

Effect van grondbuiskoeling en indirecte verdampings- koeling op de ventilatie in kassen

*Effect of soilpipe cooling and indirect
evaporative cooling on the ventilation of
greenhouses*

Ing. J.J.G. Breuer
Ir. N.J. van de Braak

imag-dlo



SIGN: R606-gu/10
EX. NO.
MLV: 1994410503

CIP-GEGEVENS KONINKLIJKE BIBLIOTHEEK, DEN HAAG

Breuer, J.J.G.

Effect van grondbuiskoeling en indirecte verdampingskoeling op de ventilatie in kassen /
J.J.G. Breuer, N.J. van de Braak. - Wageningen : IMAG-DLO. - III. - (Rapport / Dienst
Landbouwkundig Onderzoek, Instituut voor Milieu- en Agritechniek ; 94-10)

Met lit. opg. - Met samenvatting in het Engels.

ISBN-90-5406-079-4 geb.

NUGI 849

Trefw.: klimaatregeling ; kassen.

© 1994

IMAG-DLO

Postbus 43 – 6700 AA Wageningen

Telefoon 08370-76300

Telefax 08370-25670

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 enig andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system of any nature, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the publisher.

Abstract

Breuer, J.J.G., and N.J. van de Braak (DLO Instituut voor Milieu- en Agritechniek, (IMAG-DLO), Wageningen): Effect van grondbuiskoeling en indirecte verdampingskoeling op de ventilatie in kassen. *Effect of soil pipe cooling and indirect evaporative cooling on the ventilation of greenhouses*. (Org. NL), IMAG-DLO (1994) rapport 94-10, 27 pag., 4 tab., 0 fig., 10 form., 10 ref., ISBN-90-5406-079-4

By means of a computer CSMP simulation model, **DESSIM90**, the ventilation and cooling requirements of greenhouses with a tomato crop have been investigated.

Mechanical ventilation in combination with soil pipes or indirect evaporative cooling have been compared with natural ventilation.

Mechanical ventilation in combination with soil pipes or indirect evaporative cooling can be an alternative to natural ventilation. Mechanical ventilation in combination with soil pipes by a maximum ventilation flux of $40 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ gives a mean ventilation flux of $25 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ against $65 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ by natural ventilation. The yearly air exchange of about $50,000 \text{ m}^3/\text{m}^2$ is much lower than the figure of $117,000 \text{ m}^3/\text{m}^2$ for natural ventilation. The number of 2000 ventilation hours against 1800 hours by natural ventilation are somewhat higher.

Mechanical ventilation in combination with indirect evaporative cooling (using experimentally determined efficiencies of a prototype indirect evaporative cooler) requires maximum ventilation fluxes of $100 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. The ventilation hours are 2200 - 2300, which means 400 - 500 hours more than for natural ventilation. The yearly total ventilation is higher by $18,000 - 45,000 \text{ m}^3/\text{m}^2$. By using an indirect evaporative cooler with a high efficiency compared to the prototype (e.g. 75%), a maximum ventilation flux of $40 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ appeared to be sufficient. Ventilation occurs for a good 2100 hours and the yearly total ventilation is $64,000 \text{ m}^3/\text{m}^2$ lower than with natural ventilation.

Keywords: climate control ; greenhouses.

Voorwoord

In de sector glastuinbouw wordt gezocht naar technologie en produktiemethoden die het milieu minder vervuilen. Het technisch en technologisch onderzoek naar gesloten systemen moet op termijn leiden tot een lagere uitstoot van schadelijke stoffen, zoals kooldioxyde (CO₂) en pesticiden door de Nederlandse glastuinbouw.

Bij kassen zonder luchtramen valt de natuurlijke ventilatie weg. Daardoor worden bijzondere eisen gesteld aan de apparatuur voor het beheersen van het klimaat. Vooral in de zomersituatie vormt het begrenzen van de maximale kasluchttemperatuur daarbij een probleem. Koeling is daardoor voor gesloten kassen een noodzaak.

In dit rapport worden, op basis van de resultaten van een simulatiemodel, bouwstenen aangedragen voor de realisatie van klimaatbeheersingssystemen voor gesloten kassen. Met name is gekeken naar de invloed van mechanische ventilatie in combinatie met koeling door middel van grondbuizen of indirecte verdampingskoeling bij kassen.

Ir. A.A. Jongebreur
directeur

Inhoud

Samenvatting	6
1 Inleiding	7
2 Modelbeschrijving en berekeningsgevallen	8
2.1 Opbouw model DESSIM90	8
2.2 Invoergegevens	9
2.3 Rekenprocedure	9
2.4 Modules voor ventilatie	10
2.4.1 Natuurlijke ventilatie	10
2.4.2 Mechanische ventilatie	11
2.4.2.1 Grond buizen	11
2.4.2.2 Indirecte verdampingskoeling	12
2.5 Berekeningsgevallen	13
3 Resultaten	16
3.1 Natuurlijke ventilatie	17
3.2 Mechanische ventilatie met grondbuizen	18
3.3 Mechanische ventilatie met indirecte verdampingskoeling	18
3.3.1 Invloed rendement	19
3.3.2 Invloed plaatoppervlak	19
3.3.3 Invloed weergegevens	19
4 Discussie	21
5 Conclusies	23
Summary	25
Literatuur	26
Symbolen	27

Samenvatting

Kennis van de ventilatie en de gerelateerde energiebehoefte van kassen is van belang bij het ontwerp en de ontwikkeling van luchtbehandelingsapparatuur voor kassen zonder luchtramen. Met behulp van het simulatiemodel **DESSIM90** is de ventilatiebehoefte en daarmee de koelingsbehoefte van tuinbouwkassen bij de teelt van tomaten onderzocht. De effecten van mechanische ventilatie met gebruikmaking van grondbuizen of indirecte verdampingskoeling ten opzichte van natuurlijke ventilatie zijn hierbij aan de orde gekomen. De gegevens bij indirecte verdampingskoeling zijn afkomstig uit een proefopstellingstest.

