. €2500,-/ha per jaar) in relatie tot de te verwachten voordelen (energiebesparing tot maximaal jaarlijks €13000,-/ha, uniformere oogst, lever zekerheid, minder ziekten). Een programma van wensen en eisen voor noden, sensoren, behuizing en meetsysteem sluit dit deel 1 van het project af.

Tussen deel 1 en deel 2 van dit project is een go/no-go beslissing opgenomen. Uit deel 1 moest blijken of een on-line 3D meetsysteem technisch en economisch haalbaar is, of er behoefte is vanuit de sector en of het energiebesparing oplevert. Uit dit rapport blijkt dat aan deze voorwaarden is voldaan.

‘Wanneer komen de draadloze nodes op de markt?’ is een veel gehoorde vraag van tuinders. Veel tuinders willen inzicht hebben in het temperatuurverloop in hun kas; en dan nog liefst op die plaats ‘waar het gebeurt’: bij de plant. Een andere vraag is ‘wat kunnen we nog meer meten?’ Dit is na de evaluatie van Deel 1 uitgewerkt in een onderzoek naar het perspectief van draadloos CO₂ meten. Daarnaast is ook aangegeven in welke situaties een draadloos netwerk perspectieven heeft boven een bekabeld systeem. In deel 2a van dit project zijn eerst de perspectieven van een CO₂ meetsysteem en het nut van wel of geen bekabeling onderzocht (hoofdstuk 2 en 3). Dit is gevolgd door een tussenrapportage en een Go voor deel 2b. In deel 2b (hoofdstuk 4 en 5) is gewerkt aan de opzet van een praktisch meetsysteem van 100 nodes (meten temperatuur en RV en zenden data via een basisstation naar de computer voor opslag) en het toetsen hiervan bij een teler. De toetsing moet behalve informatie over de technische werking van een dergelijk systeem ook inzicht geven in de minimaal noodzakelijke hoeveelheid sensoren (het grid) om de horizontale en verticale temperatuurverschillen betrouwbaar te meten.

2 **Gebruiksdoel meetsysteem: draadloos of met bekabeling**

Met medewerkers van de Technologie-groep van Wageningen UR Glastuinbouw werd naar aanleiding van de uitkomsten in Smart Dust deel 1 nagegaan voor welke gebruiksdoelen bekabelde noden met sensoren voor T, RV en mogelijk CO₂ kunnen worden ingezet. Ook werd nagegaan voor welk gebruiksdoel draadloze noden praktischer zijn. Bekabelde noden krijgen hun energie vanuit het elektriciteitsnet, bij draadloze noden is de energievoorziening geregeld via (oplaadbare) batterijen.

Gebruik van noden

Draadloze noden zijn gemakkelijk in te zetten en worden al gebruikt in verpleeghuizen, opslagruimtes/ bewaarcellen voor groenten, fruit en bloemen en in musea. Ook bij Tracking & Tracing wordt gebruik gemaakt van sensoren. De bij Tracking & Tracing tags/pucks die gebruikt worden, meten nu offline, maar ook daar is behoefte aan een on-line meetsysteem. Dan kan worden nagegaan wanneer er met een bepaalde zending iets mis dreigt te gaan, en kan op tijd worden ingegrepen in plaats van achteraf aangeven wanneer het niet goed is gegaan.

In de glastuinbouw kan een meetsysteem, bestaande uit enkele tot enkele tientallen noden met sensoren, voor verschillende doeleinden worden gebruikt. Een meetsysteem kan van nut zijn voor tuinders, maar ook voor voorlichtingsbedrijven, certificering of voor onderzoek. Het meetsysteem meet op diverse representatieve plaatsen temperatuur, relatieve vochtigheid en eventuele andere grootheden en zorgt voor verbinding met een computer en visualisatie van de meetgegevens.

Toepassing als controlemiddel

Wanneer noden als controlemiddel worden gebruikt om verschillen in het kasklimaat op te sporen, dan kunnen ze een vaste plek in de kas hebben. Ze worden door de tuinder op bepaalde plaatsen opgehangen, regelmatig verdeeld over de kas. Op bepaalde plaatsen waar koude of warme plekken zich hebben bewezen, kunnen meer noden worden opgehangen dan op andere meer gelijkmatige plaatsen in de kas. De onderlinge afstand tussen de noden (grid) zal later in dit onderzoek worden bepaald.

Voordat dat de noden op hun definitieve plaats komen, heeft de tuinder eerst onderzocht waar zich problemen in de kas voordoen. In die oriënterende fase wordt -mogelijk- met meer sensoren gemeten en wordt inzicht verkregen waar zich als eerste problemen voordoen. Zo zouden de noden na intensieve metingen, op vaste cruciale plekken in de kas kunnen worden gebruikt. Mogelijk zijn dit metingen in de buurt van de gevel, het middenpad en bij menggroepen in de kas, waar plaatselijk andere klimaatomstandigheden zijn dan in de rest van de kas.

Op het moment dat de plaatsbepaling van de noden definitief is, kan worden overwogen of deze bekabeld dan wel draadloos moeten worden uitgevoerd.

De voordelen van bekabeling zijn:

- noden worden op één vaste plaats in de kas opgehangen;
- de tuinder heeft er weinig omkijken naar;
- energievoorziening is goed en geregeld.

De nadelen van bekabeling voor datatransport zijn:

- eenmalige, dure aanleg indien veel meetpunten gewenst zijn;
- niet flexibel: je kunt met de noden met sensoren niet even op een andere plaats gaan meten.

Onderzoek

Voor het onderzoek kunnen noden worden ingezet om inzicht te krijgen in de ruimtelijke verdeling van T, RV en CO₂ bij verschillende gewassen op verschillende locaties en onder verschillende omstandigheden. Telers die zelf onder-

zoek willen doen naar plaatselijke klimaatverschillen, verschillen in groei of voorkomen van ziekten/plagen, zouden ook kunnen besluiten tot het aanschaffen van een eigen meetsysteem.

In deze situatie waarin noden veel van plaats veranderen is een draadloos meetsysteem praktischer dan een bekabeld systeem.

De voordelen van draadloos meten zijn:

- flexibel: gemakkelijk te verhangen, zowel door teler als door onderzoeker;
- energievoorziening kan regelmatig worden gecheckt en zo nodig kunnen noden worden opgeladen;
- calibratie en ijking van sensoren is eenvoudiger uit te voeren.

Voorlichting/adviesbureaus/certificering

Telers met een probleem maar zonder eigen meetsysteem, zouden een bedrijf in moeten kunnen schakelen dat hun kas doormet en die in een rapport vastleggen waar zich eventuele problemen voordoen en hoe groot die zijn en zo mogelijk, met een advies om de oorzaak van het probleem weg te nemen. Ook kunnen metingen worden uitgevoerd voordat een nieuwe kas wordt volgezet met planten. Hiermee kunnen vooraf mogelijke problemen worden gesignaleerd en opgelost. Noden zijn goed in te zetten bij certificering van bedrijven zoals bijvoorbeeld groen label. In deze situatie komt een bedrijf met draadloze sensoren en een eigen computer voor opslag en visualisatie bij een teler. Bij deze toepassing is een draadloos meetsysteem het meest praktisch.

De voordelen van draadloos meten zijn:

- flexibel: gemakkelijk te verhangen en te gebruiken op diverse bedrijven;
- energievoorziening kan regelmatig worden gecheckt en zo nodig kunnen noden worden opgeladen;
- calibratie van sensoren kan gemakkelijk en deskundig gebeuren.

Gebruik in mobiele teeltsystemen

De verwachting is dat noden kunnen worden ingezet in alle soorten systemen. Ze kunnen dáár in het gewas worden gepositioneerd waar de gemeten parameters van grote invloed zijn. In een hoog gewas zoals komkommers en tomaat kunnen ze hoog worden gehangen, en bij een laag gewas als gerbera's kunnen ze laag worden ingezet. Bij mobiele systemen zoals bij gerbera's en rozen, kunnen draadloze noden goed worden toegepast. De node verplaatst zich dan met de rij door de kas heen. Ook bij potplanten kunnen noden worden toegepast. Het optimale aantal noden dat wordt toegepast in een gewas is afhankelijk van het gewas en het toegepaste teeltsysteem. Voorafgaande aan de proef is de inschatting dat het optimale aantal tussen 10 en 75 stuks per hectare ligt. Vanzelfsprekend is dit afhankelijk van hiervoor genoemde teeltsysteem en soort gewas. Ook de robuustheid van de sensor speelt hierbij een rol. Een draadloos systeem heeft hier natuurlijk de voorkeur bij meting op gewasniveau. Een specifieke toepassing die zich al aandient, is het draadloos meten van het vochtgehalte van het substraat. Plaatsbepaling van de sensor is wel belangrijk. De teler moet weten op welke rij of op welk tablet de sensoren zijn geplaatst en waar deze zich in de kas bevinden. Momenteel wordt er nog niet gewerkt aan een automatische plaatsbepaling van de sensoren. Dit zou visualisatie echter zeer gemakkelijk maken, ook bij toepassing door onderzoek en voorlichting.

Voor- en nadelen van draadloze of bekabelde sensoren

Draadloze systemen hebben als voordeel dat ze gemakkelijk in de kas zijn op te hangen en, indien nodig, te verplaatsen. De verzamelde metingen van sensoren worden op regelmatige tijden draadloos verstuurd naar een tussenstation en op de computer opgeslagen. Voor het onderzoek en het probleemopsporend onderzoek door commerciële bedrijven, hebben deze draadloze noden de voorkeur boven bekabelde sensoren. Wanneer noden worden gebruikt voor oriënterende metingen of certificering, is het noodzakelijk om na te gaan hoe de noden afdoende kunnen worden ontsmet om insleep van ziektes te voorkomen. Daarnaast, eveneens ter voorkoming van ziekte-insleep, zou moeten worden nagegaan of noden in de kas kunnen worden opgehangen door het personeel van de tuinder. In de toekomst zou automatische positiebepaling van de noden in de kas mogelijk zijn tot op 5-10m nauwkeurig. Het onderzoek zal moeten uitwijzen of dit voldoende is. Naast bepaling van de ruimtelijke verdeling van T, RV en CO₂ zal in het onderzoek naar voren komen hoe de metingen met noden verlopen. Sommige sensoren vragen veel energie en onderzoek moet uitwijzen hoe batterijen van de noden (gedurende langere tijd) daarop berekend zijn. Inzicht zal worden verkregen óf noden uitvallen en hoeveel dat er zijn, hoe lang de levensduur van een batterij is en hoeveel stroom de sensoren vragen. Als meest ideale systeem wordt een node met een zonnecel gezien. Het idee is om indien mogelijk, indicatief een paar noden met een zonnecel in het onderzoek mee te nemen.

Zo wordt een eerste inzicht verkregen op de werking van deze noden met zonnecel én hoe een zonnecel in een kas functioneert.

Wanneer bekend is waar de cruciale plekken zijn om continu T, RV en CO₂ te meten, dan kan een bekabeld netwerk worden ingezet. Het voordeel is, dat sensoren altijd op een vaste plaats zijn en niet uitvallen door falende batterijen. Echter, kabels die in kabelgoten in de kas liggen, verteren na verloop van tijd. Ook zijn er ARBO-eisen ten aanzien van veiligheid voor de medewerkers in de kas. Zo werken de in de kas gebruikte meetboxen op 12V en niet op 220V. Wanneer sensoren gebruikt worden om mede het kasklimaat te sturen, dan kan aansluiting van de sensor-kabels op de klimaatcomputer in de loop van de tijd leiden tot een (nog grotere) wirwar van draden. Bij bekabeling van sensoren kunnen niet de al in de kas aanwezige stopcontacten worden gebruikt: die zijn ongeveer 50% van de tijd bezet.

Overige aspecten

Voor het bepalen van de ruimtelijke verdeling van T, RV en CO₂ is het essentieel om te weten wáár de noden zich in de kas bevinden. Draadloze sensoren zijn minder 'vast op de plaats' dan bekabelde. Werknemers kunnen, bijvoorbeeld bij oogsten of ruiming van het gewas, noden die tussen het gewas geplaatst zijn, meenemen. Het is daarom belangrijk dat noden goed zichtbaar en herkenbaar zijn bij gewaswerkzaamheden.

Conclusies

Draadloos (meten) is de toekomst. In een beperkt aantal situaties buiten de tuinbouw wordt al draadloos gemeten. De ontwikkelingen rond Wifi en Blue Tooth geven aan dat ook op andere gebieden draadloos versturen van data gemeengoed aan het worden is.

In deze fase is nagegaan voor welke doeleinden een bekabeld of een draadloos meetsysteem de voorkeur verdient. Bekabeling lijkt alleen praktisch als de noden voor controle doeleinden op een vaste plaats in de kas worden gehangen. Draadloze meetsystemen hebben de voorkeur in het onderzoek, de voorlichting en bij certificering. Draadloze meetsystemen zijn flexibel en kunnen onder verschillende omstandigheden bij verschillende gewassen en bedrijven worden toegepast. Toepassing door gespecialiseerde bedrijven lijkt ook voordelen te hebben voor de (continue) energievoorziening en de toch regelmatig noodzakelijke calibratie en/of ijking. Bij mobiele teelten is er specifiek ruimte voor toepassing van draadloze meting van het bodemvocht, plaatsbepaling van de node is wel belangrijk.

3 Perspectief CO₂-metingen

3.1 Inleiding en doelstelling

CO₂ speelt een onmisbare rol bij de fotosynthese waarbij de plant, onder invloed van zonlicht, suikers aanmaakt. De CO₂-opname wordt door de huidmondjes geregeld. Om de groei te bevorderen, wordt in de glastuinbouw extra CO₂ toegediend via rookgassen uit de WKK/ketel of via zuivere CO₂. Op een bedrijf is doorgaans één grote ventilator aanwezig die de lucht met CO₂ de kas in perst door in de kas aanwezige 'doseerdarmen' (slangen). De darmen bevinden zich laag in de kas. Aangenomen wordt dat bij deze dosering met een darm, de CO₂ zich door natuurlijke convectie gelijkmatig verdeelt over de ruimte. De darmen moeten regelmatig worden gecontroleerd of er geen verstoppingen zijn ontstaan die drukverschillen veroorzaken. De oorzaak van verstopping is veelal vochtophoping als gevolg van condensatie van de rookgassen, vervuiling of verkeerd gebruik van de aanvoerleidingen. Het gevolg van verstopping is dat de CO₂-concentratie in een kas minder gelijkmatig is. In het algemeen varieert de CO₂ concentratie in een kas aanzienlijk: bij mooi weer kan het niveau dalen tot 200 ppm en door dosering is het mogelijk tot een niveau van 1500 ppm te doseren. De CO₂-concentratie in de buitenlucht is ongeveer 360ppm.

Momenteel worden in de glastuinbouw infrarood-absorptiemeters voor het meten van CO₂-concentraties het meest toegepast. Vaak wordt de lucht vanuit meerdere punten in de kas aangezogen naar één punt, waar de lucht, per meetpunt, door één meetinstrument wordt geleid ter bepaling van de concentratie in de lucht. Deze meters maken gebruik van een infraroodbron en een detector waartussen de concentratie van de lucht met CO₂ wordt gemeten. De CO₂ absorbeert een deel van de infraroodstraling. Een maat voor de CO₂-concentratie is het verschil tussen het licht dat de bron uitzendt en wat de detector ontvangt. De infraroodbron veroudert naarmate hij langer in gebruik is. Om een goede meting te behouden, is het noodzakelijk om regelmatig te ijken.

Het doel van deze fase van het project is om een aantal draadloze meetsystemen voor CO₂ te inventariseren en uit te testen onder praktijkomstandigheden.

3.2 CO₂-concentratie meten m.b.v. een draadloos netwerk

Door CO₂-concentraties draadloos te meten is, na een korte, eenvoudige installatietijd, op verschillende plekken de CO₂-concentratie bekend. Ook is het dan mogelijk om na te gaan welke factoren van invloed zijn op de CO₂-verdeling in de kas. Van invloed op de CO₂-verdeling kunnen zijn: verstopte darmen voor CO₂-aanvoer, mate van fotosynthese, ventilatie en/of vermenging van CO₂ door natuurlijke of geforceerde convectie. Het draadloos meten van CO₂-concentraties heeft de volgende technische eisen waaraan moet worden voldaan:

- de CO₂-meetunit moet zo klein mogelijk zijn zodat de unit overal te plaatsen is;
- het aantal onderhoudsbeurten, van het grote aantal sensoren, moet beperkt blijven en calibratie van de sensor moet niet al te vaak noodzakelijk zijn. Dit moet kostentechnisch interessant blijven;
- het energieverbruik van de node met sensor moet laag zijn om gegevens naar de computer te zenden en de sensor te voeden zodat een lange gebruikstijd gerealiseerd kan worden zonder batterijen te hoeven vervangen.
- de meetunit moet bestendig zijn tegen het kasklimaat en voldoende nauwkeurig kunnen meten;
- de kostprijs van de node met sensor(en) mag niet te hoog liggen.

Meetmethoden voor het bepalen van het CO₂-gehalte

De meetmethode wordt bepaald en begrensd door de gebruikte techniek. Voor het draadloos maken van een CO₂-meting waarbij op meerdere plaatsen in een kas wordt gemeten zijn de volgende componenten nodig:

- een radiomodule waaraan een CO₂-meter gekoppeld kan worden en die de gemeten CO₂ waarde kan verzenden naar een basisstation of pc;
- een basisstation om de verzonden meetwaarden van de radiomodulen te ontvangen en op te slaan;

- een CO₂-sensor;
- ijkgas van 0 ppm en 1500 ppm om de CO₂-sensoren te calibreren;
- een pomp met aanzuigleidingen vanuit de te meten plek en toevoerleidingen naar de CO₂-sensor.

Bij een draadloze CO₂-meting verloopt de communicatie tussen node en basisstation of computer via een radio-module. Deze modules zijn over het algemeen batterij gevoed waardoor de spanning waarmee deze radio's werken doorgaans laag is. Het omzetten van het analoge meetsignaal van de CO₂-sensor naar een digitale waarde gebeurt op de radio door gebruik van een analoog-digitaal converter (ADC). Dat betekent dat het voordelen heeft als de spanning die een CO₂-meter afgeeft binnen het spanningsbereik van de ADC van de radiomodule ligt. De meeste radio's werken tussen de 0 en 5 Volt; CO₂-sensoren moeten daarom ook binnen dit bereik werken.

De huidige CO₂-metingen in de glastuinbouw worden uitgevoerd met een nauwkeurigheid van ca. 50 ppm, daarom is in de markt gezocht naar CO₂-sensoren die een nauwkeurigheid hebben die rond deze waarde ligt. CO₂-sensoren verlopen doordat de infrarood bron door veroudering van eigenschap verandert. Het is noodzakelijk dat een CO₂-sensor hiervoor gecorrigeerd kan worden en dat een eventuele calibratie eenvoudig is uit te voeren. De plek waar de CO₂-meting plaatsvindt op een sensor is vaak een afgeschermd kleine kamer die niet door natuurlijke convectie geventileerd kan worden. Bij de keuze van de sensor wordt er rekening mee gehouden dat de sensor eenvoudig is aan te sluiten op een pomp met aan- en afvoerslangen óf dat de sensor zo ontworpen is dat natuurlijke convectie voldoende uitwisseling geeft van de sensor met de omgeving. Het formaat van de sensor mag niet te groot zijn en moet het toelaten om tussen gewas of bladeren te kunnen meten. Naast voorgaande eisen wordt ook nog gelet op de kostprijs, levensduur, en (kas)klimaat bestendigheid.

Eisen en wensen

Een draadloos meetsysteem met 10-75 nodes met daarin even zoveel CO₂ sensoren moet voldoen aan de volgende eisen:

- de nauwkeurigheid van de CO₂ sensor moet minstens dezelfde nauwkeurigheid hebben in vergelijking met de huidige meetmethode (+/- 50 ppm, persoonlijke communicatie CATEC);
- lage kostprijs, een draadloze CO₂ sensor biedt voordelen als deze op meerdere punten tegelijkertijd in de kas uitgezet kan worden. De grotere aantallen maken een lage kostprijs wenselijk. Uiteindelijk bepaalt een eventuele besparing van bijvoorbeeld CO₂-gebruik de kostprijs van een draadloze CO₂ sensor en hoeveel er uitgezet kunnen worden. Er is in de markt gezocht naar CO₂ sensoren met een zo laag mogelijke kostprijs door OEM CO₂ sensoren te gebruiken. Dit zijn sensoren zonder behuizing, kabels, software of displays die deels door de klant nog verder 'aangekleed' moeten worden;
- laag energie verbruik, een draadloze sensor wordt lokaal voorzien van energie door een batterij of een zone-paneel. Beide zijn energiebronnen met een laag vermogen of een korte levensduur, de sensor moet met weinig energie toch goed en over een lange periode kunnen meten. Omdat batterijvoeding het meest gangbaar is en een lage kostprijs heeft, is er gekozen voor CO₂ sensoren met een voedingsspanning van minder dan 12 V en, waar nodig, een zo kort mogelijke opwarmtijd van de infrarood lichtbron in de sensor;
- bestand zijn tegen het kasklimaat, uit (FLOWAID; Workpackage 2 Activity Report Period 1: Oct 1st, 2007 – Oct 1st, 2008) is gebleken dat elektronica en batterijen gevoelig zijn voor temperaturen boven de 50 °C en niet alle elektronica is bestand tegen condenserend vocht. Vocht, hogere temperaturen en veel licht versnellen het verouderingsproces van elektronica en kunststof. Onbekend zijn effecten van het bespuiten met gewas-beschermingsmiddelen;
- het meetbereik moet voldoende zijn, met voldoende PAR licht, CO₂, water en gesloten ramen kan het CO₂ niveau in een kas onder het buiten niveau (+/- 380 ppm) zakken naar (+/-100 ppm). In een rozen teelt worden CO₂ niveaus gebruikt van +/- 1000 tot 1200 ppm. Het meetbereik van een CO₂ sensor moet in dit gebied liggen en liefst in het lineaire meetbereik daarvan;
- klein formaat, om een draadloze CO₂ overal te kunnen plaatsen moet deze daarvoor klein genoeg zijn, bij de keuze van een sensor wordt het formaat van een paprika als bovengrens aangehouden. Met deze omvang kan de sensor tussen bladeren van de meeste gewassen geplaatst worden;
- mechanische luchtaanvoer, een draadloze CO₂ sensor is lastig uit te rusten met een ventilator omdat de energie voorziening beperkt is. De meest gangbare OEM CO₂ sensoren moeten worden geventileerd zoals de GE Telair 6004 [<http://www.gesensing.com/telaireproducts/>] welke 50 cc/min luchtdoorstroming nodig heeft

om de gewenste specificaties te behalen. Een aantal CO₂ sensoren zijn uitgerust met een membraam waardoor door natuurlijke convectie uitwisseling plaats vindt met de omgeving. Hierdoor kan een ventilator komen te vervallen;

- autocalibratie routine, zoals bij stationaire CO₂ analysers is bij veel OEM CO₂ sensoren een autocalibratie mogelijk door een tweede infrarood lichtbron. Bij toepassing van een groot aantal draadloze CO₂ sensoren is dit een groot voordeel zodat een handmatige calibratie overbodig wordt.

Commercieel verkrijgbare CO₂-sensoren

Via een literatuuronderzoek op internet en veelvuldige communicatie met fabrikanten en toeleveranciers is gekomen tot een palet van CO₂-sensoren die kansrijk worden geacht om op te nemen in een draadloze CO₂-meting. Tabel 1 laat een overzicht zien van kansrijke CO₂-sensoren die op te nemen zijn in een draadloze toepassing. Bij iedere sensor is gelet op de volgende punten:

- of het meetbereik voldoende is voor een meting in de glastuinbouw;
- of de sensor 'kasklimaat bestendig' is;
- hoe en of de sensor aangesloten moet worden op een pomp;
- of de sensor elektrisch aan te sluiten is op een radiomodule;
- de kostprijs van de sensor.

Alle geselecteerde sensoren zijn gebaseerd op infrarood absorptie meting, er zijn geen andere technieken gevonden die in een kleine behuizing te vatten zijn in combinatie met een laag energieverbruik. Voor de nabije toekomst worden CO₂-sensoren gemaakt op basis van MEMS techniek (Micro Electro en Mechanische Systemen) belangrijk (Figuur 1). Dit zijn sensoren die uit één stuk door chiptechnologie gemaakt worden, zeer klein zijn, een laag energieverbruik hebben, doorgaans direct op de microprocessor van een radio module zijn aan te sluiten en een zeer lage kostprijs hebben (15 tot 20 euro) en aan alle specificaties (Greenwald, 2005). Voor de korte termijn zal worden gekeken naar sensoren op basis van infraroodmeting. Meetmethoden die uitgaan van off-line metingen onder laboratoriumomstandigheden zijn niet geselecteerd. Daar wordt door middel van gaschromatografie de hoeveelheid CO₂ in een bepaald volume lucht bepaald.



Figuur 1. Mems CO₂-sensor.

Tabel 1. *Overzicht van technische aspecten van CO₂-sensoren voor een draadloos netwerk.*

Productnaam	Meetbereik + Nauwkeurigheid	Gebruiksomgeving	Aanbieden CO ₂	Calibratie (methode)	Ingangsspanning/ Opwarmtijd/ Uitgangssignaal	Prijs	Afbeelding+ afmeting
GE Telaire 6004 ¹	0..2000 ppm +/- 40 ppm +/- 3% van volle schaal	+0..+50°C 0..95% RV	Pomp 0,4-0,5 l/min.	n.v.t.	5Vdc 0,15W <2 min. Analoog 0..4 V	€280	 50x60x20 mm
IRgaskiT ²	0..2000 ppm +/- 5% van volle schaal	+0..+50°C 0..99% RV	Pomp	calibratie gas	5Vdc 1W 5 min. Analoog 0..2 V	€590	 55x55x55 mm
MG811 CO ₂ sensor ³	350..10000 ppm +/- 5% van volle schaal	-20..50°C 0..95%RV	Dispertie	calibratie gas	6Vdc 1,2W 10 s. Analoog 30-50mV	€20	 17x10 mm
IRcel CO ₂ ⁴	0..5000 ppm +/- 5 ppm + 4% van aangeboden concentratie	-20..50°C 0..99%RV 700..1300 hPa	Dispertie/ pomp 0,1..0,4 l/min.	calibratie gas	3-5Vdc <0,1W < 10 s. Analoog 0..5 V	€120	 Ø20x15 mm
Carbocap GMM111 ⁵	0..5000 ppm +/- 75 ppm + +3% van aangeboden concentratie	+5..+55°C 0..99% RV 700..1200 hPa	Pomp, <0,5 l/ min, 10 l/ min max.	calibratie af fabriek	24Vdc <2W 1..10 min. Analoog 0..10 V	€220	 100x60x10 mm

¹ http://www.gesensing.com/products/telaireoem.htm?bc=bc_ge_telaire² <http://www.edinst.com/irmodule.htm>³ http://www.futurlec.com/Gas_Sensors.shtml⁴ <http://www.citytech.com/>⁵ <http://www.vaisala.com/businessareas/instruments/products/carbondioxide/gmm111>

De voor- en nadelen van de gevonden CO₂-sensoren zijn opgesomd in Tabel 2.

