



Dr. ir. A.H.C. van Paassen**



ing. R.H.C. Reudink**

ir. N.J. van de Braak*

Verdampingskoeling voor tuinbouwkassen

Evaporative cooling for greenhouses

Inleiding

Het streven naar energiebesparing leidde in de tachtiger jaren tot onderzoek naar de mogelijkheden om te komen tot een nieuw ontwerp voor tuinbouwkassen. De nieuw te ontwerpen kas zou een lage energiebehoefte moeten paren aan een hoge lichtdoorlatendheid. Vanzelfsprekend zou daarnaast de produktie in zo'n kas kwantitatief en kwalitatief op peil moeten blijven, en zo mogelijk zelfs moeten toenemen.

De oplossingen voor het gestelde probleem werden vooral gezocht op het gebied van vermindering van het gebruik van constructieve delen en de toepassing van kunststoffen (van Paassen e.a., 1987 en de Noord, 1987). Het weglaten van luchtingsramen in het kasdek zou een aanmerkelijke vereenvoudiging van de constructie betekenen en goede perspectieven openen om, met alternatieve dakbedekkingsmaterialen een hoge lichtdoorlatendheid en daardoor een hogere opbrengst te bereiken.

In een dergelijke kas is mechanische ventilatie noodzakelijk teneinde de temperatuur in de kas, gedurende het zomerseizoen, niet onacceptabel hoog te laten worden.

In 1988 werd door de Faculteit Werktuigbouwkunde van de Technische Universiteit te Delft (TUD), een ventilator-eenheid ontworpen voor kassen zonder luchtramen.

De resultaten van de testen op laboratoriumschaal, uitgevoerd door de TUD, waren zodanig bemoedigend dat werd besloten het systeem bij het DLO-Instituut voor Mechanisatie Arbeid en Gebouwen (IMAG-DLO) te Wageningen op kleine schaal, onder omstandigheden die dicht bij de praktijk staan, te testen.

In dit artikel komen aan de orde:

- de gegevens en berekeningsmethode ten behoeve van het ontwerp van het ventilatiesysteem;
- het ontwerp en de realisatie;
- de resultaten van de praktijktest.

Eerst wordt een korte beschrijving van het ventilatiesysteem gegeven, daarna volgt een bespreking van de uitgevoerde praktijktest en de resultaten daarvan.

Ventilatiesysteem

Ontwerpgegevens

In de traditionele Nederlandse kassen worden de luchtingsramen gebruikt om warmte en vocht in de vorm van waterdamp af te voeren, op momenten dat

de luchttemperatuur of de luchtvochtigheid in de kas te hoog oplopen. Deze afvoer vindt plaats door warme vochtige kaslucht te vervangen door koelere en drogere buitenlucht. De hoeveelheid lucht die moet worden vervangen hangt af van de gewenste (of maximale) temperatuur en vochtigheid van de kaslucht, de heersende buitenluchtcondities en de in de kas gebrachte hoeveelheid warmte (afkomstig van instraling van de zon en/of van het verwarmingssysteem). Bij de berekening van het hier besproken ventilatiesysteem is de TUD uitgegaan van de volgende ontwerpgegevens:

Globale straling	800 W/m ²
Buitentemperatuur	28 °C
Maximale kasluchttemperatuur	30 °C
RV buiten	59%
Maximale RV kaslucht	90%

De gekozen combinatie van buitenomstandigheden vraagt om enige toelichting. Het door de TUD ontworpen ventilatiesysteem maakt gebruik van bevochtigingskoeling. Hogere buitentemperaturen en stralingsintensiteiten komen zeker met enige regelmaat voor. In het algemeen is de relatieve vochtigheid buiten dan echter lager. Dit is voor een systeem met bevochtigingskoeling gunstig, in die zin dat de lucht door meer bevochtiging tot een lagere temperatuur kan worden afgekoeld. Volgens Reudink (1989) is de kans dat de weersituatie ongunstiger uitvalt dan hierbo-

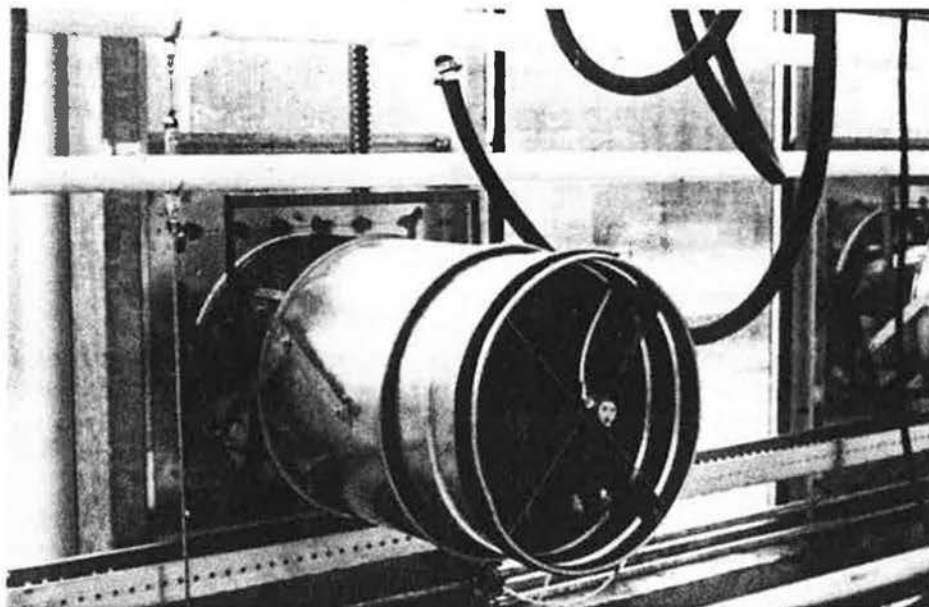
Samenvatting

Een ventilatiesysteem met verdampingskoeling voor kassen zonder luchtingsramen is ontworpen. Dit systeem is gedurende twee teeltseizoenen beproefd. Het bleek mogelijk het kasklimaat in de zomer binnen acceptabele grenzen te beheersen. Noch bij de teelt van paprika, noch bij die van tomaat traden problemen op met het gewas. De technische uitvoering van het systeem behoeft nog verbetering. Bij invoering in de praktijk zullen, door schaalvergroting, het geluidsniveau en het ruimtebeslag mogelijk problemen vormen.

Summary

A mechanical ventilation system integrated with evaporative cooling is designed for greenhouses without vents. This system has been tested during two growing seasons. The greenhouse climate during summer could be controlled within acceptable levels by means of the system. No significant problems with the crop were encountered while growing green peppers or tomatoes. Some technical details still need improvement. Introduction in practice may be hampered by problems concerning noise level and occupation of greenhouse space due to upscaling.

* Dienst voor Landbouwkundig Onderzoek; Instituut voor Mechanisatie, Arbeid en Gebouwen (IMAG-DLO), Wageningen
** Technische Universiteit Delft, (TUD Koudetechniek/Klimaatregeling), Delft.



Ventilatie-unit met verdampingskoeling.

ven is aangegeven, 1 à 2 dagen per jaar.