Het blijkt dat zowel koeling door middel van mechanische ventilatie door grondbuizen, als mechanische ventilatie met indirecte verdampingskoeling, in klimaattechnische zin, een alternatief kan zijn voor natuurlijke ventilatie. Bij vergelijking van mechanische ventilatie met behulp van grondbuiskoeling met natuurlijke ventilatie, blijkt dat in het eerste geval bij een maximumventilatiedebiet van $40 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, het gemiddelde ventilatiedebiet $25 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ bedraagt tegenover $65 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ bij natuurlijke ventilatie en het jaarlijkse totale ventilatiedebiet met ca. $50.000 \text{ m}^3/\text{m}^2$ aanmerkelijk lager is dan de $117.000 \text{ m}^3/\text{m}^2$ bij natuurlijke ventilatie maar dat het aantal ventilatie-uren ca. 2000 uur bedraagt ten opzichte van ca. 1800 uur bij natuurlijke ventilatie. Bij indirecte verdampingskoeling -met rendementen conform een onderzocht prototype- kunnen ventilatiedebieten van maximaal $100 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ noodzakelijk zijn. Het aantal ventilatie-uren is dan ca. 2200 - 2300 uur hetgeen in vergelijking met natuurlijke ventilatie 400 - 500 uur hoger is. Het totale jaarlijkse ventilatiedebiet is $18.000 - 45.000 \text{ m}^3/\text{m}^2$ hoger.

Bij gebruik van een indirecte verdampingskoeler met een hoger rendement dan van het prototype, namelijk 75%, kan worden volstaan met een maximale ventilatiecapaciteit van $40 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, ruim 2100 uren ventilatie-uren en een totaal jaarlijks ventilatiedebiet dat $64.000 \text{ m}^3/\text{m}^2$ lager is dan bij natuurlijke ventilatie.

1 Inleiding

In het DLO-onderzoekprogramma "Beperking energieverbruik en emissies in de beschermde teelten" streeft IMAG-DLO de ontwikkeling na van technische concepten en systemen voor beschermde teelten waarmee duurzaam, veilig en concurrerend kan worden geproduceerd.

In het kader van dit onderzoekprogramma wordt het project "Ontwerp van klimatiseringsapparatuur voor gesloten kassystemen" uitgevoerd. Dit project wordt mede gefinancierd door de Nederlandse onderneming voor energie en milieu (Novem) en uit het fonds "Gesloten Bedrijfssystemen" van de Directie Akker- en Tuinbouw (DAT) van het Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij (LNV).

Kennis van de ventilatie en de daarbij behorende energiebehoefte en koelingsbehoefte van kassen is nodig voor de ontwikkeling en de dimensionering van klimaatbeheersingsystemen voor kassen zonder luchtramen. Daarom is als onderdeel van de werkzaamheden binnen dit project met behulp van modelstudies nagegaan hoeveel ventilatie in kassen wordt vereist voor de koeling (Van de Braak en Breuer, 1991). Als vervolg hierop is voor twee systemen van mechanische ventilatie in combinatie met koeling met behulp van grondbuizen of indirecte verdampingskoeling, een vergelijking gemaakt met natuurlijke ventilatie bij een kas met luchtstramen.

In dit rapport wordt een korte beschrijving gegeven van het computermodel (DESSIM90) en de berekeningsgevallen. Vervolgens worden de resultaten van de verschillende berekeningen gepresenteerd en de onderlinge verschillen besproken. Tenslotte worden enkele conclusies getrokken betreffende de toepassing van mechanische ventilatie in combinatie met koeling door middel van grondbuizen of indirecte verdampingskoeling bij kassen.

2 Modelbeschrijving en berekeningsgevallen

DESSIM90 (greenhouse DESign and Simulation Model for the nineties) is een door het IMAG-DLO ontwikkeld computermodel, dat in de onderhavige studie wordt gebruikt ten behoeve van simulatieberekeningen voor het ontwerpen van klimaatbeheersingsapparatuur voor tuinbouwkassen (Breuer en Van de Braak, 1994).

De kern van het dynamische model is opgebouwd met behulp van de simulatietaal CSMP-III -Continuous System Modeling Program III- (IBM, 1975). De meeste bijkomende berekeningen worden uitgevoerd in gekoppelde subroutines, die geschreven zijn in FORTRAN-77. Het programma is geïmplementeerd op een VAX-4200 en vergt bij berekening van een volledig jaar, 365 dagen van 24 uur, ongeveer 200 minuten CPU-tijd.

Het model beschrijft de fysische processen die van belang zijn bij het tot stand komen van het kasklimaat. In het model is tevens een beschrijving opgenomen van het gedrag van het gewas aangaande fotosynthese en warmte-, vocht- en CO₂-uitwisseling met de omgeving. In het model is tevens een scherm gemodelleerd.

Ten behoeve van dit onderzoek zijn modules voor grondbuizen en indirecte verdampingskoeling opgenomen.

Een vergelijking met praktische metingen waarbij het gehele model DESSIM90 gevalideerd wordt, is niet uitgevoerd. Grote delen van DESSIM90 zijn gebaseerd op eerdere simulatiemodellen die wel gevalideerd zijn. Het verloop van de grondtemperatuur in de ingebouwde module grondbuizen is gebaseerd op praktische grondtemperatuurmetingen (Lange, 1992). De rendementen in de ingebouwde module indirecte verdampingskoeling zijn gebaseerd op praktische metingen aan een prototype indirecte verdampingskoeler (Vollebregt en De Jong, 1993). Ook is het gehele model vergeleken met praktische metingen ten aanzien van de ventilatiehoeveelheden (Van de Braak en Breuer, 1991).

2.1 Opbouw model DESSIM90

In het model DESSIM90 zijn verschillende onderdelen van het kas-gewas systeem opgenomen.

Daarbij zijn te onderscheiden:

- een diep gelegen bodemlaag
- zeven horizontale bodemlagen, van boven naar beneden in dikte toenemend
- het bodemoppervlak
- drie lagen in het gewas
- de verwarmingspijpen
- de kaslucht
- het scherm
- het kasdek
- de buitenlucht
- de stralingsomgeving van het kasdek buiten.

