



WAGENINGEN **UR**
For quality of life

Monitoring technische systemen in semi-gesloten kassen

Th.H. Gieling, M.A. Bruins, J.B. Campen, H.J.J. Janssen, F.L.K. Kempkes, M.G.M. Raaphorst, A. Sapounas



Ministerie van Landbouw, Natuur en
Voedselkwaliteit

Rapport GTB-1008



© 2010 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 : Droevendaalsesteeg 1, 6708 PB Wageningen
: Postbus 16, 6700 AA Wageningen
Tel. : 0317 - 48 60 01
Fax : 0317 - 41 80 94
E-mail : glastuinbouw@wur.nl
Internet : www.glastuinbouw.wur.nl

Inhoudsopgave

pagina

Samenvatting		3
Discussie		11
1	Voorwoord	16
2	Inleiding	17
3	Selectie van tuinbouwbedrijven	18
	3.1 Criteria voor de selectie	18
	3.2 Bedrijfskeuze	19
4	Meetsystemen	21
	4.1 Tomatenbedrijven	21
	4.2 Phalaenopsisbedrijven	21
	4.3 Aanvullende meetsystemen voor extra proeven	22
	4.4 Data-aquisitie, -verwerking en -opslag	22
	4.5 De instrumenten en de meetkwaliteit	23
	4.6 Aanleveren van data aan project teeltbegeleiding	24
5	Onderzoek naar technische systemen	24
	5.1 Testen van de slangopeningen	29
	5.2 Horizontale en verticale verdeling T en RV	35
	5.3 Schema's van de energiestromen bij de bedrijven	45
	5.4 Resultaten CFD	53
	5.5 Rookproeven	56
6	Interactie met project Teeltbegeleiding	56
	6.1 Aanleveren van data	56
7	Literatuur	58
Bijlage I	Technische gegevens meetpalen	60
Bijlage II	Overzicht meetlocaties	67
Bijlage III	Resultaten kalibratiemetingen	71
Bijlage IV	Bepalen energiegebruik van kunstmatige belichting	74
Bijlage V	Debiet ventilatoren warmtewisselaars	77
Bijlage VI	Resultaten horizontale en verticale temperatuur en vochtverdeling	78
Bijlage VII	Energiestromen	97
Bijlage VIII	Luchtsnelheidmetingen	104

Samenvatting

Er kunnen verschillende lessen getrokken worden uit het project monitoring in semi-gesloten kassen. Deze lessen zijn onder te verdelen in de volgende thema's:

- Ontvochtiging
- Temperatuur- en vochtverdeling
- Luchtbeweging
- Koelen
- Verwarmen
- Luchtverdeling
- Energiegebruik

Ontvochtiging

Ontvochtiging is een belangrijk aspect van de klimaatregeling. Het vochniveau moet onder controle blijven om ziekten en verminderde groei te voorkomen. In de semi-gesloten kassen die deelnemen aan het Monitoringproject wordt op twee manieren vocht afgevoerd:

- Door condensatie op een koud oppervlak
- Door ventilatie met buitenlucht

Indien de temperatuur van het dek en het scherm onder het dauwpunt van de kaslucht komt, vindt hier condensatie op plaats. In de koelers, die op deze bedrijven worden gebruikt, vindt ook condensatie plaats, waardoor hier ook vocht mee wordt afgevoerd. De hoeveelheid vochtafvoer hangt af van de temperatuur van het koude oppervlak, de hoeveelheid lucht die er langs wordt gepompt en de vochtinhoud van de kaslucht.

Een andere manier om vocht af te voeren is door de kas te ventileren. Buitenlucht bevat minder waterdamp dan de kaslucht in traditionele kassen. Het vervangen van kaslucht door buitenlucht voert daarom vocht af. Traditioneel gebeurt dit door de ramen te openen.

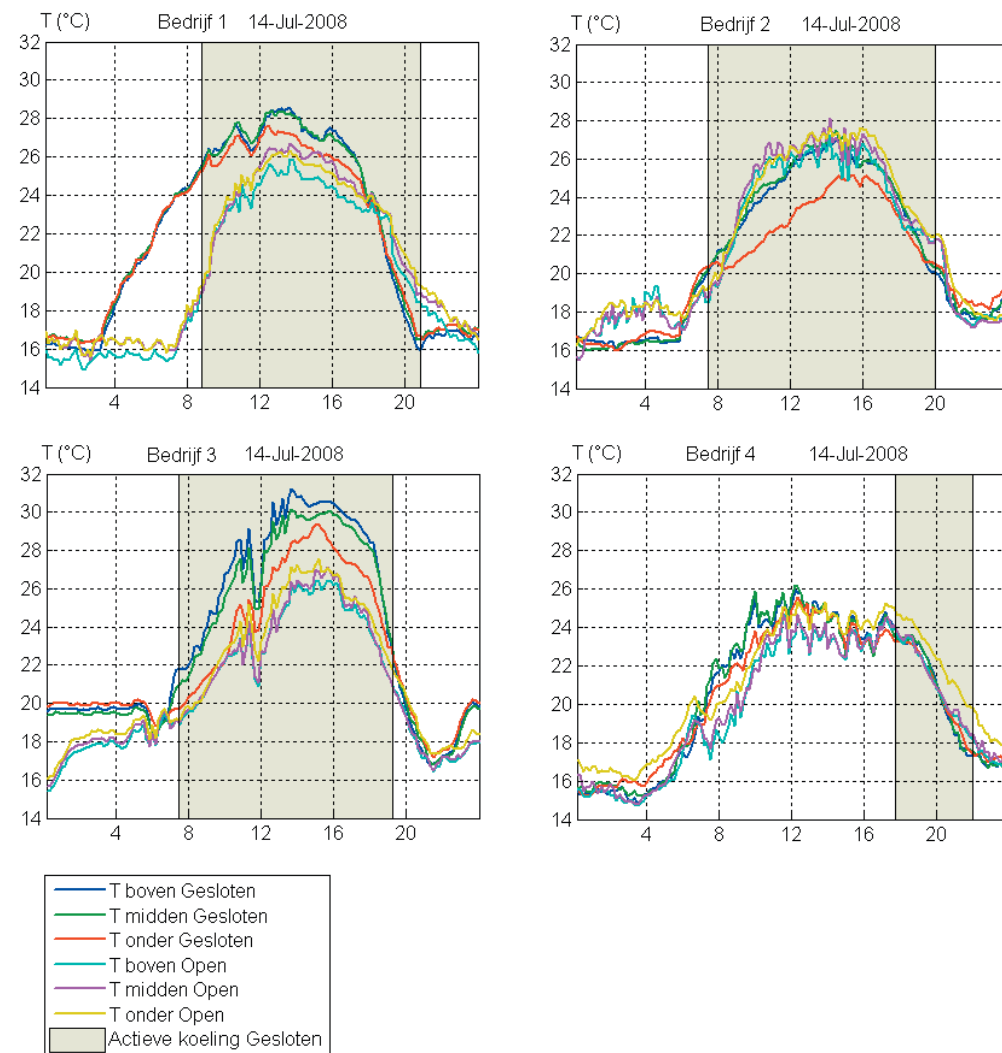
De nieuwste kassystemen maken gebruik van geforceerde buitenluchtaanzuiging waardoor het proces van vochtafvoer beter kan worden geregeld en de klimaatverdeling homogener is. In de semi-gesloten kassen van het Monitoringproject wordt deze techniek op één bedrijf na niet meer toegepast, omdat de systemen daarvoor niet ontworpen waren en er in het gebruik fouten mee zijn gemaakt. Desondanks wordt op deze bedrijven nu toch weer gekeken of dit op te lossen is. In het geval van gekoelde kassen is het mogelijk dat de hoeveelheid vocht in de buitenlucht hoger is dan wenselijk voor de kaslucht, aangezien in een dergelijk geval de warmere buitenlucht meer vocht kan bevatten dan de koudere kaslucht. In dat geval kan de vochtafvoer alleen worden gerealiseerd door condensatie op een koud oppervlak. Bij zo'n gekoelde kas vindt in de koelunits meestal al condensatie plaats. Deze condensatie kan worden vergroot door de temperatuur van de koelunit te verlagen.

Conclusies:

- Ontvochtigen met buitenlucht kan alleen wanneer de absolute luchtvochtigheid van de buitenlucht lager is dan de gewenste absolute luchtvochtigheid van de kaslucht.
- Ontvochtigen met buitenlucht werkt alleen wanneer er voldoende interactie is tussen de luchtbeweging in de buurt van de planten en de aanvoer van droge buitenlucht.
- In het systeemontwerp voor ontvochtiging moet bij onderdoor koelen rekening gehouden worden met naverwarmen om "koude voeten" te voorkomen.
- De meeste systemen zijn niet ontworpen voor ontvochtiging met een koud oppervlak.

Temperatuur- en vochtverdeling

Warme lucht is lichter dan koude lucht en droge lucht is zwaarder dan vochtige lucht. Deze natuurkundige aspecten spelen een grote rol bij koelen en verwarmen. In een traditionele kas vindt de basisverwarming onder het gewas plaats, wat er voor zorgt dat de warmte wordt verdeeld. De koeling vindt door de ramen van boven af plaats, waardoor de koude lucht zich goed verdeelt. In een traditionele kas zijn de verticale temperatuurgradiënten om deze reden beperkt (Figuur 1).



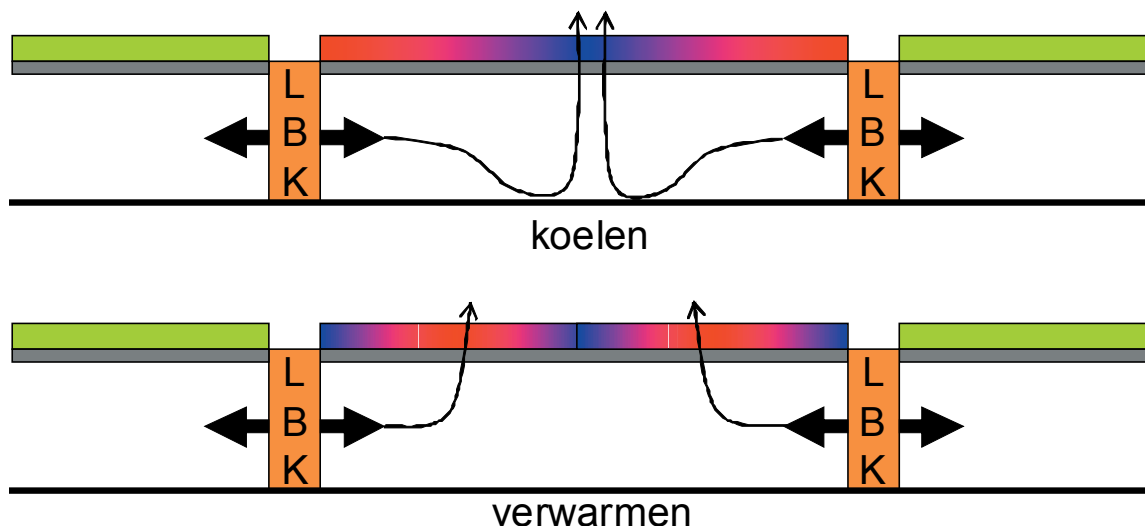
Figuur 1. Verticale temperatuurverdeling van de luchttemperatuur in de open en geconditioneerde kas van de vier tomatenbedrijven op 14 juli 2008. De periode van actieve koeling door middel van LBK's is door de donkere kleuring weergegeven. Bij de bedrijven 1, 2 en 3 wordt met slangen gekoeld waarbij bij bedrijf 1 ook met bovenkoeler wordt gewerkt. Bedrijf 4 koelt alleen met bovenkoelers.

In semi-gesloten kassen met koeling van onderaf, ontstaat een verticale temperatuurgradiënt. Deze gradiënt is alleen te verkleinen door meer luchtbeweging in te zetten, waardoor de temperatuur van de koude lucht uit de LBK (LuchtBehandelingsKast) verhoogd kan worden en de menging van de lucht in de kas groter wordt.

Bij Phalaenopsis is bij twee bedrijven de koeling aangelegd zoals geschetst in Figuur 2.

Gedurende de koelperiode ontstaat tussen de tafels een gebied met koude lucht. Temperatuurverschillen tot 4 °K zijn gemeten. Deze verschillen ontstaan mede door de luchtstroming en wordt verderop nader besproken.

Tijdens het verwarmen stijgt de warme lucht halverwege de tafel omhoog. Temperatuurverschillen tot 3 °K zijn gemeten.



Figuur 2. Temperatuurverdeling bij Phalaenopsis waarbij met LBK onder de tafels wordt gewerkt.

Conclusies ten aanzien van temperatuur- en vochtverdeling:

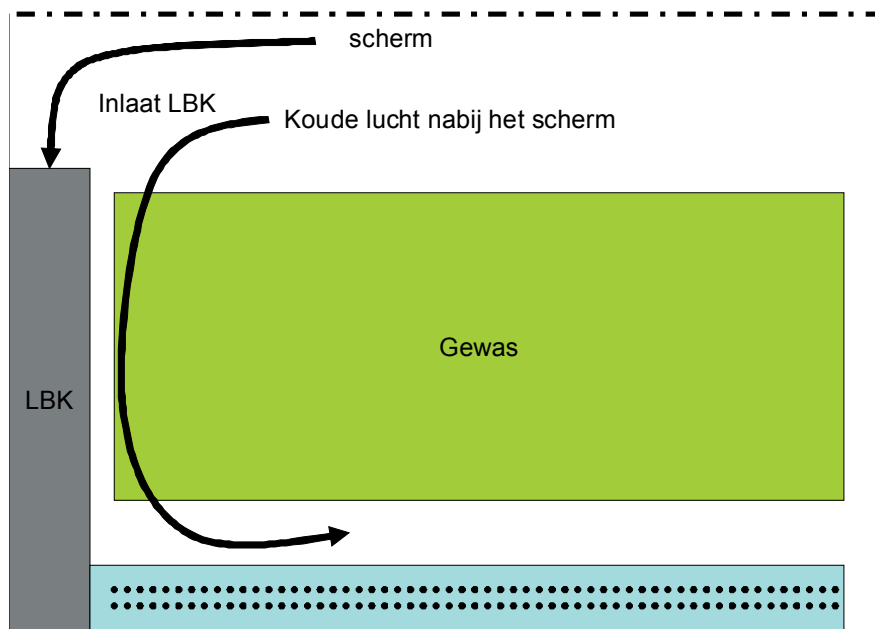
- Koelen moet boven het gewas gebeuren als verticale temperatuurgradiënten niet wenselijk zijn.
- Koelen van onderaf is goed mogelijk mits er voldoende lucht van niet te lage temperatuur door het systeem wordt rondgepompt.
- Koelen bij Phalaenopsis met LBK's onder de tafel zorgt voor horizontale temperatuur-verschillen over de tafel
- De weerstand van de tafels in combinatie met de planten belemmert een goede luchtverdeling

Luchtbeweging

In een traditionele kas wordt de luchtbeweging in een kas veroorzaakt door het verwarmingsysteem, de ventilatie en de eventueel aanwezige ventilatoren. In de semi-gesloten kassen varieert de luchtsnelheid nabij het gewas tussen de 5 en 20 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$. Luchtbeweging is wenselijk om het microklimaat rond de plant te beïnvloeden. Verversing van lucht is nodig voor de verdamping en de fotosynthese van de plant.

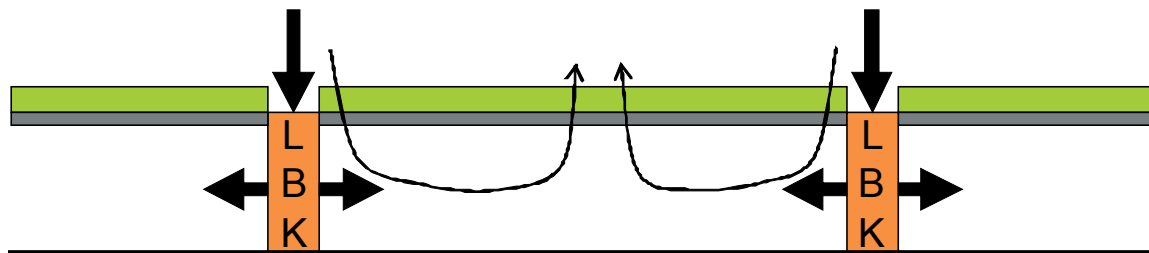
In semi-gesloten kassen is de ventilatie minder en, als er via de LBK wordt verwarmd, is het temperatuurverschil tussen de verwarming en de kaslucht kleiner. Het gevolg is dat de luchtbeweging minder is dan bij een normaal geventileerde kas. Echter, mechanische ventilatie verhoogt de luchtbeweging van de LBK's. De luchtbeweging die door deze systemen in de kas ontstaat, is beperkt ten opzichte van de luchtbeweging die ontstaat door temperatuurverschillen en windinvloeden (via de luchting). Een installatie die bijvoorbeeld op 60 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ draait, veroorzaakt een luchtbeweging van 1.7 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$. Uit verschillende metingen komt naar voren dat op het moment dat de ramen worden geopend, de windinvloed en het temperatuurverschil 'binnen - buiten' de luchtbeweging in de kas bepalen. Ventilatoren ten behoeve van luchtbeweging kunnen tijdens raamventilatie worden uitgeschakeld.

Uit metingen aan luchtslangen volgt, dat de lucht uit de slang nabij de LBK niet loodrecht uitstroomt, maar zich deels parallel aan de slang verplaatst. Als gevolg daarvan ontstaat een secundaire luchtstroom langs de LBK (Figuur 3). Deze luchtstroom heeft een negatieve invloed op het klimaat nabij de LBK.



Figuur 3. Gedrag van de luchtbeweging uit de slang nabij de LBK.

Secundaire luchtstroming is ook te zien bij decentrale LBK's. Bij de bedrijven met Phalaenopsis wordt de kaslucht door de tafel heen meegezogen, waardoor het klimaat op deze locatie anders is dan op de locatie waar de geconditioneerde lucht door de tafel heen stroomt (Figuur 4).



Figuur 4. Luchtstroming door de tafel bij decentrale LBK's in de Phalaenopsisteelt.

Bij de bovenkoelers (Figuur 5) treedt ook een secundaire luchtstroom op. Dit effect is positief aangezien de gekoelde lucht hierdoor direct opmengt met de kaslucht.

Conclusies ten aanzien van de luchtbeweging

- De krachten, die zorgen voor de luchtbeweging ten gevolge van wind en temperatuurverschillen binnen – buiten, zijn groot ten opzichte van de krachten door geforceerde luchtbeweging.
- Nabij de LBK stroomt lucht niet loodrecht uit de slang als de lichtsnelheid hoog is in dit deel van de slang waardoor horizontale klimaatverschillen worden geïntroduceerd.
- Luchtbeweging ten gevolge van een ventilator die in een vrije ruimte uitblaast zorgt voor een secundaire luchtstroom, parallel aan de luchtstroom van de ventilator.
- Bij bovenkoelers moet er voldoende ruimte boven het gewas zijn voor de koelers, zodat de gekoelde lucht kan opmengen met de kaslucht.

Koelen

Traditioneel wordt een kas gekoeld door ventilatie via de ramen. Koude lucht van buiten vervangt de warme kaslucht. Nadeel is dat hierbij CO₂ verloren gaat. Indien de warmte wordt afgevoerd door koelen met een LBK in de kas gaat de CO₂ niet meer verloren. Aangenomen dat de koude beschikbaar is, dan kan worden bepaald wat economischer is: koelen door raamventilatie of koelen door een LBK.

Conclusies ten aanzien van koelen

- De koellast is minder dan de hoeveelheid globale straling die in de kas valt ten gevolge van de reflectie op het gewas.
- Bij koelsystemen worden de geveleffecten en betonpaden te snel verwaarloosd met temperatuurverschillen tot gevolg.

Verwarmen

Traditioneel wordt verwarmd met water van maximaal 90 °C. Voor energiezuinige systemen, waarbij de watertemperatuur maximaal 45 °C is, geeft het traditionele verwarmingsstelsel niet voldoende warmte af. De warmteafgifte kan worden vergroot door het warmte-uitwisselende oppervlak te vergroten of door geforceerde luchtbeweging toe te passen. Deze laatste optie wordt in de semi-gesloten kassen gebruikt, in de vorm van zowel decentrale units als centrale units met luchtslangen. Bij het toepassen van luchtslangen functioneert de slang zelf ook als een grote verwarmingsbuis. Dit speelt vooral bij het eerste deel van de slang, nabij de LBK, waar het temperatuurverschil tussen de geconditioneerde lucht en de kaslucht groot is.

Onrust in de regeling kan de warmtevraag soms vergroten. Dit komt doordat de systemen in het algemeen niet ontworpen zijn voor gelijktijdig koelen en/of verwarmen, zodat bij schakelmomenten energie verloren gaat. Die schakelmomenten hangen vaak samen met ontvochtiging.

Conclusies ten aanzien van verwarmen

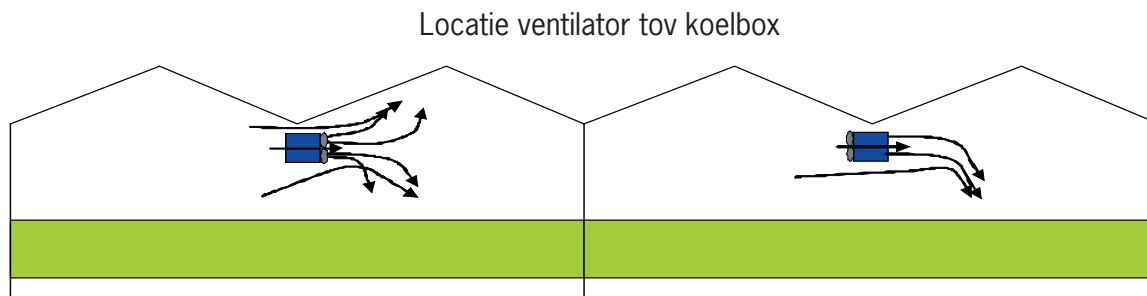
- Verwarmen moet onder het gewas gebeuren.
- Lage temperatuurverwarming moet worden gedaan met meer warmte-uitwisselend oppervlak en niet door geforceerde luchtbeweging.
- Geconditioneerde afdelingen gebruiken meestal meer warmte dan ongeconditioneerde.
- Door vergroting van het warmte-uitwisselende oppervlak van verwarmingsbuizen kan met minder elektra als benodigd voor ventilatoren in LBK's de kas verwarmd worden.

Luchtverdeling

Een goede verdeling van de geconditioneerde lucht is essentieel voor een homogeen klimaat. Luchtslangen met gaatjes worden ingezet voor deze verdeling voor het geval waarbij de luchtbehandelingkasten nabij de gevel zijn geplaatst. Mits het gatenpatroon goed is gedimensioneerd, zorgen luchtslangen voor een goede verdeling van de lucht. Door het toepassen van de luchtslangen stijgt het energiegebruik. Voor een gelijkmatige luchtuitstroom uit de slangen moet luchtdruk in de slang voldoende hoog zijn.

De verdeling bij laaghangende decentrale LBK's hangt af van de temperatuur van de uitstromende lucht ten opzichte van de kaslucht. Koude lucht blijft laag bij de grond en verdeelt zich daar gelijkmatig. Warme lucht gaat omhoog, waarbij de verdeling wordt bepaald door de turbulentie in de uitstroom en de snelheid waarmee de lucht uit de LBK's komt.

Hooghangende LBK's, die alleen worden gebruikt tijdens koelen, zorgen voor een goede verspreiding van de lucht mits de uitstromende lucht direct mengt met de kaslucht. De luchtstroom door de LBK's veroorzaakt ook een luchtstroom parallel langs de LBK's. Turbulente lucht uit de LBK's mengt zich met een andere luchtstroom. Dit is te zien op het moment dat de ventilator achter het koelblok wordt geplaatst (Figuur 5).



Figuur 5. Kas met bovenkoeler. Links de turbulente uitstroom als gevolg van de ventilator achter het blok en rechts de laminaire luchtuitstroom.

De vraag is relevant in hoeverre voor het microklimaat de luchtbeweging t.g.v. de verwarmingsystemen in semi-gesloten kassen verschil uitmaakt t.o.v. traditionele kassen met buisverwarming. Hierbij is het natuurlijk als eerste van belang te weten in welke mate het microklimaat wordt beïnvloed door het kasklimaat. Het antwoord op deze vraag is niet eenvoudig te geven.

Zo kan niet worden gesproken over hét microklimaat. Heel dicht bij het huidmondje zal de RV naar 100% neigen, iets verder daar vandaan wordt het beïnvloed door de grenslaagweerstand nabij het blad, die van veel factoren afhankelijk is, o.a. van de luchtbeweging (zie verdampingsmodellen van o.a. Stanghellini, Monteith en anderen).

Er is ook geen normering over een goed of slecht microklimaat. Wel kan worden gesproken over meer of minder luchtbeweging in het gewas. Indien de gaatjes van de luchtslang niet direct gericht zijn op het gewas, dan is de luchtbeweging bij tomatenbedrijf 4 gemiddeld 5 mm/sec. Dit is lager dan wat kan worden verwacht bij convectie met een warme buis en veel minder dan bij geopende ramen. Indien de gaatjes in de luchtslang wel op het gewas zijn gericht, zal dit plaatselijk meer luchtbeweging geven. Dit is door de conditionerende tomatentelers als hinderlijk ervaren, waarna de uitblaasstand van de gaatjes is aangepast.

De debieten waarvoor de systemen zijn gedimensioneerd, zijn klein in vergelijking met debieten die met natuurlijke ventilatie behaald kunnen worden. Rookproeven bij Phalaenopsis hebben laten zien dat luchtstromingen vaak geconcentreerd zijn (langs kieren en gaten naast de tafels) waardoor er gemiddeld minder lucht door andere delen van de tafel zal stromen. Bij de systemen zoals die zijn gebouwd bij twee van de Phalaenopsis bedrijven, zijn de ontwerpdebieten klein. In het algemeen heeft dit een merkbaar effect op het drogen van het gewas.

Conclusies ten aanzien van de luchtverdeling

- Boven koelen is beter aangezien de lucht vrijer om de koeler kan stromen en daardoor meer kan opmengen met de kaslucht wat een betere luchtverdeling geeft
- Uit energetisch oogpunt is het gebruik van luchtslangen niet wenselijk indien grote hoeveelheden lucht moeten worden verplaatst zoals bij koelen en verwarmen.
- Bij buitenluchtaanzuiging zijn luchtslangen goed in te zetten omdat de hoeveelheid lucht die wordt verplaatst klein is en de aanzuiging aan de gevel kan gebeuren.

Energiegebruik

In april 2009 is begonnen met registreren van energiestromen en bij een enkel bedrijf wordt pas recent gemeten. Om deze informatie aan te vullen is gebruik gemaakt van eigen energieboekhouding van de tuinders. De verzamelde informatie m.b.t. energiestromen in het project monitoring zijn, ondanks het meten op meerdere bedrijven, erg gericht op het resultaat van individuele bedrijven. Het trekken van conclusies van algemene strekking is nog onvoldoende onderbouwd door een -tot nu toe- te beperkt aantal meetreeksen.

De bedrijven met een WKK wordt het gebruik van de warmtepomp (WP) al snel verdrongen door de inzet van de WKK.

Energieprijzen, bijvoorbeeld terugleververgoeding van elektriciteit aan het openbare net, kan de inzet van de systemen in het energiecentrum zodanig beïnvloeden dat het gesloten kasconcept bewust verlaten wordt.

De warmtevraag op de bedrijven verschilt sterk, bij de tomatenbedrijven tot meer dan 25%. Daar waar belicht wordt vallen de overige elektriciteitsgebruikers als bronpompen en ventilatoren al snel in de marge van de elektriciteitsvraag van de belichting. Op de Phalaenopsisbedrijven wordt het verschil in energiegebruik voornamelijk bepaald door de vochtregeling, waarbij het bovenover water geven een belangrijke energiegebruiker is. De inzet van energie voor het drogen van het gewas na een watergift kan tussen de bedrijven wel tot een factor 3 verschillen.

Daar waar de energiestromen per afdeling te herleiden waren, blijkt de geconditioneerde afdeling al snel meer energie (warmte en elektriciteit) te gebruiken dan de open afdeling. Dit blijkt vaak samen te hangen met het ontvochtigen en vervolgens naverwarmen van de kasluchttemperatuur, die voor de ontvochtiging tot onder de dauwpunttemperatuur wordt gekoeld. In dit naverwarmen blijkt 5 tot 7% (gebaseerd op bedrijf 2) van de warmtevraag te zitten maar heeft uiteraard alles te maken met hoe vaak er mechanisch ontvochtigd wordt in plaats van de goedkopere ontvochtiging met buitenlucht. Er zijn aanwijzingen, dat deze energie voor het naverwarmen bijzonder gevoelig is voor het gekozen setpoint van de luchtvochtigheid en de kwaliteit van de regeling (mate van overshoot), waardoor de genoemde 5 à 7 procent gemakkelijk boven de 10% kan uitkomen (gebaseerd op waarnemingen bij bedrijf 9).

Hierbij moet wel de kanttekening gemaakt worden dat tomatenbedrijven eenvoudiger met buitenlucht kunnen ontvochtigen dan Phalaenopsisbedrijven, omdat de laatste in de zomer veel vaker tot onder de buitentemperatuur terugkoelt.

Veel elektrische energie wordt gebruikt door ventilatoren en pompen. Toch valt dit in het niet bij de hoge vraag naar elektrische energie door de belichting. Wanneer deze elektrische energie als primaire energie wordt ingekocht, kost dit bijna 2.5 keer zoveel primaire energie als bij opwekking door eigen WK, waarvan de warmte dan wel nuttig besteed moet worden. Dimensioneren van deze systemen vraagt de nodige aandacht vooral om de systemen (opwekking, opslag en terugwinning) in balans te krijgen.

Op een enkel bedrijf is de aquifer niet in balans. Het opheffen van de onbalans door het opwekken van warmte met een elektrische boiler moet worden voorkomen. Het systeemrendement van elektrische energie uit het openbare net heeft namelijk een laag rendement (40%). Daardoor is het totale rendement van een eenheid warmte die zo wordt opgewekt bijzonder laag. Het is raadzaam om te voorkomen dat elektrische energie uit het net wordt gebruikt voor opwekken van warmte.

Conclusies

Bedrijven hebben complexe energie-installaties. Ondernemers hebben veel vragen over zowel de optimale inzet van de systemen in het ketelhuis, als over het omgaan met de conditionering via luchtbehandeling in de kas. Luchtbehandeling is een andere techniek dan het traditioneel stoken met buizen en het koelen met de luchtramen. Dit monitoringproject, in samenhang met het nog lopende project "Teeltbegeleiding en Resultaatmonitoring", laat zien dat de tuinder problemen heeft met deze vorm van klimaatbeheersing.

In andere onderzoekprojecten (Raaphorst, de Gelder, Dieleman), is aangetoond dat de vragen rondom geconditioneerd telen vaak te maken hebben met de problematiek rondom ontvochtiging. Dit is echter een onderdeel waar bij de meeste systemen in de ontwerpfase geen rekening is gehouden tijdens de dimensionering. Het monitoringproject constateert dat vaak onnodig veel energie wordt ingezet om toch met de beschikbare systemen te kunnen ontvochtigen, terwijl ontvochtigen met buitenlucht op vele momenten goedkoper kan zijn. Heroverweging van de ontwerpcriteria is aan te bevelen.

Indien de energiemetingen vanaf de start in april 2009 alle seizoenen moeten omvatten, wordt de einddatum van dit project overschreden. De resultaten van deze energiemetingen zijn om die reden nog beperkt. Inzet van de geïnstalleerde meetapparatuur zou beter benut moeten worden. Het verdient aanbeveling om het energiegebruik en de energiestromen op de bedrijven, die in dit project zijn gevolgd, te continueren.

De COP's van de warmtepompen zijn lager dan van tevoren is aangenomen. Dit heeft meer te maken met het gerealiseerde temperatuurverschil tussen verdamper en condensor (een groot temperatuurverschil tussen de gevraagde koude en de gevraagde warmte), dan met de technische prestaties van de warmtepomp (Carnot-rendement). De oorzaak ligt in de dynamiek van zowel de warmtevraag als de elektriciteitsmarkt. Bij een lage elektriciteitsprijs (bijvoorbeeld 's nachts) wordt warmtepomp gebruikt. Een groot deel van de warmte is pas in de ochtend nodig (opstoken, scherm geopend). De warmte die 's nachts is aangemaakt met de warmtepomp moet dus worden gebufferd. Dit vraagt een hogere temperatuur in vergelijking tot niet bufferen. De verhoogde warmtevraag veroorzaakt als gevolg daarvan een lagere energiebesparing dan verwacht.

Het elektriciteitsverbruik van de ventilatoren en de bronpompen is gering ($\pm 20\%$) ten opzichte van het verbruik van de warmtepomp. Soms zijn de bronpompen vaker ingezet dan gepland om de benodigde hoeveelheid water van en naar de aquifer te transporteren. De moeilijk voorspelbare permitiviteit van de watervoerende zandlaag is hiervan de oorzaak. Het verbruik van de ventilatoren is sterk afhankelijk van de gehanteerde ventilatorstand. Dit verschilt per teler en varieert tussen frequentie gestuurd (regelbaar) tot aan-uit (één vast debiet). Het is niet duidelijk welk luchtdebiet onder welke omstandigheden wenselijk is.

Een luchtslang als onderdeel van de klimatiseringsinstallatie moet alleen worden toegepast ten behoeve van ontvochtiging. Voor koelen en verwarmen moet geen slang worden gebruikt.

NIR-reflectie is een mogelijkheid om de warmtelast en het klimaat in de kas gunstig te beïnvloeden.

De discussie of warmtepompen al dan niet duurzamer zijn dan WKK's valt buiten dit project. Echter, semi-gesloten of geconditioneerde kassystemen ondervinden (nu nog) concurrentie van kassystemen die over een WKK-installatie beschikken. De verwachting is dat een daling van de elektriciteitsprijs ten opzichte van de gasprijs in het voordeel van het Nieuwe Telen in een semi-gesloten kas werkt.

Discussie

Het project:

Het resultaat van het monitoringproject is een evaluatie van de bestaande semigesloten systemen zoals die bij praktijkbedrijven zijn toegepast. In dit rapport zijn de bevindingen, conclusies en analyses weergegeven. Uit de evaluatie zijn aanbevelingen naar de ondernemers geformuleerd, zowel tuinders als toeleveranciers. De aanbevelingen zijn hoofdzakelijk binnen het project teeltbegeleiding met de deelnemende tuinders besproken. Er is gebruik gemaakt van deze en andere informatie, om bij de betrokken tuinders te argumenteren wat er niet goed gaat of om na te vragen waarom de door hun genomen acties toch nodig waren. Het betrof acties van tuinders die energie kostten, tegen elkaar in werkten, niet te beargumenteren waren, angst lieten zien voor het nemen van beslissingen die afwijken van de “normale” gang van zaken of erop duiden dat het functioneren van de systemen en de betrokken klimaatprocessen niet begrepen werden. De motivatie van de deelnemende ondernemers is van groot belang voor het welslagen van dit type project, omdat hier een nauwe interactie is tussen onderzoek en praktijk.

Het meten:

De gebruikte meetapparatuur bestaat uit twee meetpalen per bedrijf met op drie hoogten de kasttemperatuur en RV, aangevuld met WETsensor, planttemperatuur en PAR-sensor. Het was gebaseerd op het meetprotocol zoals geformuleerd door de commissie onder leiding van J. Kipp (Bijlage I). Tijdens het monitoringproject bleek dat de keuze beter gebaseerd had kunnen worden op afzonderlijke eisen per deelnemend individueel bedrijf. Hier is bij het opstellen van het project onder de gegeven tijdsdruk geen extra tijd voor genomen.

De meetdata van de WETsensor en de PAR-sensor zijn in de tomatengroep niet of nauwelijks gebruikt. Om die reden is in de Phalaenopsisgroep geen WETsensor geïnstalleerd. Daarnaast is een WETsensor in het gebruikte teeltmedium in de Phalaenopsissteelt niet bruikbaar. PAR-sensoren zijn op Phalaenopsis bedrijven een zo belangrijke stuurparameter voor het kasklimaat dat op deze bedrijven kon worden gebruik gemaakt van de al aanwezige sensoren. Deze sensoren zijn allen op een beweegbare arm gemonteerd, waardoor een gemiddelde meetwaarde beschikbaar is.

Het meten van de kasluchttemperatuur en RV op drie hoogten heeft bij de Phalaenopsistelers ertoe geleid dat ze nu beter begrijpen hoe technische systemen in hun kas het kasklimaat beïnvloeden.

De verzamelde meetdata werden ook gebruikt voor discussierondes in het teeltbegeleidingsproject.

Telers waardeerden de datavergelijking van de deelnemende bedrijven het meest. Dit komt doordat de data inzichtelijk werden gepresenteerd. Grafieken van verwerkte data zijn vaak abstract en leveren pas informatie op wanneer gelijkgestemden in vergelijkende zin erover discussiëren.

De meeste sensoren zijn in 2009 gekalibreerd. Tijdens de metingen bleek dat de temperatuurmeters over het algemeen goed functioneerden, maar dat vooral de RV-meters tot 5% afweken. Men moet zich realiseren dat een RV meting per definitie minder nauwkeurig is, omdat deze op twee metingen, ieder met zijn eigen onnauwkeurigheid, is gebaseerd. Dit geeft aan dat een goede onderlinge vergelijking van de luchtvochtigheid met deze meters minder goed mogelijk is dan bijvoorbeeld met temperatuurmetingen. Wel kunnen de meters worden gebruikt om het verloop van of trends in de luchtvochtigheid te volgen.

Een vaste PAR-meter in de kas geeft geen representatief beeld van het licht op de plant omdat er veel schaduwplekken in de kas zijn. Wel geeft de PAR-meter een indicatie of de assimilatiebelichting werkt of dat het scherm is gesloten.

Een planttemperatuurmeter geeft, in combinatie met de hoeveelheid straling en de kasttemperatuur, een indicatie van de mate waarin het gewas zichzelf kan koelen door verdamping en convectie. Aangezien planttemperatuurmeters niet eenduidig op het gewas gericht blijven, is de absolute koelcapaciteit van het gewas niet in een continue onbewaakte procesgang betrouwbaar en langdurig te meten.

Bij één teler zijn vruchttemperatuurmeters opgehangen (z.g. “kunsttomaten”). Hiermee werd nagegaan of in een kas met luchtverwarming de vruchttemperatuur minder steeg ten opzichte van de kastemperatuur dan in een kas met buisverwarming. De veronderstelling was, dat overdag, in een kas met gesloten ramen, de vruchttemperatuur verder zou oplopen dan in een kas met veel luchtbeweging t.g.v. geopende ramen. Deze veronderstelling bleek juist, al gaat het hier slechts om tienden van graden.

De “ideale semi-gesloten kas” ?

Als eerste moet de vraag worden beantwoord: wat is ideaal?

Uitvoeringsvormen van installaties die voldoen aan het ideale energetische plaatje hoeven niet overeen te komen met installaties die voldoen aan het ideale economische plaatje.

De grootste prioriteit voor de ondernemer is een economisch rendabel systeem. Dit is te realiseren met een hoge productie, precies op tijd leveren, met de vereiste kwaliteit en tegen lage kosten.

Wanneer dit met energiebesparing kan worden bereikt, eventueel met besparing op fossiele energie, zonder verlies op de economische doelstelling, dan is dat voor de tuinder een belangrijk gegeven waar hij gehoor aan zal geven. Energiebesparing op zich is echter prioriteit twee.

De verwachting bij de investeringen in semigesloten systemen bij tomaat waren hooggespannen. Men ging hier uit van productietoename van 20% en een energiebesparing van 30%. Deze verwachte verbeteringen werden niet gehaald. Een deel van de problemen hierbij is te vinden in het onvoldoende definiëren van de referentie. Het ervaring opdoen met het telen in de semigesloten systemen heeft geleid tot nieuwe teeltinzichten, die ook werden toegepast in de referentiekas. Hierdoor werden de resultaten van de referentie ook steeds beter. De productiewinst van de semi-gesloten kas ten opzichte van de referentie kas werd hierdoor teniet gedaan.

In de Phalaenopsis-teelt is koeling essentieel om jaarrond een kwalitatief goed product te kunnen telen. Met de onderzochte systemen blijkt dit goed mogelijk te zijn. Deze systemen voldoen dus aan de verwachtingen. Opgemerkt moet worden dat deze systemen niet altijd een homogener kasklimaat tot gevolg hebben.

Welk ideaal moet worden nagestreefd is niet eenvoudig te beantwoorden. Onderstaande punten zijn door de telers naar voren gebracht:

- **kasomhulling:** wel luchtramen, meerdere schermen,
- **verwarmen:** inblazen van licht opgewarmde buitenlucht onder in de kas; maak gebruik van passieve warmteoverdracht met buizen; groot verwarmend oppervlak voor gebruik laagwaardige warmte; bij tomaat een groeibuisje tussen het gewas voor extra teelsturing; toepassing van temperatuur-integratie,
- **koelen:** bij Phalaenopsis om planttemperatuur laag te houden, dus dicht bij de plant (onderin), bij tomaat om CO₂ in de kas te houden (mag zowel onderin als bovenin); vernevelen is beperkt aantal uren toepasbaar,
- **ontvochtigen:** zo veel mogelijk met buitenlucht, bij kleine of negatieve verschillen in absolute luchtvochtigheid tussen kas- en buitenlucht of bij gebrek aan beschikbare CO₂: mechanisch koelen en door de zon (dus bovenin) laten herverwarmen van kaslucht,
- **warmteproductie:** bij lage sparksread door warmtepomp, anders door WKK,
- **koudeproductie:** bij voldoende jaarlijkse warmtevraag: door warmtepomp, anders door koeltoren,
- **CO₂:** bij gebrek aan fossiele brandstoffen afkomstig van externe bronnen.

De installaties die zijn aangetroffen bij de verschillende deelnemende tuinders voldoen niet aan al deze eisen. Het ideaalbeeld verschilt daarom per tuinder en is onderhevig aan de omgeving.

Uit oogpunt van duurzaamheid is een klimaatneutrale kas ideaal, waarbij geen fossiele brandstof nodig is en alle elektriciteit groen wordt ingekocht. In economisch opzicht is een kas met een WKK (nog steeds) ideaal. Zonder regelgeving zal een tuinder pas overgaan tot energiebesparing als het economisch voordelig voor hem is.

Koelen past in het algemene plaatje van een semi-gesloten kas. Enerzijds is het doel om de ventilatie te verminderen en anderzijds om warmte te oogsten. Ventilatie beperken en zo CO₂ besparen is technisch en economisch haalbaar indien er koude beschikbaar is. Dit geeft een meerwaarde van ongeveer 4 €/GJ aan beschikbare koude. Deze waarde is net voldoende om de operationele kosten van het maken en produceren van koude te vergoeden, maar onvoldoende om de investeringskosten van een geconditioneerde kas te dekken.

In de Phalaenopsisteelt is koelen noodzakelijk voor de productie. Voor een Phalaenopsisbedrijf heeft koude een zodanig hoge waarde en is de warmtevraag zodanig hoog, dat investering in een warmtepomp al snel loont.

Naast koude levert een warmtepomp ook laagwaardige warmte. Echter, in de huidige energiemarkt heeft laagwaardige warmte slechts een geringe waarde. Oogsten van warmte moet om die reden alleen worden toegepast om de aquifer in balans te houden.

Koelen is om die reden energetisch gezien alleen zinvol als de hierbij geoogste warmte efficiënter kan worden aangewend dan andere beschikbare warmtebronnen. Wanneer dit niet het geval is dan is koeling net als belichting een energievragend productiemiddel.

De verwachting is dat in de toekomst de energiemarkt zal veranderen. Als fossiele brandstof zo duur wordt dat WKK's niet meer rendabel zijn, zijn warmtepompen een alternatief om met weinig elektriciteit warmte te maken, waarbij dankzij de koude beter kan worden omgegaan met het CO₂ niveau in de kas.

Output van het project

- Arkesteijn, M., M. Raaphorst en H. Stolker, 2008. Opbrengst in (semi-)gesloten kassen. Onder Glas. Vol. 12 December 2008.
- Arkesteijn, M., F.L.K. Kempkes en Th.H. Gieling, 2009. Zoeken naar het meest optimale klimaat. Onder Glas. Vol. 2 Februari 2009.
- Arkesteijn, M., F.L.K. Kempkes en Th.H. Gieling, 2010. Geconditioneerd telen: Wat leert ons het monitoring project. Onder Glas. Vol. 2 Februari 2009.
- Campen J.C. en Th.H. Gieling, 2008. Masterclass Koelen en Verwarmen in semigesloten kassen. Energiek2020-nu Event, 2008.
- Campen, J.C., 2009. Masterclass Koelen en Verwarmen in semigesloten kassen. Workshop semigesloten telen Rotterdam.
- Campen, J.B. and F.L.K. Kempkes, 2009. Climatic Evaluation of Semi-Closed Greenhouses. Acta Hort. Greensys 2009 Canada. in print.
- Dieleman, J.A. and S. Hemming, 2009. Energy Saving: from Engineering to Crop Management. Acta Hort. Greensys 2009 Canada. in print.
- Gieling, Th.H., 2008. Posterpresentatie tijdens opening Wageningen UR Glastuinbouw te Bleiswijk
- Gieling, Th.H., 2009. Organisatie Workshop semigesloten telen. Techniek voor tuinder en toeleverancier: Presentaties en discussies tussen tuinders, toeleveranciers en onderzoek. Rotterdam Novotel.
- Gieling, Th.H., 2009. Presentatie van een poster: Klimaat en teelttechniek. Workshop semigesloten telen, Productschap Tuinbouw Zoetermeer.
- Gieling Th.H., J.B. Campen, J.A. Dieleman, N. Garcia, H.J.J. Janssen, F.L.K. Kempkes, J.A.M. Kromwijk, M.G.M. Raaphorst, 2009. Monitoring of Climate Variables in Semi-closed Greenhouses. Acta Hort. Greensys 2009 Canada. in print.
- Kempkes, F.L.K., 2008, 2009. Deelname aan en technische inbreng bij de discussies op de Phalaenopsisbedrijven in project Teeltbegeleiding
- Kempkes, F.L.K., 2009. Semi-closed greenhouse: Pro's and Con's in relation to climate, crop management and systems. Presentations and Masterclass in Guadalajara Mexico.
- Kempkes, F.L.K., 2009. Masterclass koelen en verwarmen bij Phalaenopsis en tomaat. 2 daagse cursus georganiseerd door fa. Hoogendoorn.
- Sapounas A.A., J.B. Campen, F.L.K. Kempkes and Th.H. Gieling, 2009. Influence of Different Air Treatment Systems to the Environment of Semiclosed Greenhouses: Simulation Study of Four Commercial Greenhouses with Pot Plants. Presentation on Greensys 2009, Canada.

