



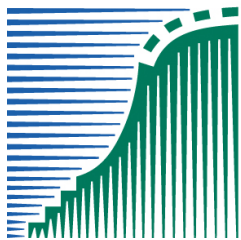
Verbeteren verticaal temperatuurprofiel in een Aircokas

Peter van Weel

¹ Instituten

© 2007 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



**landbouw, natuur en
voedselkwaliteit**



Wageningen UR Glastuinbouw

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

Inhoudsopgave

	pagina
Inhoudsopgave	4
Samenvatting	2
1. Inleiding	3
2. Doelstelling	4
3. Werkwijze	6
4. Probleemanalyse en programma van eisen	8
4.1 Probleemanalyse	8
4.2 Programma van eisen	10
4.3 Aanpak	11
5. Luchtbehandelingskasten met horizontale ventilatoren	13
5.1 Proefkas	13
5.2 Metingen	14
5.3 Conclusie horizontale ventilatoren	20
6. Verticale ventilatoren	22
6.1 Theoretische achtergrond	22
6.1.1 Situatie overdag	22
6.1.2 Situatie in de nacht	23
6.2 Metingen aan de effectiviteit van verticale ventilatoren	25
6.2.1 Situatie overdag	26
6.2.2 Situatie in de nacht	28
6.3 Effect op botrytis bij tomaat	32
6.4 Conclusie verticale ventilatoren	32

Samenvatting

Samenvatting

De minimum buis is een energieverspillende actie die als doel heeft om het gewas in de nacht of overdag te activeren, verticale temperatuurverschillen kleiner te maken en botrytis te voorkomen. Een nadere analyse van de gevolgen van deze actie leert dat de minimum buis deels het probleem vergroot dat men probeert te bestrijden. Door de extra energietoevoer neemt de verdamping en daarmee de RV in de kas toe. Dat vergroot de kans op botrytis en dus wordt er meer geventileerd om dat extra vocht af te voeren. Daarvoor worden kieren in schermdoeken getrokken en ramen geopend. Dat levert op zijn beurt een koude luchtstroom die lokaal tot condens kan leiden. Door gebruik te maken van de kennis uit het Mollier diagram en de energiebalans van een gewas is een energiezuiniger oplossing denkbaar voor de door de ondernemer gewenste doelen. Die bestaat uit het installeren van luchtverplaatsingsystemen die de lucht verticaal mengen. Daardoor ontstaat een situatie waarin met volledig gesloten schermdoek of ramen de verticale temperatuurverschillen minimaal worden en de kans op botrytis door condens afneemt. Voor dit doel zijn twee systemen getest: luchtbehandelingskasten die bovenin de kas hangen en verticaal werkende ventilatoren van het type Aircobreeze.

De luchtbehandelingskasten hebben als primair doel om te verwarmen, koelen of ontvochtigen, maar verplaatsen ook de kaslucht. Uit metingen in een kas met tomaten en paprika's is gebleken dat ondanks een groot volume verplaatste lucht ($25 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{uur}$) geen goede temperatuurverdeling te bereiken was, zowel overdag als in de nacht. Het aanbrengen van hulpventilatoren, die een grote ($40 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$) horizontale luchtstroom dwars op de uitblaas van de luchtbehandelingskasten veroorzaakte, verbeterde de temperatuur verdeling enigszins maar gaat wel gepaard met een groot verbruik aan elektriciteit ($4 \text{ W}/\text{m}^2$).

Met behulp van verticaal werkende Aircobreeze ventilatoren was bij gesloten scherm een goede verticale temperatuurverdeling haalbaar met een klein stroomverbruik van $1 \text{ W}/\text{m}^2$. De ventilator veroorzaakt een egaal verdeelde luchtbeweging van ongeveer $55 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ met een snelheid in het gewas van $5 \text{ cm}/\text{sec}$. In die situatie waren de verticale temperatuurverschillen zowel bij paprika als bij tomaat minder dan 1 graad. De temperatuur onder het schermdoek daalde met ongeveer 1 graad, wat een directe energiebesparing oplevert. Daarnaast konden de schermdoeken vaker volledig gesloten blijven of intensiever gebruikt. De Aircobreeze is daarmee een uitstekend instrument om met één of twee volledig gesloten energieschermen paprika of tomaat te telen, zelfs bij een relatief hoge vochtproductie in de nacht zoals bij het proefbedrijf het geval was omdat in de grond werd geteeld. De te behalen energiebesparing is daarmee direct afhankelijk van de inzet van energieschermen. Ondanks een hogere gemiddelde RV door het dichter houden van de schermen en het laten vervallen van de minimum buis trad er niet meer botrytis op. Opvallend was wel dat de botrytis voornamelijk bestond uit wonden die niet goed opdroogden. Dat is een teken dat de luchtbeweging of de RV onderin het gewas nog verder moet worden verbeterd. Overdag was er bij gesloten ramen en lage instralingen ook een positief effect op de verticale temperatuurverschillen waardoor er minder gestookt en gelucht hoeft te worden. De Aircobreeze heeft geen effect op horizontale temperatuurverschillen.

1. Inleiding

In een Aircokas[®] worden de luchtramen zo lang mogelijk gesloten gehouden met als doel het besparen van energie en het verhogen van de CO₂ concentratie. Dat levert naast een hogere productie ook een energiebesparing op omdat overdag meer licht en warmte wordt toegelaten die in de nacht gecompenseerd kan worden door een lagere kasttemperatuur. Dat leidt tot een hogere RV. Door die hogere RV neemt de kans op botrytis toe. Wanneer de zon opkomt ontstaat in de ochtend een verkeerd verticaal temperatuurprofiel. De hoger gelegen plantendelen worden snel opgewarmd, terwijl de lagere plantendelen zoals stengels en vruchten achterblijven in temperatuur. Dat leidt tot condensatie en botrytis. Bij gebruik van belichting wordt dit probleem nog versterkt omdat er extra warmtetoevoer van bovenaf is. De huidige methode om dit probleem op te lossen bestaat uit het aanzetten van de laagliggende verwarming. Dat heeft echter een aantal negatieve effecten. De verdamping wordt gestimuleerd, het vergt energie en door de grote waterinhoud van het buisennet bestaat er een te trage reactietijd waardoor regelmatig overtollige warmte moet worden weggekoeld. Omdat de temperatuur verhoging meestal al vanaf 3 uur 's nachts wordt opgebouwd om een te snelle opwarming van de vruchten te voorkomen vanwege de kans op scheuren stijgt ook de gemiddelde nachttemperatuur tot boven de gewenste waarde. In een tomatenteelt wordt door de minimum buis op jaarbasis 6-10 m³ gas per m² verbruikt die wellicht te vermijden is. In principe moet daartoe de warmte die bovenin de kas ophoopt naar beneden worden verplaatst. Op die wijze wordt geen extra energie toegevoerd en behoeven de laagliggende buizen minder hoog of helemaal niet gestookt te worden. Dit onderzoek is gericht op het bedenken en uittesten van alternatieve methoden voor het verkleinen van de verticale temperatuurverschillen om te komen tot energiebesparing en minder botrytisaantasting.

2. Doelstelling

Technische doelstellingen

Het project geeft antwoord op de vraag aan welke eisen een systeem voor verticale luchtbeweging moet voldoen voor twee pilotgewassen: tomaat en paprika. De eerste als representant van hoogopgaande gewassen en de tweede voor lagere gewassen met een hoge LAI. Op basis van systeemontwerpen worden vervolgens de technische en de economische perspectieven beoordeeld.

Een praktijktoets moet uitwijzen of het gewenste temperatuurprofiel gerealiseerd kan worden in een gewas.

Energiedoelstellingen

Door het verminderen van de verticale temperatuurverschillen vervalt de noodzaak om anders dan voor verwarmingsdoeleinden met het buizennet te stoken. Op jaarbasis bespaart dat 6-10 m³ gas per m² kas. Daar staat een elektriciteitsbehoefte voor ventilatoren tegenover die ingeschat wordt op 2 m³/m² aardgasequivalent. Omdat bij het toenemen van de instraling niet eerst de warmte van een buizennet hoeft te worden afgelucht kunnen de ramen langer gesloten blijven waardoor de beschikbare CO₂ beter benut wordt. Dat levert naar verwachting op jaarbasis 5% emissiereductie op.

Nevendoelestellingen

Door het verminderen van de verticale temperatuurverschillen verkleint de kans op condensvorming op plantdelen. Uitval of schade door botrytis wordt daarmee verminderd.

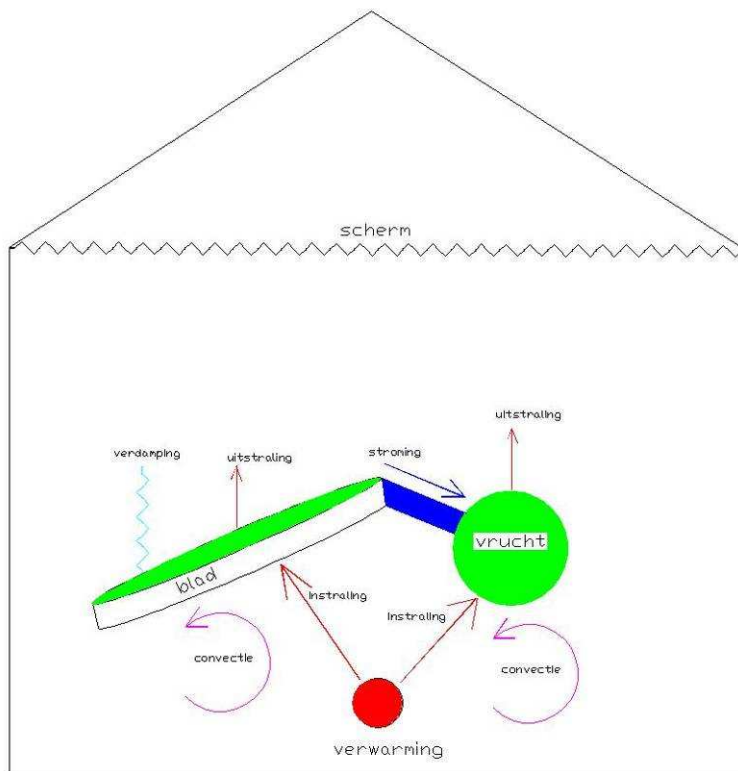
3. Werkwijze

Er is een programma van eisen ontwikkeld waaraan een klimatiseringssysteem voor zowel energiebesparing als beperking/preventie van botrytisaantasting zou moeten voldoen. Op basis daarvan zijn een aantal oplossingen bedacht waarmee de doelstelling van het verkrijgen van kleinere verticale temperatuurverschillen mogelijk gehaald zou kunnen worden. Uit die oplossingsrichtingen is een systeem gekozen en gerealiseerd in een proefkas met het Aircokas systeem op het biologische tomaten/paprika bedrijf van Ruud van Schie in Ens. Zowel bij de tomaten als de paprika zijn metingen verricht naar de prestaties van het oude verwarmingssysteem op basis van luchtbehandelingskasten en een buizennet en van de nieuw gekozen oplossing. Op basis van de resultaten van die metingen is een nieuw systeem gedefinieerd en getekend. Vervolgens is dat systeem op basis van Aircobreeze ventilatoren gerealiseerd en zijn twee jaar lang metingen en waarnemingen verricht.

4. Probleemanalyse en programma van eisen

4.1 Probleemanalyse

Botrytis ontstaat wanneer gedurende een langere periode het gewas nat blijft. Daarom is het belangrijk om te analyseren wanneer er kans bestaat op condensatie. Het Mollier diagram kan ons helpen om uit te rekenen wat de kansen op condensvorming zijn bij een specifieke planttemperatuur en RV van de omringende kaslucht. Aan de hand van een aantal voorbeelden kan het risico eis nader worden geanalyseerd. De bladtemperatuur is een resultante van de hoeveelheid energie die naar het blad toestroomt en de energie die het door uitstraling, verdamping en convectie weer verliest.