Tabel 2. *Beoordeling van CO₂-sensoren t.b.v. een draadloos meetsysteem.*

Sensor	Nauwkeurigheid	Kostprijs	Aansluiten op radio	Energieverbruik
GE Telaire 6004	+	-	+/-	+
IRgaskiT	+/-	--	-	-
MG811 CO ₂ -sensor	--	++	++	+/-
IRcel CO ₂	+	+	++	++
Carbocap GMM111	+/-	-	--	--

Uit Tabel 2 komt de IR-cel als beste naar voren. Het kleine formaat, korte opwarmtijd, lage energieverbruik en lage kostprijs maken deze sensor het meest geschikt om aan te sluiten op een radiomodule. De kostprijs van de sensoren maakt veel verschil (Tabel 1 en 2). De MG811 koppelt een zeer lage prijs echter aan een zeer grote onnauwkeurigheid. GE Telaire en IrgaskiT zijn daarentegen wel nauwkeurig, maar zodanig duur dat opname in een meet-systeem met enkele tientallen sensoren te duur wordt. De lange opwarmtijd van de laatste twee typen maken hen ook onpraktisch.

In de aanloop naar de praktische toepassing bleken de IRCEL en Irgaskit geen vertegenwoordiging in Nederland te hebben en wilde de fabrikant in Zwitserland nog geen medewerking verlenen om ze via een andere leverancier te verkopen. De Telaire sensor is door de leverancier Acin vervangen door de Acrin SD023, omdat zij in tweede instantie twijfelden of de Telaire sensor toegepast kon worden in een (tuinbouw)kas. In samenwerking met toeleveranciers (o.a. Catec <http://www.catec.nl/0>), is gekozen voor andere CO₂ sensoren die specifiek passen voor het meten in de kas. De volgende CO₂ sensoren (Tabel 3) zijn gekozen omdat deze het voordeel hebben dat er geen mechanische luchttoevoer benodigd is om een CO₂ meting uit te voeren. Daarnaast is het energieverbruik lager, hebben ze een lagere kostprijs en een kortere opwarmtijd dan de in Tabel 1 genoemde sensoren.

Tabel 3. Overzicht CO₂ sensoren voor praktijkmetingen.

Type	EE89	SD023	Vaisala GMM222	MG811 CO ₂
				
Fabrikant	E plus E	Acrin	Vaisala	MG811
Meetprincipe	Non-Dispersive Infrared	Non-Dispersive Infrared	Non-Dispersive Infrared	Chemisch
Werkgebied	0...2000ppm	0..2000 ppmvol	0...2000 ppm	350..10000 ppm
Nauwkeurigheid	< ± (50ppm +2% van meetwaarde)	± 30 ppm + ± 2% van meetwaarde	± (1.5% van meetgebied + 2% van meetwaarde)	+/- 5% van volle schaal
Respons tijd	< 5 min	10 sec. @ 30 cc/min. luchtstroming, < 3 min. volgens diffusie meetmethode	30 sec	10 s.
Stabiliteit typ	20ppm / jaar	< ± 10 ppm/ jaar	<±5 %VolleSchaal/2 jaar	Afh. omgevingscondities
Sample tijd	15 s	< 1s	n. b.	< 1s
Uitgangssignaal	0...2000 ppm 0..5V	0..10 VDC voor 0..2000 PPM	0...2.5 V voor 0..2000 ppm	30-50mV
Voeding	4.75 - 7.5V DC	6-14 V DC	11...20 V DC	6 V DC
Opgenomen vermogen	3W max., typ. 30mW	< 1 Watt	<2.5 W	1,2 W
Opwarmtijd	< 5 min	Opwarmtijd < 1 min. (volledige specificaties < 15 min.)	30 seconden, 15 minuten volledige specificaties	Afh. omgevingscondities
Prijs	€162,-	€300,-	€620,-	+/- 5 min €20

¹ <http://www.epluse.com/index.php?id=548&L=1>

² http://www.acin.nl/acin_instrumenten/NL/producten/gas/transmitters/SD023.htm

³ <http://www.vaisala.nl/instrumenten/producten/kooldioxide/gmm220/productdocumentatie?SectionUri=%2finstrumenten%2fproducten%2fkooldioxide%2fgmm220&Tab=1#tabs>

⁴ <http://www.compel.ru/images/catalog/339/MG811.pdf>

Het combineren van CO₂-sensoren met een T- en RV meting op één radiomodule.

Voor een CO₂-meting zijn meer onderdelen nodig dan voor een T en RV meting. Uit Tabel 1 blijkt dat bij bijna alle CO₂-sensoren lucht van de te meten plek aangezogen moet worden en langs de sensor moet worden gebracht door gebruik van een pomp. Het energieverbruik van een CO₂-sensor ligt een factor 10 hoger in vergelijking tot de T- en RV-sensoren in combinatie met een radiomodule die in Deel 1 zijn beschreven. Bovenstaande punten geven aan dat het technisch moeilijk is om een CO₂-sensor te combineren met een T- en RV-meting. Daarnaast maakt de huidige kostprijs van CO₂-sensoren een meetsysteem met meer dan 20 of 30 CO₂-sensor erg duur. Daarom is in eerste instantie een praktijkmeting uitgevoerd met de vier sensoren genoemd in Tabel 3.

3.3 Praktijkmetingen

Om na te gaan hoe verschillende noden met sensoren in de kas CO₂-concentraties meten, is er voor gekozen om op één hoogte de verschillende sensoren op te hangen. De gemeten CO₂-concentraties worden zowel onderling als met de CO₂-meter van de klimaatcomputer vergeleken.

Calibratie van de CO₂ sensoren

De interne IR lichtbron heeft een opwarmtijd van een aantal minuten. Daarna is de bron voldoende op temperatuur en stabiel genoeg om een voldoende nauwkeurige meting uit te voeren. Deze lichtbronnen verouderen. In de meeste CO₂ sensoren is een tweede identieke lichtbron opgenomen die om een bepaalde tijd (in te stellen naar fabrieksgegevens; verschillend van 1 maal per dag tot 1 maal per maand) opwarmt. Met deze tweede bron wordt de sensor regelmatig gecalibreerd. Omdat deze lichtbron minder frequent wordt gebruikt zal deze minder snel verouderen en kan deze gebruikt worden voor calibratie doeleinden. Na verloop van tijd zal toch door veroudering de CO₂ sensor gaan verlopen, een regelmatige calibratie van de gehele sensor is dan gewenst. Onder andere Priva levert spuitbussen met een bekend mengsel van CO₂ (1000 ppm) en lucht waarmee een calibratie kan worden uitgevoerd.

Uitlezen van CO₂ sensoren

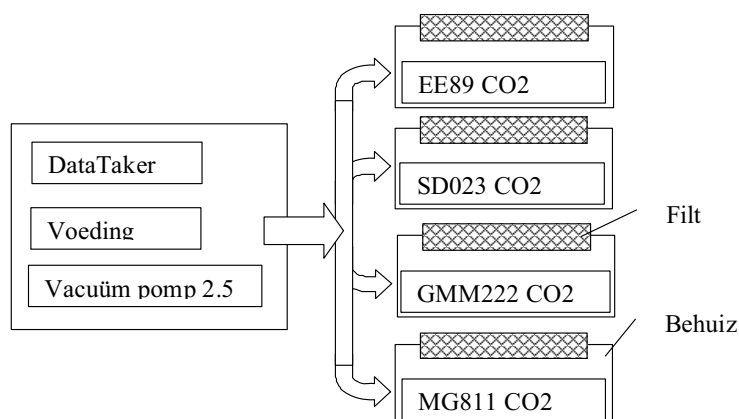
Vaak zijn de huidige CO₂ sensoren voorzien van een analoog display en geplaatst bij de tuinder op het kantoor. Modernere typen (<http://www.agro.priva.nl/pages/content/S2/contentpage-1189.aspx>) kunnen direct gekoppeld worden aan een klimaatcomputer. Deze kan de gegevens van de analyser opslaan in een database zodat achteraf bekeken kan worden welke CO₂ niveaus er in de kas aanwezig zijn geweest. De data wordt ook de door klimaatcomputer gebruikt in de klimaatregeling.

Aanvoer van de te analyseren lucht

De te analyseren lucht uit de kas wordt aangezogen via lange kunststof leidingen uit de kas. Vlak voor de sensor wordt de lucht gefilterd om te voorkomen dat stof ophoopt in de sensor(behuizing). Vaak worden er van een aantal plekken uit de kas leidingen naar de sensor aangelegd. Een klep voor de sensor schakelt tussen de leidingen zodat met 1 sensor verschillende locaties in de kas bemonsterd kunnen worden. Bij temperatuur verschillen tussen de kaslucht (warmer) en de aanvoerleiding van CO₂ naar de analyser (kouder) kan er in de leiding vocht condenseren. Vocht heeft de eigenschap dat het CO₂ opneemt en dus meetfouten veroorzaakt. Het is dus van belang dat de aanvoerleiding worden geïsoleerd wat niet altijd gebeurt.

Proefopzet

Om de sensoren te beschermen tegen invallend condenswater en vervuiling zijn ze in een kunststof doos geplaatst met stoffilter. De gekozen sensoren worden normaliter met het membraan in de te meten lucht geplaatst. Door de sensoren in een beschermende doos te plaatsen is een mechanische lucht afvoer benodigd om de geblokeerde natuurlijke convectie stroom te compenseren. Dit gebeurt door een kleine vacuümpomp aan te sluiten met een geïsoleerde luchtslang. Een regelbare voeding zorgt voor de benodigde energie van de sensoren en het uitgangssignaal van de sensoren is aangesloten op een datalogger van Datataker type 500. De sensorwaarden worden iedere minuut gelogd. De proef is uitgevoerd in een proefkas van Wageningen UR Glastuinbouw in Bleiswijk bij een geconditioneerde rozenteelt. Het CO₂ niveau wordt dagelijks gevarieerd tussen 400 en 1200 ppm. De kasklimaatgegevens (T, RV en CO₂) worden om de 5 minuten gemeten en in een Let's Grow database vastgelegd. De tijd van de datalogger wordt gesynchroniseerd via het netwerk zodat deze gelijk loopt met de tijd van de Let's Grow database. Deze gegevens worden later gebruikt bij de analyse van de data. Een schets van de proefopzet is hieronder weergegeven. De proef is gestart op woensdag 28 november 14:00 uur en beëindigd op woensdag 5 december 15:30. De eerste 30 minuten zijn overgeslagen om de sensoren te laten opwarmen.



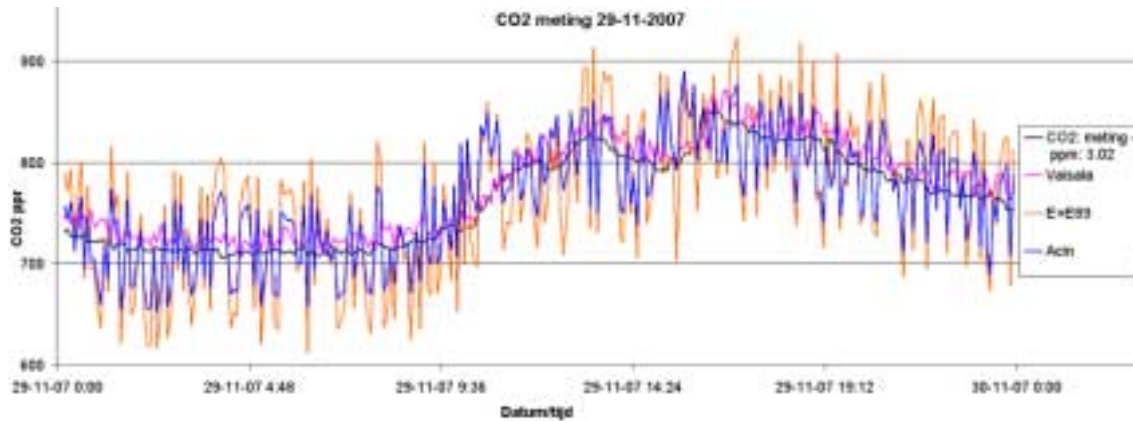
Figuur 2. Principeschema van CO₂ meting in proefkas.



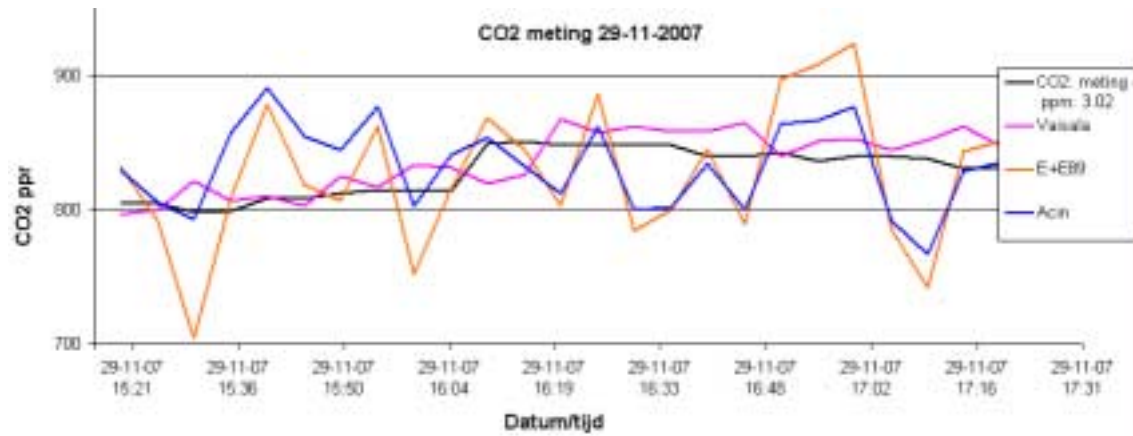
Figuur 3. Opstelling in de kas.

Resultaten

Drie sensoren zijn af fabriek gecalibreerd (Vaisala, Acrin en E+E89) en gelineariseerd zodat de ruwe sensorwaarden, opgeslagen in de datalogger in mV, in Excel eenvoudig omgezet konden worden naar ppm. De kasgegevens (CO₂, T en RV) zijn om de 5 minuten opgeslagen, terwijl de datalogger om de minuut gegevens (CO₂) heeft verzameld. De sensordata zijn daarom gemiddeld over 5 minuten (Figuur 4). Kort na aanvang van de metingen is de MG811 CO₂-sensor kapotgegaan. Bij navraag bij de fabrikant bleek dat de aangeboden voedingsspanning te hoog is geweest en dat deze sensor toch niet geschikt is om in een kas te meten vanwege de hoge vochtigheid. Deze sensor is buiten de analyse gelaten.



Figuur 4. CO_2 meting van 3 beproefde CO_2 sensoren en referentie CO_2 meting van proefkas 3.02 op 29 nov 2007.

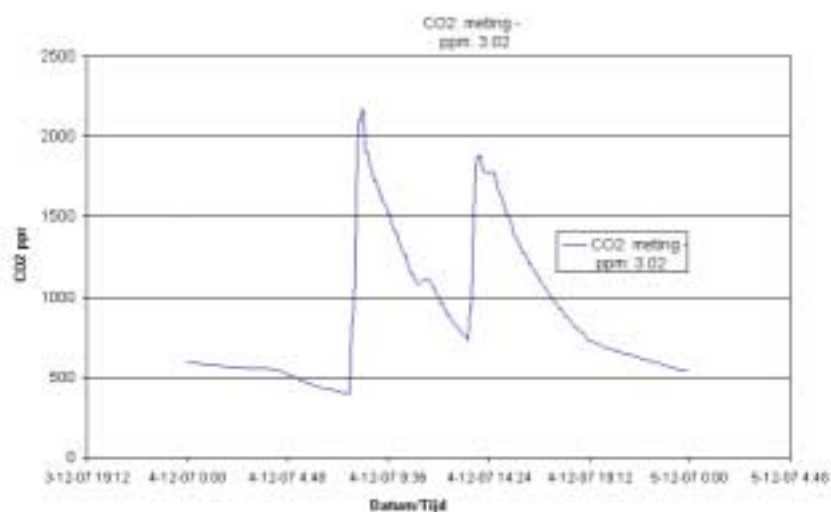


Figuur 5. Detail van CO_2 meting van 3 beproefde CO_2 sensoren en referentie CO_2 meting van proefkas 3.02.

Uit Figuur 4, 5 en Tabel 4 valt op te maken dat de Viasala sensor gemiddeld een iets hogere CO_2 aangeeft in vergelijking met de referentie CO_2 . Daarnaast lijkt het dat de sensor wat achterloopt bij de meting. Er is een kleine vertraging op te merken wat te herleiden valt uit de constructie van de sensor zelf. Het membraan en het volume van de sensor is vele malen groter in vergelijking met de andere twee sensoren (E+E89 en Acin SD020). Daardoor duurt het langer voordat de lucht in de sensor is 'ververst'. De E+E 89 sensor geeft gemiddeld de kleinste meetfout (Tabel 4). Daarentegen schiet de gemeten CO_2 wat op en neer, wat ook te zien is bij de Acin SD020 sensor. Beide sensoren hebben in tegenstelling tot de Viasala sensor een klein membraan en zijn daardoor gevoeliger voor kleine veranderingen in de aangeboden en te meten luchtstroom. De vacuümpomp kan hieraan ook debet zijn doordat de pomp gepulseerd lucht wegzuigt uit de instrumentendoos. De hoge standaardafwijking op de meeste dagen bij de meeste sensoren is het gevolg van de dynamiek van het CO_2 niveau (Figuur 6). De computermeting (merk oogedoorn) filtert daarentegen de metingen en levert een voortschrijdend gemiddelde.

Tabel 4. Gemiddelde, Standaardafwijking en Variatie coëfficiënt van gemeten CO₂ per dag.

CO ₂ REF kas 3.02	Vaisala	E+E89	Acin SD020	
807	821	821	809	28-11-2007
34,5	34,0	75,7	60,2	Gemiddelden
4,27	4,14	9,23	7,44	STDEV
				VC
764	776	763	764	29-11-2007
45,3	46,0	74,0	57,6	Gemiddelden
5,93	5,94	9,70	7,54	STDEV
				VC
824	846	821	820	30-11-2007
387,9	381,3	391,1	391,7	Gemiddelden
47,03	45,07	47,62	47,77	STDEV
				VC
753	781	755	758	1-12-2007
392,1	381,8	395,2	398,9	Gemiddelden
52,01	48,87	52,29	52,61	STDEV
				VC
792	820	791	799	2-12-2007
516,3	505,3	516,7	523,2	Gemiddelden
65,16	61,62	65,25	65,50	STDEV
				VC
744	771	746	761	3-12-2007
384,3	375,3	388,8	388,2	Gemiddelden
51,60	48,68	52,08	51,01	STDEV
				VC
887	913	890	887	4-12-2007
438,7	428,9	445,4	444,8	Gemiddelden
49,41	46,95	50,00	50,06	STDEV
				VC
904	921	902	933	5-12-2007
603,3	598,5	606,8	620,5	Gemiddelden
66,67	64,93	67,25	66,44	STDEV
				VC



Figuur 6. Dynamiek van doseren op 4-12-2007 in kas 3.02.

Berekening van het opgenomen vermogen

Als de gekozen sensoren aangesloten moeten worden op radiomodulen worden deze door een batterij gevoed. Om de omvang van de batterijvoeding te bepalen zijn de volgende 2 scenario berekeningen uitgevoerd. In het eerste scenario staat de sensor altijd aan en in het tweede scenario wordt de sensor na de meting uitgezet. In de berekening zijn de opwarm- en sampletijden opgenomen en is de meetfrequentie gevarieerd van eenmaal per minuut tot 30 minuten. Daarmee is de benodigde energie per maand berekend naar Ah bij gebruik van een voedingsspanning van 12 V.

Tabel 5. Benodigde energie voor de beproefde CO₂ sensoren, scenario 1 altijd aan.

	Energie verbruik per maand scenario 1 altijd aan [Ah]			
Meetfrequentie [s]	60	300	600	1800
E plus E, EE89	46,35	10,71	6.255	3.285
Acrin, SD023	60	60	60	60
Vaisala, GMM222	150	150	150	150

Tabel 6. Benodigde energie voor de beproefde CO₂ sensoren, scenario 2 aan/uit.

	Energie verbruik per maand scenario 2 aan/uit [Ah]			
Meetfrequentie [s]	60	300	600	1800
E plus E, EE89	46,35	10,71	94,5	31,5
Acrin, SD023	61	12,2	6,1	2,03
Vaisala, GMM222	87,5	17,5	8,75	2,92

Sensor EE89 heeft een opwarmtijd van 300 seconden zodat het geen zin heeft om de sensor aan en uit te schakelen bij een meetfrequentie van minder dan 300 s (Tabel 6). Dezelfde sensor gaat na een meting in een slaapstand en verbruikt dan minder energie. Bij een lage meetfrequentie van eens per half uur (1800 s) resulteert dit in een lager opgenomen vermogen per maand in vergelijking met de sensoren van Acrin en Vaisala (Tabel 5). In Tabel 6 is te zien dat het aan en uit zetten van deze sensor door de langere opwarmtijd van 300 s resulteert in een groter opgenomen vermogen per maand dan bij gebruik van de slaapstand. De overige twee sensoren met een kortere opwarmtijd profiteren van het aan en uitzetten wat een lager energie verbruik oplevert. De berekening laat zien dat deze CO₂ sensoren bij hoge meetfrequentie slecht toepasbaar zijn in combinatie met een batterij voeding. Een gemiddelde autoaccu heeft een capaciteit van 60 tot 80 Ah vergelijkbaar met de benodigde capaciteiten zoals berekend in Tabel 5 en 6. Bij meetfrequenties van een half uur zijn 10 oplaadbare batterijen voldoende. Met een capaciteit van 2,8 Ah en 1,2V, kunnen deze aan de energie vraag van één maand voldoen. In de berekening is het benodigde vermogen van de pomp niet meegenomen omdat bij een draadloze toepassing het gebruik van een pomp met aan of afvoer slangen ongewenst is en de beproefde sensoren in principe niet mechanisch geventileerd hoeven te worden. Zonder mechanische ventilatie is het wel nodig om de sensoren zo in een behuizing te plaatsen dat de openingen van de sensor direct in contact staan met de kaslucht maar dat de sensor tegen het kasklimaat wordt beschermd.

3.4 Conclusies

CO₂-sensoren, gebaseerd op infrarood absorptie, zijn door de kleine omvang, laag energieverbruik, lage kostprijs en elektrische compatibiliteit met bestaande radiomodulen het meest geschikt om met radiomodulen te combineren.

CO₂-sensoren gemaakt met MEMS technologie zijn een veelbelovende techniek voor de toekomst maar zijn nog niet verkrijgbaar. Een CO₂-sensor die toegepast wordt in de glastuinbouw moet tegen het kasklimaat bestendig zijn, van 0 tot 2000 ppm kunnen meten met een nauwkeurigheid van +/- 50 ppm en eenvoudig te calibreren zijn om veroudering en of vervuiling van de sensor te compenseren. In combinatie met een radiomodule, zodat de sensorwaarde van de CO₂-sensor draadloos uit te lezen is, moet de sensor een laag energieverbruik hebben, elektrisch aan te sluiten zijn op de radiomodule en moet het uitgangssignaal van de sensor op te nemen zijn door de radio.

Alle beproefde sensoren voldoen om een juiste CO₂ meting uit te voeren maar verschillen aanzienlijk in prijs. De prijsverschillen leiden in dit geval niet tot betere prestaties. En de kostprijs per sensor, bij gebruik in een draadloos netwerk van sensoren, is nog te hoog. Het benodigde vermogen per sensor is ondanks het lage verbruik van enkele Watts omgerekend per maand aanzienlijk. Het toepassen van aan/uit strategieën, lage meetfrequenties en slaapstanden maken het gebruik van een batterijvoeding nog niet praktisch haalbaar. Ook de behuizing van de sensoren moeten beter ontworpen worden zodat via natuurlijke convectie de lucht in en rondom de sensor kan worden verversd zonder gebruik van mechanische ventilatie. Geconcludeerd kan worden dat de huidige stand van de CO₂-sensortechnologie het nog niet mogelijk maakt om een draadloos netwerk van CO₂ sensoren in te zetten in de praktijk. Daarvoor verbruiken de sensoren te veel energie, is de kostprijs te hoog en wordt te veel gevraagd van de behuizing.

4 Materiaal en methode praktijkproef metingen Temperatuur en Relatieve vochtigheid

In de beginfase dit project kwam het bedrijf Wisensys (www.wirelessvalue.nl) met een nieuw systeem op de markt dat aan alle wensen en eisen die destijds zijn uitgezet voldeed. Een volledig meetsysteem met 100 noden is toen aangeboden voor 30k€. Na een afweging tussen zelf bouwen en inkopen heeft het geleid tot de aanschaf van een draadloos meetsysteem van Wisensys (Figuur 24). Het Wisensys systeem voldeed aan de volgende eisen en wensen:

- een radionode die ervoor zorgt dat de meetgegevens van een sensor draadloos naar een verzamelpunt gestuurd kan worden. Er zijn maar enkele fabrikanten die een dergelijk product op de markt aanbieden, voorbeelden hiervan zijn Sownet en Crossbow (www.sownet.nl en www.crossbow.com).
- een T en RV sensor die voldoende nauwkeurig beide grootheden kan meten. Een laag energie verbruik is daarbij van groot belang omdat draadloze toepassingen batterij gevoed worden en over een lange tijd gebruikt moeten kunnen worden. Een goed voorbeeld hiervan is de T en RV sensor van Sensirion waarmee in verschillende projecten binnen WUR (Parapluplan Gerbera en Lofar-Agro) ruime ervaring is opgedaan. Ook bovengenoemde fabrikanten hebben deze sensor in het product pakket opgenomen wat het vertrouwen in dit product versterkt.
- elektrische energie, vaak een batterij, is nodig voor de radionode en sensor. Hiervoor worden Lithium batterijen gebruikt. Deze leveren vanuit 1 cell 3,6 V gecombineerd met een hoge energie dichtheid en met dus een kleine verpakking. Een C-cell lithium batterij van de fabrikant Sonnenschein levert 3,6 V met een capaciteit van 7,6 Ah. Een gemiddelde alkaline batterij C-type levert 1,5 V bij 2 Ah (<http://www.greenbatteries.com/libafa.html>) zodat er ongeveer 2,5 alkaline batterijen nodig zijn om 1 Lithium batterij te vervangen.
- De behuizing moet bestand zijn tegen een kasklimaat. Uiteindelijk moeten deze componenten nog aangestuurd worden door software. De ervaring in het Lofar-Agro project heeft ons geleerd dat hiervoor veel tijd nodig is. De kosten van een dergelijk zelf te bouwen systeem voor bijvoorbeeld 100 noden zijn samengevat in Tabel 7.

Tabel 7. Kosten meetsysteem.

Onderdeel	Kostprijs per stuk	Totaal
Radio node	120	12.000
Sensor	25	2.500
Batterij	12	1.200
Behuizing	25	2.500
Klein materiaal	15	1.500
Basisstation	1.500	1.500
	Subtotaal	21.200
Software		50.000
	Totaal	71.200

4.1 Test sensoren in de klimaatcel

Om de technische meetcapaciteiten te testen van het Wisensys system is een proef uitgezet in een klimaatkamer. In de experimenten zijn verschillende sensoren gebruikt zodat prestaties met elkaar vergeleken kunnen worden:

- Een digitale T sensor (thermistor) (wy1).
- Een gecombineerde T en RV sensor van Wisensys (wy2). Dit type is later gebruikt in de uitgebreidere proef met 100 sensoren).
- Een PT-1000 temperatuur sensor (wy3).