1 Voorwoord

Voor u ligt het eindrapport van het project “Monitoring van teeltomstandigheden bij verschillende technische systemen in semi-gesloten kassen”, dat van 01-01-2008 tot 31-12-2009 is uitgevoerd op negen bedrijven in de praktijk. Dit monitoringproject maakt onderdeel uit van een serie projecten binnen het “Versnellingsprogramma implementatie semi-gesloten kas”, dat zich binnen het Programma Kas als Energiebron richt op het wegnemen van obstakels die een snelle acceptatie van het “Nieuwe Telen” in geconditioneerde kassen tegenwerken.

Het monitoringproject is opgezet om inzicht te verkrijgen in de beslissingen die de betrokken tuinders nemen en de problemen die zij tegenkomen bij het besturen van het klimaat in hun geconditioneerde kas. Na een evaluatie halverwege de looptijd is het project uitgebreid met het instrumenteren van een extra biologisch teeltbedrijf en met het – waar mogelijk – inventariseren van de energiestromen op een beperkt aantal van de geconditioneerde bedrijven.

Het project is gefinancierd door het Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Voedselkwaliteit en het Productschap Tuinbouw. Wij bedanken beide instanties voor deze ondersteuning.

Het onderzoek is uitgevoerd samen met de tuinder-ondernemers of hun teeltdeskundigen:

M. van den Hoorn, V. van der Lans, W. Piet, J. Stolk, H. Stolker, J. Raemakers, J. van der Voort en M. van Wingerden.

De onderzoekers binnen dit project bedanken deze ondernemers c.q. teeltdeskundigen voor het beschikbaar stellen van hun tijd en aandacht en voor het gebruik van hun kas met bijbehorende installaties.

Het onderzoek is uitgevoerd door:

- Wageningen UR Glastuinbouw: dr. Th.H. Gieling (projectleider), ir. A. de Gelder, Ing. F.L.K. Kempkes, dr. J.B. Campen, (resp. leiders van workpackage 1, 2 en 3), ir. M.G.M. Raaphorst (contact naar teeltbegeleidingsproject), dr. A. Sapounas, Ing. H.J.J. Janssen en Ing. M.A. Bruins.

Aan dit onderzoek is technische bijstand verleend door:

- Innogrow BV: Ing. B. Douven, Ing. H. Stolker.
- Letsgrow BV: Ir. H. Ammerlaan, Ing. R. van Vianen

Project referentienummers:

PT projectnummer 13107

Thema energieprogramma: Transitiepad programma Kas als Energiebron

Projectnummer Wageningen UR Glastuinbouw: 3242044200.

2 Inleiding

Het programma Kas als Energiebron (KaEB) heeft als ambitie dat in 2020 de nieuw te bouwen kassen energieneutraal en economisch rendabel zijn, dat de fossiele energie daarin sterk is gereduceerd en de glastuinbouw kan optreden als leverancier van duurzame warmte en elektriciteit. Gesloten of semi-gesloten kasconcepten staan hoog genoteerd als het er om gaat de glastuinbouw minder afhankelijk van fossiele energie te maken, met als extra positief accent de potentiële verhoging van de productie of de productkwaliteit. In het transitiepad zonne-energie wordt de ambitie voor de semi-gesloten kas gegeven als 700 ha in 2011 en 2500 ha in 2020.

Het programma KaEB hecht grote waarde aan de inbreng van ondernemers. Een aantal tuinders heeft vanaf het begin geïnvesteerd in het idee van geconditioneerd telen in (semi)gesloten kassen. Samen met de eigen vertrouwde toeleverancier van techniek en besturing zijn door deze ondernemers via een vaak innovatieve aanpak plannen uitgewerkt voor de eigen kas en de eigen omstandigheden. Dit leidde uiteindelijk tot een veelheid van oplossingen. Bij de ondernemers (tuinders en toeleveranciers) ontstond de vraag hoe die verschillende systemen ingrijpen op het kasklimaat en de teelt en of de verschillende beschikbare apparaten wel naar behoren functioneren. Objectief vergelijkingsmateriaal van het gerealiseerde kasklimaat door de verschillende systemen in de praktijk was op dat moment nog niet voorhanden. Semi-gesloten of geconditioneerde kassystemen ondervinden (nu nog) concurrentie van kassystemen die zijn toegerust met een WKK installatie. De verwachting is dat dit bij het dalen van de elektriciteitsprijs t.o.v. de gasprijs zal omslaan in het voordeel van het Nieuwe Telen in een semi-gesloten kas. Bij de beoordeling van het projectvoorstel was het de wens van de beoordelaars dat het project zich zou richten op het monitoren van klimaat en teelt bij een belangrijk hoogopgaand gewas en daarnaast een sierteelt die zich kenmerkt door hoog energiegebruik. Versplintering van het project over teveel sectoren werd afgeraden.

Deze wensen resulteerden in het deelnemen van tuinders met een tomatenteelt, dit eens te meer omdat door een aantal tomatentuinders al in semi-gesloten telen was geïnvesteerd. De Phalaenopsisteelt werd gekozen omdat hier het energiegebruik hoog is en de teeltwijze met een warme en koude afdeling bij uitstek geschikt is voor energiebesparende maatregelen.

Deze overwegingen waren aanleiding voor de onderstaande doelstellingen gericht op energiebesparing en handhaving van de economische positie:

Technische doelstellingen:

- Het objectief meten van horizontaal en vertikaal verdeelde klimaatdata in semigesloten kassen met verschillende technische uitvoeringsvormen. Daarbij wordt aangesloten bij de op dit moment in de praktijk aanwezige systemen zoals: met en zonder buitenlucht-menging, boven en onder inbrengen van koude/warme lucht, gedistribueerde koelers of centraal met verdeelslurven, gebruik van het scherm. Vaststellen van de invloed van de eigenschappen van systeemonderdelen op de verdeling.
- Het gebruik van de meetdata voor het opstellen, kalibreren en valideren van een ruimtelijke beschrijving (CFD-model).

Energiedoelstelling:

- Argumenten aandragen in de discussie rond geconditioneerde kassen en de bijdrage die zij leveren aan de energiebesparing en het terugdringen van het gebruik van fossiele energie.
- De focus van dit onderzoek ligt op belangrijke vragen die de voorlopers hebben, n.l. het gedrag van de klimaatsbepalende variabelen temperatuur/RV verdeling horizontaal en vertikaal, de luchtbeweging en de luchtvochtigheid in de geconditioneerde kassen.
- Hierbij de verticale verdeling continue te monitoren via een vaste opstelling, om zo data aan te leveren aan de discussies met tuinders en de horizontale verdeling. Het meten van de luchtbeweging via de mobiele meetsets, om te worden gebruikt in de beoordeling van de werking van systeemonderdelen en voor de CFD-modelvorming.

3 Selectie van tuinbouwbedrijven

In semi-gesloten kassen is het klimaat en daardoor de klimaatregeling (instelparameters, aangestuurde installaties) anders dan in conventionele Nederlandse kassystemen. Veel kenmerken van de conventionele Nederlandse kassystemen zijn terug te vinden in semi-gesloten kassen. De kasconstructie is bij de meeste semi-gesloten systemen gelijk aan de conventionele kas, al zijn er ondernemingen die (een deel van) de luchtramen hebben weggelaten om meer lichttoetreding in de kas te realiseren. De fysieke ondersteuning, geleiding en irrigatie van het gewas zijn meestal gelijk aan de conventionele Nederlandse kassystemen.

In conventionele Nederlandse kassystemen worden warmte en vocht via ramen in het kasdek afgevoerd. De streefwaarde van de luchttemperatuur en -vochtigheid wordt in de semi-geslotensystemen op verschillende manieren bereikt. Vaak werken semi-geslotensystemen met Luchtbehandelingskasten (LBK's), die in veel variaties beschikbaar zijn. LBK's worden ingezet om te verwarmen, te koelen, te bevochtigen en te ontvochtigen. Tussen LBK's bestaan wezenlijke verschillen in capaciteit, distributiesysteem en plaatsing in de kas. De drie manieren van luchtbehandeling zijn:

1. opblaasbare plastic slurven, die via gaten de behandelde lucht zo gelijkmatig mogelijk door de kas verdelen,
2. plaatsing van LBK's lokaal in de kas (centraal, decentraal, boven of onder gewas of teelttafel)
3. toepassen van hogedrukverneveling.

Enkele ondernemers passen ventilatoren uit conventionele Nederlandse kassystemen toe ter ondersteuning van de luchtverdeling. Daar waar de behandelde lucht in de kas wordt gebracht is een splitsing te maken tussen luchtinbreng onder in dan wel boven in de kas. Bij vrijwel alle systemen is rekening gehouden met optimalisatie van de distributie van behandelde lucht.

3.1 Criteria voor de selectie

Voorloper-ondernemers, de innovators, installeerden de eerste systemen. Zij pasten een aantal, van elkaar verschillende, technische systeemoplossingen toe. Welke technische oplossingen het beste bij hun teelt en hun bestaande teeltsysteem pasten, werd mede bepaald door inzichten die ontstonden door discussies met collega-ondernemers. Ook de adviezen van betrokken installatiebedrijven zijn meegenomen. Vroege volgers, "early adaptors", die gestimuleerd werden via de MEI-regeling, keken sterk naar de resultaten van deze voorlopers. Voor dit monitoringproject werden bedrijven geselecteerd zowel uit de groep voorlopers als uit de groep vroege volgers.

Bij de start van het project waren acht bedrijven betrokken bij het gelijktijdig monitoren van het klimaat: vier Tomatenbedrijven en vier Phalaenopsisbedrijven.

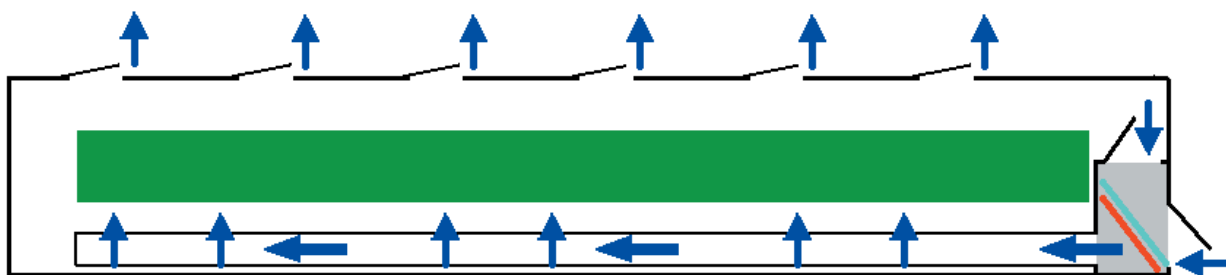
De tomatenbedrijven werden geselecteerd op basis van de installaties in de aanwezige semi-gesloten afdeling dan wel "open" afdeling. Bedrijven die Phalaenopsis kweken dienden te beschikken over een warme en of gekoelde afdeling. Gedurende de laatste negen maanden van het project is op verzoek van de opdrachtgevers een biologisch teeltbedrijf hier aan toegevoegd. Ook werd het project uitgebreid met het monitoren van de energiestromen op een aantal van de bedrijven.

Samengevat: In totaal zijn negen bedrijven betrokken bij het monitoren. Van deze negen bedrijven zijn vier gespecialiseerd in de teelt van tomaten, vier in de teelt van Phalaenopsis en één bedrijf teelt verschillende vrucht- en vollegrondsgroenten volgens biologische teeltmethoden.

Namen van bedrijven worden in deze rapportage achterwege gelaten. Om in de besprekingen onderscheid te kunnen maken is aan elk bedrijf een nummer toegekend. De tomatenbedrijven zijn genummerd van 1 tot en met 4, zoals hieronder beschreven in Tabel 1. De Phalaenopsisbedrijven zijn genummerd van 5 tot en met 8, zoals hieronder beschreven in Tabel 2. Het biologisch bedrijf wordt aangeduid met nummer 9.

3.2 Bedrijfskeuze

Bij de tomatentelers wordt op drie bedrijven gewerkt met gecentraliseerde luchtbehandelingkasten met luchtdistributie door slurven onder het gewas (Figuur 6). Bedrijf 1 heeft de mogelijkheid van bovenkoeling door middel van decentrale LBK's. Dit bedrijf heeft ook het aantal luchtramen zeer beperkt. Bedrijf 2 heeft de mogelijkheid om water te vernevelen boven het gewas. Bedrijf 4 werkt met decentrale boven-koeling d.m.v. LBK's en verneveling boven het gewas. Bij alle tomatenbedrijven is de energiehuishouding van het gesloten deel gecombineerd met een conventionele kas. De tomatenbedrijven kunnen scherminstallaties gebruiken om de kas te isoleren. Een samenvatting van de verschillende systemen bij de tomatenbedrijven is weergegeven in Tabel 1.

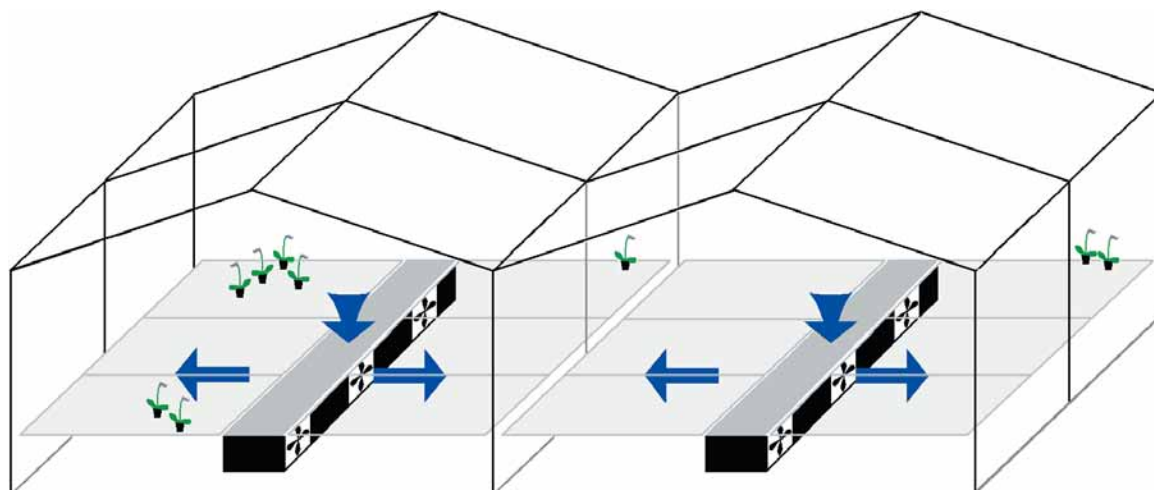


Figuur 6. Zijaanzicht van een gesloten kas (bedrijf 2) met gecentraliseerde LBK's. Distributie van behandelde lucht geschiedt met slurven. De blauwe pijlen geven mogelijke luchtstromen aan, het groene vlak vertegenwoordigt het gewas en de LBK is grijs gekleurd, met een koelelement in lichtblauw en een verwarmingselement in het rood.

Tabel 1. Gegevens van de semi-gesloten systemen bij de deelnemende tomatenbedrijven.

Bedrijf	Gecentraliseerde LBK's, distributie door slurven onder het gewas	Decentrale LBK's met vrije uitblaas	Verneveling boven het gewas
1	X	X	
2	X		X
3	X		
4		X	X

De Phalaenopsisbedrijven telen alle vier op teelttafels. Bij de eerste twee Phalaenopsisbedrijven wordt de koeling onder de tafels ingebracht door middel van gedecentraliseerde LBK's (Figuur 7), bij de derde door middel van gecentraliseerde LBK's met distributie onder de teelttafels door middel van slurven. Bij het vierde bedrijf wordt de koeling boven de teelttafels ingebracht door middel van decentrale LBK's met vrije uitworp. Twee Phalaenopsistelers hebben de mogelijkheid om de kaslucht te bevochtigen door middel van verneveling. De bedrijven zijn uitgerust met meerdere schermen, die overdag ingezet kunnen worden om de instraling te beperken en gedurende de nacht om de kas te isoleren. Drie van de vier krijgen de kas in de zomer standaard, terwijl één afhankelijk van de omstandigheden kiest voor het wel of niet krijgen. In Tabel 2 staat een samenvatting van de verschillende semi-gesloten systemen zoals deze bij de Phalaenopsistelers zijn geïnstalleerd.



Figuur 7. Semi-gesloten kas van Phalaenopsisbedrijf 5. In deze kas wordt de behandelde lucht onder de teelttafels ingebracht. De blauwe pijlen geven de stromingsrichting rond de luchtbehandelingkasten weer.

Tabel 2. Gegevens van de semi-gesloten systemen bij de deelnemende Phalaenopsis bedrijven.

Bedrijf	LBK's, boven het gewas met vrije uitblaas	LBK's, distributie door slurven onder het gewas	LBK's met vrije uitblaas	Verneveling boven het gewas
5			X	X
6			X	
7		X		
8	X			X

4 Meetsystemen

4.1 Tomatenbedrijven

De meetuitrusting op de tomatenbedrijven is overal gelijk en zijn uitgevoerd als I4all (LetsGrow) meetpalen, in overeenstemming met het vooraf uitgewerkte meetplan (Kipp et al., 2008). De meetpalen zijn uitgerust met een GPS modem om de verzamelde data naar de Letsgrow-database door te sturen. Op de meetpalen zijn 3 meetboxen bevestigd met meetboxen voor temperatuur en elektronische vochtmeting. Daarnaast omvat de meetopstelling een planttemperatuurmeter, een PAR-sensor en een WET-sensor. In Figuur 8 is een I4all meetpaal met nog twee meetboxen, de PAR-sensor en de planttemperatuurmeter zichtbaar weergegeven.



Figuur 8. Overzicht meetpaal op tomatenbedrijf 2.

De technische specificaties van deze meetpalen zijn in Bijlage 1 opgenomen. De locatie van de meetpalen, dus ook de keus welke afdelingen als referentie in de open en welke vergelijkingsafdeling in de “gesloten” kas gekozen worden, zijn in onderling overleg met de ondernemer bepaald. Ervaring met klimaatverschillen in de kas en de aanwezigheid van alle gewenste klimaat- en setpointinstellingen in de klimaatcomputer hebben hierbij de doorslag gegeven. De locaties van de meetinstallaties op de bedrijven is in Bijlage 2 opgenomen.

4.2 Phalaenopsisbedrijven

De Phalaenopsisbedrijven zijn pas in een tweede fase van meetinstallaties voorzien, nadat hiermee op de tomaten bedrijven ervaring was opgedaan. De opzet van de meetuitrusting op de Phalaenopsisbedrijven is om die reden anders aangepakt dan op de tomatenbedrijven. Ook is het gebruik van een meetpaal in de opzet van de Phalaenopsisbedrijven niet mogelijk omdat er op roltafels wordt geteeld.

Bovendien zijn de PAR-sensoren op deze bedrijven niet statisch maar beweegbaar over de tafel in de bedrijfsuitrusting opgenomen. Dit resulteert in een nauwkeuriger beeld. Om beide redenen is ervoor gekozen om de extra benodigde meetapparatuur door de huisinstallateur te laten plaatsen. De camera's voor het meten van de planttemperatuur zijn van het zelfde type en leverancier als bij de I4all meetpalen. De gebruikte meetboxen zijn overeenkomstig de standaard meetboxen die op de bedrijven in gebruik zijn. Ze voldoen allen aan de GLK normering (GLK 8, NKO-geijkte sensoren).

4.3 Aanvullende meetsystemen voor extra proeven

Voor de metingen aan de horizontale- en verticale-temperatuurprofielen is gebruik gemaakt van Sownet-sensoren (Sownet, 2007). De sensoren zijn in een grid geplaatst zodat, afhankelijk van het op het bedrijf aanwezige systeem, de temperatuur- en vochtprofielen bepaald konden worden. Hierbij is duidelijk onderscheid gemaakt tussen tomaat en Phalaenopsis daar het tomatengewas een hoog opgaand gewas en Phalaenopsis een compact gewas is. De dataverzameling is met de bijgeleverde software uitgevoerd. De meet-PC is op afstand via het internet toegankelijk gemaakt om de werking en vordering van de metingen te kunnen monitoren. Deze metingen zijn op die bedrijven uitgevoerd waar ook de grootste impact van de conditioneringssystemen op het kasklimaat te verwachten waren. Behalve voor het bepalen van de kasluchttemperatuur en RV is dit systeem ook ingezet om het temperatuurverloop in de luchtslangen, waar van belang, te bepalen.

In de tomatenteelt is het verticale temperatuurpatroon al onderwerp van discussie zolang al over conditionering van de kas gesproken wordt, in het bijzonder met betrekking tot de uitgroeiduur van de rijpende vruchten. Om hier beter inzicht in te krijgen zijn op verzoek van, en in overleg met, de tuinder van tomatenbedrijf 1 kunstvruchten "SensorTom" geïnstalleerd (Hortimax, 2008). In zowel de open als de gesloten afdeling is een set van drie vruchten op drie hoogten gemonteerd. De bovenste bij de hoogste bloeiende tros, de middelste in het midden van het bladpakket en de onderste bij de rijpende vrucht. De SensorTom meet twee temperaturen, één oppervlakte- en één kerntemperatuur. De data zijn door een eigen meet-PC verzameld en via LetsGrow aan de tuinder en de teeltbegeleider beschikbaar gesteld.

4.4 Data-aquisitie, -verwerking en -opslag

Bij een grootschalig monitoring- en meetproject is een uniform verzamel- en verwerkingssysteem een voorwaarde voor goed resultaat. Daarom is gekozen om gebruik te maken van een systeem zoals LetsGrow. Bij dit systeem wordt op de klimaatcomputer bij de deelnemer een programma geïnstalleerd die de gewenste parameters verstuurd naar een database. Hierbij wordt een meetinterval van vijf minuten aangehouden. De te meten variabelen, ca. 75 tot 100 per bedrijf, worden in overleg met de ondernemer en de teeltbegeleider op het bedrijf vastgesteld. Via internet kunnen deelnemers de geselecteerde parameters van het eigen maar ook van de collegabedrijven bekijken, om zo gevoel te krijgen over het klimaat bij de collega-ondernemer.

Uit deze centrale database is via een automatische procedure ieder uur de data gedownload en in een locale database geplaatst. Reden hiervoor is: i) te kunnen beschikken over de mogelijkheid om berekeningen aan de verzamelde gegevens uit te voeren, ii) tijdbesparing in de verwerking te realiseren en iii) onafhankelijk te worden van het internet. Voor de analyse van de verzamelde gegevens en het aanleveren van gegevens voor het teeltbegeleidingproject is universele programmatuur ontwikkeld, die het vergelijken van bedrijven vereenvoudigt.

4.5 De instrumenten en de meetkwaliteit

Als onderdeel van de metingen bij de tuinders is door LetsGrow een onderhoudsschema opgesteld waarin voor het jaar 2010 een kalibratie van alle sensoren is opgenomen. In het najaar van 2009 zijn op drie bedrijven controlemetingen uitgevoerd om een beeld te krijgen van de kwaliteit van de metingen en om na te gaan of de sensoren ter plekke gekalibreerd kunnen worden. De resultaten van deze metingen zijn vastgelegd in Bijlage 3. De planning rondom de kalibratie van de sensoren kan een probleem vormen. Uitwisseling is eigenlijk alleen mogelijk tijdens teeltwisseling. De kalibratieprocedure moet aan het begin van het onderzoek al vast liggen. Bontsema *et al.* (2005) beschrijven de noodzaak van goede metingen in relatie tot energiebesparing.

Het vochtdeficit is in Bijlage III als berekende waarde aan de tabel toegevoegd.

De resultaten van de controlemetingen aan de meetpalen geven aan dat een enkele gecombineerde T- en RV-sensor net buiten de specificatie valt. De afwijking in RV ligt binnen +5/-5%, waar +3/-3% normaal is. De nauwkeurigheid is niet over het hele meetgebied constant maar varieert van $\pm 3\%$ bij lage RV tot $\pm 5\%$ bij hoge RV. De sensoren moeten regelmatig

gecontroleerd worden om fouten te beperken. De controlemetingen kunnen ter plaatse niet worden uitgevoerd zonder de installatie deels te ontmantelen.

Als gevolg van luchtstromingen die ontstaan door ventilatie en door de warme droge lucht aanvoer door luchtslangen zijn T en RV in de kas niet constant. De veranderingen tijdens de controlemeting zijn zodanig dat ze alleen als indicatie voor goed of slecht functioneren te gebruiken zijn. Voor kalibreren is een “stabiele situatie” gewenst. Vooral in afdelingen met luchtslangen treden kleine maar tamelijk snelle fluctuaties in T en RV op. Het langzaam onnauwkeurig worden van elektronische T- en RV- sensoren over een langere periode (bijvoorbeeld een jaar) is een extra probleem. Daarom moeten de sensoren twee keer per jaar worden gecontroleerd. In overleg met de leverancier is een schema opgesteld om de sensoren periodiek bij een gecertificeerde instantie te laten kalibreren. Daarbij wordt elke sensor in de meetpaal periodiek door een gekalibreerd exemplaar vervangen. Dit is ter plaatse uit te voeren en garandeert de continuïteit van de metingen.

De meting van de ruimtelijke verdeling van T en RV is met een set draadloze sensoren uitgevoerd. De set is aan het begin van de proef in een klimaatkamer gecontroleerd op correcte werking. Deze sensoren zijn beurtelings bij de betreffende tuinders geïnstalleerd. Voorafgaand aan elke meetserie is de set draadloze sensoren voorzien van nieuwe batterijen en gedurende minimaal één dag gecontroleerd op afwijkingen. Draadloze sensoren zijn storingsgevoeliger dan bedrade sensoren. Daarom is de werking van de draadloze sensoren via het Letsgrow netwerk op afstand regelmatig gecontroleerd.

Alle metingen zijn tijdens de verwerking van de data steeds gecontroleerd op betrouwbaarheid via een inschatting van meetwaarde die verwacht mag worden. Bij sterke afwijking van één meetpunt in de meetgrid zonder verklaring van de afwijking, is het betreffende meetpunt weggelaten in de verdere analyse. De metingen zijn niet absoluut geïnterpreteerd, maar de conclusies t.b.v. de teeltstrategieën zijn gebaseerd op trends. Bij een constante meetfout van enkele procenten mag de trendlijn dan weliswaar iets verschoven liggen, maar de trend blijft hetzelfde.

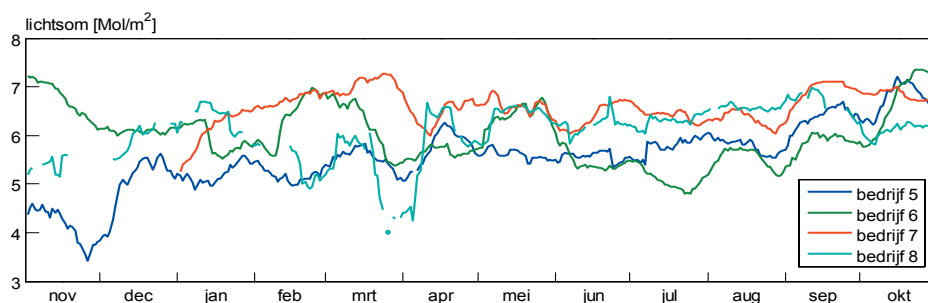
Bij diffuus en bewolkt weer is het lichtniveau in de kas laag en onvoldoende stabiel om een PAR-sensor in een kas goed te kunnen controleren met behulp van een geijkt exemplaar. Er is geen betaalbare en handzame methode om lokaal te kalibreren, die aan de normen voldoet,

De stralingstemperatuursensor voor het bepalen van de bladtemperatuur is gecontroleerd met behulp van een tweepuntmeting: een zwartstraler van 39 °C als eerste ijkpunt en smeltend ijs als nulpunt. Deze ijkmeting gaf aan dat de sensoren stabiel waren en de foutmarge ruim binnen de specificaties lag.

De sensoren op de meetpalen zijn minder storingsgevoelig omdat ze zijn aangesloten met korte kabels.

4.6 Aanleveren van data aan project teeltbegeleiding

Voor zowel individuele- als voor groepsbesprekingen bij het parallel lopende project “Teeltbegeleiding” is gebruik gemaakt van de gegevens die in het monitoringproject zijn verzameld. Voor de groepsbesprekingen is vaak gefocust op klimaatovergangen zoals dag / nacht, vochtthuishouding in de kas en toelaten van licht. Ook werd naar jaaroverzichten gekeken. In Figuur 9 is een voorbeeld van een jaaroverzicht van de gerealiseerde lichtsom weergegeven. De teeltbegeleiders kregen de gewenste data, verbouwd in EXCEL-documenten, aangeboden.



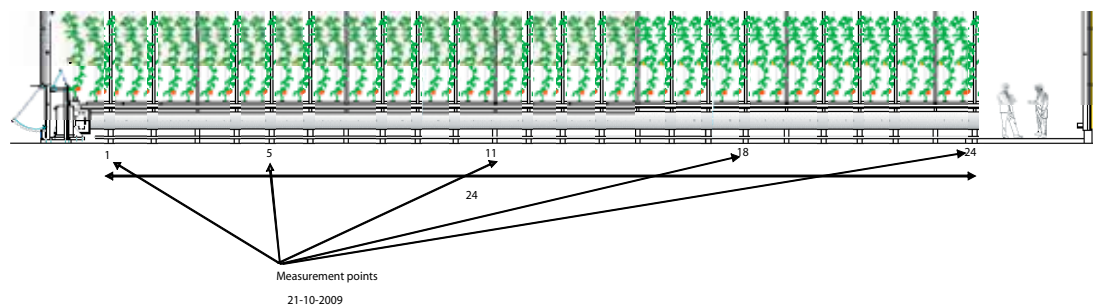
Figuur 9. De gerealiseerde lichtsom op de 4 Phalaenopsisbedrijven van november 2008 tot oktober 2009.

5 Onderzoek naar technische systemen

Semi-gesloten kassystemen zijn aantrekkelijk omdat het mogelijkheden biedt om de glastuinbouw minder afhankelijk te maken van fossiele brandstoffen. Door kassen meer gesloten te houden, ook bij hoge instraling, is een verhoging van de CO₂-concentratie mogelijk, wat aanleiding kan zijn voor productieverhoging. Ook geeft de semi-gesloten kas mogelijkheden tot een hogere mate van controle op het klimaat wat vooral bij de Phalaenopsis teelt van groot belang is om ook in de zomer bloemtakken te kunnen ontwikkelen. Ook is de ziektedruk lager omdat minder met buitenlucht wordt geventileerd.

5.1 Testen van de slangopeningen

Tijdens het onderzoek was er discussie over de openingen in de slangen. Het betrof zowel de plaats in de slang als de grootte van de opening. Factoren van invloed zijn de luchtdruk en de stromingssnelheid van de lucht in de slang. Een elektronische pitotbuis is gebruikt om de druk en de luchtsnelheid in de luchtslangen te meten. In Figuur 10 zijn de plaatsen aangegeven waar gemeten is met de pitotbuis.



Figuur 10. Locaties in de slangen waar gemeten is met een pitotbuis

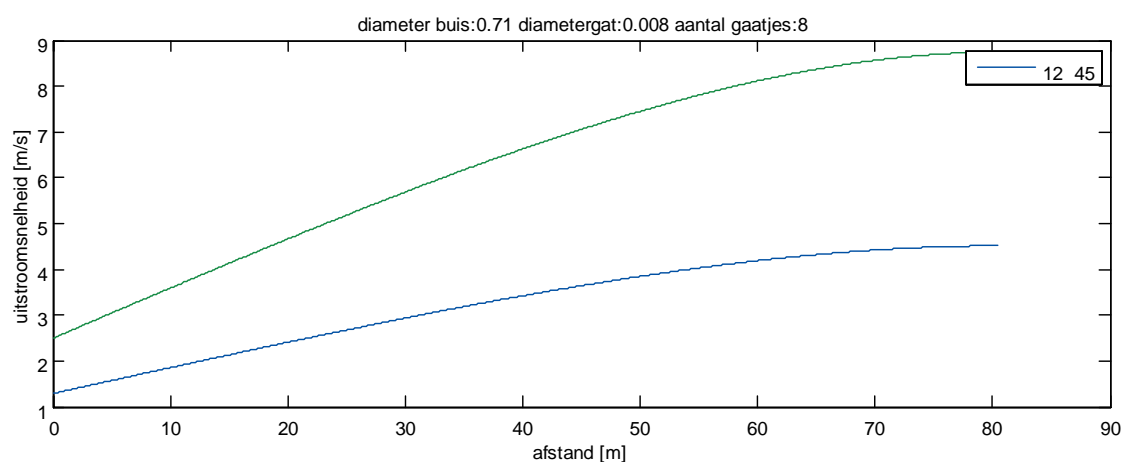
Op verschillende locaties in de slang is de statische druk gemeten. De uitstroom uit een slang met gaatjes hangt af van de statische druk in de slang bij het gaatje. Deze statische druk hangt af van de drukverdeling in de totale slang. De druk in de slang wordt bepaald door een statische component en een dynamische component. De dynamische druk $P_{\text{dynamisch}}$ samen met de luchtsnelheid v , volgens:

$$P_{\text{dynamisch}} = \frac{1}{2} \rho v^2, \text{ waarin } \rho \text{ de dichtheid van de lucht is.}$$

Aan het begin van de slang waar de lucht wordt ingeblazen is de dynamische druk hoog en daarmee de statische druk laag. In dit deel van de slang komt relatief minder lucht uit de gaatjes dan aan het eind van de slang. Bij een geringe opening van alle gaatjes ten opzichte van het doorstromend oppervlak van de slang, zijn de verschillen over de slang gering. Wanneer beide oppervlaktes gelijk zijn dan zijn de verschillen nog acceptabel. Als het oppervlak van de gaatjes groter is dan het doorstromende oppervlak van de slang, dan wordt slecht verdeeld. Vaak wordt voor een ongeveer gelijk oppervlak gekozen, omdat de ventilator hierbij minder druk hoeft op te bouwen dan bij een geringer aantal gaatjes, wat energie zuiniger is. Ook kan de ventilator nog een effect hebben op de luchtsnelheid in het begin van de slang. De werveling die de ventilator veroorzaakt kan ervoor zorgen dat de luchtsnelheid langs de gaatjes groter is dan de luchtsnelheid in de richting van de slang alleen. De hoeveelheid lucht ϕ_v [m³ s⁻¹], die uit de gaatjes stroomt, kan worden gekoppeld aan de statische druk $p_{\text{statische}}$ door:

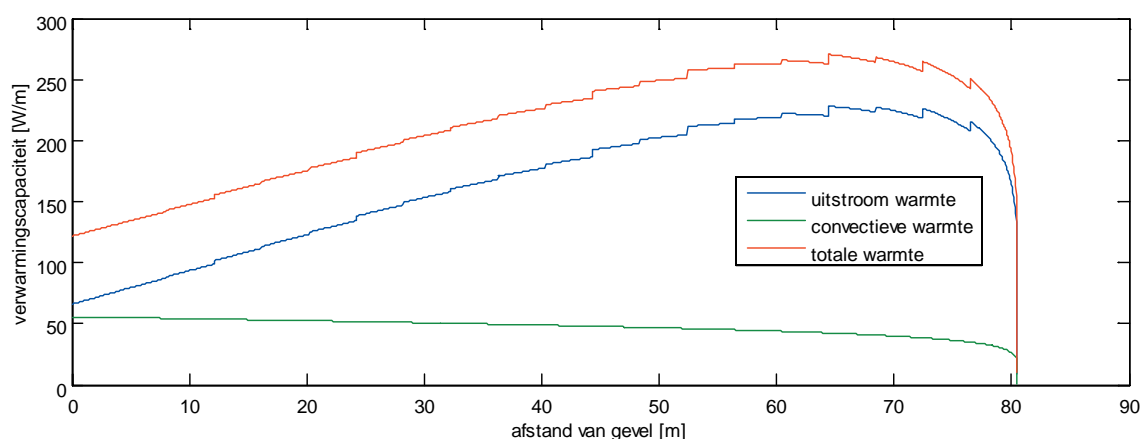
$$\phi_v = 0.6 A_{\text{gat}} \sqrt{\frac{2p_{\text{statisch}}}{\rho}}, \text{ waarin } A_{\text{gat}} \text{ het oppervlak van het gaatje is.}$$

Figuur 11 laat de uitstroom uit een 80 m lange slang met een diameter van 71 cm zien met acht gaatjes met een diameter van 8 mm zijn gemaakt. De verdeling van de gaatjes vergelijkbaar met de slang die bij bedrijf 2 is geïnstalleerd. Het oppervlak van alle gaatjes is hier ongeveer gelijk aan de doorsnede van de slang. Te zien is dat de uitstroom gelijkmatig is verdeeld. De uitstroom is berekend voor twee startdrukken. Verhoging van de frequentieregeling van 50% naar 90% verdubbelt het luchtdebiet. De druk wordt 3.75 maal zo groot. Dit betekent dat het elektriciteitsverbruik acht maal zo groot wordt.



Figuur 11. Berekende uitstroom op basis van de druk gemeten in de slang nabij het pad voor 50% (12 Pa) en 90% (45 Pa) draaien (gemeten t.o.v. de gevel).

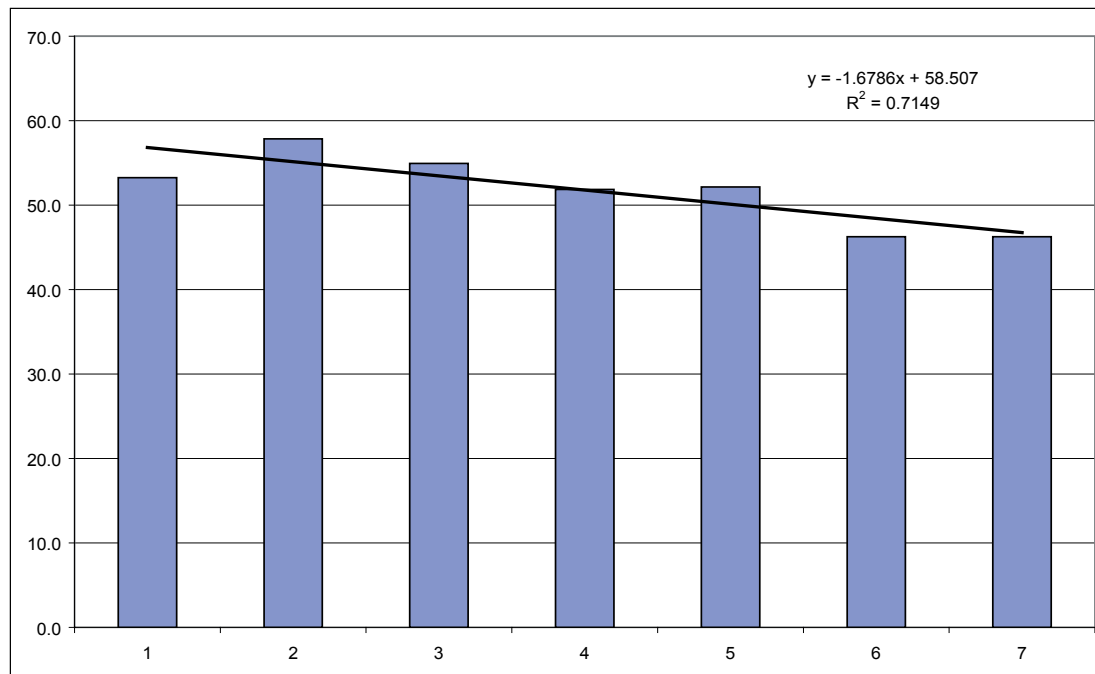
Hoe de uitstromende lucht zich beweegt hangt af van de omgeving waar de uitstroom plaatsvindt en van de temperatuur van de uitstromende lucht ten opzichte van de omgevingstemperatuur. De omgeving kan ervoor zorgen dat de lucht direct wordt afgeremd bijvoorbeeld omdat er bladeren dicht bij de slang hangen. Wanneer de lucht vrij uit kan stromen dan zal de snelheid ervan ook snel in grootte afnemen. Koude lucht daalt en warme lucht stijgt. Als koude lucht wordt uitgeblazen en de slang zich bij de grond bevindt dan zal de lucht zich daar verspreiden. Wordt warme lucht uitgeblazen dan zal deze lucht omhoog gaan. Figuur 12 laat de warmteafgifte van de slang zien als gevolg van uitstroomde lucht en als gevolg van de convectieve warmte t.g.v. de temperatuur van de slang zelf. De warmteafgifte is groter aan het eind van de slang.



Figuur 12. Warmteafgifte van de slang in relatie tot de afstand van de gevel.

Een drukmeting in de luchtslang geeft veel informatie over de verdeling van de uitstromende lucht. In Figuur 13 is te zien dat de statische druk in de gehele slang ongeveer gelijk is. Dit heeft als gevolg dat de uitstroom per gaatje van dezelfde grootte ook gelijk is. Een gelijkmatige statische druk over de slang betekent dat de drukval over de slang t.g.v. de eigen

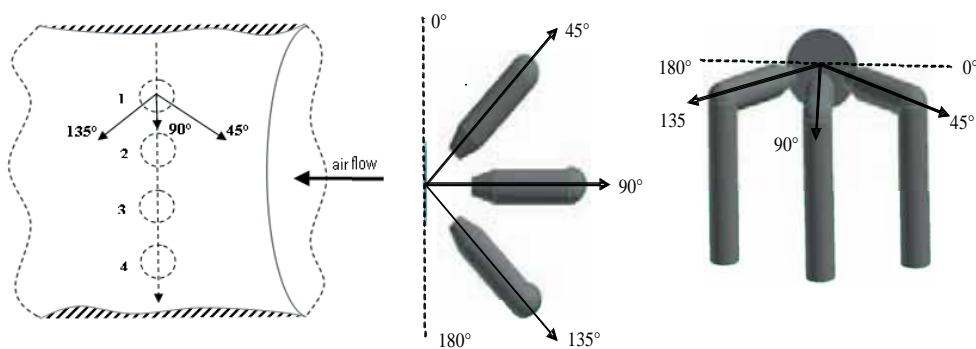
weerstand voor luchtdoorstroming klein is. De slang-diameter is dus groot genoeg voor de hoeveelheid lucht die door de slang wordt gepompt. De diameter van de slang en het aantal gaatjes in de slang is hiervoor bepalend. De statische druk wordt geleverd door de ventilator. Bij een gelijkmatige statische druk geeft aan dat de ventilator een overdruk in de slang heeft opgebouwd. Dit heeft tot gevolg dat de ventilator tegen de overdruk in moet werken. Dit kost meer elektrische energie bij hogere overdruk.



Figuur 13. Statische druk in de slang (Pa)

De luchtsnelheid in de slang kan ook berekend worden met drukmetingen. Uit het verschil tussen statische en dynamische druk kan de snelheid worden berekend. Deze luchtsnelheid is onder verschillende hoeken gemeten ten opzichte van de slang (Figuur 14).

Uit de metingen volgt dat de snelheid en de richting van de uitblaas wordt bepaald door zowel de statische druk in de slang als door de luchtsnelheid in de slang. In Figuur 14 is aangegeven hoe en waar de luchtsnelheid uit de gaten is gemeten. In Tabel 3 is aangegeven welke luchtsnelheden onder verschillende hoeken werden gemeten.

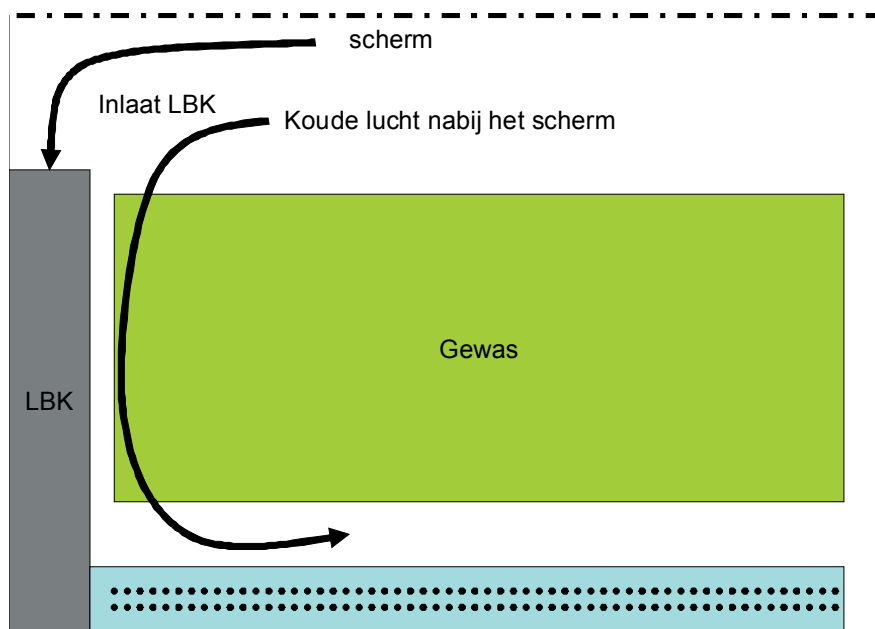


Figuur 14. Luchtsnelheidmetingen die zijn uitgevoerd in de luchtslang

Tabel 3. Maximale, minimale en gemiddelde luchtsnelheid onder verschillende hoeken ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Hoek	Min	Max	Gemiddeld
45	4.2	5.55	4.875
90	9.275	9.825	9.55
135	9.475	10.225	9.85

De metingen laten zien dat de lucht onder een hoek uit de slang komt in het deel van de slang dat zich nabij de ventilator bevindt. In het ontwerpstadium werd aangenomen dat de lucht loodrecht uit de slang zou komen. De luchtsnelheid in de ventilatorslang naar het pad zorgt ervoor dat dit niet gebeurt. Aan het einde van de slang is de luchtsnelheid in de slang kleiner en komt de lucht loodrecht uit de slang. Door het niet loodrecht uitstromen van de lucht ontstaat er een luchtstroom beneden in de kas van de gevel in de richting het pad (Figuur 15).