Figuur 1: Energiestromen van blad en vrucht in de nachtsituatie met buisverwarming onder het gewas

In figuur 1 is te zien dat een blad of een vrucht warmte ontvangt van een verwarmingsbuis via directe stralingsoverdracht en indirect via opgewarmde lucht (convectie). Wordt er niet gestookt, dan ontvangt een blad of een vrucht warmte vanuit de omringende lucht zolang deze warmer is. Is de omringende lucht kouder dan zal blad en vrucht juist warmte verliezen. Bij warmtetoever zal de bladtemperatuur stijgen. Het blad verliest echter gelijktijdig warmte aan de omgeving door uitstraling en door verdamping. Ook is bekend dat via de sapstroom warmte uitgewisseld kan worden tussen plantdelen. In de nacht zullen de huidmondjes vrijwel gesloten zijn door gebrek aan licht. Daarom kan de verdamping alleen optreden vanuit poriën. Dat betekent dat een blad zich zal gedragen als een gewoon nat oppervlak, de "natte bol". Een verdampend oppervlak verliest warmte en zal dicht bij de natte bol temperatuur komen. Dat is niet hetzelfde als de dauwpunt temperatuur, die ligt lager. In de volgende

tabel valt af te lezen dat bij stijging van de RV de natte bol temperatuur en het dauwpunt steeds dichterbij elkaar komen, maar ook steeds dichterbij de kasttemperatuur. Relatief geringe verschillen in temperatuur zullen dan al tot condensatie leiden. Met name het verdampende blad dat de natte bol temperatuur zal naderen zit al snel bij het dauwpunt wanneer de RV verder stijgt of de kasttemperatuur verder daalt. Wanneer de RV 100% wordt zijn de temperaturen voor kas, dauwpunt en natte bol gelijk. Er is dan ook geen verdamping meer.

Kasttemperatuur	Dauwpunt temperatuur			Natte bol temperatuur		
	RV 80%	RV 90%	RV 95%	RV 80%	RV 90%	RV 95%
20	16,5	18,3	19,2	17,6	18,8	19,5
18	14,5	16,3	17,2	15,8	16,8	17,5
16	12,6	14,4	15,2	14,0	15,0	15,6
14	10,6	12,4	13,2	12,0	13,1	13,6
12	8,7	10,4	11,2	10,1	11,1	11,6

Tabel 1: Relatie tussen kasttemperatuur, RV, dauwpunt temperatuur en natte bol temperatuur.

Een vrucht of een stengel kan slechts weinig verdampen en zal vooral door temperatuurverschil met de omgeving afkoelen of opwarmen en na verloop van tijd dicht bij de kasttemperatuur komen te liggen. Omdat deze delen veel water bevatten zal de temperatuur sterk nadien op de omgeving. Het warmteverlies door uitstraling is bij gesloten scherm beperkt doordat het temperatuurverschil tussen plant en scherm erg klein is. A het scherm niet gesloten is, kan door uitstraling de bladtemperatuur onder de luchttemperatuur komen met condensatie als gevolg.

Condensatie treedt op wanneer de temperatuur van een plantdeel onder het dauwpunt komt te liggen. Globaal kunnen de volgende situaties optreden gedurende de nacht:

1. De luchttemperatuur zakt en komt onder het dauwpunt. De verdampende bladeren zijn al kouder dan de omgeving en zullen relatief snel verder afkoelen en nat slaan. De niet verdampende stengels en vruchten zullen dan (vanwege de grotere massa en dus energie-inhoud) als laatste nat slaan. Als de luchttemperatuur niet hoger mag worden, bijvoorbeeld om een bepaalde temperatuursom te realiseren, dan zal de RV verlaagd moeten worden door te ventileren om condensatie te voorkomen.
2. De RV wordt zo hoog dat al bij kleine temperatuurverschillen condensatie optreedt.
3. De afkoeling van de plant door uitstraling naar een koude "hemel" wordt zo groot dat een blad of vrucht onder het dauwpunt komt te liggen. Dat kan het geval zijn bij het geheel of gedeeltelijk opentrekken van het scherm. Bijvoorbeeld als er een kier wordt getrokken in het scherm om overtollige warmte of vocht af te voeren. Door een relatief kleine koude luchtstroom langs het doek kan deze al zoveel afkoelen dat het doek kouder wordt dan de plant.
4. Door een kier in het schermdoek kan de bladtemperatuur ook verlagen door tocht en onder het dauwpunt komen.

In de ochtend wanneer de zon opkomt kan dan ook nog de volgende situatie ontstaan:

Bij instraling stijgt de verdamping onder invloed van het opengaan van de huidmondjes, de hoeveelheid vocht in de lucht neemt toe, maar de luchttemperatuur stijgt nog niet omdat het scherm open gaat. Wel worden de bovenste plantdelen warmer door instraling. Dat leidt tot een hogere RV onderin het gewas. Op dat moment slaan de koude vruchten nat. Je krijgt dan dus tijdelijk een grotere temperatuurgradient met als gevolg een RV-gradient binnen het gewas. Kortom over de hoogte van het gewas verschillende klimaten en dus lokaal overschrijding van de gewenste parameters.

Om de kans op condensatie zo klein mogelijk te maken kunnen er twee acties worden ondernomen.

1. De temperatuur verhogen van het plantendeel dat nat dreigt te slaan.
2. De RV zo ver verlagen dat het dauwpunt zakt onder de temperatuur van het plantendeel.

Verhoging van de nacht temperatuur met een minimum buis is de tot nu toe gebruikte strategie om zowel de blad of vruchttemperatuur te verhogen als de RV te verlagen. Deze strategie is om een aantal redenen niet optimaal.

- a) De toevoer van energie naar het blad vergroot de verdamping en daarmee de RV.

- b) Verwarming boven de gewenste planttemperatuur vergroot het energieverbruik omdat er geventileerd moet worden.
- c) Bij een aantal gewassen is een lage planttemperatuur gewenst voor beheersing van de groei of de kwaliteit.

Verlaging van de RV door ventilatie met buitenlucht via de luchtramen en kieren in het scherm is daarom een meer voor de hand liggende strategie waarvan inmiddels is aangetoond ⁽¹⁾ dat die niet alleen een energiebesparing oplevert, maar ook minder kans op condensatie en schimmelontwikkeling. In Nederland is de buitenlucht vrijwel altijd droger dan kaslucht waardoor deze methode vrijwel altijd toepasbaar is. Toch zijn veel ondernemers huiverig voor deze methode omdat ze (terecht) bang zijn voor kouval via de kier die zowel in het schermdoek als in het luchtraam aangebracht moet worden, waardoor lokaal toch natslag op kan treden. Een methode die geen (locale) verticale onevenwichtigheden in het kasklimaat veroorzaakt is vereist (een kier geeft lokaal verticale onevenwichtigheden). Daarom wordt in dit rapport een derde methode voorgesteld: het verkleinen van de verticale temperatuurverschillen. Wanneer het koudste onderdeel van een kas niet een plantonderdeel is, mag de RV gerust hoog zijn zonder gevaar op condensatie op het gewas zolang de gewastemperatuur maar overal boven het dauwpunt blijft. Bij een analyse van de temperatuurverschillen in een kas blijkt bij gesloten scherm vooral de verticale verdeling een probleem. Wanneer een verwarmingssysteem goed is gedimensioneerd en de gevels voldoende luchtdicht zijn zal bij een gesloten scherm de horizontale temperatuurverdeling goed zijn. Wanneer er gestookt wordt treedt er warmteophoping bovenin het gewas op omdat warme lucht stijgt door zijn lagere soortelijke massa. Wanneer het schermdoek wordt geopend en de zon de vruchten nog niet voldoende op kan warmen blijven de plantendelen onderin tijdelijk extra koud. Vooral bij hoge RV's ligt de dauwpunttemperatuur dan dicht bij de kastemperatuur zodat kleine temperatuurverschillen al leiden tot condensatie. Een manier om dat te voorkomen is de kaslucht verticaal beter te mengen door de warme lucht bovenin de kas naar beneden te stuwen met een ventilator. Wanneer dit systeem wordt gecombineerd met een beheerste ventilatie met buitenlucht waardoor de RV zover kan worden verlaagd dat altijd en op elke plaats boven het dauwpunt gebleven kan worden ontstaat er een energiezuinige en beheersbare vochtregeling. Als door ventilatie de kastemperatuur daalt tot onder het gewenste nivo moet de buitenlucht worden opgewarmd voor ze de planten bereikt. Die lucht wordt dan relatief droog en kan gericht worden gedoseerd bij de plantendelen die in de gevarenzone zitten. Bij veel instraling treedt het probleem op dat er bovenin de kas een ophoping van warmte ontstaat die lokaal tot oververhitting kan leiden. Door luchtbeweging kan extra verkoeling optreden doordat de warmteoverdracht van het blad naar de omgeving door convectie wordt vergroot. Bovendien wordt de warmte beter over het gewas verdeeld.

4.2 Programma van eisen

Om **botrytis** te voorkomen moet over het gehele gewas aan de volgende eisen worden voldaan:

1. Geen condens op vruchten of stengels
2. Daarvoor moeten de verticale temperatuurverschillen zodanig beperkt blijven dat geen enkel gewasonderdeel onder het dauwpunt komt.
3. Omdat temperatuurverschillen nooit helemaal te vermijden zijn moet een "veilige" RV worden nagestreefd, bijvoorbeeld 90%.

Om **energie** te besparen moet aan de volgende eisen worden voldaan:

1. Verticale temperatuurverschillen in de plantendelen tussen zonsondergang en een uur na zonsopgang minder dan 0,5 graden.
2. Vocht afvoeren via ventileren met buitenlucht en niet via minimum buis.
3. Alleen warmte toevoeren wanneer de planttemperatuur te laag wordt.
4. Warmte-energie niet grotendeels vervangen door elektrische energie benodigd voor aandrijving van ventilatoren of pompen.
5. Geen kouval via openingen in ramen of schermdoek waardoor de ondernemer geneigd zal zijn om harder te stoken.

4.3 Aanpak

Op basis van deze uitgangspunten kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

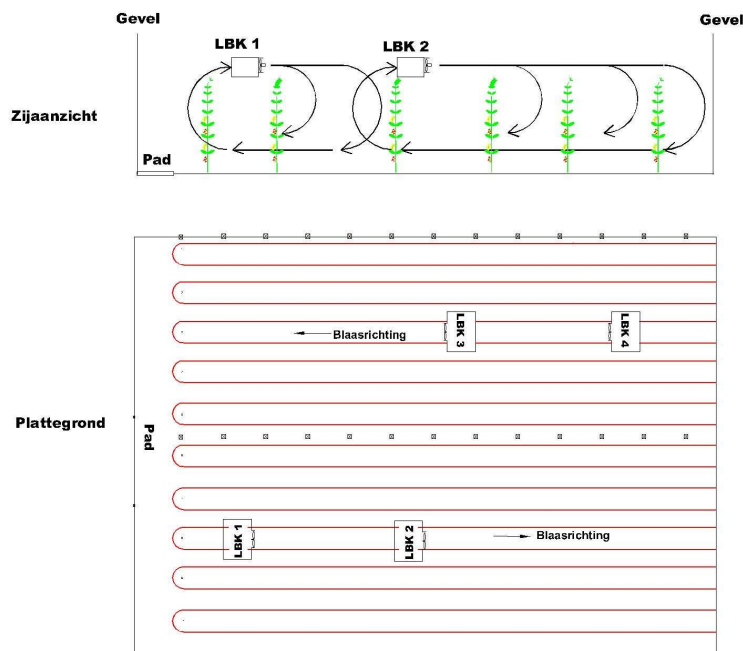
Er moet een ventilatiesysteem komen op basis van verticale luchtbeweging die zorgt voor zo klein mogelijke verticale temperatuur verschillen, zowel overdag als in de nacht. Als daarna de RV als te hoog wordt beoordeeld moet worden ontvochtigd door mechanisch te koelen of door te ventileren met buitenlucht. In beide situaties kan het energiescherm zoveel mogelijk gesloten blijven. De bovenstaande conclusies leiden tot een aantal oplossingsrichtingen die zijn uitgetest.

1. Luchtbehandelingskasten met horizontale ventilatoren
2. Verticale ventilatoren, eventueel gecombineerd met aanzuiging van lucht van boven het scherm.

5. Luchtbehandelingskasten met horizontale ventilatoren

5.1 Proefkas

Met een luchtbehandelingskast waarin zowel koude als warmte aan de kaslucht kan worden toegevoegd kan actief worden ontvochtigd zonder de luchtramen te openen. Ook kan overdag actief worden gekoeld. De kosten en de effectiviteit daarvan vallen buiten het kader van dit rapport, maar de luchtverdeling die met de ventilatoren kan worden bereikt is wel onderzocht. In de proefkas van 16 bij 60 meter hingen boven een tomatengewas 4 ventilatoren die zodanig over de ruimte waren verdeeld dat theoretisch een rondgaande luchtstroom boven, door en onder het gewas kon worden gerealiseerd.