Voorts is aangenomen dat 80% van het zonlicht door het kasdek wordt doorge laten en dat circa 2/3 van de binnenkomende stralingsenergie wordt gebruikt voor verdamping door het gewas. Het ventilatiesysteem moet onder ontwerpcondities dan nog 213 W/m² afvoeren. Door de van buiten aangevoerde ventilatielucht adiabatisch te bevochtigen, kan de temperatuur hiervan met 5 °C worden terug gebracht van 28 °C tot 23 °C. In de kas gekomen, stijgt deze lucht vervolgens 7 °C in temperatuur tot 30 °C. Om hierbij 213 W/m² op te nemen is een ventilatiedebiet van 92 m³/h per m² grondoppervlak nodig. De vochtigheid in de kas wordt bepaald door de vochttoevoer van de bevochtiger en de hoeveelheid verdamping van het gewas (respectievelijk 0,002 en 0,0058 kg per kg kaslucht). Hierdoor kan de relatieve vochtigheid in de kas oplopen tot meer dan 80%.

Uitvoering

Het ventilatiesysteem bestaat uit een serie eenheden die op regelmatige afstand in de gevel zijn geplaatst. Elke eenheid is voorzien van een axiale ventilator met daarachter een persluchtwatervernevelaar voor het adiabatisch bevochtigen van de lucht. De lucht wordt in de kas geblazen via een geperforeerde slang van polyetheenfolie, zoals op de foto's en figuur 1 is te zien. Bij het ontwerp is uitgegaan van een kas van 100 x 100 m. De kas is van het conventionele Venlo-type met een middenpad en een kapbreedte van 3,2 m. Zoals in figuur 4 is aangegeven worden

er twee ventilatoreenheden per kap toegepast. Hierdoor behandelt elke ventilator een strook ter breedte van 1,6 m. Aan beide kopgevels zijn ventilatoreenheden geplaatst, zodat één ventilatoreenheid lucht moet toevoeren over een lengte van 50 m. Omdat 92 m³/h lucht per m² grondoppervlak nodig is voor de afvoer van warmte moet elke eenheid tenminste 1,6x50x92 = 7360 m³/h lucht leveren.

De ventilatie-eenheid is voorzien van een schuif waarmee de verhouding buitenlucht/kaslucht kan worden gereguleerd. Een andere regelmogelijkheid is de keuze uit twee toerentallen. Het vereiste maximum toerental is 3000 toeren per minuut, hetgeen zonder extra maatregelen geluidsproblemen zal opleveren.

Om de kosten en het energieverbruik zo laag mogelijk te houden is gekozen voor een axiaalventilator en folietoevoerslangen met een zo groot mogelijke diameter (450 mm).

Bevochtigingsrendement

De koelcapaciteit van de installatie hangt af van het bevochtigingsrendement:

$$\eta_{bv} = (\theta_b - \theta_s) / (\theta_b - \theta_{nb})$$

met: θ_b = buitentemperatuur °C

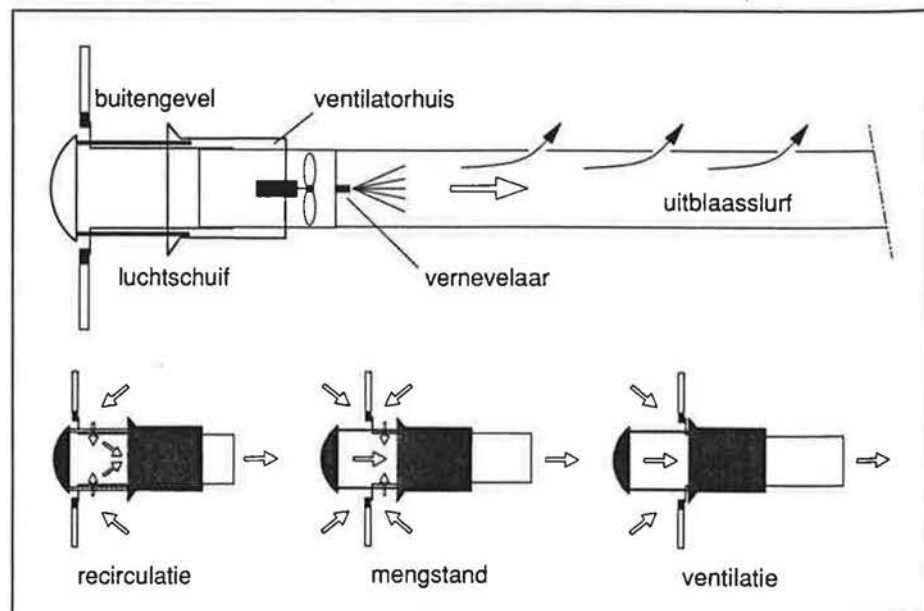
θ_s = temperatuur na bevochtiging °C

θ_{nb} = natte bol temperatuur van de buitenlucht °C

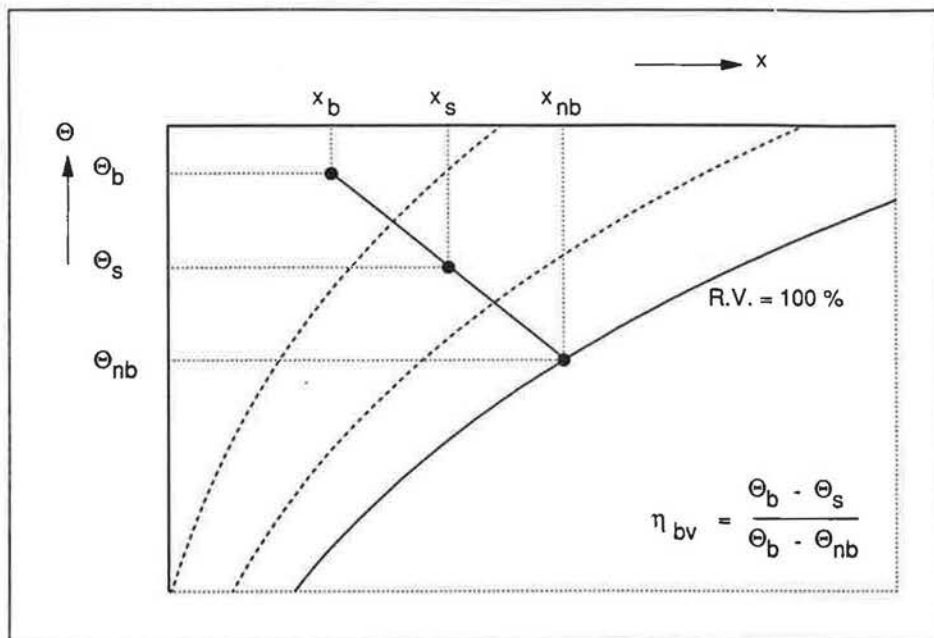
Door het injecteren van een zeer fijne waternevel in de ventilatielucht koelt deze zeer snel af, doordat voelbare warmte onttrokken wordt voor de verdamping. Direct na de vernevelzone in het ventilatiekanaal heeft de lucht een droge bol temperatuur θ_s , die lager is dan de oorspronkelijke temperatuur θ_b . Deze verlaging is natuurlijk groter naarmate de buitenlucht droger is, immers dan kan er meer worden verdampt. Theoretisch kan de ventilatielucht met behulp van bevochtigingskoeling niet verder worden afgekoeld dan de natte bol temperatuur θ_{nb} , zodat deze als referentiewaarde dient. In het Mollierdia gram voor vochtige lucht van figuur 2 is een en ander ter verduidelijking aangegeven. Uit deze figuur wordt ook duidelijk dat tevens geldt:

$$\eta_{bv} = (x_b - x_s) / (x_b - x_{nb})$$

met x = absolute vochtigheid in kg



Figuur 1. Schema uitvoering ventilatoreenheid.