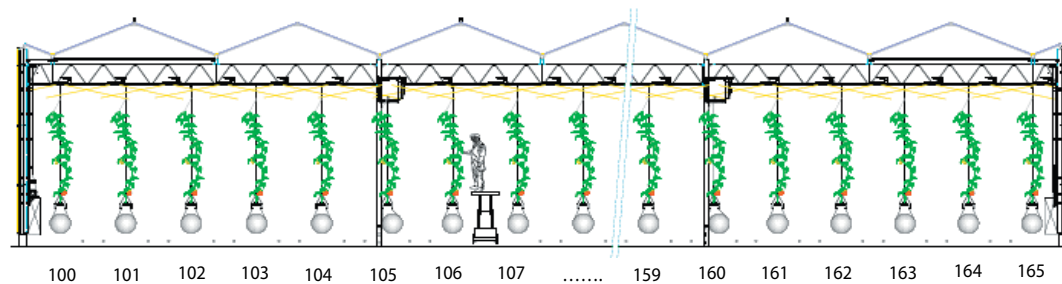


Figuur 15. Gedrag van de luchtbeweging uit de slang nabij de LBK.

De uitstromende lucht zorgt ervoor dat er een secundaire luchtstroom ontstaat, waarbij koude lucht van boven in de kas naar beneden wordt gezogen. Met rookproeven was deze luchtstroom, parallel aan de slang onderin de kas, duidelijk te zien. Door deze luchtstroming worden de eerste vakken van de kas (ongeveer 10-15 m) niet goed verwarmd, waardoor veel Botrytis kan optreden. De meetresultaten staan in Bijlage VIII.

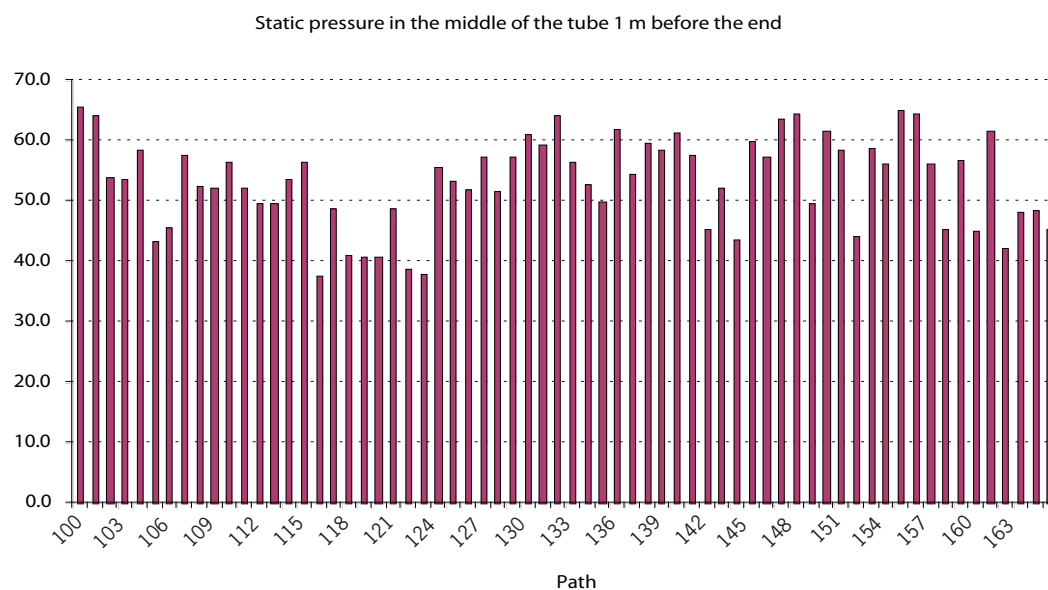
Dit probleem is opgelost door parallelle luchtstroom te voorkomen. Door schotten te plaatsen loodrecht op de slang kan dit worden opgelost, echter, dit is praktisch niet goed uitvoerbaar. Door de gaten onderin de slang te plaatsen kunnen de schotten onder de slang worden aangebracht. Deze oplossing is praktisch uitvoerbaar. Vergroten van de slang (diameter) verkleint ook de luchtsnelheid in de slang maar deze oplossing is niet praktisch uitvoerbaar (plaatsgebrek).

De verschillen tussen de slangen onderling zijn bepaald door de statische druk aan het eind van de slang te meten (Figuur 16).



Figuur 16. Representatie van de luchtslangen in de verschillende paden van de kas.

Figuur 17 laat zien dat de druk in de verschillende slangen niet gelijk is. Dit komt door het grote aantal scheuren in de verschillende slangen, waardoor veel lekverlies optreedt. De luchtverdeling wordt hierdoor negatief beïnvloed.



Figuur 17. Statische druk aan het eind van alle slangen.

Uit bovenstaande analyse van de slangen komt naar voren dat klimaatbeheersing met slangen niet eenvoudig is en ook tot een hoger energiegebruik leidt. Toch wordt vaak voor slangen gekozen, omdat de units voor luchtbehandeling dan aan de gevel van de kas geplaatst kunnen worden. Zo blijft het lichtverlies en de ruimtebenutting beperkt. Deze voordelen moeten de beschreven nadelen compenseren.

Conclusies ten aanzien van de luchtslangen

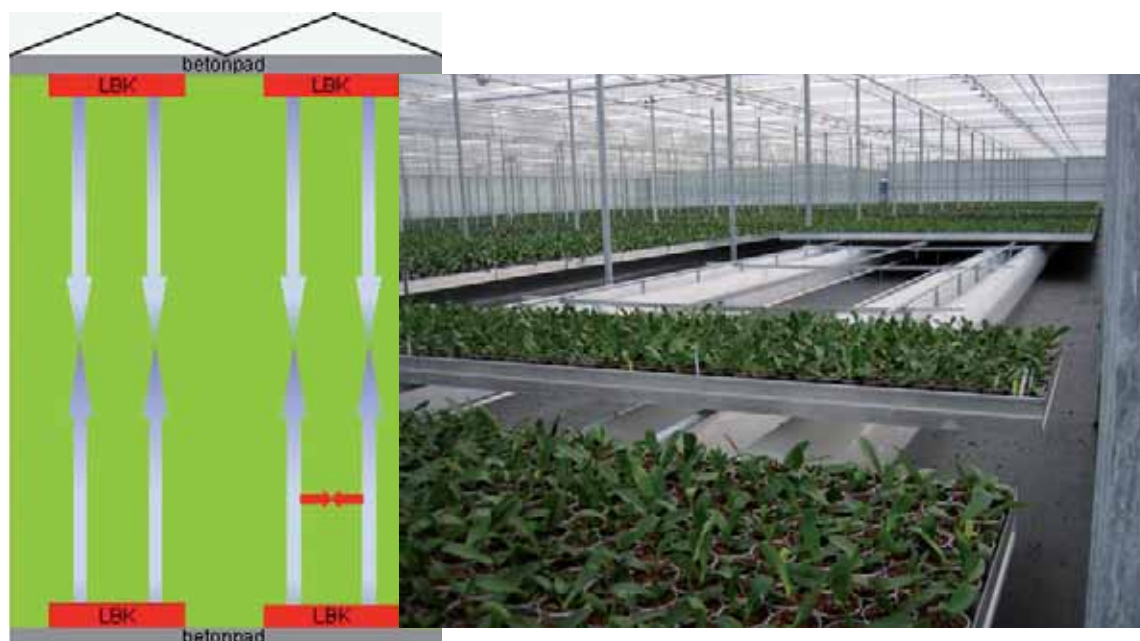
- De uitstroom uit de slangen en de warmteverdeling is te berekenen.
- In de praktijk is de uitstroom uit de gaten anders dan verwacht. De richting van de luchtstroom uit de gaten hangt sterk af van de snelheid waarmee de lucht zich door de slang beweegt.
- Scheuren in de slang zorgen voor een ongelijkmatige verdeling van de uitstromende lucht. Een systeem met luchtslangen is kwetsbaar op dit punt.
- Een parallelle luchtstroom aan de luchtslang zorgt ervoor dat koude lucht van bovenin de kas naar beneden wordt gebracht met als gevolg een slechte temperatuur en vochtverdeling.
- Met de juiste gatenverdeling kan een goede warmte- en/of koudeverdeling worden gerealiseerd.
- Een goede luchtverdeling is met slangen te realiseren maar gaat gepaard met hoger elektriciteitsgebruik.

5.2 Horizontale en verticale verdeling T en RV

Tijdens dit project zijn op zeven van de negen geselecteerde bedrijven één of meerdere keren metingen aan de horizontale en verticale temperatuur- en vochtverdeling uitgevoerd. Deze metingen zijn uitgevoerd met de in paragraaf 3.3 beschreven draadloze sensoren. In de volgende paragrafen zullen enkele specifieke resultaten worden toegelicht. In Bijlage VI zijn de meetresultaten per bedrijf gegeven.

5.2.1 Temperatuurverdeling bij een LBK met slang

Bij bedrijf 7 is in de periode van 24 juli t/m 20 augustus 2009 in de koelafdeling (zie Bijlage II) in twee fasen de horizontale temperatuurverdeling gemeten. De Venlokas met een 8 m tralie is voorzien van vier LBK's per tralie die naast het betonpad zijn geïnstalleerd. De padlengte (van betonpad tot en met betonpad) is 96 m en de breedte van de afdeling is 64 m. In Figuur 18 is de opstelling van de LBK's in de kas en de verdeling van de verdeelslangen weergegeven. De LBK's, aan de kopzijdes van de kas, blazen van beide kanten één luchtslang in als alle ventilatoren aan staan. Het systeem kan handmatig op halve kracht draaien, dan wordt van iedere LBK één van de twee ventilatoren uitgeschakeld waardoor één ventilator een hele slang van geconditioneerde lucht voorziet.



Figuur 18. Overzicht lay-out LBK's en verdeelslangen in één tralie bij bedrijf 7.

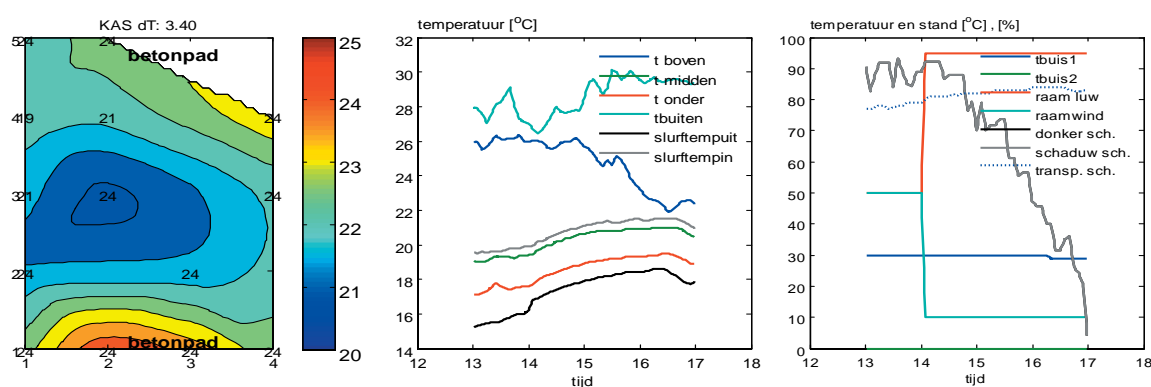
Naast de LBK's met de luchtslangen zijn er per tralie ook nog 4 x 51 mm buizen-onder en 2 x 71 mm buizen boven de tafel als buisverwarming geïnstalleerd.

Zoals in Bijlage II voor dit bedrijf is aangegeven, is deze koelafdeling aan de zuidkant ingesloten door een afweekafdeling, die meestal 1 °C warmer gestookt wordt dan de gemeten koelafdeling. De "tussen"-afdeling, ten Noorden van de koelafdeling, wordt meestal als koelafdeling ingezet.

De temperatuurverdeling is zowel op afdelings- als op tafelschaal gemeten. Doordat de ventilatoren in de LBK veel lucht (m³) verpompen, is de verwachting dat precies tussen twee slangen (zie rode pijl in Figuur 18 of Figuur 21) een geforceerde luchtstroom door de tafel ontstaat. De slangen vullen onder de tafel vrijwel de gehele hoogte tussen bodem en onderkant tafel.

De afdeling is in een grid van 4 bij 5 sensoren gemeten en de tafel in een grid van 5 bij 3 sensoren.

tijdens de meetperiode lagen de maximumtemperaturen buiten tussen 18 en 32 °C. Het patroon in de temperatuurverdeling was vrijwel onafhankelijk van de buitenomstandigheden maar heeft overdag een vrijwel vast patroon. Hierbij konden de temperatuurverschillen in de afdeling fors oplopen. In Figuur 19 is een voorbeeld van de temperatuurverdeling op een warme middag (19 augustus 2009) gegeven. In de contourplot is de gemiddelde temperatuur op de verschillende locaties tussen 14:00 en 16:00 uur in de afdeling gegeven. Daarnaast is informatie over het kasklimaat op drie hoogten, aanzuigen en uitblaas temperatuur van de LBK, scherm- en raamstanden en buistemperaturen gegeven. Deze additionele informatie loopt van één uur voor tot één uur na de periode waarop de contourplot is gebaseerd om de trend in het kasklimaat te beter kunnen volgen.

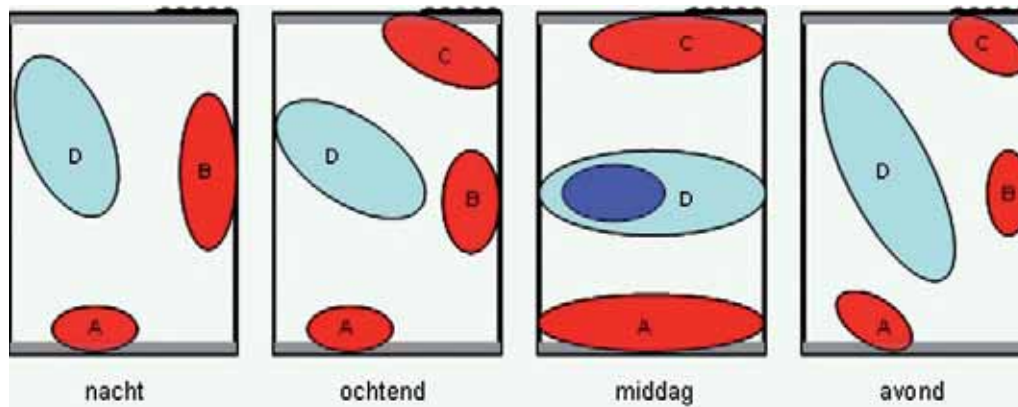


Figuur 19. Contourplot van de koelafdeling op bedrijf 7 op 19 augustus 2008 tussen 14:00 en 16:00 met aanvullende kasklimaatdata.

Het temperatuurverschil in de afdeling loopt op tot 3.4 °C. Hierbij is het in het midden van de afdeling duidelijk kouder dan aan het betonpad en het op het zuid-westen gelegen betonpad is warmer dan het op het noord-oosten gelegen pad. Bij een buitentemperatuur van meer dan 28 °C is geeft de meetbox, die net boven het gewas hangt, ca. 21 °C (T-midden) aan. Onder de tafel is het wat koeler omdat daar de koude in de kas wordt gebracht. Als zonwering worden zowel krijt als het transparante scherm en het schaduw scherm gebruikt. De temperatuur boven in de kas (T-boven ca. 1 m onder het scherm) daalt wanneer het schaduw scherm langzaam wordt geopend. Dit duidt op opmengen van de kaslucht waar deze eerst sterk gelaagd was met 9 °C temperatuurverschil tussen de meetbox onder de tafel en de meetbox onder het scherm.

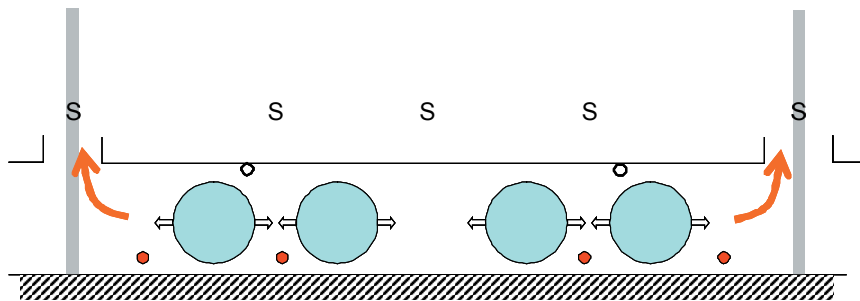
Naast het warme betonpad wordt de tussengevel aan de zuidkant gedurende de dag ook warmer dan de tussengevel aan de noordkant.

In Figuur 20 laat het temperatuurverloop gedurende de dag in de afdeling zien. Het patroon is typerend voor de situatie waar vrijwel continu gekoeld moet worden.



Figuur 20. Trendmatig verloop van de temperatuurverdeling gedurende de dag gedurende een periode waarin voornamelijk gekoeld wordt.

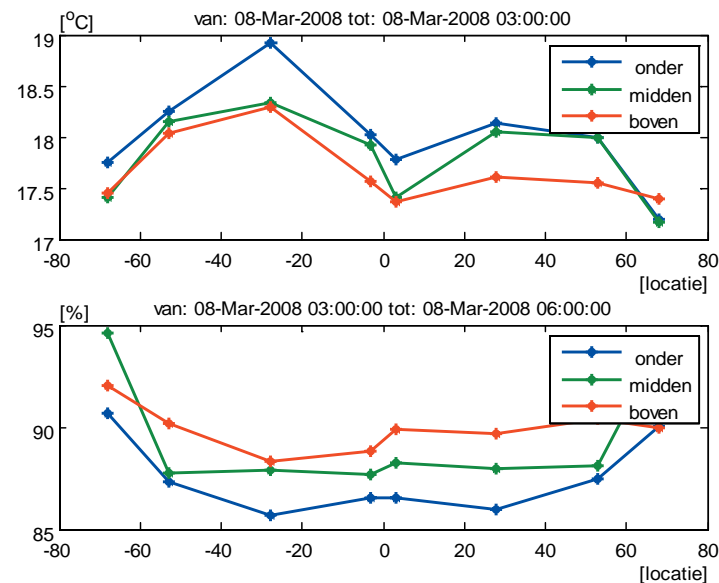
De temperatuurverschillen variëren gedurende de dag. In de late avond en nacht is het maximale temperatuurverschil ca. 1.5 °C. In de namiddag loopt dit op tot ruim 3°C. Bij het ontwerp van de koelsystemen worden de gevels en betonpaden te snel niet meegenomen, met temperatuurverschillen als gevolg. Wanneer er meer verwarmd wordt is het verschil in de middag kleiner. Temperatuurverschillen kleiner dan 1 °C zijn in de meetperiode niet voorgekomen. Wordt er meer verwarmd, dan verdwijnt over het algemeen de warme plek A (Figuur 20). De andere punten, in het bijzonder B, blijven bestaan. Het is niet duidelijk waardoor de warme plek B in de avond en nacht ontstaat. De naastliggende afdeling wordt ruim 1 °C warmer gestookt maar aan de tussengevel is visueel niets waar te nemen. Het lijkt logisch dat het betonpad als gevolg van de warmtebelasting van de zon warmer wordt, ondanks het gesloten gevelscherm. Omdat de LBK's naast het betonpad staan en de slangen daarom pas na het betonpad en LBK beginnen, is er netto geen koelcapaciteit aan het betonpad. Daarnaast wezen rookproeven uit dat bij de eerste tralie(s) weinig lucht uit de slang komt. De temperatuurmeting op tafelniveau laat ook temperatuurverschillen zien maar de metingen geven geen duidelijke trend aan. In Figuur 21 is een situatieschets van het verwarmings-/ koelsysteem en de positie van de sensoren (S) gegeven. In de lengte van de kas zijn op drie lijnen (onder de tralie, het midden van het vak en weer onder de tralie) op dezelfde posities als in Figuur 21, sensoren geplaatst.



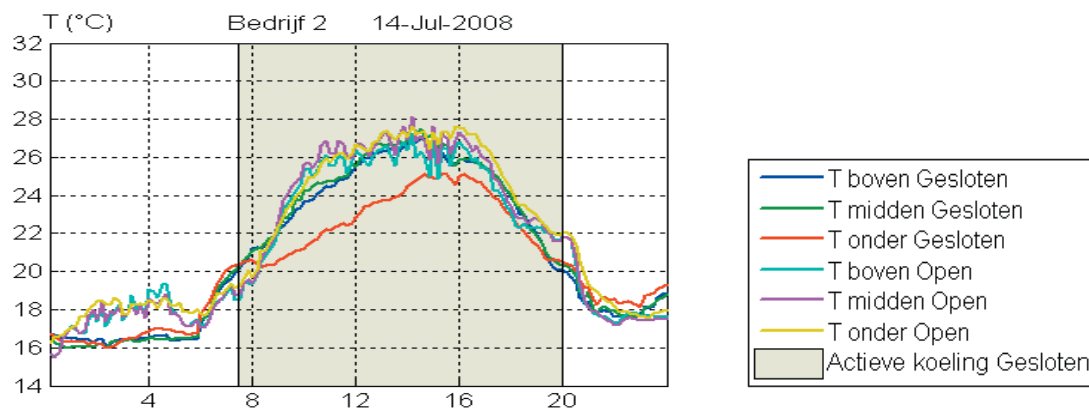
Figuur 21. Situatie schets positionering slangen en verwarmingsbuizen en de sensorpositie.

Rookproeven lieten zien dat lucht vrij eenvoudig tussen de tafels kan trekken (oranje pijlen in de Figuur 21) omdat lucht de weg van de minste weerstand kiest. Dit effect zou versterkt kunnen worden omdat tijdens de metingen doek op de gazon bodem van de tafels was geplaatst, wat de weerstand door de tafel sterk vergroot. De temperatuurprofielen varieerden tijdens de metingen zodanig dat geen algemene trend van warme of koudere banen kan worden aangegeven. Er is niet gemeten dat door de open ruimte tussen de poten en de tafels koudere (tijdens koelen) of warmere lucht (bij verwarmen) lokaal tot een hogere temperatuur leidt. Dat er geen duidelijke trend is gemeten, is mogelijk het gevolg van de locatie in de kas waar gemeten is. De meetlocatie was op het randje van de warme plek in Figuur 20 aangegeven met "A".

Figuur 22 laat de temperatuurverdeling van gevel tot gevel zien parallel aan de slang bij bedrijf 2. Gedurende deze periode waarin de verwarming wordt gebruikt, is de temperatuur lager bij de gevels waar de LBK is opgesteld. Als gevolg hiervan is de relatieve luchtvochtigheid hoog, wat resulteert in een verhoogde ziektedruk. De reden voor deze verschillen en de oplossing hiervoor worden besproken in de paragraaf CFD-berekeningen.



Figuur 22. Temperatuurverdeling over de gehele kas parallel aan de luchtslang op bedrijf 2.



Figuur 23. Temperatuur in de open en gesloten kas op bedrijf 2 op verschillende hoogten.

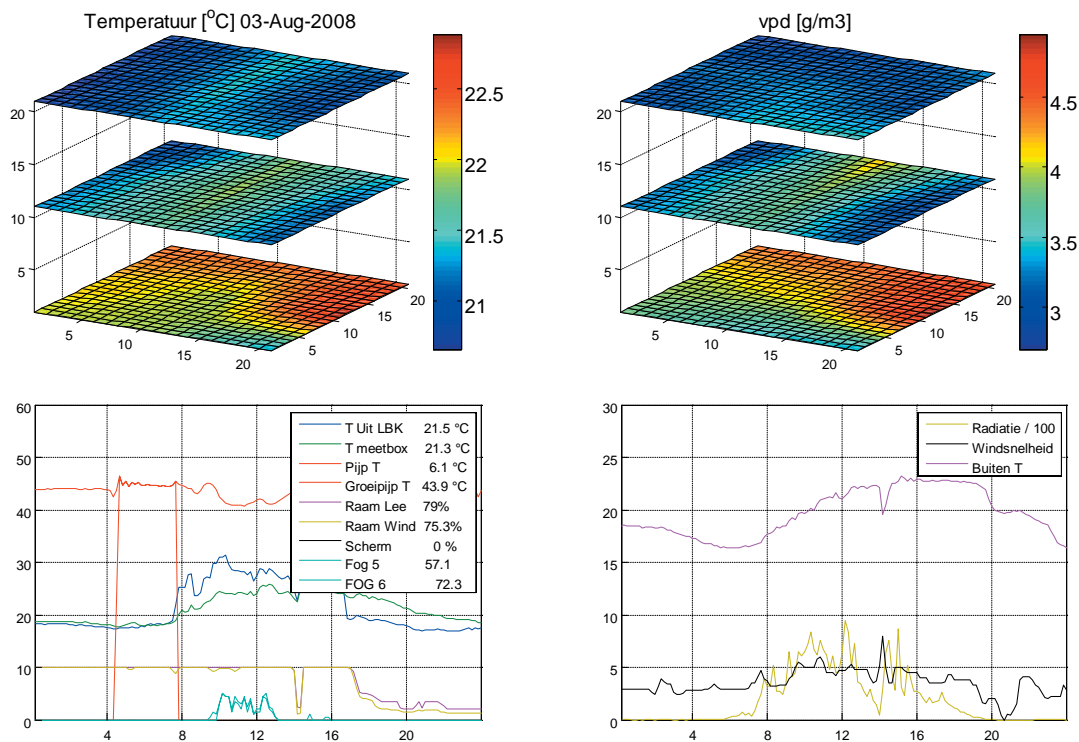
Een belangrijk aspect bij het koelen door slangen die onder het gewas geplaatst zijn, is het optreden van een verticale temperatuurgradiënt. In Figuur 23 is deze gradiënt duidelijk te zien, met als rode lijn de temperatuur onderin het gewas. De gradiënt heeft geen gevolgen voor de productie maar verschilt met de traditionele kas.

Conclusies ten aanzien van de temperatuurverdeling bij een LBK met slang

- verwarmen met luchtslangen geeft bij de huidige systemen geen goede verdeling,
- de lucht komt niet zo gelijkmatig uit de slangen als bij het ontwerp bedoeld,
- waar geen luchtslangen aanwezig zijn loopt de temperatuur hoog op tijdens koelen.

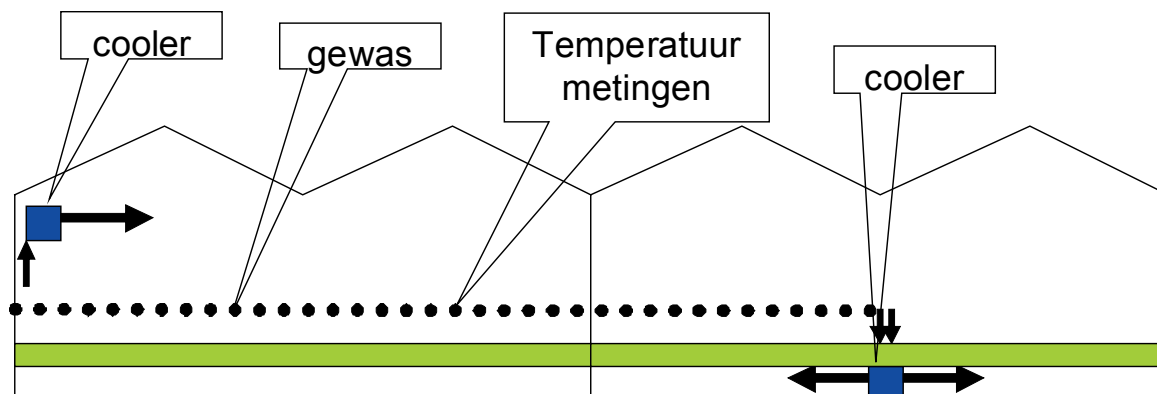
5.2.2 Temperatuurverdeling bij een LBK

Drie betrokken bedrijven bij het monitoringproject hebben LBK's boven het gewas hangen. In een repeterend grid van deze LBK's is op bedrijf 4 het klimaat gemeten door middel van de draadloze sensoren. Figuur 24 geeft de verdeling van temperatuur en vochtdeficiet op verschillende hoogtes weer. De LBK's zijn in een grid geplaatst.



Figuur 24. Temperatuur en vochtdeficiet verdeling op drie verschillende hoogtes in een repeterend grid van LBK's.

Uit de temperatuur- en vochtverdeling blijkt dat koelers nauwelijks voor temperatuurverschillen bij het gewas veroorzaken. Dit komt door het feit dat de koelers hoog geplaatst zijn waardoor de lucht uit de koelers voldoende ruimte heeft om op te mengen met de kaslucht. Daarnaast is de uitstroom uit de koelers turbulent wat voor een goede opmenging zorgt. Figuur 25 toont de situatie bij bedrijf 8. Een deel van de kas is uitgevoerd met bovenkoelers (Figuur 26) en een deel met onderkoelers (Figuur 27). De stippellijn geeft de plaats aan waar sensoren zijn opgehangen om de temperatuurverdeling te meten.



Figuur 25. Situatie bij bedrijf 8 waar de temperatuurverdeling over de tafels in een afdeling met boven en een afdeling met onderkoelers is gemeten.



Figuur 26. Foto van de bovenkoelers.

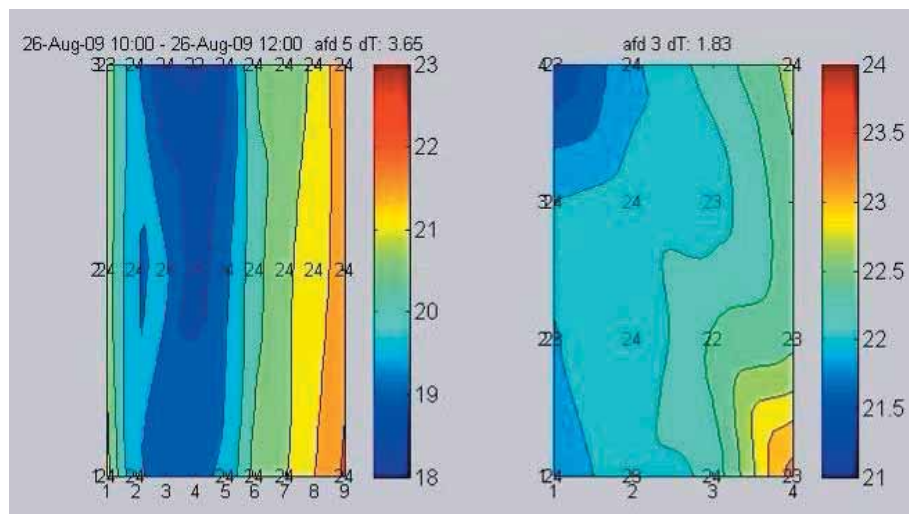


Figuur 27. Foto van de onderkoeler en verwarmers.

In Figuur 28 is het verschil te zien tussen bovenkoelers (laminaire uitstroom) en onderkoelers. Bij de bovenkoelers daalt de koude lucht voordat de andere zijde van de kas bereikt is. Het gevolg is een temperatuurverschil over de kas van ca. 3.5 graden. Bij de koelers onder de tafel stroomt de koude lucht eerst langs de vloer richting de gevel om daar vervolgens op te stijgen. Het temperatuurverschil is hier kleiner dan bij bovenkoelers.

Een verbetering is te realiseren door de LBK's niet aan de zijkant maar in het midden van de afdeling te plaatsen en om-en-om naar de linker- dan wel de rechterkant uit te laten blazen. Wel moet worden voorkomen dat de uittredende lucht niet direct wordt aangezogen door de naastliggende LBK. Ook kan de helft van de LBK's aan de overliggende zijgevel geplaatst worden, zodat de LBK's naar elkaar toe blazen. Voordeel hiervan is dat de benodigde worp wordt gehalveerd, waarbij mogelijk ook nog minder debiet hoeft te worden gerealiseerd. Dit levert energiebesparing op het ventilatorvermogen op. ook is het mogelijk om het ventilatordebiet te verhogen, zodat de worp wordt vergroot en de overliggende gevel wordt gehaald. Nadeel hiervan is dat er meer elektrische energie nodig is.

Bij deze temperatuurverdeling ziet de teler de "warme" baan bij de tussengevel met de afweekafdeling als een overgangszone van de planten naar de afweek, die op een paar graden hogere kasluchttemperatuur wordt gehandhaafd. Zo hoeft bij binnenkomst vanuit de warme afdeling een iets warmere hoek niet slecht voor de planten te zijn. Zogenaamde overgangsschade (veel lagere temperatuur en meer licht) is een bekend probleem in de zomer en vroege herfst.



Figuur 28. Temperatuurverdeling in een afdeling met bovenkoelers (links) en een afdeling met onderkoelers (rechts) bij bedrijf 8.

Geconcludeerd kan worden dat bovenkoelers een goed klimaat kunnen geven mits deze voldoende ruimte hebben zodat de uitstromende lucht kan opmengen met de kaslucht en de uitstroom turbulent is.

Ten slotte zijn er over de hele lengte van de kas metingen uitgevoerd die terug te vinden zijn in de Bijlage VI. Over deze afstand zijn verschillen vooral bij het gangpad en de gevel waarneembaar.

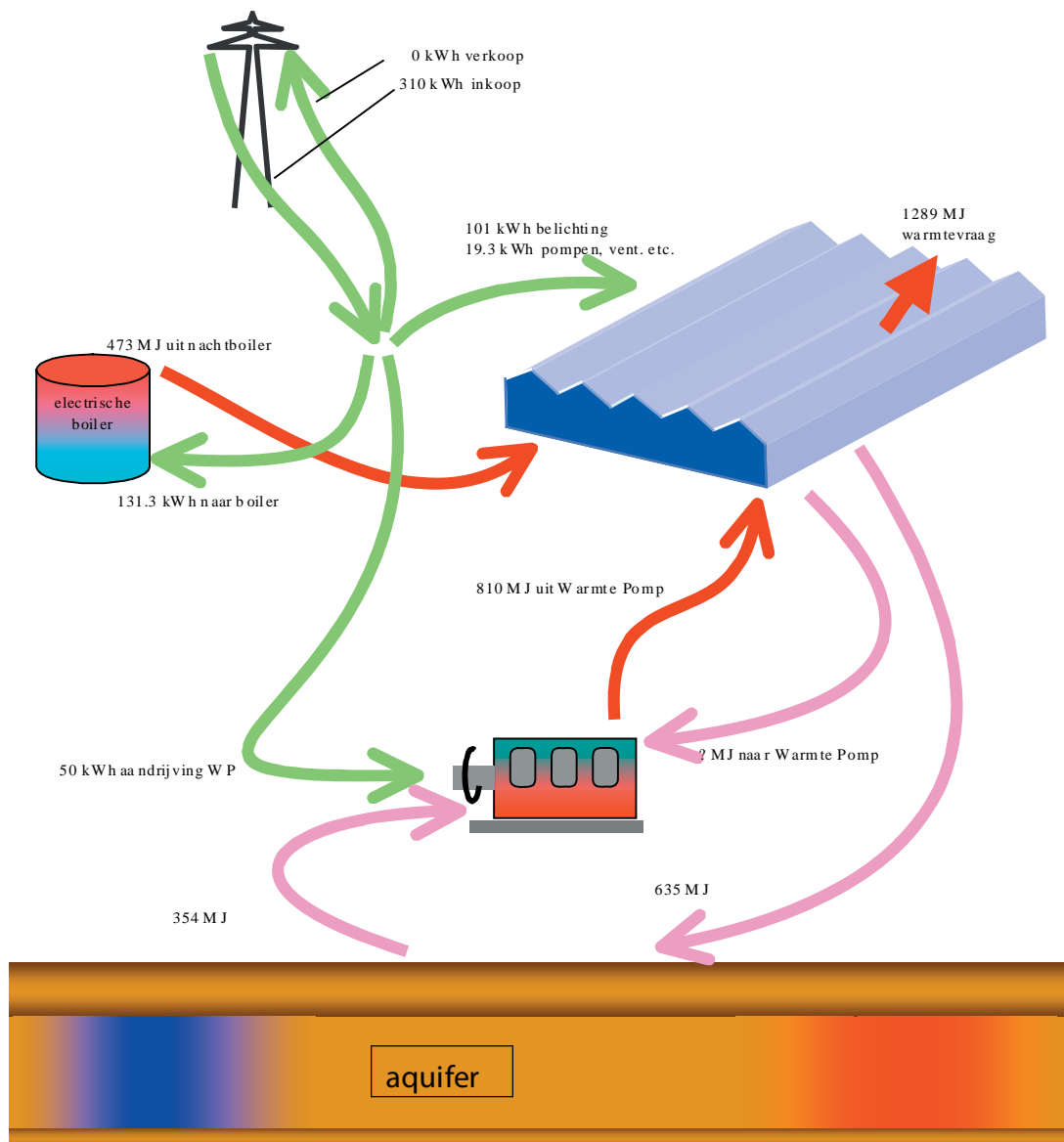
5.3 Schema's van de energiestromen bij de bedrijven

Deze paragraaf is tot stand gekomen in samenwerking met Innogrow die op twee bedrijven intensief energiestromen heeft gemeten. Er is voor gekozen om van de bedrijven 2 en 9, waar al een groot aantal metingen werden verricht, intensief te bemeten. Een derde bedrijf dat niet bij dit project betrokken was, maar wel de energiestromen worden gemeten, is met toestemming van de tuinder betrokken bij de energiemonitoring. Voor de andere bedrijven is de energiebalans, zo goed als mogelijk was, bepaald.

Het opstellen van de energiebalans van de bedrijven maakt duidelijk hoe de energiestromen op de bedrijven lopen. Tussen de bedrijven zijn grote verschillen in installatie, het gebruik van de systemen en de bedrijfsuitrusting. Daarnaast zijn treden soms grote verschillen op tussen de klimaatsturing op de bedrijven.

Een goed voorbeeld hiervan is de Phalaenopsisteelt waar bedrijf 6 tot enkele dagen na een gietbeurt tot drie keer meer energie in het ontvochtigen steekt dan bedrijf 8. Bij het opzetten van de energiebalans is een opsomming van alle energieverbruikers gemaakt om een zo volledig mogelijk overzicht te verkrijgen in de energiegebruikers op de bedrijven. De energiegebruikers zijn opgedeeld in groepen: belichting, watergift, bronpompen, circulatiepompen, ventilatoren, ketel, wkk, boiler en WP. Het energieverbruik is, waar het niet werd geregistreerd, bepaald door het geïnstalleerd vermogen van de gebruikskomponenten te vermenigvuldigen met de tijd van een jaar en een belastingsfactor. De belastingsfactor F_b geeft aan welk deel van de tijd de verbruiker, teruggerekend op maximaal vermogen, heeft gedraaid. Hierin is verwerkt dat een gebruiker ook in deellast kan draaien zoals bv. de ventilatoren en de belichting.

De belastingsfactor kan direct berekend worden uit het geregistreerde energieverbruik (kWh-meter) en het geïnstalleerd vermogen als één gebruikend installatieonderdeel op één kWh-meter is aangesloten. De belastingsfactor kan indirect berekend worden uit extra metingen en schattingen op basis van ervaring van de tuinder. Op deze manier is de energiebalans opgesteld (Bijlage VIII). Het totale energieverbruik moet overeenkomen met het geregistreerde totaalverbruik, de som van alle kWh en of gasmeters waarvoor betaald moet worden. Met enkele aannames en schattingen is de jaar-energiebalans opgesteld en voor bedrijf 6 weergegeven in Tabel 12 (Bijlage VII). De energiestromen zijn schematisch weergegeven in Figuur 29.



Figuur 29. Schematische weergave energiestromen per m^2 op jaarbasis van bedrijf 6 in 2009.

De energiestromen op bedrijfsniveau bestaan uit inkoop (elektriciteit en aardgas) en, wanneer er een WKK installatie aanwezig is, ook uit mogelijke verkoop van elektriciteit (negatieve inkoop). Daarnaast zijn de belangrijkste energieproducenten (WP, WKK en ketel) en consumenten (voornamelijk belichting) benoemd. Hierbij moet worden bedacht, dat het grootste deel van de elektrische energie die in de belichting gaat direct als warmte in de kas vrij komt. Echter, een gedeelte wordt direct via de luchtramen afgevoerd, omdat op zo'n moment meer energie de kas ingaat dan er vraag naar warmte is. In Figuur 29 is deze extra warmte, geleverd door de belichting, niet opgenomen in de warmtevraag van de kas.

Figuur 29 toont dat van de 310 kWh die er per m^2 is ingekocht, 50 kWh door de WP, 131.3 kWh door de elektrische ketel en 101 kWh voor de belichting is gebruikt. De restterm van 19.3 kWh is gebruikt voor bronpompen, ventilatoren, ontsmetting en gietwatervoorziening. Deze restterm kan door onbekendheid van getallen of door verkeerde inschattingen hoger oplopen.

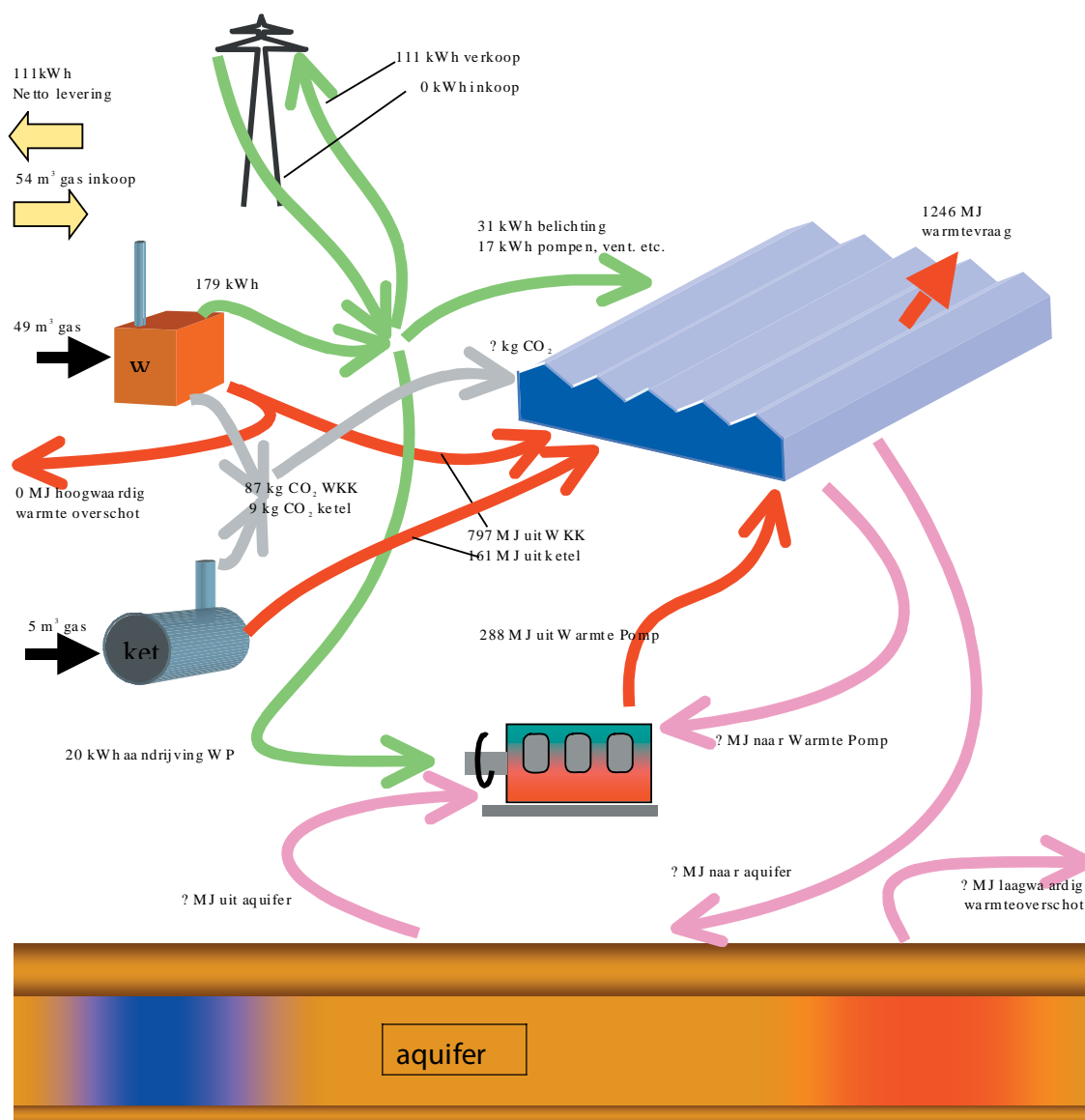
De post "overig" is in het geval van bedrijf 6 slechts een klein deel van de grote energiegebruikers als belichting en elektrische boiler. Omdat er op dit bedrijf geen aardgas voorziening of zuivere CO_2 -bron is, zijn de regels aardgas en CO_2 in dit geval leeg. De WP en ketel hebben uit de 50 en 131.3 kWh elektrische input resp. 810 en 479 MJ/ m^2 warmte geproduceerd. De koude productie van de WP bedroeg 630 MJ/ m^2 . Deze informatie is in detail opgenomen in Tabel 12. Het is een fout in het systeemontwerp om zo weinig warmte te oogsten. Alternatieven, bijv. warmte oogsten van een

externe bron, zijn niet in uitvoering genomen. Het tekort aan warmte wordt op dit bedrijf met de WP aangevuld. Dit levert tevens koude op, die in de aquifer wordt opgeslagen, waardoor een koude-overschot ontstaat. Om dit op te lossen moet de WP minder uren op warmtevraag gaan draaien wat bij dit bedrijf met een elektrische boiler is opgelost. Dit is een blijvende situatie. Een tijdelijk probleem in de aanloopfase is de onbalans van de aquifer. Dit wordt in een aantal seizoenen weggewerkt. Wanneer de aquifer in balans is, is deze situatie verbeterd.