De belangrijkste processen die het model beschrijft zijn:

- de warmte-uitwisseling door geleiding, convectie en straling tussen de eerder genoemde onderdelen
- de transmissie en absorptie van globale straling door gewas en kasonderdelen
- de verdamping door het gewas
- de condensatie tegen het kasdek
- vochtuitwisseling tussen kaslucht enerzijds en buitenlucht of ventilatiesysteem anderzijds
- energie- en damptransporten rond het scherm in de kas.

2.2 Invoergegevens

De invoergegevens voor het rekenmodel zijn te scheiden in twee hoofdgroepen, te weten gegevens die gedurende de berekening niet veranderen (stationair) en gegevens die tijdens de berekening variëren (tijdsafhankelijk).

Als stationaire gegevens worden ingevoerd:

- locatie en oriëntatie van de kas
- afmetingen van de constructiedelen
- afmetingen van de verwarmingspijpen
- diverse fysische eigenschappen.

Als tijdsafhankelijke gegevens worden ingevoerd:

- weergegevens (luchttemperatuur, relatieve vochtigheid, windsnelheid, directe en diffuse globale straling)
- teeltregime (streefwaarden voor: kasluchttemperatuur, ventilatietemperatuur, minimumbuisstemperatuur en de lichtafhankelijke aanpassingen van deze streefwaarden).
- gesimuleerd temperatuurverloop grond op 3 m diepte.

2.3 Rekenprocedure

Alle berekeningen worden uitgevoerd voor een kas waarvan de grootheden genormeerd zijn op 1 m² grondoppervlak. Het model is dynamisch, waarbij als rekenstap in de tijd, op basis van de tijdconstanten van de onderdelen van het rekenmodel, 10 seconden is genomen.

Buiten het CSMP-programma is er naast een voorbereiding van de invoerparameters ook een verwerking van de uitvoergegevens nodig. In CSMP-III worden drie hoofdsegmenten onderscheiden waarbinnen alle berekeningen en bewerkingen plaatsvinden al dan niet met behulp van subroutines: een initial, een dynamic en een terminal segment. Een gedetailleerde beschrijving van DESSIM90 wordt gegeven door Breuer en Van de Braak (1994).

- *voorbereiden invoergegevens*

De parameters voor elk berekeningsgeval worden in een aparte datafile (CASINP) opgegeven.

- *initial segment*

In het initial segment van het CSMP-model worden naast het toekennen van geheugenplaatsen voor één- of meer-dimensionale arrays ook de startwaarden voor een groot aantal variabelen en constanten van het model gegeven. Met behulp van diverse subroutines worden datafiles ingelezen en/of worden data berekend.

- *dynamic segment*

In het dynamic segment worden alle berekeningen op een nader in het terminal segment aan te geven tijdstap (DELTA) doorlopen over een totaal in te stellen berekeningstijd (FINTIM). In onze berekeningen is de waarde van DELTA gelijkgesteld aan 10 seconden terwijl FINTIM op 31536000 s (1 jaar) is gesteld. Op deze manier wordt een geheel jaar in stappen van 10 s doorlopen. In het dynamic segment worden onder andere de setpoints voor de verschillende temperaturen berekend.

- *terminal segment*

In het terminal segment kunnen DELTA (berekeningstijdstap), FINTIM (totale berekeningstijd) en tijdstip van uitvoer van gegevens worden opgegeven, evenals de integratiemethodiek (keuze uit acht). Bij deze berekeningen is voor een eerste orde Euler-integratie gekozen die met een vaste tijdstap werkt.

- *uitvoer van de berekeningsresultaten*

Het uitvoeren van de berekende gegevens gebeurt deels in het dynamic segment en deels in het terminal segment. In het laatste geval worden de berekeningsresultaten verkregen door gebruik van het OUTPUT-commando in het CSMP-programma. Het programma maakt dan een file aan met de gevraagde variabelen als functie van de tijd, weergegeven in tabel- of grafiekvorm. Met behulp van speciale subroutines kunnen gegevens van dag- en weekssommen van bepaalde grootheden worden opgeslagen.

Eveneens worden met behulp van een aantal subroutines datafiles gemaakt met gegevens van de warmte- en koelbehoefte, de verdamping, de relatieve vochtigheid, de temperatuur in de kas en het ventilatiedebiet.

2.4 Modules voor ventilatie

In het programma DESSIM90 kan zowel natuurlijke als mechanische ventilatie worden gesimuleerd. Het momentane maximumventilatiedebiet bij natuurlijke ventilatie kan worden berekend met de module MXVENT. Daarnaast zijn twee modules opgenomen waarmee in het geval van mechanische ventilatie een systeem van koeling kan worden gesimuleerd, te weten een systeem van koeling met behulp van grondbuizen (SOILP) en een systeem van indirecte verdampingskoeling (IEC).

2.4.1 Natuurlijke ventilatie

De natuurlijke ventilatie wordt berekend voor een kas met ramen, waarbij in de programmatuur rekening is gehouden met een raamoppervlak van 1/4 van het dekkoppervlak en een maximumventilatiedebiet ($FVENT_{max}$ in $m^3/(m^2.s)$) dat bepaald wordt

door de windsnelheid (v_w in m/s) en het temperatuurverschil (ΔT in °C) tussen kas boven het scherm (t_{air2} in °C) en buitenlucht (t_{out} in °C) (De Jong, 1990).

$$FVENT_{max} = \sqrt{a \cdot v_w^2 + b \cdot (t_{air2} - t_{out})} \quad (1)$$

Uit het onderzoek van De Jong (1990) is voor het beschreven kastype af te leiden dat:

$$a = 56,25 \cdot 10^{-6}$$

$$b = 32,83 \cdot 10^{-6} \text{ voor } (t_{air2} - t_{out}) > 0.$$

2.4.2 Mechanische ventilatie

Bij mechanische ventilatie kan in tegenstelling tot bij natuurlijke ventilatie de te ventileren hoeveelheid lucht dwingend worden opgelegd. Aangezien dit veel transport-energie kost, is er gezocht naar methoden die de te ventileren hoeveelheid reduceren. In onderstaande worden twee systemen van koeling beschreven waarmee getracht wordt de ventilatiebehoefte te reduceren.