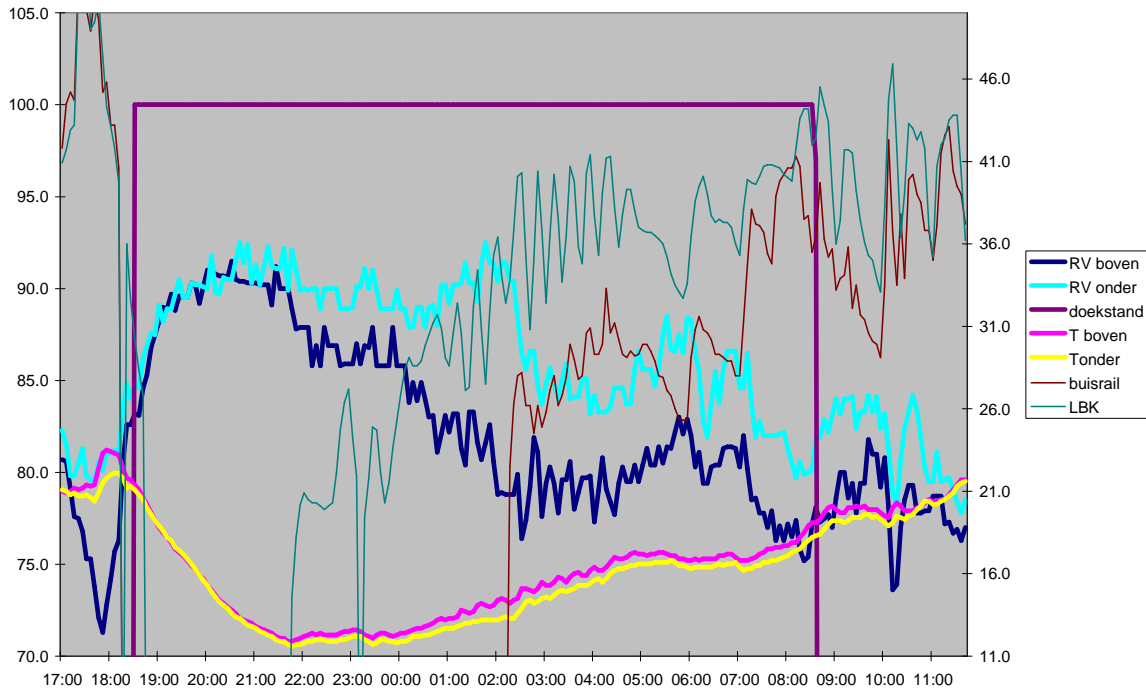
Figuur 2: Plattegrond en Zijaanzicht van proefkas met luchtbehandelingskasten. Aangegeven zijn de nagestreefde stromingspatronen.



Figuur 3: overzicht proefkas met luchtbehandelingskasten.

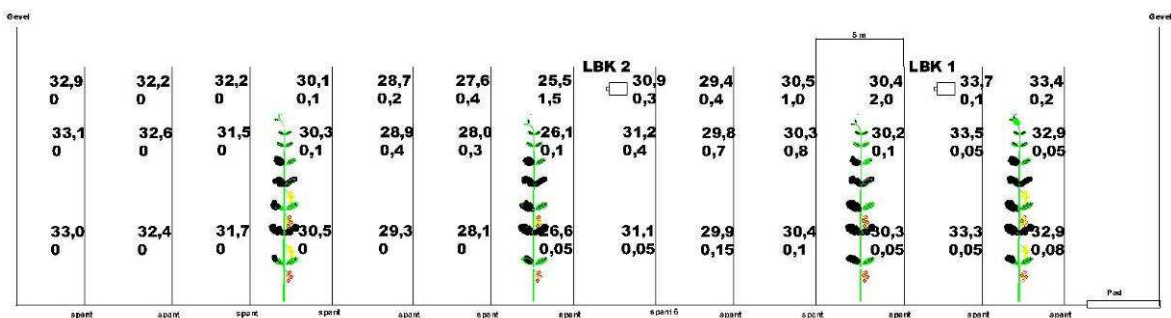
5.2 Metingen

In deze kas zijn metingen verricht naar de gerealiseerde temperatuurprofielen in de nacht (Figuur 4). In die situatie was het schermdoek gesloten en werd verwarmd met het buisrailnet en met de LBK's. De temperatuur onderin het gewas bleef achter ondanks het blazen met de LBK. Mede daardoor was het onderin het gewas ook vochtiger.



Figuur 4: Verticaal profiel van temperatuur en RV bij gebruik van energiedoek, buisrail en LBK verwarming.

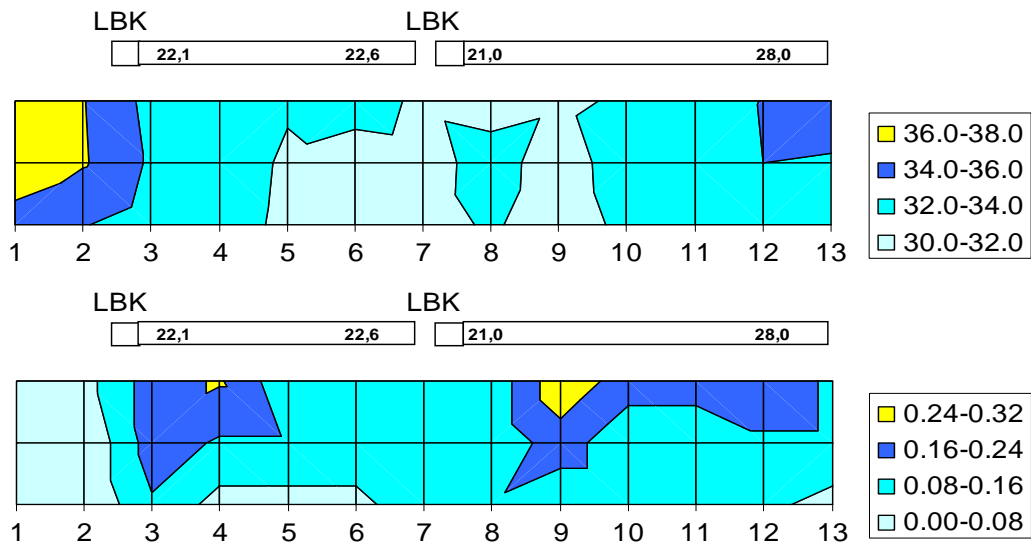
Ook overdag zijn metingen uitgevoerd met de luchtverdeling van de LBK's. Ondanks een grote luchtverplaatsing vielen zowel de horizontale als verticale temperatuurverdeling erg tegen wanneer er een koelvermogen van 200 W/m² werd gevraagd.



Figuur 5: Zijaanzicht kas: Metingen luchttemperatuur (bovenste getal) en luchtsnelheid in m/sec (onderste getal) op 3 hoogten in het pad waar de luchtbehandelingskasten hangen. 850 W/m² instraling, geen verneveling, uitblaastemperatuur LBK= 20,6 °C. Gevraagd koelvermogen 200 W/m². Ventilator 50 Hz. Raamopening: luwe zijde 36%, windzijde 16%. Datum 12-05-2006.

Met name net voor en vanaf 20 meter afstand van de LBK liepen de temperaturen in het horizontale vlak erg hoog op. Dat had met name een negatieve invloed op de zetting van tomaat. Verticaal was de temperatuurverdeling wel redelijk, maar door de hoge temperatuur toch onacceptabel.

In een poging om dit temperatuurprofiel te verbeteren werden er plastic slurven met een doorsnee van 60 cm gemonteerd aan de uitblaasopeningen van de LBK's. In de slangen was een gatenpatroon aangebracht om de lucht over de planten te verdelen. Uit de metingen bleek dat er direct achter de LBK een goede temperatuurverdeling werd behaald, maar verder verwijderd van de LBK's en tussen de rijen LBK's juist een hele slechte.



Figuur 6: Zijaanzicht kas: Metingen luchttemperaturen in de verdeelslang achter de luchtbehandelingskasten, de ruimtemtemperatuur en de luchtsnelheden (onderste grafiek) op 3 hoogten. 760 W/m² instraling, verneveling aan. Gevraagd koelvermogen 150 W/m². Ventilator 50 Hz. Raamopening: luwe zijde 45%, windzijde 45%. Datum 12-06-2006, 16.00-16.50 uur.

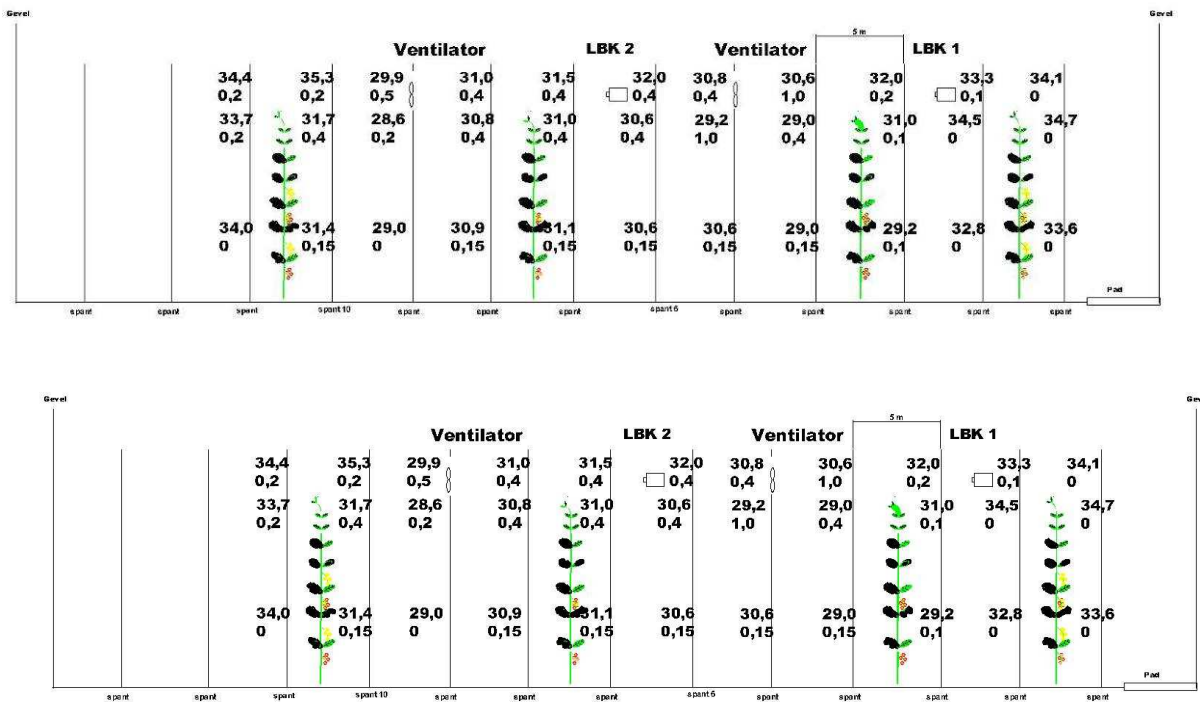
Ook bij dit systeem was de eindsituatie niet voldoende uniform en deze uitvoeringsvorm niet acceptabel. Daarvoor zijn meerdere redenen aan te voeren. Ten eerste waren de horizontale temperatuurverschillen te groot. Ten tweede neemt de slang permanent licht weg en ten derde neemt de koelcapaciteit door het gebruik van slangen af terwijl het stroomverbruik juist stijgt. Dat laatste wordt veroorzaakt door de hogere druk die nodig is om de weerstand van de slangen te overwinnen. Bovendien kan uit de oplopende uitblaastemperatuur in de slang worden afgeleid dat de slanglengte te groot is en er eigenlijk nog een LBK extra nodig zou zijn om in deze situatie een goede temperatuurverdeling en voldoende koelvermogen te ontwikkelen. Dat zou de investeringen verder opschroeven.

Vervolgens is daarom de slang vervangen door hulpventilatoren op 10m afstand van de LBK's met een debiet van 0-5000 m³/h die de koude lucht uit de LBK opnemen en verder transporteren.



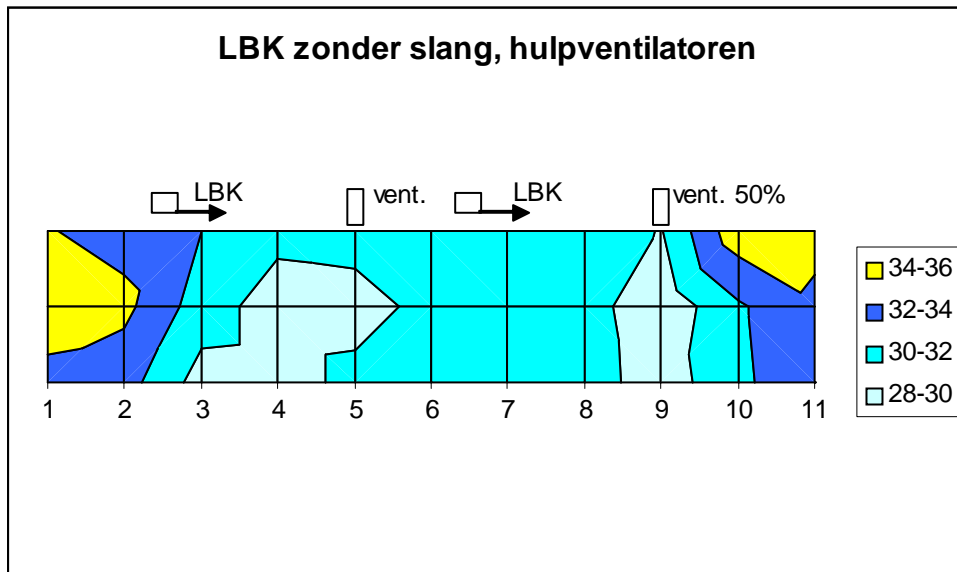
Figuur 7: hulpventilator achter de LBK.