De opzet van de bedrijven 1, 2 en 4 (resp. Tabel 4, Tabel 6 en Tabel 5) zijn complexer door de tussenkomst van de WK-installatie. De getallen die in de regel 'CO₂' worden genoemd, zijn niet de gedoseerde hoeveelheden CO₂, maar de op het bedrijf geproduceerde CO₂.

In Figuur 30 zijn de energiestromen van bedrijf 1 weergegeven.

Alleen op het gesloten deel dit bedrijf is belicht, waardoor de totale post belichting in vergelijking tot de andere bedrijven klein is, immers de gepresenteerde getallen zijn voor het gehele bedrijf. Hierdoor wordt de post "overig" enigszins onderschat. Voor een standaard bedrijf wordt een energiegebruik van 7 á 8 kWh voor elektriciteit verondersteld. Voor het gesloten deel komt de post elektriciteit overig dan op een hoog niveau van ca. 40 kWh te liggen. De oorzaak hiervan is niet aan te geven. De COP van de WP is gemiddeld 4.

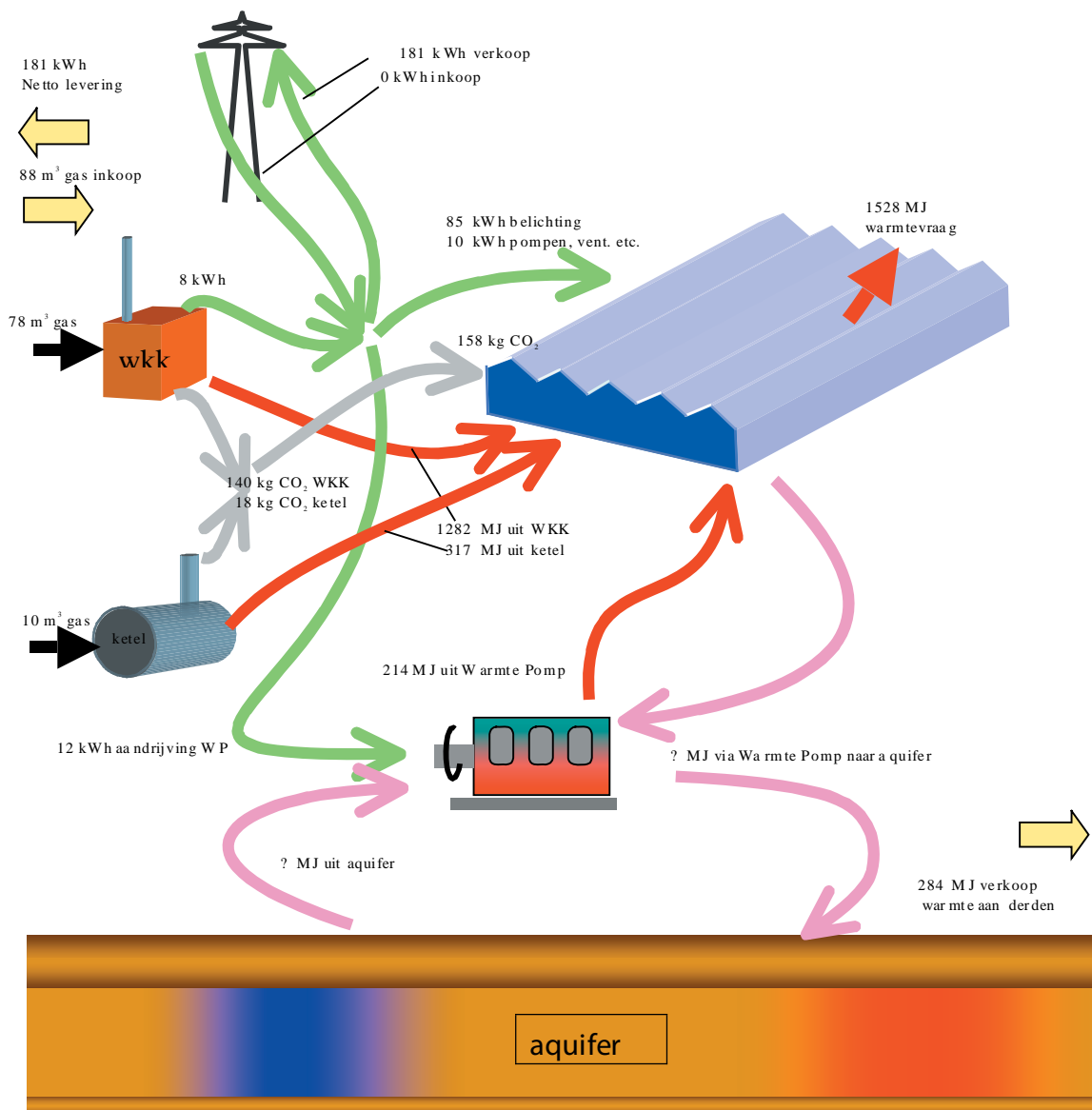


Figuur 30. Schematische weergave energiestromen per m² op jaarbasis van bedrijf 1 in de periode week 33 2008 – week 32 2009.

Tabel 4. Energiestromen op bedrijf 1 (22% gesloten oppervlak) in de periode week 33 2008 – week 32 2009.

Energiedrager	Eenheid	Inkoop	WP	WKK	Ketel	Belichting	Overig
Elektriciteit	kWh/m2	-111	-20	179		-31	-17
Aardgas	m3/m2	54		-49	-5		0
CO2	kg/m2			87	9		-96
Warmte	MJ/m2		288	797	161		-1246
Koude	MJ/m2		209				-209

In Figuur 31 zijn de energiestromen van bedrijf 4 weergegeven. De energievraag op dit bedrijf is hoger dan op bedrijf 1 en 2. De geografische ligging van dit bedrijf is daar een van de oorzaken van.

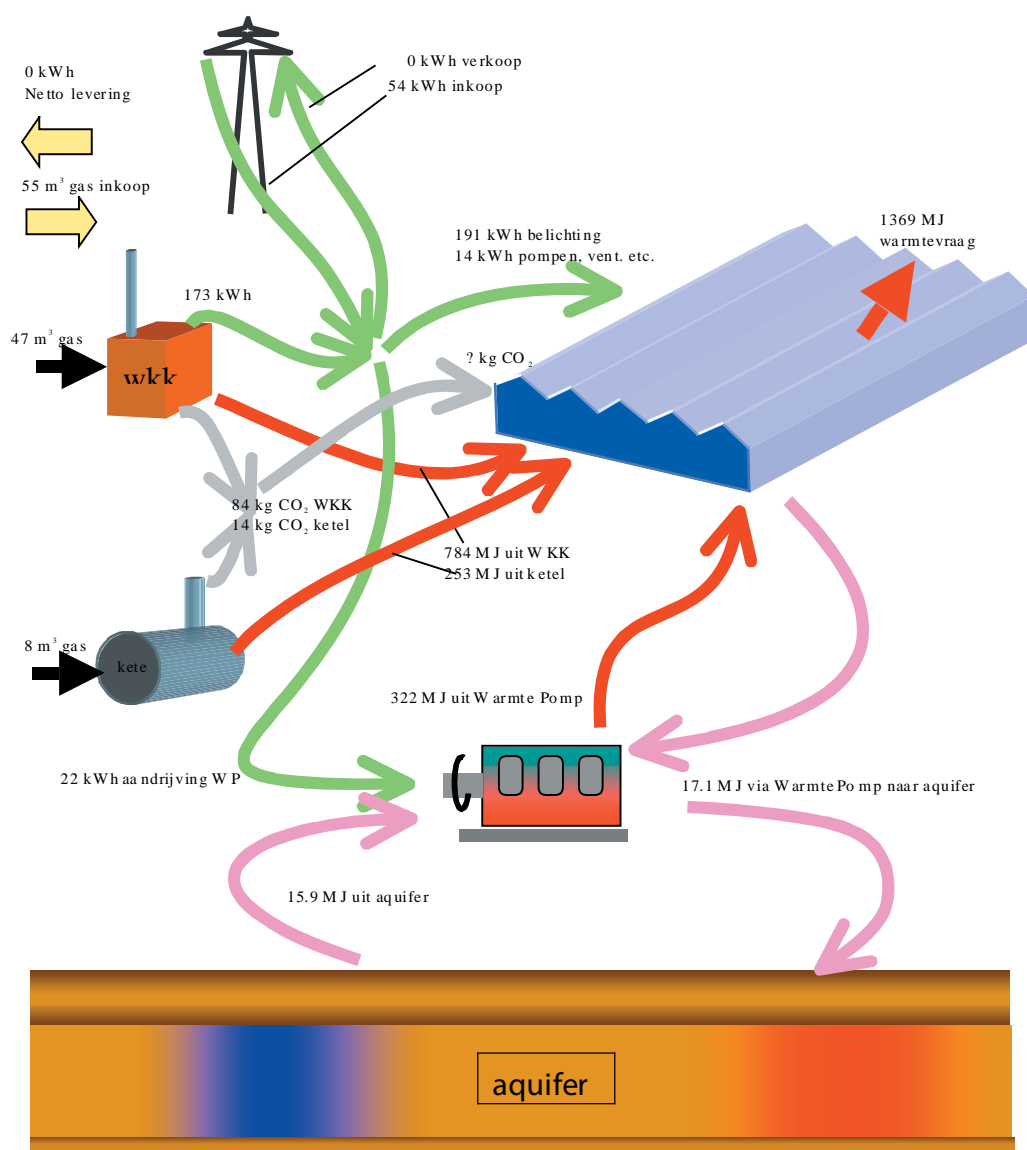


Figuur 31. Schematische weergave energiestromen per m² van bedrijf 4 in de periode week 41 2008 – week 40 2009.

Tabel 5. Energiestromen op bedrijf 4 (45% geconditioneerd) in de periode week 41 2008 – week 40 2009.

Energiedrager	Eenheid	Inkoop	WP	WKK	Ketel	Belichting	Overig
Elektriciteit	kWh/m2	-181	-12	288		-85	-10
Aardgas	m3/m2	88		-78	-10		0
CO2	kg/m2			140	18		-158
Warmte	MJ/m2	-284	214	1282	317		-1528
Koude	MJ/m2		151				-151

De bedrijven waar intensief aan de energiestromen is gemeten zijn de bedrijven 2 en 9. Op een extra bedrijf, dat geen onderdeel uitmaakt van het monitoringproject in de zin van klimaatmonitoring, worden de energiestromen intensief bemeten. Op aanbeveling van het adviesbureau Innogrow is er voor gekozen dit bedrijf op te nemen in de monitoring van de energiestromen. In Tabel 6 zijn de energiestromen van bedrijf 2 weergegeven. Op dit bedrijf wordt het gehele teeltoppervlak belicht. In elektriciteitsstromen is te zien dat de post belichting het grootst is. Met een COP van 4.1 presteert de WP op dit bedrijf vrijwel het zelfde als bij bedrijf 1. Ook dit bedrijf laat zien dat de warmtevoorziening uit de WKK een veel grotere bijdrage levert dan de WP. De energie-input op bedrijf 2 is veel groter dan bij bedrijf 1. Naast een gelijke aardgasinkoop moet bedrijf 2 nog 54 kWh elektriciteit inkopen waar bedrijf 1 nog 111 kWh weet te verkopen.



Figuur 32. Schematische weergave energiestromen per m² op jaarbasis van bedrijf 2 in de periode week 41 2008 – week 40 2009.

Tabel 6. Energiestromen op bedrijf 2 (38% geconditioneerd) in de periode week 41 2008 – week 40 2009.

Energiedrager	Eenheid	Inkoop	WP	WKK	Ketel	Belichting	Overig
Elektriciteit	kWh/m²	54	-22	173		-191	-14
Aardgas	m³/m²	55		-47	-8		0
CO₂	kg/m²			84	14		-99
Warmte	MJ/m²		322	784	253		-1359
Koude	MJ/m²		235				-235

5.3.1 Energiestromen van Bedrijf 2, bepaald uit intensieve metingen door Innogrow

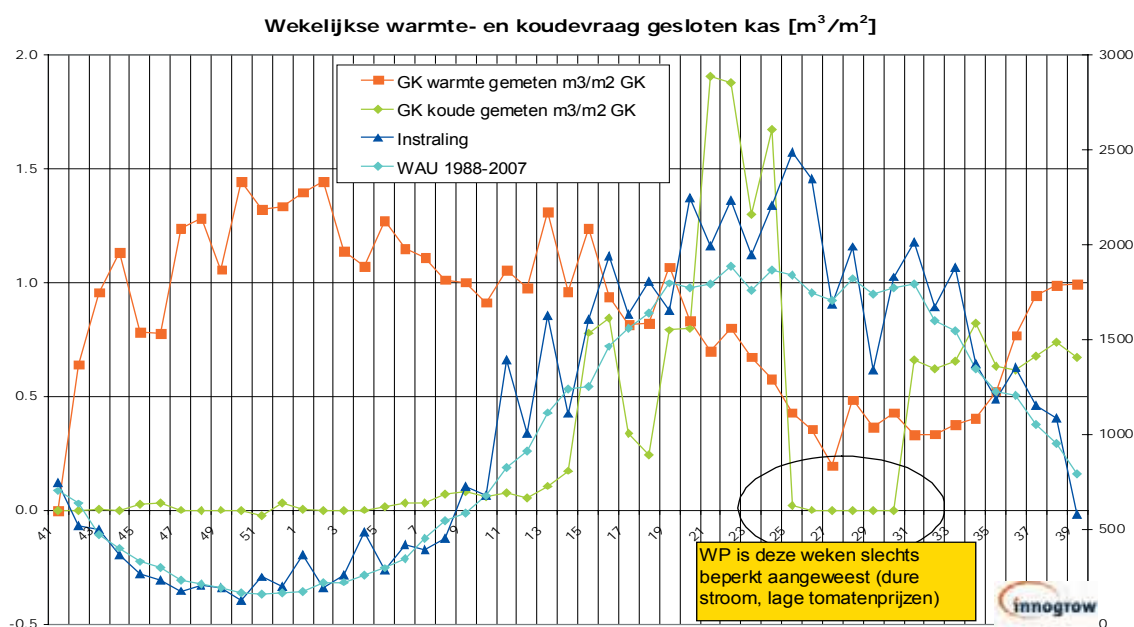
Op 6 oktober 2008 is zowel in open kas (OK) als gesloten kas (GK) geplant. In de OK is het gewas op 28 september 2009 verwijderd en in de gesloten kas is tot begin december door geteeld.

Voor een goede vergelijking is week 39 als laatste week aangehouden (27 september).

- De totale warmtevraag van de gesloten kas was 44.1 m³/m². Hiervan is 6.1 m³/m² gebruikt voor ontvochtiging met naverwarming via warmteblok.
- De laatste vijf weken heeft de GK 2.7 m³/m² meer warmte gebruikt dan de OK. Deze 2.7 m³/m² wordt van het GK totaal afgehaald voor een betere vergelijking.
- De totale warmtevraag van de GK wordt dan 41.4 m³/m².
- De totale warmtevraag van de OK 40,1 m³/m².
- De gewogen gemiddelde warmtevraag tussen GK en OK is 40.6 m³/m².
- De GK heeft een productie van 110% ten opzichte van de OK.
- Er is 2279 uren belicht. De totale belichtingsenergie was 636 MJ/m².
- 95% hiervan is warmte = 604.2 MJ/m².
- De systeemopzet heeft 17.6% primair energiegebruik bespaard.
- De warmte (15.9 m³ a.e./m²) en koude (17.1 m³ a.e./m²) levering van de bronnen zijn redelijk in balans.
- De gemiddelde gemeten COP van de WP is 4.1 bij een ontwerpconditie van 4.5.
- Uitval van één van de bronnen heeft de koelcapaciteit zodanig beïnvloed dat er meer via de ventilatieramen gekoeld is met als gevolg lagere CO₂-concentraties als gewenst.
- Energieprijzen, bijvoorbeeld terugleververgoeding elektriciteit aan het openbare net, kan de inzet van de systemen zodanig beïnvloeden dat het GK-concept bewust verlaten wordt.

Warmte- en koude vraag gesloten kas

In de Figuur 33 staat de wekelijkse warmte- en koude-input van gesloten kas (gemeten met GJ-meters). Beide in m³ aardgasequivalenten/m² kasoppervlak (31.65 MJ op onderwaarde).

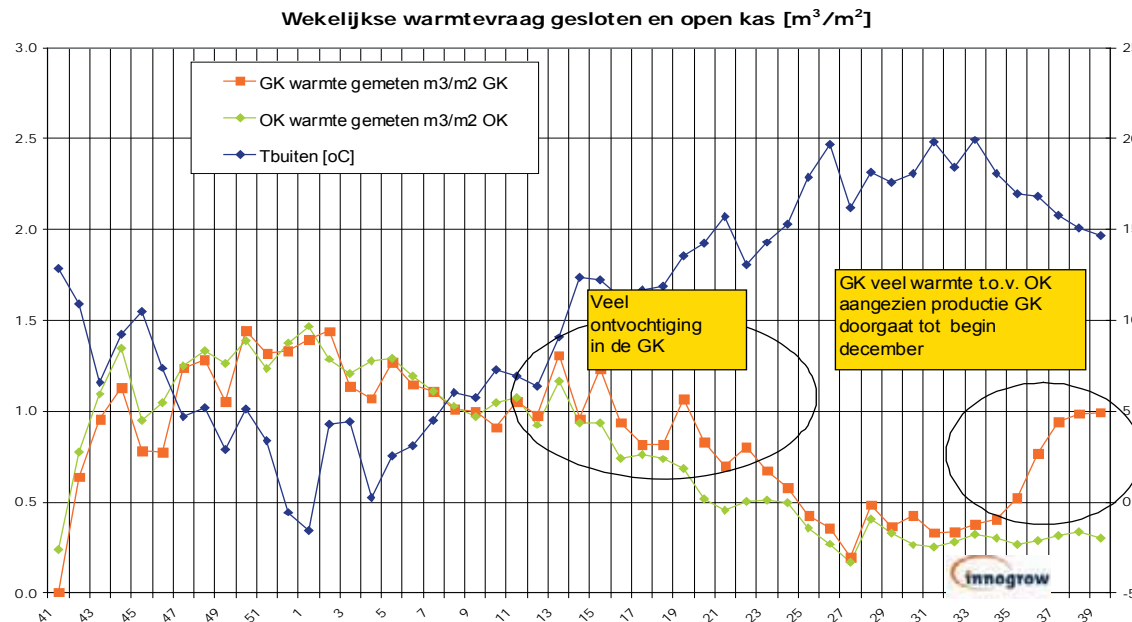


Figuur 33. Wekelijkse warmte en koudevraag van de gesloten kas (m³/m²).

Vanaf week 26 t/m 30 werd de WP nauwelijks ingezet omdat de stroom duur was en de tomatenprijs laag. Er wordt bewust minder energie in de kas gebracht. Dit betekent ook dat er slechts beperkt koude aanwezig is en worden de ramen eerder en/of verder open gestuurd.

Warmtevraag open- en gesloten kas

In Figuur 34 staat de wekelijkse warmte-input van de openkas en gesloten kas, gemeten met GJ-meters.



Figuur 34. Wekelijkse warmtevraag van de open en gesloten kas (m^3/m^2).

Vanaf week 13 t/m 22 is de vraag naar aanvullende naverwarming ten behoeve van ontvochtiging groot.

De totale warmtevraag van de gesloten kas was $44.1 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Hiervan is $6.1 \text{ m}^3/\text{m}^2$ gebruikt voor ontvochtiging. De laatste vijf weken ging beduidend meer warmte de GK in in vergelijking tot de OK namelijk $2.7 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door ontvochtiging. De $2.7 \text{ m}^3/\text{m}^2$ wordt van het totaal afgehaald om een betere vergelijking te kunnen maken. De totale warmtevraag van de gesloten kas $41.4 \text{ m}^3/\text{m}^2$ en van de open kas $40.1 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Het gewogen gemiddelde tussen GK en OK is $40.6 \text{ m}^3/\text{m}^2$.

Belichting

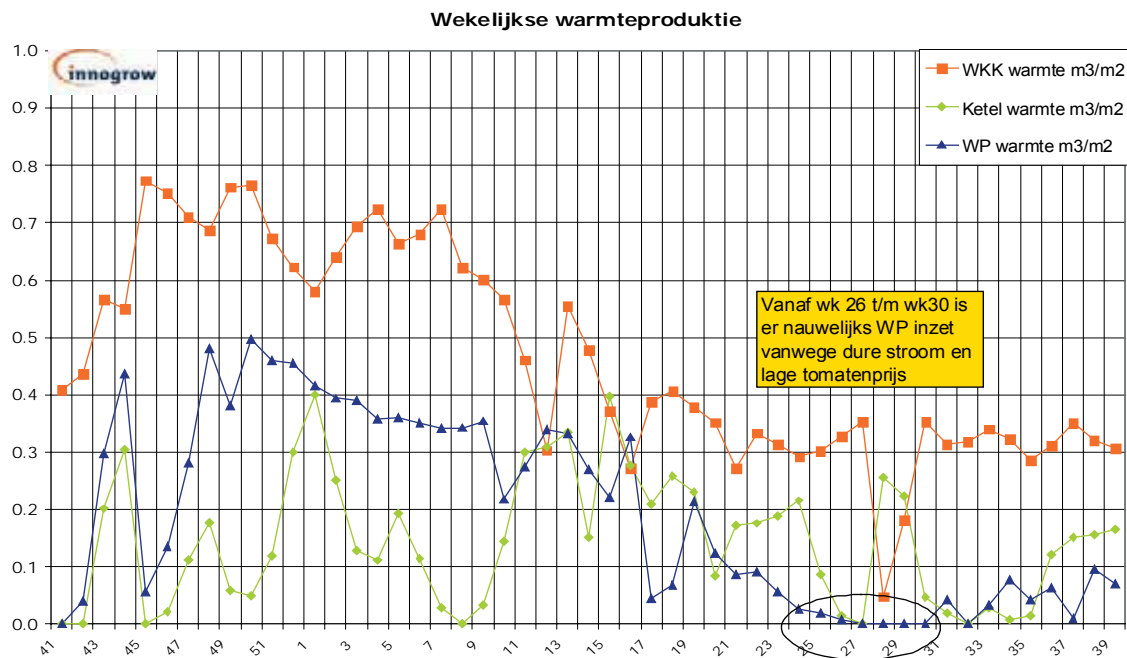
In totaal is er 2279 uur belicht. Het vermogen van de lampen is $77.7 \text{ W}/\text{m}^2$. De totale belichtingsenergie is dan $177 \text{ kWh}/\text{m}^2 = 636 \text{ MJ}/\text{m}^2$. Het warmteaandeel wordt verondersteld 95% te zijn en bedraagt $604 \text{ MJ}/\text{m}^2$. Voor OK en GK geldt dezelfde belichtingsstrategie.

Warmteproductie WKK, WP, ketel

In Figuur 35 is de inzet van de warmteproducenten WKK, ketel en WP weergegeven.

Als basis advies voor de inzet van bronnen is aangehouden:

- eerst WKK,
- dan zoveel mogelijk WP,
- als het niet anders kan met ketel aanvullen.



Figuur 35. Wekelijkse warmteproductie van alle systemen.

In week 29 was er onderhoud aan de WKK. Vanaf week 26 t/m 30 is er nauwelijks inzet van de WP vanwege dure stroom overdag en lage tomatenprijs. Er wordt bewust minder energie in de kas gebracht.

Dit betekent dat er slechts beperkt koude aanwezig is en worden de ramen eerder en verder open gestuurd tijdens de dag.

Het totaal aantal draaiuren van de WKK bedraagt 5313 en van de WP 2722 uren.

Uitgangspunten ontwerp:

- koudevraag 30a.e./m²/jaar
- Draaiuren WP 3000 uur
- COP warmtepomp 4.5

Warmtepomp

- De gemeten COP wordt berekend uit de met een warmtemeter gemeten warmteproductie van de WP gedeeld door het gemeten elektriciteitsverbruik van de WP.
- Vanaf week 22 wordt de WP vaker aan/uit gezet. Dit heeft invloed op de gemeten COP.
- Het totaal aantal vollast uren was 2722 uur en het totaal gemeten opgenomen vermogen 2003 MWh. Met een totale warmteproductie van 8166 MWh is de gemiddelde gemeten COP 4.1.

De WP heeft dit seizoen niet optimaal kunnen werken vanwege de slechte beschikbaarheid van de bronnen. Daardoor kon er in de winter te weinig warmte worden opgepompt en is er minder koude opgeslagen. In de zomer kon er minder koude worden opgepompt. Vanaf eind augustus zijn alle bronnen weer operationeel.

Gevolgen van 3 in plaats van 4 koude bronnen.

Slechts drie koudebronnen waren beschikbaar, waardoor de flow aan de primaire (bron) kant lager is. De totale flow bedraagt 170m³.

- Dit betekent ook een lagere flow aan de secundaire koude kant van de WP. Operationeel wordt dit opgelost door een lagere T aan te houden naar de koude bron van 3.9 °C, echter, de energie die overgedragen wordt blijft kleiner.
- De uitgangstemperatuur van de WP mag niet onder de 3.9 °C. komen, om bevrozing te voorkomen. Om dat te realiseren wordt het elektrisch vermogen teruggeregeld. Het voordeel hiervan is dat er minder elektriciteit nodig is, dus minder elektriciteit gebruikt.

Winter

Voor de wintersituatie wordt uitgegaan van 3000 uren WP (in de zomer draait de WP volgens ontwerp 1000 uur. Bedrijf 2 heeft in de zomer ongeveer 500 uur gehaald)

De energieoverdracht aan de koude kant (verdampert) is minder door de ontbrekende koudebron (kleinere flow) en dat betekent minder warmte aan warme kant (condensor). Hierdoor is er meer gas (m^3) (ketelinzet) nodig is.

Zomer

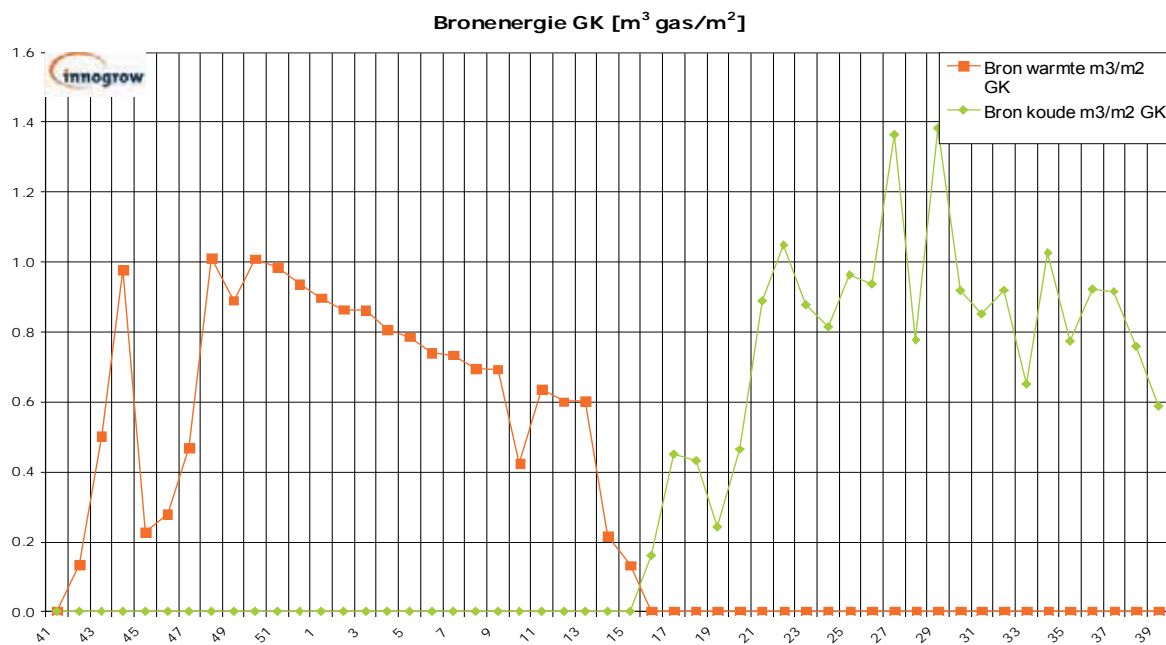
Door de beperking van de flow aan de primaire kant bij aanvoeren van koude, worden minder m^3/u aangevoerd. Op een warme zomerse dag worden de bronnen 24 uur/dag ingezet.

De GK is zo gedimensioneerd dat de aquifer 's avonds en 's nachts de koudebuffers vult. Op het moment dat het licht wordt, kan de koude nog geleverd worden door de bronnen. Wanneer de vraag naar koude groter wordt dan de bronnen kunnen leveren, worden de koudebuffers volledig en de WP gedeeltelijk ingeschakeld. De inzet van warmtepompen voor additionele koude productie op een zomerse dag is minimaal. Dit is normaal gesproken voldoende. Maar met drie bronnen worden de buffers en WP eerder ingeschakeld en is de koudebuffer te vroeg leeg.

Bij bedrijf 2 gingen op zomerse dagen de ramen op het eind van de dag open om zonnewarmte weg te koelen (oogsten). Bovendien wordt de WP overdag in de zomer vanwege dure stroomuren en lage tomatenprijzen regelmatig niet ingezet. Er wordt ook minder energie in de kas gebracht. Doordat de bronnen niet volledig functioneren is er te weinig koude beschikbaar in de zomer. Dit wordt nog eens versterkt door het bewust uit laten van warmtepompen op de heetste dagen. Dit leidt ertoe dat de ramen eerder en/of verder open moeten. Dit betekent lagere CO_2 -niveaus, dus lagere meerproductie.

Bronnen (Aquifers)

Om de bronvermogens warmte en koude met elkaar te vergelijken zijn deze voor beiden omgerekend in $\text{m}^3 \text{ a.e.}/\text{m}^2$ over de gesloten kas (Figuur 36). De warmte kan natuurlijk ook gebruikt worden voor de open kas.



Figuur 36. Warmte en koude energiestromen uit de bronnen voor de gesloten kas.

De uit de bronnen geleverde koude is $17.1 \text{ m}^3 \text{ a.e.}/\text{m}^2$ en uit de bronnen geleverde warmte bedraagt $15.9 \text{ m}^3 \text{ a.e.}/\text{m}^2$.

Energetische besparing

De energetische besparing kan op meerdere manieren worden vastgesteld, waarbij de gekozen referentie bepalend is. In absolute zin besparen de kassystemen op dit bedrijf geen energie. Het aandrijven van de systemen kost meer elektriciteit. Ook gaat er onnodig veel energie in het mechanisch ontvochtigen verloren (naverwarming). In Bijlage VII is dit verder uitgewerkt. Het is aan te bevelen om door te gaan met voldoende warmte in de kas te brengen, vooral in de ochtend en om de ramen te blijven gebruiken voor de benodigde ventilatie. Dit moet wel op de juiste manier gecombineerd worden met actieve koeling: basisventilatie voor ontvochtigen, dan actieve koeling, bij een hogere koudevraag het raam verder openen). Hiermee zijn temperatuur, vocht en CO₂ goed te beheersen.

Conclusies ten aanzien van het energiegebruik op bedrijf 2

- Bij een goede werking van de bronnen is de WP beter inzetbaar en kan meer energie worden bespaard.
- Als gevolg van problemen met de bronnen is 50% van de geprognosticeerde koude gebruikt. Dit is gecompenseerd met meer raamventilatie. Het gevolg hiervan is een lagere meerproductie en een kleinere energiebesparing. Nu de bronnen weer redelijk goed functioneren, is er gedurende het zomerseizoen weer voldoende koude beschikbaar om het benodigde CO₂-niveau in de GK te realiseren en de daarbij behorende meerproductie. Tevens kan er weer voldoende warmte worden geoogst die nodig is om energie te besparen.
- Vocht afvoeren door condensatie kost teveel energie wanneer naverwarming nodig is. Vocht afvoeren met buitenlucht is energiezuiniger.

5.3.2 Aanvullend extra bedrijf

De hier gepresenteerde resultaten hebben betrekking op week 26 tot 50 (2009). Door de korte meetperiode zijn de resultaten niet compleet voor alle seizoenen.

Vanaf week 26 is er op het aanvullende bedrijf (Y) de benodigde data gelogd, gemonitord en werden de data geanalyseerd. Met de verkregen data zijn energieberekeningen gemaakt. De referentiekas is het naastgelegen bedrijf (Z). De teeltstrategie is voor beide bedrijven gelijk. De oppervlaktes van de twee bedrijven zijn in Tabel 7 weergegeven:

Tabel 7. Overzicht oppervlakten gemonitorde bedrijf (Y) en referentie bedrijf (Z).

bedrijf	Y [ha]	Z [ha]
Opkweek	2.3	2
Koeling	1	0.6
Afkweek	1	1.5
Overige Phalaenopsis	-	0.5

- De warmtevraag (m³/m²) van de twee gevolgdde bedrijven zijn goed vergelijkbaar.
- De oppervlakte van de opkweek van Bedrijf Y is 54% van het totale areaal van Bedrijf Y (4.3 ha)
- De oppervlakte van de opkweek van Bedrijf Z is 45% van het totale areaal van Bedrijf Z (4.6 ha)

De verwachting is dat Bedrijf Y een hogere warmtevraag heeft dan Bedrijf Z door verschillen in opkweekoppervlak.

- De WP heeft in de zomer koude moeten produceren omdat er nog geen koude in de aquifer zat. Volgende zomer zal de WP op warmtevraag draaien, mits in de winter voldoende koude in grond wordt opgeslagen. Doordat de WP extra uren draait om de koude te maken ontstond een overschot aan laagwaardige warmte (881 MWu), die via de overschotwisselaar in de aquifer is gebracht. Deze laagwaardige warmte kan deze winter al nuttig ingezet worden in combinatie met de geoogste zonnewarmte.
- De installatie om warmte te oogsten werkt bij bedrijf Z de volgende zomer. Deze zomer is alleen warmte geoogst bij bedrijf Y.
- De koudeproductie gebruikt vanaf week 26 t/m 40 is 9.1 m³a.e./m² gemeten met de warmtemeters voor bedrijf Y. De begroting is 17.8 m³/m² voor de te koelen afdelingen van bedrijf Y en bedrijf Z.

Het verschil kan verklaard worden door:

- De warmteogst in de koeling is pas gestart in week 26 en in de afweek pas in week 34. Normaal start de warmteogst al in april.
- Doordat er geen koude in de bronnen zit is de koudevoorraad gedurende de warme zomerdagen vaak te weinig om tot de avond door te koelen. Men is dan genoodzaakt om eerder op de avond te stoppen dan gewenst.

De koude opgeslagen in de bodem vanaf week 40 t/m 50 is minder dan begroot. Dit heeft een aantal redenen:

- Vanaf week 28 is 1/6 deel van de 3 warmtepompen niet meer in te zetten. Dit deel wordt begin januari gerepareerd. (Elke WP heeft 2 compartimenten).
- Beperking van de transportpomp capaciteit in de koeling en afweek veroorzaakt een hogere aanvoerwatertemperatuur dan gewenst waardoor de COP slechter werd. Hierdoor is meer elektriciteit nodig en wordt minder koude wordt opgewekt bij dezelfde warmtevraag. De transportpompen zijn in week 48 vervangen.
- De verwerkingsruimte van bedrijf Y heeft betonvloerverwarming. Deze stond een aantal weken te hoog ingesteld met als gevolg dat er meer koude nodig was om de ruimte te koelen.

Aanbeveling

Het is van belang dat voldoende koude in de bodem kan worden opgeslagen gedurende de winter, zodat de WP geen extra uren hoeft te maken in de zomer om de resterende koude te maken.

5.4 Resultaten CFD

5.4.1 Computational Fluid Dynamics (CFD)

Wat is het?

Een rekenmethode om warmte en massa stromingen in of langs of door een geometrie te simuleren.

Hoe werkt het?

De geometrie wordt opgedeeld in kleine stukjes waarover de continuïteitsvergelijkingen worden opgelost. Dit proces gebeurt iteratief tot convergentie wordt bereikt.

Wat zijn de voordelen?

Verschillende ontwerpen van nieuwe gebouwen, auto's, computers etc. kunnen worden vergeleken zonder dure tijdsverslindende experimenten te doen met prototypes.

Wat is er nodig?

Een commercieel CFD-programma, een krachtige computer en iemand die met beide goed overweg kan. Van het probleem zelf (bijv. de te onderzoeken kas) zijn de dimensies van de geometrie de temperaturen, de windsnelheid etc. nodig.

CFD is meer dan 15 jaar gebruikt voor de simulatie van het binnenklimaat, vooral in experimentele kassen. Aspecten die werden geanalyseerd zijn:

- ventilatie (natuurlijke en geforceerde)
- verwarming (leidingen en LBK-eenheden)
- koeling (LBK, ventilator & pad)
- ontvochtiging

De CFD-analyse is een integraal ontwerpinstrument om de installatie van controlesystemen te optimaliseren.

5.4.2 Gewasweerstand

In de simulatie worden verschillende onderdelen van de kas meegenomen om zowel de luchtstroming als de warmtestromen in een kas te kunnen simuleren. Een belangrijk aspect voor de CFD-simulatie is de weerstand van het gewas op de luchtstroom. Deze weerstand bepaalt in grote mate de luchtbeweging door de kas. In Figuur 37 zijn Phalaenopsisplanten op de tafel, van onderaf gezien. Figuur 38 en Figuur 39 laten het model en het resultaat ervan zien waarmee de weerstand in een Phalaenopsisgewas is bepaald.



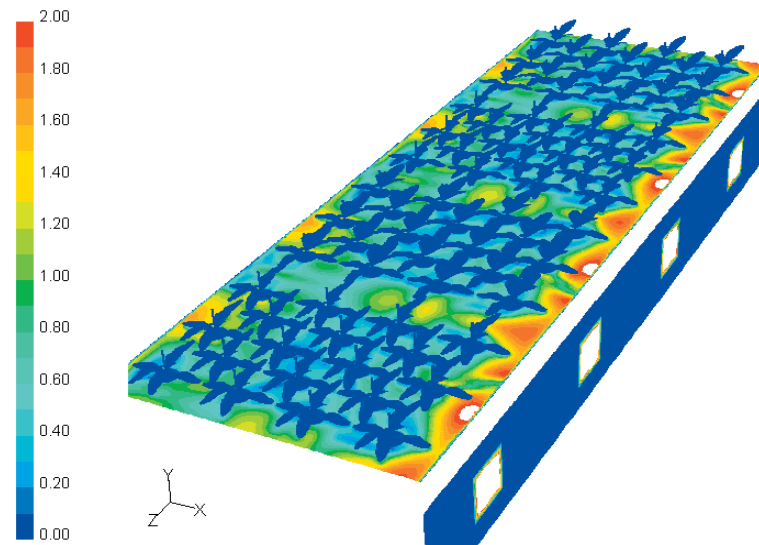
Figuur 37. Foto van de Phalaenopsisplant op de tafel van onderaf gezien.



Figuur 38. Model van de Phalaenopsisplanten op de tafel.

Op basis van het resultaat van de berekeningen van de gewasweerstand (Figuur 39) kan de lucht en temperatuurverdeling in de kas worden bepaald. Een gelijksoortige aanpak is gebruikt voor de bepaling van de luchtweerstand van tomatenplanten.

In Figuur 39 is duidelijk te zien dat een deel van de lucht langs de tafel stroomt en niet door het gewas. De weerstand aan de randen van de tafels zal moeten worden verhoogd om een gelijkmatige luchtverdeling te krijgen.



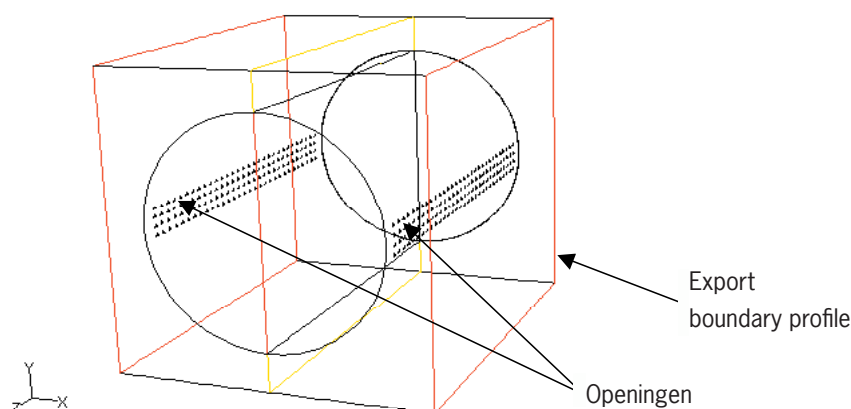
Figuur 39. Luchtsnelheidsverdeling over de tafel met Phalaenopsisplanten in relatie tot het systeem.

CFD-simulaties tonen aan dat de luchtweerstand van de planten in combinatie met de tafel zeer gering is. Wanneer de weerstand van de tafel in combinatie met het gewas niet gelijkmatig is wordt onder de tafel geen gelijkmatige druk opgebouwd. Het gevolg is dat de lucht de ruimte onder de tafel verlaat op een plaats die afhankelijk is van de uitblaastemperatuur en de luchtsnelheid onder de tafel. De locatie waar dit gebeurt, is dan niet zo gelijkmatig over de tafel verdeeld zoals in de ontwerpfase is bedoeld. Lucht kiest de weg van de minste weerstand zodat lucht langs kieren of looppaden zal stromen in plaats van door de tafel.

Verhoging van de luchtweerstand van de tafels zorgt voor een betere verdeling van de lucht mits de lucht alleen door de tafel omhoog kan stromen. Echter, de verhoogde weerstand kost meer elektrische energie voor het rondpompen van de lucht. Ten slotte laten deze CFD-berekeningen zien dat het microklimaat in termen van luchtbeweging voldoende is ($> 5\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) nabij het gewas.

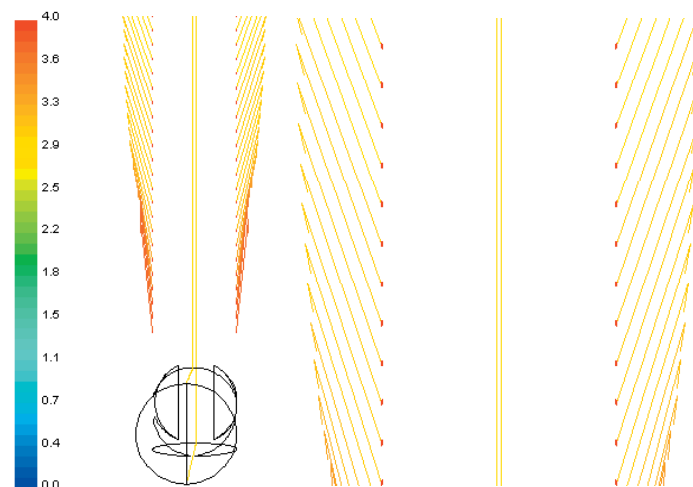
5.4.3 Uitblaaskarakteristieken

Naast de weerstand van het gewas is ook de uitblaaskarakteristiek van de gebruikte luchtslangen van belang. Hiervoor is het model uit Figuur 40 gebruikt.



Figuur 40. Model van een deel van de luchtslang op basis waarvan de uitblaas karakteristiek is bepaald.

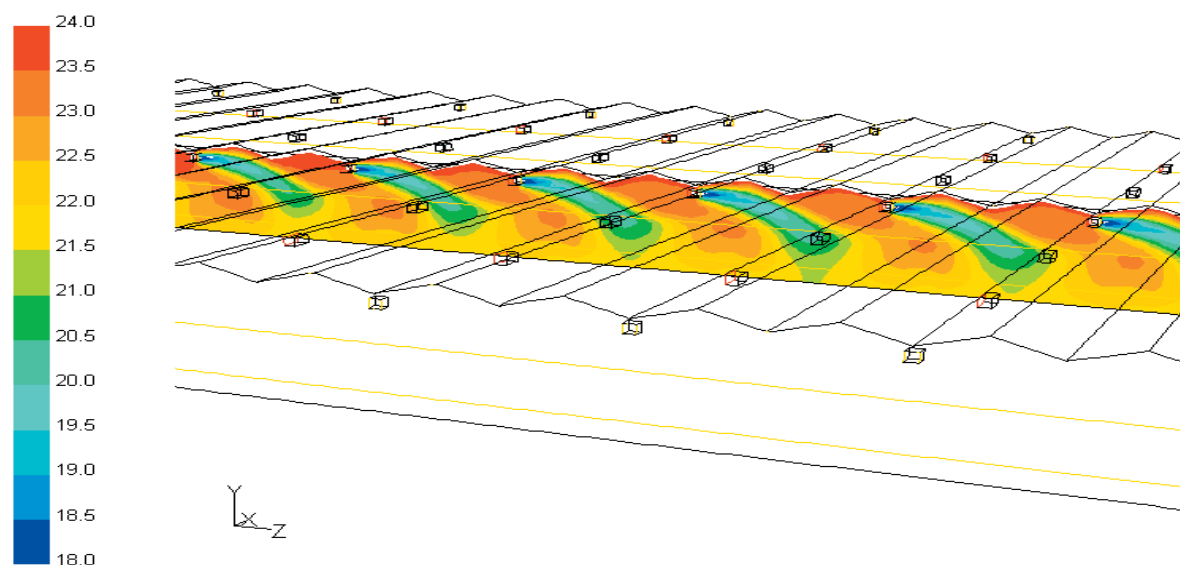
Figuur 41 laat het resultaat van de CFD-berekening zien. Duidelijk is te zien dat de lucht schuin uit de luchtslang komt zoals ook in de experimenten is vastgesteld. Deze analyse toont aan dat de uitstroom uit de slangen anders is dan in de ontwerpfase was aangenomen.