2.4.2.1 Grondbuizen

In de module (SOILP) bestaat de mogelijkheid om òf buitenlucht òf kaslucht eerst door een stelsel van grondbuizen te laten lopen voordat ze aan de kaslucht wordt toegevoegd. Door een seizoenafhankelijke grondtemperatuur op te nemen is het mogelijk de buitenlucht of kaslucht dan gekoeld in de kas te brengen. De seizoenafhankelijke grondtemperatuur ($t_{soil(3m)}$ in °C) op 3 m diepte op een bepaalde dag (N) vanaf 1 januari, afgeleid uit grondtemperatuurmetingen door Lange (1992), is te beschrijven conform een methodiek van France and Thornley (1984) met behulp van de gemiddelde jaarlijkse grondtemperatuur (a_y in °C), de gemiddelde amplitude van de grondtemperatuur (b_y in °C) en de dag waarop de gemiddelde jaarlijkse grondtemperatuur wordt bereikt (N_0):

$$t_{soil(3m)} = a_y + b_y \cdot \sin\left(\frac{N - N_0}{365}\right) \cdot 360 \quad (2)$$

met voor Nederlandse omstandigheden:

$$a_y = 12,8 \text{ °C}; b_y = 4,7 \text{ °C}$$

$$N_0 = 126$$

De optioneel toe te passen grondbuizenmodule berekent de uittrede-temperatuur (t_{spout} in °C) van de lucht uit de grondbuizen. Het temperatuurrendement ($\eta_{Tsoilpipe}$) van het grondbuizensysteem, waarvoor Lange (1992) voor koelingscondities 74% en voor verwarmingscondities 81% vond, is conservatief gesteld op 70% en is te schrijven als een functie van de luchtintrede-temperatuur -buitenlucht (t_{out}) of kaslucht (t_{air} in °C)-, de luchtuitrede-temperatuur (t_{spout}) en de grondtemperatuur ($t_{soil(3m)}$). Bij gebruik van buitenlucht:

$$\eta_{T_{soilpipe}} = \frac{t_{out} - t_{spout}}{t_{out} - t_{soil(3m)}} \quad (3)$$

Bij gebruik van kaslucht:

$$\eta_{T_{soilpipe}} = \frac{t_{air} - t_{spout}}{t_{air} - t_{soil(3m)}} \quad (4)$$

De grondbuizen worden toegepast als er, bij de temperatuurregeling, ventilatie gewenst is en er verder nog voldaan wordt aan één van de volgende combinaties van voorwaarden:

- geen verwarming nodig en de buitentemperatuur hoger dan de grondtemperatuur op 3 m diepte ($t_{out} > t_{soil(3m)}$)
- verwarming ten gevolge van minimumbuis noodzakelijk en de buitentemperatuur lager dan de grondtemperatuur op 3 m diepte ($t_{out} < t_{soil(3m)}$)

Het is ook mogelijk om kaslucht in plaats van buitenlucht door het grondbuizensysteem te leiden. Er treedt dan een volledige recirculatie van de kaslucht op.

Bij lichtdoorvoer door de grondbuizen wordt ervan uitgegaan dat de buistemperatuur steeds gelijk is aan de gesimuleerde grondtemperatuur ($t_{soil(3m)}$). Met andere woorden er wordt een oneindige warmteafvoer gesimuleerd.

2.4.2.2 Indirecte verdampingskoeling

Vooruitlopend op een mogelijke toepassing van een gesloten kas is er bij het IMAG-DLO onderzoek gedaan naar indirecte verdampingskoeling voor kassen (Vollebregt en De Jong, 1993). In DESSIM90 is ook een module (IEC) ingebouwd die gebruik kan maken van de indirecte verdampingskoeler. In de indirecte verdampingskoeler wordt kaslucht gekoeld door deze langs warmtewisselende platen te leiden, terwijl aan de andere bevochtigde kant van de platen buitenlucht gevoerd wordt. De verdamping van het bevochtigde plaatoppervlak koelt de plaat en daarmee de kaslucht.

De optioneel toe te passen module voor indirecte verdampingskoeling (IEC) berekent de luchtcondities die uit de indirecte verdampingskoeler komen. Er kan gerekend worden met een temperatuurrendement ($\eta_{T_{ec}}$) van bijvoorbeeld 75% maar ook met experimenteel bepaalde temperatuur- ($\eta_{T_{ec}}$) en absolute vochtigheidsrendementen ($\eta_{x_{ec}}$) (Vollebregt en De Jong, 1993) van een prototype indirecte verdampingskoeler. Er wordt in het laatste geval ook rekening gehouden met absolute vochtigheid (waterinhoud) van de in- en uittredende luchtstromen.

Het temperatuurrendement van de indirecte verdampingskoeler ($\eta_{T_{ec}}$) is een functie van de kasluchttemperatuur (t_{air}), de uittrede-luchttemperatuur uit de koeler (t_{ecout} in °C) en de plaattemperatuur (t_{pliec} in °C).

Het absolute vochtigheidsrendement van de indirecte verdampingskoeler ($\eta_{x_{ec}}$) is een functie van de absolute vochtinhouden van kaslucht (x_{air} in g/kg), de uittrede-lucht uit de koeler (x_{ecout} g/kg) en de lucht direct aan de plaat (x_{pliec} in g/kg). Het temperatuurrendement ($\eta_{T_{ec}}$) en het absolute vochtigheidsrendement ($\eta_{x_{ec}}$) zijn als volgt gedefinieerd:

$$\eta_{T_{ec}} = \frac{t_{air} - t_{ecout}}{t_{air} - t_{pliec}} \quad (5)$$

$$\eta_{X_{ec}} = \frac{x_{air} - x_{ecout}}{x_{air} - x_{pliec}} \quad (6)$$

Met behulp van deze formules wordt de temperatuur en absolute vochtigheid van de uittreedende lucht uit de indirecte verdampingskoeler berekend.