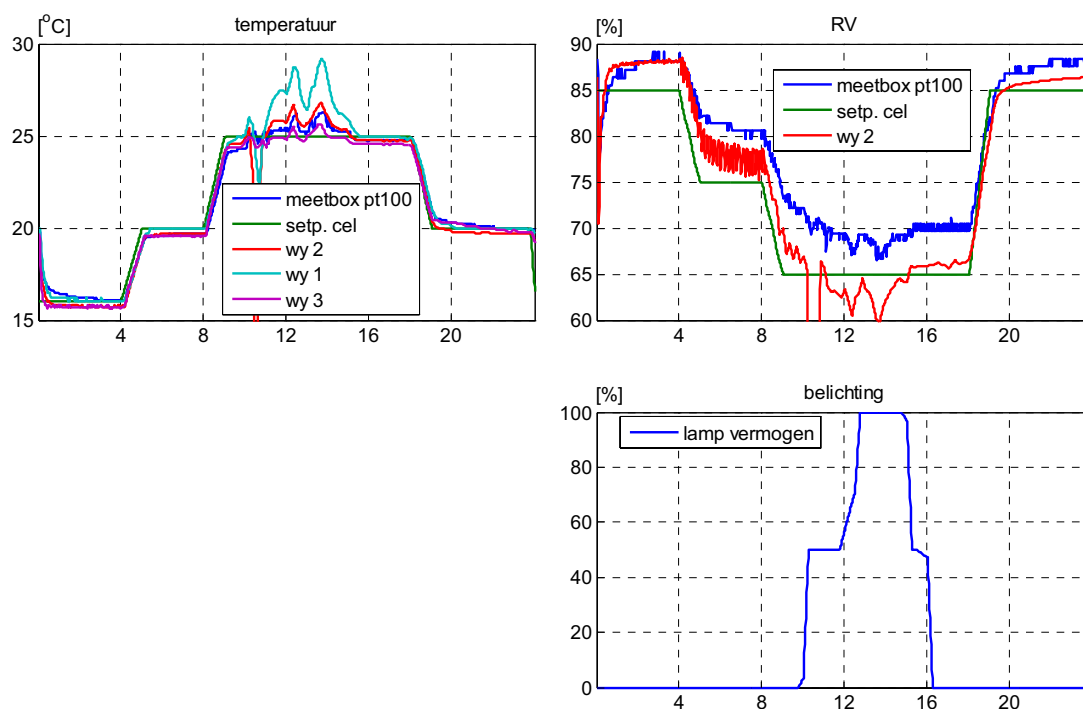
De sensoren zijn voor twee dagen in een klimaatcel geplaatst (17 en 18 April 2007). De data van de sensoren is opgeslagen samen met de meetdata van een standaard T en RV meetbox zoals gebruikt door tuinders in de glastuinbouw (Figuur 7). De data van de meetbox zijn niet gebruikt als een absolute referentie maar alleen ter vergelijking. De meetbox gebruikt twee geventileerde PT-100 sensoren waarvan er één in een natte kous is gestoken zoals in een droge-natte-bol meting. Voor aanvang van de test zijn de twee PT-100 sensoren onder droge condities getest en zijn de verschillen teruggerekend.



Figuur 7. Standaard T en RV meetbox van PRIVA.

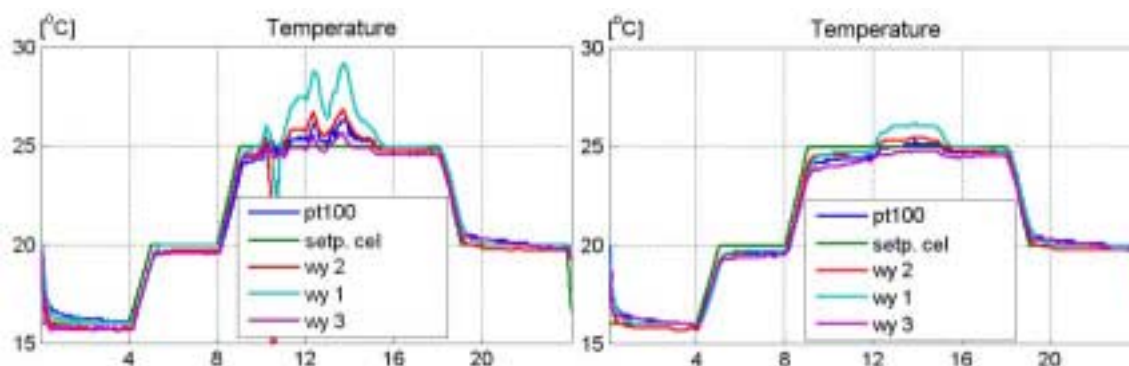
In de klimaatcel is de set-point temperatuur gedurende de dag gevarieerd tussen 16 en 25 °C, en de RV tussen 65 en 85%. In het plafond van de klimaatcel zijn hoge druk natrium assimilatielampen aangebracht die direct invalend zonlicht simuleren op de sensoren. De helft van de lampen is aangezet om 10.00u, en de volledige belichting tussen 13.00 en 15.00u. De lampen zijn uitgezet om 16.00u.

De resultaten van de eerste dag zijn weergegeven in Figuur 8. Zodra de lampen aangaan geeft sensor wy1 een hogere temperatuur aan in vergelijking met andere sensoren. De dip in de grafiek rond 10:30 wordt veroorzaakt doordat de sensoren tijdelijk uit de cel zijn gehaald. Zodra de belichting uit staat worden de temperatuurmetingen gelijkmatiger en over de sensoren heen en is de fout minimaal. Bij lage luchtvochtigheden (<70%) heeft de wy2 sensor een verschil van 5% in vergelijking met de meetbox.



Figuur 8. Etmaal T en RV in klimaatcel (3 Wisensys sensoren, meetbox) en setpoint computer en belichting (17 april 2007).

In tegenstelling tot de meetbox worden de Wisensys sensoren niet geventileerd. Wanneer gemeten wordt in stilstaande lucht kan dit leiden tot vertragingen of statische afwijkingen in de metingen. In de klimaatkamer staat de lucht niet stil en wordt voortdurend rond gepompt door ventilatoren. Het resultaat van de meting laat zien dat de Wisensys sensoren iets sneller reageren op temperatuursveranderingen dan de geventileerde sensoren in de meetbox. Dit is te verklaren door de zeer geringe massa van de Wisensys sensoren. Zodra de lampen uit zijn, zijn de temperatuurmetingen gelijk maar met de belichting aan zijn er verschillen. In samenwerking met de toeleverancier is besloten om de sensor af te schermen tegen direct invallend zonlicht door een geschuimde pvc plaat (Figuur 24). In Figuur 9 en 10 is het resultaat te zien van een meting uitgevoerd op 19 april en vergeleken met de meting van 17 april. Het verschil is niet helemaal weggenomen maar kan deels verklaard worden door technische verschillen tussen de sensoren, spreiding op de meting en meetfouten in de sensor van de meetbox en het Wisensys systeem. Na dit experiment werd de nauwkeurigheid voldoende geacht voor het uitvoeren van een experiment in de kas.



Figuur 9. Links de resultaten van de temperatuur meting in een klimaatcel (17-april).

Figuur 10. Rechts de resultaten van de temperatuur meting na aanbrengen van een scherm tegen direct invallend licht (19-april).



Figuur 11. Klimaatcel met assimilatiebelichting in het plafond.



Figuur 12. Basisstation gekoppeld aan een meetpc met het sensorgraph programma van Wisensys.

De constructie van de geschuimde pvc plaat is nog voor verbetering vatbaar. Een rechte plaat ontvangt gedurende de dag in gelijkblijvend direct zonlicht een wisselende hoeveelheid zonlicht doordat de hoek waaronder de zon staat over de dag varieert. Een betere constructie is een halve bolvormige plaat die ongeacht de zonnestand altijd dezelfde hoeveelheid straling over het oppervlak ontvangt zodat de warmte belasting op de sensor gelijk blijft [Per. Comm. Ricardo Suay Cortés (<http://agroingenieria.ivia.es/Como%20llegar/Como%20llegar.html>), IVIA, Valencia].

4.2 Communicatie-afstand tussen node - ontvanger - computer

De fabrikant geeft een communicatie afstand op van 1 km in een open veld. Het gedrag van de radio reikwijdte in een kas was nog onbekend. Om de reikwijdte te onderzoeken werden op twee praktijkbedrijven experimenten uitgevoerd.

Doel

Testen van de reikwijdte van het radiosignaal.

Experiment 1: reikwijdte van een radio in een laag gewas

Locatie: Fa. Koolhaas te Nieuwerkerk aan den IJssel

Planten: Gerbera's

Kas: hoogte tralie 3,5 m, lengte 250 m, breedte 50 m.

Bijzonderheden: veel schoringen of kruiswindverbanden in de kas die mogelijk het radiosignaal kunnen dempen.

Op het uiteinde van de 250 meter is een tweede compartiment met gerbera's geplaatst met een diepte van 50 m. Deze wordt gescheiden van de kas door een binnengevel. Het hoofdpad wordt onderbroken door een automatisch sluitende tweedelige aluminium deur.



Figuur 13. Schoringen in een kas kunnen mogelijk het radiosignaal beïnvloeden.

Opzet proef

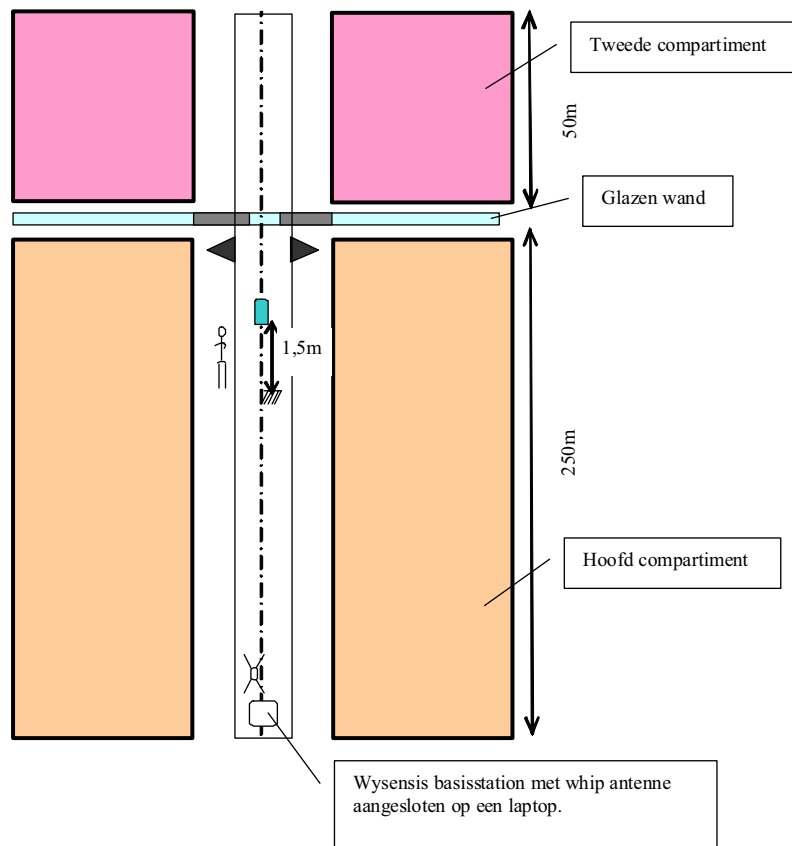
- Laptop met basisstation (Wisensys systeem) geplaatst in het midden en aan het begin van het hoofdpad.
- Meetfrequentie draadloze meetunit van Wisensys: 1s.
- Gemeten grootte: T en RV.

Uitvoering van de proef

Eén observeerder kijkt op de laptop of iedere seconde data binnenkomen via een lopende grafiek op het scherm van de laptop. Zodra de kwaliteit van het radiosignaal minder wordt (enkele berichten worden niet ontvangen) of wegvalt dan zal de meetfrequentie van 1 seconde niet meer gehaald worden of geheel stoppen, dit is een maat voor de reikwijdte van de meetunit. Een tweede persoon loopt met de draadloze meetunit over het middenpad van het basisstation weg (Figuur 14). De meetunit wordt daarbij zoveel mogelijk op 1,5 meter hoogte gehouden zover mogelijk van het lichaam af. Aan het eind van het 250 meter pad wordt de deur naar het tweede compartiment geopend en na het sluiten wordt door de tweede persoon de wandeling met de meetunit voortgezet.

Resultaat

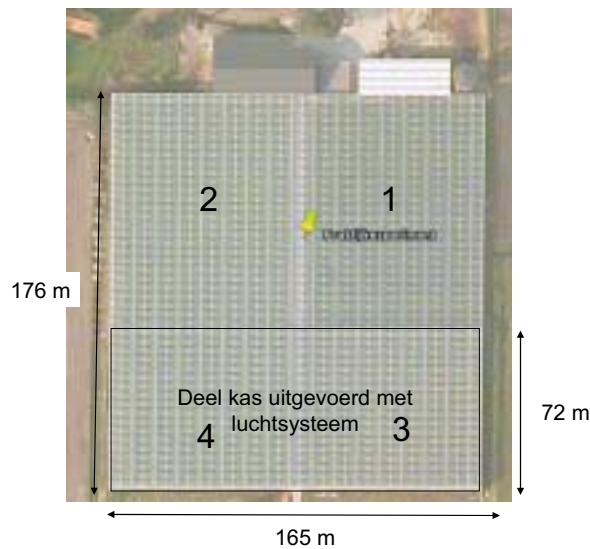
Tot aan het uiteinde van het 250 m hoofdpad bleven de data per seconde binnenkomen en bleef het radiocontact in stand. In het tweede compartiment was na het sluiten van de deur radiocontact maar deze viel na 10 meter het radiocontact weg. Het radiocontact werd weer hersteld nadat de meetunit weer terug werd gebracht in het eerste compartiment.



Figuur 14. Schema test van radioreikwijdte in een laag gewas (Gerbera).

Meting 2: radio reikwijdte in een hoog gewas (tomaten).

- Locatie: Oirschot.
- Planten: tomaten 4 m hoog.
- Kas: tralie hoogte 5 m, lengte 176 m, breedte 165 m.
- Opmerkingen: de kas is gebouwd eind jaren 90 begin 2000. De kas is verdeeld in twee compartimenten, zoals weergegeven in Figuur 15. Een glazen wand scheidt de twee compartimenten (1 en 2 van 3 en 4).



Figuur 15. Tomaten kas in Oirschot, het experiment is gehouden in compartiment 2 en 4.



Figuur 16. Kijkje in de kas, de tomaten planten staan op hangende stalen goten.

Materialen

- Laptop met RS232 Wisensys basisstation, whip antenne en Sensorgraph geïnstalleerd.
- Het basisstation is aan het begin van het pad en in het midden van het compartiment geplaatst op een hoogte van 1,5 meter.
- Meetfrequentie draadloze meetunit van Wisensys: 1s.
- Er zijn 20 Wisensys T en RH noden gebruikt.

Resultaten

Het basisstation is in het midden van het compartiment geplaatst op 1,5 meter hoogte. Wisensys nodes 1 t/m 15 zijn tussen de planten geplaatst op een hoogte van 1,5 m. Node nummer 16 t/m 20 zijn bij het basisstation geplaatst en dienen als referentie. De T en RV zijn 3 uur lang gemeten en de resultaten zijn via het Wisensys Sensorgraph programma opgeslagen en geïmporteerd in Excel. In Excel is geëvalueerd of er werkelijk per minuut data van een sensor node is verzonden en ontvangen, het aantal keer dat het niet gelukt is, is geteld en vertaald naar een 'data transmittance success rate' (Tabel 8).

meetset van 100 noden wordt daarom de antenne in de nok van de kas geplaatst zodat er minder plantmassa tussen de noden en de antenne van het basisstation staat.

Meting 3: Communicatie ontvanger-computer

Het basisstation is uitgevoerd met een RS232 uitgang. De baudrate, het getal geeft aan hoeveel bits per seconde er verstuurd kunnen worden, van het basisstation is 9600. In Tabel 9 valt op te maken dat de maximale kabellengte 150 meter mag zijn.

Tabel 9. Maximale kabellengte volgens Texas instruments en http://www.lammertbies.nl/comm/info/nl_RS-232_specs.html.

RS232 kabellengte volgens Texas Instruments	
Baudrate	Maximale kabellengte (m)
19200	15
9600	150
4800	300
2400	900

Bij de praktijkproef is het nodig om via een kabel vanuit het midden van de kas de data te versturen naar een pc in een technische ruimte van de tuinder. De te overbruggen afstand is ruwweg 100 – 150 meter. Voorafgaand aan de praktijktoets is een dergelijke kabel (150 m UTP 5) getest. Hieruit bleek dat de kabel of toch te lang was of een te grote elektrische capaciteit heeft. De data van het basisstation werden niet ontvangen door de pc. Daarop is besloten om het RS232 signaal te versterken tot RS485 waardoor de maximale kabellengte vergroot wordt zoals in Tabel 10 is weergegeven (naar http://www.lammertbies.nl/comm/info/nl_RS-485.html).

Tabel 10. Maximale kabellengte bij RS232 en RS485.

	RS232	RS485
Max afstand (vlg. standaard)	15 m	1200 m
Max snelheid op 12 m		
Max snelheid op 1200 m	20 kbs	
(1 kbs)	35 Mbs	
100 kbs		

Gebruik van de RS485 uitgang leverde inderdaad geen problemen op.

4.3 Metingen in de praktijk

De praktijkmetingen dienden plaats te vinden op een bedrijf waar ook metingen plaatsvonden in het kader van het project Ventilatievoud (Bontsema *et al*, 2007). Dit heeft als voordeel dat registraties van het klimaat plaatsvinden en dat een relatie kan worden gelegd tussen temperatuurverschillen in de kas en het al of niet ventileren op dat moment. Daarom is uiteindelijk gekozen voor een komkommerbedrijf in Heerde (Figuur 18-20). Een plattegrond van de kas is weergegeven in Figuur 22 en de karakteristieken van de lay-out van het bedrijf zijn weergegeven in Tabel 11. De buitenafmetingen van de kas zijn 93,5 x 170m. Het middenpad (3,5m) verdeelde de kas in twee gedeelten, aan iedere kant 43m. De kas had twee verwarmingsafdelingen, voor en achter, het achterste deel is later bijgebouwd. In Figuur 22 is deze grens te zien op 72m vanaf de technische ruimten. De technische ruimte ligt aan

de ZW-kant van het bedrijf. Het achterste vak is 97,2m lang. In het midden van de kas was boven het middenpad het basisstation opgehangen (Figuur 21) dat is aangesloten op het elektriciteitsnet en op de computer van de tuinder.



Figuur 18. Bovenaanzicht van het bedrijf.
(Bron: Google Earth)



Figuur 19. Middenpad.



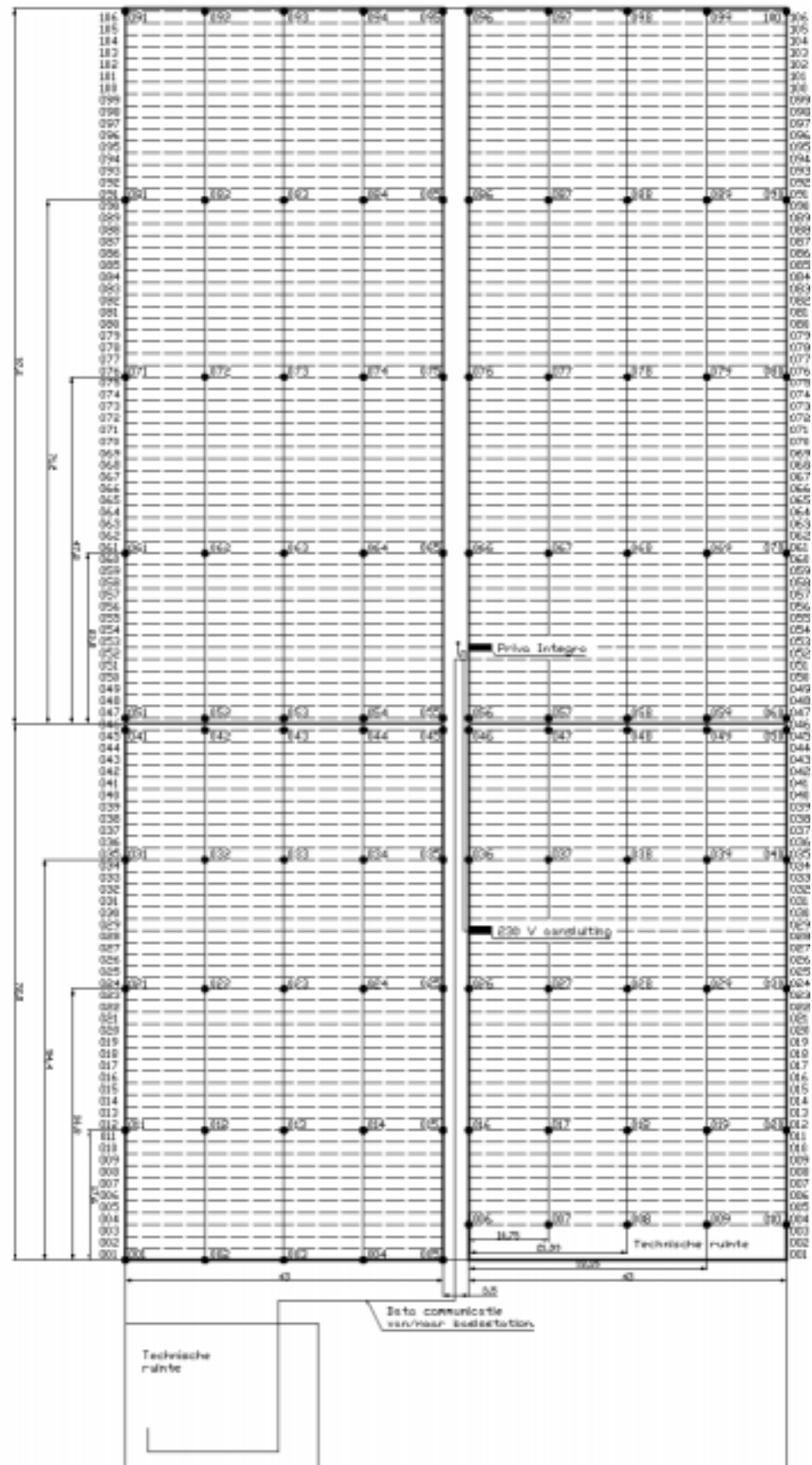
Figuur 20. Zijpaden met verwarmingssysteem.



Figuur 21. Basisstation aan een tralie in het middenpad.

Tabel 11. Meetgegevens meetlocatie (in m).

Kas	Afmeting in m	Schermen	
Hoogte nok	5.35	Energiescherm	Ja
Hoogte goot	4.70	Zonnescherm	Nee
Vakmaat	4.50	Beweegbaar scherm aan gevel	Nee
Kapbreedte	3.20		
Raambreedte	1.125	Verwarming	
Raamlengte	1.65	Ondernet	Ja
Luchtraam (bxh)	0,525x2.25	Bovennet	Nee
Soort glas	Enkel	Groeibuizen	Ja
		Apart regelbaar gevelnet	Nee



Figuur 22. Schematische weergave van de komkommerkas met breedte en lengtematen, nummering plukpaden, horizontale verdeling van 100 nodes en plaatsing van het basisstation (situatie proef 1).

Komkommerplanten zijn op 14 augustus 2007 geplant. Een overzicht van start- en einddata van de drie proeven is in Tabel 12 opgenomen.

Tabel 12. Plantdatum van de komkommers en data van het op- en verhangen van nodes.

Actie		Datum	Plaatsing nodes
Planten zetten		14 augustus 2007	
Proef 1	start	29 aug	Verspreid over de hele kas (tussen de rijen op 18m (voorste vak); in de rij op 1, 11, 21, 31 en 41m vanaf de gevel).
	einde	9 okt	
Proef 2	start	19 okt	Intensiever op één hoogte in noordwestelijk kwart van de kas (tussen de rijen 8m, in de rij op 1, 2,5, 5, 11, 21, 31 en 41 m vanaf de gevel (nodes op 2,5 en 5m zijn er tussengehangen i.v.m. proef 1).
	einde	21 okt	
Proef 3	start	22 okt	Op verschillende hoogtes in ca. 1/16 gedeelte van de kas aan noordwestelijke gevel: 4 rijen op 8m en in de rij op 1, 2,5, 5 11 en 21m. Verticaal op 0,5, 1, 1,5, 2 en 2,5m boven het maaiveld.
	einde	29 okt	

In proef 1 zijn de nodes uniform verdeeld over het gehele kascomplex opgehangen, waarbij in de rij steeds een vaste afstand van 10m is aangehouden en bij de gevel de node op 1m afstand is gehangen en bij het middenpad op 2m vanaf de rand. In het voorste vak is de rijafstand ca. 18m, in het achterste vak 24m. Bij de overgang van het voorste naar het achterste vak wordt het verwarmingssysteem gesplitst. Daarom is hier een extra rij nodes opgehangen. In de tweede proef is op een kleiner oppervlak, het noordwestelijke kwart van de kas, hetzelfde aantal sensoren opgehangen. Het grid verkleinde zich (Tabel 12) om de invloed van de gevel te meten. In de derde proef is ook verticaal gemeten waarbij het onderste meetpunt tussen de twee groeibuizen hing en het bovenste meetpunt boven het gewas uitstak (Figuur 23).

Bij de resultaten (hoofdstuk 5) wordt voor de duidelijkheid de feitelijke proefsituatie weergegeven. Vervolgens heeft een analyse van de data plaatsgevonden, enerzijds op de momentane waarden, anderzijds op de gemiddelde waarden.



*Figuur 23.
Foto-impressie van het wisensys
meetsysteem.*

Het blauwe kastje bevat de batterij, de microprocessor en de radio. Aan de onderkant zijn de sensoren zichtbaar. Er is een wit plaatje aan de onderkant gemonteerd om directe instraling te voorkomen. Aanpassing van het ontwerp van de behuizing was voor dit project niet mogelijk.



Batterij

Microprocessor

(Radio) tranceiver

Aansluitingen voor sensoren

Antenne

5 Resultaten Temperatuur en Relatieve Vochtigheid

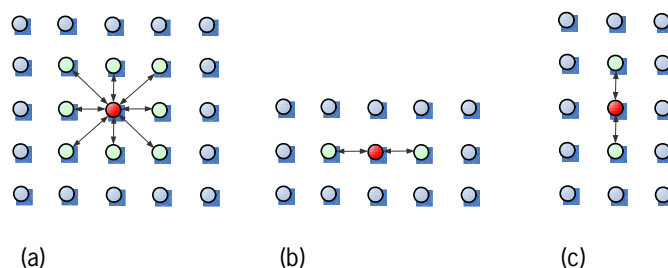
5.1 Proef 1: gehele bedrijf, momentane waarden

In proef 1 zijn de horizontale verschillen in temperatuur en relatieve vocht geanalyseerd. Om te kunnen bepalen wat de kleinste te meten temperatuur- en vochtverschil met de gekozen set-up is gekeken wat de maximale verschillen tussen naburige sensoren is. De berekeningen zijn gedaan op basis van uurgemiddelden die weer gebaseerd zijn op 1-minuut waarnemingen voor Temperatuur en RV. Voor proef 1 is de gehele kas met 4 afdelingen geanalyseerd (Figuur 24).