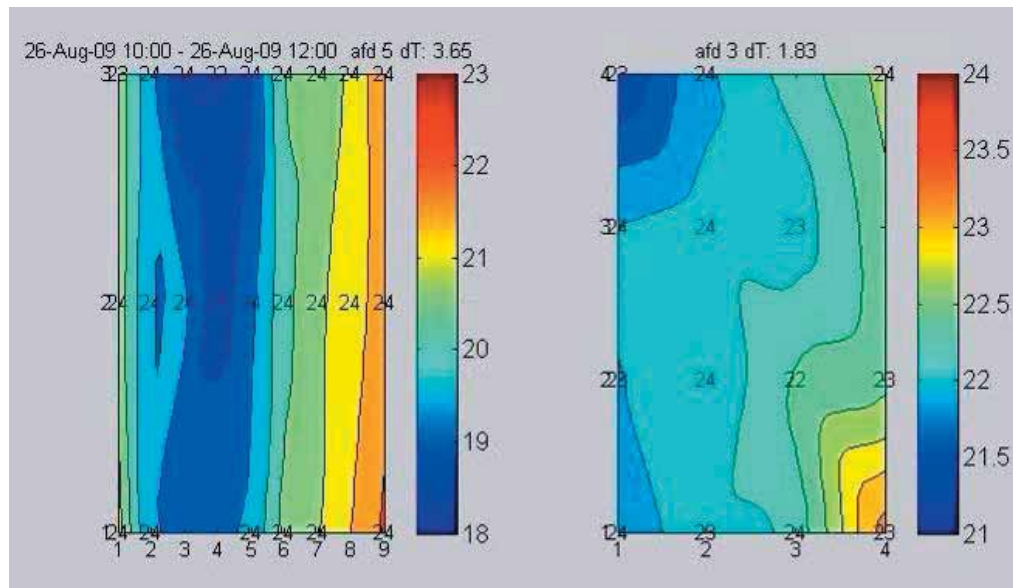
Figuur 41. Uitstroomvectoren uit het eerste deel van de slang.

Figuur 42 laat de temperatuurverdeling zien wanneer wordt uitgegaan van koelers waarbij de lucht laminair uit de koeler komt stromen. Figuur 43 (is gelijk aan Figuur 28) laat eenzelfde beeld zien in de kas waar de bovenkoelers zijn geïnstalleerd.

In dit geval is de temperatuurvariatie in de kas groot. Praktijkmetingen hebben aangetoond dat door de turbulentie van de uitstromende lucht te vergroten, deze variatie veel kleiner wordt. Uit deze analyse kan worden geconcludeerd dat de lucht niet laminair maar turbulent uit de koelers komt.



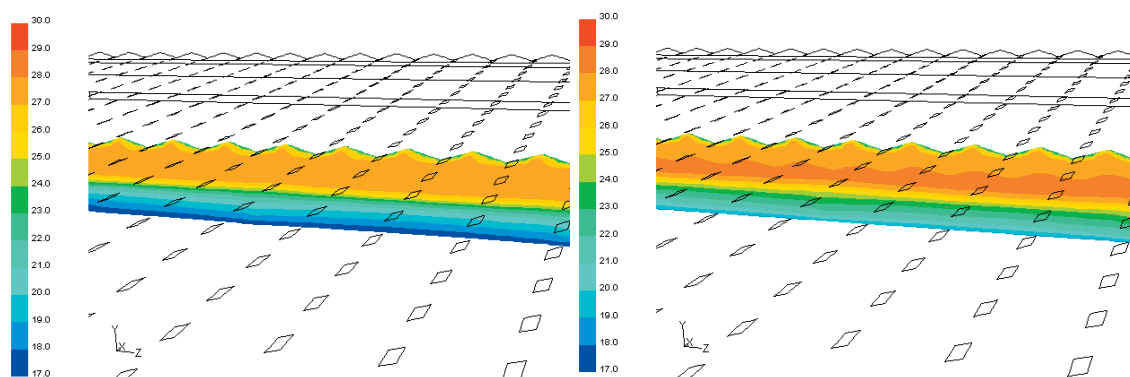
Figuur 42. Luchttemperatuurverdeling (°C) in een deel van de Greenport kas terwijl de Koelers zijn ingeschakeld.



Figuur 43. Temperatuurverdeling in een afdeling met bovenkoelers (links) met een afdeling met onderkoelers (rechts) bij bedrijf 8.

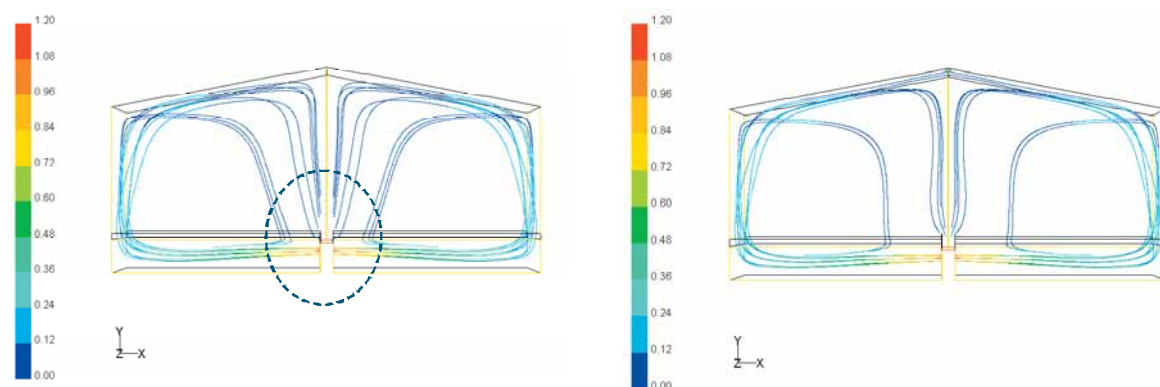
5.4.4 Klimaatberekeningen

Met CFD zijn verschillende problemen uit de praktijk bekeken waarna mogelijke oplossingen gesimuleerd zijn. Figuur 44 laat een voorbeeld van deze aanpak zien. Links is de situatie gegeven waarin het probleem zichtbaar is: doordat onderin werd gekoeld ontstond een verticale temperatuurverdeling. Een mogelijke oplossing is rechts in de figuur te zien waar de ramen tijdens het koelen iets worden geopend. Zo wordt de luchtbeweging in de kas groter. Deze oplossing verkleint de temperatuursverschillen maar heft ze niet op.



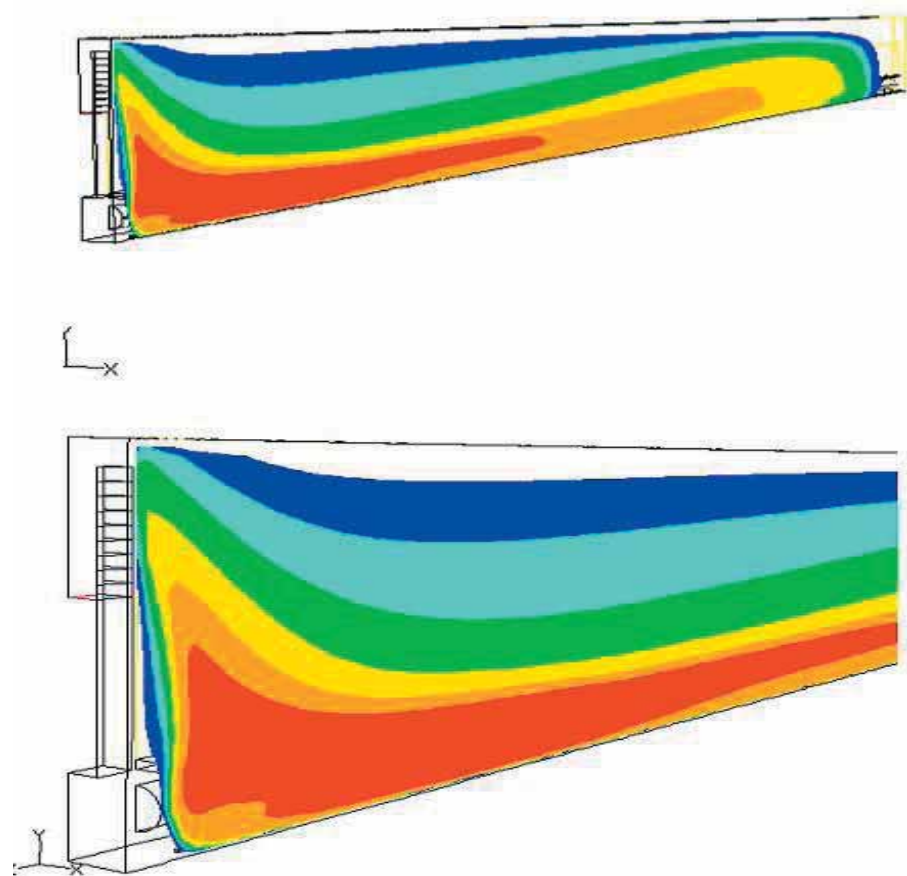
Figuur 44. Invloed van meer ventilatie tijdens het koelen van onderaf.

Bij de Phalaenopsisteelt, met koeling van onderaf, ontstond een secundaire luchtstroom nabij de inlaat van de LBK (Figuur 45). Deze situatie is door CFD gevisualiseerd en in het linkse deel van Figuur 45 weergegeven. Als mogelijke oplossing is de plaatsing van wandjes langs de tafel onderzocht. Deze oplossing blijkt inderdaad voor een geringere secundaire luchtstroming te zorgen, zoals is weergegeven in het rechter deel van Figuur 45.



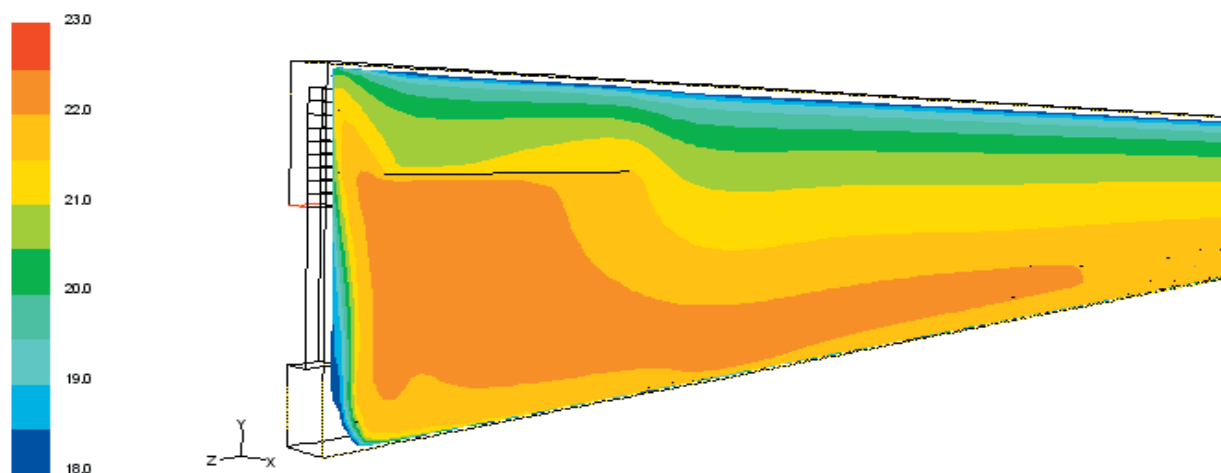
Figuur 45. Invloed van een verhoging van de rand van de tafel op de secundaire luchtstroom.

In paragraaf 5.2.1 is gemeten dat het gebruik van een luchtslang voor verwarming een slechte temperatuurverdeling oplevert. Deze situatie is gemodelleerd met CFD en te zien in Figuur 46. Het effect op de temperatuur nabij de LBK is te zien in de figuur, maar niet zo duidelijk als in het experiment.



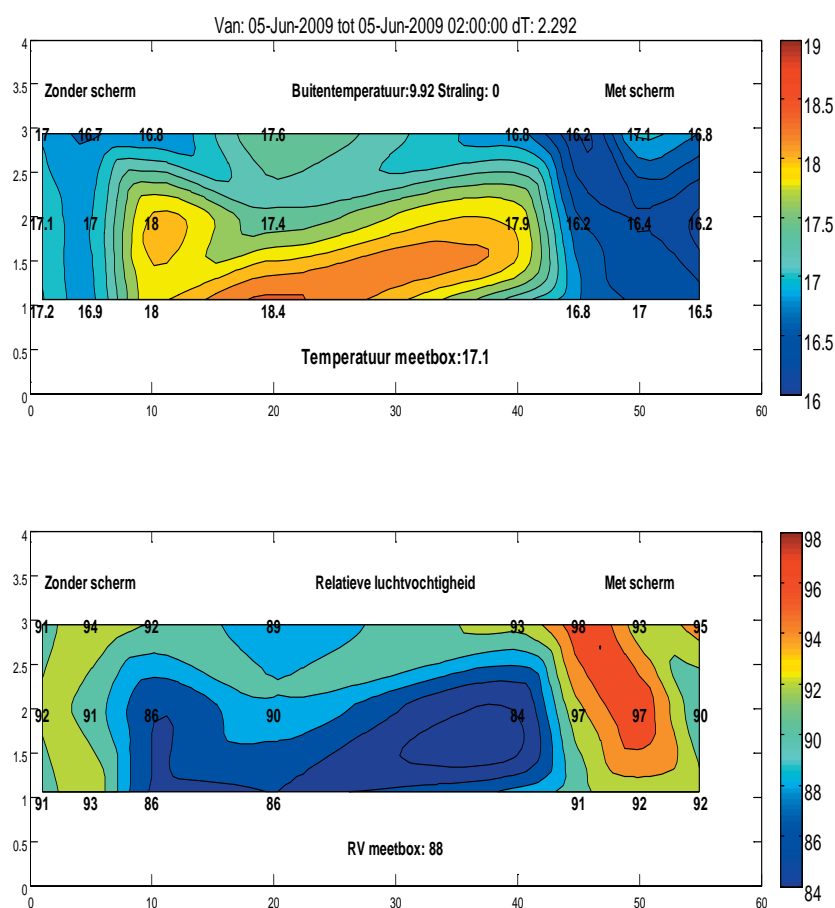
Figuur 46. Oplossing waarbij een scherm wordt gebruikt om de secundaire luchtstroom te verkleinen.

Als mogelijke oplossing werd voorgesteld om een scherm te plaatsen om de secundaire luchtstroom te verkleinen. Het resultaat van deze oplossing volgens CFD is te zien in Figuur 47.



Figuur 47. Oplossing waarbij een scherm wordt gebruikt om de secundaire luchtstroom te verkleinen.

Deze oplossing bleek niet goed te functioneren zoals in Figuur 48 te zien is aan de slechte temperatuurverdeling. In de praktijk bleek het scherm het probleem niet op te lossen. Nog steeds is nabij de LBK de temperatuur lager en de relatieve luchtvochtigheid hoger.

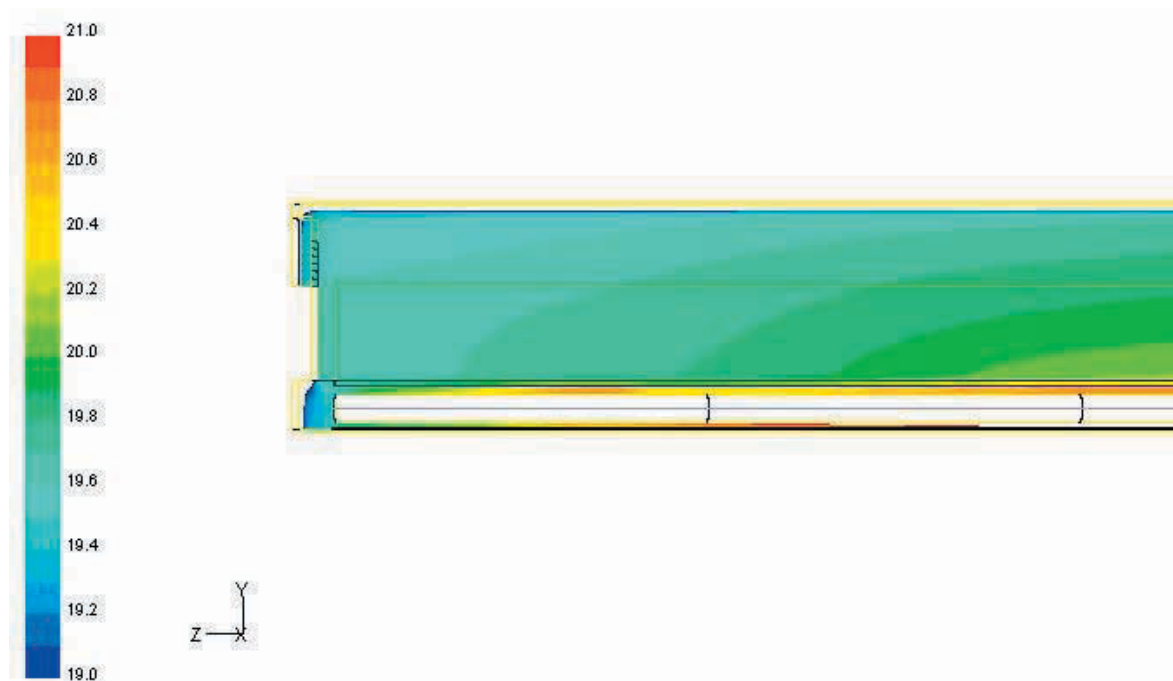


Figuur 48. Meting in de praktijk na het installeren van het scherm.

Op basis van dit resultaat is het CFD-model verfijnd. De uitstroom uit de luchtslang is nauwkeurig gemodelleerd zoals in de vorige paragraaf is beschreven. Het resultaat kwam overeen met de praktijk zoals in Figuur 49 te zien is en in meer detail in Figuur 50.



Figuur 49. Temperatuurverdeling over de slang waarbij de LBK links geplaatst is.



Figuur 50. Detail van dezelfde temperatuurverdeling als in Figuur 49, maar nu nabij de LBK.

Met dit model is vervolgens een nieuwe oplossingsrichting bekeken. Hierbij wordt de lucht niet horizontaal uitgeblazen maar in het eerste deel van de slang vertikaal richting de grond. Op de grond worden vervolgens obstakels geplaatst die de luchtstroom in de richting van de slang belemmeren. Hierdoor wordt de lucht gedwongen omhoog te stromen.

Conclusies van de CFD berekeningen

Aan de hand van de CFD berekeningen die in deze studie zijn gedaan kan het volgende worden geconcludeerd:

- De toepassing van CFD op specifieke problemen in de praktijk heeft geleid tot concrete oplossingen. Verschillende oplossingsrichtingen zijn eenvoudig met CFD op waarde te schatten waarna deze oplossingen in de praktijk kunnen worden toegepast.
- Zoals uit eerdere studies bleek, is CFD een goede manier om de luchtstroming en de temperatuurverdeling van een systeem te visualiseren.
- De randvoorwaarden in de berekening zijn cruciaal voor de uitkomst. Voor de bedrijven in dit project bleek het van grote invloed te zijn hoe de lucht uit de verschillende LBK's stroomt. Ook is de weerstand van het gewas op de luchtstroom van belang. Zo zorgt verhoging van de luchtweerstand van de tafels bij de Phalaenopsisteelt voor een betere verdeling van de lucht, mits de lucht alleen door de tafel omhoog kan stromen. Dit kost wel meer energie voor het rondpompen van de lucht. Verhogen van de weerstand aan de randen van de tafels zorgt voor een gelijkmatige luchtverdeling.

5.5 Rookproeven

Op de verschillende bedrijven zijn rookproeven uitgevoerd om inzicht te krijgen in de luchtbeweging ten gevolge van de installatie. Van deze proeven bij twee bedrijven zijn duidelijke foto's gemaakt en de resultaten zijn beschreven in Figuur 51 en Figuur 52

5.5.1 Bedrijf 7



Figuur 51. De rook was ingebracht bij de inlaat van de LBK. Te zien is dat de rook ver van de LBK uit de slang komt.



Figuur 52. De rook komt 5 meter na de LBK gelijkmatig uit het gewas.

Conclusies m.b.t. bedrijf 7

1. Het tracergas verspreidt zich gelijkmatig over de kas.
2. Er komt geen rook uit het eerste deel van de slang.
3. Indien er een gat tussen de tafels aanwezig is, dan komt de rook hoofdzakelijk uit deze gaten.
4. Het openen van de deur voor het doorvoeren van de tafels veroorzaakt een verandering van de luchtstroom.
5. De ventilatoren die boven het gewas hangen beïnvloeden de luchtstroom niet.

5.5.2 Bedrijf 8

Figuur 53. De invloed van de bovenkoelers op de luchtstroom is duidelijk te zien midden in de kas. De stroom is laminair.



Bovenkoelers zoals ze bij bedrijf 8 zijn geïnstalleerd, zorgen duidelijk voor een laminaire stroming in de kas. Dit in

tegenstelling tot bedrijf 4 waar de bovenkoelers juist een turbulente stroming veroorzaken. De turbulente luchtstroom geeft een betere verdeling maar de stroming reikt minder ver dan een laminaire stroming.

Conclusies van de rookproeven

- Rookproeven zijn een goed middel om de luchtstroming ten gevolge van een installatie te visualiseren.
- Rookproeven laten zien dat geforceerde luchtbeweging (met ventilatoren) minder krachtig is dan natuurlijke luchtbeweging veroorzaakt door temperatuurverschillen en windinvloeden.
- De uitstroom bij luchtslangen is niet gelijkmatig en de richting is niet overal loodrecht aan de luchtslang.
- Lucht kiest de weg van de minste weerstand waardoor de verdeling niet gelijkmatig is als de weerstand niet gelijkmatig is.
- Koude lucht verspreidt zich over de grond indien deze onderin wordt ingebracht.
- LBK's met een turbulente uitstroom zorgen voor veel opmenging van de lucht, bij een laminaire luchtstroom is dit veel minder het geval.

6 Interactie met project Teeltbegeleiding

In het project Teeltbegeleiding en Resultaat Monitoring zijn de verzamelde data gekoppeld aan de betrokken tomatentelers en Phalaenopsistelers. Dit gebeurde tijdens individuele bezoeken en tijdens gezamenlijke bijeenkomsten voor tomaat of Phalaenopsis. De verzamelde data waren een belangrijke ondersteuning voor de kennisuitwisseling tussen telers en onderzoekers.

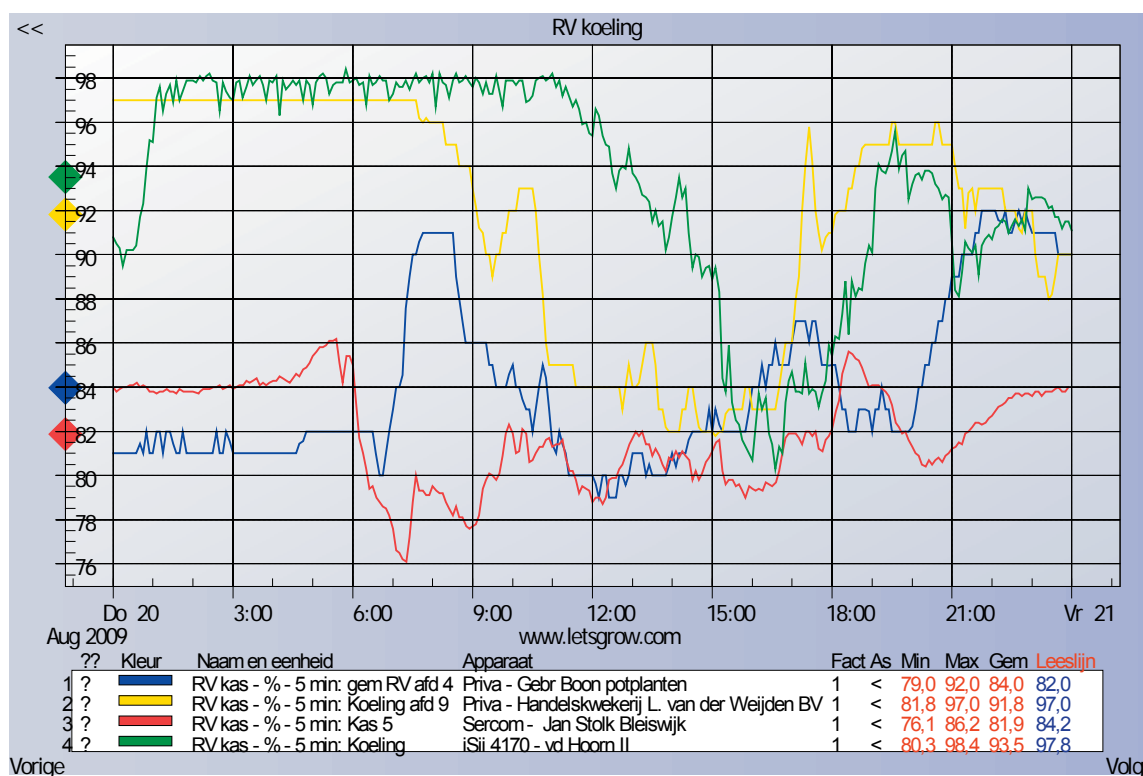
6.1 Aanleveren van data

De meetdata werden op meerdere manieren geleverd aan het project Teeltbegeleiding en Resultaatmonitoring. De voornaamste manieren waren met LetsGrow.com, Cyclische gemiddelden en gefilterde data. In deze paragraaf wordt aangegeven voor welk doel deze verschillende vormen zijn aangewend.

6.1.1 LetsGrow

Voor de meer incidentele datavergelijking is gebruik gemaakt van de LetsGrow.com. De opgeslagen 5-minuten gegevens worden direct naar de telers teruggekoppeld. De Phalaenopsistelers kunnen Temperatuur-, RV- en PAR-data onderling vergelijken. Tomatentelers kregen data van andere tomatentelers van de teeltbegeleider. De grafieken worden gebruikt om kritische momenten te evalueren.

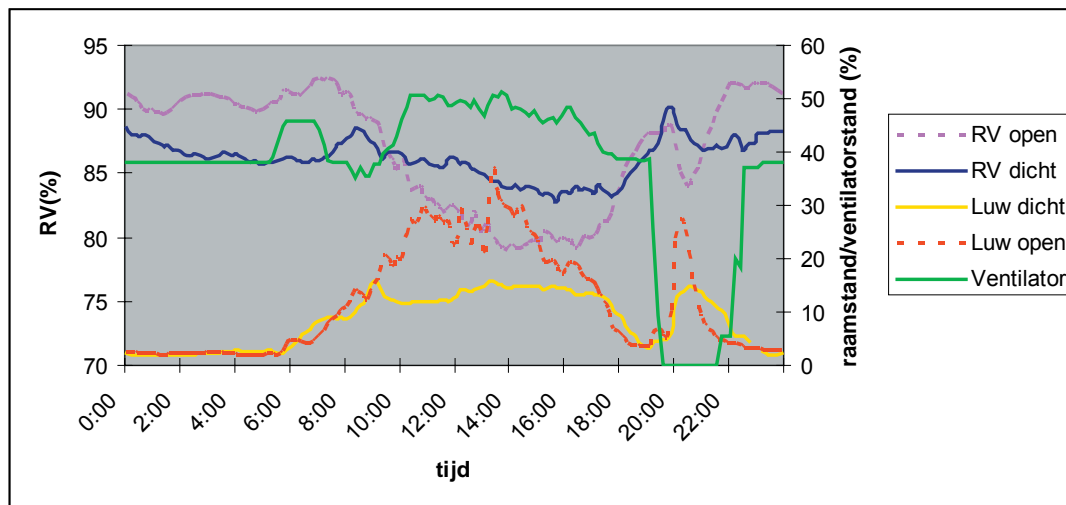
Figuur 54 toont een voorbeeld van een vergelijkingsgrafiek bij Phalaenopsis in augustus. De grafiek laat zien dat in de koelafdeling moeilijk een lage RV kan worden aangehouden. Meestal wordt een RV van 75% nagestreefd. Bij twee bedrijven was 's nachts gegoten en daar was de RV gedurende lange tijd zeer hoog. Bij de twee andere bedrijven, waar die dag niet was gegoten steeg de RV ook tot 85% of 90%.



Figuur 54. Voorbeeld van een vergelijkingsgrafiek via Letsgrow.com

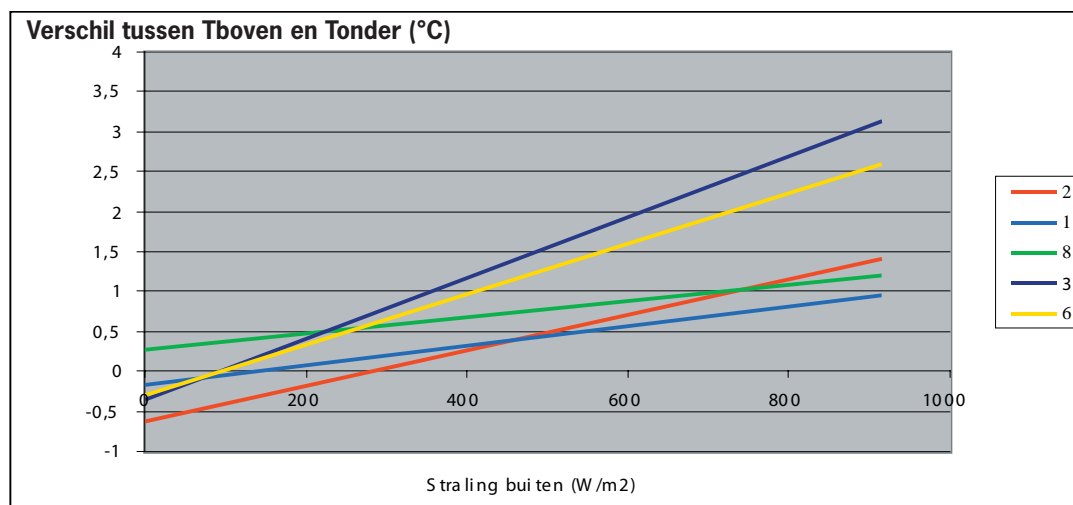
6.1.2 Cyclische gemiddelden

Van alle metingen kunnen cyclische gemiddelden worden berekend. Cyclische gemiddelden geven van ieder tijdstip de gemiddelde waarde aan gedurende een aantal, bijvoorbeeld 14, etmalen. Zo wordt een structureel verloop van de verschillende waarden zichtbaar. Een voorbeeld van cyclische gemiddelden is in Figuur 55 weergegeven. Uit de grafiek blijkt dat in de geconditioneerde tomatenkas de ramen overdag minder ver opengaan dan in de open kas en dat de RV daar ook minder daalt. Verder is te zien dat de teler na zonsondergang de ventilatoren in de gesloten kas uitzet en de luchtramen opent om een verlaagde 'voornachttemperatuur' te realiseren. Het voordeel van cyclische gemiddelden is, dat toevallige schommelingen worden uitgemiddeld en de grote lijnen van de afgelopen twee weken meer naar boven komen. Dit geeft een basis om met de teler te discussiëren waarom bepaalde instellingen zijn gebruikt.



Figuur 55. Voorbeeld van een grafiek van cyclische gemiddelden.

Ruwe data werden bewerkt, door ongeloofwaardige of ongeldige data weg te filteren. Dit werd vooral toegepast voor analyses. Zo kunnen met Excel verschillende data met elkaar worden vergeleken om de invloed op elkaar te kunnen bepalen. In Figuur 56 zijn van vijf verschillende tomatenbedrijven de regressielijnen gegeven van het verschil tussen de boven- en de benedentemperatuur. Uit de figuur blijkt dat sommige bedrijven een hoger temperatuurverschil accepteren dan andere. Dit heeft ook te maken met de configuratie, de mate van bovenkoeling of de ventilatiecapaciteit.



Figuur 56. Voorbeeld van een analyse met gefilterde data van de bedrijven.

7 Literatuur

- Bakker, J.C., H.J. Maters, J.A. Kipp, Th.H. Gieling, en A.C. Hoes, 2009. Synergie Eindrapportage Fase I en II. Nota 569 Wageningen UR Glastuinbouw januari 2009, pp58
- Bontsema, J., Th.H. Gieling, J.G. Kornet E. Rijpsma & G.J. Swinkels, 2005. Het effect van fouten op het meten van licht, temperatuur en CO₂ op de energiebesparing van tuinbouwkassen. Rapport A&F-510.
- Campen J B; A. de Gelder (2007). Horizontale variatie, pp. 16. Rapport Plant Research International, Wageningen
- Energiek 2020; www.energiek2020.nu
- Hortimax, 2008. <http://www.hortimax.nl/4/4/32/nl/producten/sensoren/sensortom.html>
- Jaarplan Kas als Energiebron, 2008. Programma Kas als energiebron. www.kasalsenergiebron.nl/, pp 28.
- Kipp, J.A., Th.H. Gieling en M.A. Bruins, 2008. Monitoringsprotocol voor Meten in Semi-gesloten Kassen. Nota 550, Wageningen UR Glastuinbouw, Bleiswijk, pp 22.
- Mariaux, G., Y. Gervais and L. Crespeau, 2000. Theoretical and Experimental Investigation of the Dynamic Behaviour of Centrifugal Fans, Intern. Journal of Rotating Machinery Vol. 6-3, pp. 227-233
- GLK 8, Anonymus. 2007. Certificatie schema groenlabelkas. www.smk.nl
- Sownet 2007. <http://www.sownet.nl>.
- Raaphorst, M. 2005. Optimale teelt in de gesloten kas. Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V. Business Unit Glastuinbouw, pp56.
- Dieleman, A., de Gelder, A., Evelens, B., Elings, A., Janse, J., Lagas, P., Qian, T., Steenhuizen, J., & Meinen, E., 2009. Tomaten telen in een geconditioneerde kas: groei productie en onderliggende processen. Nota 633, Wageningen UR Glastuinbouw, Wageningen, pp 60.

Bijlage I Technische gegevens meetpalen

Uitgangspunten

- Belangrijk: de meetopstellingen worden individueel ontsloten via LetsGrow Live en zijn daardoor op alle bedrijven inzetbaar, onafhankelijk van het merk of type klimaatcomputer.
- Op ieder van de zeven deelnemende bedrijven worden twee uniforme meetopstellingen geïnstalleerd. De uniformiteit en kwaliteit van de sensoren data is hiermee gewaarborgd.
- Systemen kunnen na de periode van 2 jaar zeer gemakkelijk voor andere doeleinden (onderzoeken) worden ingezet. De geboden oplossing is dus niet bedrijfsafhankelijk.
- Meetopstelling nr. 1 bestaat uit een meetpaal met een PAR sensor, een Planttemperatuur camera, een WET sensor en drie meetboxen met een RV- en temperatuursensor.
- Meetopstelling nr. 2 bestaat uit een meetpaal met drie meetboxen met een RV- en temperatuursensor.
- Alle meetopstellingen worden volgens genoemde voorschriften (meetprotocol -1997) gemonteerd, geïnstalleerd en ontsloten via GPRS modem.
- Alle klimaatcomputers en aanwezige meetopstellingen worden voor de duur van twee jaar ontsloten via LetsGrow Live voor de uitlezing van de data. Genoemde prijzen betreffende de Internetdiensten gelden dan ook voor 2 jaar.
- Offerte is exclusief benodigde aanpassingen op de bedrijven van de individuele Synergie deelnemers. Te denken valt aan buiten RV meting of aanpassingen aan klimaatcomputer of bedrijfsnetwerk. (Zie hiervoor de bijlage "LetsGrow Live eisen").

Hoogendoorn

Versie	: ECONOMIC vanaf Versie 11
Besturingssysteem	: Windows® XP
Firewall	: Met port forwarding functionaliteit, bij voorkeur Netscreen
IP adres	: Vast IP adres via zakelijke breedband verbinding
Internet verbinding	: Voorkeur download 2048 kbps
Kosten	: Geen

Priva

Versie	: Office versie vanaf 4.3.2
Besturingssysteem	: Windows® XP
Benodigde software	: Rapport generator met Live koppeling voor LetsGrow
IP adres	: Vast IP adres via zakelijke breedband verbinding
Internet verbinding	: Voorkeur download 2048 kbps
Kosten	: Rapport generator en live koppeling moeten aanwezig zijn, kosten hangen af van reeds aanwezige software. Indicatie; max: € 2.200,- / min: € 0,-

HortiMaX

Versie	: Synopta vanaf versie 2
Besturingssysteem	: Windows® XP
IP adres	: Vast IP adres via zakelijke breedband verbinding
Internet verbinding	: Voorkeur download 2048 kbps
Kosten	: Geen

Planttemperatuur camera

Inleiding

Met de meetbox wordt reeds de ruimtetemperatuur gemeten en is daarmee een bekend gegeven. De temperatuur van het gewas (bloem, steel, vrucht) kan daarvan echter sterk afwijken met mogelijk gewascondensatie tot gevolg. Daarnaast bepaalt de planttemperatuur uiteindelijk de plantactiviteit en niet de ruimtetemperatuur. Inzicht in de planttemperatuur is daarom onmisbaar bij optimalisering van de teeltomstandigheden.



Techniek

Deze sensor maakt gebruik van infrarood techniek waarmee een contactloze meting kan worden uitgevoerd.

Meting

De Planttemperatuur camera meet de temperatuur (°C) van het gewas of de vrucht waarop de camera gericht wordt. Afhankelijk van de hoogte en de kijkhoek ten opzichte van het gewas heeft de Planttemperatuur camera een meetspot-oppervlak van 0,8 – 8 m². Bij een horizontale plaatsing van de behuizing (zie foto) meet de camera onder de standaard richthoek van 79°.

Bevestiging / plaatsing

De Planttemperatuur camera is spatwaterdicht en heeft een solide RVS behuizing welke op een beugel met draaibare kop wordt gemonteerd. De beugel wordt aan een kaspoot bevestigd.

Onderhoud / kalibratie

Het onderhoud bestaat slechts uit het –met enige regelmaat- reinigen van de lens met een vochtige doek. Dit is mede afhankelijk van de hoeveelheid uitgevoerde gewasbeschermingshandelingen waardoor de lens in meer of mindere mate vervuild raakt. Kalibratie van de Planttemperatuur camera is vrijwel niet nodig omdat door aanwezigheid van een referentieschijf afwijkingen vanzelf gecorrigeerd worden.

Geleverd wordt een Planttemperatuur camera set, bestaande uit:

- CT 11 infrarood camera 4 – 20 mA
- Camerakop met RVS behuizing
- Kaspootbeugel
- Growlab verwijsbordje
- Handleiding

Meetbox

Inleiding

Als aanvulling op het Growlab meetsysteem is een meetbox beschikbaar.

Techniek

Zowel de RV/T als de optionele CO₂ sensor werken digitaal.

Meting

De RV/T sensor meet het relatieve vochtgehalte (%) en de temperatuur (°C) van de lucht.

Bevestiging / plaatsing

De meetbox kan zeer eenvoudig gemonteerd worden aan de meetpaal of via een beugel aan een kaspoot.

Kalibratie

Het kalibreren van de RV/T sensor dient tweejaarlijks te gebeuren en kan uitgevoerd worden door het vervangen van de meetkop door een nieuw exemplaar.

Geleverd wordt een meetbox, bestaande uit:

- RV/T sensor
- Meetbox met ventilator
- Ophangbeugel

Optie:

De meetbox kan uitgebreid worden met een CO₂ sensor. Hiermee heeft u inzicht in het CO₂ gehalte (in ppm's) op gewasniveau. Deze meting wordt tevens als input gebruikt voor de berekening van het Fotosyntheserendement in geval van toepassing bij een Growlab Plantivity meetunit.

- CO₂ sensor
- Interface

WET sensor set

Inleiding

Met de WET sensor beschikt u over een instrument dat inzicht geeft in de teeltomstandigheden op wortelniveau.

Techniek

De WET sensor werkt elektronisch en is onderhoudsvrij. De sensor bestaat uit een drietal meetpennen die in het substraat gestoken wordt.



Meting

De WET sensor meet

- het EC gehalte (mS/cm/s^{-1})
- het vochtgehalte (%)
- de substraattemperatuur ($^{\circ}\text{C}$)

Bevestiging / plaatsing

De WET sensor wordt in het substraat gestoken en is met een kabel verbonden aan de interface. Deze wordt in de nabijheid ($< 5 \text{ m}$) aan een kaspoot gemonteerd.

Kalibratie

De WET sensor wordt softwarematig gekalibreerd en kan daarom in vele bodem- en substraatsoorten worden geplaatst zoals: steenwol, potgrond, veengrond, volle grond of kokos.

Geleverd wordt een WET sensor set, bestaande uit:

- WET sensor type-3
- Interface 0-5 V / 4-20 mA
- Growlab verwijsbordje
- Handleiding

PAR sensor

Inleiding

Met de PAR sensor is het mogelijk om het 'groeilicht' in de kas op gewasniveau te meten. Deze sensor meet het beschikbare licht wat de plant kan gebruiken voor het fotosyntheseprocess.

Techniek

De PAR sensor is een compacte waterdichte sensor en heeft een analoog uitgangssignaal.

Meting

De PAR sensor meet het groeilicht ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}^{-1}$).



Bevestiging / plaatsing

De PAR sensor wordt met een houder bevestigd in de kas vlak boven het gewas.

Onderhoud / kalibratie

Het onderhoud bestaat slechts uit het –met enige regelmaat- reinigen van het meetvlak met een vochtige doek. Dit is mede afhankelijk van de hoeveelheid uitgevoerde gewasbeschermingshandelingen waardoor de lens in meer of mindere mate vervuild raakt. De normale meetafwijking bedraagt ca. 2% per jaar. Geadviseerd wordt de PAR sensor tweejaarlijks te laten kalibreren.

Geleverd wordt een PAR sensor, bestaande uit:

- PAR sensor
- Bevestiging
- Interface 0-5 V / 4-20 mA
- Growlab verwijsbordje
- Handleiding

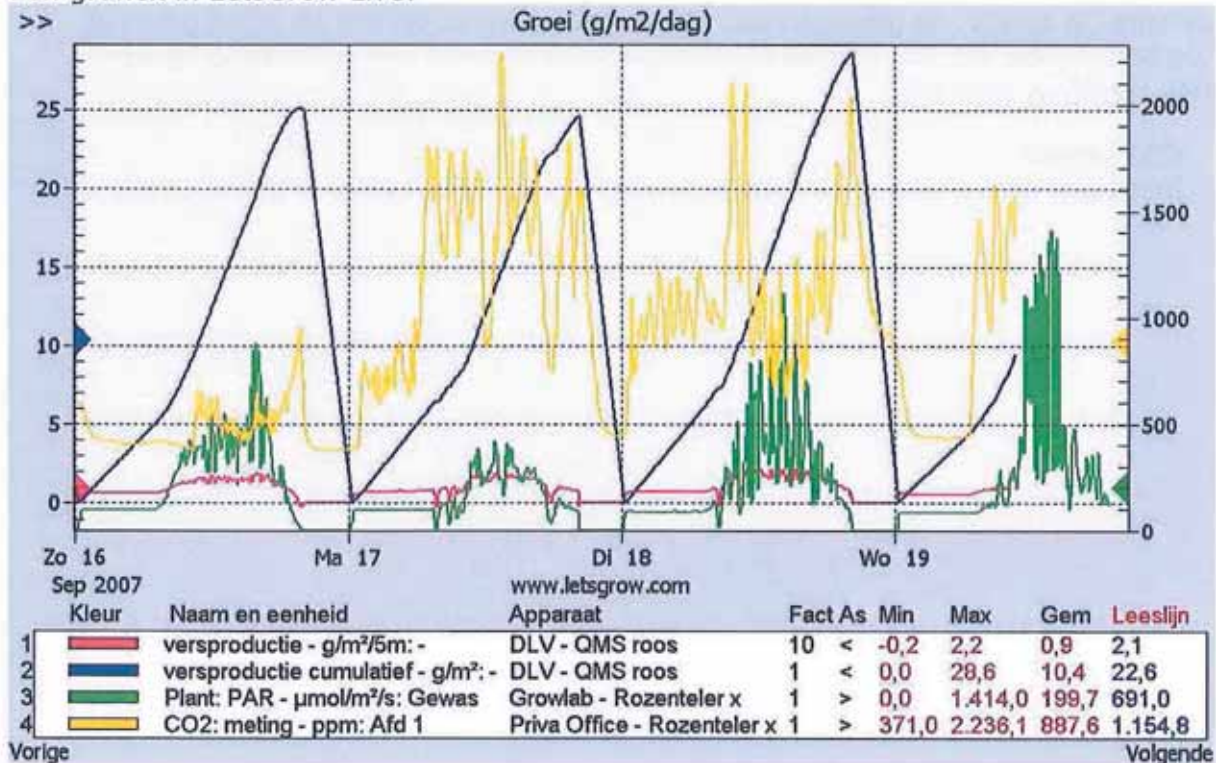
LetsGrow Live

Het onafhankelijke platform voor de Internationale glastuinbouw. Alle gewenste management informatie is overal, altijd en live beschikbaar via Internet via het Management Informatie Systeem LetsGrow Live. Klantspecifieke berekeningen of modellen die meerekenen met de continu wisselende omstandigheden in uw kas kunnen eenvoudig worden toegevoegd aan uw account.

De meeste kwekers nemen deel in een studieclub of een excursiegroep en willen hun teeltgegevens en procesverloop vergelijken met die van collega's. Ook grote tuinbouwbedrijven met meerdere teeltlocaties willen de processen van de verschillende locaties eenvoudiger kunnen vergelijken. Vaak blijkt namelijk dat bijvoorbeeld klimaatgegevens niet met elkaar overeenkomen en daardoor onvergelykbaar zijn. Een Priva klimaatcomputer is nou eenmaal geen HortiMaX computer. LetsGrow.com heeft nu een geautomatiseerd systeem ontwikkeld, waardoor het mogelijk is om allerlei gegevens van verschillende bedrijven of verschillende teeltlocaties via internet in één grafiek, tabel of overzicht samen te brengen.