De in het model gehanteerde rendementen, zoals onderzocht bij het prototype door Vollebregt en De Jong (1993), zijn als volgt weer te geven:

Voor het geval dat het langsstromende luchtdebiet (FV_{iec} in $m^3/(m^2 \cdot s)$) kleiner is dan $0,024 m^3/(m^2 \cdot s)$ gelden:

$$\eta_{T_{ec}} = 0,50888 \quad (7)$$

en

$$\eta_{X_{ec}} = 1,4622 \quad (8)$$

terwijl er voor een luchtdebiet gelijk aan of groter dan $0,024 m^3/(m^2 \cdot s)$ gelden:

$$\eta_{T_{ec}} = 0,3494 + \left(\frac{0,00383}{FV_{iec}} \right) \quad (9)$$

en

$$\eta_{X_{ec}} = 0,2874 + \left(\frac{0,0282}{FV_{iec}} \right) \quad (10)$$

In het model bestaat bovendien nog de mogelijkheid de verhouding tussen koelend oppervlak en kasgrondoppervlak te wijzigen. De gewenste maximale hoeveelheid ventilatielucht is instelbaar.

De randvoorwaarden waarbij de indirecte verdampingskoeler niet wordt toegepast, zijn:

- geen ventilatie in de kas gewenst
- buitentemperatuur lager dan $5^\circ C$ (in verband met bevroingsgevaar)
- droge-boltemperatuur kaslucht lager is dan de natte-boltemperatuur van de buitenlucht.

2.5 Berekeningsgevallen

De berekeningen zijn uitgevoerd voor een tomatenteelt in een moderne kas met de volgende eigenschappen: enkelglas in dek en gevel, 1 meter breed glas in het dek,

dakhelling van 22°, goothoogte 3,2 m, vak 3,2 m × 4 m, smalle aluminiumgoot van 0,158 m × 0,171 m, geen scherm en oriëntatie van de nok N-Z. Bij de berekeningen is de invloed van de gevels niet verdisconteerd. De ventilatie kan hetzij langs natuurlijke weg – een kas met ramen – hetzij langs mechanische weg -ventilatoren, grondbuizen, en indirecte verdampingskoeling- worden gerealiseerd. Alle berekeningsgevallen zijn gemaakt met versie 2.7 van DESSIM90.

Bij de indirecte verdampingskoeling zijn berekeningen gemaakt voor een apparaat met een hoog rendement, een voor rendementen gebaseerd op experimenten bij een prototype en een voor rendementen van het prototype maar met een gunstiger oppervlakteverhouding.

Om een beeld te geven van de optredende ventilatiebehoefte en daarmee ook van de koelingsbehoefte is het gemiddelde ventilatiedebiet bepaald gedurende de uren dat er geventileerd wordt en het aantal uren dat maximale ventilatie optreedt.

Bij mechanische ventilatie is gekeken naar:

- grondbuizen (met onbepaalde afvoer van warmte bij de ongestoorde, gesimuleerde grondtemperatuur op 3 m diepte)
 - buitenlucht (t_{out}) als voeding
 - kaslucht (t_{air}) als voeding (recirculatie)
- indirecte verdampingskoeling
 - hoog rendement (temperatuurrendement van 75%)
 - prototype-rendementen (temperatuurrendement en absolute vochtigheidsrendement) met 3,24 m² warmtewisselend oppervlak – plaatoppervlak – per m² kas
 - prototype-rendementen met gunstiger oppervlakteverhouding, 0,5 m² plaatoppervlak per m² kas
 - prototype-rendementen met gunstiger oppervlakteverhouding, 0,5 m² plaatoppervlak per m² kas, met actuele weerdata van een warm jaar (1992)

In alle berekeningen is een aantal vaste uitgangspunten gehanteerd. Dit zijn: verwarming en ventilatie worden geregeld op basis van de kasluchttemperatuur -temperatuurregeling genoemd-, geen toepassing minimumbuis, wel lichtafhankelijke temperatuurverhoging van teelt- en ventilatietemperatuur. Voor alle berekeningsgevallen, op één na, is het weerbestand SEL – het referentiejaar voor de Nederlandse glastuinbouw – (Breuer et al., 1991) gebruikt. In één geval is het weerbestand van het (warme) jaar 1992 van het KNMI-station in De Bilt gekozen.

Bij alle berekeningen met mechanische ventilatie is er naar gestreefd zoveel te ventileren dat een maximale kasluchttemperatuur overeenkomstig de maximumkasluchttemperatuur bij natuurlijke ventilatie wordt bereikt.

Bij de indirecte verdampingskoeling van het prototype met een gunstiger oppervlakteverhouding is alleen de grens aangehouden van maximaal 100 m³/(m².h) ventilatie. In dit rapport wordt de hoeveelheid voelbare en latente warmte die verloren gaat met ventilatie koelingsbehoefte genoemd.

Uitgaande van bovenstaande zijn met DESSIM90 de gevallen, weergegeven in tabel 2.1, berekend:

Tabel 2.1 Overzicht berekende gevallen.

Table 2.1 Overview calculated cases.

Berekeningsgeval	Type Ventilatie	Maximum-ventilatie-debiet ($\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)	Type Koeling
natuurlijke ventilatie $\text{VENT} = f(v_w, \Delta T)$	natuurlijk	f(windsnelheid, temperatuurverschil kas- en buitenlucht)	natuurlijk
mechanische ventilatie grondbuizen met t_{out} $\text{VENT} = 40 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	mechanisch	40	grondbuizen met buitenlucht
mechanische ventilatie grondbuizen met t_{air} $\text{VENT} = 40 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	mechanisch	40	grondbuizen met kaslucht
mechanische ventilatie indirecte verdamping, hoog rendement 75% $\text{VENT} = 40 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	mechanisch	40	indirecte verdampingskoeling
mechanische ventilatie indirecte verdamping, prototype-rendement 3,24 m^2 plaat/ m^2 kas $\text{VENT} = 100 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	mechanisch	100	indirecte verdampingskoeling
mechanische ventilatie indirecte verdamping, prototype-rendement 0,5 m^2 plaat/ m^2 kas $\text{VENT} = 100 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, weerdata SEL	mechanisch	100	indirecte verdampingskoeling
mechanische ventilatie indirecte verdamping, prototype-rendement 0,5 m^2 plaat/ m^2 kas $\text{VENT} = 100 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, weerdata 1992	mechanisch	100	indirecte verdampingskoeling

$\text{VENT} = f(v_w, \Delta T)$ houdt in een maximumventilatie-debiet als functie van windsnelheid (v_w in m/s) en het temperatuurverschil (ΔT in °C).