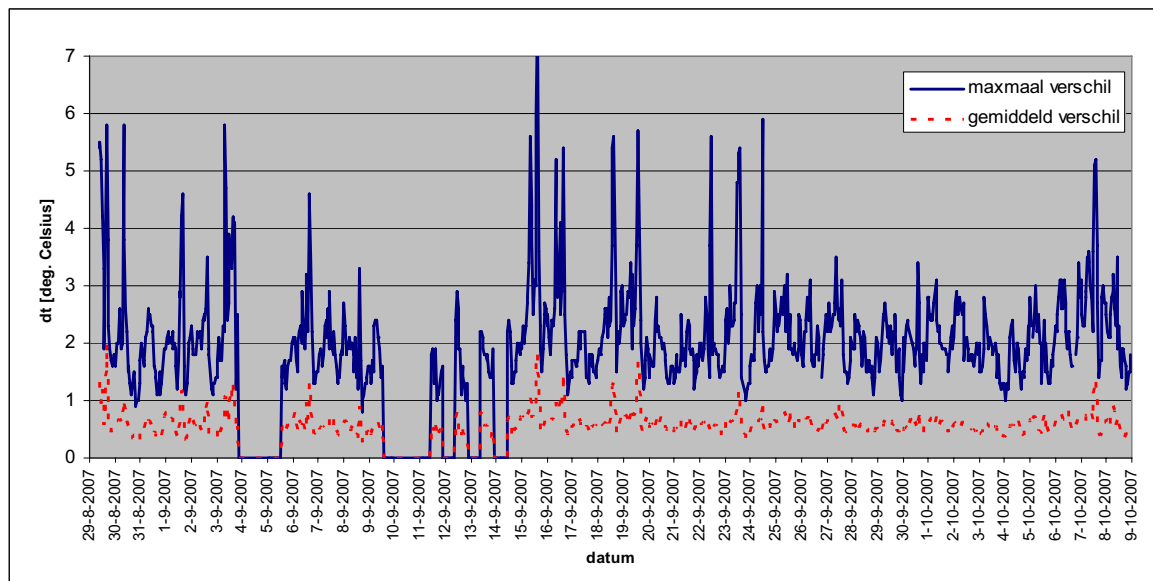
Figuur 24. Ligging van het bedrijf, inclusief verdeling in vier vakken.

Voor het bepalen van het maximale en gemiddelde absolute verschil in meetwaarden tussen een sensor en zijn naburige sensor is het absolute verschil in meetwaarden met alle omliggende sensoren berekend. Dit verschil is voor iedere sensorpositie berekend. Vervolgens is uit deze verschilwaarden het maximum en het gemiddelde berekend. Dit is gedaan voor zowel de combinatie van lengte- en breedterichting (alle omliggende sensoren) als ook alleen in lengte en alleen in breedterichting (Figuur 25).

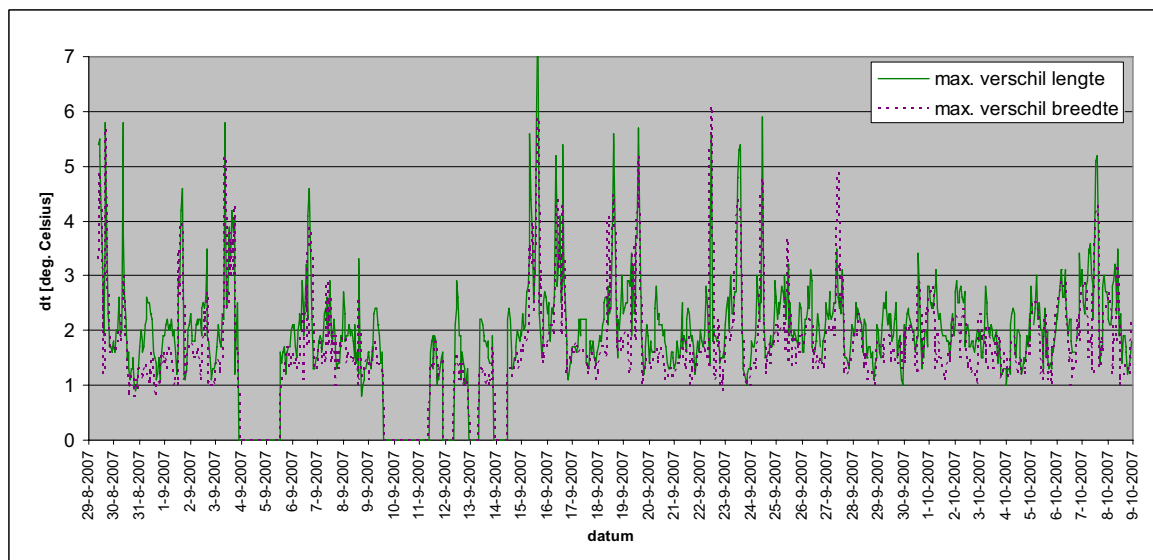


Figuur 25. Berekenen van absolute verschillen in meetwaarden van naburige sensoren: (a) combinatie lengte en breedterichting, (b) alleen breedterichting, (c) alleen lengterichting. Meetpunt (rood), buursensoren (groen), overige sensoren die in de berekening niet zijn meegenomen (blauw).

Vervolgens is uit deze verschillen de maximale en gemiddelde verschil voor de hele kas berekend. Figuur 26 en 27 tonen de resultaten voor temperatuur over de hele meetperiode. Voor de periodes waar de verschillen als 0 zijn weergegeven ontbreken de meetdata.



Figuur 26. Maximale en gemiddelde temperatuurafwijking tussen onderliggende nodes (combinatie lengte en breedterichting).



Figuur 27. Maximale temperatuurafwijking tussen onderliggende sensoren (alleen lengte en alleen breedterichting).

Het absolute verschil tussen buursensoren kan in sommige uren op een bepaalde plek in de kas oplopen tot 7 graden. Het gemiddelde maximale verschil ligt over de gehele periode gezien bij ongeveer 0.75 graden. De maximale afwijking in lengterichting ligt in het algemeen hoger dan die in breedterichting omdat de afstand tussen de nodes in proef 1 in de lengterichting groter is (17-24m lengterichting en 11m breedterichting).

In Tabel 13 zijn de minimale en maximale gradiënten in temperatuur over de hele kas in de hele proefperiode weer-gegeven. Als gradiënt wordt in dit geval het absolute verschil tussen de hoogste en de laagste meting binnen het meetgebied bedoeld (voor proef 1 dus de hele kas). De gradiënt was op geen moment kleiner dan 1.5 °C en is tijdens dit experiment incidenteel opgelopen tot meer dan 9 °C (overdag met zonbelasting).

Tabel 13. Maximum, Minimum en gemiddelde gradiënt over de hele kas in de hele proefperiode (proef 1).

Minimum gradiënt	1.5 °C
Maximum gradiënt	9.2 °C
gemiddelde gradiënt	3.8 °C
Standard afwijking	1.1 °C

Twee periodes uit deze data met verschillende klimaatomstandigheden zijn gedetailleerder geanalyseerd:

1. Onrustige periode: 15-9 t/m 20-9
2. Rustige periode: 29-9 t/m 4-10

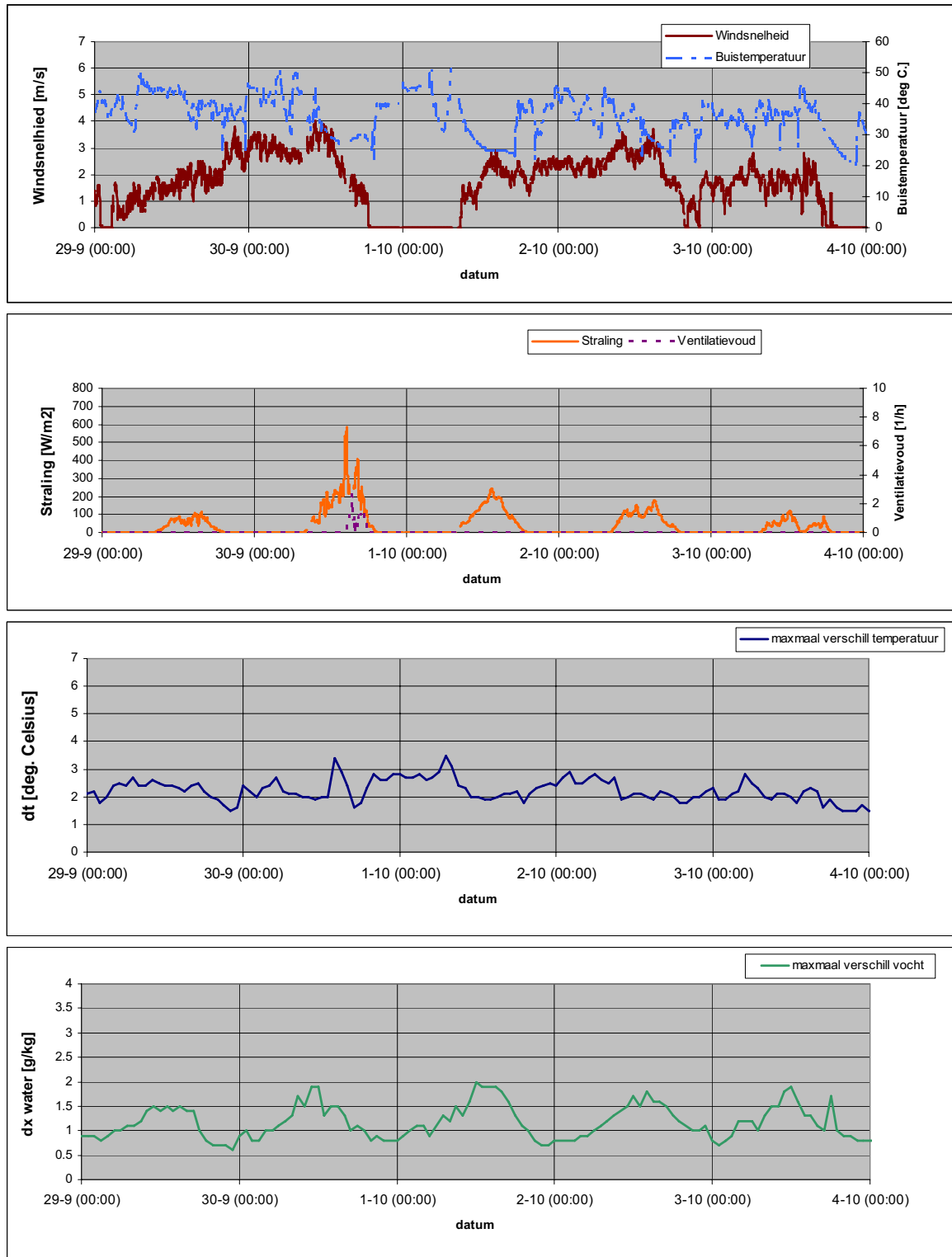
Onder onrustig wordt hier verstaan dagen met veel globale instraling en wisselende raamstanden (tot 40% open) met enig verschil tussen dag- en nacht buitentemperatuur. Onder rustig weer worden meer bewolkte dagen verstaan met weinig tot geen open ramen en een gelijkmatiger temperatuurverloop zowel binnen als buiten.

Figuur 28 en Figuur 29 geven de klimaat- en weersomstandigheden voor deze periodes weer. Ook de door de ventilatiemonitor geschatte ventilatievoud (Bontsema *et al.*, 2007) is in deze grafieken weergegeven. Verder wordt het maximaal gemeten temperatuurverschil tussen buursensoren in de kas getoond en het maximaal gemeten verschil in vocht. Omdat het relatieve vochtgehalte (RV) afhankelijk is van de temperatuur heeft een omrekening plaatsgevonden van relatief vocht (%) naar absoluut vocht (g/kg).

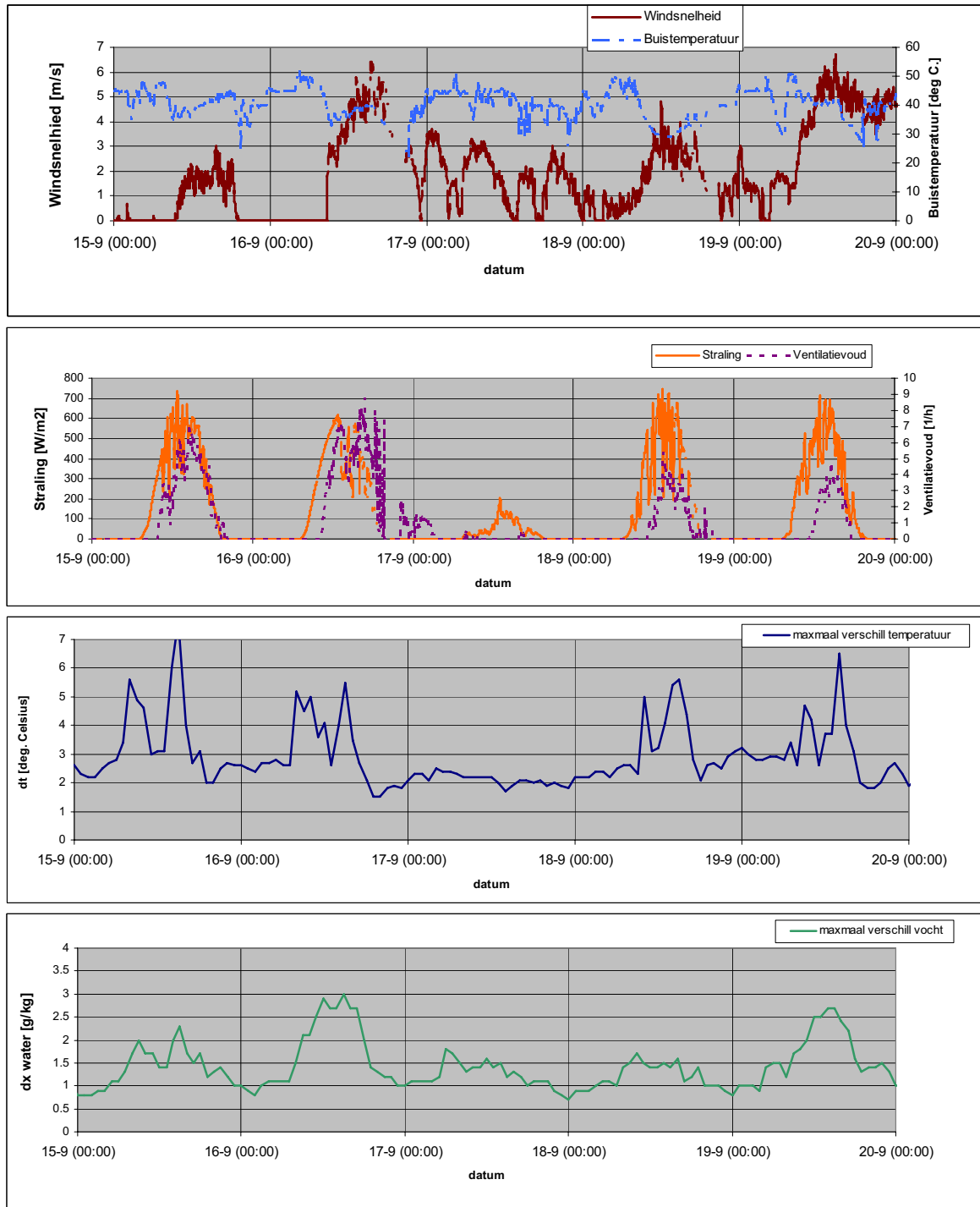
Bij onrustiger weer, d.w.z. veel globale straling en ventilatie zijn de gemeten temperatuurverschillen en vochtverschillen binnen de kas veel hoger dan bij weinig globale straling. Terwijl in de rustige periode het maximale temperatuurverschil tussen twee buursensoren in de hele kas redelijk constant rond de 2 á 3 graden is, loopt in de onrustige periode dit verschil op tot 5 tot 7 graden. De hoogste verschillen vinden plaats op momenten met veel ventilatie. Uiteraard komt dit ook overeen met momenten van hoge straling zodat er meerdere verklaringen voor dit gedrag mogelijk zijn: 1. Open ramen zorgen voor inval van koude lucht en veel luchtbeweging, zodat tussen twee buursensoren grote verschillen in temperatuur te meten zijn. 2. De meting wordt beïnvloed door directe instraling op de sensor.

Deze resultaten laten zien, dat zelfs bij rustig weer op bijna ieder moment het gemeten momentane verschil tussen twee naburige sensoren ergens in de kas groter 2 graden is. Is de doelstelling een temperatuurverschil van momentaan 1 graad ruimtelijk in kaart te kunnen brengen dan zal de afstand tussen twee meetpunten gehalveerd moeten worden. Alternatief kan over een langere periode worden gemeten (meerdere dagen) om zich herhalende data te verkrijgen. Door statistische analyse van deze data is de nauwkeurigheid te verhogen (zie 5.2 en Bijlage II).

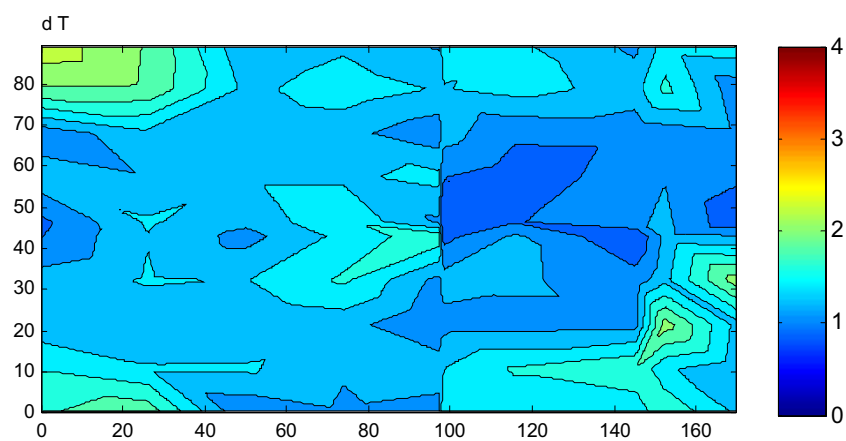
In Figuur 30 t/m Figuur 32 en Figuur 33 t/m Figuur 34: Onrustige periode (15/9., 16/9, 19/9). In Figuur 35 is de tweedimensionale verdeling van het absolute temperatuurverschil tussen onderliggende sensoren weergegeven. Dit is gedaan voor zowel een heel etmaal (0-23 h) dan ook voor alleen de dagperiode (8-18 h) en de nachtperiode (19-7 h). Met deze grafieken worden dus locaties in de kas verduidelijkt met bijzonder hoge of lage variatie. Het valt op, dat in de rustige periode het beeld zeer gelijkmatig is en dat op alle momenten niet kan worden gesproken van een duidelijk gevel effect. In de onrustige periode is tijdens de dagperiode een plek met grotere variatie in het noordoost gedeelte van de kas. De oorzaak hiervan is niet bekend.



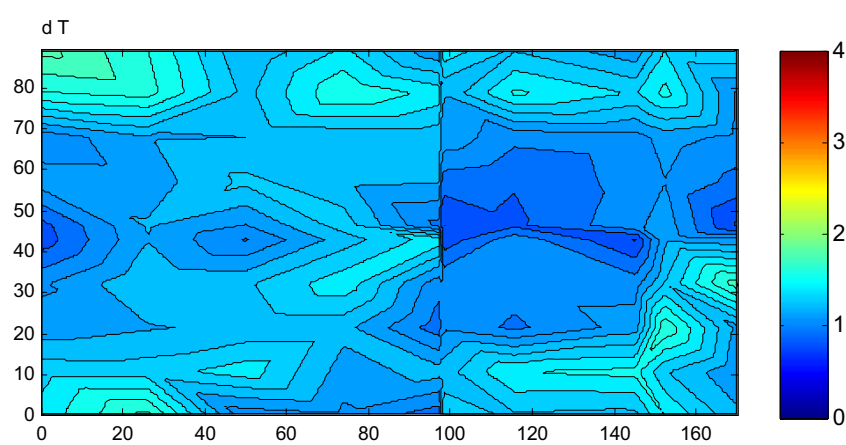
Figuur 28. Rustige periode.



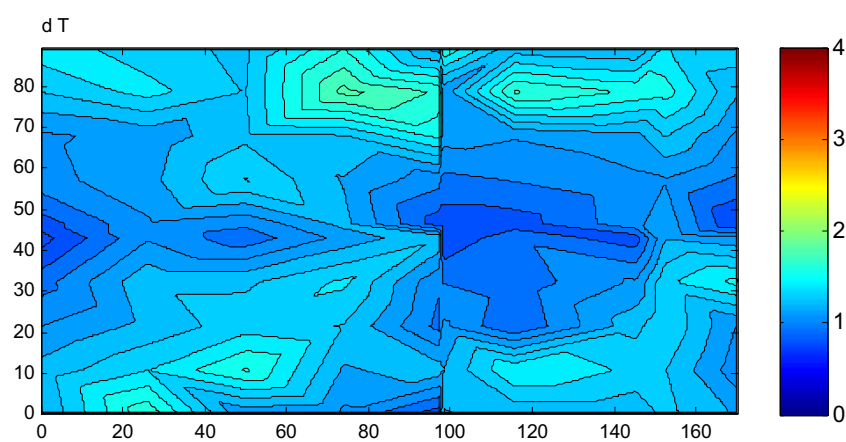
Figuur 29. Onrustige periode.



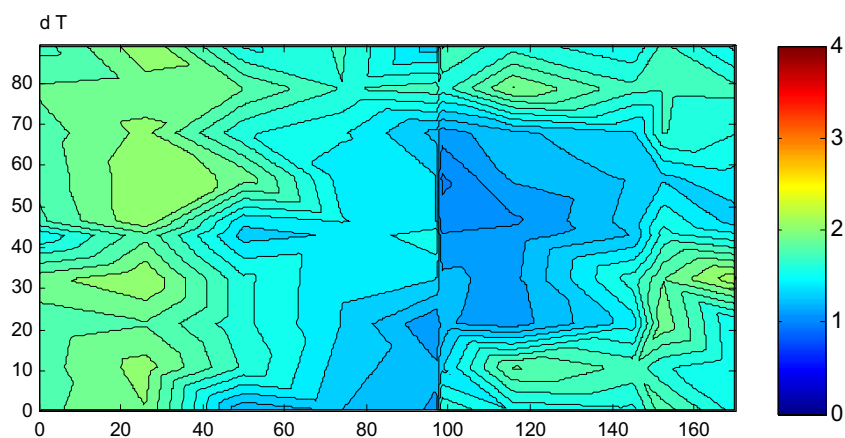
Figuur 30. Rustige periode (29-9,30-9, 01-10-2007); 0-23 h.



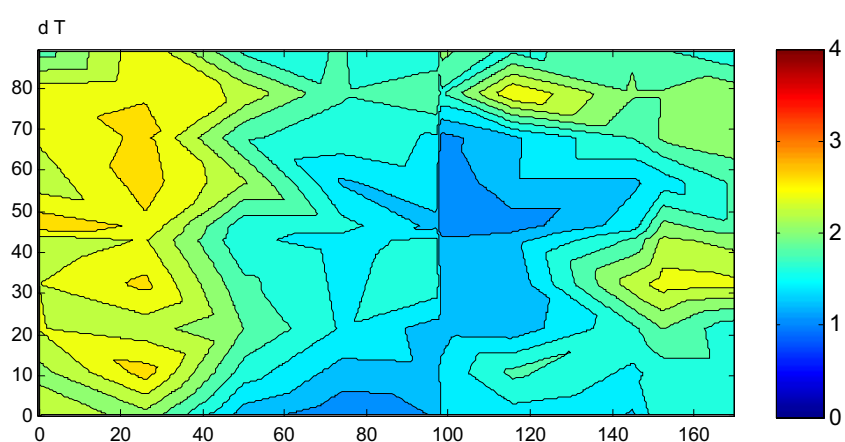
Figuur 31. Rustige periode (29-9,30-9, 01-10-2007); 8-18 h.



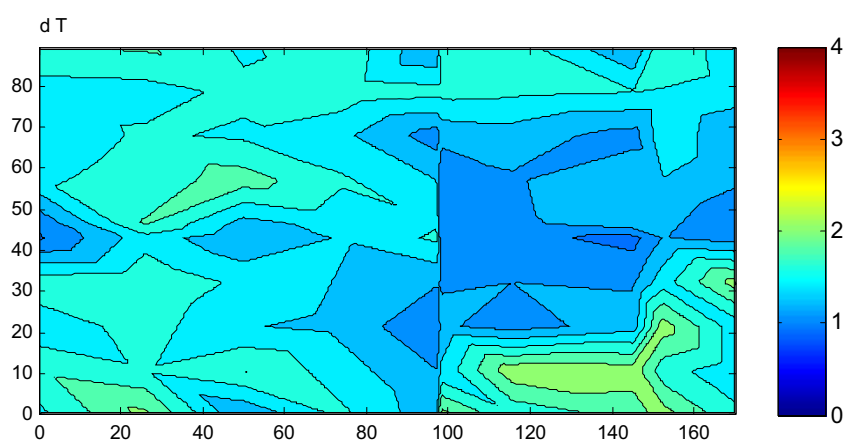
Figuur 32. Rustige periode (29-9,30-9, 01-10-2007); 19-7 h.



Figuur 33. Onrustige periode: (15-9,16-9, 19-9-2007); 0-23 h.



Figuur 34. Onrustige periode: (15-9,16-9, 19-9-2007); 8-18 h.



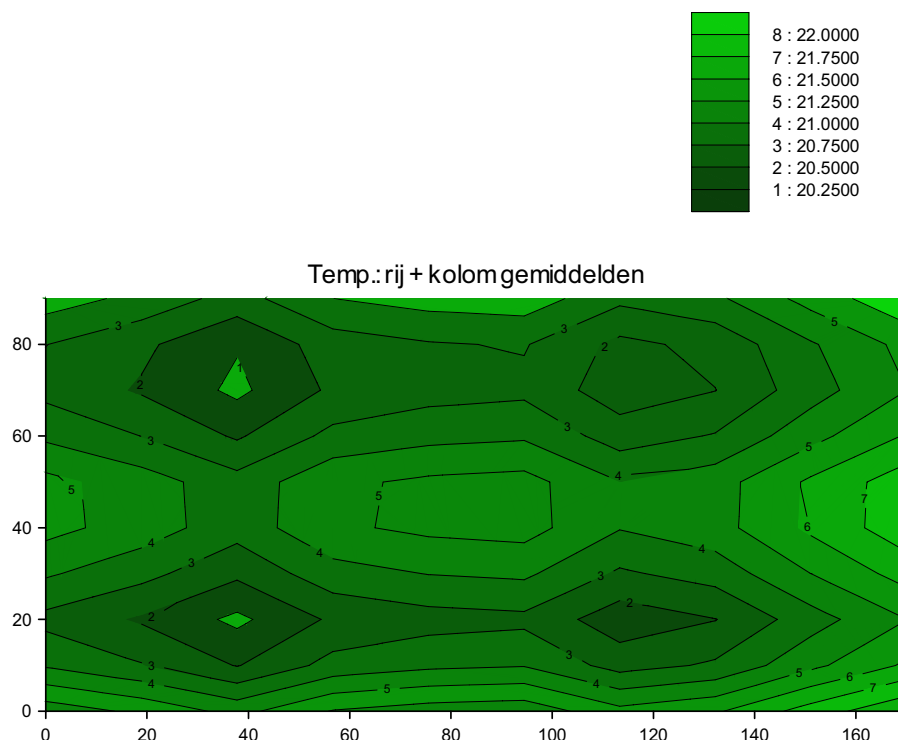
Figuur 35. Onrustige periode: (15-9,16-9, 19-9-2007); 19-7 h.