De gedachte daarachter was dat een groter volume lucht verplaatst kan worden via een vrije uitblaas, terwijl gelijktijdig het toerental van de ventilator in de LBK omlaag kan en daarmee de stroomkosten omlaag gaan. In figuur 8 is het aantal en de positionering van de hulpventilatoren aangegeven. In figuur 8 staan de temperaturen en luchtsnelheden weergegeven die bereikt werden. Na het weglaten van de slangen werd het luchtvolume dat uit de LBK's kwam inderdaad sterk vergroot door het wegvallen van de tegendruk. Dat viel op te maken uit de grotere luchtsnelheden die werden bereikt in het pad. Toch werd de horizontale temperatuurverdeling daar niet beter van. In figuur 9 is dat met kleuren weergegeven. Extreme temperatuurverschillen van meer dan 5 graden werden



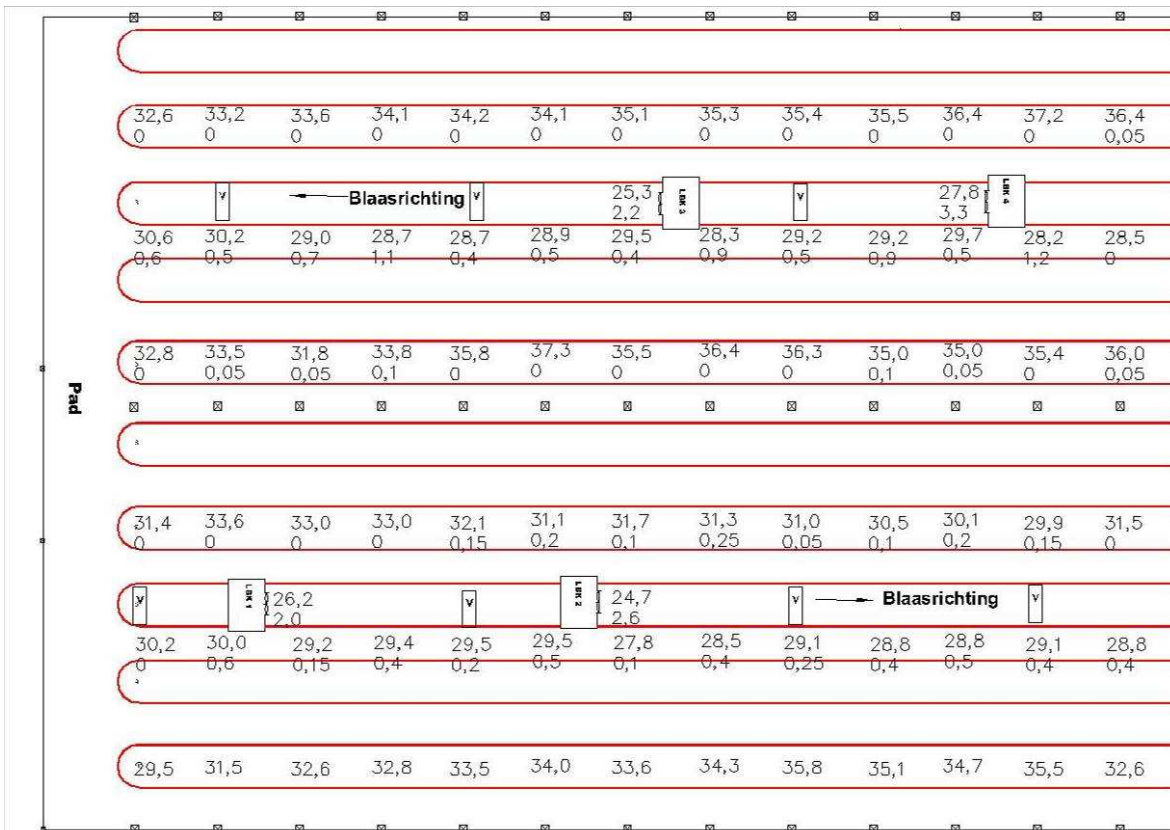
vastgesteld.

Figuur 8: Zijaanzicht kas: Metingen luchttemperatuur (bovenste getal) en luchtsnelheid in m/sec (onderste getal) in het pad waar de luchtbehandelingskasten hangen. LBK's voorzien van hulpventilatoren op 10 meter afstand. Linker hulpventilator draaide op half vermogen. 940 W/m² instraling, verneveling aan. Gevraagd koelvermogen 200 W/m². Ventilator 30 Hz. Raamopening: luwe zijde 45%, windzijde 45%. Datum 12-06-2006, 14.20-15.00 uur.



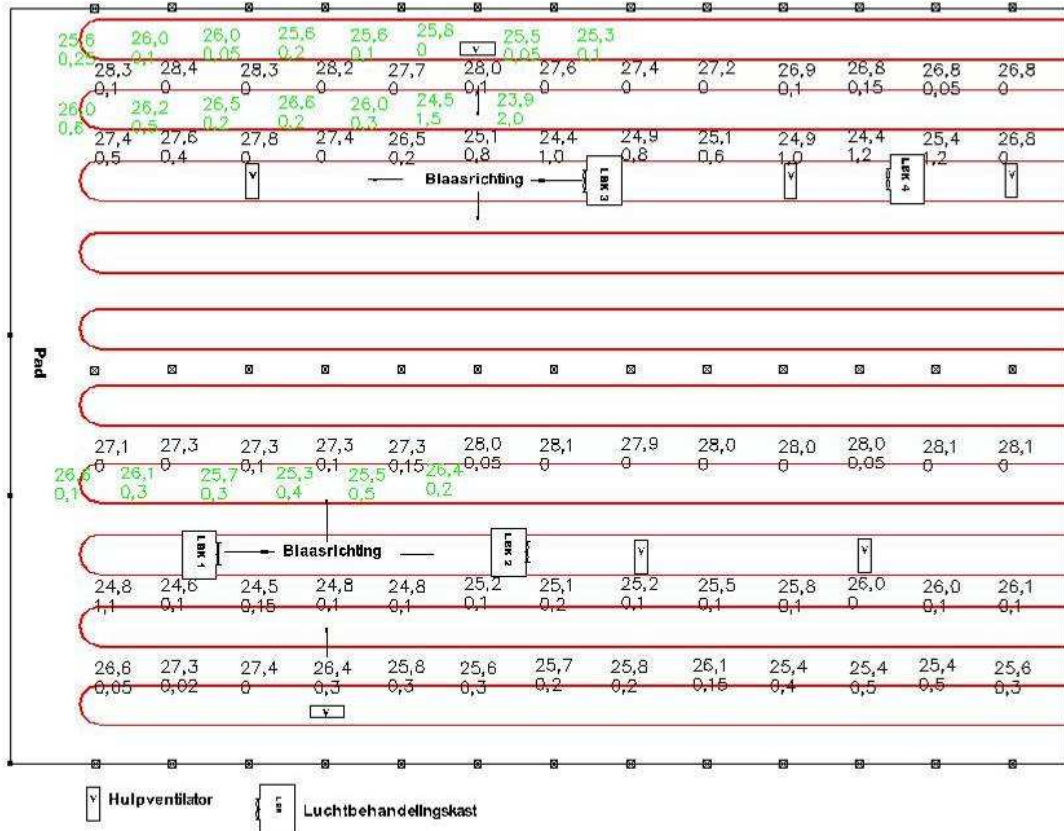
Figuur 9: Zijaanzicht kas: Temperatuurverdeling in het pad onder de LBK's voorzien van hulpventilatoren, weergegeven als isothermen.

Ondanks de lagere ventilatorsnelheid werden zowel de horizontale als verticale temperatuurverdeling beter in het gebied waar de hulpventilator zijn werk deed. En ondanks de hogere instraling ten opzichte van de situatie met slangen werden er lagere kasttemperaturen behaald met dezelfde LBK's. Er bestaan dus kansen om het stroomverbruik te verminderen zonder concessies aan het geleverde koelvermogen. Achter de tweede hulpventilator die met half vermogen draaide waren de temperaturen beduidend hoger, hetgeen erop duidt dat een goede afstemming tussen LBK ventilator en hulpventilator belangrijk is. Helaas blijkt uit een meting van de horizontale temperatuurverschillen (figuur 10) dat deze in de paden waar geen LBK's hangen te groot zijn, zelfs wanneer de ventilatoren op maximaal vermogen draaien.

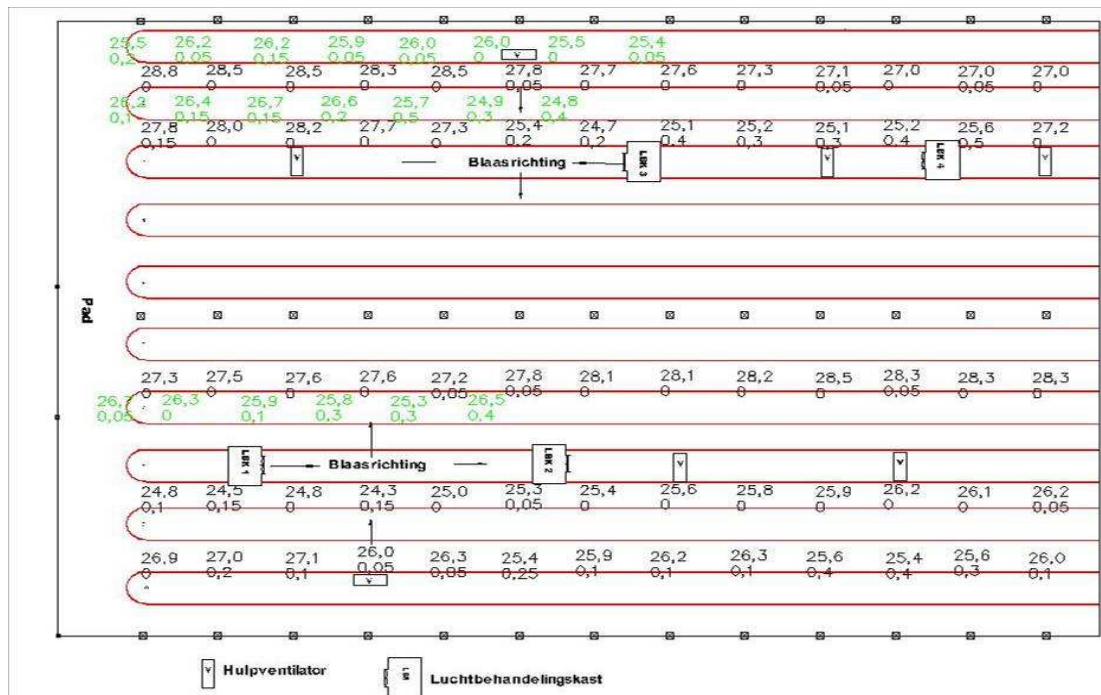


Figuur 10: Plattegrond kas: Luchttemperatuur en luchtsnelheid in m/sec op 1m beneden de koppen van de planten. Alle ventilatoren op maximale stand. Koelvermogen LBK's 120 W/m². Raamstand 55%, verneveling aan. 26-07-2006, 15.00- 16.30 uur.