$\text{VENT} = 40$ en $100 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ geven een bovengrens voor het ventilatie-debiet van 40 respectievelijk $100 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$.

Alle berekeningsgevallen berekend met DESSIM90, versie 2.7.

3 Resultaten

Tabel 3.1 geeft voor de in paragraaf 2.5 genoemde gevallen de berekende waarden voor de optredende maximumkasluchttemperatuur, het aantal ventilatie-uren per jaar, het gemiddelde ventilatiedebiet, het totale jaarlijkse ventilatiedebiet en de benodigde hoeveelheid energie (warmtebehoefte) per jaar.

Tabel 3.1 Invloed wijze van ventileren op de maximumkasluchttemperatuur, het aantal ventilatie-uren, gemiddeld ventilatiedebiet, het totale ventilatiedebiet en de energiebehoefte.

Table 3.1 Effect of ways of ventilation on the maximum greenhouse air temperature, the number of ventilation hours, mean ventilation flux, the total ventilation flux and the energy requirement.

Berekeningsgeval	Maximum- kaslucht- tempe- ratuur (°C)	Aantal Ventilatie- uren per jaar (h)	Gemiddelde Ventilatie- debiet (m ³ /(m ² .h))	Totale Ventilatie- debiet per jaar (m ³ /m ²)	Energie- behoefte per jaar (kWh/m ²)
natuurlijke ventilatie VENT = $f(v_w, \Delta T)$	31,8	1813	65	117.000	410
mechanische ventilatie grondbuizen met t_{out} VENT = 40 m ³ /(m ² .h)	30,9	1978	25	49.000	410
mechanische ventilatie grondbuizen met t_{air} VENT = 40 m ³ /(m ² .h)	31,7	2048	25	52.000	409
mechanische ventilatie indirecte verdamping, hoog rend. 75% VENT = 40 m ³ /(m ² .h)	31,7	2107	25	53.000	408
mechanische ventilatie indirecte verdamping, prototype 3,24 m ² plaat/m ² kas VENT = 100 m ³ /(m ² .h)	31,0	2207	61	135.000	410
mechanische ventilatie indirecte verdamping, prototype 0,5 m ² plaat/m ² kas VENT=100 m ³ /(m ² .h), weerdata SEL	34,2	2304	70	162.000	406
mechanische ventilatie indirecte verdamping, prototype 0,5 m ² plaat/m ² kas VENT = 100 m ³ /(m ² .h), weerdata 1992	35,7	2539	73	185.000	368

VENT = $f(v_w, \Delta T)$ houdt in een maximumventilatiedebiet als functie van windsnelheid en het temperatuurverschil.

VENT = 40 en 100 m³/(m².h) geven een bovengrens voor het ventilatiedebiet van 40 respectievelijk 100 m³/(m².h).

Een energiebehoefte per jaar van 8,8 kWh/m² komt overeen met 1 m³ aardgas per m² per jaar.

In tabel 3.2 is, voor alle berekende gevallen, een overzicht gegeven van het maximaal bereikte ventilatiedebiet en het aantal uren dat het maximumventilatiedebiet wordt bereikt.

Tabel 3.2 Maximumventilatiedebiet en bijbehorend aantal uren voor alle berekende gevallen.
Table 3.2 Maximum ventilation flux and corresponding number of hours for all calculated cases.

Berekeningsgeval	Maximum-ventilatiedebiet ($\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)	Aantal uren maximum-ventilatiedebiet per jaar (h)
natuurlijke ventilatie VENT = $f(v_{wv} \Delta T)$	260 (≥ 40) ¹⁾	2 (1140) ¹⁾
mechanische ventilatie grondbuizen met t_{out} VENT = $40 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	40	1090
mechanische ventilatie grondbuizen met t_{air} VENT = $40 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	40	1200
mechanische ventilatie indirecte verdamping, hoog rend. 75% VENT = $40 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	40	1230
mechanische ventilatie indirecte verdamping, prototype 3,24 m^2 plaat/ m^2 kas VENT = $100 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	100	1010
mechanische ventilatie indirecte verdamping, prototype 0,5 m^2 plaat/ m^2 kas VENT = $100 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, weerdata SEL	100	1420
mechanische ventilatie indirecte verdamping, prototype 0,5 m^2 plaat/ m^2 kas VENT = $100 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, weerdata 1992	100	1710

¹⁾ Bij natuurlijke ventilatie bedraagt het aantal uren per jaar waarbij maximumventilatiedebiet $\geq 40 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ is 1140.

3.1 Natuurlijke ventilatie

Bij de natuurlijke ventilatie zien we (tabel 3.1) dat de maximaal optredende kasluchttemperatuur $31,8 \text{ }^\circ\text{C}$ wordt. In de andere berekeningen is getracht deze temperatuur zo goed mogelijk te benaderen en niet te overschrijden. Het aantal ventilatie-uren is 1813 uren bij een gemiddeld debiet over die uren van $65 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. Het totale ventilatiedebiet

per jaar is $117.000 \text{ m}^3/\text{m}^2$. De energiebehoefte wordt $410 \text{ kWh}/\text{m}^2$ per jaar. In tabel 3.2 zien we dat de maximale ventilatie $260 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ wordt, en wel 2 uur in de klasse $> 250 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. Bij onderstaande beschouwingen zal de natuurlijke ventilatie als referentie dienen.