Gehele bedrijf, gemiddelde waarden

In Bijlage II is een statistisch verslag gegeven van de analyse van de data op basis van 1 uur gemiddelden over de maand september. Hierin is op vier verschillende manieren de dataset geanalyseerd. In het eerste model is onderzocht hoe de verschillende factoren (dag, uur, x- en y-coördinaat en interacties) zich onderling verhouden. Het blijkt dat de factor uur en de interactiefactor dag*uur de grootste variatie hebben, gevolgd door de lokale omstandig-

heden ($x \cdot y$ coördinaten). Factor uur heeft met het dag/nacht ritme te maken, maar ook dat de variatie op hetzelfde uur op bijv. een zonnige dag anders is dan op een bewolkte dag. Hierdoor verandert ook het ruimtelijk aspect ($x \cdot y$ interactie). Tussen middenpad en gevel (Y -coördinaat) is meer variatie dan tussen de verschillende kappen (X -coördinaat). Dit model rekent ook uit dat verschillen kleiner dan $0,65^\circ\text{C}$ (de meeton nauwkeurigheid) niet gedetecteerd kunnen worden. Dit is meer dan de technische onnauwkeurigheid van de sensoren ($\pm 0,2^\circ\text{C}$). Het verschil wordt bijvoorbeeld veroorzaakt door luchtstromen, schaduw, groei gewas of bladstand. De verschillen zijn dan gedurende de meetperiode niet constant. Gemiddeld over alle sensoren komt de meeton nauwkeurigheid uit op ca. $1,1^\circ\text{C}$.

Aangezien niet alle factoren random en onafhankelijk van elkaar zijn is in het 2^e model hier rekening meegehouden en zijn een aantal factoren vastgezet waardoor alleen met factor dag*uur en X en Y is gerekend (Figuur 36).

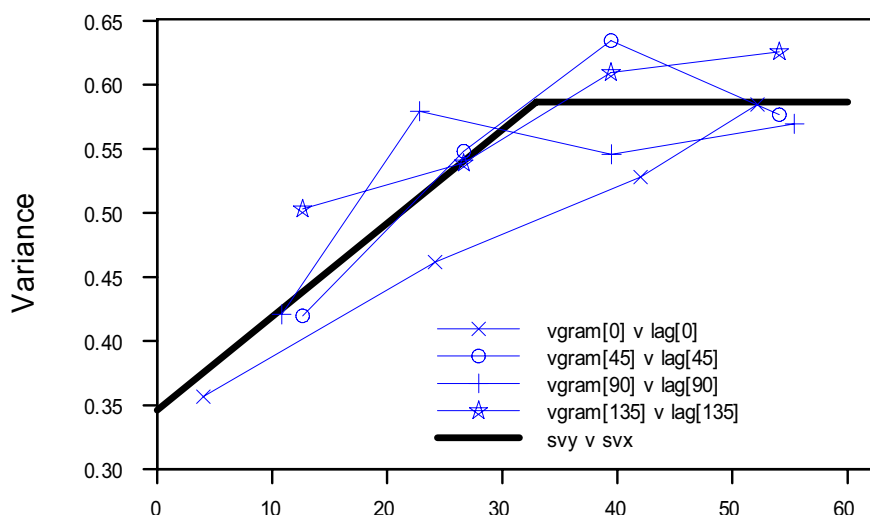


Figuur 36. Rij en kolom gemiddelden.

Duidelijk zijn vier koudere vlakken en het middenpad te herkennen. Ook de invloed van extra verdelingsbuizen aan de beide kopse gevels is te zien. Verschillen tot ca. 2 graden zijn te zien. De standaardafwijking van het gemiddelde is niet overal in de kas gelijk, het varieert tussen $0,6$ en 2°C , zonder dat hiervoor specifieke plekken aangegeven kunnen worden.

Aangezien de afstanden tussen de sensoren niet gelijk was is hier een speciaal, 3^e, model voor gemaakt waarin hiervoor wordt gecorrigeerd. In feite wordt dezelfde onnauwkeurigheid berekend als met het eerste model. Wel is de meeton nauwkeurigheid te verlagen van $1,1$ naar $0,9^\circ\text{C}$ door de interactie tussen uur en plaats mee te nemen. Dit betekent dat op de ene plaats in de kas een andere variatie in temperatuur is als op een andere plaats.

In het 4^e model is met geostatistische technieken berekend wat de varianties zijn als de afstand tussen de sensoren varieert (Figuur 37). Hieruit valt voor deze kas en voor deze (weers)omstandigheden te concluderen dat als twee sensoren tegen elkaar staan er nog altijd een variantie van $0,35$ ($=1,1^\circ\text{C}$) bestaat. De variantie neemt toe tot $0,6$ ($=1,5^\circ\text{C}$) bij toename van de onderlinge afstand tussen de sensoren tot 33m . Bij verdere toename van de afstand tussen twee sensoren ga je informatie missen, de meting wordt onafhankelijk. Het zou dan bijvoorbeeld kunnen dat je een koude of warme plek in de kas niet meet.



Figuur 37. Relatie tussen afstand tussen sensoren en de daardoor optredende variantie.

Dag-nacht gemiddelden temperatuur en RV

In Bijlage III is als voorbeeld een aantal septemberdagen weergegeven. Verschillen tussen dag en nacht zijn duidelijk en de gemiddelde dagtemperatuur gaat omhoog met toenemende instraling. Als de stookinvloed groter wordt is er een duidelijker patroon van koude/warme plekken in de kas zoals ook in Figuur 18 te zien is. Één dag of nacht geeft geen helder beeld over horizontale temperatuurverschillen. Het absolute verschil ligt meestal tussen de 2 en 3°C. RV geeft een veel grilliger beeld waardoor per dag/nacht totaal geen beeld gekregen wordt.

5.2 Proef 2: hoge resolutie meetgrid langs de gevel

In dit experiment zijn de sensoren door ze in 1 kasafdeling te plaatsen over een fijner meetgrid verdeeld (Figuur 38), vooral met het doel om de effecten van de gevel beter in kaart te kunnen brengen (H4.3). Vanwege problemen met de data acquisitie zijn alleen voor de dagen 19, 20 en 21 oktober volledige datasets beschikbaar. Deze drie dagen worden hier nader geanalyseerd.

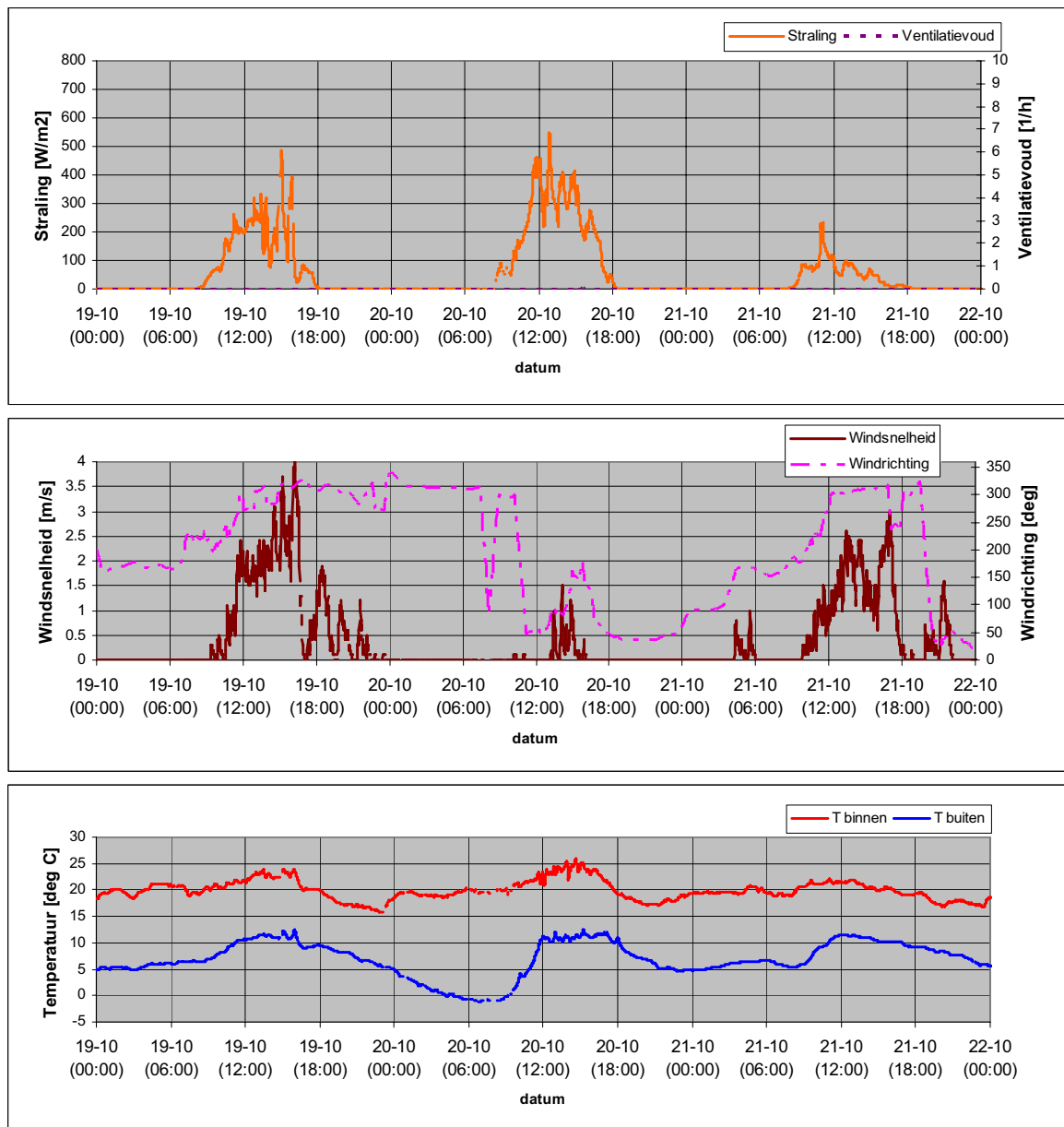


Figuur 38. Ligging van het bedrijf in relatie tot de volgende afbeeldingen. Voor proef 2 zijn alle sensoren geplaatst in de oranje gekleurde afdeling.

Buiten weersomstandigheden tijdens het experiment:

19 en 20 oktober zijn redelijk zonnige dagen geweest, 21 oktober was een meer bewolkte dag.

Op 19 en 21 oktober heerste overdag matige wind uit noordwest (ca. 300 graden). Op 20 oktober was weinig tot geen wind uit richting zuid tot zuidoost. 's Nachts was het op alle dagen rustig weer. De buitentemperatuur lag overdag tussen 5 en 10 graden en op 20 oktober is de temperatuur in de vroege ochtenduren net onder het vriespunt gedaald. Tijdens alle drie de dagen waren de ventilatieramen van de kas gesloten. Figuur 39 geeft het verloop weer.

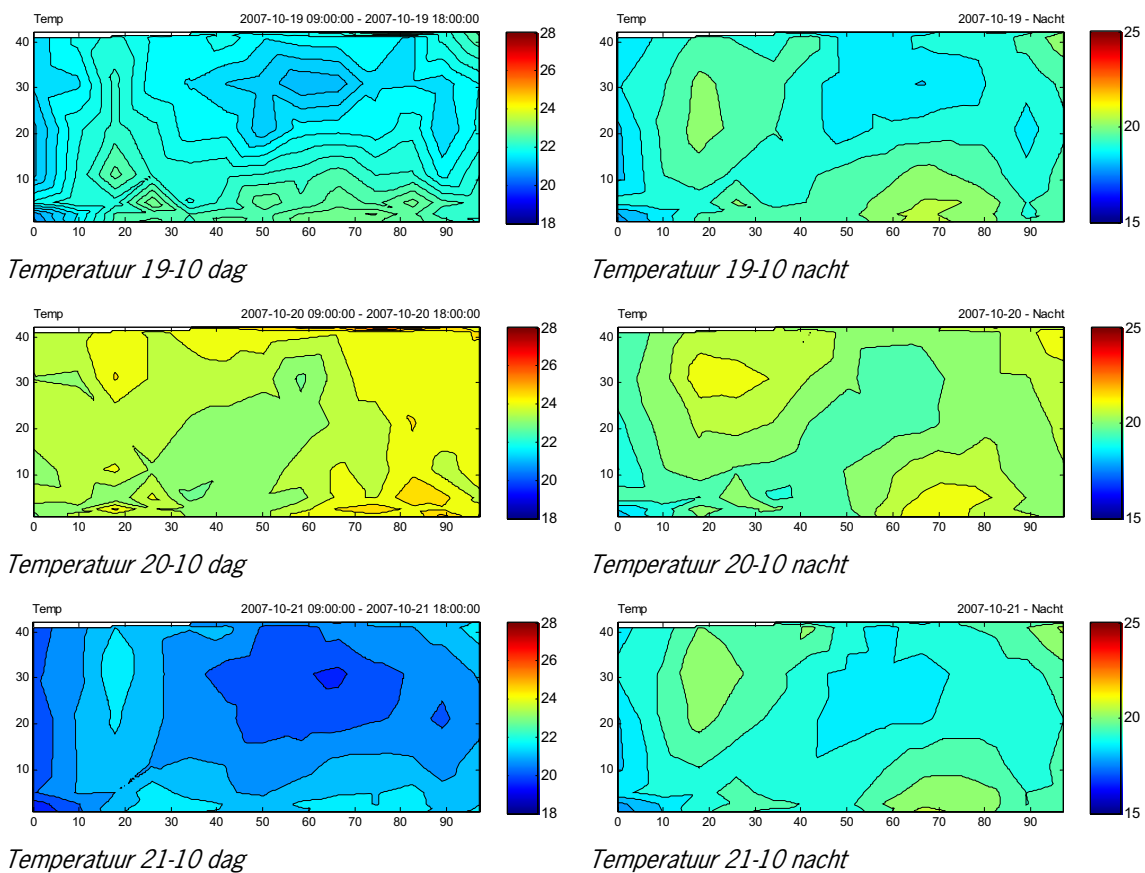


Figuur 39. Weer en Klimaatomstandigheden tijdens proef 2.

Temperatuurverdeling

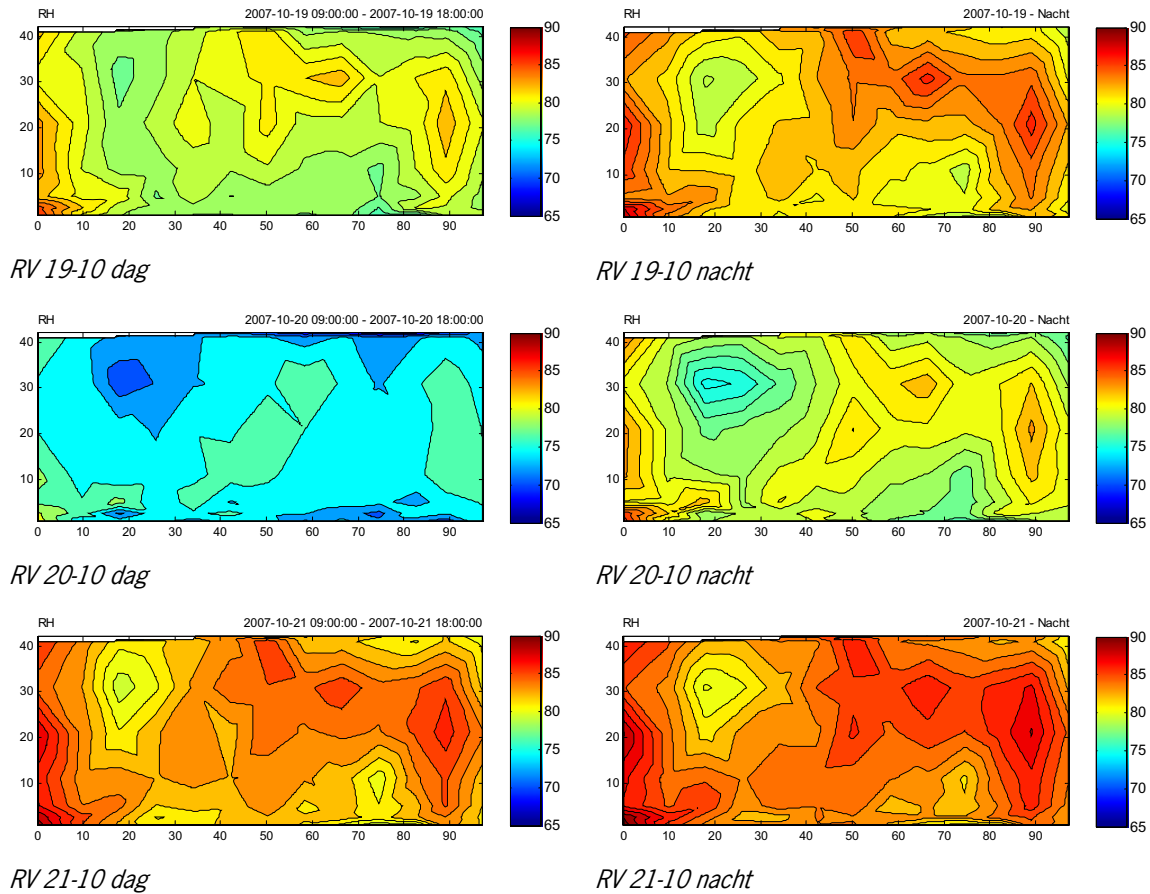
Voor de analyse van de temperatuur en RV verdeling zijn de dagen in een nachtperiode (0 tot 9 uur en 18 tot 24 uur) en een dagperiode (9 tot 18 uur) opgesplitst. In Figuur 40 zijn de gemiddelde waarden over deze periodes weer-gegeven. Bij de noordoost gevel (linker kant in figuur) is op alle dagen een koud gebied. Op 19 oktober overdag is deze afkoeling het grootst. Dit was ook de dag met de hoogste windsnelheid, hoewel ook op andere plekken in de

kas hetzelfde lage temperatuurniveau is gemeten. De noordwest gevel (onderkant in figuur) is daartegenover warmer dan de rest van de kas. Dit heeft hoogstwaarschijnlijk met de verwarmingsbuizen langs de gevel te maken.



Figuur 40. Horizontale temperatuurverdeling 19-10 t/m 20-10.

Bij de metingen van de RV zijn de gevelinvloeden, met name van de noordoost gevel (linker kopse gevel), iets duidelijker zichtbaar (Figuur 41). Dit correspondeert met de daar heersende lagere temperaturen (Figuur 40). Op alle dagen is dichtbij de noordoost gevel een gebied met hoge RV. Ook is er op alle dagen een vochtige plek rechts in de figuren (bij co-ordinaat $x=90$ en $y=25$) te zien.



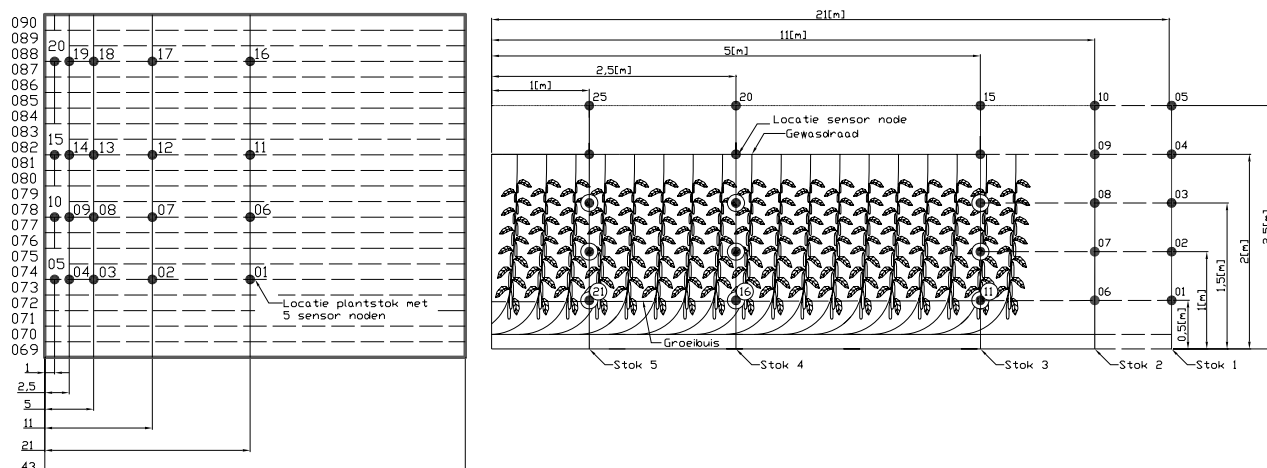
Figuur 41. Horizontale verdeling van relatieve vochtgehalte (RV) op 19-10 t/m 21-10.

5.3 Proef 3: driedimensionale meting

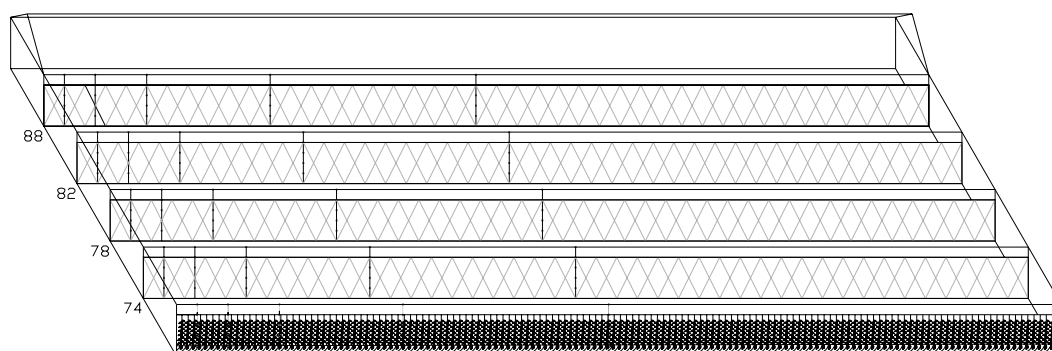
In deze proef (van 22-10 tot 29-10) zijn de 100 sensoren in een klein gedeelte van één afdeling geïnstalleerd. Hiervoor zijn 5 sensoren per stok op verschillende hoogtes geïnstalleerd (4.3, Figuur 6, Figuur 42).



Figuur 42. Voor proef 3 zijn alle sensoren geplaatst in het oranje gedeelte van het bedrijf.



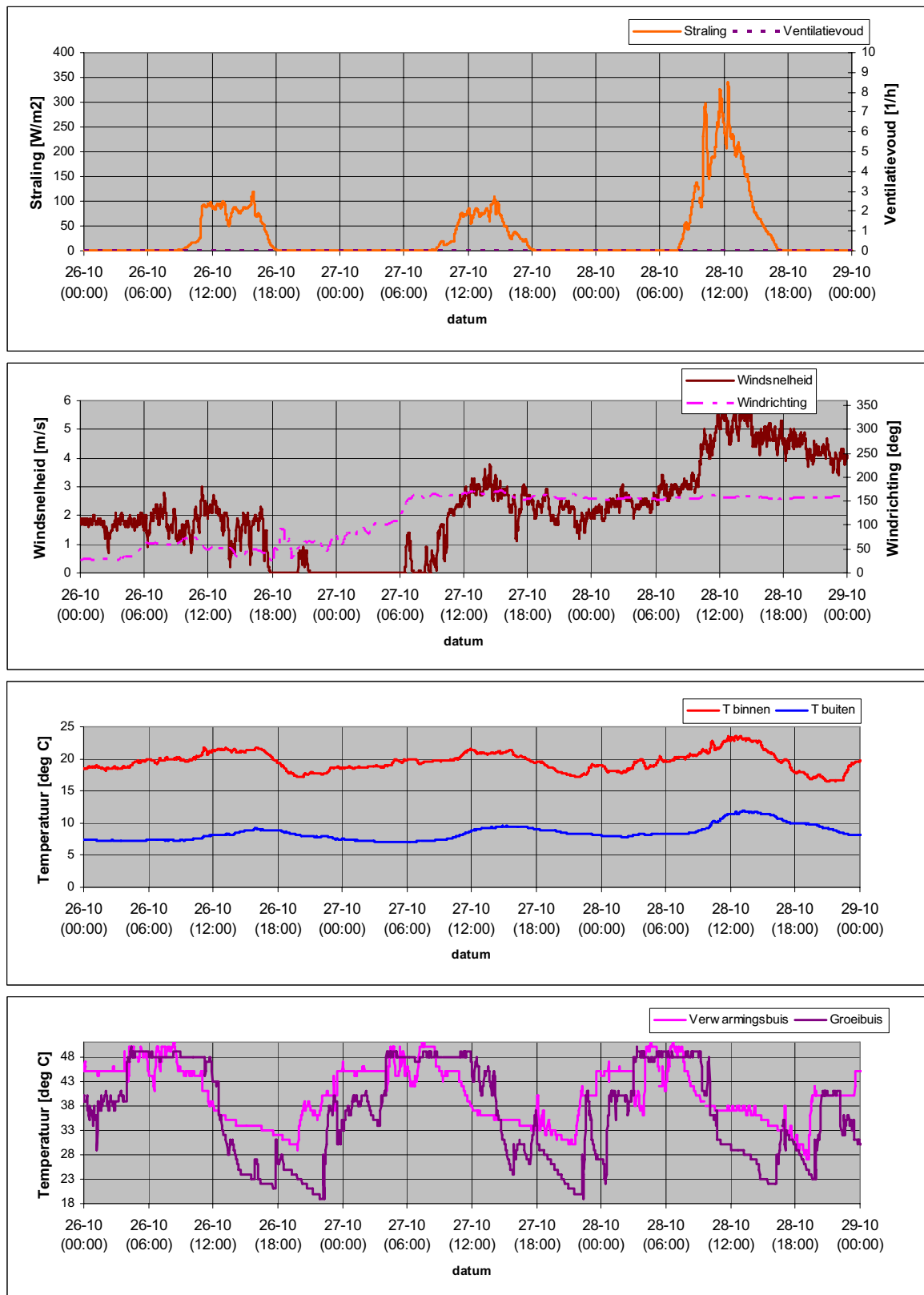
Figuur 43. Lay-out van de meetopstelling in proef 3, bovenaanzicht (links) en zijaanzicht van één rij (rechts).



Figuur 44. Lay-out van de meetopstelling in proef 3. De verticale lijntjes geven de posities van de meetstokken weer (zie ook Figuur 23); de nummers verwijzen naar de paden zoals ook aangegeven in Bijlage I en Figuur 24).

Klimaatomstandigheden tijdens proef 3

Tijdens proef 3 zijn er dagen met weinig globale straling (maximum rond 100 W/m^2) en dagen met meer straling (met maximaal 350 W/m^2) geweest (Figuur 45). De buitentemperatuur was rond 8°C en er was weinig (26-10) tot matige wind (28-10) uit noordoost tot zuidoost. Voor de analyse is als voorbeeld het vergelijk gemaakt van een dag met weinig instraling (26-10) en een dag met meer instraling (28-10). Op alle dagen zijn de ramen dichtgehouden of op een kier gezet, de maximale raamstand overdag was op 26-10 3% aan de lijszijde en op 28-10 6%. Met de ventilatiemonitor werd op beide dagen het ventilatievoud op 0 geschat.