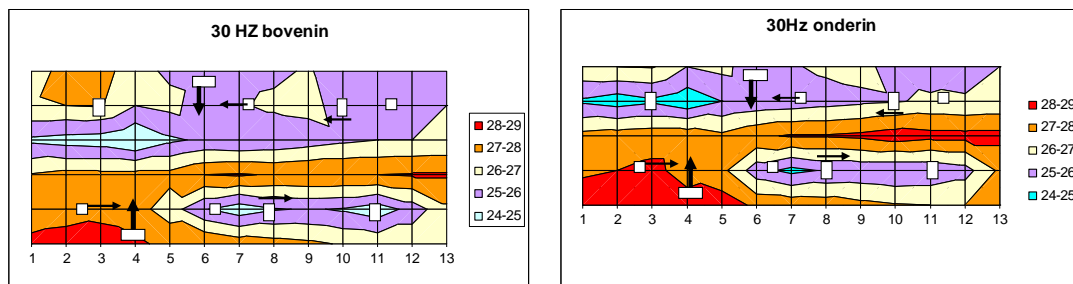
Duidelijk is dat luchtondersteuning in dezelfde richting als de uitstroomrichting van de LBK alleen een luchtstroming in het pad teweegbrengt waar de LBK is opgesteld zelfs wanneer er heel hard wordt geblazen. Daarom is als vervolgstap geëxperimenteerd met een hulpventilator die juist dwars op de uitstroomopening van de LBK blaast. In figuur 11 zijn 2 horizontaal werkende hulpventilatoren met een debiet van 5000 m³/h, ofwel 40 m³/m²/h boven het gewas zodanig gemonteerd dat een rondgaande luchtstroom voor de uitstroomopening van LBK's 1 en 4 ontstaat. Deze techniek stamt uit de koeltechniek in bewaarruimtes. Uitgangspunt is dat er een continue rondgaande luchtstroom in de ruimte wordt onderhouden waarin naar behoefte op één of meerdere punten warmte of koude wordt geïnjecteerd.



Figuur 11: Plattegrond kas: Temperatuur en luchtsnelheid in m/sec in het pad bij de koppen van de planten. Luchtstroom dwars op de LBK's 1 en 3. Meting 25-08-2006, 14.30-17.00 uur. Straling 50-300W, raamstand 20%. Bronpomp 30Hz, LBK en hulpventilatoren op 30Hz. Verneveling uit. *Getallen in Groen: ventilatoren en LBK op 50 Hz.*

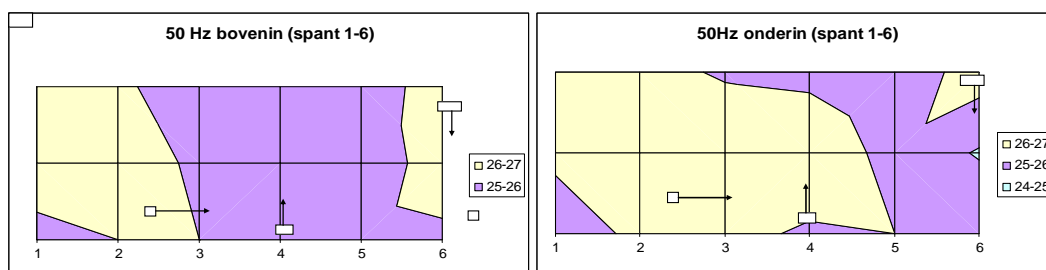


Figuur 12: Plattegrond kas: Temperatuur en luchtsnelheid in m/sec in het pad 1,0 m onder de koppen van de planten. Luchtstroom dwars op de LBK's 1 en 3. Meting 25-08-2006, 14.30-17.00 uur. Straling 50-300W, raamstand 20%. Bronpomp 30Hz, LBK en hulpventilatoren op 30Hz. Verneveling uit. *Getallen in Groen : ventilatoren en LBK op 50 Hz.*



Figuur 13: Horizontaal temperatuurprofiel op twee hoogten. Links op plantkophoogte, rechts op 1m onder de kop. De ventilatoren draaiden op 30Hz vermogen.

Het verhogen van het toerental van zowel de LBK als de hulpventilator naar 50 Hz verbeterde het temperatuurprofiel nog aanzienlijk zoals blijkt uit figuur 14 waarin alleen voor het gebied waarin de hulpventilatoren actief zijn de gerealiseerde temperaturen zijn weergegeven voor een situatie met 300 W/m² instraling.



Figuur 14: Horizontaal temperatuurprofiel op twee hoogten. Links op plantkophoogte, rechts op 1m onder de kop. De ventilatoren draaiden op 50Hz vermogen.

Uit deze metingen kan de conclusie worden getrokken dat de luchtstroom dwars op de LBK's een positief effect heeft op de horizontale temperatuurverdeling bovenin het gewas mits het toerental hoog genoeg is. Ook halverwege de plant is het positieve effect goed zichtbaar. Door de regeling was het helaas niet mogelijk om de LBK's een ander toerental te geven dan de hulpventilatoren, maar de verwachting is dat een combinatie van hoog toerental voor de hulpventilator met een laag toerental voor de LBK nog beter was geweest. Een deel van de uitgeblazen lucht van de LBK werd niet afgebogen door de hulpventilator door de onevenredig hoge stuwdruk van de LBK ventilator. Het injecteren van een koude luchtstroom in een permanente rondgaande luchtstroom is overigens de meest gebruikte techniek in de koudetechniek, maar nog niet toegepast in kassen. Het stroomverbruik van deze optie is redelijk. De LBK ventilator kent een verbruik van 600 W bij 30Hz, terwijl de hulpventilator bij 30Hz 110 Watt verbruikt. Totaal 710 Watt op 250 m², dus 2,8 W/m². Bij 1000 draaiuren en een stroomprijs van € 0,08/ kWh komt dit neer op € 0,23/m².jaar. Zou de LBK zonder hulpventilator draaien, maar op 50Hz, dan is daarvoor 1200 W nodig, ofwel € 0,38/m².jaar.

Beide op 50Hz laten draaien kost 1420 W ofwel € 0,45/m².jaar.

5.3 Conclusie horizontale ventilatoren

Het is vrijwel onmogelijk om een egale verticale en horizontale temperatuurverdeling te krijgen bij gebruik van horizontaal blazende ventilatoren boven het gewas. Bedden die naast de uitblaasrichting van de ventilator liggen, bevinden zich in de luwte van de luchtbehandelingskasten. Als aan de luchtstroom ook nog koude of warmte wordt toegevoegd wordt de ongelijkheid nog groter. Het aanbrenge van een luchtslang aan de LBK met gaten die zijwaarts uitblazen lost het horizontale ongelijkheidsprobleem niet op. Bovendien neemt de koelcapaciteit sterk af, nemen de stroomkosten toe en ontstaat er extra lichtverlies. Door het aanbrenge van hulpventilatoren die dwars op de uitblaasrichting van de LBK een rondgaande luchtstroom tot stand brengen wordt het horizontale temperatuurprofiel beduidend beter, maar helaas wel met een relatief hoog stroomverbruik.

6. Verticale ventilatoren

6.1 Theoretische achtergrond

6.1.1 Situatie overdag

De ventilatie in een kas is normaal gebaseerd op de werking van een luchtraam. Daarmee wordt binnenlucht vervangen door buitenlucht door middel van een gecompliceerd samenspel tussen energietoevoer door de zon in de kas en tussen wind, raamopeningen aan de luwe zijde en aan de windzijde en interne stromingen. Op een zomerse dag worden daarbij ventilatievouden van 30 gehaald, hetgeen betekent dat de kaslucht per uur 30 keer verwisseld wordt, dus bij een kashoogte van 5m, $150 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$. Een dergelijke luchtverplaatsing met ventilatoren uitvoeren zou een enorm stroomverbruik vergen. De vraag is echter of een dergelijke verplaatsing noodzakelijk is. In principe brengt de zon de warmte netjes verdeeld in de kas, waardoor een horizontaal gerichte luchtverplaatsing niet noodzakelijk is om temperatuurverschillen te vereffenen. Weliswaar bestaan er schaduwplekken in de kas, maar daar krijgt het gewas ook minder PAR licht te verwerken waardoor een eventuele lagere luchttemperatuur alleen maar gunstiger is. De belangrijkste reden voor luchtbeweging is de afvoer van warmte vanaf de plant. Een gebrek aan luchtbeweging kan leiden tot een tijdelijk overmatige verdamping die uiteindelijk zal leiden tot sluiting van de huidmondjes met als gevolg in het gunstigste geval verminderde fotosynthese en in het ongunstigste geval oververhitting en verbranding. Dat fenomeen wordt veroorzaakt door de wet van behoud van energie, ook wel de energiebalans genoemd. Die wet zegt ons dat alle energie die op een blad terechtkomt, in dit geval de instraling plus de omgevende kaslucht temperatuur zolang die warmer is dan het blad, daar ook weer van moet verdwijnen. Bij een blad zijn daar twee belangrijke wegen voor: verdamping en temperatuurverschil met de omringende kaslucht. Voor een goed functionerend gewas met geopende huidmondjes bedraagt de warmteafvoer via verdamping al gauw 70% van wat er aan energie op het blad terechtkomt. Valt die verdamping enigszins terug, dan zal het blad warmer worden dan de kaslucht en via convectie warmte afgeven. Maar convectie functioneert alleen goed wanneer er ook luchtbeweging is. Met andere woorden bij weinig luchtbeweging loopt de bladtemperatuur sterker op dan bij veel luchtbeweging. Daarbij speelt het bladoppervlak ook een cruciale rol, hoe kleiner het bladoppervlak, hoeveel minder warmte er kan worden overgedragen. Dus een jong gewas heeft meer moeite om de zonnwarmte af te voeren. Een deel van de zonnestraling wordt door het blad gereflecteerd. Een jong blad reflecteert meer dan een oud blad. Dat compenseert deels het gebrek aan verdamping.

Gesloten kassen zonder luchtramen kennen het probleem dat er bovenin het gewas, daar waar de grootste hoeveelheid energie wordt geabsorbeerd door het gewas, te weinig luchtbeweging kan ontstaan wanneer de luchtslangen onderin het gewas zijn gelegd. Daarbij wordt vaak gedacht dat dit veroorzaakt wordt door een gebrek aan koude bovenin, maar een gebrek aan luchtbeweging ligt meer voor de hand, omdat die juist in het bovenste deel van het gewas kleiner is dan wat met luchtramen wordt bereikt. Om die reden kunnen luchtbehandelingskasten beter bovenin de kas gemonteerd zijn en liefst op zoveel mogelijk punten uitblazend.

In het geval er geen luchtbehandelingskasten zijn en er gewoon gelucht wordt, is de vraag of ventilatoren nut hebben. De horizontale verplaatsing van lucht boven het gewas is overbodig omdat het tussen het gewas geen warmte afvoert. Verticale ventilatoren kunnen mogelijk wel zin hebben. In de eerste plaats om verticale temperatuurverschillen te verkleinen en daarmee bijvoorbeeld de afrijpingsnelheid van vruchten te bevorderen. In de situatie dat de ramen minder ver open staan en er toch veel instraling is kan een verticale luchtstroom ook zin hebben om de warmteafvoer vanaf het blad goed te houden. Dat is het geval wanneer de strategie gevolgd wordt om met verneveling de warmteinhoud van de kaslucht zo groot te maken dat de ramen maar een klein beetje open hoeven om genoeg warmte af te voeren. Daarmee wordt dan bereikt dat er meer CO_2 in de kas blijft. Het zal duidelijk zijn dat de luchtbeweging in het gewas dan kan afnemen tot een kritische grens door het kleinere ventilatievoud. Het voordeel van de combinatie luchtraam, verneveling, verticale luchtbeweging is dat de warmte en het vocht lokaal worden afgevoerd en de horizontale verschillen daarom klein zullen zijn. Bovendien hoeft lucht maar over kleine afstanden verplaatst te worden waardoor het stroomverbruik laag kan blijven. De verticaal werkende Aircobreeze ventilator verplaatst $8000 \text{ m}^3/\text{h}$. Bij een kashoogte van 5m en een werkingsgebied van 250 m^2 betekent dat een verplaatsing van $32 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ en een ventilatievoud van 6,4. Staan de ramen ver genoeg open, dan

zal dit ventilatievoud al gauw overtroffen worden en heeft aanzetten van de ventilatoren alleen nut voor het opheffen van verticale temperatuurverschillen.

Bij een lagere instraling is de kans dat er grote verticale temperatuurverschillen bestaan minder groot, maar kan er wel een laag stilstaande lucht onderin het gewas ontstaan. Om dit te doorbreken is een kleine luchtsnelheid van 0,05 m/sec voldoende. Als die laag dan ongeveer 1,5 meter dik is, is een luchtverplaatsing van 4,5 m³/m²/h nodig.

6.1.2 Situatie in de nacht

Er kunnen zich 4 situaties voordoen waarbij een verticale luchtbeweging gewenst kan zijn:

1. In de avond, om de kas snel af te koelen.
2. Gedurende de sluitingsperiode van een scherm om condens te voorkomen.
3. Gedurende de sluitingsperiode van het scherm om vocht af te voeren.
4. Bij het opentrekken van het scherm om het onderste deel van het gewas snel op te warmen.
5. Bij de toepassing van belichting onder een scherm zowel warmte als vocht verplaatsen.