Figuur 2. Bevochtigingsrendement.

waterdamp per kg droge lucht. Er bestaat een relatie tussen het bevochtigingsrendement en de mate waarin water moet worden verneveld in het kanaal. Deze relatie is bij de TU Delft onderzocht. Experimenten met een prototype van de ventilatoreenheid resulteerden in het volgende verband:

$$\eta_{bv} = 1 - \exp(-0,806 A / \Phi_{v,l})$$

waarin $\Phi_{v,l}$ het volumedebiet van de ventilator in m^3/s is en waarbij

$$A = \Phi_{m,w} / q_l \Phi_{v,l} (X_{nb} - X_b)$$

de verhouding is tussen massadebiet door de vernevelaar ($\Phi_{m,w}$) en de minimaal te verdampen hoeveelheid water bij volledige bevochtiging van de lucht. Met de gemeten Θ_{nb} en Θ_b zijn x_{nb} en x_b af te leiden. Expliciet schrijven van $\Phi_{m,w}$ levert:

$$\Phi_{m,w} = -1,24 q_l \Phi_{v,l}^2 (x_{nb} - x_b) \ln(1 - \eta_{bv})$$

Voor de ontwerpcondities geldt:

$$\begin{aligned} \Theta_b &= 28^\circ\text{C} \\ RV &= 59\% (x_b = 0,0140 \text{ kg/kg}) \\ \Theta_{nb} &= 21,9^\circ\text{C} \\ x_{nb} &= 0,0166 \text{ kg/kg} \\ \Phi_{v,l} &= 7360 \text{ m}^3/\text{h} = 2,044 \text{ m}^3/\text{s} \\ q_l &= 1,17 \text{ kg/m}^3 \\ \eta_{bv} &= 0,8 \end{aligned}$$

Hieruit volgt:

$$\Phi_{m,v} = 0,0254 \text{ kg/s (91,45 kg/h)}$$

Tevens geldt:

$$= x_b - \eta_{bv}(x_b - x_{nb}) = 0,0161 \text{ kg/kg.}$$

Per ventilatoreenheid wordt uit de in overmaat toegevoegde hoeveelheid de volgende hoeveelheid waterdamp opgenomen:

$$\begin{aligned} \Phi_{m,wd} &= q_l \Phi_{v,l} (x_s - x_b) \\ &= 1,17 \cdot 2,044 \cdot (0,0161 - 0,0140) \\ &= 0,005 \text{ kg/s (18 kg/h).} \end{aligned}$$

In de praktijk zal dit getal iets hoger kunnen zijn omdat de niet verdampte neveldruppeltjes tot ver in het kanaal worden meegesleurd en daar opnieuw de gelegenheid krijgen om te verdampen in de inmiddels opgewarmde lucht.

Doel en uitvoering van de praktijktest

Doel

De laboratoriumtests op het prototype van de ventilatoreenheid werden in 1988 door de TUD afgerond. De resultaten waren bemoedigend, zodat besloten werd bij IMAG-DLO op kleine schaal een test onder praktijkomstandigheden uit te voeren.

De doelstelling van deze test was een antwoord te verkrijgen op de volgende vragen:

- Is het ventilatiesysteem in staat de temperatuur in een kas onder praktijkomstandigheden beneden het gewenste maximum te houden?
- Welke temperatuurverschillen ontstaan er in de richting van de uitblaassurven in de kas als gevolg van het ventilatiesysteem?
- Welke luchtvochtigheden treden er onder verschillende omstandigheden op?
- Treden er bijzondere problemen op

met betrekking tot de teelt?

- Treden er bijzondere problemen op met betrekking tot de werking van de installatie?

Is het geluidsniveau dat door de installatie wordt voortgebracht, acceptabel?

Kasafdeling

De test is uitgevoerd in afdeling 7 van de Energiekas op het IMAG-terrein. Dit is een afdeling met vier kappen van 3,2 meter breed, een lengte van 24 meter, en een poothoogte die 3,75 meter bedraagt. De beide zijwanden zijn inpandig. De kopgevel aan de westzijde is een buitengevel, de gevel aan de oostzijde grenst aan de middencorridor van waaruit de afdelingen van de Energiekas kunnen worden bereikt. Figuur 3 geeft een plattegrond van de Energiekas te zien.

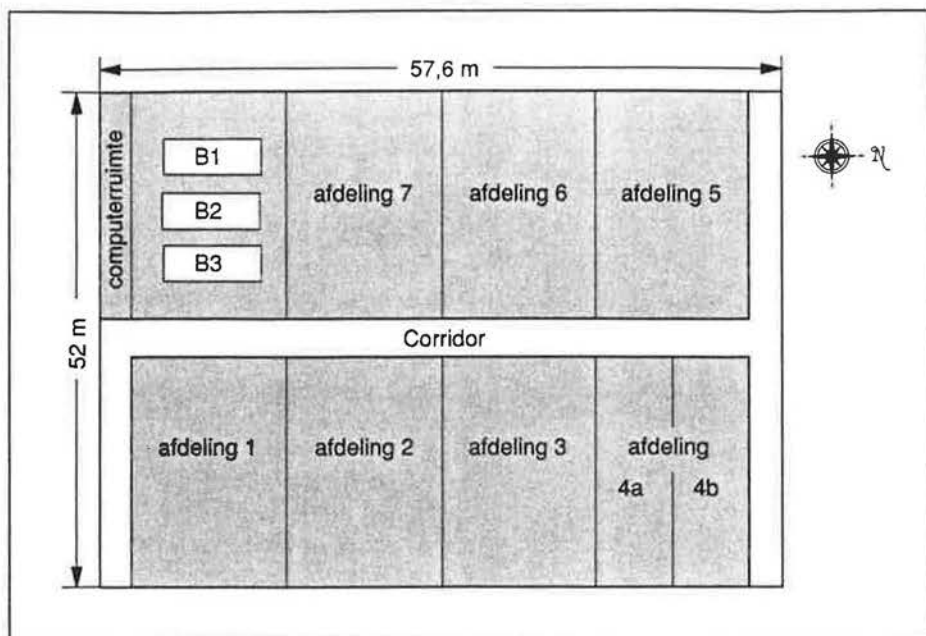
Afdeling 7 is uitgerust met een energiescherm type LS 10 en een schaduw-scherm type LS 15. Ten behoeve van de test is de ventilatie gesloten gehouden. De verwarming van de afdeling bestaat uit een net van gevinde aluminium buizen, type Alcoa 73-078 voor de basislast en een net van stalen buizen van 51 mm diameter om in de pieklast te voorzien. Het net van stalen pijpen doet tegelijkertijd dienst als railsysteem voor transport voor bijvoorbeeld de afvoer van geoogste producten.

De kasafdeling is ingericht voor de teelt op steenwol matten in goten. Hiertoe is de bodem vanaf de buitengevel naar de corridor op afschot gelegd. Het voedingswater wordt met behulp van druppelaars toegediend. Het overschot loopt via de goten onder de steenwol matten naar een verzamelpunt van waaruit het wordt opgepompt om opnieuw te worden gebruikt.