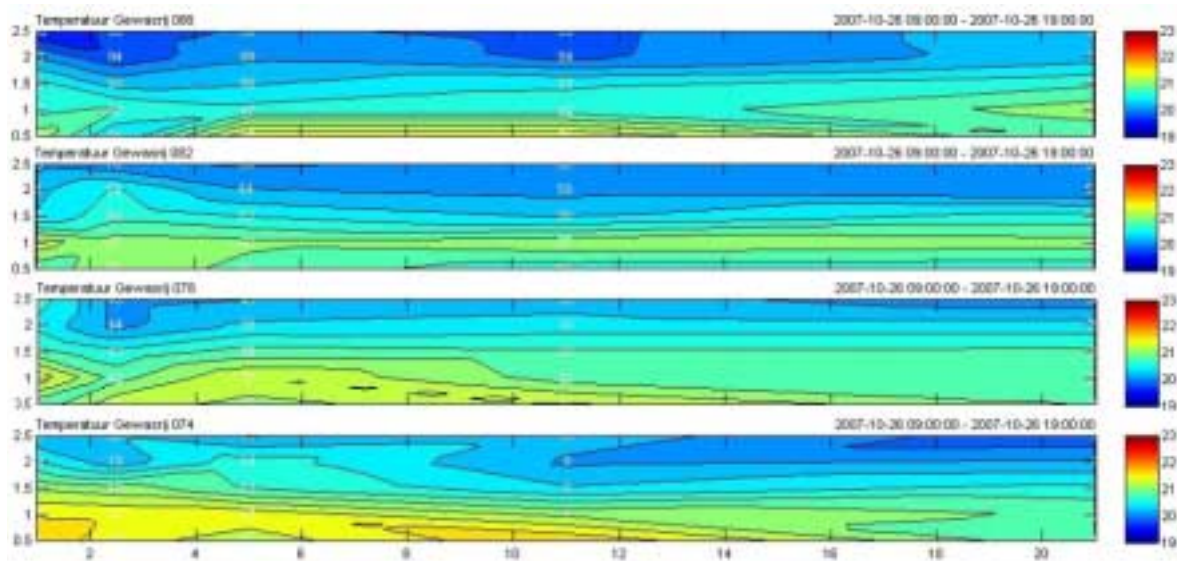


Figuur 45. Weer en Klimaatomstandigheden tijdens proef 3.

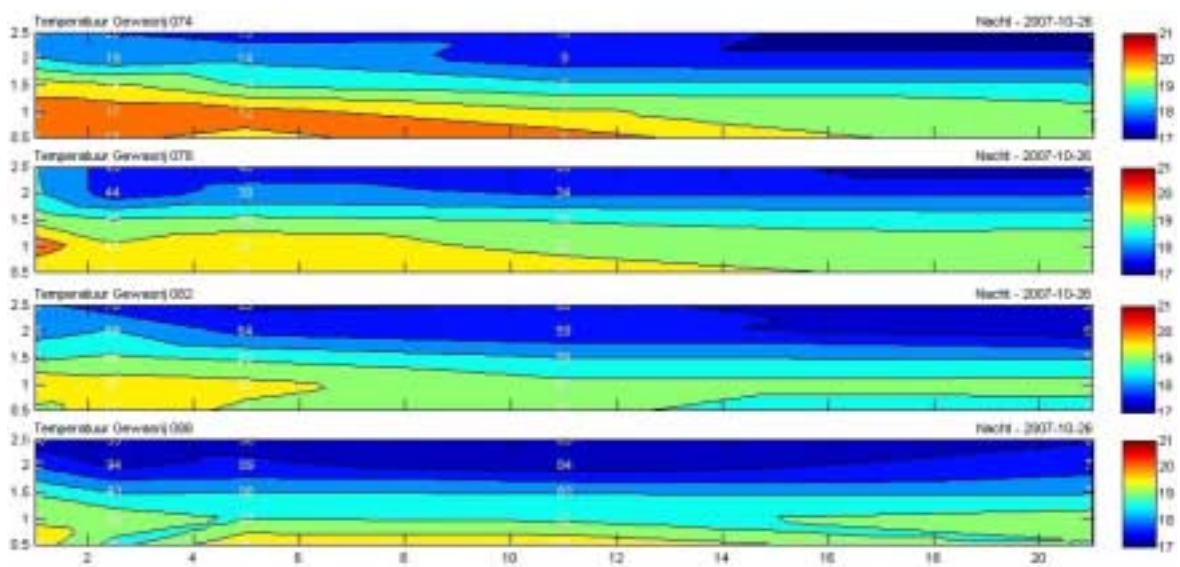
Figuur 46-49 tonen de temperatuurverdeling onderverdeeld naar de gemiddelde waarden tijdens de dagperiode (9 tot 19 uur) en de nachtperiode (19 tot 9 uur). Ieder plaatje representeert een verticaal vlak van een gewasrij (zie ook Figuur 44). Aan de linker rand van de plaatjes bevindt zich de gevel, de rechter rand komt overeen met de positie halverwege tussen gevel en middenpad.

Op de dag met weinig instraling (26-10; Figuur 28) is er zowel overdag als ook 's nachts een verticale temperatuurgradiënt, hier is het boven in het gewas kouder dan onder in het gewas. Overdag is het verschil maximaal 3 graden, in de nachtperiode loopt het verschil op tot 5 graden (Figuur 29). De warmte wordt door de verwarmingsbuizen aangevoerd. Parallel aan de gewasrijen loopt de groeibuis. Ook is er een gevelverwarming, die vooral 's nachts voor grotere verschillen zorgt en die tot 1m hoogte tot op 11m afstand van de gevel invloed heeft. In de periode van 25-10 t/m 28-10 zijn geen schermen gebruikt. Op 28-10 om 22:30 uur lag het energiescherm dicht tot de volgende ochtend ca. 11:30 uur.

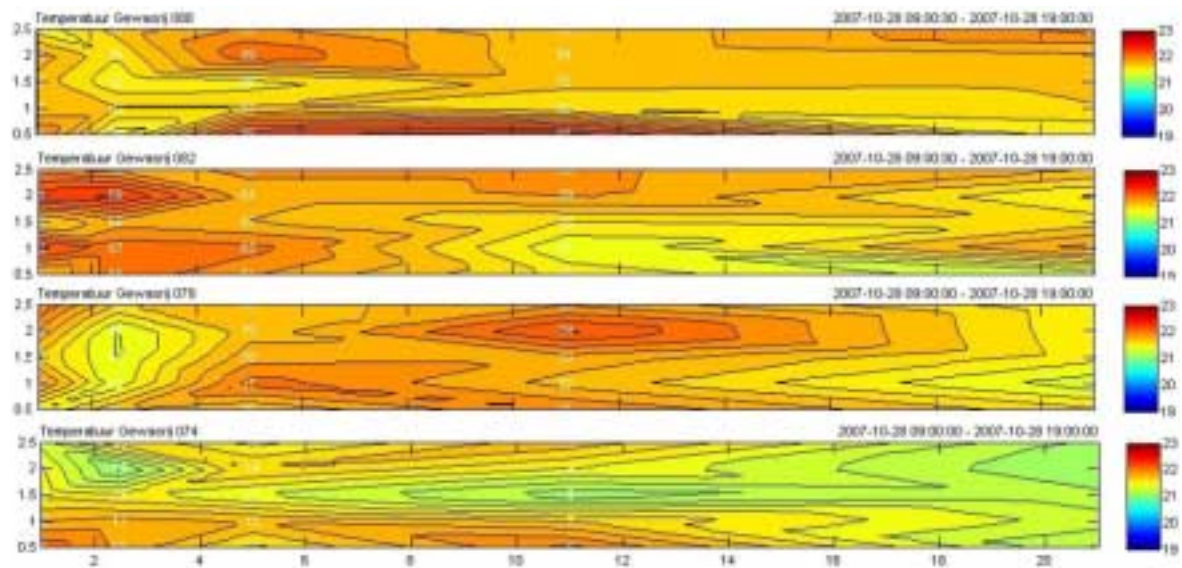
Op de dag met meer instraling (28-10; Figuur 30) is het overdag enkele graden warmer. Boven in het gewas is het nu ongeveer even warm als onder in het gewas en de temperatuurverdeling is gelijkmatiger. Het beeld in de nachtperiode (Figuur 31) is vergelijkbaar met de vorige nacht.



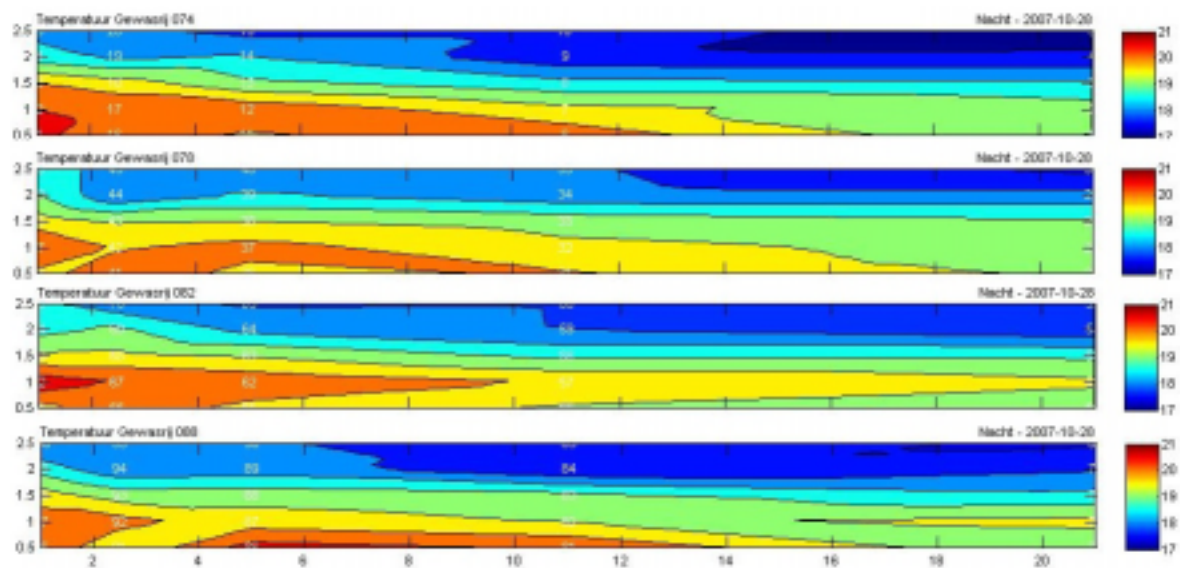
Figuur 46. 26-10 dagperiode.



Figuur 47. 26-10 nachtperiode.



Figuur 48. 28-10 dagperiode.



Figuur 49. 28-10 nachtperiode.

6 Discussie

Draadloos of bekabeld

Als de trend doorzet dat we op meer plaatsen in de kas een betrouwbare meting willen uitvoeren dan is een discussie over bekabelde of draadloze sensoren gerechtvaardigd. Nu al komen specialisten tot de conclusie dat bekabelde sensoren alleen van nut zijn als ze kunnen blijven hangen. De arbeid die nodig is voor het, frequent, verplaatsen van sensoren wordt bij gebruik van bekabelde sensoren onbetaalbaar. Bekabelde sensoren zijn voor de teler controle- of sturingsmetingen. Draadloze sensoren zijn vooral handig als ze maar een korte periode op een zelfde plaats hoeven te hangen. Dit kan het geval zijn bij onderzoek, voorlichting, het opsporen van koude en warme plekken, storingen, certificering (voor Groen Labelkas) etc.

Praktijkmetingen

Horizontale verschillen

Verschillen tussen twee buursensoren zijn momentaan onderzocht (wat is het grootste en wat het kleinste verschil tussen twee burens, zowel in X als in Y als in diagonale richting) op basis van uurgemiddelden (hoofdstuk 5.1). Er blijken verschillen tot 7°C mogelijk in deze periode. In 5.2 zijn de verschillen tussen buursensoren gedurende 9 dagen achter elkaar geanalyseerd. De momentane verschillen komen elke keer op dezelfde wijze voor waardoor de variatie in de verschillen minimaal wordt na statistische doorrekening (1-2°C verschil). De vraag ontstaat wanneer welke analysetechniek moet worden toegepast met het oog op praktijktoepassing van een meetsysteem. Analyse van momentane waarden en gemiddelde waarden zijn aanvullend. Het vergelijken van momentane temperaturen, alhoewel op basis van uurgemiddelden, berekend van 1-minuut waarnemingen, waardoor toch een zekere afvlakking ontstaat, levert inzicht in verschillen tussen uitersten. In sommige uren kan het oplopen tot 7°C verschil tussen twee buursensoren, gemiddeld is het verschil minder dan 1°C. Bij de statistische analyse van 9 achtereenvolgende dagen blijkt meer het temperatuurintegratie-effect. Verschillen worden kleiner, het geeft een duidelijk beeld waar voor de plant koude en warme plekken bestaan. Waarschijnlijk is onderscheid tussen een dag en een nachtperiode zinvol, omdat dan beter onderscheid kan worden gemaakt tussen zon- en stookinvloed. Het gemiddelde beeld (Figuur 36) is bij analyse van afzonderlijke dagen soms te zien maar vaak ook niet. Soms zijn de verschillen ook in uurgemiddelde-grafieken al goed te zien. Betrouwbaar wordt het pas bij een langere aaneengesloten periode.

Aangezien er in deze periode een aanzienlijk verschil tussen buiten- en binnentemperatuur was, lag het scherm 's nachts dicht en is er gestookt. In hoeverre het ontstane beeld verandert door te meten in de winter is onbekend. In de zomer zal het zeker veranderen omdat de stookinvloed dan nihil is. Of dit invloed heeft op het minimaal aantal in te zetten sensoren is nog onbekend. Uiteindelijk levert dit de variatie binnen een bedrijf veroorzaakt door weersinvloeden bij een gegeven verwarmingssysteem. Op een ander bedrijf met een ander verwarmingssysteem kunnen de verschillen anders zijn. Hoeveel anders is nu niet te zeggen. Daarnaast kunnen andere factoren van invloed zijn op het totale beeld: type kas, gewas, lampen, scherm, ventilatie.

In deze analyse is vooral gefocust op temperatuur. De relatieve vochtigheid wordt beïnvloed door de temperatuur en verschillen worden uitvergroot. 1°C temperatuurverschil veroorzaakt al gauw 7-10% vochtverschil. Patronen in RV zijn nog onduidelijk.

Verticale verschillen

Een temperatuurgradiënt van 5°C in de nacht bij een gesloten scherm ontstaat als gestookt moet worden. De gevel (verwarming) heeft hierbij een accumulerend effect waardoor temperatuurverschillen onderin de kas (1m) en op 10 van de gevel zichtbaar worden. Meer naar het middenpad worden de verschillen kleiner. Overdag zijn de verschillen tussen onder en boven kleiner door de straling. Op bewolkte dagen 3°C verschil, op zonnige dagen geen verschillen tussen onder en boven in de kas.

Energie

Uit de in dit onderzoek uitgevoerde metingen komt nog niet direct een recept naar voren om energie te besparen, hetgeen ook niet verwacht mocht worden omdat het een faciliterend meetsysteem is. Dit heeft enerzijds te maken met het feit dat op één bedrijf is gemeten in één seizoen en anderzijds omdat de interpretatie van alle temperatuurverschillen nog niet vastligt. Met dit draadloze meetsysteem bestaande uit commercieel verkrijgbare componenten hebben we een instrument in handen waarmee uitgebreider op een of meerdere bedrijven kan worden gemeten. Het is geschikt voor temperatuur en relatieve vochtigheidsmetingen, maar niet voor CO₂. Voor de laatste is draadloze meetapparatuur nog niet geschikt. Het aantal sensoren per ha hoeft geen 100 te zijn. Om inzicht in de problematiek te krijgen zijn ca. 100 sensoren wel ideaal. Voor dit bedrijf, in dit seizoen en bij deze infrastructuur is een sensorafstand van 30m geschikt om alle temperatuurverschillen te registreren. Nagegaan moet worden of in een ander seizoen, bij een ander gewas of bij een ander verwarmingssysteem andere conclusies worden getrokken.

7 Conclusies

Bekabeling of draadloos

- Bekabelde sensoren zijn alleen van nut als de nodes (eenheden bestaande uit meerdere sensoren) of sensoren gedurende lange tijd op één plaats blijven hangen. Draadloze meetsystemen zijn vooral van nut voor onderzoek, voorlichting en certificering. De energievoorziening, ziekteverspreiding en regelmatige calibratie zijn nog een punt van zorg.

CO₂ sensoren

- Randvoorwaarden voor een CO₂-sensor die toegepast wordt in de glastuinbouw:
 - kasklimaat bestendig zijn;
 - van 0 tot 2000 ppm kunnen meten;
 - een nauwkeurigheid van +/- 50 ppm;
 - eenvoudig te calibreren zijn om veroudering en of vervuiling van de sensor te compenseren;
 - te combineren met een radiomodule, zodat de sensorwaarde van de CO₂-sensor draadloos uit te lezen is bij een laag energieverbruik;
 - elektrisch aan te sluiten zijn op de radiomodule;
 - het uitgangssignaal van de sensor op te nemen zijn door de radio.
- CO₂-sensoren gemaakt met MEMS technologie zijn een veelbelovende techniek voor de toekomst maar zijn nu nog niet verkrijgbaar.
- CO₂-meting is nu nog niet geschikt voor een groot meetsysteem met veel sensoren omdat een pomp de CO₂-sensor van lucht moet voorzien waardoor veel energie nodig is dat de kostprijs erg hoog maakt. Integratie met T en RV en geforceerde ventilatie kan dit probleem oplossen.
- Al de beproefde sensoren voldoen om een juiste CO₂ meting uit te voeren maar verschillen aanzienlijk in prijs. De prijsverschillen leiden in dit geval niet tot betere prestaties.
- De kostprijs per CO₂ sensor is bij gebruik in een draadloos netwerk van sensoren nog te hoog.
- Het benodigde vermogen per CO₂ sensor is aanzienlijk en maakt het gebruik van een batterijvoeding nog niet praktisch haalbaar.
- De behuizing van CO₂ sensoren moet zo ontworpen worden dat via natuurlijke convectie de lucht in en rondom de sensor kan worden ververst zonder gebruik te hoeven maken van mechanische ventilatie.
- Met de huidige stand in CO₂ sensortechnologie is het nog niet mogelijk om een draadloos netwerk van CO₂ sensoren in te zetten in de praktijk.
- Praktisch gezien zijn CO₂ sensoren nu niet rijp voor praktijktoepassing.

Praktijkmetingen temperatuur en RV

- De componenten benodigd voor een draadloos meetsysteem voor T en RV zijn inmiddels commercieel verkrijgbaar. De componenten van de firma Wisensys die in dit onderzoek zijn gebruikt, zijn relatief goedkoop en van goede kwaliteit. Voor toepassing in de tuinbouwpraktijk moeten de nodes worden afgeschermd voor directe straling.
- De maximale afstand tussen een node en het basisstation is, door de beïnvloeding in een kas van glas, metaal en planten, maximaal 60m. Bij een afstand van meer dan 60-70m is het zendresultaat vaak minder dan 100%. Het plaatsen van het basisstation net onder de goot heeft een positief effect op het zendresultaat.
- Transport van data tussen het basisstation en een PC kan het beste plaatsvinden via een RS485 kabel. Bij kleine afstanden (20-50m) voldoet een RS232 uitgang nog wel, hoewel gevoelig voor storingen (radio, draaiende motoren). De baudrate is wel aan te passen, maar kan gaan conflicteren met de totale hoeveelheid te versturen data waardoor binnen het meetinterval van 1 minuut nog niet alle data zijn verstuurd.
- Met nodes hangend in een grid van 10x24m zijn data verzameld:
 - Technisch werkte het meetsysteem in deze periode zonder problemen. Verhangen van de nodes was snel en eenvoudig uitvoerbaar.

- Op basis van uurgemiddelden, verschillen twee buursensoren maximaal 7°C op hetzelfde moment, het gemiddelde verschil bedroeg op het zelfde moment 0,75°C;
- Op basis van uurgemiddelde is het maximale verschil tussen de 100 sensoren op hetzelfde moment 9°C en het minimale verschil 1,5 bij een gemiddeld verschil van 3,8°C;
- In een rustige periode met weinig straling en weinig open ramen is het uurgemiddelde verschil tussen twee buursensoren 2-3°C. In een periode met veel straling en veel open ramen loopt dit verschil tussen buursensoren op naar 5-7°C.
- Bovenstaande conclusies geven aan dat lokaal het klimaat sterk kan verschillen.
- Statistische analyse van de meetdata leverde de volgende conclusies:
 - De minimale meetonnauwkeurigheid bedraagt 1,1°C en wordt voornamelijk veroorzaakt door de wisselingen per uur van de dag (regeling op dag/nacht, zon/wolken invloed) en de locatie in de kas.
 - De meetonnauwkeurigheid verschilt met de afstand tussen de sensoren, minimaal 1,1°C als de sensoren tegen elkaar hangen en maximaal 1,5°C op 33m afstand. Als de afstand tussen twee sensoren groter dan 33m wordt, ontstaat het risico dat niet alle 'verschijnselen' (koude of warme plekken) worden gemeten. Per ha zouden dan minimaal 9 sensoren nodig zijn.
 - Meestal is de gevel en het middenpad iets warmer dan het tussenliggende gedeelte. In deze specifieke kas met halverwege een aftakking van de aanvoerbuizen van het verwarmingssysteem, ontstaan vier vakken.
 - Het verwarmingssysteem op dit bedrijf is goed aangelegd en er zijn geen storingen die voor grote temperatuurproblemen zorgen. Middenpad en buitengevels worden slechts incidenteel zichtbaar.
 - Een intensiever grid van sensoren levert momentaan geen extra informatie op. Verschillen in figuren zijn vooral weersafhankelijk.
 - Op een dag met weinig instraling waren de ramen gesloten en was er overdag een verticale gradiënt van 3°C en 's nachts van 5°C waarbij het onder in het gewas warmer is door aanvoer via de verwarming.
 - Op een dag met veel instraling was er overdag geen verticale gradiënt. In de nacht ontstaat weer een gradiënt van 5°C door de verwarming.
 - De statistische analyse geeft aan dat ondanks de eerder geconstateerde grote verschillen in lokaal klimaat er slechts een geringe spreiding in het meetsysteem zit als voldoende lang wordt gemeten (voldoende is voorlopig ca. 8-10 dagen).

Eindconclusies

- Een draadloos meetsysteem, in een commerciële uitvoering, is goed (nauwkeurig, zonder dataverlies) in staat de ruimtelijke verdeling van temperatuur en relatieve vochtigheid inzichtelijk te maken. Een eerste indicatie geeft aan dat minimaal 9 sensoren in één horizontaal vlak per ha nodig zijn.
- Uitwerking van data en presentatie van gegevens vragen nog nadere onderbouwing. Zowel de analysemethode van de meetdata als de hoeveelheid sensoren in afhankelijkheid van de bedrijfssituatie (gewas, seizoen, verwarmingssysteem) is voor één specifieke situatie vastgelegd. Veralgemeinering kan nu nog niet.
- De variatie in horizontale verschillen is per dag of nacht zodanig dat hiermee geen uitspraak kan worden gedaan over de gelijkmatigheid van de temperatuur in een kas. Hiervoor moet een gemiddelde over ten minste enkele dagen (7-10 dagen) worden genomen. Gemiddelde horizontale verschillen bedragen 1-2°C in deze kas in dit seizoen, momentane verschillen variëren tussen 1 en 7°C tussen buursensoren.
- Variatie in verticale temperatuurverschillen is vooral groot (tot ca. 5°C) als er wordt gestookt.
- Het is nu nog niet praktisch mogelijk om een vergelijkbaar meetsysteem voor CO₂ op te zetten.
- Horizontale verschillen in temperatuur en luchtvochtigheid in een kas zijn met commercieel verkrijgbare apparatuur te meten. Interpretatie van de meetdata vergt uitgebreider onderzoek, omdat nu maar één specifieke situatie is vastgelegd. Indien geen randvoorwaarden aan de interpretatie worden gesteld zijn alle uitspraken mogelijk.
- Het hoofddoel van het project, de ontwikkeling van een goedkoop en eenvoudig inzetbaar meetsysteem om horizontale en verticale verschillen in temperatuur en luchtvochtigheid on-line te meten, is gedeeltelijk gerealiseerd. Technisch zijn grote stappen gemaakt (commerciële meetsystemen zijn beschikbaar). Interpretatie van meetdata en bepaling van randvoorwaarden zijn nog niet uitontwikkeld en dus niet verkrijgbaar.