Ad 1. De afkoeling in de avond kan worden bevorderd door de warme kaslucht snel af te luchten. Om daarbij ook het gewas snel af te koelen kan de lucht het beste worden gecirculeerd, zodat de koude buitenlucht goed door het gewas verdeeld wordt en de extra luchtbeweging bovendien zorgt voor een snellere uitwisseling tussen plant en kaslucht. Voor een optimaal effect moet de ventilator onder een luchtraam zijn geplaatst. Wanneer de ventilator zowel van onderen als van boven lucht aanzuigt kan ook bij windstil snel koude buitenlucht naar binnen worden gehaald. Om dit proces snel te laten verlopen en daarmee maximaal profijt te hebben van de temperatuurverlaging is een systeem met veel luchtverplaatsing gewenst, ongeveer een verversing per minuut. Dat komt neer op 60 m³/m²/h.

Ad 2. Condensvorming kan worden voorkomen door de temperatuurverschillen in het gewas zo klein mogelijk te maken. Daarvoor is het noodzakelijk om warmteophoping onder het scherm te voorkomen. Dat kan door een verticale circulatie tot stand te brengen. De hoeveelheid lucht die daarbij verplaatst moet worden is afhankelijk van de dichtheid en de isolatiewaarde van het scherm. Hoe beter de isolatie, hoe minder warmte er onderin de kas wordt toegevoerd en hoe kleiner het volume te verplaatsen lucht. Daarbij moet wel worden aangetekend dat een dichter scherm ook een hogere luchtvochtigheid oplevert waardoor al bij kleinere temperatuurverschillen condens op zal treden. Dat betekent dat er op een andere wijze vocht afgevoerd zal moeten worden (zie ad 3). Bij een heel open scherm zal er veel warme lucht en daarmee ook vocht door het scherm verdwijnen. Tegelijkertijd zullen de verticale temperatuurverschillen ook groter zijn omdat er meer warmte moet worden toegevoerd. In dat geval zal de verticale luchtverplaatsing groter moeten zijn om die verschillen weer op te heffen. De ventilator moet de natuurlijke, opwaarts gerichte, luchtstroom versterken om daarmee een neerwaartse beweging in gang te zetten en te onderhouden. De ventilator creëert daarmee onderin de kas een onderdruk die de warme lucht van boven naar beneden zuigt. Naarmate de verticale temperatuurverschillen groter zijn zal dit meer stuwkracht vergen. Daarvoor moet een luchtbeweging in stand worden gehouden met een snelheid die net iets groter is dan de opgaande beweging van warme lucht.

Ad 3. De kans op condensvorming op het gewas wordt verkleind door vocht af te voeren via een kier in het scherm. Helaas is de regeling van de schermkier onnauwkeurig, waardoor al gauw te veel of te weinig wordt afgevoerd en de kier veroorzaakt op zichzelf ook locale temperatuurverschillen. Een verticale ventilator kan een rol spelen bij de gecontroleerde afvoer van vocht. Het geteste type ventilator zuigt zowel van boven als van onderen lucht aan. Door boven de ventilator een opening in het schermdoek te maken kan de koude, droge lucht die zich boven het schermdoek bevindt naar beneden worden gezogen. Deze lucht zal de RV verlagen en dezelfde hoeveelheid vochtige lucht door het schermdoek afvoeren. Omdat de ventilator zowel van onder als van boven lucht aanvoert zal de koude lucht direct gemengd en opgewarmd worden en daarna over het gewas verspreid. Kouval kan daarmee worden voorkomen. Tegelijkertijd kan door een goede beheersing van de kiergrootte de hoeveelheid vochtafvoer nauwkeurig worden geregeld en daarmee energie worden bespaard. Omdat vocht hiermee goed gecontroleerd kan worden afgevoerd levert de toepassing van een scherm met een extra hoge isolatiewaarde voordelen op. In de eerste plaats is het een voordeel dat daardoor de kasdektemperatuur lager zal worden, zodat er meer condensatie zal plaatsvinden en de ramen langer gesloten kunnen blijven. In de tweede plaats is er minder warmtetoevoer nodig

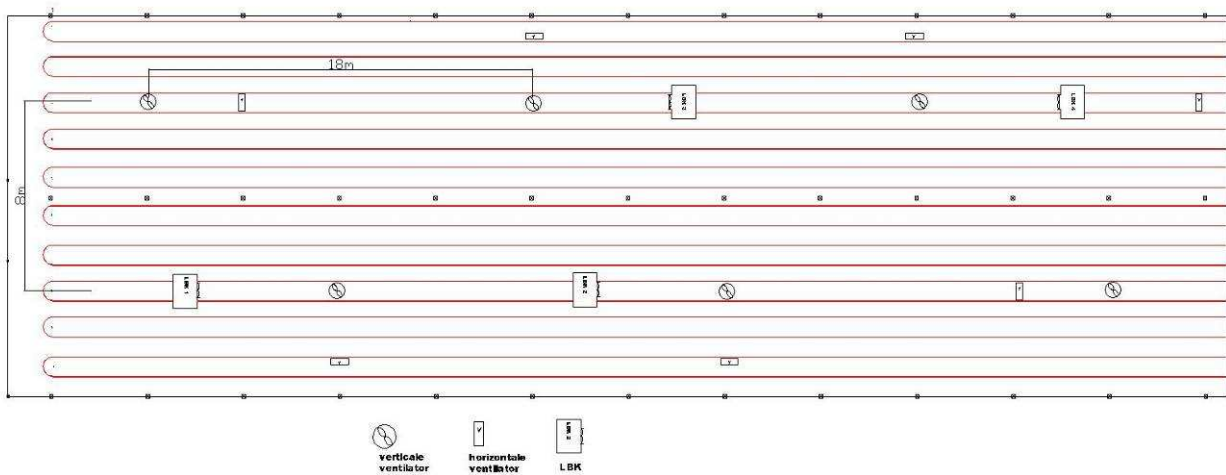
waardoor er minder water verdampt en de verticale temperatuurverschillen nog kleiner zijn. Daarmee is de weg geopend naar forse energiebesparing door betere isolatie. Voorwaarde is wel dat de hoeveelheid droge lucht die naar beneden kan worden gehaald groot genoeg is en ook te variëren.

Ad 4. De gevaarlijkste periode voor condensvorming is wanneer het schermdoek wordt opengetrokken. De kasttemperatuur daalt daarbij snel waardoor de RV stijgt. Wanneer de zon schijnt warmt het gewas bovenin snel op terwijl de temperatuur onderin het gewas achterblijft. De combinatie van hogere RV en lage temperatuur veroorzaakt condens. De standaard methode om dit probleem te voorkomen is ruim van te voren extra warmte onderin het gewas te brengen en het scherm in stappen te openen. Dat kost echter onnodig energie. Door het in stand houden van een verticale luchtbeweging wordt tijdens het gesloten zijn van het scherm de warme lucht omlaaggestuwd. Daardoor zullen alle plantonderdelen een gelijke temperatuur hebben, zeker zolang ze niet actief verdampen door instraling. Als het scherm wordt geopend starten alle plantonderdelen dus met een gelijke temperatuur. Daarna zorgt de verticale luchtbeweging voor een zo snel mogelijk transport van de warme lucht naar beneden. Daarbij is het zelfs een voordeel wanneer het scherm pas geopend wordt wanneer de zon voldoende sterkte heeft om de kas op temperatuur te houden. Daarmee wordt de schermperiode zelfs met enkele uren vergroot.

Ad 5. Bij gebruik van belichting onder een scherm bouwt zich een extra warme laag bovenin het gewas op. Daardoor wordt de transpiratie onnodig gestimuleerd waardoor de kans op het sluiten van de huidmondjes toeneemt en de fotosynthese niet optimaal zal zijn. Aan de andere kant zal door het openstaan van de huidmondjes extra vochtproductie bestaan die de vochtinhoud van de lucht opstuwt. Al bij relatief kleine verticale temperatuurverschillen in het gewas zal dan al condensatie ontstaan. In principe kunnen alle reeds genoemde voordelen van verticale luchtbeweging ook hier benut worden.

6.2 Metingen aan de effectiviteit van verticale ventilatoren

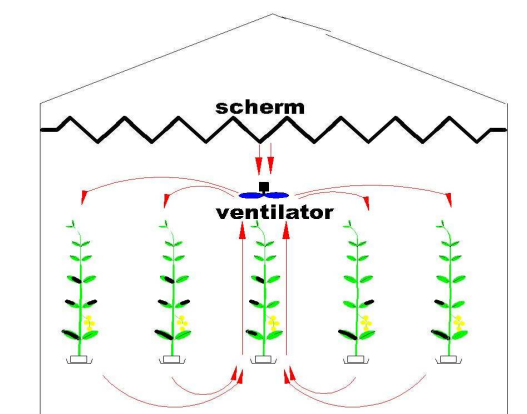
Op het bedrijf van Ruud van Schie zijn metingen verricht aan de temperatuurverschillen en lichtsnelheden binnen een gewas wanneer gebruik werd gemaakt van een verticale ventilator. Daarvoor was een kasafdeling van 1000 m² uitgerust met 6 verticale ventilatoren van het type “Aircobreeze”, opgehangen volgens de configuratie in fig. De goothoogte van deze kas was 4,5m. Er was een LS10 energiescherm aanwezig.



Figuur 15 : Plattegrond proefkas met ophangplan ventilatoren



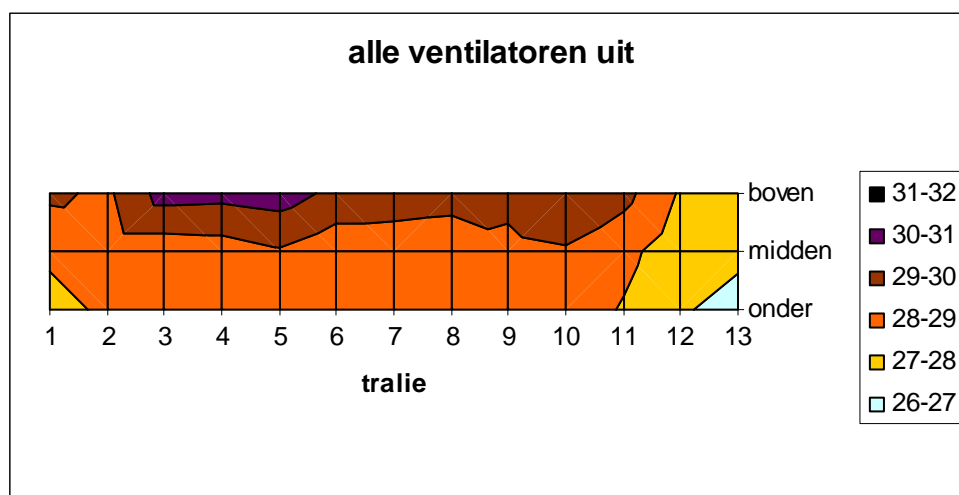
De Aircobreeze verplaatst 8000 m³ lucht per uur, ofwel in deze proef: 55 m³/m²/h. Het toerental van de waaier is 180 rpm. Het stroomverbruik is 160 W. Bij 3000 draaiuren kost dat € 0,23 aan stroom per m². Op de foto is te zien dat de lucht vanuit het pad omhoog wordt gezogen. Een deel wordt ook van bovenaf aangezogen. Daarna zal deze horizontaal verspreid worden volgens de onderstaande figuur.



Figuur 16: De Aircobreeze zuigt van onderen lucht aan en verspreid die boven het gewas.

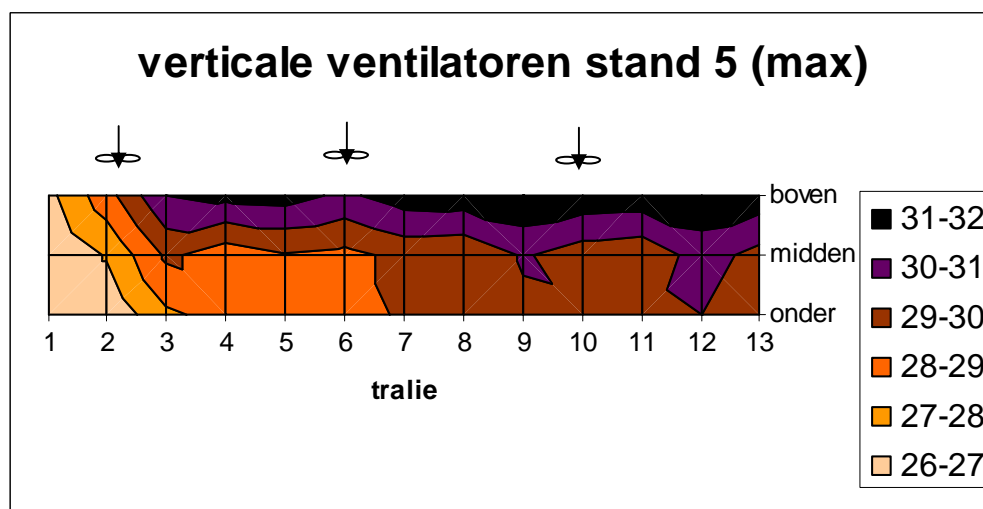
6.2.1 Situatie overdag

Met deze configuratie is voor een volgroeid tomatengewas overdag gemeten wat de effecten zijn.