Ventilatiesysteem

Ten behoeve van de test in afdeling 7 van de IMAG-Energiekas, is de ventilatoreenheid als volgt met een kleinere capaciteit uitgevoerd:

Ventilatorwaaier Multifan 394-10PP2C140-A19/6 met een opbrengst van ruim 3500 m^3/h bij een druk van ruim 71 Pa. Omdat de afdeling waarin de test plaatsvindt kleiner is dan waarmee in het oorspronkelijk ontwerp rekening is gehouden, is een installatie met een kleinere capaciteit ontworpen. Zoals eerder vermeld is per m^2 grondoppervlak 92 m^3/h gekoelde lucht nodig om het overschot aan warmte af te voeren. Voor deze afdeling met een lengte van 24 meter is dus per ventilatoreenheid 92 x 1,6 x 24 is ca. 3500 m^3/h nodig. Het bijbehorend toerental kan nu tweemaal



Figuur 3. Plattegrond Energiekas.

zo laag zijn als bij het oorspronkelijk ontwerp (1500 in plaats van 3000 toeren per minuut). Geluidsproblemen zijn bij dit lage toerental nauwelijks te verwachten.

- Elektromotor KMER 80G8-4 met 750 en 1500 tpm.
- Luchtverdeelerslang 22 meter lang van PE buisfolie UV-3 met een dikte van 0,18 mm en een diameter van 0,4 meter, aan de bovenzijde voorzien van paren uitblaasgaten met een diameter van 40 mm en een onderlinge afstand van 250 mm. Deze verdeelslang is bovendien aan de onderzijde geperforeerd voor de drainage van het overtollige vernevelde water.
- Vernevelaars conform het ontwerp van de TUD (Reudink, 1988) met een werkdruk van 0,25 MPa voor zowel water als perslucht, en een opbrengst van 0,34 l/min. (Dit is in verhouding met het debiet van de ventilator.)

De ventilatoreenheden zijn in de buitengevel aangebracht zoals in aangegeven in figuur 4.

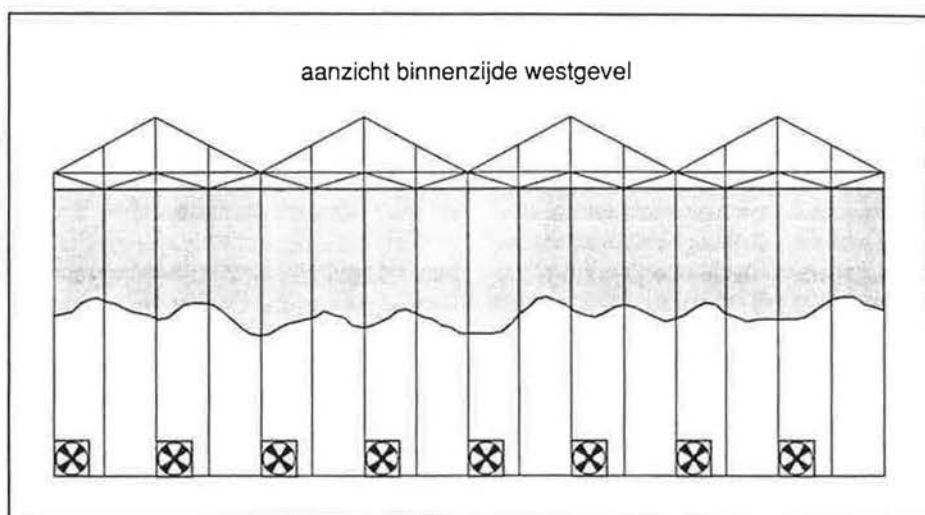
Voor de bediening van de luchtschuiven van de acht ventilatoreenheden is een tandheugelsysteem met een torsie-as langs de binnenzijde van de buitengevel aangebracht.

De computer voor de klimaatregeling werd voorzien van een module, die de luchtingsramen in de vakken het dichtst bij de buitengevel opent, indien de luchtschuiven in een stand worden gezet waarbij buitenlucht wordt aangezogen. Hierdoor wordt evenveel kaslucht afgevoerd als buitenlucht wordt ingeblazen. Voorts werd de klimaatcom-

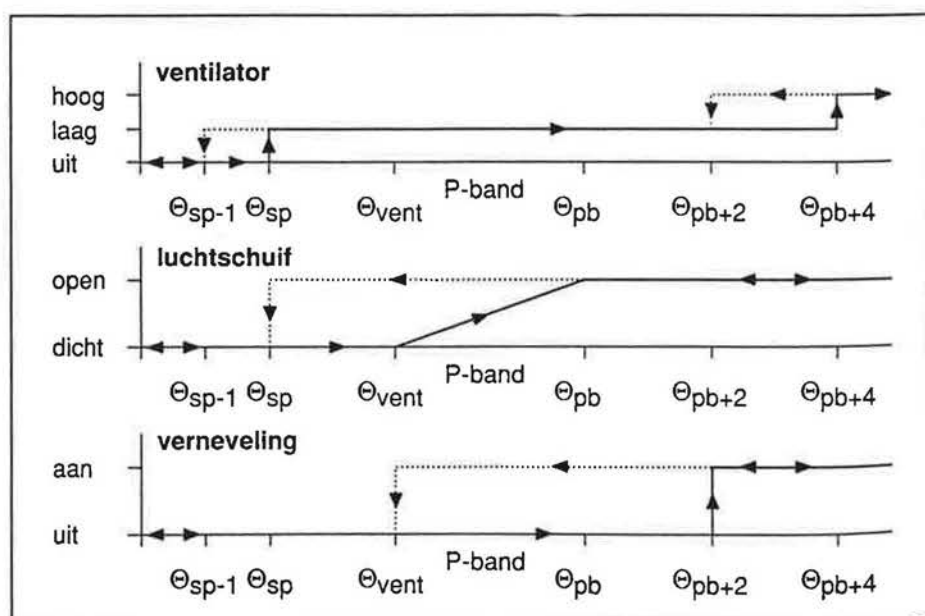
puter voorzien van een regelmodule voor de ventilatoreenheden.

Bij stijgende temperatuur worden hierdoor de volgende stuuracties geïnitieerd:

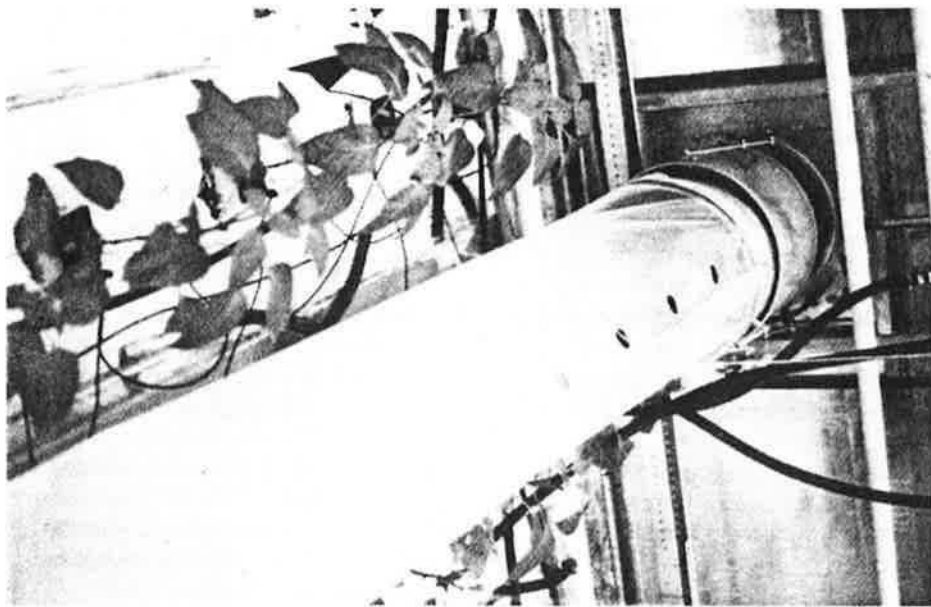
- De ventilator wordt bij een temperatuur $\theta = \theta_{sp}$ (bijv. 18 °C) op het lage toerental ingeschakeld waardoor er recirculatie van de kaslucht op gang komt.
- Bij $\theta = \theta_{vent}$ wordt de luchtschuif geopend waardoor geleidelijk buitenlucht wordt aangezogen en in de kas gebracht. Bij $\theta = \theta_{pb}$ is de schuif volledig geopend. ($\theta_{pb} - \theta_{vent}$ is de proportionele band en wordt afhankelijk van de buitentemperatuur bijgesteld; bijvoorbeeld in de zomer 2 °C en in de winter 4 °C.)
- Bij $\theta = \theta_{pb} + 2$ wordt de vernevelaar ingeschakeld, waardoor via verdam-



Figuur 4. Locatie ventilatoreenheden in buitengevel.



Figuur 5. Regelacties als functie van de temperatuur.



Unit met verdeelslang.

ping warmte aan de aangezogen buitenlucht wordt onttrokken.

- Bij $\Theta = \Theta_{pb} + 4$ wordt de ventilator op het hoge toerental geschakeld waardoor meer buitenlucht in de kas wordt gebracht.

Bij afnemende temperaturen worden de stuuracties in omgekeerde volgorde doorlopen, met dit verschil dat de omschakelwaarden van de temperatuur verschoven zijn, om een onrustig regelgedrag te voorkomen.

Figuur 5 geeft de regelacties als functie van de kastemperatuur schematisch weer.

Teelten

Van maart 1989 tot en met oktober 1989 werden paprika's geteeld. In de periode van maart 1990 tot en met september 1990 is een tomatenteelt uitgevoerd. Deze tweede test is enerzijds uitgevoerd om de bevindingen uit de eerste teelt te verifiëren, en de moeilijkheden bij de teelt van een tweede gewas te onderzoeken. Anderzijds bood deze test de mogelijkheid om binnen een ander IMAG-project te onderzoeken of de geïnstalleerde apparatuur van dienst kan zijn bij de sturing van de gewasverandering (een belangrijke groeifactor).

Metingen

Gedurende teelten zijn de volgende metingen verricht:

- *Indicentele metingen:*

Geluidsniveau. Op drie plaatsen in afdeling 7 (in het centrum, nabij de ventilatoren en nabij de corridor) zijn metingen verricht met behulp van geluidsniveaumeters van Bruel & Kjaer,

type 2231. Deze metingen zijn uitgevoerd in de situatie dat de ventilatoren op lage en hoge snelheid draaiden met de vernevelaars al dan niet ingeschakeld. De metingen vonden plaats met een volgroeid paprikagewas in de afdeling.

Luchtdebiet. Tijdens de eerste teelt zijn door de TUD debietmetingen verricht aan de ventilatoreenheden (Reudink, 1989). Gedurende de tweede teelt is met behulp van een pitobuis meting het debiet bepaald van één van de ventilatoreenheden bij beide toerentalen.

Temperatuur in slurven en bevochtigingsrendement. De TUD heeft tijdens de paprikateelt de temperatuurverlaging als gevolg van de adiabatische bevochtiging bepaald alsmede het

bevochtigingsrendement. Tijdens de tomatenteelt is op een aantal dagen het bevochtigingsrendement en het temperatuurverloop in één van de slurven bepaald.

- *Metingen in verband met de klimaatregeling.*

Ten behoeve van de klimaatregeling zijn gedurende de gehele teeltduur de volgende gegevens verzameld:

Kasluchttemperatuur en luchtvochtigheid. Deze zijn bepaald met behulp van een geventileerde meetbox met PT 100 elementen, uitgevoerd als psychrometer met droge en natte bol.

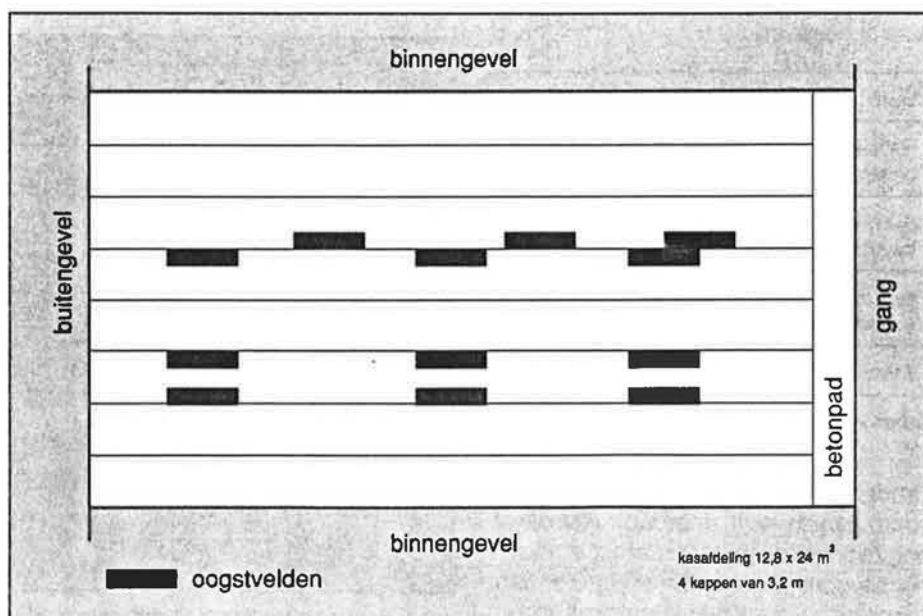
Overige. De standen van de kleppen voor de toevoer van water en perslucht naar de vernevelaars. De stand van de luchtschuiven. De stand van het ventilatortoerental (uit/laag/hog). En de stand van de luchttingsramen.

- *Klimaatwaarnemingen*

Met behulp van een datalogger Hewlett Packard type 3497A zijn tijdens de gehele teeltduur de volgende klimaatgegevens verzameld:

Temperatuur en vochtigheid. Op twee meter hoogte is met behulp van psychrometers op 3 plaatsen de kasluchttemperatuur en de luchtvochtigheid bepaald. Nabij de buitengevel, in het centrum van de kas en nabij de corridor. In de naastgelegen afdeling 6 is met behulp van een geventileerd en afgeschermd thermokoppel op twee meter hoogte nabij de buitengevel ter vergelijking eveneens de temperatuur bepaald.

Weergegevens. Op het IMAG-terrein nabij de Energiekas is een weertoren geplaatst, waarmee de luchttempera-



Figuur 6. Locatie proefvelden in zowel afdeling 6 als 7.

tuur, RV, en globale straling verkregen zijn.