8 Literatuur

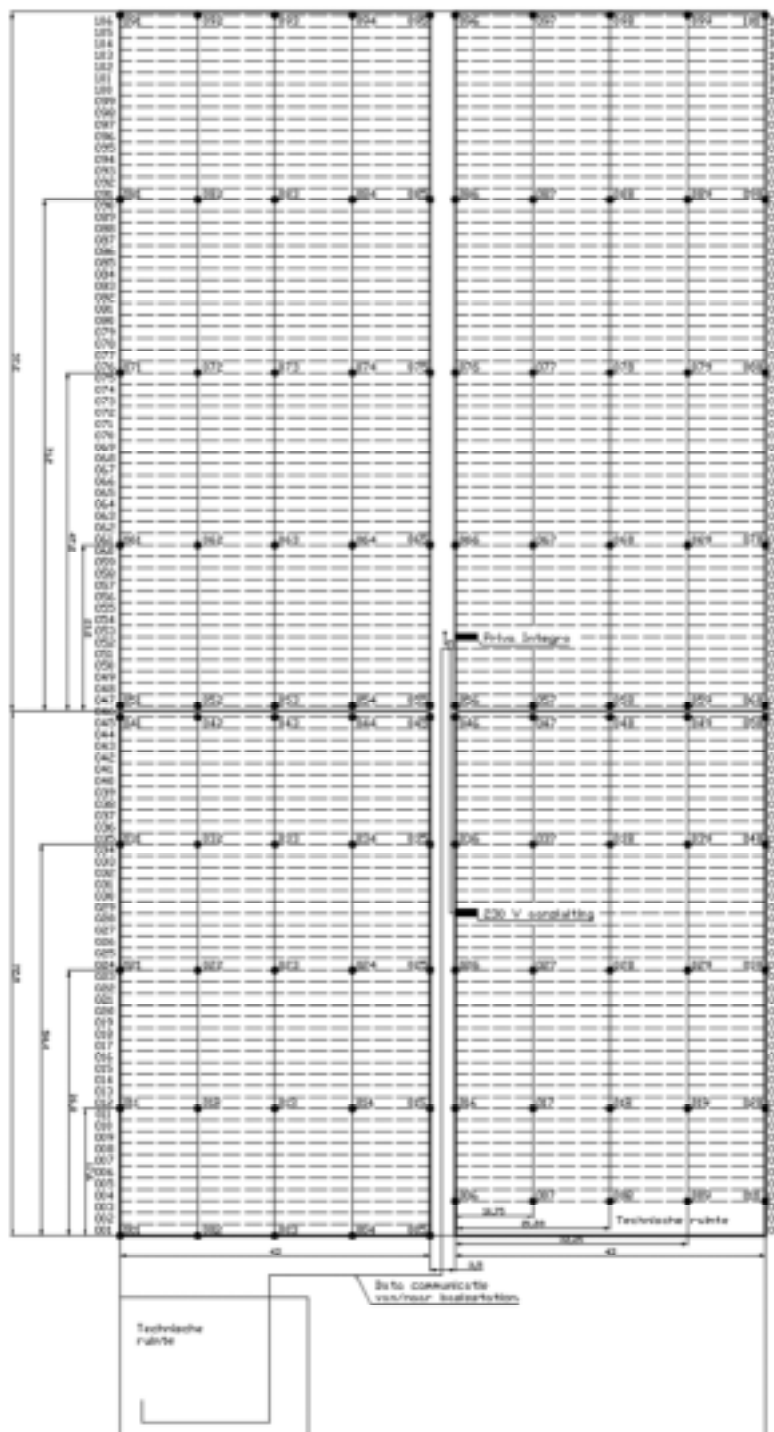
- Arkesteijn, M. & J. Bontsema, 2005.
Met een 'meter voor ventilatievoud' tot 10% energie te besparen. Onder Glas, Jaargang 2, nr. 12, december 2005.
- Bontsema, J., J. Hemming, C. Stanghellini, P. de Visser, E.J. van Henten, J. Budding, T. Rieswijk & S. Nieboer.
On-line estimation of transpiration in greenhouse horticulture. Proceedings 2nd IFAC International Conference on Modelling and Design of Control Systems in Agriculture, Agricontrol 2007, Osijek, Croatia, 3-5 September 2007, p. 29-34.
- Bontsema, J., J. Hemming, C. Stanghellini, P.H.B. de Visser, E.J. van Henten, J. Budding, T. Rieswijk & S. Nieboer, 2007.
On-line monitor van transpiratie en fotosyntheseactiviteit. Wageningen, Wageningen UR, Glastuinbouw, Nota 451, 40 p..
- Bontsema, J.; E.J. van Henten, J.G. Kornet, J. Budding & Th. Rieswijk, 2005.
On-line estimation of the ventillation rate of greenhouses. In: Proceedings of the 16th IFAC World Congress, Praag, 3-8 July 2005. - Praag : IFAC, - p. 6. 16th IFAC Worldcongress, 2005-07-03/2005-07-08.
- Campen, J.B. & A. de Gelder, 2007.
Horizontale variatie. Wageningen : Plant Research International, Rapport 131, 16 p.
- Esmeijer, M. & R. Tuin, 2001.
Het kan vriezen, het kan dooien, horizontale temperatuurverdeling in kassen kan nog een stuk beter. Vakblad voor de Bloemisterij 3, 2001, pp. 42-43.
- Greenwald, A.C., 2005.
Mems chip CO₂ sensor for building systems integration. Internet:
<http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/860161-UpDeA3/860161.PDF>.
- Henten, E.J. van, J. Bontsema, J.G. Kornet & J. Hemming, 2006.
On-line schatting van het ventilatievoud van kassen. Wageningen, Plant Research International, p. 60.
<http://www.citytech.com/>
<http://www.edinst.com/irmodule.htm>
http://www.futurlec.com/Gas_Sensors.shtml
http://www.gesensing.com/products/telaireoem.htm?bc=bc_ge_telaire
<http://www.vaisala.com/businessareas/instruments/products/carbondioxide/gmm111>
- Kempkes, F.L.K., N.J. van de Braak & C.M.J. Bloemhard, 1999.
Effecten van buisligging bij de teelt van chrysanten, onderzoek naar verticale temperatuur- en vochtverschillen, energiegebruik en groei. PBG rapport 238, 1999.
- Medema, D. & J. Bontsema, 2007.
Ventilatiemonitor kan 10% energie besparen, Vakblad voor de bloemisterij, nummer 2, 2007, p. 38-39
- Nijs, L., 1997.
Handleiding voor het opsporen en oplossen horizontale klimaatverschillen. PPO Glas (PBG), Naaldwijk, rapport 112, 32 p.
- Schaik, W.H.J. van & M.L.H. Schevers, 2003.
Ruimtelijke Temperatuurmeter in kassen met ClimaView™, Innovations Handling, Eindhoven, 2003.
- Tuijl, B. van, H. Janssen & E.A. van Os, 2006.
Microklimaat meten gerberaplant t.b.v. parapluplan gerbera. Beslisdocument fase A0, 38 p. (in druk).
- Van Os, E.A., M.A. Bruins & B.A.J. van Tuijl, 2006.
Meting van ruimtelijke verdeling van temperatuur en RV met behulp van draadloze minisensoren (Smart Dust). Wageningen, PRI rapport 126, 33 p.

Bijlage I.

Plaatsing van de sensoren bij de drie proeven

Proef 1:
Ruimtelijke verdeling

Noord

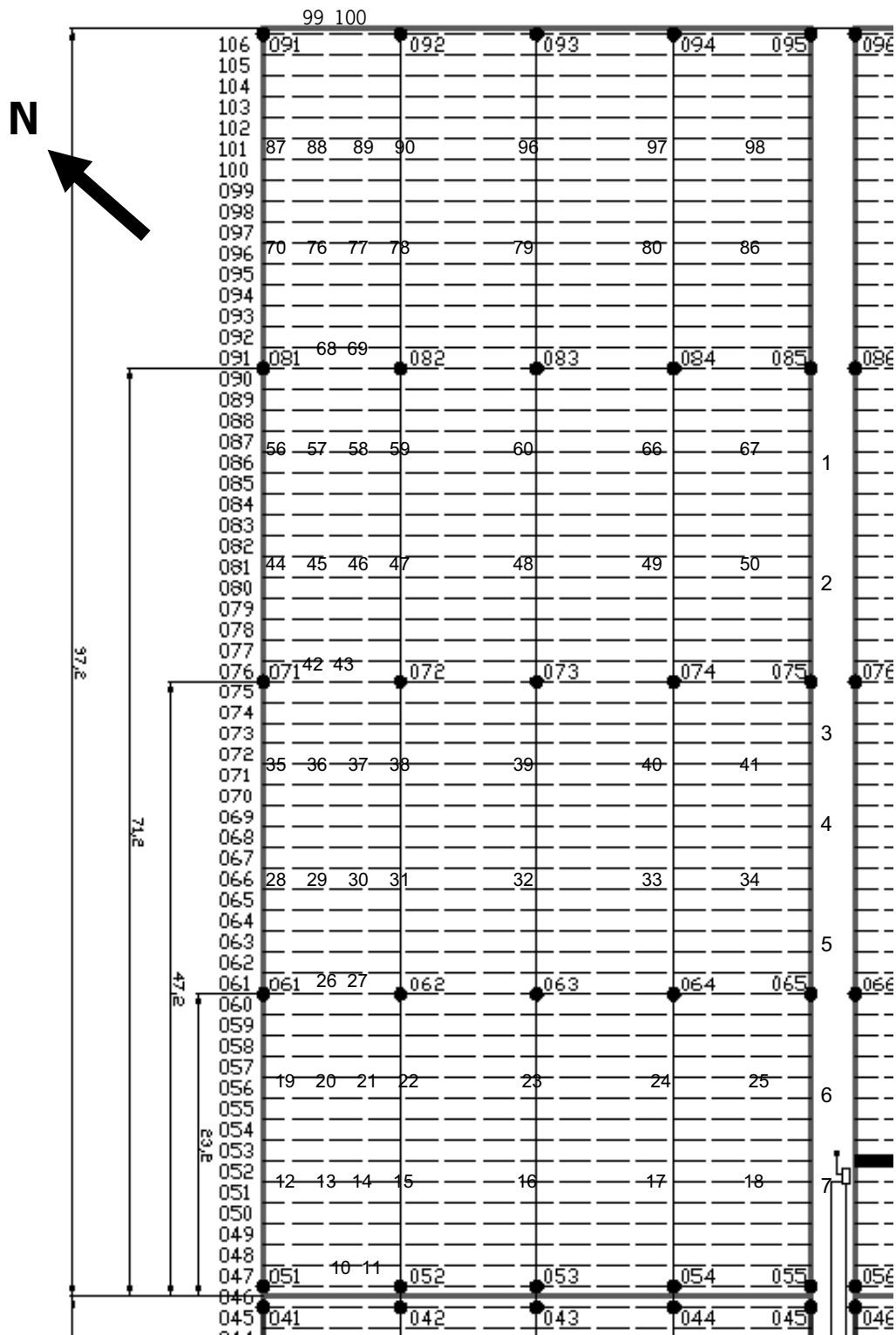
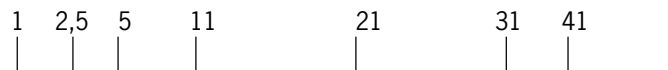


I - 2

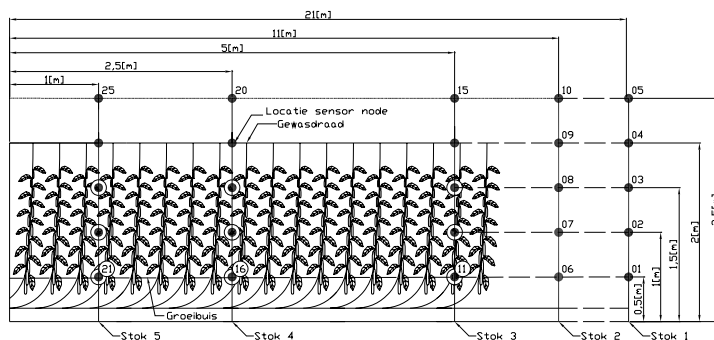
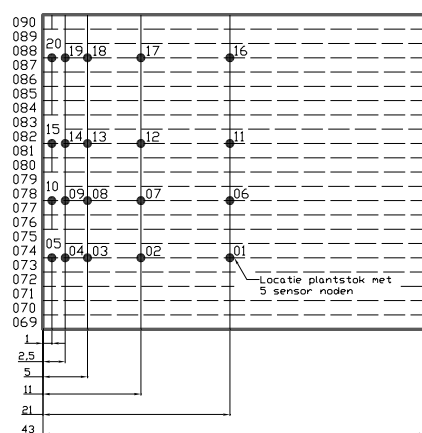
Proef 2:

In noord-west hoek kas

Horizontale verdeling in m:



Proef 3:
Lay-out



Bijlage II.

Statistische analyse proef 1

Deze bijlage bevat de statistische rapportage van Paul Keizer (afd. Biometris) van een deel van de meetdata van proef 1.

Dataset: Temperatuur in °C, September 2007 1 uurs gemiddelden, uit een rechthoekige kas van 90 bij 170 meter, gemeten in een grid van 100 sensoren.

Vraagstelling: Wat is de variatie in de gemeten temperatuur, gegeven de sensordichtheid in een specifieke kas?

Hiervan afgeleid:

Wat is de lokale variatie en hoe groot zijn de verschillen tussen locaties in een kas?

Kan een verschil van meer dan één graad gedetecteerd worden met het gegeven meetnet? Zo ja, kan met minder sensoren volstaan worden? Liefst verschillende scenario's?

Variabele: Temperatuur_uurgemiddelden; op basis van actuele waarden per minuut gemeten.

Factoren: Dag, Uur, Comp, X en Y met:

Dag: aaneengesloten subset van 9 september-dagen

Uur: 24 gemiddelde-uurwaarnemingen

Comp: Compartiment; de vier kwadranten van de kas die in principe apart regelbaar zijn.

X: 10 afgeronde x-posities in de lengte van de kas (niet volledig equidistant (=gelijke x-afstand)). Gemiddeld op 25 meter afstand (behalve positie 5 en 6 op 1 meter)

Y: 10 afgeronde y-posities in de breedte van de kas (niet volledig equidistant). Gemiddeld op 10 meter afstand (behalve positie 5 en 6 op 5 meter)

Globale en specifieke aspecten van de dataset

Er zijn een aantal dagen, uren en twee sensoren waar geen waarnemingen van zijn. Hoewel het voor de analyse in principe niet uitmaakt is er voor gekozen om een zo volledig mogelijke subset van de data te nemen en die te complementeren voor de twee sensoren. Met behulp van een volledig fixed Anova-model met interacties, tot op drieweg niveau, zijn de missende waarden geschat. Deze beïnvloeden de verdere analyses niet, maar de gemiddelden tabellen zijn nu compleet voor de missende sensoren en kunnen grafisch worden weergegeven.

Figuur 1 geeft de gemiddelde temperatuur weer van de geselecteerde periode uit september. In de twee begeleidende grafieken is het verloop van de gemiddelde temperatuur over deze dagen weergegeven en het dag-nacht ritme voor de gemiddelde temperatuur over uren.

De representatie is niet geometrisch correct omdat het grid equidistant is genomen, dit geldt ook voor de Figuren 3, 4 en 5. In Figuur 2 zijn de sensorposities wel correct weergegeven met diens nummer. De oorsprong (nulpunt) is links onder en correspondeert met Noord-West. De Zuidzijde van de kas heeft een aansluitende technische ruimte. Met de 4 in de kas aanwezige open compartimenten is niet direct rekening gehouden omdat de factoren X en Y dit afdekken. Er is wel gekeken naar het effect van deze component in de ruimtelijke analyses maar het effect is veel kleiner dan die van X en Y.

Analyse aanpak

Er zijn vier verschillende modellen toegepast:

- Variantie componenten: geeft inzicht in de bijdrage van iedere factor of factorcombinatie in de uiteindelijke gemeten variatie.
- Fixed model: opdelen van een rechthoekige kas in rijen, kolommen en specifieke plekken. De restvariatie geeft dan de meetnauwkeurigheid weer.

- Mixed model die in het random deel de correlatie tussen ruimtelijk factoren expliciet modelleert en daar een betere schatting van kan geven.
- Geostatistische met Kriging voor interpolatie van uitsluitend het ruimtelijke deel van de variatie in de dataset.

Hiermee kan zowel een geïnterpoleerde patroon van het temperatuursverloop in de kas gemaakt worden, als een geïnterpoleerd patroon van de variatie.

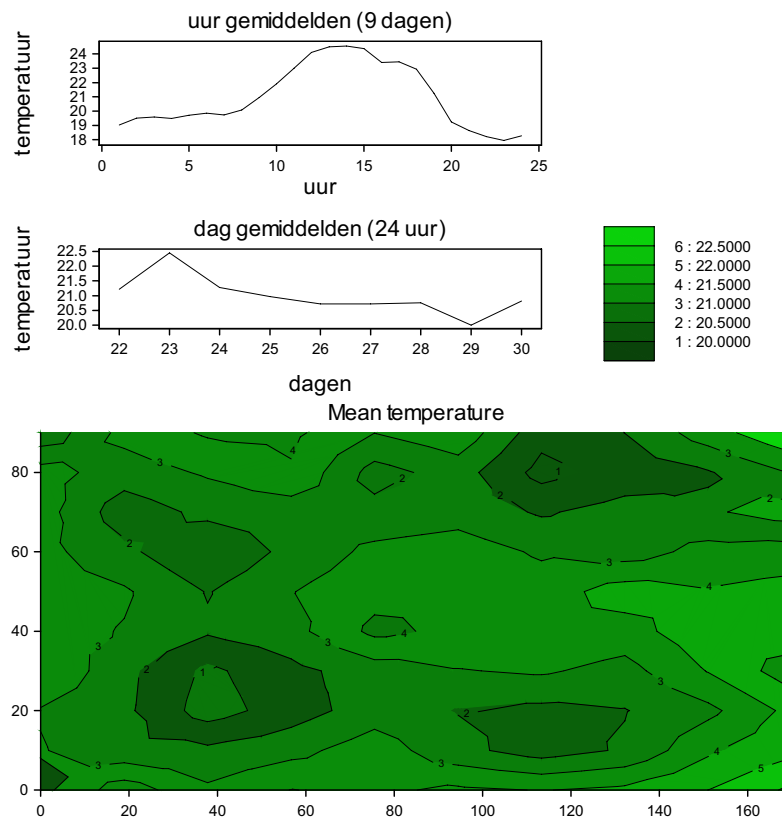


Figure II-1. Gemiddelde temperatuur in $^{\circ}\text{C}$: Boven; uurgemiddelden over 9 dagen, Midden; daggemiddelden over 24 uur in september, Onder; kas gemiddelden over dagen en uren.

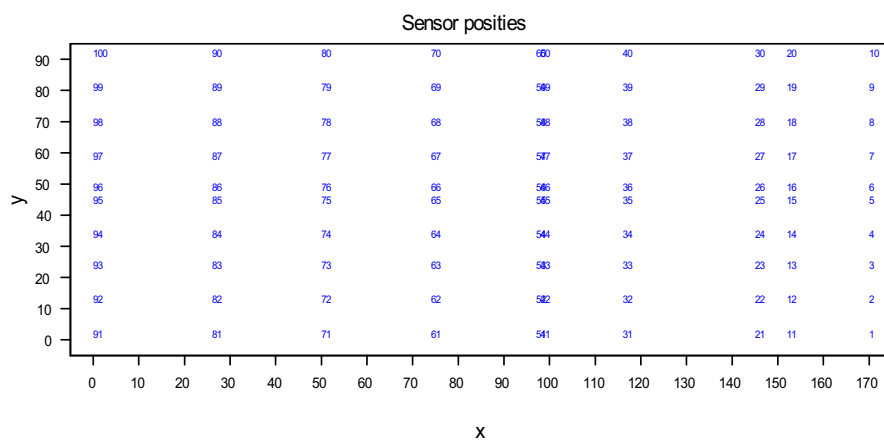


Figure II-2. Sensor posities in de kas.

Varantie-componenten

Om een indruk te krijgen hoe de verschillende bronnen van variatie zich verhouden tot elkaar, is een volledig random model gebruikt (Tabel 1). Hier wordt dus geen rekening gehouden met de structuur in de data en gaat er van uit dat alles onafhankelijk is.

Variantie-componenten zijn onderling vergelijkbaar, het geeft de mate van variatie weer die is toe te schrijven iedere factor of factor-combinatie die hoort bij de metingen van een sensor. De rest-variantie is een schatting van de meetfout van het gegeven systeem in de geselecteerde periode. Voor Tabel 1 is slechts een reeks van 5 aaneengesloten dagen gebruikt omdat anders de rekentijd te veel opliep. In volgorde van belangrijkheid zien we in Tabel 1 dat de factor **Uur** en factor **Dag.Uur** de grootste variatie vertonen. Dit spreekt voor zich, het dag-nacht uur-ritme is het meest variabel omdat dit niet volledig wordt weggeregeld. De verschillen tussen de dagen, met name in buitentemperatuur en zonneschijn dragen aan deze variatie bij. Hierna komen de ruimtelijke interactie-component, de factor **X.Y**, gevolgd door respectievelijk de factor **Y** en de factor **X**. Dit geeft aan dat er naar verhouding meer locale variatie is dan globale rij en kolom variatie. Wat ook opvalt, is dat er wat meer variatie zit in de y-component, in de breedte van de kas, met maar 10 meter afstand ten opzichte van de x-component, met 25 meter afstand tussen de sensoren. De andere interacties tussen de componenten zijn klein in verhouding met de restvariantie. De restvariantie geeft aan dat we verschillen van $\pm 0.65\text{ }^{\circ}\text{C}$ [$= 2 \cdot \sqrt{(0,101)}$] niet kunnen detecteren met de sensor. Dit is de absoluut basale onnauwkeurigheid van het systeem. Omdat dit ruim boven de nauwkeurigheid van de sensor zelf uitgaat ($\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$) zijn hier de luchtstroom, schaduw, vocht, gewas etc. verantwoordelijk voor, die kunnen per dag, uur en plaats variëren.

In de praktijk zal echter een aantal van de andere variantiecomponenten bijdragen aan de restvariantie omdat ze niet te voorspellen zijn. Alleen voor varianties met een duidelijke ruimtelijke component kunnen we met de inrichting van het grid van sensoren compenseren. De feitelijke restvariantie komt hierdoor op 0.324 (Tabel 2), dit geeft een meetnauwkeurigheid van $\pm 1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ indien de waarnemingen onafhankelijk zouden zijn. De werkelijke variantie kan hoger uitvallen.

Analyse met vast ruimtelijke model

Niet alle factoren zijn echter random en onafhankelijk. Er zijn factoren of factorcombinaties die dat in alle redelijkheid juist wel of niet zijn. De factor Dag is in principe een random factor die we niet in de hand hebben. Anderzijds wordt door de regeling in de kas getracht de dagen zo constant mogelijk te houden. We zien dit terug als een relatief kleine variantie component en beschouwen deze door de regeling als fixed. Zoals opgemerkt bij de variantie componenten voor Uur en Dag.Uur is dit patroon vrij vast, zeker over een relatief korte periode, en beschouwen deze als fixed. Het X-Y-grid van de sensoren geeft waarnemingen die gecorreleerd zijn afhankelijk van de afstand. De vorm en constructie van de kas zijn hier mede bepalend. Zoals opgemerkt de hogere orde interactie-componenten met X en Y zijn relatief klein en komen bij de restvariantie. Als we de rechthoekige structuur van de kas als leidraad nemen is een model met rijen en kolommen voor de hand liggend. In Figuur 3 is het resultaat weergegeven van een fixed model met rij en kolom structuur (Fixed model: $\text{Dag} \cdot \text{Uur} + X + Y$). Hierin zijn duidelijk de kwadranten zichtbaar (centrale pijpleidingen vanuit de zuidelijke technische ruimte met uitsplitsing op 100 meter) en het gemiddelde effect van de zuid- en westzijde (zon en technische ruimte). De vaste temperatuurverschillen die een gevolg zijn van deze structuur bedraagt rond de 2 graden. De afwijkingen van dit model met de data kan verder opgesplitst worden in een locatie specifiek deel van de kas (X.Y interactie = sensor positie) en een rest. Dit additieve deel komt boven op de rij en kolom structuur en is weergegeven in Figuur 4 en het laat zien dat er locale effecten zijn van $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. De niet door het model verklaarde residuele variantie, die overblijft van de data, is als standaarddeviatie weergegeven in Figuur 5. Variatie in de grootte van de standaarddeviatie laat zien dat deze rest niet overal gelijk is, minimaal $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ en maximaal $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ bedraagt. Dit is een onderschatting, op basis van onafhankelijkheid.

Tabel II-1. Compleet random model voor 5 aaneengesloten dagen in september 2007.

REML variance components analysis

Response variate: temp
 Fixed model: constant
 Random model: fdag + fuur + fx + fy + fdag.fuur + fdag.fx + fdag.fy + fuur.fx + fuur.fy + fx.fy
 + fdag.fuur.fx + fdag.fuur.fy + fdag.fx.fy + fuur.fx.fy
 Number of units: 12000

Residual term has been added to model

Sparse algorithm with AI optimisation

Estimated variance components

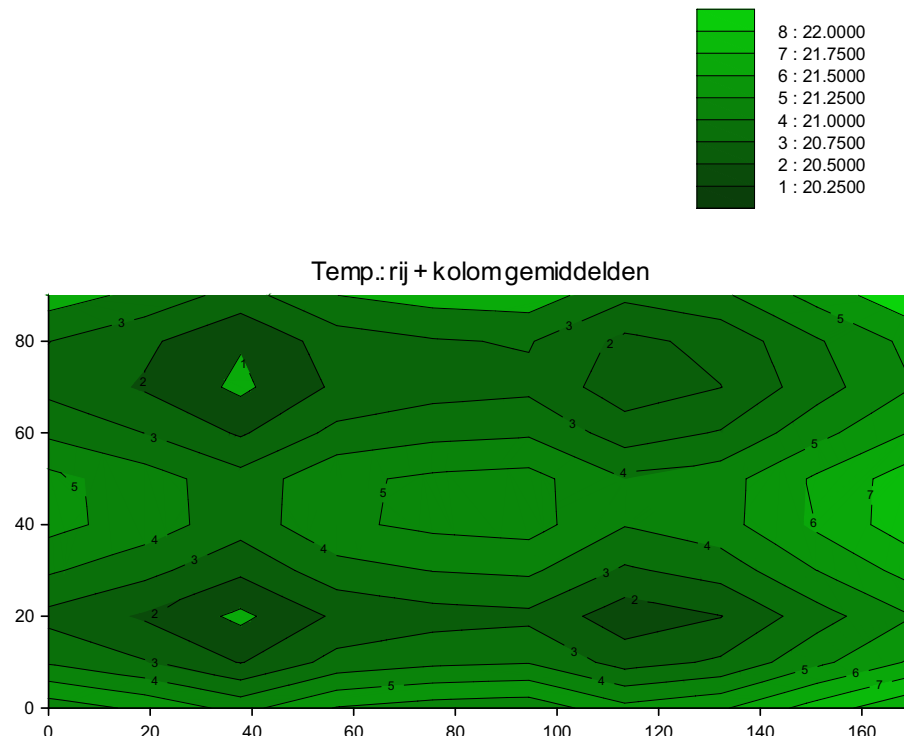
Random term	component	s.e.
fdag	0.0692	0.0802
fuur	3.9644	1.2306
fx	0.0697	0.0429
fy	0.0919	0.0527
fdag.fuur	1.0013	0.1490
fdag.fx	0.0102	0.0035
fdag.fy	0.0046	0.0020
fuur.fx	0.0237	0.0040
fuur.fy	0.0253	0.0038
fx.fy	0.1693	0.0277
fdag.fuur.fx	0.0484	0.0029
fdag.fuur.fy	0.0321	0.0021
fdag.fx.fy	0.0199	0.0019
fuur.fx.fy	0.0477	0.0022

Residual variance model

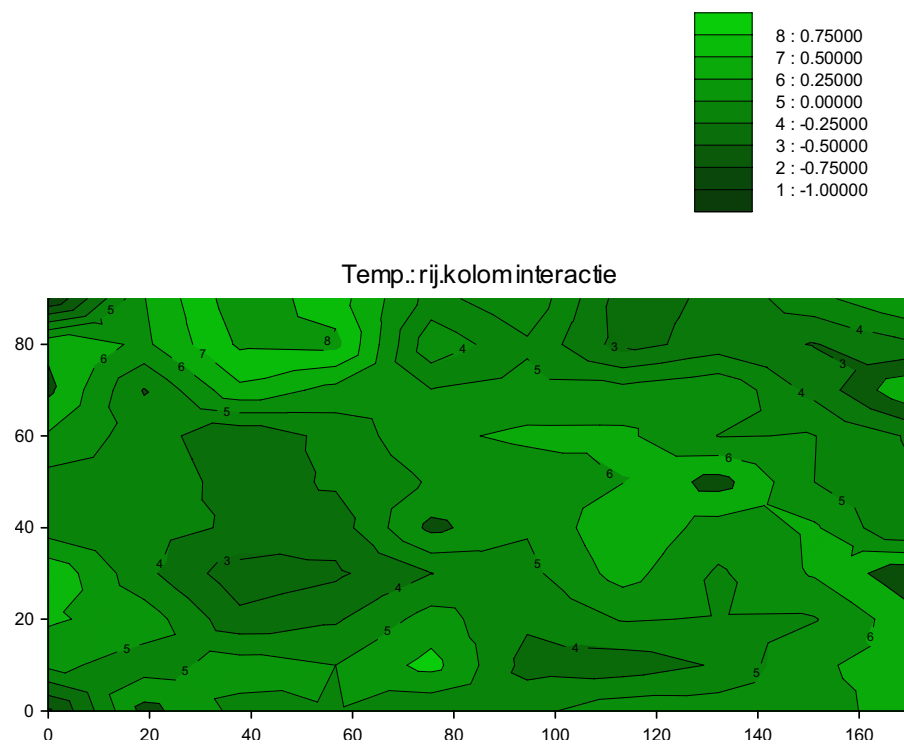
Term	Factor	Model(order)	Parameter	Estimate	s.e.
Residual		Identity	Sigma2	0.101	0.0016

Table of predicted means for Constant

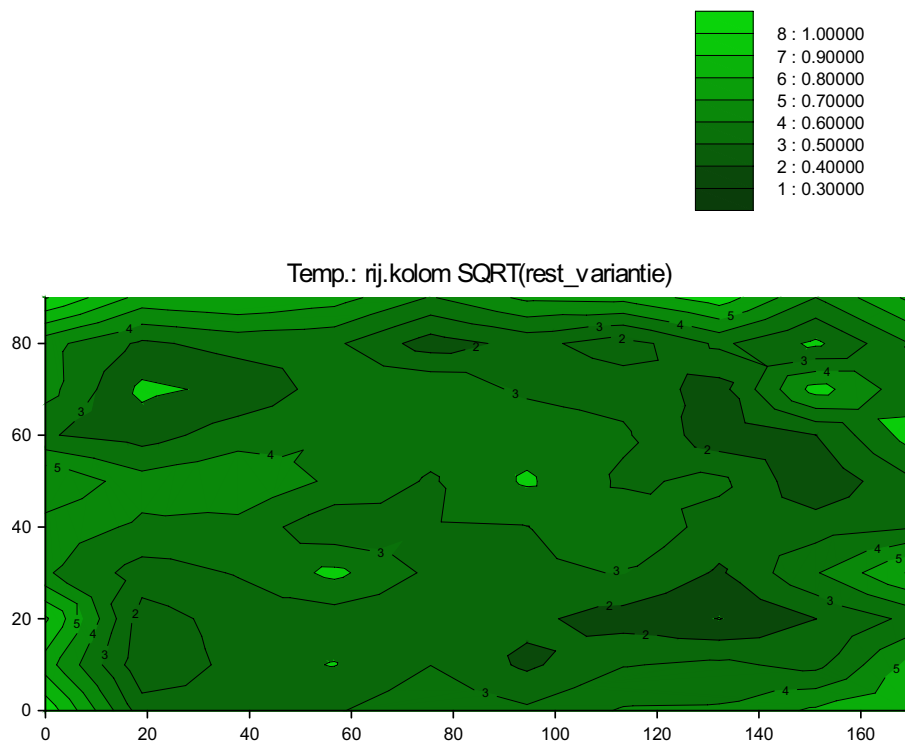
20.61 Standard error: 0.454



Figuur II-3. Rij en Kolom gemiddelden met een Fixed model.