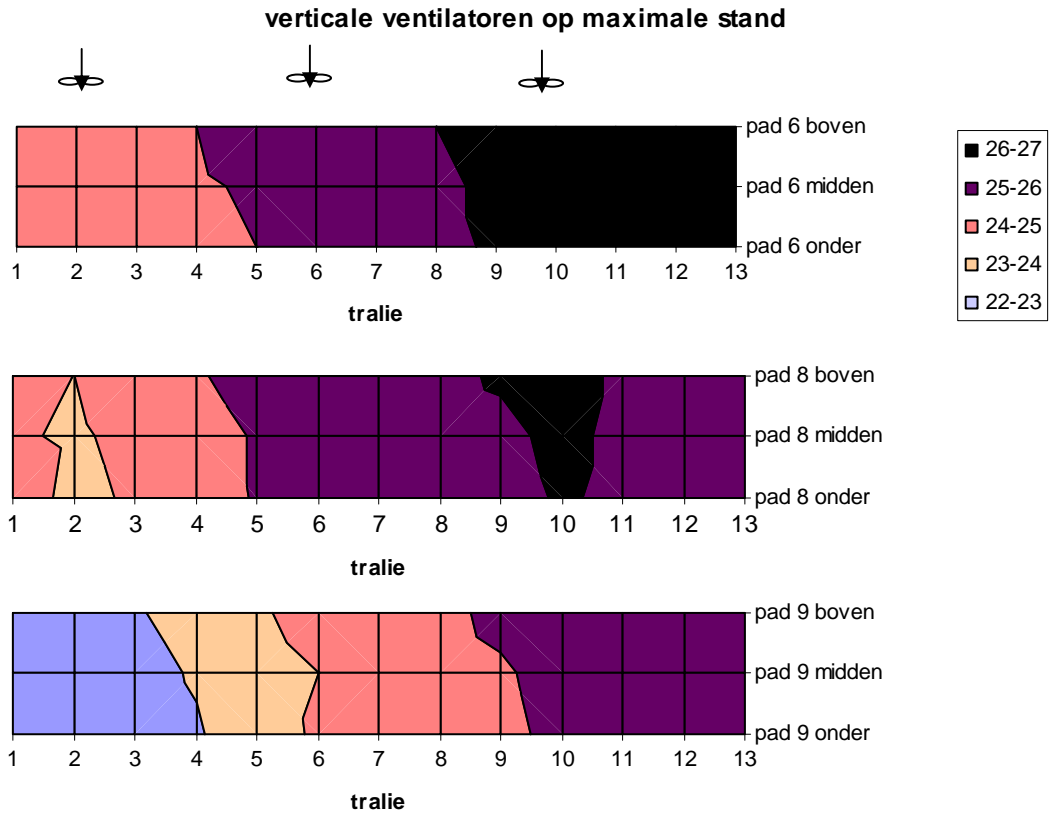
Figuur 17: Verticaal temperatuurprofiel (net boven, halverwege en onderin de plant) over een bedlengte van 13 tralies bij 600 W/m^2 instraling, waarbij alle ventilatoren uit stonden. Buitentemperatuur is 17°C .

Zonder ventilatoren bestaat er een duidelijke verticale temperatuur gelaagdheid met de hoogste temperaturen bovenin. Ook langs de gevels zijn er lagere temperaturen.



Figuur 18: Verticaal temperatuurprofiel (net boven, halverwege en onderin de plant) over een bedlengte van 13 tralies bij een instraling van 600 W/m^2 in het pad onder de Aircobreeze. Buitentemperatuur is 17°C .

Met ventilatoren is er bij deze instraling het effect dat de warme bovenlaag dieper in het gewas doordringt. Er wordt blijkbaar niet veel buitenlucht aangezogen omdat de luchttemperatuur bovenin de kas zelfs gestegen is.



Figuur 19: verticale temperatuurverdeling in 3 paden bij een instraling van 450 W/m². Buitentemperatuur 15 °C.

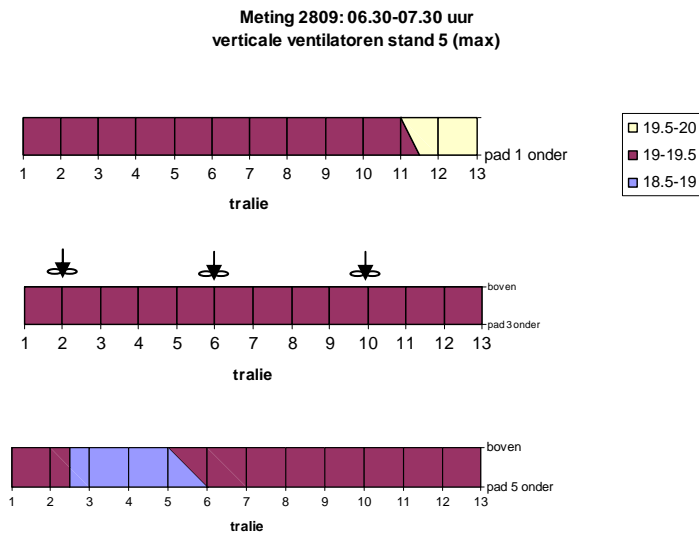
De ventilatoren hangen in één rij boven pad nummer 6. Om de effecten in andere paden te beoordelen is ook gemeten in het naastliggende pad nummer 8 en het nog iets verder gelegen pad nummer 9. Uit figuur 19 blijkt dat bij een lagere instraling het verticale temperatuurprofiel optimaal is, ook in de verderweg gelegen paden. Alleen de horizontale verdeling van links naar rechts (tralie 1 naar tralie 13) laat te wensen over. Dat komt deels door het feit dat de linkerzijde van de kas tegen een dichte wand van de schuur ligt en minder zonlicht ontvangt. Geconcludeerd kan worden dat de effecten van verticale luchtbeweging overdag bij een matige instraling positief zijn op het verticale temperatuurprofiel. Horizontale verschillen worden niet verkleind. Bij toenemende instraling nemen de effecten af en stijgen de gemiddelde temperaturen in het gewas.

6.2.2 Situatie in de nacht

In principe zijn er 2 situaties die van belang zijn. De nachtsituatie met een gesloten scherm omdat dan de verticale temperatuurverschillen het grootst zijn en ook de kans op condens door een hoge RV groot is. Daarnaast is de kans op verticale temperatuurverschillen en condens ook groot op het moment dat het scherm opengetrokken wordt. In deze meetsituaties was alle warmte afkomstig van laag gelegen verwarmingsbuizen.

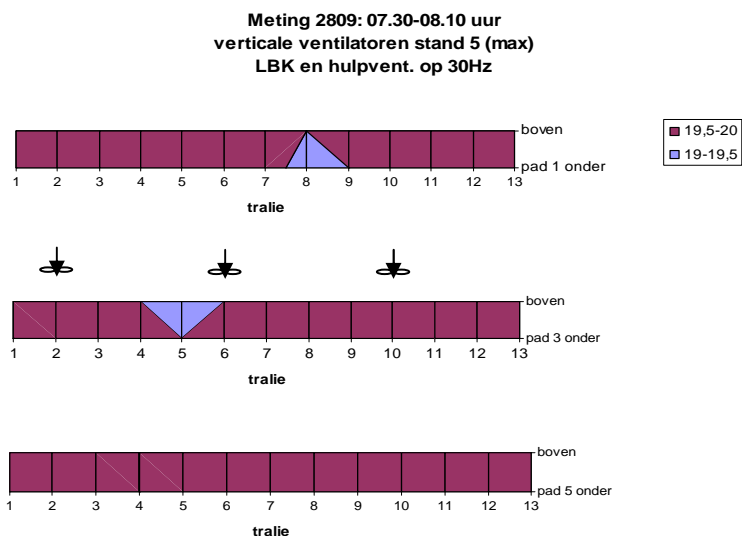
Scherm opentrekken

Meting 1: Voor zonsopgang zijn de verticale Aircobreeze ventilatoren op de maximale stand (5) gezet en zijn de luchtbehandelingskasten (LBK's) en de hulpventilatoren uitgezet. De resultaten waren positief, zowel horizontaal als verticaal waren de luchttemperaturen gemeten aan de onderzijde van het gewas en bij de koppen minimaal.



Figuur 20: Verticaal temperatuurprofiel bij tomaat gemeten in 3 paden bij zonsopgang 10 minuten na het openen van een gesloten schermdoek en de Aircobreeze op volle snelheid.

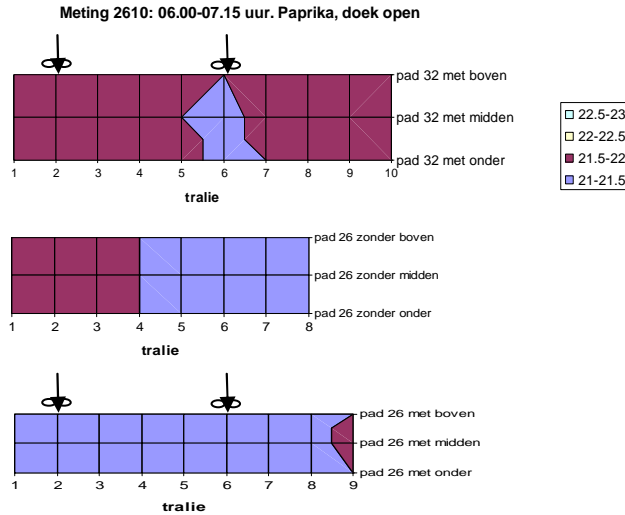
Meting 2: Tijdens zonsopgang zijn de LBK's en de hulpventilatoren op 30Hz aangezet naast de Aircobreeze ventilatoren. Er was geen koelvraag. Ook nu was de temperatuurverdeling goed.



Figuur 21: Verticaal temperatuurprofiel bij tomaat gemeten in 3 paden bij zonsopgang 10 minuten na het openen van het schermdoek, Aircobreeze op volle toeren, LBK's en horizontale ventilatoren op lage toeren.

Algemeen kan worden geconcludeerd dat zowel de horizontale als verticale temperatuurverschillen bij tomaat in deze situatie verwaarloosbaar klein zijn.

Ook bij paprika is gemeten wat de Aircobreeze voor effect had. In eerste instantie is gemeten bij een situatie met geopend doek.



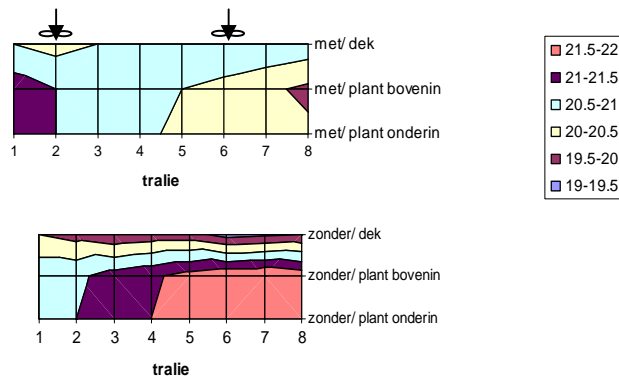
Figuur 22: Verticaal temperatuurprofiel op 3 hoogten (boven= kop plant) bij Paprika in de ochtend met juist geopend doek, gemeten in twee paden onder de Aircobreeze die wel (met) of niet (zonder) draaide.

De planten waren 2,2m hoog. De conclusie is dat de verticale temperatuurverschillen bij een geopend doek erg klein zijn. Er lijkt een kleine horizontale vereffening plaats te vinden door de Aircobreeze.

Geopend scherm

Om de effecten van het gebruik van een ventilator te kunnen inschatten bij geopend scherm zijn in een situatie waarin er verwarmd moest worden direct na elkaar metingen verricht met en zonder Aircobreeze.

Meting 0811: 07.30-08.20 uur. Paprika, doek open
verticale ventilatoren stand 5 (max), buisrail 55 graden



Figuur 23: Verticaal temperatuurprofiel bij paprika bij open schermdoek met en zonder Aircobreeze.