Door analyse van deze grafieken en rapportages kunt u sneller en efficiënter van elkaar leren. Dat bespaart tijd en levert meer resultaat op. Daarnaast biedt LetsGrow Live de mogelijkheid om 5 minutengegevens direct online weer te geven. Dat betekent dat u altijd 'live' inzage hebt in het klimaatverloop bij uw collega's uit de excursiegroep. Desgewenst kunt u een teeltadviseur inzagerecht geven om via internet met u mee te kijken. Dat maakt het wel zo makkelijk om met elkaar van gedachten te wisselen.

Een grafiek in LetsGrow Live:



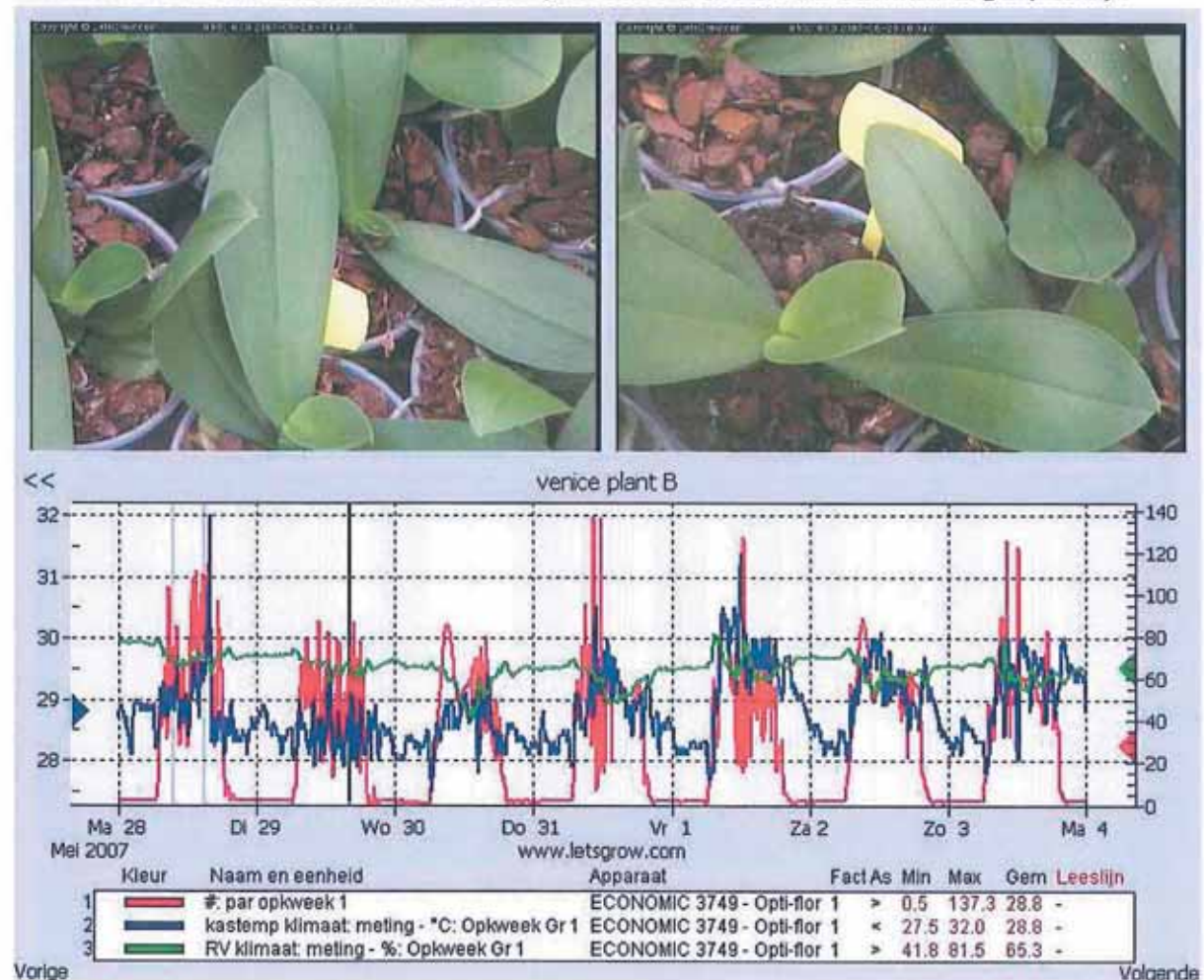
LetsGrow Teleview

Telers krijgen voor het eerst de mogelijkheid om hun gewas via camera's te registreren. Deze extra dimensie kan meer inzicht verschaffen in de teelt waardoor een verdere optimalisatie mogelijk is.

Nieuwe rassen, andere teeltstrategieën voor klimaat en watergeven en jaar-lijks wisselende klimaatomstandigheden maken het telen tot een dynamisch proces. Om het optimale uit het gewas te blijven halen is het nodig om in-zicht te hebben in de groeiomstandigheden en daarbij te zien hoe het gewas hierop reageert. Niet alleen het klimaat, maar ook de stand van het gewas is belangrijk om een goede analyse te maken.

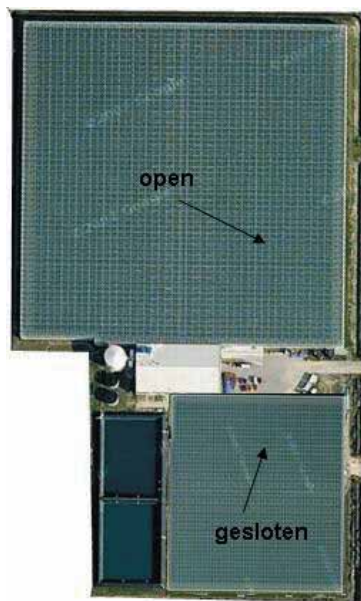
Via de geavanceerde software is het mogelijk om de klimaatgegevens en het beeld van het gewas met elkaar te integreren. Met het bladeren door de klimaatgrafiek zal gelijktijdig het beeldmateriaal verspringen naar de bijbehorende periode. Hierdoor is niet alleen te zien wat het klimaat van bijvoorbeeld vier weken geleden was, maar ook hoe het gewas er toen bij stond.

Schermafdruck van LetsGrow Teleview (de foto's worden als een film afgespeeld):

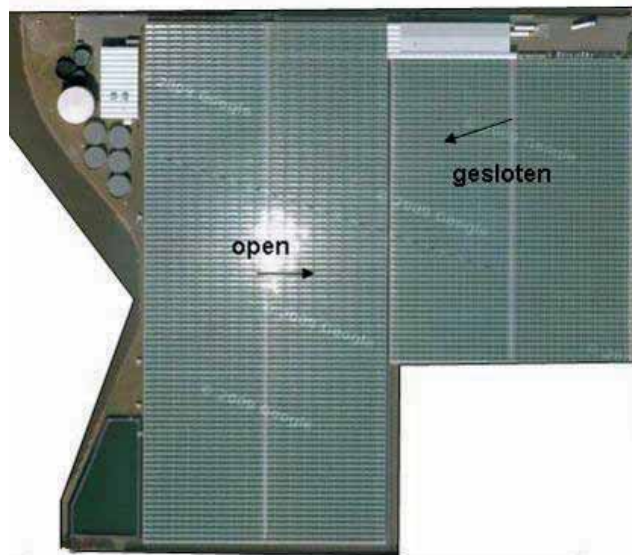


Bijlage II Overzicht meetlocaties

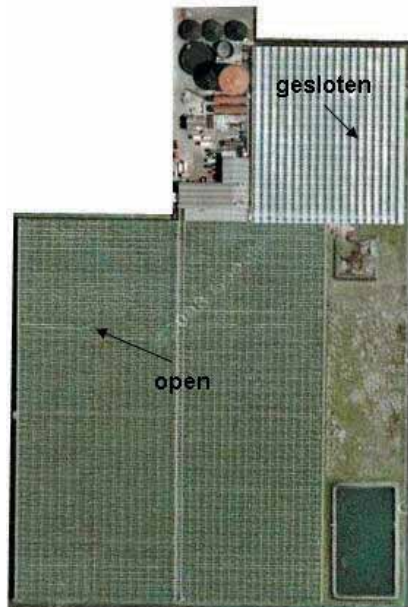
Plattegronden van de Tomatenbedrijven. De locaties van de meetpalen zijn met de pijl aangegeven.



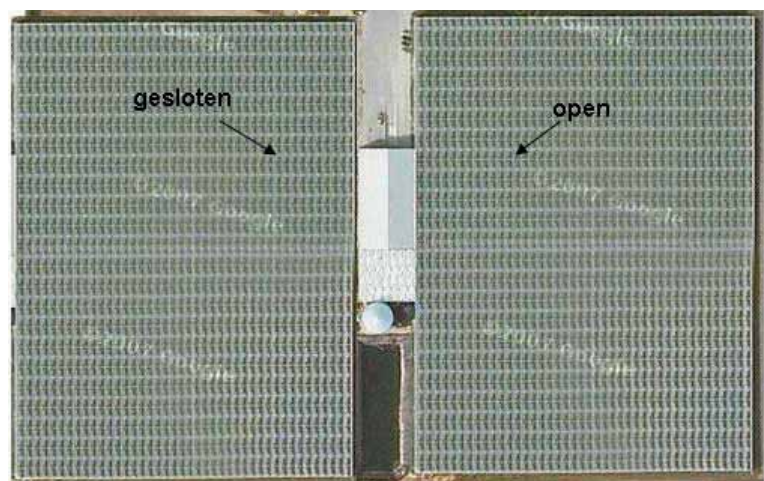
Tomatenbedrijf 1



Tomatenbedrijf 2

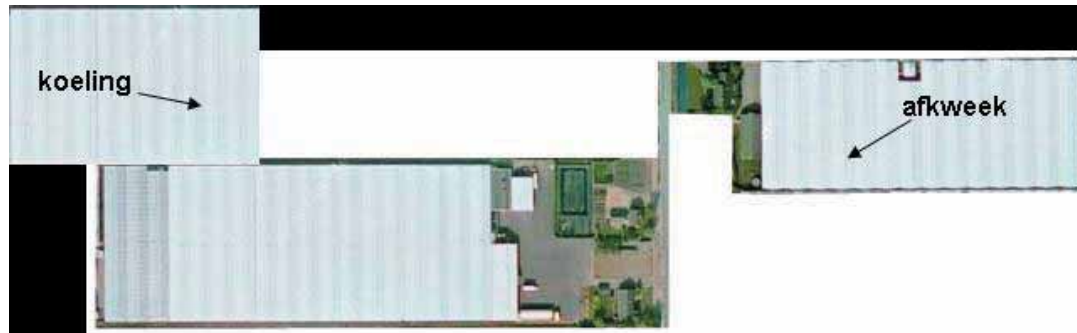


Tomatenbedrijf 3

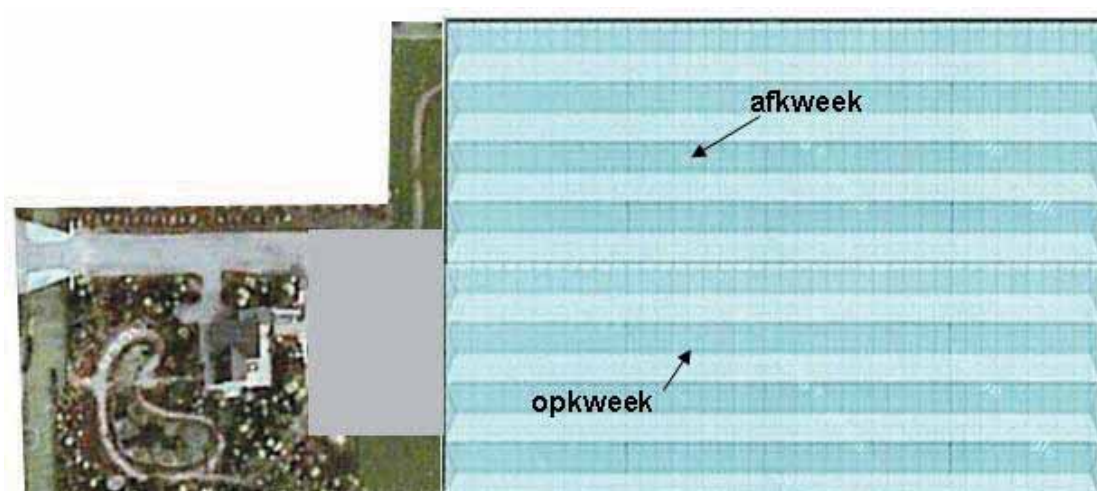


Tomatenbedrijf 4

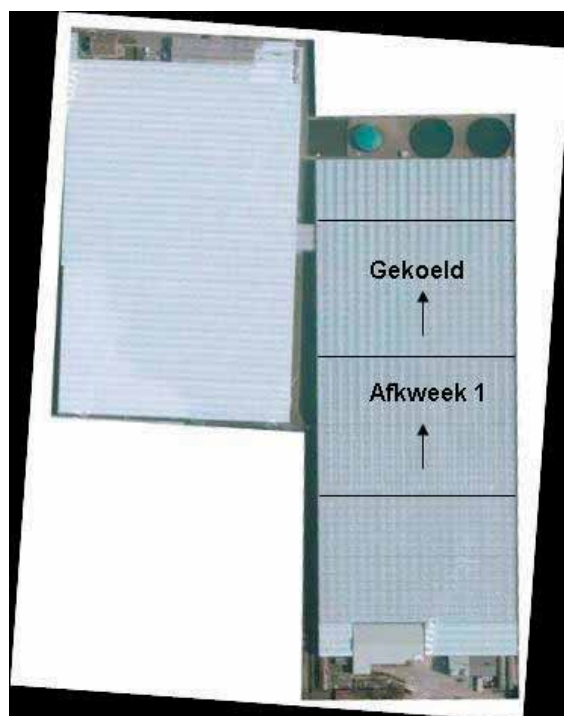
Plattegronden van de Phalaenopsisbedrijven. De locaties van de meetpalen zijn met de pijl aangegeven.



Phalaenopsisbedrijf 5



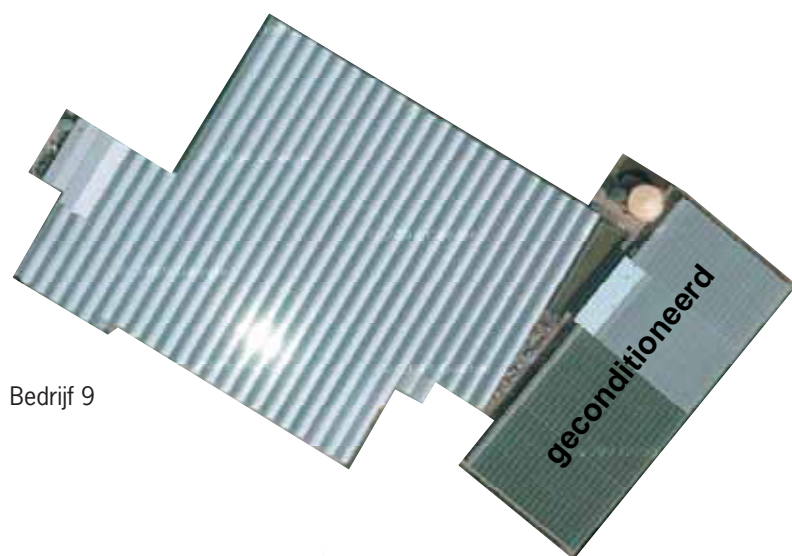
Phalaenopsisbedrijf 6



Phalaenopsisbedrijf 7



Phalaenopsisbedrijf 8



Bedrijf 9

Bijlage III Resultaten kalibratiemetingen

Tabel 8. Resultaten van de controle meting bij tuinder 3 op 30 september 2009.

Standaard afdeling						
tijdstip		Referentie	Meetpaal	eenheid	opmerking	
9:30	T _{boven}	20.1	20.2	[°C]	berekend	
	RH _{boven}	88.1	80.6	[%]		
	VD _{boven}	2.15	3.50	[g.m ⁻³]		
9:35	T _{midden}	20.1	20.2	[°C]	berekend	
	RH _{midden}	88.0	80.6	[%]		
	VD _{midden}	2.16	3.50			
9:40	T _{onder}	20.4	20.2	[°C]	berekend	
	RH _{onder}	86.7	80.3	[%]		
	VD _{onder}	2.43	3.56	[g.m ⁻³]		
Afdeling met luchtslangen en raamventilatie						
10:10	T _{boven}	21.7	21.7	[°C]	geen luchtfilter	
	RH _{boven}	80.5	76.1	[%]	grote doorstroming	
	VD _{boven}	3.80	4.69	[g.m ⁻³]	berekend	
10:15	T _{midden}	21.7	21.7	[°C]	geen luchtfilter	
	RH _{midden}	83.6	78.7	[%]		
	VD _{midden}	3.21	4.18	[g.m ⁻³]	berekend	
10:20	T _{onder}	21.8	21.8	[°C]	geen luchtfilter	
	RH _{onder}	82.5	76.1	[%]		
	VD _{onder}	3.45	4.72	[g.m ⁻³]	berekend	
10:30	PAR	174.0	165.0	[μMol.m ⁻² .s ⁻¹]	weer: bewolkt diffuus	
10:30	PAR zwart	1.0	1.0		kapje op de sensor	
tijdstip		Referentie	IR camera	Berekend	eenheid	opmerking
10:45	T _{straling}	0 °C	1335.0	0.0	[°C]	smeltend ijs
10:35	T _{straling}	39 °C	3414.0	39.0	[°C]	zwartstraler

Tabel 9. Resultaten van de controle meting op bedrijf 2 30 september 2009.

Open afdeling					
tijdstip		Referentie	Meetpaal	eenheid	
13:05	T _{boven}	19.2	19.0	[°C]	
	RH _{boven}	74.0	81.0	[%]	
	VD _{boven}	4.45	3.22	[g.m ⁻³]	berekend
13:07	T _{midden}	19.3	19.0	[°C]	
	RH _{midden}	75.2	79.2	[%]	
	VD _{midden}	4.27	3.53	[g.m ⁻³]	berekend
13:10	T _{onder}	19.8	18.3	[°C]	
	RH _{onder}	72.0	80.8	[%]	
	VD _{onder}	4.95	3.13	[g.m ⁻³]	berekend
13:15	CO ₂	420.0		[ppm]	op 1 mtr goothoogte
Gesloten afdeling					

Vervolg tabel 9.

12:30	T _{boven}	21.6	21.7	[°C]	geen luchtfilter
	RH _{boven}	73.1	73.5	[%]	veel luchtdoorstroom
	VD _{boven}	5.26	5.21	[g.m ⁻³]	berekend
12:35	T _{midden}	20.7	20.4	[°C]	geen luchtfilter
	RH _{midden}	79.0	81.4	[%]	
	VD _{midden}	3.91	3.41	[g.m ⁻³]	berekend
12:40	T _{onder}	21.0	19.7	[°C]	geen luchtfilter
	RH _{onder}	73.0	78.2	[%]	Meting buiten spec's
	VD _{onder}	5.11	3.84	[g.m ⁻³]	berekend
12:45	PAR	270.0	245.0	[μMol.m ⁻² .s ⁻¹]	weertype: bewolkt diffuus
	PAR zwart	1.0	1.0		zwart kapje op de sensor
12:50	T _{straling}	0 °C	0.3	[°C]	smeltend ijs in thermoskan
	T _{straling}	39 °C	39.1	[°C]	zwartstraler
12:23	CO ₂	860.0		[ppm]	op 1 mtr goothoogte
12:25	CO ₂		930.0	[ppm]	op 2.8 mtr hoogte

Tabel 10. Resultaten van de controle meting op bedrijf 1 30 oktober 2009.

Gesloten afdeling					
tijdstip		Referentie	Meetpaal	eenheid	opmerking
9:30	T _{boven}	21.7	21.4	[°C]	
	RH _{boven}	84.2	87.3	[%]	
	VD _{boven}	3.10	2.40	[g.m ⁻³]	
9:35	T _{midden}	22.8	22.1	[°C]	t.g.v. opwarmen
	RH _{midden}	84.1	81.0	[%]	instabiliteit in meetwaarde
	VD _{midden}	3.30	3.80		berekend
9:40	T _{onder}	22.4	21.7	[°C]	
	RH _{onder}	84.5	85.6	[%]	
	VD _{onder}	3.10	2.80	[g.m ⁻³]	berekend
10:35	T _{straling}	39.0	38.9	[°C]	zwartstraler
	T _{straling}	0.0	0.1	[°C]	smeltend ijs in thermoskan
Open afdeling					
11:05	T _{boven}	20.5	20.4	[°C]	geen luchtfilter
	RH _{boven}	74.9	74.6	[%]	veel luchtdoorstroom
	VD _{boven}	4.60	4.60	[g.m ⁻³]	berekend
11:15	T _{midden}	20.6	20.0	[°C]	geen luchtfilter
	RH _{midden}	75.2	75.0	[%]	
	VD _{midden}	4.60	5.40	[g.m ⁻³]	berekend
11:25	T _{onder}	21.5	20.1	[°C]	geen luchtfilter
	RH _{onder}	73.5	75.6	[%]	
	VD _{onder}	5.20	4.40	[g.m ⁻³]	berekend
10:45	T _{straling}	39.0	38.8	[°C]	IR camera berekend
10:35	T _{straling}	0.0	0.0	[°C]	

Tabel 11. Overzicht van de gebruikte referentie sensoren en een I4All meetpaal .

Referentie sensoren:	Type	fabrikant	Leverancier
Temperatuur	DTM 3000	Sensor Data	Catec
T & RH sensor	Digitron 2080	www.digitron.co.uk	Catec
PAR sensor	LiCor LI 250a		Catec
Referentiebronnen:			
39 °C Zwartstraler	Heitronics SW15		Heitronics
0 °C	smeltend ijs in thermoskan		



Zwartstraler 39°C
Heitronics SW15



Temperatuur sensor DTM3000



CO₂ meter VaisalaCARBOCAP



PAR LiCor LI 250a



T & RH Digitron



Meetpaal i4All check

Figuur 57. Meetapparatuur zoals gebruikt tijdens de metingen

Bijlage IV Bepalen energiegebruik van kunstmatige belichting

Het lichtniveau in de kas bestaat uit een deel transmissie van buitenlicht en een deel kunstmatige belichting. De belichting kan in groepen continue geregeld worden. Het PAR niveau in de kas en het PAR niveau buiten de kas zijn continue gemeten. De bijdrage van elke lichtbron wordt bepaald. Hieruit volgt de tijdsduur en de mate van de belichting en kan het totale belichtingsenergieverbruik berekend worden.

Vanaf 1 oktober 2009 is het stuursignaal LIGHTON beschikbaar, dat het percentage v.h. vermogen P_{art} van de artificiële belichting aangeeft. De volgende procedure berekend LIGHTON aanvullend voor de ontbrekende periode en daarmee het energieverbruik voor de totale belichtingsperiode.

De installatieschema's geven aan dat in afd. 1, 2 resp. afd. 3, 4 en 6, resp. 80 en 160 [$\mu\text{Mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] verlichting is geïnstalleerd. Uit de metingen met de PAR sensor volgt dat dit werkelijk 68 resp. 137 [$\mu\text{Mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] bedraagt, bij 100% belichting (Figuur 58). De conversiefactor F_{par} wordt dan 0.68 resp. 1.37 [$\mu\text{Mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \%^{-1}$].

De lichttransmissie van een kas veranderd sterk in de loop van het jaar (Bot G..1983), hetgeen de voorkeur oplevert om de transmissie te berekenen over een periode waarin de belichting actief is. De transmissie factor F_{td} voor het kasdek wordt bepaald door de ratio:

$$F_{td} = \frac{PAR_{transm}}{PAR_{out}} \quad 0..1 [-]$$

$$PAR_{transm} = PAR_{inside} - PAR_{artif}$$

$$PAR_{artif} = LIGHTON \cdot F_{par}$$

Waarbij:

PAR_{transm} is het transmissieve deel van de PAR in de kas

PAR_{out} is de gemeten PAR buiten de kas.

PAR_{inside} is de gemeten PAR in de kas

PAR_{artif} is het PAR deel van de artificiële belichting

De ratio PAR_{transm} / PAR_{out} blijkt maar in een beperkt gebied geldig te zijn waardoor er gekozen is deze grafisch weer te geven en de F_{td} m.b.v. diagram 1 van Figuur 58 te bepalen. In diagram 1 van Figuur 58 is het cyclische gemiddelde over 7 dagen genomen waardoor een gemiddelde waarde ontstaat. De grafiek laat tevens zien dat de F_{td} maar in een beperkt deel bepaald kan worden. Automatisch berekenen is om die reden te onnauwkeurig. De transmissie factor blijkt voor beide afdelingen ongeveer $F_{td} = 0.5$ te zijn. Dit is een acceptabele waarde voor een kasdek met kanaalplaten. Met deze transmissiefactor kan voor de gehele belichtingsperiode PAR_{transm} bepaald worden. Het signaal LIGHTONcalc kan m.b.v. PAR_{artif} nu voor de gehele belichtingsperiode berekend worden:

$$PAR_{artif} = PAR_{inside} - PAR_{out} \cdot F_{td} \cdot F_{tscr}$$

$$LIGHTONcalc = PAR_{artif} / F_{par} \quad 0..100 [\%]$$

Waarbij:

F_{tscr} is de transmissiefactor voor de combinatie van beide schermen en wordt als volgt berekend:

LIGHTONcalc uitmiddelen over een jaar geeft de belastingsfactor.

$$Fb = \text{mean}(LIGHTONcalc) / 100 \quad 0..1 [-]$$

F_{tscr} wordt dan als volgt berekend:

Elke afdeling heeft 2 schermen aangeduid met SCR1 en SCR2. Waarbij:

SCR1 0-50 % scherming aan de zuidzijde kap,

SCR1 50-100% scherming noordzijde van de kap

SCR2 0-100% horizontaal scherm

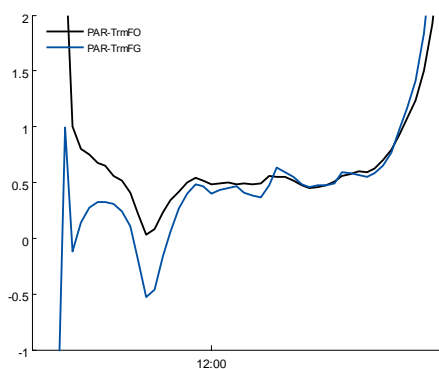
$$F_{tscr} = (SCR1 \cdot 0.25 + (100 - SCR1) \cdot 1.0 \cdot SCR2 \cdot 0.80 + (100 - SCR2) \cdot 1.0) / 100 \quad 0..1 [-]$$

Waarbij:

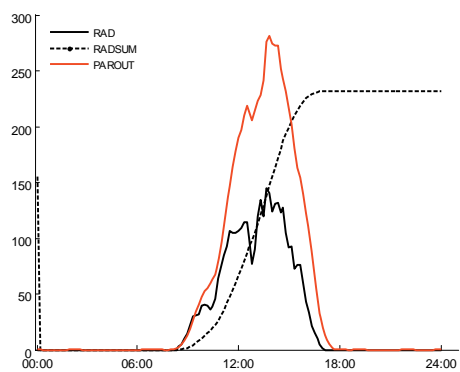
$SCR1 * 0.25$ de transmissie van het scherm 1 is	0-100 [%]
$(100-SCR1) * 1.0$ de transmissie van de kier van scherm 1 is.	0-100 [%]
$SCR2 * 0.8$ de transmissie van het scherm 2 is	0-100 [%]
$(100-SCR2) * 1.0$ de transmissie van de kier van scherm 2 is.	0-100 [%]

De PAR-sensor is bevestigd aan een draaiarm en doorloopt op deze manier een traject waardoor de meting minder gevoelig is voor schaduwwerking van de kasconstructie. Een probleem is dat het horizontale scherm al bij een kleine opening de volledige lichtdoorlaat op de sensor geeft waardoor het scherm als niet lineair door de sensor gezien wordt. Het scherm aan de noordzijde wordt zodra de zon over de nok draait geheel geopend, waardoor een stapvormige verstoring optreedt. Het totale gedrag van de gecombineerde schermen en het meetsysteem voor de PAR is dus complexer dan de formules en de meting weergeven. Buiten de periode dat de belichting aan is, moet de berekende PAR_{artif} 0 zijn. Deze fout wordt zo laag mogelijk gehouden door het empirisch bepalen van de constanten. Dit model is gevoelig voor de waarden van de parameters. Om dit te beperken wordt veronderstelt dat de verlichting aan is, zodra het licht niveau in de kas hoger is dan buiten de kas. Met deze regel wordt LIGHTONcalc vastgesteld, die nu 0 of 100% is; de hiermee berekende belastingsfactor is 17%.

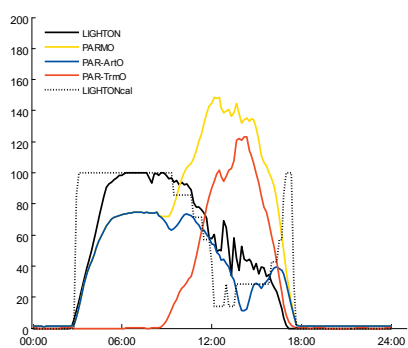
Met de voorgaande uitgebreide procedure wordt de correctie geschat op ~1 %, de belastingsfactor wordt dan 16%. De schatting is gedaan aan de hand van de grafische presentatie van de cyclische gemiddelden over 7 dagen van LIGHTONcalc en LIGHTON, in de periode dat de waarden hiervan bekend zijn. De berekende belastingsfactor is opgenomen in Figuur 58. Diagram 3 en 4 tonen hoe het gemeten PAR niveau in de kas (gele lijn) opgedeeld is in een transmissiedeel van het PAR licht van buiten (rode lijn) en een deel van de artificiële PAR belichting (blauwe lijn). Het deel transmissie van het PAR licht van buiten (rode lijn) komt uiteraard goed overeen met de PAR buiten. Het berekende deel van de PAR artificiële belichting komt overeen met LIGHTON maar duidelijk is te zien dat de berekende LIGHTONcalc te hoog is en gecorrigeerd moet worden. Deze correctie kan berekend resp. geschat worden uit het verschil tussen LIGHTON en LIGHTONcalc. De piek aan het einde van de belichting in LIGHTONcalc komt overeen met het sluiten van het scherm waarbij de PAR-sensor pas op het laatste moment in de schaduw komt. Voor de analyse van de data is intensief gebruikt gemaakt van het programma AnalyseCyclicData dat speciaal voor dit project ontwikkeld is.



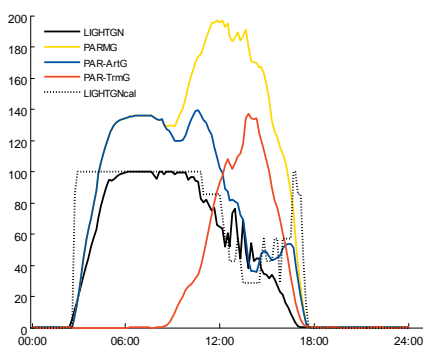
1 Transmissiefactor kasdek



2 Meteo station PAR en Irad



3 PAR niveau's in afd 1,2

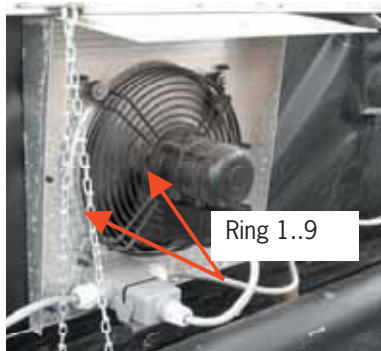


4 PAR niveau's in afd 3,4,6

Figuur 58. Het berekenen van de transmissie coëfficiënt door de gemeten en berekende PAR signalen.

Bijlage V Debiet ventilatoren warmtewisselaars

De kassen van bedrijf 5 en 6 worden verwarmd en gekoeld met een groot aantal warmtewisselaars in combinatie met ventilatoren. Deze zijn per kap/tralie in een rij onder de teelttafels opgesteld. De luchtverplaatsing wordt geregeld door het toerental van de ventilator te variëren met een frequentieregelaar. De luchtverplaatsing is evenredig met het toerental van de ventilator (G. Mariaux et.al 2000), die op zijn beurt weer evenredig is met de frequentie van de regelaar. Aan de hand van het opgeslagen setpoint van de frequentie in de database (Letsgrow) kan de luchtverplaatsing bepaald worden. Metingen in 2008 met aparte KWh meters voor alle ventilatoren tonen dat de ventilatoren vrijwel continue op 50% van het maximale vermogen draaien; onderstaande resultaten zijn hierop gebaseerd.



Figuur 59. Ventilator zoals in gebruik bij het Phalaenopsisbedrijf 6

Meting van het debiet van een ventilator in de praktijk

Het actieve oppervlak van de ventilator is verdeeld in negen ringen, van elke ring is de luchtsnelheid gemeten (Figuur 59). De opbrengst van de ventilator is gemeten bij een frequentie 50Hz met een Testo 512 luchtsnelheid- en drukmeter.

$$Q_{\text{ventilator}} = 3600 * \sum_{n=1}^{n=9} V_n * A_n = 1136 \text{ (n=1..9) [m}^3 \cdot \text{h}^{-1}]$$

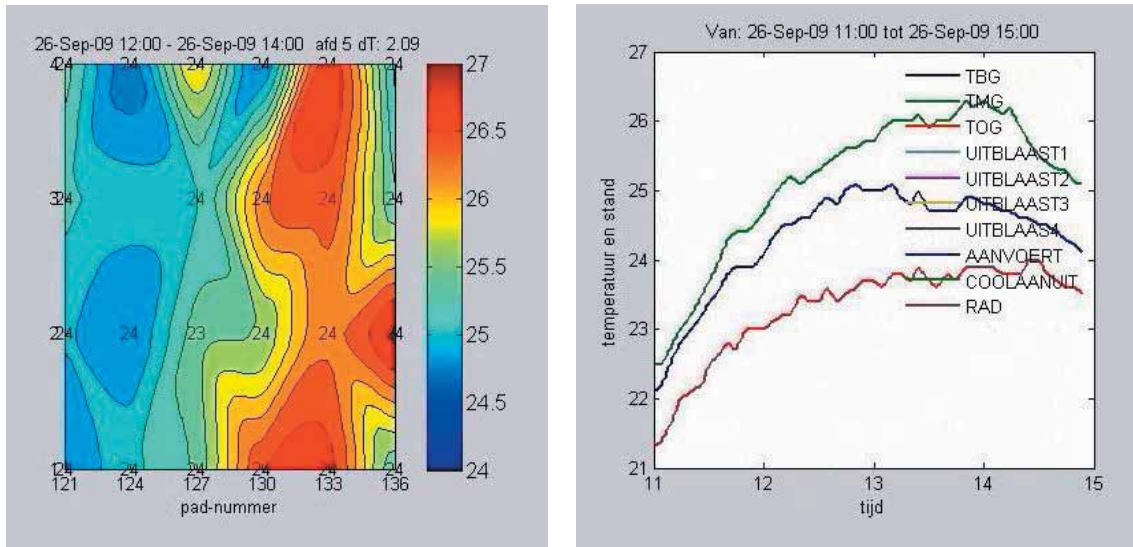
$$A_{\text{ventilator}} = 2.2 * 6.5 [\text{m}^2] \text{ geeft } Q_{\text{m}^2} = Q_{\text{ventilator}} / A_{\text{ventilator}} = 79 \text{ [m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}]$$

Waarbij: n = ring 1..9 van het veiligheidsrooster, V_n = luchtsnelheid gemeten per ring, A_n = opp. / ring, $Q_{\text{ventilator}}$ = debiet ventilator, $A_{\text{ventilator}}$ = het kasopp. / ventilator, Q_{m^2} = het debiet / m^2 kasopp.

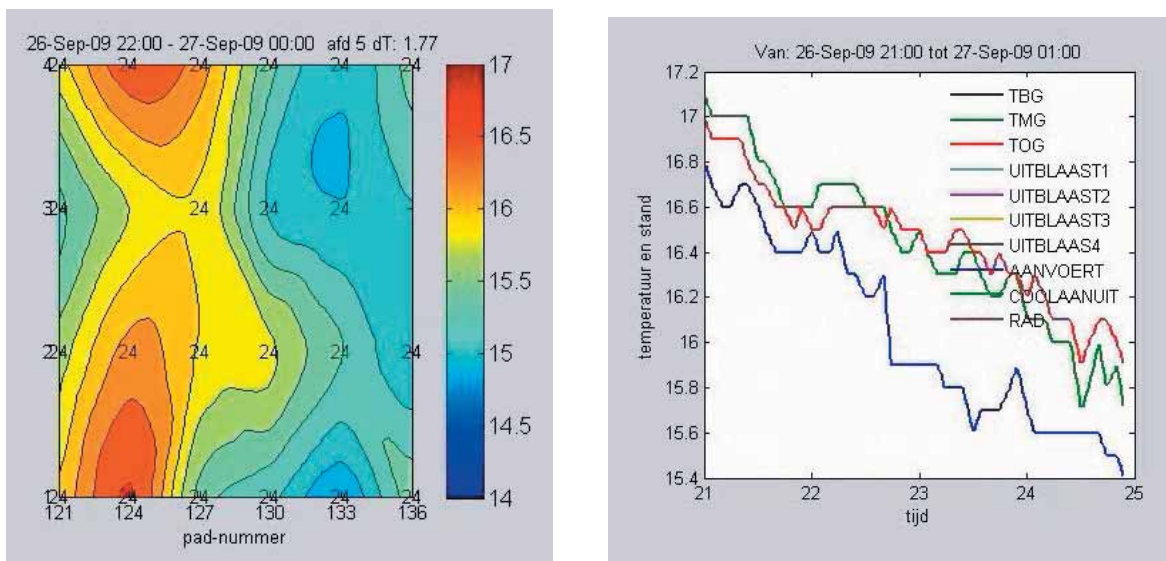
De ventilator is uitgevoerd met een inductiemotor (kooikermotor). Een inductiemotor heeft twee magneetvelden nodig. Het eerste magneetveld is het draaiend magneetveld van de stator en draait synchroon met de netfrequentie van 50Hz. De motor is opgebouwd uit 2 poolparen waardoor het draaiveld $50 * 60 / 2 = 1500 \text{ omw. min}^{-1}$ bedraagt. Het tweede magneetveld bevindt zich in de rotor en wordt meegesleept en geïnduceerd door het statordraaiveld. De rotor draait trager dan het statorveld en is dus asynchroon met de netfrequentie. Het koppel dat de rotor levert is evenredig met het verschil in toerental tussen beide velden, ook wel slip genoemd. De motor specificatie geeft aan dat bij nominaal vermogen van 30W het toerental $n=1320 \text{ omw. min}^{-1}$ en de slip $100\% * (1-1320/1500) \rightarrow 12\%$ is. Een verandering tussen nul- en vollast geeft een verandering in snelheid van 10%. Een frequentieregelaar is een elektronische schakeling die de frequentie van de aangeboden motorvoeding kan regelen, om de snelheid te regelen:

$$n_r = n_s \cdot (1 - g) = \frac{f_1}{p} \cdot (1 - g)$$

waarbij: n_r = Rotorsnelheid motoras, n_s = Statorveldsnelheid, opgedrongen door de frequentieregelaar, g = slip (snelheidsverschil tussen stator en rotor t.b.v. koppel), f_1 = de nieuwe frequentie door de frequentieregelaar, p = Aantal poolparen, (constant, 2 bij een 4-polige motor).



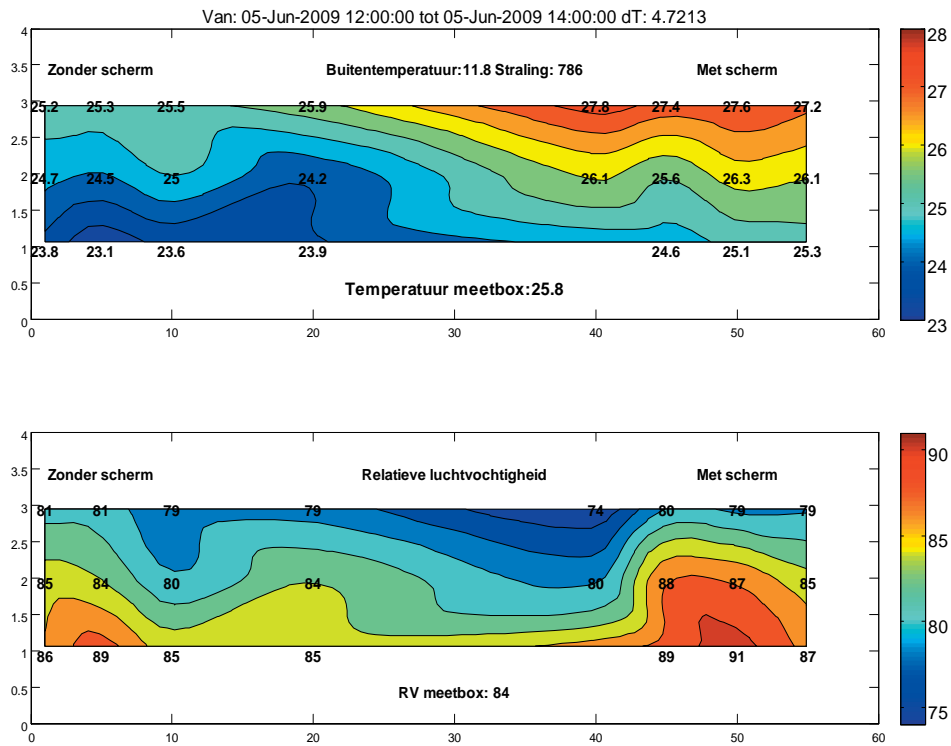
Figuur 61. Temperatuurverdeling bij bedrijf 1 op 26-sep-09 14:00, delta T = 2.1°C.



Figuur 62. Temperatuurverdeling bij bedrijf 1 op 26-sep-09 24:00, delta T = 1.8°C.

Bedrijf 2

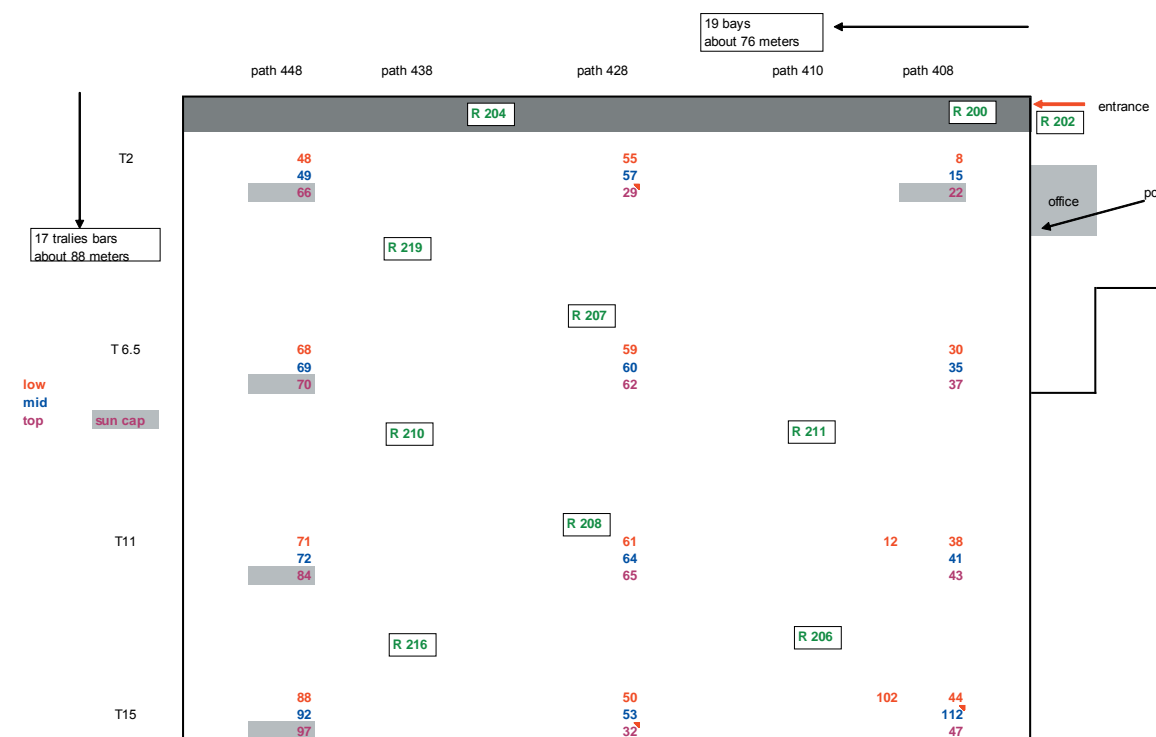
Zoals in paragraaf 5.4.4 is besproken is een extra scherm in de kas geplaatst om de lage temperatuur nabij de LBK tijdens verwarmen te voorkomen. In Figuur 63 is te zien dat dit scherm zorgt voor hogere temperaturen om het moment dat er wordt gekoeld. Kortom het scherm is niet een goede oplossing.



Figuur 63. Temperatuur en luchtvochtigheid bij een stralingsniveau van bijna 800 W/m².

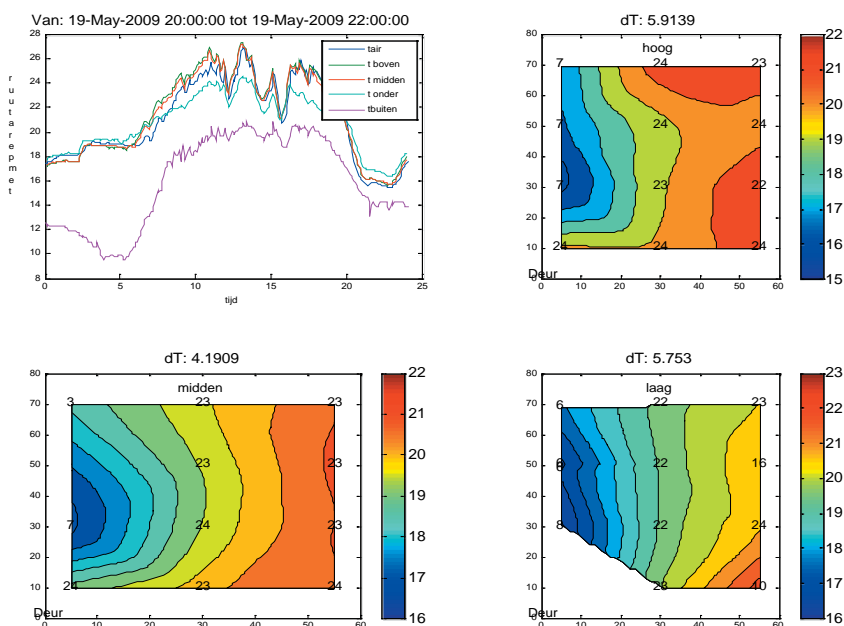
Bedrijf 3

Figuur 64 toont de verdeling van de sensoren in de kas, in 3 paden, op 4 locaties en op 3 hoogten.