Oogstwaarnemingen

Tijdens de eerste teelt (paprika's) zijn geen metingen aan de oogst verricht. Gedurende de tweede teelt (tomaten) zijn, op de in figuur 6 aangegeven proefvelden, de opbrengsten bepaald in afdeling 7, en ter vergelijking eveneens in de naastgelegen afdeling 6.

Resultaten

Geluid

De resultaten van de geluidmetingen zijn weergegeven in tabel 1. Met de ventilatoren op hoog toerental geschakeld en de vernevelaars in werking blijft het geluidsniveau nog juist onder de grens van 80 dBA, waarbeneden bij langdurige blootstelling geen gehoorschade optreedt.

ventilatorstand	vernevelaar	westgevel	midden	oostgevel
laag	uit	67,6	62,7	59,3
laag	aan	77,6	72,6	67,0
hoog	aan	79,4	74,8	70,9

Tabel 1. Geluidsniveau in dBA in energiekas afd. 7 (18-07-89).

Bij schaalvergroting moet er rekening worden gehouden met hogere ventilatortoerentallen en luchtsnelheden. Hierbij zullen in het algemeen hogere geluidsniveaus optreden, zodat maatregelen nodig zullen zijn om deze tot een acceptabel niveau terug te brengen.

Koeling en bevochtiging

De resultaten van de metingen verricht op 26 juni 1989 door de TUD zijn in tabel 2 gegeven.

Buitentemperatuur	θ_b	28,1 °C
Natte-boltemperatuur buiten	θ_{nb}	19,7 °C
Slurfteperatuur na bevochtigingssectie	θ_s	22,7 °C
Luchtdebiet per ventilatoreenheid	$\Phi_{v,l}$	0,98 m ³ /s
Bevochtigingsrendement	η_{bv}	64,3%

Tabel 2. Meetresultaten op 26 juni 1989.

Omdat er in de kas warmte wordt toegevoerd aan de lucht in de slurf voordat al het vernevelde water verdampt is, kan het bevochtigingsrendement groter dan 1 worden, zodat beter gesproken kan worden over de verzadigingsindex I_x ,

waarbij $I_x = 1$ als er water is opgenomen tot aan de verzadiging bij de natte-boltemperatuur buiten.

Om na te gaan hoe efficiënt het vernevelde water werd gebruikt, is tevens de verhouding E_w bepaald tussen de hoeveelheid toegevoerd water en de hoeveelheid door de lucht opgenomen water. De metingen aan de luchtcondities in de verdeelslang zijn 11 meter vanaf de ventilatoreenheid uitgevoerd. De resultaten zijn voor een aantal metingen weergegeven in tabel 3, waarbij de debieten gelden voor de gehele kasafdeling.

De hoeveelheid toegevoerd water blijkt te variëren in de tijd. Dit maakt dat in sommige gevallen het wateroverschot te groot is en op andere momenten meer water verdampt had kunnen worden. Als oorzaak hiervan kunnen de variaties in de waterdruk aangemerkt worden. Verbeteringen kunnen als volgt worden bereikt:

- Variaties in de waterdruk kunnen met behulp van goede reduceerventielen worden verminderd.
- Het overtollige water loopt via gaten onder in de slurf weg. Door deze gaten alleen aan het einde van de slurf aan te brengen blijft het water langer in de slurf, waardoor alsnog een deel kan verdampen.
- Voorts zou door aanpassing van de

hoeveelheid te vernevelen water aan het debiet en de vochtigheid van de aangezogen buitenlucht, de efficiëntie van het waterverbruik kunnen worden verbeterd.

Kasluchttemperatuur en luchtvochtigheid

In figuur 7 is het verloop van de binnentemperatuur in de natuurlijk geventileerde ruimte (afdeling 6) vergeleken met die in de ruimte van afdeling 7, die is voorzien van het mechanisch ventilatiesysteem met verdampingskoeling. Op het warmste deel van een zomerse dag in juli (29 juli 1990) bleek de installatie in staat de temperatuur op 26 °C te kunnen regelen. Op diezelfde dag liep de temperatuur in de natuurlijk geventileerde kas op tot 30 °C. Dit verschil is hoofdzakelijk te danken aan de verdampingskoeling.

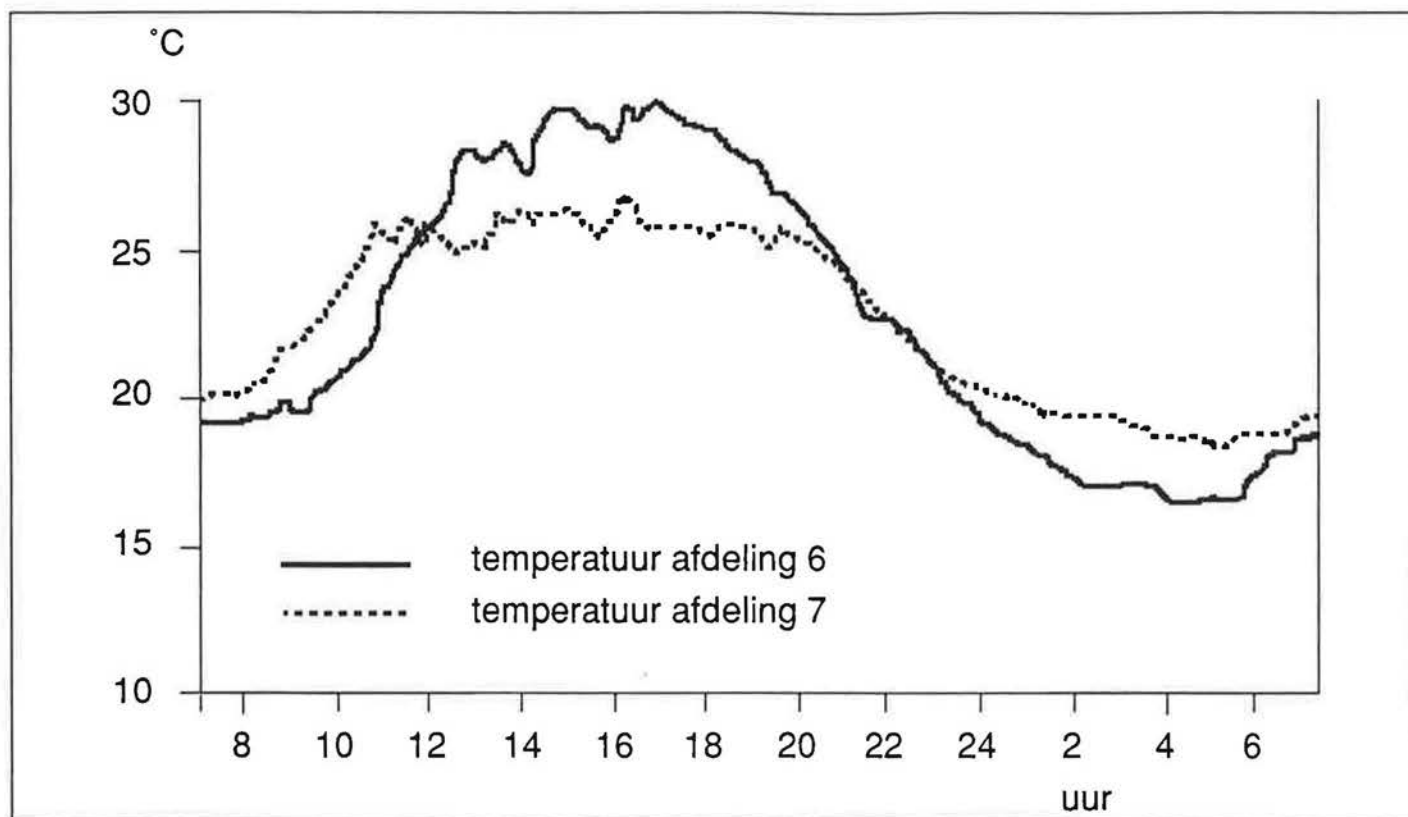
Het is noodzakelijk de bevochtiging mede afhankelijk te maken van de relatieve vochtigheid, omdat dit anders kan leiden tot te hoge relatieve vochtigheden in de avonduren. Immers dan neemt de binnentemperatuur af ten gevolge van de afnemende zonbelasting. Bij een te hoge relatieve vochtigheid moet de bevochtiging worden uitgeschakeld of worden gereduceerd. Houdt het regelsysteem hiermee rekening dan blijkt de relatieve vochtigheid in de kas met de mechanische ventilatie niet veel af te wijken van die in de natuurlijk geventileerde kas.