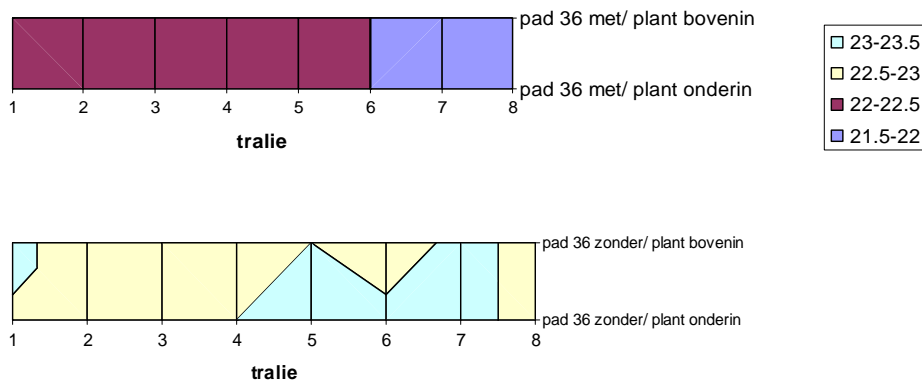
Hier is duidelijk te zien dat de warmte onderin het gewas blijft hangen door de laagliggende verwarming en de afkoeling bovenin. Het gebruik van de ventilator verbetert het profiel sterk. Gevreesd moet wel worden dat daarmee

meer warmte onder het kasdek terechtkomt waardoor de energieverliezen toenemen. Het is daarom in deze situatie van groot belang om de meetbox waarmee de verwarming wordt aangestuurd voldoende laag tussen het gewas te hangen.

Gesloten scherm

Vervolgens dezelfde situatie maar nu met gesloten schermdoek.

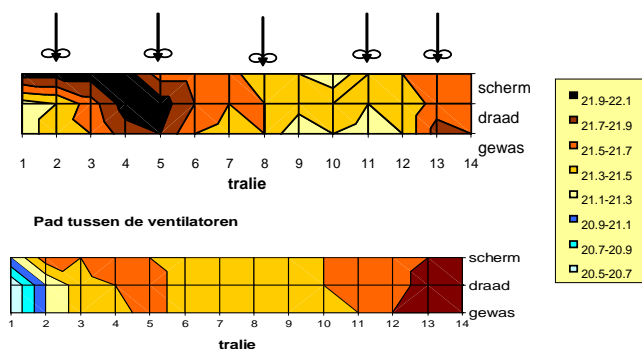
**Meting 0811: 06.00-07.15 uur. Paprika, doek dicht
verticale ventilatoren stand 5 (max), buisrail 45-55 graden**



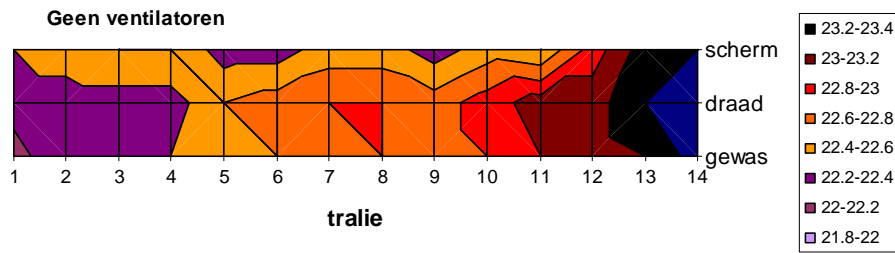
Figuur 24: Verticaal temperatuurprofiel bij paprika bij gesloten schermdoek met en zonder Aircobreeze.

De verticale temperatuurverdeling bij gesloten doek verbetert enigszins door gebruik van de ventilatoren. Wat echter meer opvalt is de totale verlaging van de temperatuur tussen het gewas. De plafondtemperatuur tegen het doek is daardoor 0,5 °C lager waardoor de warmteverliezen naar boven ook minder zijn. De meetbox waarmee de verwarming wordt aangestuurd hing tussen het gewas bij tralie 3 op 1,5 m hoogte.

Dezelfde meting is ook uitgevoerd in een nieuwe kas met 5,0 m goothoogte en een dubbel scherm. In dit geval stonden er jonge paprika planten van 1,0 m hoog. De Aircobreeze ventilatoren hingen in een vierkantsverband met een onderlinge afstand van 15x16m. In de situatie dat beide schermen volledig gesloten waren en er met een buis van 50 °C werd gestookt is gekeken naar een situatie met en zonder ventilatoren.



Figuur 25: Verticale temperatuurprofielen in een pad onder de Aircobreeze en een pad tussen twee rijen ventilatoren in bij Paprika met twee gesloten schermdoeken en gebruik van Aircobreeze. Buistemperatuur= 50 °C.



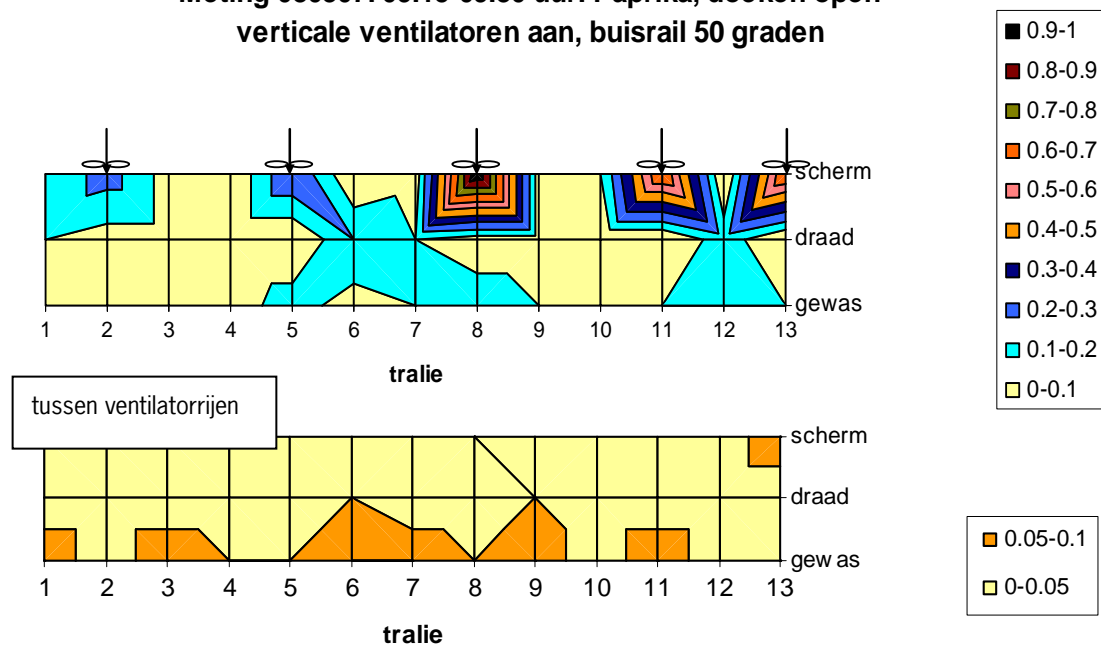
Figuur 26: Verticaal temperatuurprofiel bij Paprika met twee gesloten schermdoeken zonder gebruik van Aircobreeze. Buistemperatuur= 50 °C.

Ook hier is het beeld dat de temperaturen in het gewas dalen bij gebruik van de Aircobreeze en dat het verticale temperatuurprofiel prima is. In dit geval is de temperatuur onder het scherm zelfs 1,0 °C lager bij gebruik van de Aircobreeze.

Luchtbeweging

De hoeveelheid lucht die een Aircobreeze verplaatst wordt geschat op 8000 m³/uur. Bij een paprika gewas is ook gemeten hoeveel luchtbeweging er op verschillende plekken in de kas werd veroorzaakt.

**Meting 080307: 09.15-09.30 uur. Paprika, doeken open
verticale ventilatoren aan, buisrail 50 graden**



Figuur 27: Luchtsnelheden in m/sec bij gebruik van een Aircobreeze gemeten bij een 1,5 m hoog paprikagewas, op drie hoogten: Net onder het scherm, bij de kop van de plant (draad) en halverwege de plant (gewas).

Het is duidelijk waarneembaar dat de grootste luchtsnelheden zich onder de ventilatoren voordoen. Deels bestaat dat uit een verticale kolom van ongeveer een meter doorsnede waarlangs lucht van onderin de kas naar boven wordt gezogen. Daarnaast bestaat er boven het gewas een hogere snelheid in een straal van ongeveer 5 meter waarmee de lucht over het gewas wordt uitgeblazen. Toch konden daar geen afwijkingen in het gewas worden vastgesteld. De hogere luchtsnelheid boven het gewas kan als positief worden beschouwd in de situatie dat er veel instraling is. In de situatie dat er gestookt wordt met een relatief open schermdoek of zonder schermdoek, zal de hogere luchtsnelheid

boven het gewas tot extra energieverbruik kunnen leiden door de intensievere uitwisseling met het kasdek. In de rest van de kas heersen erg lage maar wel constant aanwezige luchtsnelheden die in het gewas meestal niet boven de 0.05 m/sec uitkomen. Die constante kleine luchtbeving is voldoende gebleken om vochtophoping te voorkomen. Condens is nooit in het gewas aangetroffen. De rookproeven hebben dit beeld bevestigd. Daarin was goed waarneembaar dat de rook als een verticale kolom onder de ventilator werd opgezogen en daarna horizontaal verspreid. Daarbij werd een egale vulling van de kas met rook bereikt. De afstand tussen de ventilatoren was dus niet te groot. Opvallend was wel dat een openstaande deur of een luchtraam het beeld heel snel verstoortte. Eigenlijk werkt dit systeem dus vooral goed bij een gesloten scherm en dichte gevels.



Figuur 28: Rook wordt onder de Aircobreeze aangezogen in een kolom (links) en vervolgens over een groot oppervlak egaal verspreid (rechts).

6.3 Effect op botrytis bij tomaat

Door het vaker sluiten van de schermen werd in de nacht geteeld bij een relatief hoge RV tussen 90-95%. Dat leverde bij tomaat geen extra aantasting van botrytis op ondanks het vrijwel volledig weglaten van de minimum buis. Wel werd geconstateerd dat er vooral stengelbotrytis optrad als gevolg van slecht opdrogende wonden. Dat wijst er op dat de minimum buis in dat opzicht wel gemist werd. Het inblazen van droge buitenlucht of het vergroten van de luchtbeving rondom de wonden kan mogelijk dit probleem oplossen.

6.4 Conclusie verticale ventilatoren

De Aircobreeze is in staat om met een relatief laag stromverbruik van 1 W/m² binnen het gewas een egale luchtbeving te veroorzaken van 5 cm/sec over een gebied van ongeveer 250 m². Dat was voldoende om vochtophoping en verticale temperatuurverschillen te voorkomen. Boven het gewas heerst een grotere luchtsnelheid van ongeveer 10 cm/sec. Dat werkt gunstig in het geval van hoge instralingen. Overtollige warmte wordt dan extra snel afgevoerd. Deze hogere luchtsnelheid kan wel ongunstig zijn voor het energieverbruik in de situatie dat er gestookt wordt zonder scherm of met een relatief open scherm. Omdat de Aircobreeze de gemiddelde luchttemperatuur omlaag brengt kan dit probleem worden voorkomen door de meetbox waarmee de verwarming wordt aangestuurd relatief laag in het gewas te hangen. Bij een gesloten scherm worden de verticale temperatuurverschillen zowel bij paprika als bij tomaat minder dan 1 graad. De temperatuur onder het schermdoek daalt met ongeveer 1 graad. De Aircobreeze is daarmee een uitstekend instrument om met één of twee volledig gesloten energieschermen paprika of tomaat te telen, zelfs bij een relatief hoge vochtproductie in de nacht zoals bij het proefbedrijf het geval was omdat in de grond werd geteeld. De te behalen energiebesparing is daarmee direct afhankelijk van de inzet van energieschermen. Ook in de situatie dat belichting wordt gebruikt zal de Aircobreeze het verticale temperatuurprofiel sterk verbeteren. Omdat er dan relatief veel warmte het gewas in wordt gestuurd, moet

wel worden gewaakt voor een te hoge etmaal temperatuursom voor het gewas. Omdat de de Aircobreeze de horizontale temperatuurverschillen niet verbetert en de RV relatief hoog blijft kan overwogen worden om dit systeem verder uit te breiden met een luchtdistributiesysteem met slangen onderin het gewas waarmee voorverwarmde buitenlucht de kas in wordt gebracht. Omdat de schermen dan volledig gesloten kunnen blijven en ook geen functie meer hebben in de afvoer van vocht kunnen ze een nog hogere isolatiewaarde krijgen waardoor energiebesparingen tot 80% haalbaar worden door alleen te investeren in goed schermen, Aircobreeze ventilatoren en een buitenlucht distributie. Een groot deel van de buisverwarming kan dan vervallen waardoor extra investeringsruimte ontstaat. Overigens kan de aanschaf van Aircobreeze ventilatoren ook al bekostigd worden uit een besparing op buisverwarming omdat er dankzij de ventilatoren meer geschermd kan worden. De stroomkosten worden begroot op € 0,23 per m²/jaar.