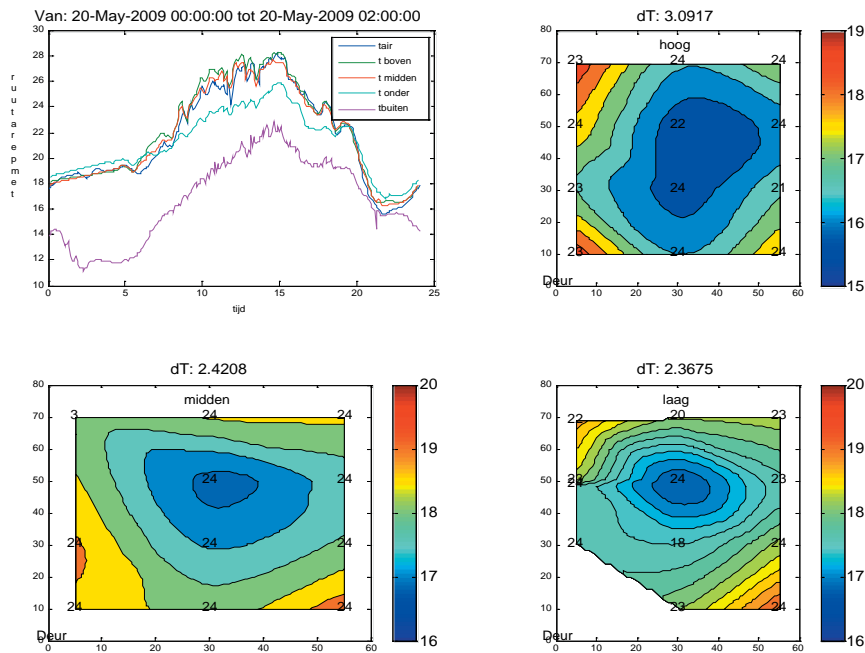
Figuur 64. Locatie van de verschillende sensoren in kas met boven aan het pad en rechtsboven de ingang van de kas.

Figuur 65 toont de temperatuurverdeling gemeten met het draadloze sensor netwerk. Het diagram linksboven toont de temperaturen zoals gemeten door de meetpaal, bij de meetbox en de buitentemperatuur. In sommige figuren ontbreekt data.

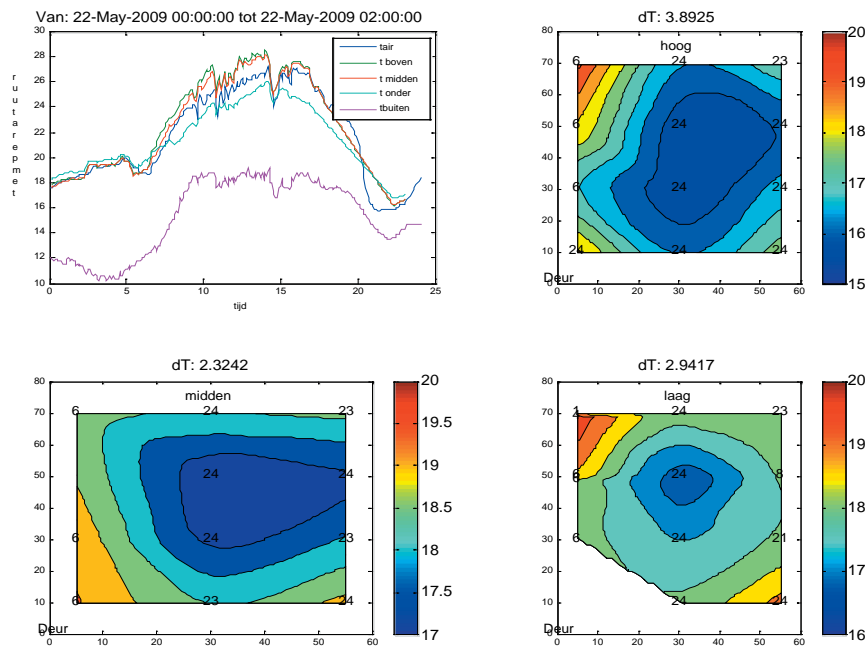


Figuur 65. Klimaatgegevens op 19 mei en de temperatuurverdeling op drie verschillende hoogtes van 20:00 tot 22:00.

Figuur 65 laat de temperatuur verdeling zien op het moment dat de ramen wijd openstaan om de temperatuur in de kas snel naar beneden te brengen. De inkomende lucht heeft dezelfde temperatuur als de buitenlucht. De lucht warmt op naar mate hij door de kas stroomt in de figuur van links naar rechts. Dit is de oorzaak van de relatief hoge temperatuur verschillen.



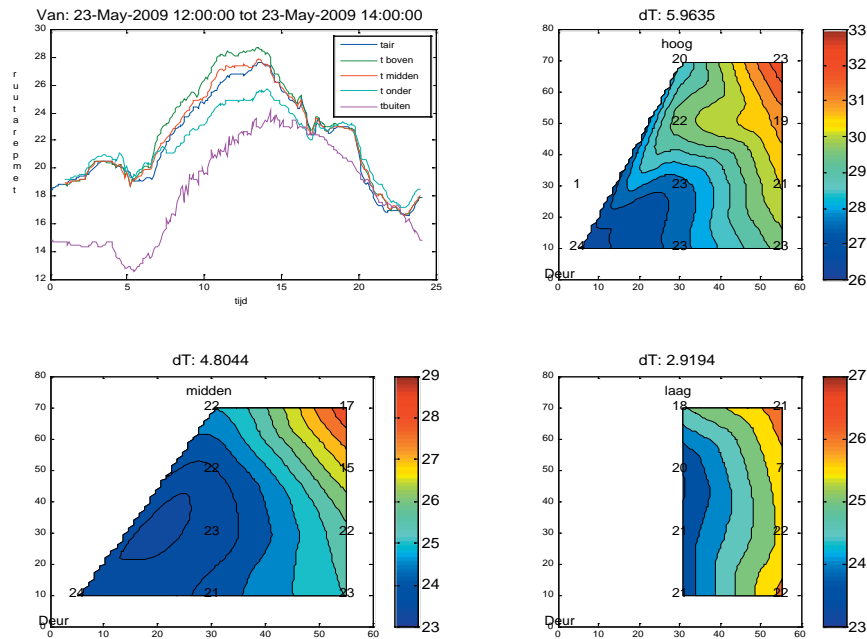
Figuur 66. Klimaatgegevens op 20 mei en de temperatuurverdeling op drie verschillende hoogtes van 00:00 tot 02:00.



Figuur 67. Klimaatgegevens op 22 mei en de temperatuurverdeling op drie verschillende hoogtes van 00:00 tot 02:00.

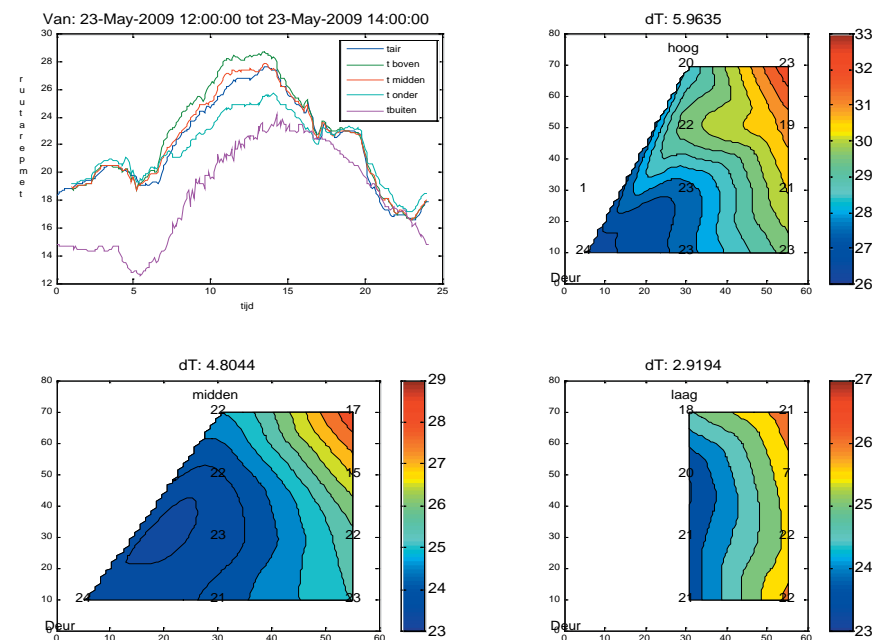
De twee bovenstaande figuren (Figuur 66 en Figuur 67) zijn opgesteld voor de periode tussen 0:00 en 02:00 's nachts. Dit is een periode waarin de kasluchttemperatuur geleidelijk toeneemt. De temperatuur profielen zien er voor deze periode allemaal gelijk uit. Er wordt meer warmte via de gevel toegevoerd dan via de buizen.

Figuur 68 laten de klimaatverdeling zien op het moment dat er wordt gekoeld.



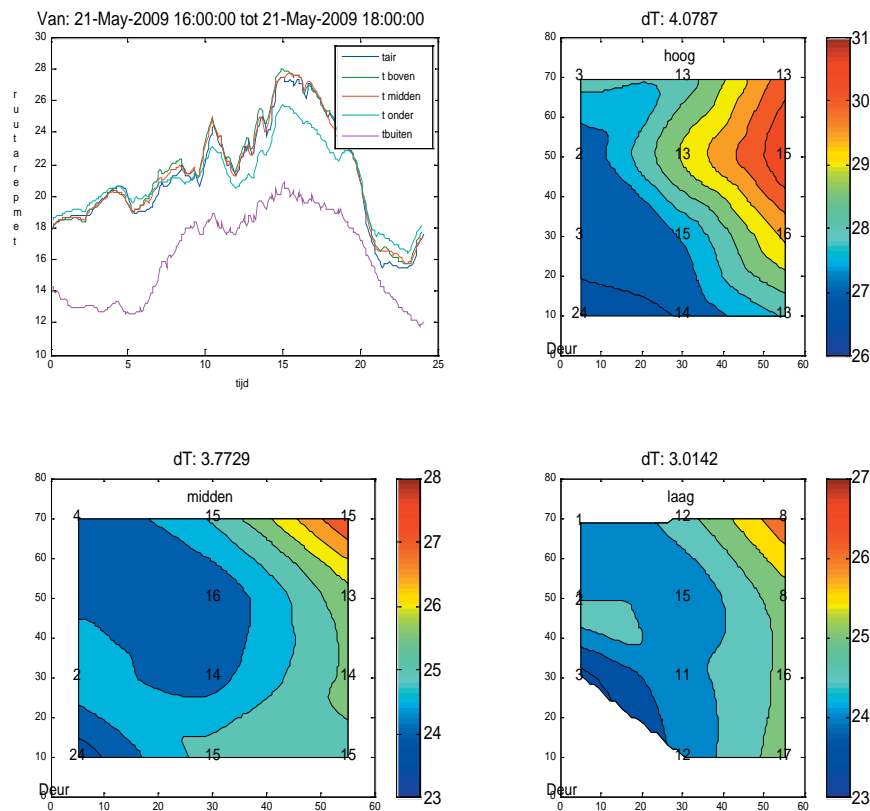
Figuur 68. Temperatuurverdeling over de gehele kas tijdens koelen op drie verschillende hoogtes waarbij de LBK aan de linkerkant van het figuur zijn geplaatst.

Figuur 69 toont de volgende dag. Hier was de buitentemperatuur hoger en daardoor ook de verschillen in de kas groter. De verschillen nemen toe naarmate de buitentemperatuur hoger wordt.



Figuur 69. Temperatuurverdeling over de gehele kas tijdens koelen op drie verschillende hoogten (LBK linkerkant van het figuur).

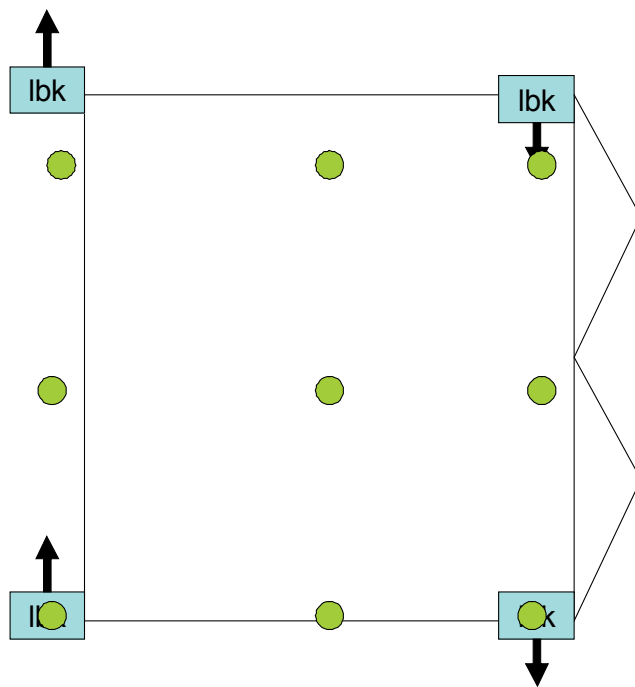
Figuur 70 toont de klimaatverdeling in een kas waarbij LBK's aan één zijde van de kas zijn geplaatst en de lucht met slangen in de kas wordt verdeeld. Aan de zijde waar geen LBK's staan (hier bevindt zich het pad) loopt de temperatuur aanzienlijk hoger op dan aan de zijde van de LBK's. De koude lucht wordt in dit systeem niet gelijkmatig verdeeld vooral door de aanwezigheid van het pad waar geen koeling plaatsvindt.



Figuur 70. Temperatuurverdeling over de gehele kas tijdens koelen op drie verschillende hoogtes waarbij de LBK aan de linkerkant van het figuur zijn geplaatst.

Bedrijf 4

In een sectie van bedrijf 4 zijn draadloze temperatuur en relatieve luchtvochtigheidsensoren opgehangen om de invloed van de LBK's op het klimaat te analyseren. Er zijn in totaal 27 meetpunten gebruikt in een matrix van 3 bij 3 bij 3. Op drie verschillende hoogtes: bij de kop van het gewas, middenin het gewas en ter hoogte van de vruchten is het klimaat gemeten. Figuur 71 laat zien hoe de meetboxen zijn geplaatst ten opzichte van de LBK's.



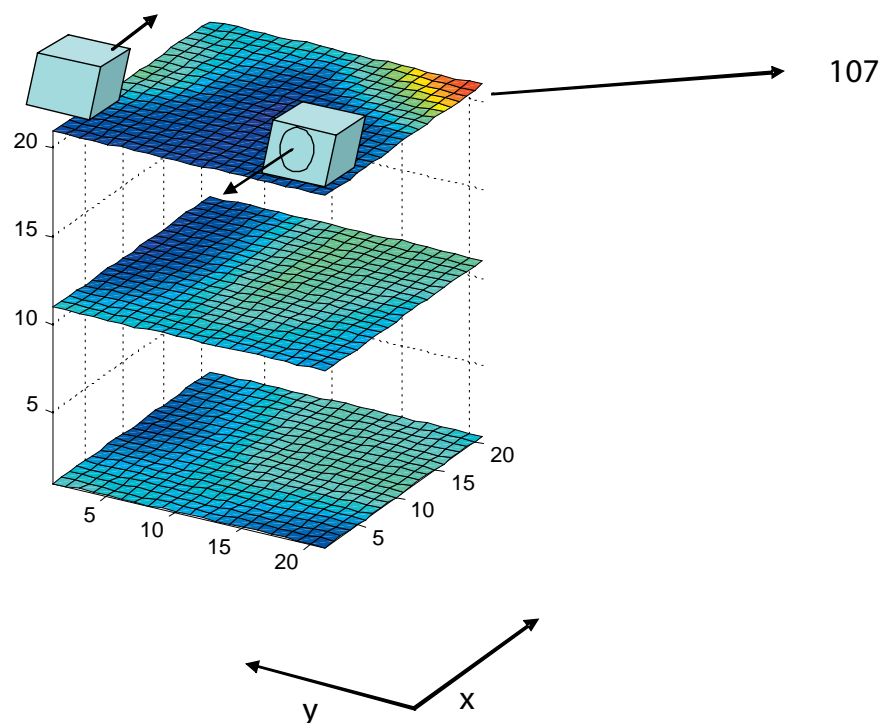
Figuur 71. Locatie van de meetboxen ten opzichte van de LBK's.

De foto van Figuur 72 laat de kas zien en plaats van de meetboxen bovenin de kas. Elke drie minuten wordt het klimaat gemeten. Deze informatie wordt gekoppeld aan de informatie uit de klimaatcomputer.

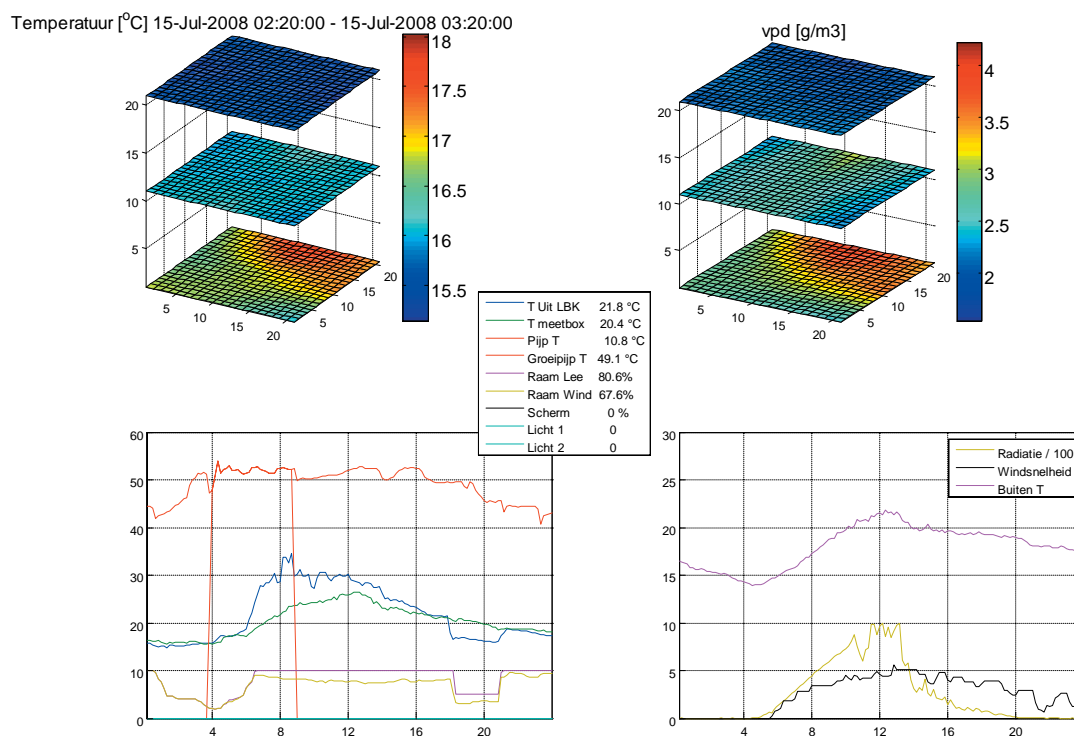


Figuur 72. Overzicht van de sectie waar de meetboxen zijn opgehangen.

Figuur 73 toont het temperatuurprofiel t.o.v de LBK's. Elk vlak is opgebouwd uit de informatie van 3 sensoren die op die betreffende hoogte zijn aangebracht. De kleurenbalk aan de rechterzijde toont de temperatuurschaal bijbehorend bij de kleurverdeling in de diagrammen.



Figuur 73. Visualisatie van de temperatuurprofielen ten opzicht van de koelers.

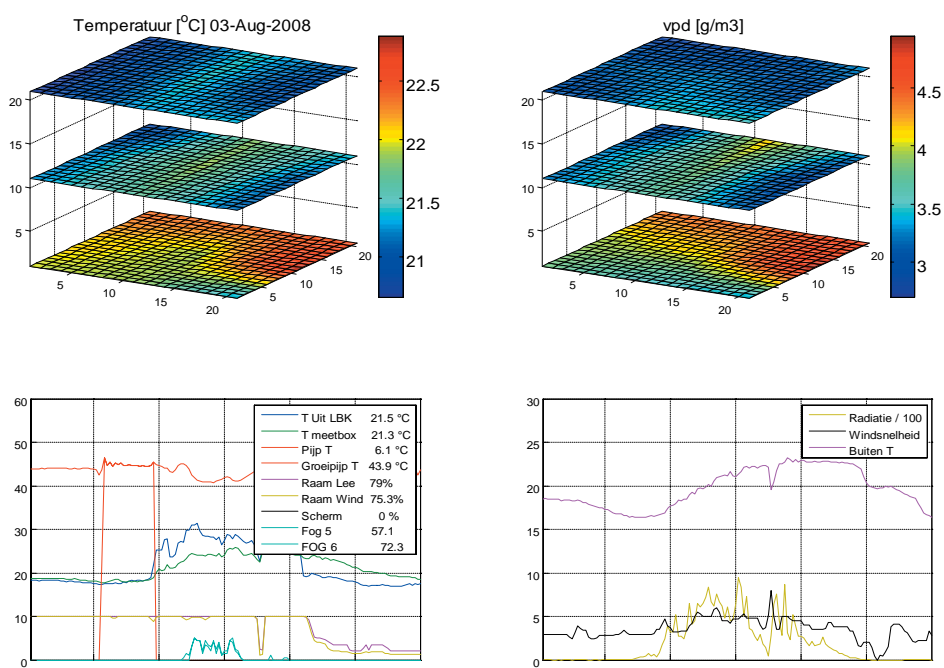


Figuur 74. Temperatuurpatroon op 15 juli 2008 van 2:20 tot 3:20 's nachts met de klimaatcomputerinformatie van die dag.

Figuur 74 toont de gemiddelde temperatuur- en vochtdeficit-verdeling gedurende een specifieke periode in de nacht. De onderste twee diagrammen tonen de informatie uit de klimaatcomputer voor de specifieke dag waarvoor de

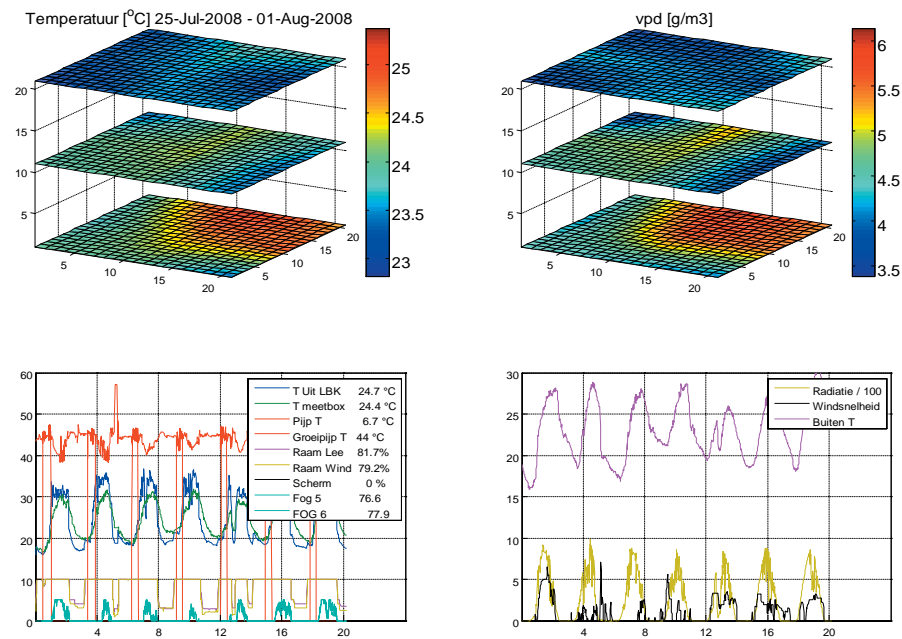
temperatuurverdeling is getoond laten zien dat de temperatuur nabij de kop van het gewas de buitentemperatuur benadert in deze nacht. Onderin het gewas, nabij de vruchten, is de temperatuur rond de 18 °C. De verdeling is niet gelijkmatig op het niveau van de vruchten, waarschijnlijk veroorzaakt door het feit dat sommige meetplaatsen meer dan anderen worden beïnvloed door de temperatuur van de groeipijp. Op de andere niveaus zijn de verschillen minimaal.

Figuur 75 toont de gemiddelde temperatuurverdeling op het moment dat de koelers in werking zijn. Op deze specifieke dag gaat de koeling aan rond 17 uur en functioneert tot middernacht. Deze informatie is te verkrijgen uit de temperatuur van de lucht die uit de LBK komt (blauwe lijn uit diagram linksonder in Figuur 75) en de temperatuur bij de meetbox (donker groene lijn). Indien de temperatuur van de lucht uit de LBK lager wordt dan bij de meetbox dan kan worden aangenomen dat de LBK is ingeschakeld. In het midden van de luchtstromen uit de koelers is de temperatuur bij de kop van het gewas ongeveer 1 graad hoger. In het middelste vlak, halverwege het gewas, zijn de temperatuurverschillen ook nog duidelijk aanwezig. De koelers hebben ook invloed op het vochtdeficit tussen het gewas, zoals in Figuur 75 te zien is. De temperatuurverschillen zijn echter gering ten opzichte van het temperatuurverschil tussen de kaslucht en de lucht uit de koeler, die ongeveer 4 °C is.



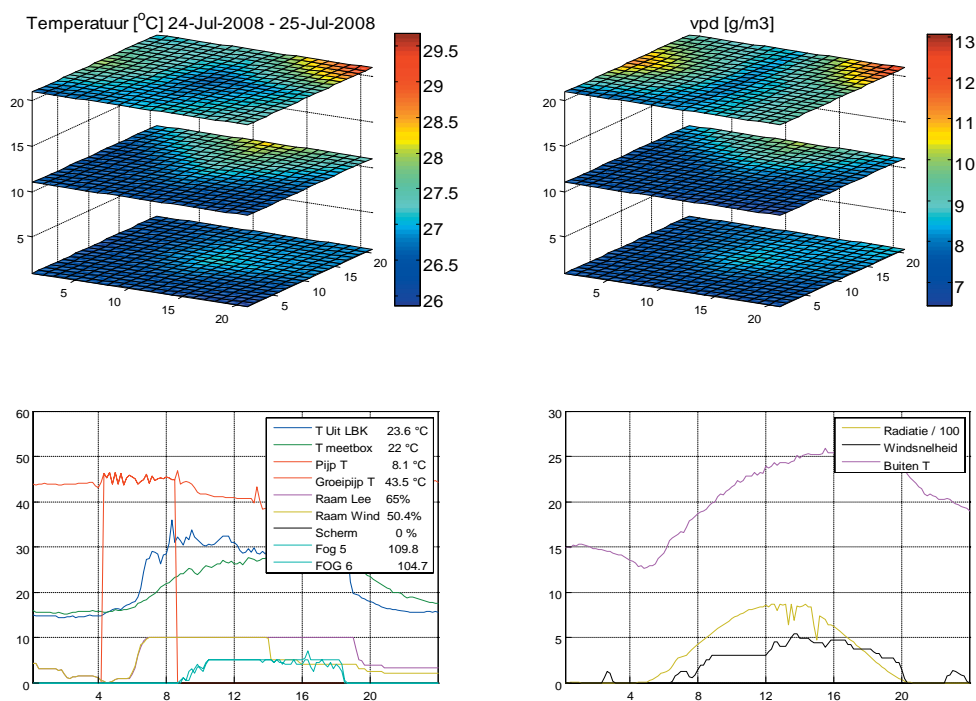
Figuur 75. Informatie gedurende een periode dat de koeling wordt ingezet.

Figuur 76 toont dat ook over een langere periode de invloed van de koeler terug te vinden is in het temperatuurpatroon. Vooral tussen het gewas is de invloed zichtbaar.



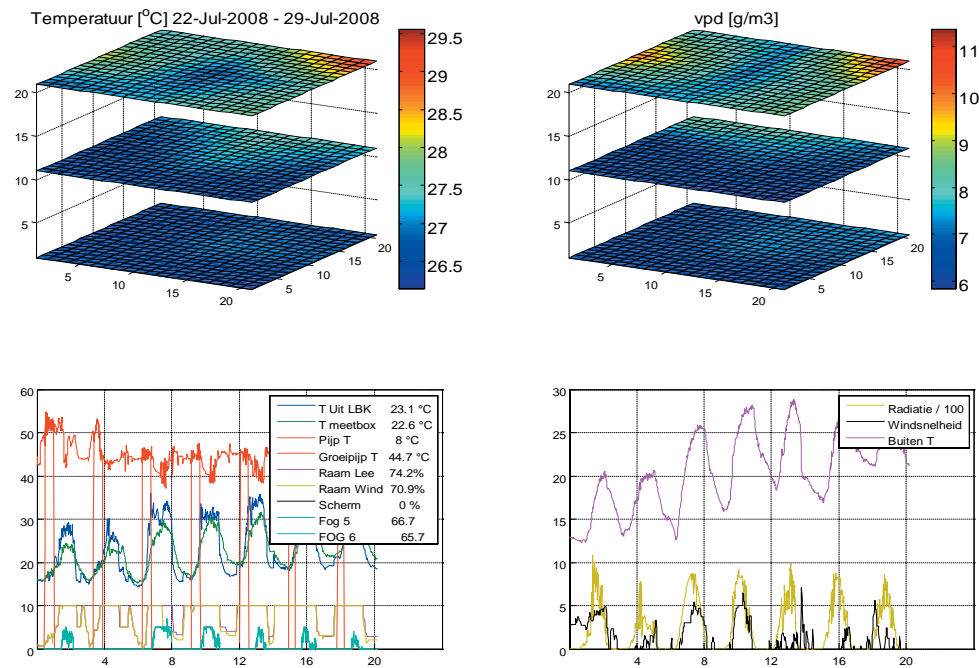
Figuur 76. Temperatuurprofiel tijdens koelen over gedurende een week.

Figuur 77 toont de gemiddelde temperatuurverdeling op 24 juli 2008, op het moment dat er wordt verneveld. De verneveling bevindt zich parallel aan de goot tussen de koelers. In het bovenste vlak, rechts achteraan en links in het midden is een hogere temperatuur waarneembaar. Blijkbaar wordt deze locatie minder goed van nevel voorzien. De temperatuurverschillen ter hoogte van de kop van het gewas zijn 2.5 °C. Ook het vochtdeficit is hoger op deze locaties.



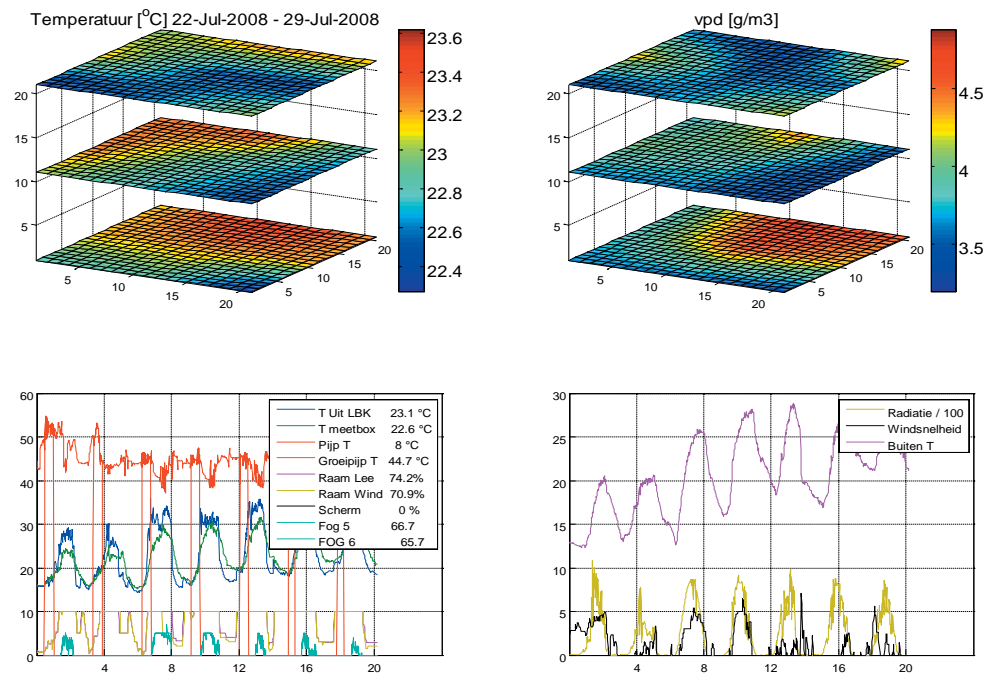
Figuur 77. Situatie tijdens verneveling gedurende de periode van een dag.

Figuur 78 toont de gemiddelde temperatuurverdeling over een week op de momenten dat de verneveling wordt gebruikt. De patronen zijn vergelijkbaar met Figuur 77. Tussen het gewas is de invloed van de verneveling verwaarloosbaar. Op momenten dat de verneveling actief is, zijn ook over langere periode de temperatuurverschillen groter dan 2 °C. Het temperatuurverschil kan ook worden veroorzaakt door de locatie van de ramen. Echter omdat er bij hoge temperaturen altijd wordt verneveld is de invloed van de ramen op het klimaat niet apart te visualiseren.

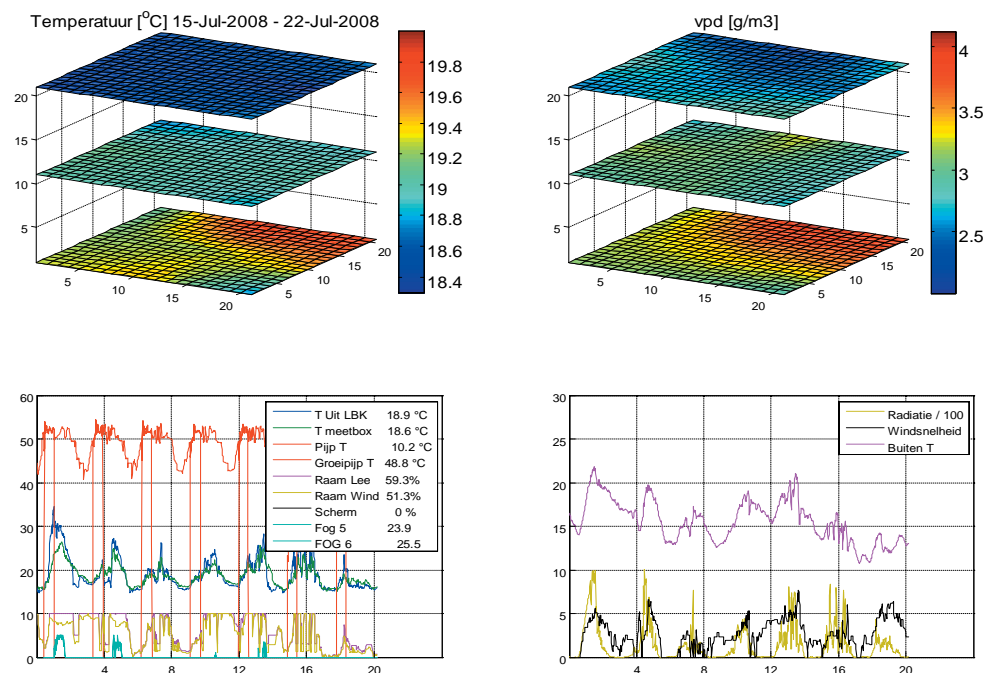


Figuur 78. Temperatuurverdeling gedurende een week voor de momenten waarop de verneveling is geactiveerd.

Figuur 79 en Figuur 80 tonen de temperatuurverdeling voor een koude en een warme periode. De maximale temperatuurverschillen over het geheel zijn in dezelfde orde van grootte echter voor de warme periode zijn verschillen te vinden in het horizontale vlak en in het verticale vlak, terwijl de verschillen in de koude periode hoofdzakelijk in de verticale richting zijn. De verschillen ontstaan gedurende de lichtperiode.



Figuur 79. Gemiddelde temperatuurverdeling over een week tijdens een relatief koude periode.



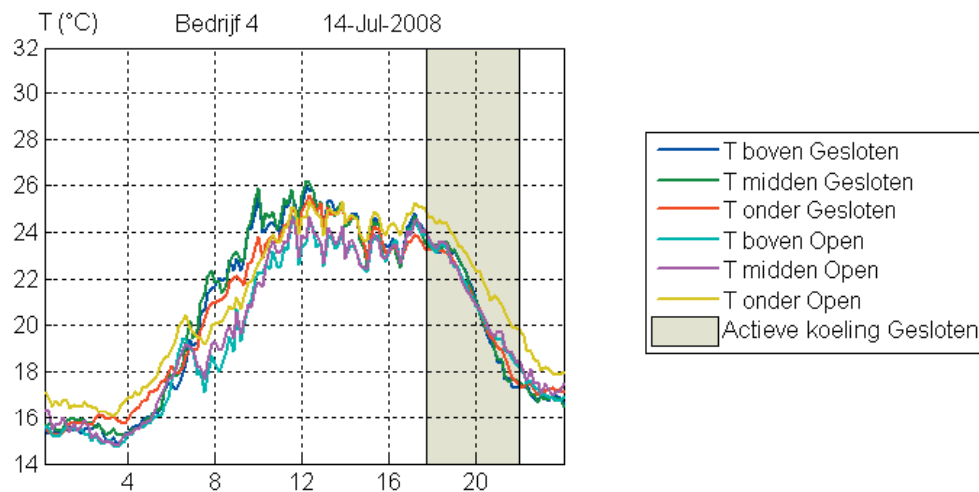
Figuur 80. Gemiddelde temperatuurverdeling over een week voor een relatief warme periode.

Conclusies

- In de nacht zijn de horizontale temperatuurverschillen minder dan 1 °C.
- Vertikaal zijn er wel verschillen t.g.v. de verwarming onderin en het ventileren bovenin.
- De LBK's zorgen voor temperatuurverschillen nabij de kop van het gewas maar ook midden in het gewas. De verschillen zijn ongeveer 1 °C, wat klein is ten opzichte van het verschil tussen de temperatuur van de lucht die uit de koeler komt en de kasluchttemperatuur.
- Bij een hoge instraling nemen de temperatuurverschillen nabij de kop van het gewas toe. Op dit moment wordt ook de verneveling ingezet. De combinatie van de verneveling en de luchting zorgt voor deze temperatuurverschillen.

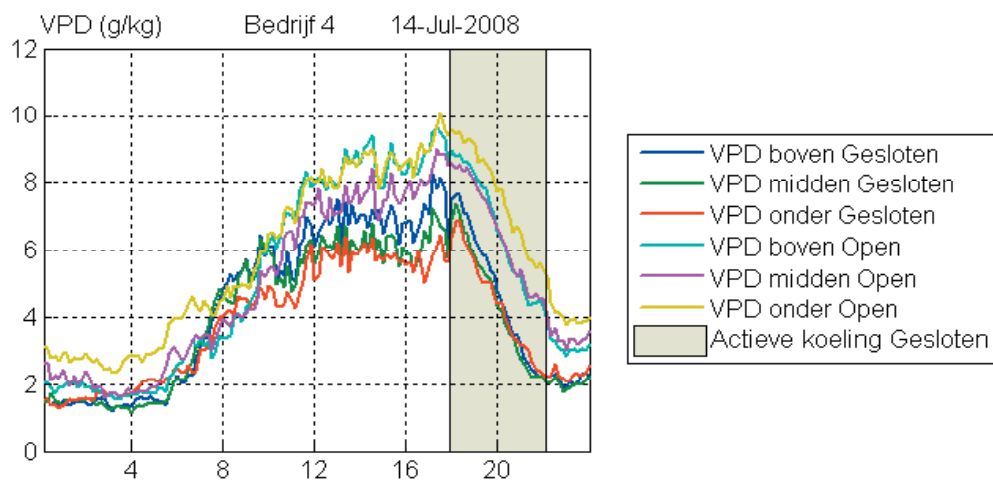
Gegevens uit klimaatcomputer Bedrijf 4.

Figuur 81 toont de temperaturen gemeten door de meetpaal in de gesloten en in de open kasafdeling op 14 juli 2008. Uit de figuur valt op te maken dat de temperatuur in de open kas gemiddeld lager is dan in de gesloten kas. Dit komt omdat in de open kas meer ramen per vierkante meter zijn. Verder valt op dat in de open kas de temperatuur onderin de kas hoger is dan bovenin terwijl dit bij de gesloten kas juist andersom is. Tijdens het koelen zijn de temperaturen in de verschillende hoogte in de gesloten kas nagenoeg gelijk. De metingen met de draadloze sensoren laten zien dat de temperatuur onderin het gewas hoger was. De draadloze sensoren waren in de nabijheid van de groeibuis aangebracht, hetgeen dit verschil mogelijk veroorzaakt.



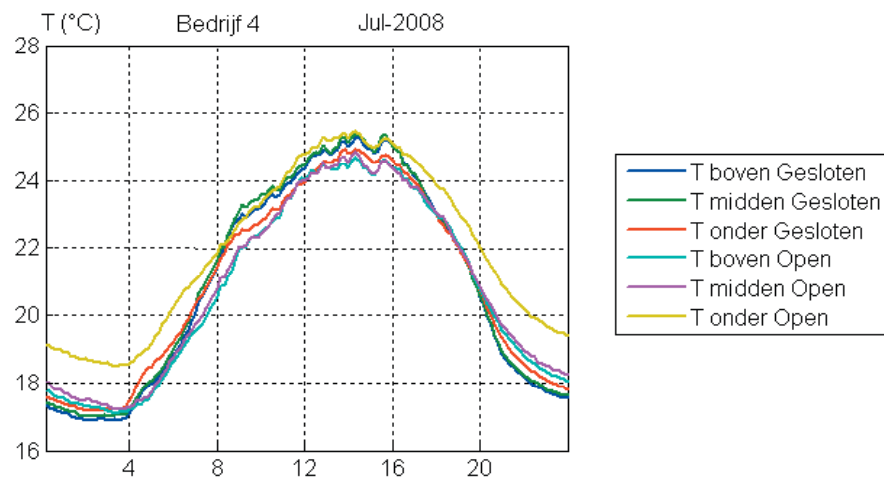
Figuur 81. Temperaturen gemeten bij de meetpaal in de open en de gesloten kas op 14 juli.

Figuur 82 toont het vochtdeficit op 14 juli 2008. In de gesloten kas is het vochtdeficit lager door de verneveling en de koeling en het feit dat deze kas minder ramen heeft.



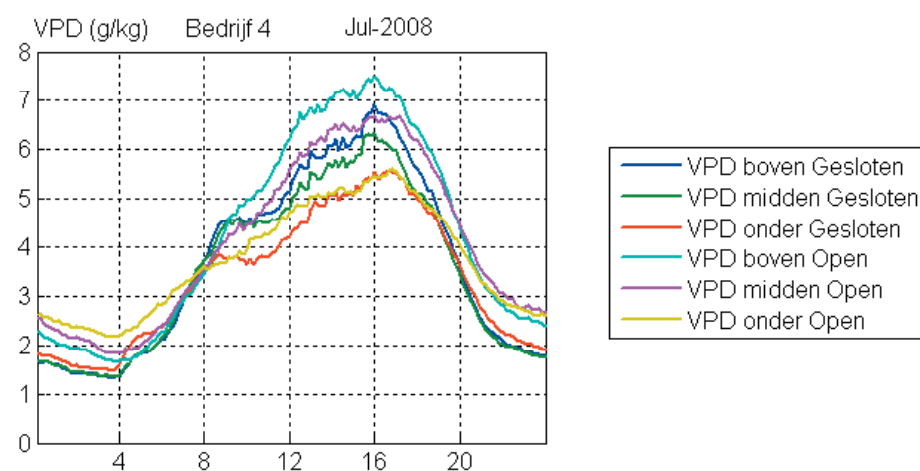
Figuur 82. Vochtdeficit gemeten bij de meetpaal in de open en de gesloten kas op 14 juli.

Om momentane effect te vereffenen is een cyclisch gemiddelde berekend van de hele maand juli voor elke tijdstip van de dag. Ook in Figuur 83 is duidelijk te zien dat in de open afdeling de verwarming zorgt voor een andere verticale gradiënt dan in de gesloten afdeling.



Figuur 83. Temperaturen gemeten bij de meetpaal in de open en de gesloten kas in de maand juli.

Figuur 84 toont dat onderin de kas het vochtdeficit zowel in de gesloten als de open afdeling kleiner is dan bovenin de kas. Ten gevolge van de kleinere ventilatie en de verneveling zijn de verschillen in de gesloten kas kleiner.



Figuur 84. Vochtdeficit gemeten bij de meetpaal in de open en de gesloten kas in de maand juli.

Bedrijf 5

Niet gemeten.

Bedrijf 6

Resultaten van deze metingen zijn beschreven in rapport. (Campen, 2008).

Bedrijf 7

De uitgevoerde metingen bij tuinders geven een beeld van de ruimtelijke verdeling van de T en RV in het horizontale vlak en in een enkel geval ook het verticale vlak. Met de verzamelde gegevens kan een beeld gevormd worden hoe op warme dagen de gekoelde lucht zich in de kas verdeelt. In de periode juli, augustus en september, waren er voldoende warme dagen waarop de koeling actief was. De metingen zijn telkens voor een aaneengesloten meetperiode van 5 of meer dagen verricht. Voor aanvang van metingen op een bedrijf werden de batterijen van de draadloze sensoren vervangen. Na afloop werd de meetopstelling gecontroleerd op afwijkingen. Vervolgens werd het meetsysteem bij de volgende tuinder geplaatst en opgestart. Om de continuïteit van de data zoveel mogelijk te garanderen werd dagelijks via internet de correcte werking gecontroleerd.