3.2 Mechanische ventilatie met grondbuizen

Bij de mechanische ventilatie met grondbuizen wordt er òf buitenlucht (t_{out}) òf kaslucht (t_{air}) door de grondbuizen gevoerd. Mechanische ventilatie heeft ten opzichte van natuurlijke ventilatie een verhoging van het aantal ventilatie-uren tot gevolg. Bij een regeling op relatieve vochtigheid zal het aantal ventilatie-uren verder toenemen ten opzichte van de hier toegepaste temperatuurregeling (Van de Braak en Breuer, 1991). De maximale ventilatie (tabel 3.2) blijkt in beide gevallen van mechanische ventilatie met behulp van grondbuizen gelijk aan de ingestelde bovengrens van $40 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ te zijn. Bij deze bovengrens wordt de maximale kasluchttemperatuur van $31,8 \text{ }^\circ\text{C}$ die bij natuurlijke ventilatie optreedt niet overschreden.

– Grondbuizen met buitenlucht

Tabel 3.1 geeft aan dat bij de toepassing van grondbuiskoeling waarbij de buitenlucht door de grondbuizen wordt gevoerd de maximumkasluchttemperatuur met ongeveer $1 \text{ }^\circ\text{C}$ daalt ten opzichte van de natuurlijke ventilatie. Het aantal ventilatie-uren neemt met 165 uren toe. Het gemiddeld ventilatiedebiet, over de geventileerde uren, neemt sterk af met $40 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$.

Het totale ventilatiedebiet per jaar is $68.000 \text{ m}^3/\text{m}^2$ lager dan bij natuurlijke ventilatie. De energiebehoefte voor verwarming blijft onveranderd. In tabel 3.2 zien we dat het aantal uren met maximale ventilatie hoger ligt dan bij natuurlijke ventilatie, namelijk ca. 1100. Wanneer deze uren vergeleken worden met het aantal uren met een maximumventilatiedebiet van $40 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ of meer bij natuurlijke ventilatie -1140 uur-, worden deze gevallen vergelijkbaar.

– Grondbuizen met kaslucht

Bij de toepassing van grondbuiskoeling, waarbij de kaslucht door de grondbuizen wordt gevoerd, daalt de maximumkasluchttemperatuur met $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ ten opzichte van de natuurlijke ventilatie. Het aantal ventilatie-uren neemt met 235 uren toe. Het gemiddeld ventilatiedebiet neemt ook hier sterk af met $40 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. Het totale ventilatiedebiet per jaar is $65.000 \text{ m}^3/\text{m}^2$ lager dan bij natuurlijke ventilatie. De energiebehoefte blijft vrijwel onveranderd.

In tabel 3.2 zien we dat, als het aantal uren met maximale ventilatie vergeleken wordt met het aantal uren met een maximumventilatiedebiet van $40 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ of meer bij natuurlijke ventilatie -1140 uur-, er ook hier sprake is van een vergelijkbaar geval.

3.3 Mechanische ventilatie met indirecte verdampingskoeling

Bij de indirecte verdampingskoeling maken we onderscheid in drie typen: een hoogrendement apparaat, het prototype en een prototype met gunstiger oppervlakte-verhouding.

Ten opzichte van de natuurlijke ventilatie zal mechanische ventilatie met indirecte verdampingskoeling en slechts een $0,5 \text{ m}^2$ plaat per m^2 kas een aanmerkelijke verhoging van de maximumkasluchttemperatuur tot $34,2 \text{ }^\circ\text{C}$ plaatsvinden.

3.3.1 Invloed rendement

Toepassing van indirecte verdampingskoeling waarbij het temperatuurrendement op 75% is aangenomen, zal, zoals tabel 3.1 laat zien, ten opzichte van natuurlijke ventilatie en bij een vrijwel gelijkblijvende maximumkasluchttemperatuur het aantal ventilatie-uren doen toenemen met ca. 300 uur. Het gemiddeld ventilatiedebiet, neemt net als bij grondbuizen sterk af met $40 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, terwijl het totale ventilatiedebiet per jaar $64.000 \text{ m}^3/\text{m}^2$ lager is dan bij natuurlijke ventilatie. Ook hier blijft de energiebehoefte vrijwel onveranderd.

Tabel 3.2 laat zien dat bij indirecte verdampingskoeling met hoog rendement bij een bovengrens van $40 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ het aantal uren van maximale ventilatie ca. 100 uur hoger is.

Bij de toepassing van indirecte verdampingskoeling, waarbij de rendementen – zowel het temperatuurrendement als het rendement voor de absolute vochtigheid in de lucht – dezelfde zijn als gemeten bij het prototype, zakt de maximale kasluchttemperatuur met $0,8 \text{ }^\circ\text{C}$ ten opzichte van de natuurlijke ventilatie. Ten aanzien van de ventilatie-uren zien we een toename van bijna 400 uur. Het gemiddeld ventilatiedebiet daalt nu maar met $4 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, maar het totale ventilatiedebiet per jaar is $18.000 \text{ m}^3/\text{m}^2$ hoger dan bij natuurlijke ventilatie. De energiebehoefte blijft onveranderd.

Bij indirecte verdampingskoeling conform het prototype moest de bovengrens voor het ventilatiedebiet op $100 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ worden gesteld om de maximaal toelaatbare kasluchttemperatuur, zoals die bij natuurlijke ventilatie optreedt, niet te overschrijden.

3.3.2 Invloed plaatoppervlak

Bij de toepassing van indirecte verdampingskoeling, waarbij de rendementen dezelfde zijn als in het prototype maar met minder plaatoppervlak per m^2 kas -een mogelijk aangepaste versie-, zien we in tabel 3.1 dat de maximale kasluchttemperatuur stijgt tot $34,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Ten aanzien van de ventilatie-uren zien we een toename van bijna 500 uur. Het gemiddeld ventilatiedebiet stijgt nu met $5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, terwijl het totale ventilatiedebiet per jaar $45.000 \text{ m}^3/\text{m}^2$ hoger is dan bij natuurlijke ventilatie. De energiebehoefte blijft vrijwel onveranderd. Tabel 3.2 laat zien dat het aantal uren met maximale ventilatie ruim 400 uren hoger is dan bij het prototype zelf.