Gewas en gewasbehandeling

Gedurende de eerste teelt (paprika) zijn geen metingen aan het gewas uitgevoerd. De gewasverzorgers hadden de indruk dat er in afdeling 7 iets minder

luchtdebiet $\Phi_{v,l}$ m ³ /s	temperatuur buiten θ_b °C	vochtigheid buiten x_a g/kg	vocht deficit buiten Δx_e g/kg	temperatuur slurf θ_s °C	water- debiet $\Phi_{m,w}$ 10 ⁻³ kg/s	rendement bevochtiging η_e	verzadigings- index I_x	rendement watergebruik E_w
5,33	21,1	6,73	9,1	20,6	36	0,42	1,25	0,68
8,04	24,6	8,44	11,2	24,9	40	0,32	1,05	0,84
5,33	26,1	8,11	13,3	24,7	43	0,38	1,32	0,76
5,33	26,4	8,18	13,7	24,8	34	0,37	1,28	0,94
5,33	24,4	5,97	13,4	23,8	33	0,34	1,09	0,88
8,04	26,2	7,16	14,5	27,3	57	0,29	0,97	0,69
5,33	26,7	6,61	15,7	27,4	54	0,35	1,18	0,63
8,04	27,0	6,05	16,6	27,7	58	0,27	0,93	0,74
5,33	27,5	6,41	16,9	27,2	59	0,31	1,08	0,55

Tabel 3. Meetresultaten van de bevochtiging in de periode 1 - 6 mei 1990. (Janssen, 1990)

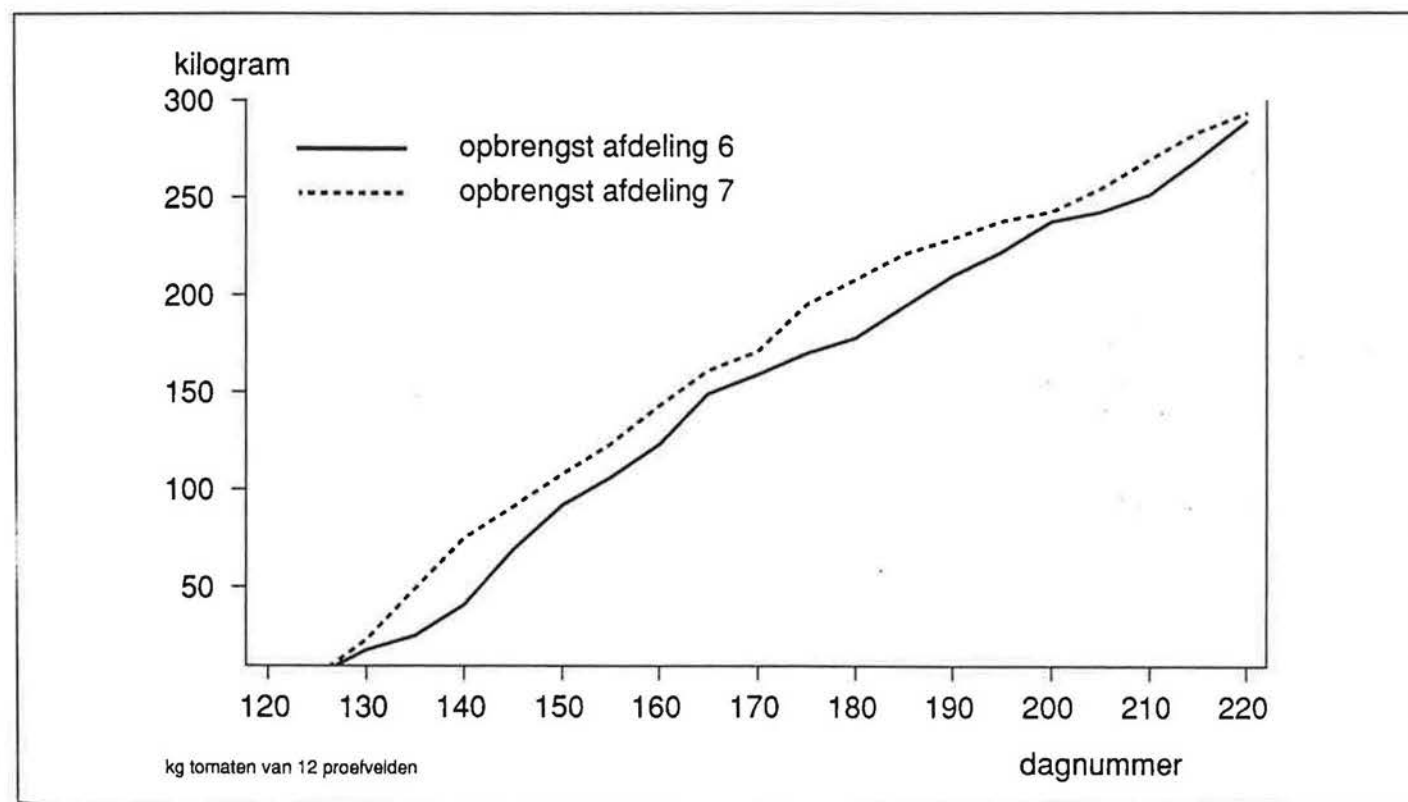


Figuur 7. Verloop temperatuur afdelingen 6 en 7 op 29 juli 1990.

neusrot optrad dan in de andere afdelingen, maar dat de problemen met insecten (in casu Trips) iets groter waren. Het eerste is mogelijk het gevolg van een iets gunstiger klimaat, het laatste heeft mogelijk als oorzaak de laaggelegen

aanvoeropeningen van de ventilatoreenheden, waardoor meer insecten in de kas worden gebracht. Omdat deze zaken niet nader zijn onderzocht, blijven dit veronderstellingen. De opbrengst in de afdeling met het

ventilatiesysteem leek niet veel af te wijken van die in de andere kasafdelingen. Het verrichten van arbeid in afdeling 7 werd enerzijds plezieriger gevonden dan in de andere kasafdelingen, omdat er een "aangenamer" (koeler) klimaat



Figuur 8. Cumulatieve opbrengst in afdelingen 6 en 7.

heerste, anderzijds werd het geluid van de ventilatoren (vooral op hoge snelheid) en de vernevelaars als hinderlijk ervaren. Door de grote diameter van de uitblaasslurven was een versmalling van de looppaden tussen het gewas noodzakelijk. Dit leverde bij de werkzaamheden in de kas hinder en schade aan het gewas op.