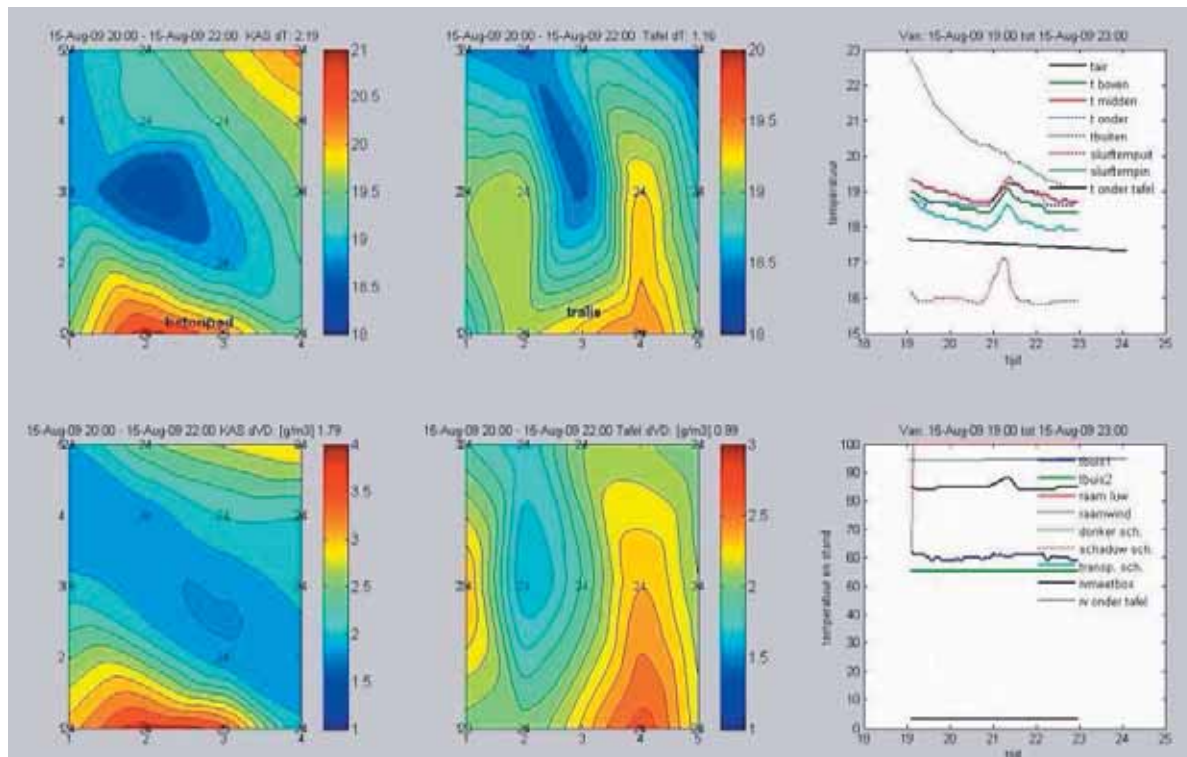
In overleg en in samenwerking met de tuinders werd de plaats en de indeling van de T en RV sensoren vastgesteld en vervolgens geïnstalleerd. Bij bedrijf 7 werd de complete koelafdeling met een meetveld van 4 * 5 draadloze sensoren (SOWnet) bemeten maar ook een gebied ter grootte van een enkele roltafel met een meetveld van 4*3 sensoren. Bij de grafische presentaties worden naast een contourplot met gemiddelde temperaturen over enkele uren tevens grafieken van bv. kasttemperatuur, buitentemperatuur, straling, uitblaastemperatuur koeler, temperatuur onder de roltafel etc. weergegeven. Op deze manier kan de correlatie tussen de ruimtelijke T en RV verdeling en bv. de straling bestudeerd worden. Het is nu nog te vroeg voor conclusies maar duidelijk is dat de ruimtelijke verdeling van veel facetten afhankelijk is. De grootste invloed is de directe instraling van de zon en de verdeling van de uittredende luchtstromingen van de diverse typen koelunits. Andere effecten zijn o.a. luchtstromingen van de verwarmingsnetten, warmtestromingen door de scheidingswanden van de warme afdelingen naar de gekoelde afdeling en de werking van het betonpad als warmte buffer omdat regelmatig geen rekening wordt gehouden om ook dit oppervlak te koelen terwijl op die plaats de warmtebelasting vaak het hoogst is. Al deze invloeden zorgen ervoor dat de T en RV continue over het etmaal variëren en dat sommige plaatsen in de kas in de loop van het etmaal zelfs om kunnen slaan van boven het gemiddelde warm naar onder het gemiddelde koud.

In Figuur 85 wordt meetveld 2 bij bedrijf 7 weergegeven, de sensoren zijn aan horizontale hulpdraden opgehangen waardoor een flexibele verdeling vlak boven de planten mogelijk werd.



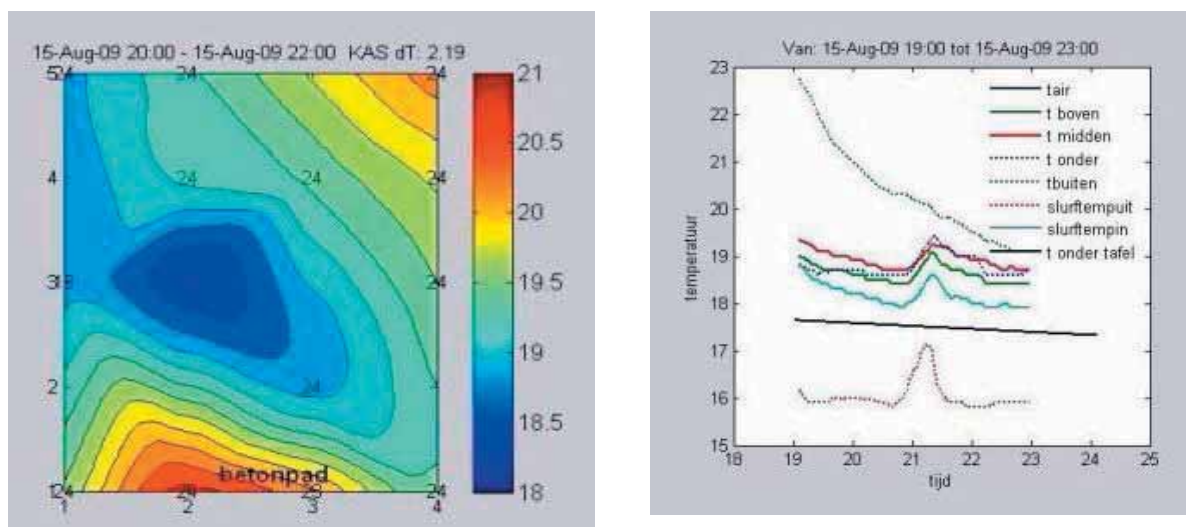
Figuur 85. Meetopstelling bij Bedrijf7, de SOWnet sensoren hangen aan horizontale hulpdraden.

In Figuur 86 wordt de T en VD verdeling van de totale afdeling (meetveld 1, links in het figuur) en de verdeling boven een roltafel (meetveld 2, midden in het figuur) met bijbehorende klimaatdata die invloed hebben op de werking van het systeem zoals uitblaastemperatuur van de luchtbehandelingkast, buistemperaturen, scherm en raamstanden e.d.(rechts in het figuur) weergegeven. In bijvoorbeeld stappen van 2 uur (zoals hier getoond) kan de T en RV verdeling weergegeven worden zodat een beeld gevormd kan worden van de veranderingen in de tijd. Linksonder en midden onder is het vochtdeficiet weergegeven voor respectievelijk de hele afdeling en boven de tafels.



Figuur 86. De Temperatuur en VD verdeling bij bedrijf 7 van meetveld 1 en 2 met specifieke klimaatdata op 15 augustus.

In Figuur 87 toont een detail van Figuur 86. Hierin is de ruimtelijke verdeling en de spreiding in temperatuur ($dT=2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$) van de koelafdeling te zien. Dit kan bv. vergeleken worden met de sterk dalende buitentemperatuur en de temperatuur onder de tafel die na 21:00 even oploopt. Elk meetpunt is het gemiddelde over het interval van 2 uur.



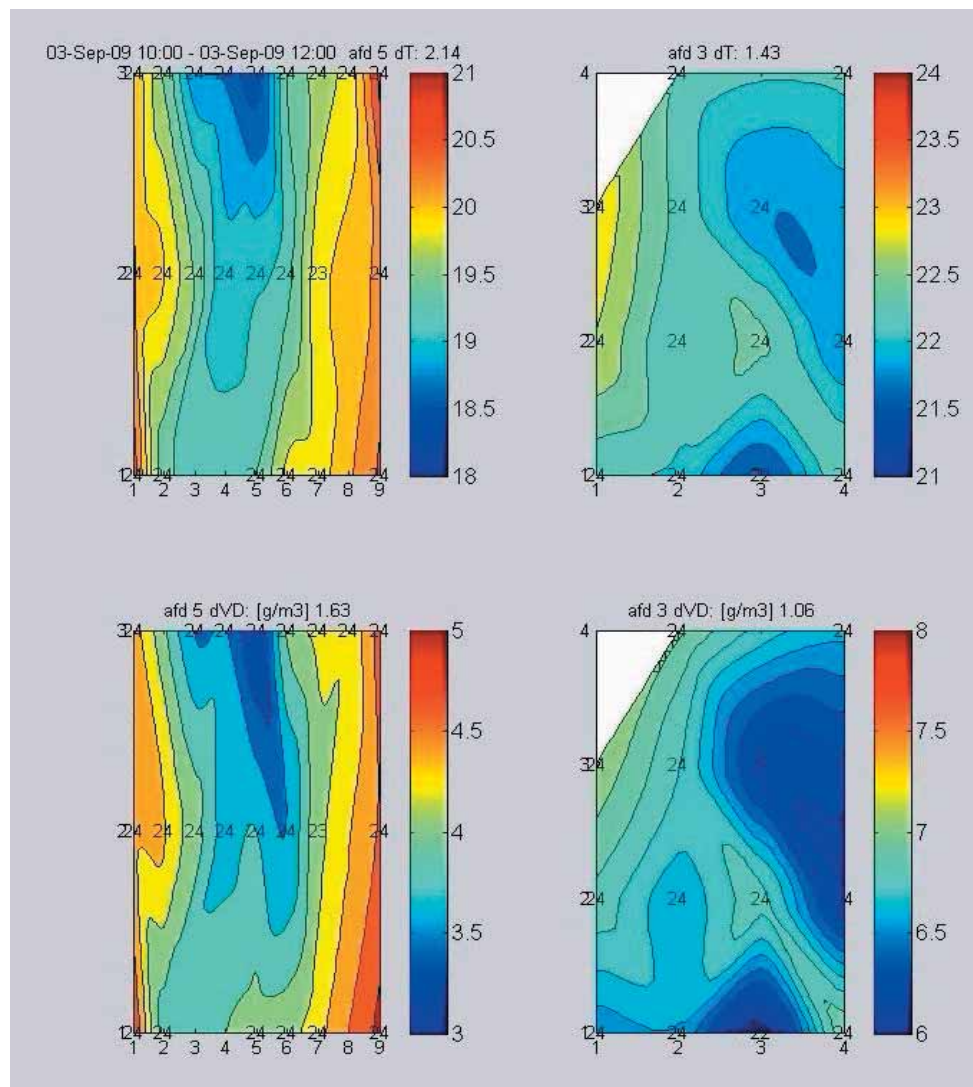
Figuur 87. Detail uit de totale presentatie bij bedrijf 7 van T verdeling en specifieke klimaatdata.

Bedrijf 8

Data 1^e meetserie (periode 25 augustus – 3 september) Horizontale metingen.

In de 1^e meetserie ligt de nadruk op de T en VD verdeling over de breedte van de kas en in de 2^e meetserie ligt de nadruk op de verdeling in de lengterichting van de kas.

In afdeling 3, 4 zijn de sensoren in een veld van 4 x 4 geplaatst. De 4 meetpunten in de breedte zijn verdeeld tussen de JSK en de tussengevel. De 4 sensoren in het pad zijn geplaatst bij poot 7, 8, 9 en 10, waarbij poot 1 de buitengevel is. In afdeling 5 zijn de sensoren in een veld van 9 x 3 geplaatst, waarbij de 9 zijn verdeeld over de volle breedte van afdeling 5 en 6 (3 per kap) en de 3 in het pad zijn geplaatst bij poot 6, 7 en 8 waarbij poot 1 de buitengevel is. In Figuur 88 is duidelijk te zien dat in rij 1 en 9 bij de scheidingswand met de warmere afdelingen een opwarming plaatsvindt. De spreiding in temperatuur ΔT is 2.14°C, maar binnen het veld van rij 2 t/m 8 blijft de spreiding binnen de 1.5°C.



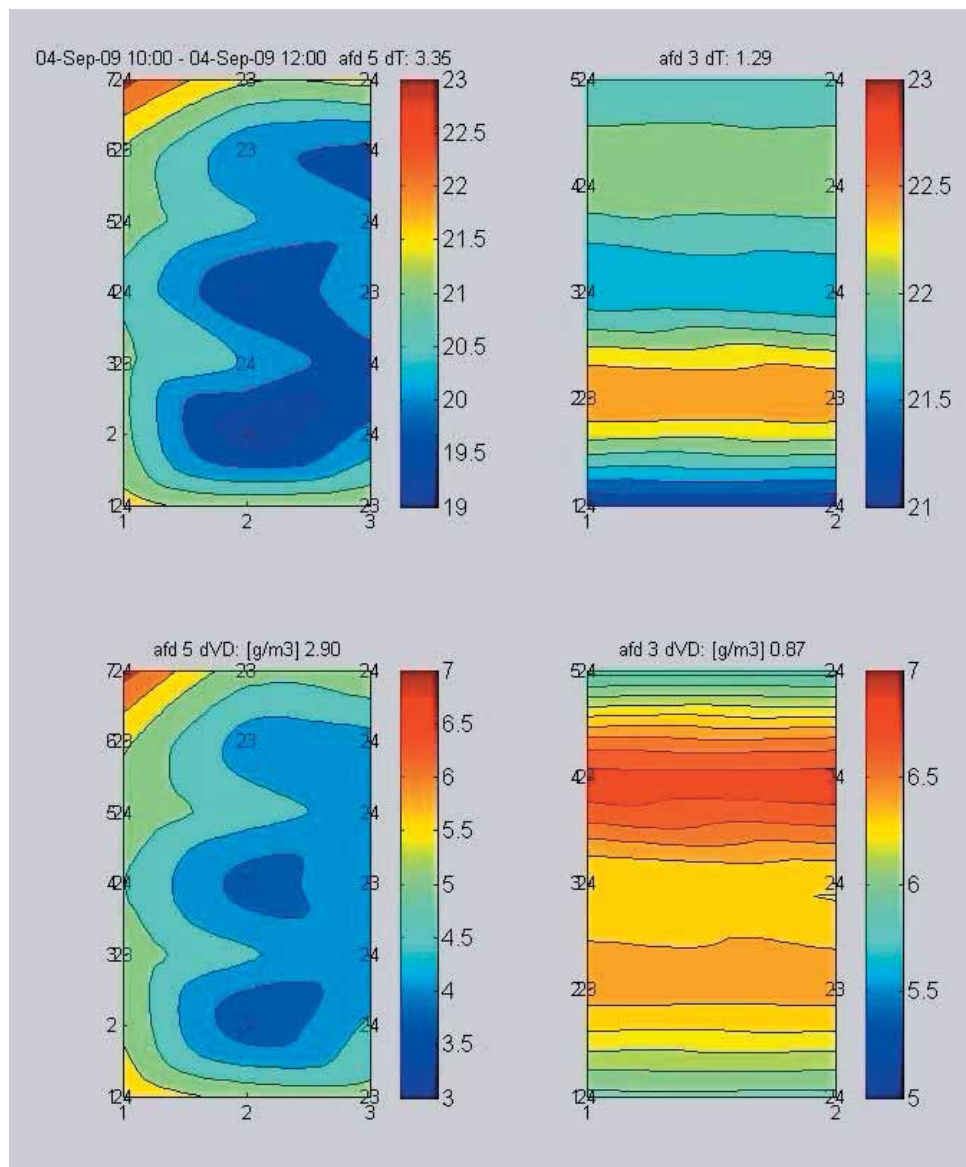
Figuur 88. Horizontale temperatuur en vochtprofiel in het kleine meetgrid.

Data 2^e meetserie (periode 4-10 september).

Om een beeld te krijgen hoe de horizontale T en VD verdeling is over de volle lengte (100 m) van afdeling 3, 4 en 5, 6, is een 2e serie metingen opgezet.

In afdeling 3, 4 is in het midden en over de gehele lengte van de kas 1 rij van 5 sensoren geplaatst. De spreiding in temperatuur dT is 1.3°C.

In afdeling 5, 6 zijn, verdeeld over de breedte en lengte van de kas, 3 rijen van 7 sensoren geplaatst. In Figuur 89 is te zien dat aan het begin en einde van de rijen de temperatuur hoger is, hetgeen wordt weer door het betonpad veroorzaakt. De spreiding in temperatuur dT is ca. 3.4°C, maar over het grootste deel van het oppervlak blijft de spreiding onder de 1.5 °C.



Figuur 89. Horizontale temperatuur en vochtprofiel over de volle lengte van afdeling 3 en 4 en afdeling 5 en 6.

Conclusies

De spreiding in T en VD in de beide afdelingen is afgezien van wat randeffecten behoorlijk goed, ook over de volle lengte van kas De JSK koelers in afdeling 3 en 4 geven een beter beeld te zien dan de bovenkoelers in afd. 5 en 6. In deze laatste is door het grotere temperatuurverschil het effect van de randen (betonpad en gevels) groter.

Bijlage VII Energiestromen

Bedrijf 6

Belichting

Op bedrijven met belichting vormt deze de grootste energieverbruiker, maar toch is op dit bedrijf (en de meeste andere bedrijven) geen aparte verbruiksmeting (KWh meter) in gebruik. De belichting kan in groepen continu geregeld worden. Het lichtniveau in de kas bestaat voor een deel uit transmissie van buitenlicht en deel kunstmatige belichting. Het PAR-niveau in de kas en het PAR-niveau buiten de kas worden continu gemeten. Deze metingen zijn gebruikt om het deel van de kunstmatige belichting te bepalen en vervolgens de belastingsfactor en het energieverbruik te berekenen. Het verbruik van belichting is uitgewerkt in Bijlage IV en de resultaten zijn verwerkt in de energiebalans.

Ventilatoren

In 2008 is een KWh meter gebruikt om het energieverbruik van de ventilatoren te registreren. Hiermee is de belastingsfactor berekend en voor 2009 is dezelfde factor aangenomen.

De ventilatoren draaien bijvoorbeeld gemiddeld op 50% van het maximale vermogen gedurende de 100% van de tijd (het jaar), de belastingsfactor wordt dan $F_b = 0.5 \times 1.0 = 0.5$. Bij een geïnstalleerd vermogen P van 25 kW over de tijd van 1 jaar T (8760 uur) wordt het energieverbruik:

$$E = P \times T \times F_b = 25 \times 8760 \times 0.5 = 110 \text{ MWh.}$$

De meetwaarden voor 2008 en 2009 zijn verwerkt in resp. Tabel 12 en Tabel 13

Tabel 12. Energieverbruik in 2008 van bedrijf 6.

2008	Aantal	P _{el} [W]	P _{el,tot} [kW]	F _v [-]	F _b [-]	E [MWh]	E _{tot} [MWh]	E _{tot} · m ² kWh	Omschrijving eenheid
Belichting									Armaturen
Moerkas	24	400	9.6	1.15	0.155	15.0			24·400W
Afd 1	204	400	81.6	1.15	0.155	127.4			12·17·400W
Afd 2	264	1000	264.0	1.05	0.155	376.4			8·33·1000W elektronische VSA
	15	400	6.0	1.05	0.155	8.6			15·400W
Afd 3/4	520	1000	520.0	1.05	0.15	717.4			8·65 ·1000W
Afd 6	48	1000	48.0	1.05	0.15	66.2			48 ·1000W
	30	400	12.0	1.15	0.15	18.1			30 ·400W
Afd. 7	16	400	6.4	1.15	0.50	32.2			16·480W assimilatie 12h/dag
	80	50	4.0	1.20	0.25	10.5			40·2·50W TL buizen
	18	400	7.2	1.15	0.25	18.1			18·450W, 12h werkverlichting
kantoor + showroom	40	18	0.7	1.20	0.60	4.5			40·18W TL 14h/dag
Belichting totaal			959.5				1497.6	100.9	verbruik per jaar in kWh
Watergeefstelsysteem									
UV ontsmetting	6	200	1.2		0.67	7.0			gemiddeld 16h/24h
UV systeem pomp	1	2200	2.2		0.67	12.8			
Gietwaterpomp	1	1800	1.8		0.30	4.7			6 uur per week
Systeem pomp	1	5500	5.5		0.30	14.5			regenwater systeem pomp
Spuitboom en pomp	1	7500	7.5		0.30	19.7			
Watergeefstelsysteem			18.2				58.8	4.0	jaar verbruik in MWh
Kantoor/kantine, etc	1	2500	2.5		0.10	2.2			
Procesbesturing	1	1500	1.5		1.00	13.1			
Transportsysteem	1	5000	5.0		0.15	6.6			intern transportsysteem (geschat)
Compressor lucht	1	7500	7.5		0.10	6.6			voor pneumatiek
Proces + diversen			16.5				28.5	1.9	jaar verbruik in MWh
Bronpompen	3	11000	33.0		0.25	72.3			bronpompen
Ventilatoren	832	30	25.0		0.50	110.1			Gemeten in 2008
Circulatiepompen	6	1500	9.0		0.20	15.8			koel en verwarmingscircuit
Pompen ventilatoren			67.0				198.1	13.4	
Boiler	1	1200000	1200.0		0.0		0.0	0.0	In 2008 niet beschikbaar
Warmtepomp	1	382000	382.0		0.6		1990.0	134.1	berekend
Totaal vermogen P _{tot}			2643.2	Afwijking			-52.2	-3.5	afwijking t.g.v. schatting
				Totaal energie verbruik			3720.8	250.7	op jaarbasis in [MWh] en [kWh·m ⁻²]
Totaal oppervlak [m ²]		14840							

Tabel 13. Energieverbruik in 2009 van bedrijf 6.

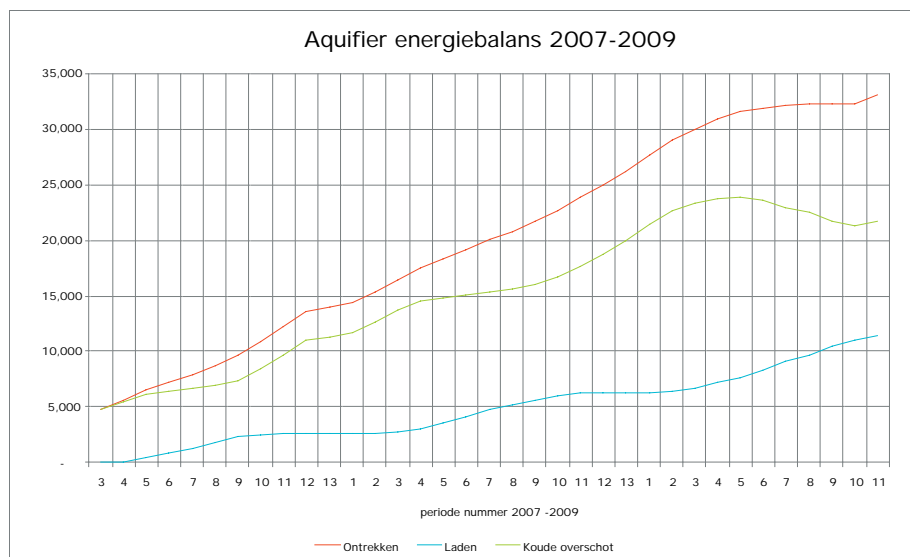
2009	Aantal	P _{el} [W]	P _{el,tot} [kW]	F _v [-]	F _b [-]	E [MWh]	E _{tot} [MWh]	E _{tot} · m ² kWh	Omschrijving eenheid
Belichting									
Moerkas	24	400	9.6	1.15	0.17	15.0			Armaturen 24·400W
Afd 1	204	400	81.6	1.15	0.17	127.4			12·17·400W
Afd 2	264	1000	264.0	1.05	0.17	376.4			8·33·1000W elektronische VSA
	15	400	6.0	1.05	0.17	8.6			15·400W
Afd 3/4	520	1000	520.0	1.05	0.16	717.4			8·65·1000W
Afd 6	48	1000	48.0	1.05	0.16	66.2			48·1000W
	30	400	12.0	1.15	0.16	18.1			30·400W
Afd. 7	16	400	6.4	1.15	0.50	32.2			16·480W assimilatie 12h/dag
	80	50	4.0	1.20	0.25	10.5			40·2·50W TL buizen
	18	400	7.2	1.15	0.25	18.1			18·450W, 12h werkverlichting
kantoor + showroom	40	18	0.7	1.20	0.60	4.5			40·18W TL 14h/dag
Belichting totaal			959.5				1499.1	101.0	verbruik per jaar in kWh
Watergeefstelsysteem									
UV ontsmetting	6	200	1.2		0.67	7.0			gemiddeld 16h/24h
UV systeem pomp	1	2200	2.2		0.67	12.8			
Gietwaterpomp	1	1800	1.8		0.30	4.7			6 uur per week
Systeem pomp	1	5500	5.5		0.30	14.5			regenwater systeem pomp
Spuitboom en pomp	1	7500	7.5		0.30	19.7			
Watergeefstelsysteem			18.2				58.8	4.0	jaar verbruik in MWh
Kantoor/kantine, etc	1	2500	2.5		0.10	2.2			
Procesbesturing	1	1500	1.5		1.00	13.1			
Transportsysteem	1	5000	5.0		0.15	6.6			intern transportsysteem (geschat)
Compressor lucht	1	7500	7.5		0.10	6.6			voor pneumatiek
Proces + diversen			16.5				28.5	1.9	jaar verbruik in MWh
Bronpompen	3	11000	33.0		0.25	72.3			bronnpompen
Ventilatoren	832	30	25.0		0.50	110.1			Gemeten in 2008
Circulatiepompen	6	1500	9.0		0.20	15.8			koel en verwarmingscircuit
Pompen ventilatoren			67.0				198.1	13.4	
Boiler	1	1200000	1200.0		0.19		1949.1	131.3	aparte kWh meter in 2009
Warmtepomp	1	382000	382.0		0.22		742.3	50.0	gemeten met kWh meter in 2009
Totaal vermogen P _{tot}			2643.2	Afwijking			126	8.5	afwijking t.g.v. schatting
				Totaal energie verbruik			4601.9	310.1	op jaarbasis in [MWh] en [kWh·m ²]

Boiler elektrische ketel voor het produceren van heet water(90°C)

Dit bedrijf heeft in het voorjaar van 2009 een elektrische boiler aangeschaft omdat de onbalans in de aquifer (teveel koude in de aquifer) zodanig was, dat er maatregelen getroffen moesten worden om deze onbalans op te heffen. De oorzaak was dat de warmtepomp teveel draaiuren op warmtevraag maakte.

In 2009 is een kWh meter gebruikt om het verbruik van de geïnstalleerde boiler te registreren. Het opwarmen, de warmteafname en het warmteverlies van deze boiler maken de vergelijking tussen 2008 en 2009 minder overzichtelijk.

In Figuur 90 en Tabel 14 is te zien dat vanaf 2009 periode 3-4 er minder warmte aan de aquifer is onttrokken terwijl er wel warmte is geladen, waardoor het koudeoverschot is afgenomen.



Figuur 90. Cumulatieve energiebalans van de aquifers.

Tabel 14. Jaaroverzicht van het laden en ontladen van de bronnen.

	Laden	Onttrekken	Overschot
	GJ	GJ	GJ
2007	2,630	14,065	11,436
2008	3,560	13,260	9,700
2009 tot november	5,104	5,295	191
2009*	5,104	9,140	4,036
	kWh	kWh	kWh
2007	730,463	3,906,993	3,176,530
2008	988,761	3,683,287	2,694,526
2009	1,417,723	2,538,881	1,121,158
	Laden	Onttrekken	Overschot
	m3	m3	m3
2007	109,455	755,173	645,717
2008	169,522	768,909	599,387
2009 tot november	176,324	263,037	86,712
2009*	176,324	263,033	86,708

Conclusies bedrijf 6

- Het bedrijf onttrekt meer warmte dan koude aan de bron waardoor een koudeoverschot is ontstaan.
- Na verandering van strategie in begin 2009 is het laden en ontladen beter in balans gebleven. werd er weer warmte onttrokken.
- Het beoogde effect wordt ook bereikt door een verandering later in 2009. De bronnen zijn echter nog steeds in onbalans.
- In 2009 is een aparte elektrische boiler ingezet die in de daluren draait, waardoor de warmtevraag aan de bron verminderde. Stel dat de COP van de warmtepomp met bronpompen en warmtewisselaars 4 is, dan betekent dit dat het totale rendement van de warmtepomp vier keer hoger is dan van de boiler. De boiler draait in de daluren en kan op elk gewenst tijdstip ingeschakeld worden, de energie wordt ingekocht als het tarief laag is. Het tarief moet echter een factor 4 lager zijn om de prijs per eenheid warmte gelijk te krijgen.
- Dit bedrijf heeft een overschot aan koude terwijl andere bedrijven met WKK vaak een overschot aan warmte hebben. Combinatie van twee van dergelijke bedrijven zou extra besparing kunnen opleveren.
- Het systeemrendement van elektrische energie uit het openbare net heeft een laag rendement (40%). Het totale rendement van een eenheid warmte die langs die weg opgewekt wordt, is dan ook bijzonder laag. Het zou dus raadzaam zijn te voorkomen dat elektrische energie uit het net wordt gebruikt voor opwekken van warmte.

Energieregistratie door Innogrow

Tabel 15. Overzicht energiestromen in bedrijf 2.

		OK	GK + OK
Resultaat 2009		WWK referentie	semi gesloten
oppervlak open	m2	93,000	59,000
oppervlak gesloten	m2	-	34,000
totaal project		93,000	93,000
belicht opp		100%	100%
vraag			
warmte	m3/m2 belicht	40.1	40.58
	m3/m2 onbelicht		
	m3/m2	40.10	40.58
	MWu Warmte	32,787	33,179
elektra			
lampen	W/m2	77.5	77.5
	MW	7.2	7.2
	uren	2279	2279
	MWu	16,428	16,428
lbk	MWu	-	581
wp	MWu	-	2,003
aquifer en GK pompen	MWu		1,156
Basislast 7 kwh/m2	Mwu	651	651
totaal	MWu Elektra	17,079	20,819
koude	m3/m2		17.4
	MWu Koude	-	5,201
productie			
WKK	MWve	2,929	2,928
	uren	5245	5245
42.6%	MWue	15,360	15,360
54.0%	Mwuth (max 3400 Kw)	19,460	19,460
	m3 gasverbruik	4,098,999	4,098,999
WP	MWve		
	uren		2722
	COP		4.08
	MWue	-	2,003
	Mwuth (max 3000 Kw)	-	8,166
	Mwuk	-	6,163
ketel	MWuth	13,327	5,553
107%	m3 gasverbruik	1,416,673	590,324
koude		0%	118%
warmte dekking WP			25%
warmte wkk		59%	59%
warmte wkk+wp			83%
elektra gevraagd ingevuld door WKK		90%	74%
MWUe in te kopen	MWu	1,719	5,459
Scenario 1 - elektriciteitscentrale ¹		391,052	1,241,938
Scenario 2 - elektriciteit WKK burens ²	Uitgevoerd in 2009		
Inkoop elektra burens	MWu		10,597
Inkoop net	MWu		1,777
Verkoop net	MWu		6,915
Inkoop elektra burens	m3 (gelek = 43%)		2,803,130
Eigen warmte burens door opwekking	m3 (guth = 52%)		1,457,628
Inkoop net	m3 (gelekcentrale = 50%)	391,052	404,326
Electriciteitscentrale opgewekt ³	m3 (50%)	1,573,081	
Extra m3 gas		391,052	176,748
Gasverbruik lokaal (wkk + ketel)	m3	5,515,673	4,689,323
Totaal gasverbruik landelijk (scen.1)	m3	5,906,725	5,931,261
Totaal gasverbruik landelijk (scen.2)	m3	5,906,725	4,866,071
	Energetisch rendement		
Gasverbruik lokaal (WKK + WP + ketel)			14.98%
Gasverbruik landelijk			-0.42%
Gasverbruik landelijk (inkoop burens)			17.62%

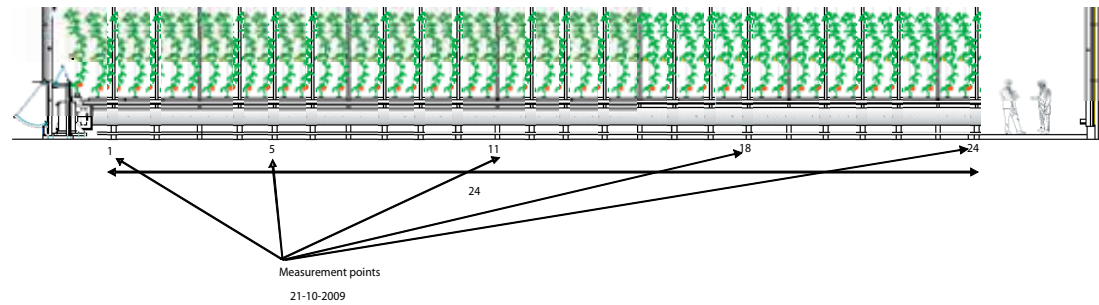
1. scenario 1: De elektriciteit wordt via het net ingekocht met rendement 50%
2. scenario 2: Dit is het scenario dat Bedrijf 2 gebruikt. In de tabel zijn de werkelijke getallen vermeld van inkoop burens, inkoop net en verkoop net.
3. landelijk: Bij het OK concept dient de elektriciteitscentrale de MWu elektriciteit die Bedrijf 2 verkoopt, op te wekken met rendement van 50%. Deze wordt daarom meegerekend aan de referentiekant.

Tabel 16. Overzicht energiestromen in bedrijf 2 volgens de EOS demo systematiek.

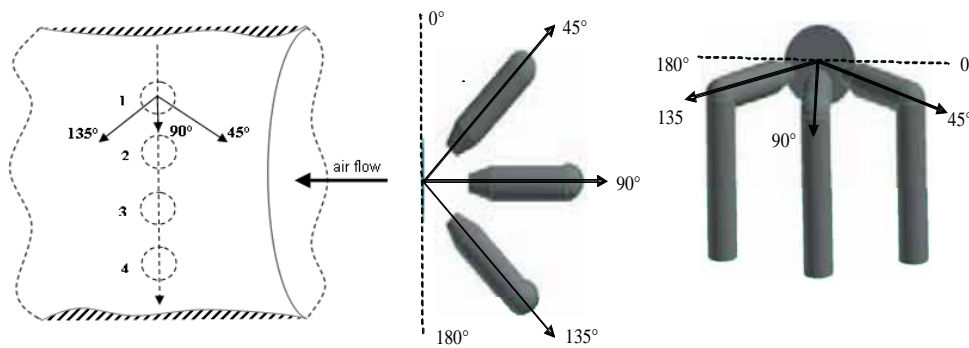
		oppervlak	warmte			lampen	2279	uur	Koude		GK elektra [MWh]	
		[ha]	[m3/m2]	[mln m3]	[MWh,th]	[W/m2]	[MWe]	[MWh,e]	[m3/m2]	[MWh]	Warmte- pomp	LBK en pompen
referentie	OK	5.9	40.1	2.4	20800	77.5	4.6	10421	-	-	-	-
	OK	3.4	40.1	1.4	11987	77.5	2.6	6005	-	-	-	-
	totaal	9.3	40.1	3.7	32787	77.5	7.2	16426	-	-	-	-
nieuwe situatie met gesloten kas	OK	5.9	40.1	2.4	20800	77.5	4.6	10421	-	-	-	-
	GK	3.4	41.4	1.4	12381	77.5	2.6	6005	17.4	5201	2003	1737
	totaal	9.3	40.6	3.8	33181	77.5	7.2	16426		5201	2003	1737
Toelichting op warmtevraag: de fysieke warmtevraag van de kas, zowel in de referentie als in de nieuwe situatie, is 50 m3/m2. Door de warmte van de belichting daalt de netto warmtevraag naar 40 m3/m2. Deze wordt geleverd door WKK en ketel, en in de nieuwe situatie ook door de WP.												
			referentie			nieuwe situatie			Toelichting			
Energievraag (afkomstig uit bovenstaande tabel)			warmte MWh,th	koude MWh,th	elektra MWh,e	warmte MWh,th	koude MWh,th	elektra MWh,e				
Totale warmtevraag			32787			33181			totaal, dus zowel open als gesloten kas			
totale koudevraag				0			5201		alleen in de gesloten kas is er koudevraag			
Basislast 7 kwh/m2					651			651				
totale elektriciteitsvraag					17077			20817	voor belichting, en in nieuwe situatie ook WP en LBK,extra pompen			
Energieleveranciers												
WKK			19460		15360	19460		15360	Inzet WKK verandert niet			
WP			0	0	0	8166	6163		WP levert nu koude en warmte (vooral aan gesloten kas, maar deels ook aan open kas).			
Ketel			13327			5555			resterende (piek)warmtevraag wordt ingevuld door de ketel, zowel voor de open als de gesloten kas.			
WKK-derden					0			10597				
Restvraag			0	0	1717	0	0	1777	Elektriciteit van het openbare net.			
Verkoop								6915	Elektriciteit verkoop aan het openbare net			
								5459	Rest			
Inkoop van energie												
Gas		mln m3	5.52			4.69						
Elektriciteit derden		MWh				10597						
Elektriciteit van het net		MWh	1717			1777						
Primair energieverbruik												
Totaal gasverbruik		mln m3	5.52			4.69						
Elektriciteit van WKK-buren						2.80						
Warmte WKK geleverd aan buren						-1.46						
Verkoop aan het net						-1.57						
Elektriciteit van het net		mln m3 aeq	0.39			0.40						
Eprim totaal		mln m3 aeq	5.91			4.87						
Eprim totaal		m3/m2	64			52						
Besparing op primair energieverbruik						17.61%						
CO2-balans												
CO2-emissie gasverbruik		kton	9.8			8.3						
CO2-emissie WKK-derden						0.9						
CO2-emissie elek. van het net (inkoop)			1.0			1.0						
CO2-emissie elek. van het net (verkoop)						-3.9						
CO2-emissie totaal		kton	10.8			6.4						
Besparing op CO2-emissie						40.77%						
Kengetallen												
WKK		5245 uur										
		2.94 MWe										
		43% elek. rend										
		3.8 MWth										
		54% therm. rend										
WP		4.08 COP										
		0.74 MWe										
		2722 uur										
Ketel		107% therm. rend										
Rendement WKK-derden		43% Mwue										
Rendement WKK-derden		52% Mwuth										
Rendement E-net		50%										
CO2 aardgas		1.78 kg/m3										
CO2 WKK-derden		0.09 kg/kWh										
CO2 elektriciteitsnet		0.56 kg/kWh										

Bijlage VIII Luchtsnelheidmetingen

Luchtsnelheidmetingen zoals uitgevoerd bij bedrijf 1. De positie wordt verklaard in Figuur 10 (paragraaf 5.1). De hoeken worden verklaard in Figuur 14. Voor de goede orde worden deze respectieve figuren hier nog eens herhaald in Figuur 91 en Figuur 92. In Tabel 17 zijn de gemeten statische druk en de daarbij behorende luchtsnelheid weergegeven.



Figuur 91. Representatie van de luchtslangen in de verschillende paden van de kas.



Figuur 92. Luchtsnelheidmetingen die zijn uitgevoerd in de luchtslang.

Tabel 17. Luchtsnelheidmetingen bedrijf 1.

Position 1			Static Pressure			Velocity		
			min	max	average	min	max	average
1	Center - inside the tube		49.5	57.0	53.3	8.9	9.9	9.4
	1	45°	3.3	9.5	6.4	2.7	4.5	3.6
		90°	42.0	47.0	44.5	8.0	8.7	8.4
		135°	45.0	52.0	48.5	8.7	9.4	9.1
	2	45°	9.1	13.3	11.2	3.1	4.2	3.7
		90°	56.0	61.1	58.6	9.3	9.7	9.5
		135°	66.8	73.1	70.0	9.9	10.9	10.4
	3	45°	16.5	20.3	18.4	5.7	6.6	6.2
		90°	50.3	72.0	61.2	10.2	10.7	10.5
		135°	53.5	61.1	57.3	9.6	10.3	10.0
	4	45°	15.8	30.2	23.0	5.3	6.9	6.1
		90°	52.3	60.3	56.3	9.6	10.2	9.9
		135°	57.2	63.9	60.6	9.7	10.3	10.0

Position 5			Static Pressure			Velocity		
			min	max	average	min	max	average
5	Center - inside the tube		54.4	61.3	57.9	9.7	10.3	10.0
	1	45°	17.1	19.5	18.3	6.1	6.7	6.4
		90°	50.1	52.4	51.3	9.2	9.9	9.6
		135°	44.4	49.6	47.0	8.3	9.1	8.7
	2	45°	17.6	22.1	19.9	4.8	5.6	5.2
		90°	53.7	56.8	55.3	9.3	9.6	9.5
		135°	43.5	51.1	47.3	8.6	9.1	8.9
	3	45°	19.5	25.2	22.4	5.8	6.7	6.3
		90°	55.8	58.1	57.0	9.5	9.8	9.7
		135°	40.3	47.0	43.7	8.1	8.8	8.5
	4	45°	21.6	26.8	24.2	5.8	6.3	6.1
		90°	48.4	52.6	50.5	9.0	9.4	9.2
		135°	48.3	51.1	49.7	8.7	9.4	9.1

Position 11			Static Pressure			Velocity		
			min	max	average	min	max	average
11	Center - inside the tube		54.1	55.8	55.0	9.2	9.6	9.4
	1	45°	21.8	24.3	23.1	5.4	5.7	5.6
		90°	49.1	51.8	50.5	9.2	9.3	9.3
		135°	41.5	43.2	42.4	8.4	8.6	8.5
	2	45°	21.9	25.6	23.8	5.8	6.2	6.0
		90°	46.8	49.4	48.1	8.8	8.9	8.9
		135°	37.9	40.8	39.4	8.6	8.8	8.7
	3	45°	16.4	22.2	19.3	5.1	5.6	5.4
		90°	49.2	50.6	49.9	9.0	9.1	9.1
		135°	39.6	41.7	40.7	7.9	8.2	8.1
	4	45°	19.8	24.2	22.0	5.7	6.3	6.0
		90°	47.3	48.8	48.1	8.9	9.0	9.0
		135°	43.9	44.6	44.3	8.4	8.6	8.5

Vervolg Tabel 17

Position 18			Static Pressure			Velocity		
			min	max	average	min	max	average
18	Center - inside the tube		51.6	52.1	51.9	9.2	9.3	9.3
	1	45°	21.8	24.2	23.0	6.5	6.8	6.7
		90°	47.1	49.2	48.2	8.9	9.1	9.0
		135°	36.8	40.9	38.9	8.2	8.5	8.4
	2	45°	26.8	28.5	27.7	6.4	6.5	6.5
		90°	49.8	51.2	50.5	9.0	9.1	9.1
		135°	41.2	44.6	42.9	8.1	8.3	8.2
	3	45°	25.7	28.4	27.1	6.5	6.7	6.6
		90°	48.9	49.7	49.3	8.9	9.0	9.0
		135°	37.6	39.1	38.4	7.7	7.9	7.8
	4	45°	32.5	36.1	34.3	7.2	7.5	7.4
		90°	49.2	50.1	49.7	9.0	9.0	9.0
		135°	36.2	39.3	37.8	7.9	8.0	8.0

Position 24			Static Pressure			Velocity		
			min	max	average	min	max	average
24	Center - inside the tube		51.5	52.8	52.2	9.2	9.3	9.3
	1	45°	33.1	33.9	33.5	7.5	7.6	7.6
		90°	49.8	50.2	50.0	9.1	9.1	9.1
		135°	37.1	38.4	37.8	7.8	7.9	7.9
	2	45°	27.8	29.2	28.5	6.7	6.9	6.8
		90°	50.8	51.0	50.9	9.1	9.2	9.2
		135°	42.8	44.6	43.7	8.5	8.7	8.6
	3	45°	42.1	45.2	43.7	8.4	8.5	8.5
		90°	51.4	51.8	51.6	9.2	9.3	9.3
		135°	35.1	36.3	35.7	7.5	7.6	7.6
	4	45°	29.5	30.2	29.9	7.0	7.1	7.1
		90°	49.8	51.7	50.8	9.2	9.3	9.3
		135°	38.5	39.1	38.8	8.0	8.1	8.1

End of the tube			Static Pressure			Velocity		
			min	max	average	min	max	average
	Center - inside the tube				0.0			0.0
	1	45°			0.0			0.0
		90°	46.8	48.2	47.5	8.8	8.9	8.9
		135°			0.0			0.0
	2	45°			0.0			0.0
		90°	45.5	47.0	46.3	8.7	8.8	8.8
		135°			0.0			0.0
	3	45°	38.0	40.0	39.0	8.0	8.1	8.1
		90°	46.5	47.3	46.9	8.7	8.8	8.8
		135°	29.0	36.0	32.5	7.1	7.4	7.3
	4	45°			0.0			0.0
		90°	47.3	47.8	47.6	8.8	8.9	8.9
		135°			0.0			0.0