Figuur II-4. Rij.Kolom interactie. Deze komt boven op het Rij en Kolom effect (Figuur II-3).



Figuur II-5. De rest variantie als standaard deviatie weergegeven. Dit geeft ruimtelijke variatie weer in de meeton nauwkeurigheid.

Analyse met een fixed en ruimtelijk random model

De correlatie ten gevolge van de ruimtelijke afstand tussen de sensoren kan ook direct mee gemodelleerd worden samen met ander andere factoren (fixed en random factoren). Door de random structuur te specificeren in een gemengd model, fixed = Dag*Uur en random = X.Y met een twee dimensionale power relatie (euclidisch), kunnen we de rest variatie optimaal opsplitsen en rekening houdend met de afstand tussen de metingen.

In Tabel II-2 is het resultaat hiervan weergegeven, de rest variantie is 0.325 (vergelijkbaar met de rest van het fixed model of de som van de resterende variantiecomponenten uit het random model en diens rest). De ruimtelijke variantiecomponent is even groot (factor=1.0) voor het locatie effect (vergelijkbaar met de som van de losse variantiecomponenten van X, Y en X.Y uit het volledige random model). Het locale effect is ook hier ± 1 °C.

De variatie van Uur met locatie is ook relevant, deze beschrijft de mate waarin de locatie en tijdstip interacteren. Enerzijds is deze variatie niet bruikbaar voor sturing, maar kan invloed hebben op het meetnetwerk omdat bepaalde plaatsen in de kas meer variabel zijn dan anderen. In Tabel II-3 is in het model uitgebreid met deze interactie van locatie en uur (Random: Uur.X.Y). Hoewel klein ($0.63 \cdot 0.221$) geeft dit een extra uur.locatie specifieke effect van ± 0.75 °C naast het locale effect van ± 1.1 °C, de meeton nauwkeurigheid daalt dan tot ± 0.9 °C. Dit geeft aan dat er uur variaties zijn in de kas, die afhankelijk zijn van de posities waar die gemeten worden. Hiermee zou extra locatie specifiek variatie opgespoord kunnen worden tengevolge van bijvoorbeeld het dag-nacht ritme. Dit zou nadere uitwerking behoeven.

Geostatistische benadering van de ruimtelijke restvariatie met Kriging

Het gemengde model met structuur in de varianties kan nader geïnterpoleerd worden met behulp van geostatistische technieken. In een (semi-)variogram worden de varianties weergegeven afhankelijk van de onderlinge afstanden waarop deze gemeten zijn. In de bovenhelft van Figuur II-6 is dit voor de 2 hoofdrichtingen met diagonalen in de kas weergegeven. Hier is een algemeen variantie-model aan gefit. We hebben hier gekozen voor een relatief simpel 'bounded linear model'. Dit model geeft als parameters de meeton nauwkeurigheid, de extra toename in variantie op met afstand waarop deze onafhankelijk zijn en de afstand waarop dat gebeurt. Dit variantie model kan met de oorspronkelijk gemeten temperatuur gebruikt worden om tussenliggende punten te interpoleren (Kriging).

In de onder helft van Figuur II-6 zijn de geschatte temperaturen op een geometrisch correcte en geïnterpoleerde manier weergegeven. De schatting van de onnauwkeurigheid hiervan is weergegeven in Figuur II-7, het hoort bij een isotrope variantie schatting van de ruimtelijke structuur. Dit weerspiegelt duidelijk de sensordichtheid in de kas (met een extra dichtheid in de midden rij en midden kolom van de kas, zie structuur in Figuur II-2). Hier zou ook met andere scenario's de verwachte variatie berekend kunnen worden.

De parameters van het algemene model uit het variogram zijn (nugget=0.35, sill=0.24 and range=33 meter), de precieze extra variatie per meter afstand is dan ook klein ($0.24/33 = 0.007$) per meter. We kunnen ook aan het variogram zien hoe de variantie geschat wordt met afstand. Dit is feitelijk waar het om gaat als we verschillende scenario's van sensor dichtheid willen voorspellen.

*Tabel II-2. Mixed model voor 9 aaneengesloten dagen in september 2007.
Alleen random deel met ruimtelijke structuur.*

REML variance components analysis

Response variate: temp
 Fixed model: constant + fdag + fuur + fdag.fuur
 Random model: fx.fy + '*units*'
 Number of units: 21600

'*units*' used as residual term

Sparse algorithm with AI optimisation

Covariance structures defined for random model

Covariance structures defined within terms:

Term	Factor	Model	Order	No. rows
fx.fy	fx	Power - euclidean distance (+ scalar)	1	10
	fy	Power - euclidean distance	1	10

Estimated parameters for covariance models

Random term(s)	Factor	Model(order)	Parameter	Estimate	s.e.
fx.fy	fx	Power(1)	phi_1	0.9282	0.0171
			Scalar	1.0540	0.2080
	fy	Power(1)	phi_1	0.9411	0.0162

Note: the covariance matrix for each term is calculated as G or R where
 $\text{var}(y) = \text{Sigma2}(ZGZ' + R)$, i.e. relative to the residual variance, Sigma2.

Residual variance model

Term	Factor	Model(order)	Parameter	Estimate	s.e.
'*units*'	Identity		Sigma2	0.325	0.0031

*Tabel II-3. Mixed model voor 9 aaneengesloten dagen in september 2007.
Alleen random deel met ruimtelijke structuur en de interactie ervan met uur.*

REML variance components analysis

Response variate: temp
Fixed model: Constant + fuur + fdag + fuur.fdag
Random model: fx.fy + fx.fy.fuur + '*units*'
Number of units: 21600

'*units*' used as residual term

Sparse algorithm with AI optimisation

Covariance structures defined for random model

Covariance structures defined within terms:

Term	Factor	Model	Order	No. rows
fx.fy	fx	Power - euclidean distance (+ scalar)	1	10
			1	10
fx.fy.fuur	fx	Power - euclidean distance (+ scalar)	1	10
			1	10
	fy	Power - euclidean distance	1	10
			0	24
	fuur	Identity		

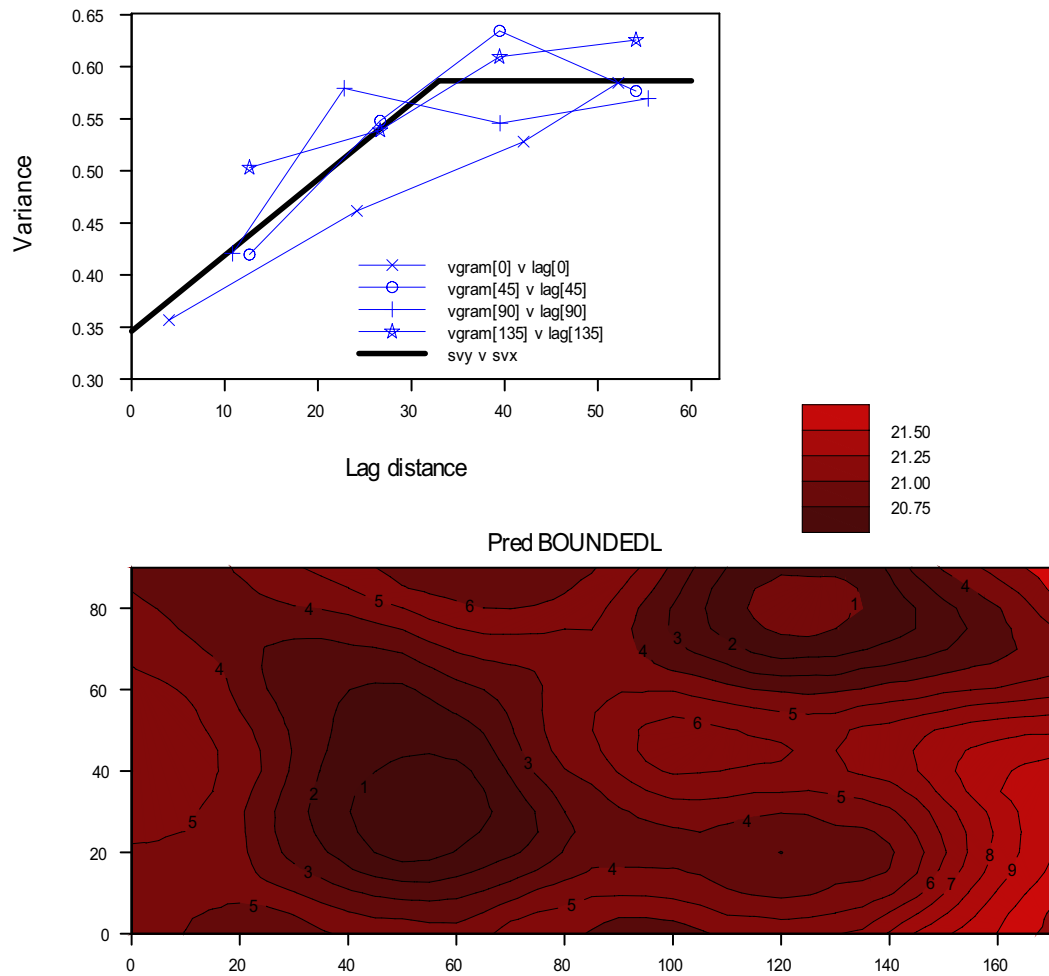
Estimated parameters for covariance models

Random term(s)	Factor	Model(order)	Parameter	Estimate	s.e.
fx.fy	fx	Power(1)	phi_1	0.9186	0.0200
			Scalar	1.5080	0.3000
fx.fy.fuur	fy	Power(1)	phi_1	0.9401	0.0167
			phi_1	0.9817	0.0017
	fx	Power(1)	phi_1	0.6345	0.0509
			phi_1	0.9739	0.0025
	fuur	Identity	-	-	-

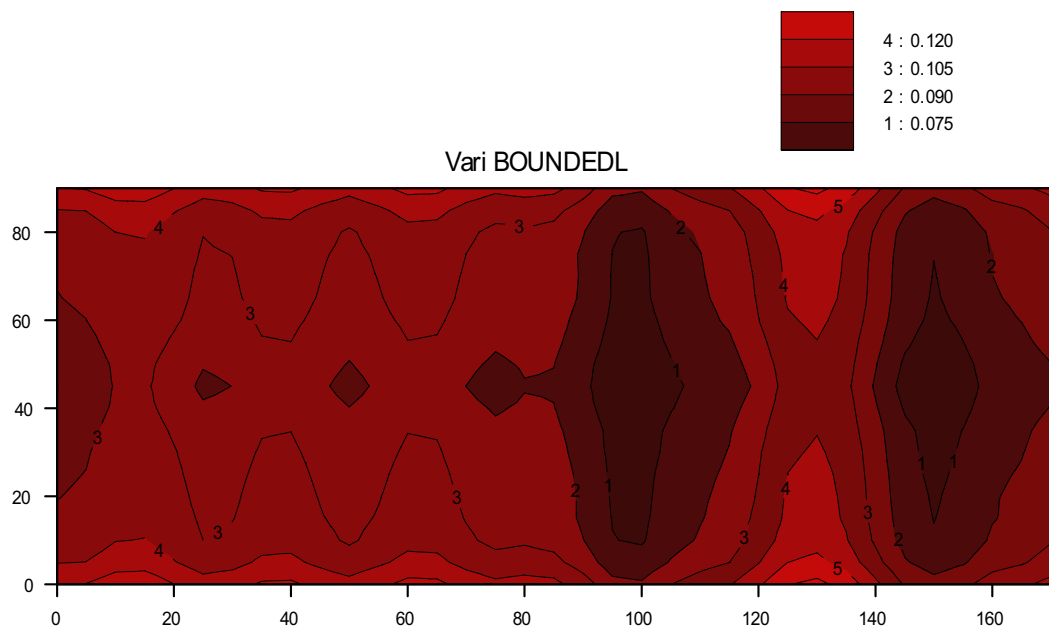
Note: the covariance matrix for each term is calculated as G or R where
 $\text{var}(y) = \text{Sigma2}(ZGZ' + R)$, i.e. relative to the residual variance, Sigma2 .

Residual variance model

Term	Factor	Model(order)	Parameter	Estimate	s.e.
'*units*'	Identity		Sigma2	0.221	0.0022



Figuur II-6. Variogram en geïnterpoleerde gemiddelden over 9 dagen.



Figuur II-7. Variantie schattingen voor de dataset met het huidige grid van sensoren.

Conclusies

Opsplitsing met een variantie-componenten analyse geeft aan dat de locale effecten in de kas even groot zijn als de rij en kolom effecten samen. De kas is dus redelijk homogeen in temperatuur. De basale meeton nauwkeurigheid voor een sensor op een tijdstip en plaats is ± 0.65 °C. De hogere orde interacties zijn klein ten opzichte van de rest en dat maakt dat de meeton nauwkeurigheid gemiddeld genomen uitkomt op ± 1.1 °C. Dit is exclusief de variatie die lokaal in de kas aanwezig is.

Met het Fixed model, kunnen we de locale variatie opdelen in een rij deel, kolom deel en een locatie specifiek deel (= rij.kolom interactie). Rijen en kolommen geven samen een verschil van ± 1.0 °C. De technische ruimte en het verloop van de verwarmingsbuizen, naar het centrale punt, worden hiermee zichtbaar. Een lichteffect in de westzijde van de kas (door de zon) is ook te zien. Deze verschillen kunnen versterkt of verzwakt worden met ± 1.0 °C voor locatie-specifieke temperatuursverschillen. De resterende meeton nauwkeurigheid is niet homogeen verdeeld.

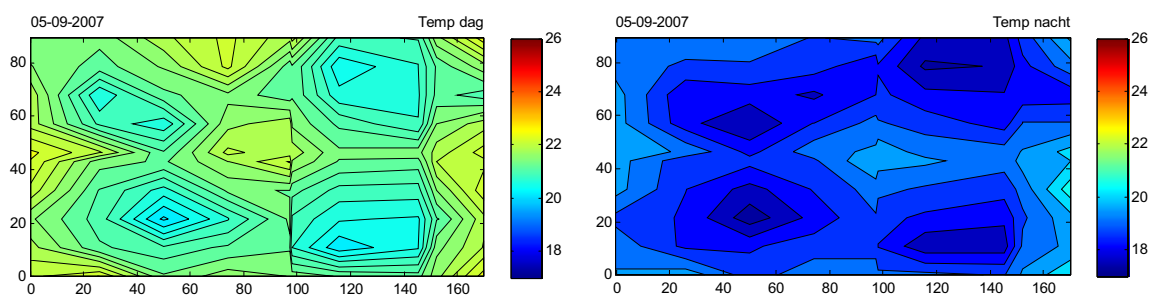
Voornamelijk de Noord en Oost rand van de kas en in de uiterste hoeken, is deze meer variabel.

Het Mixed model geeft een betere schatting van de meeton nauwkeurigheid en het effect tengevolge van de locale variatie. In een dergelijk model kunnen ook allerlei andere covariabelen meegenomen worden (het weer, gewas etc.), dat is hier niet gedaan. De correlaties tussen verschillende sensoren zijn zeer hoog. Dus ofschoon er duidelijke (kleine) verschillen zijn in de kas qua temperatuur, wordt deze goed gemeten met het gegeven meetnet. De duidelijke interactie-component Uur.X.Y doet vermoeden dat er locale effecten optreden afhankelijk van het tijdstip. Het moet nader bekeken worden of dit voor de regeling van de kas relevant is (de meeton nauwkeurigheid neemt iets af).

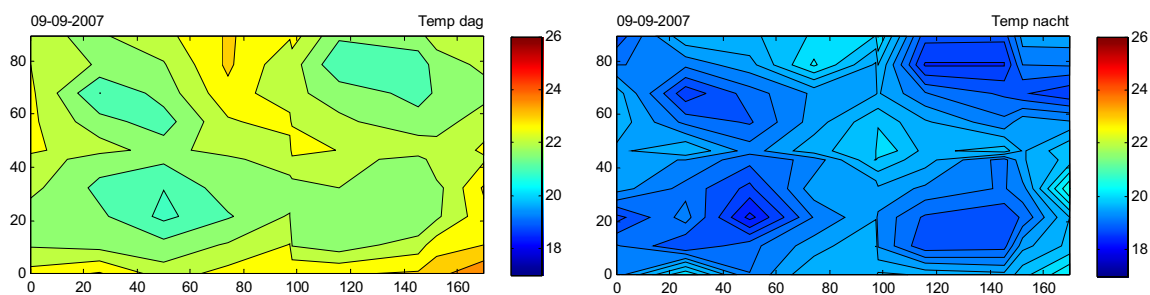
Een geostatistische benadering geeft de mogelijkheid om het ruimtelijke patroon te interpoleren en inzichtelijk te maken. Vanaf ca. 35 meter zijn de metingen als onafhankelijk te beschouwen, op kleinere afstand nemen de verschillen af die men waarneemt, absoluut zijn dit verschillen van maximaal ± 0.35 °C. Hiermee kan men de bestaande metingen interpoleren en ook de variantie hiervan laten zien, gegeven het meetnet. Indien een grotere precisie gewenst is kan men hier uit afleiden waar de sensoren deze het best geplaatst kunnen worden en met welke dichtheid. Met een meeton nauwkeurigheid van maximaal ± 1.2 °C lijkt een grotere precisie hier niet echt nodig. Dit betekent dat als de sensoren meer dan 35m uit elkaar worden gehangen de kans toeneemt dat essentiële informatie wordt gemist. Als sensoren dichter dan 35m bij elkaar worden gehangen neemt de variantie af van 1.50°C tot 1.15°C.

Bijlage III.

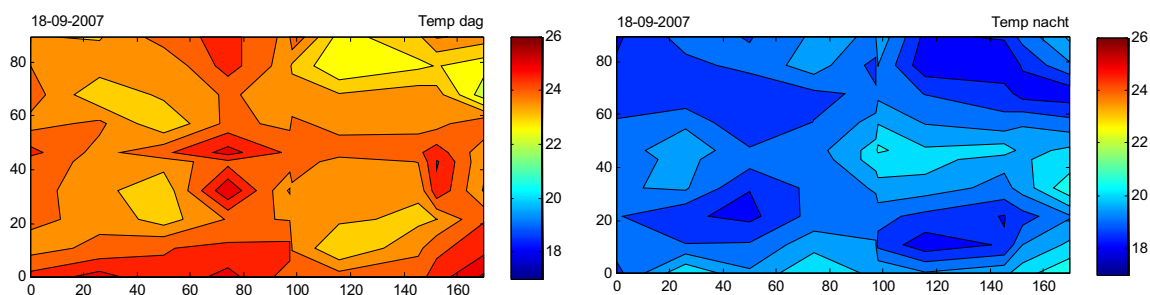
Daggemiddelden proef 1, temperatuur en RV



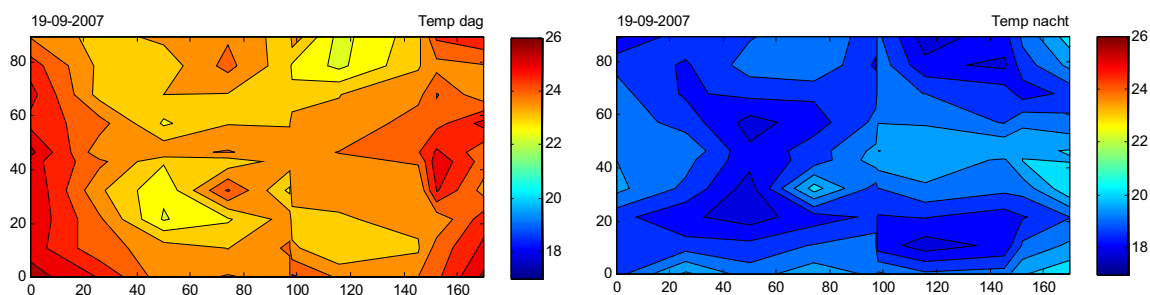
05-09: buiten: $\max T 15$, $\min T 5^\circ\text{C}$; 0 uur zon. Onder invloed van het stoken ontstaan 4 koudere vlakken die ook in de statistische analyse zichtbaar worden. Temperatuurverschillen zijn klein (ca. $2-3^\circ\text{C}$).



06-09: buiten: $\max T 18$, $\min T 12^\circ\text{C}$; 2 uur zon. Meer zon, temperatuur overdag stijgt, verschillen groter ($3-4^\circ\text{C}$).



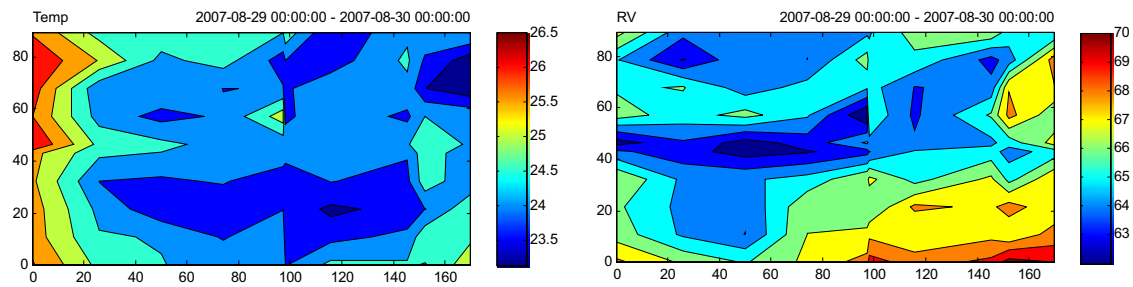
18-09: buiten: $\max T 15$, $\min T 5^\circ\text{C}$; 6 uur zon. Veel zon, hogere temperatuur overdag.



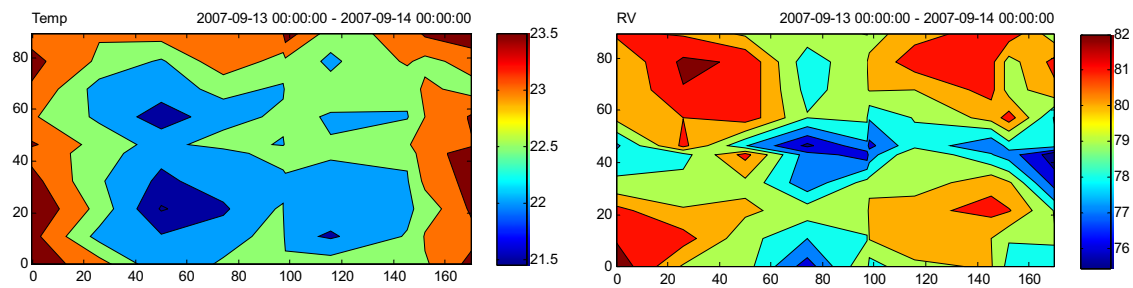
19-09: buiten: $\max T 17$, $\min T 5^\circ\text{C}$; 4 uur zon; Matig zonnig, vrij warm, ook door hogere buitentemperatuur. Verschillen $2-3^\circ\text{C}$.

III - 2

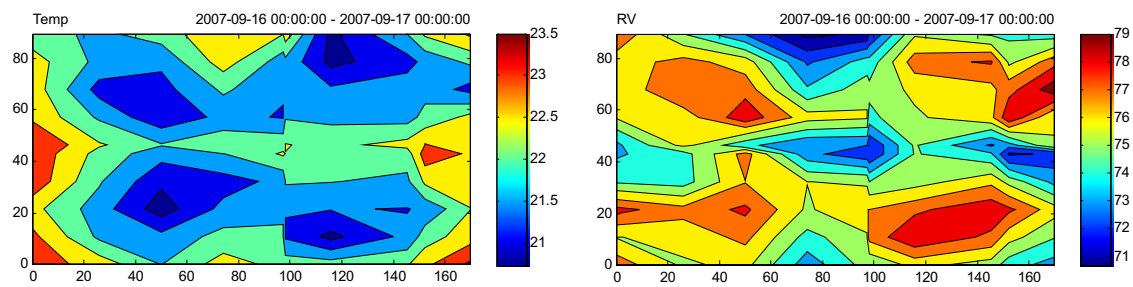
24 uurs gemiddelden van temperatuur en RV (kleur schaal is niet constant!). Per dag is het moeilijk te constateren waar koude of warme plekken zijn.



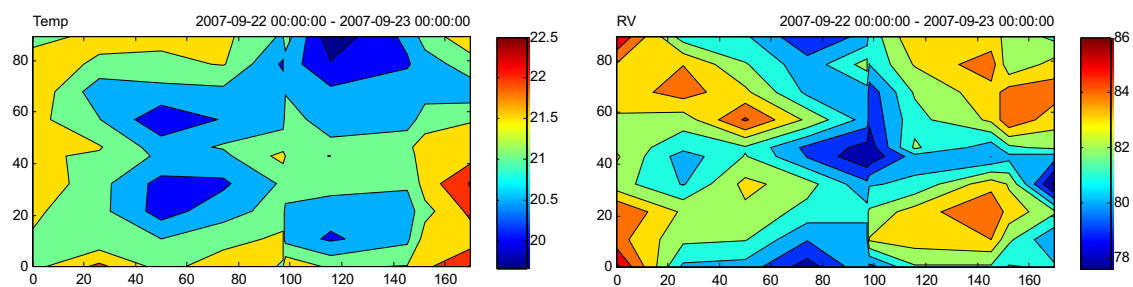
Bij temperaturen van 24-26oC daalt de RV tot 63-70%, weinig stookinvloed te zien.



Bij temperaturen van 22-23oC is RV 77-82%.



Bij temperaturen van 21-23oC is RV 71-78%.



Bij temperaturen van 20-22oC is RV 78-85%.