Gedurende de tweede teelt (tomaten) zijn op 12 proefvelden (figuur 6) de opbrengsten bepaald in afdeling 7 en ter vergelijking eveneens in de naastgelegen afdeling 6. In figuur 8 zijn de opbrengsten van de gezamenlijke proefvelden voor elk van de twee afdelingen cumulatief tegen de tijd uitgezet. De opbrengst van afdeling 7 (295 kg) blijkt wat hoger te zijn dan die van afdeling 6 (290 kg). Analyse van de oogstresultaten geeft echter geen statistisch significant verschil tussen beide afdelingen te zien.

Energiegebruik en kosten

Door het mechanisch ventilatiesysteem wordt 19,5 kWh/m².j) aan elektrische energie gebruikt. De kosten hiervan bedragen ca. f 1,50/(m².j). Hier staat tegenover dat de ventilatieramen kunnen worden weggelaten, zodat er minder schaduw wordt veroorzaakt en er dus meer licht in de kas komt. Het effect hiervan is een hogere opbrengst (1% meer licht geeft ongeveer 1% meer opbrengst). Een conventionele kas met luchtramen laat "kaal", d.w.z. zonder scherminstallatie, 72% licht door via het dek. Worden de luchtramen uit het dek verwijderd, zodat het dek doorlopend gesloten is uitgevoerd, dan neemt de lichtdoorlatendheid met ca. 3% toe. Dit levert een bruto produktiewinst op van ca. f 2,-/(m².j) Als hiervan de elektriciteitskosten van het mechanisch ventilatiesysteem à f 1,50/(m².j) wordt afgetrokken, blijft er f 0,50/(m².j) over. Dit is een zéér bescheiden winst waardoor de installatie zich pas na 43 jaar terug betaalt. De keerzijde hiervan is de relatieve verhoging van het energiegebruik per kg produkt.

In een kas met een lichtdoorlatendheid van 80%, zoals de door de TU Delft ontwikkelde Golfkas (Van Paassen, 1987), verdient men ongeveer f 5,50/(m².j) meer dan bij een normale kas, zodat de winst ca. f 4,-/(m².j) is. Hier tegenover staan de hogere kosten van het duurdere dek en de klimaatinstallatie. De terugverdientijd wordt geschat op 9 jaar.

Milieuaspekt

Het voordeel van het mechanisch venti-

latiesysteem is dat de buitenlucht gefilterd kan worden en zodoende insecten buiten de kas gehouden kunnen worden. Het gevolg is dat er beduidend minder bestrijdingsmiddelen nodig zullen zijn. Vooral dit aspekt wordt door de tuinderswereld als het belangrijkste argument voor toepassing van het mechanisch ventilatiesysteem gezien.

Conclusies en aanbevelingen

Tegen de achtergrond van het doel van de praktijktest kunnen de volgende conclusies getrokken worden.

- Gedurende de twee teelten zijn regelmatig hoge buitentemperaturen opgetreden. De luchtvochtigheid liep daarbij niet zo hoog op, dat de ontwerpcondities voor het ventilatiesysteem werden gehaald. Toch mag op basis van de analyse van de klimaatwaarnemingen worden aangenomen, dat met behulp van een ventilatiesysteem voorzien van verdampingskoeling, zoals dat in de IMAG kas is onderzocht, men in staat is het zomerklimaat in kassen zonder luchtramen binnen acceptabele grenzen te beheersen.
- De temperatuur wordt plaatselijk (nabij de ventilatoreenheden) onder extreme omstandigheden tot 4°C hoger dan in de rest van de kas.
- Bij keuze van de juiste regelstrategie wijkt de RV weinig af van die in een conventionele kas.
- Tijdens de uitgevoerde tests zijn geen bijzondere problemen met de teelt opgetreden. Er is geen significant verschil in opbrengst per eenheid van oppervlakte geconstateerd ten opzichte van een conventioneel geventileerde kas. Wel levert het ruimtebeslag van de polyetheen uitblaasslurven hinder op door de versmalde paden. Bovendien leidt dit tot een geringe verlaging van het beteelbare oppervlak.
- De installatie zelf vertoonde enkele kinderziekten. Zo dienden de elektromotoren voor de ventilatoren geselecteerd te worden met het juiste type lagering, en zal zorg besteed moeten worden aan de constructie van de bediening van de luchtschuiven. Ook de verneveling behoeft de nodige verbetering.
- Het geluidsniveau van de installatie bleef, werkend op maximale capaciteit nog juist onder de norm voor arbeidsomstandigheden van 80 dBA, maar werd wel als hinderlijk ervaren.
- Toepassing van het mechanisch ventilatiesysteem in een conventionele kas

zonder luchtramen leidt tot hogere energiekosten per kg produkt. Voordelen zijn op den lange duur te verkrijgen in een nieuw type kas met een 8% hogere lichtdoorlatendheid.

- Het grote voordeel van een mechanisch geventileerde kas is de mogelijkheid om insecten te weren, zodat er minder bestrijdingsmiddelen moeten worden toegepast.

Samenvattend kan worden gezegd dat in principe het onderzochte systeem zeker perspectieven biedt voor de klimaatbeheersing in kassen zonder luchtramen. Een verdere ontwikkeling van het systeem is daarbij op zijn plaats. Hierbij zal dan vooral aandacht besteed moeten worden aan de volgende punten:

- verbetering van de constructieve uitvoering;
- gelijkmatige en constante verneveling;
- oplossingen voor het ruimtebeslag van de uitblaasslurven;
- verlaging van de geluidproductie;
- aangepaste klimaatregeling;
- plaats en afmetingen van de opening voor luchtafvoer.

Samenwerking

Dit onderzoek is uitgevoerd in een samenwerkingsverband tussen de TU Delft, het IMAG en de kassenbouwer Hordijk. Het onderzoek werd gefinancierd door de NOVEM (Nederlandse Maatschappij voor energie en milieu).

Referenties

- Janssen, A.H.S., 1990. De invloed van vochtinjectie op klimaat en verdamping. Instituut voor Mechanisatie Arbeid en Gebouwen, Wageningen, HTuS Stageverslag.
- Paassen, A.H.C. van, e.a., 1987. Haalbaarheidsonderzoek Golfkas. Technische Universiteit Delft, Afdeling Werktuigbouwkunde, Delft, Rapport nr K-132.
- Noord, G.J. de, Paassen A.H.C. van. TU Delft ontwikkelt drie nieuwe kastypen. Klimaatbeheersing 16 (1987) nr. 4 (april).
- Reudink, R.H.C. Test Klimaatinstallatie Golfkas. Technische Universiteit Delft, Afdeling Werktuigbouwkunde, Delft, Rapport Werkgroep Glastuinbouw (1988).
- Reudink, R.H.C. en A.H.C. van Paassen. Veldtest klimaatstelsel gesloten kas. Technische Universiteit Delft, Afdeling Werktuigbouwkunde, Delft, Rapport nr K-159 (1989).