3.3.3 Invloed weergegevens

Bij alle berekeningen met uitzondering van één geval wordt het weerbestand SEL – referentiejaar voor de Nederlandse glastuinbouw – gebruikt. Bij één variant van mechanische ventilatie, indirecte verdampingskoeling en het rendement van een prototype met gunstiger oppervlakteverhouding, wordt een recent warm jaar, nl. 1992, van het KNMI-

station in De Bilt gebruikt. De belangrijkste weergegevens van de bestanden 'SEL' en '1992' zijn in tabel 3.3 weergegeven.

Tabel 3.3 Minimum-, maximum- en gemiddelde buitentemperatuur van referentiejaar (SEL) en het jaar 1992.

Table 3.3 *Minimum, maximum and mean values of outside temperature from reference year (SEL) and the year 1992.*

Buitentemperatuur (°C) gedurende:	Referentiejaar SEL (De Bilt)			KNMI-jaar 1992 (De Bilt)		
	min.	max.	gem.	min.	max.	gem.
gehele jaar	-13,8	28,8	9,4	-9,0	30,4	10,6
winterhalfjaar okt. t/m mrt.	-13,8	17,7	4,9	-9,0	16,6	5,7
zomerhalfjaar apr. t/m sept.	- 0,8	28,8	13,8	-0,7	30,4	15,4

Tabel 3.1 laat zien dat voor het warme jaar 1992 de maximale kasluchttemperatuur 1,5 °C hoger wordt dan bij het referentiejaar SEL en stijgt daarmee naar 35,7 °C. Het aantal ventilatie-uren stijgt met 235 ten opzichte van SEL en ruim 725 meer dan bij natuurlijke ventilatie.

Het gemiddelde ventilatiedebiet stijgt naar een niveau van 73 m³/(m².h). Het totale ventilatiedebiet per jaar is 68.000 m³/m² hoger dan bij natuurlijke ventilatie en 23.000 m³/m² hoger dan bij gebruikmaking van het referentiejaar. De energiebehoefte daalt sterk; per jaar 38 kWh/m² lager dan bij SEL en 42 kWh/m² minder dan bij natuurlijke ventilatie.

Tabel 3.2 toont dat het ingestelde maximum van 100 m³/(m².h) gedurende bijna 300 uur meer wordt bereikt dan bij SEL.

4 Discussie

De beschreven resultaten geven een aantal opmerkelijke zaken te zien, die in het volgende aan een nadere beschouwing zullen worden onderworpen.

- Voor alle berekende gevallen, met uitzondering van de variant met het warme jaar 1992, is de energiebehoefte per jaar weliswaar vrij constant maar op een relatief laag niveau van ca. 410 kWh/m^2 ($46,6 \text{ m}^3 \text{ gas}$). Een reden voor het lage niveau is dat er bij de berekeningen geen rekening is gehouden met een gevel en geen minimumbuis is toegepast.
De geringe verandering van de energiebehoefte kan verklaard worden omdat in alle gevallen bij benadering hetzelfde binnenklimaat is gerealiseerd bij dezelfde buitencondities. De energiebehoefte wordt voornamelijk bepaald in de winter/koudeperiode.
- Wanneer strikt op temperatuur geregeld wordt, geeft het simulatiemodel voor de natuurlijke ventilatie aan dat er slechts 1813 uren per jaar behoefte is aan ventilatie. Dit stemt goed overeen met een, niet gepubliceerde, berekende waarde van 1820 uur uit een haalbaarheidsstudie, betreffende luchtbehandelingssystemen voor kassen, zoals beschreven door Knies (1992).
- Mechanische ventilatie met behulp van luchtdoorvoer door grondbuizen verhoogt het aantal ventilatie-uren met 165 - 235 ten opzichte van natuurlijke ventilatie. Het gemiddelde ventilatiedebiet zakt echter sterk terug met ca. $40 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. Ruim de helft van het aantal ventilatie-uren wordt er op maximumwaarde geventileerd. Het totale jaarlijkse ventilatiedebiet neemt af met $65.000 - 68.000 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Bij de simulatie van de grondbuizen is ervan uitgegaan dat de seizoenafhankelijke grondtemperatuur op 3 m diepte niet wordt beïnvloed door de warmteafgifte van de lucht die door de buizen stroomt. Dit is een situatie waarbij het grondbuizensysteem maximaal kan presteren. De resultaten geven dus een indicatie van het best haalbare. In het algemeen zal de temperatuur van de grond wel stijgen waardoor er meer geventileerd zal moeten worden.
- Mechanische ventilatie bij grondbuizen leidt tot een aanzienlijke daling van het gemiddelde ventilatiedebiet en het totale jaarlijkse ventilatiedebiet, maar niet tot een daling van de energiebehoefte voor verwarming. Dit is toe te schrijven aan het feit dat in het model de hoge ventilatiedebieten bij mechanische ventilatie vooral in de zomer optreden. Juist in deze periode wordt er weinig gestookt zodat dit geen effect heeft op de energiebehoefte.
- Mechanische ventilatie met behulp van indirecte verdampingskoeling conform het prototype zal ten opzichte van natuurlijke ventilatie het aantal ventilatie-uren met ca. 400 doen toenemen, terwijl het gemiddelde ventilatiedebiet gering afneemt met $4 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. Bijna de helft van het aantal ventilatie-uren wordt er op maximale waarde geventileerd. Het totale jaarlijkse ventilatiedebiet neemt toe met $18.000 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Gaan we uit van het prototype met gunstiger oppervlakteverhouding -minder m^2 plaat per m^2 grond- dan zal ten opzichte van natuurlijke ventilatie het aantal ventilatie-uren met ca. 500 uur toenemen en het gemiddelde ventilatiedebiet met $5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, het totale jaarlijkse ventilatiedebiet neemt toe met $45.000 \text{ m}^3/\text{m}^2$, maar de maximale kasluchttemperatuur zal oplopen tot een niet acceptabele waarde van meer dan $34 \text{ }^\circ\text{C}$. Houdt men rekening met het feit dat actuele jaren, zoals 1992, nog warmer kunnen zijn, dan zijn zelfs kasluchttemperaturen van bijna $36 \text{ }^\circ\text{C}$ niet uitgesloten.

- Het prototype met een gunstiger oppervlakteverhouding blijkt geen echte verbetering in te houden. Dit ligt in de lijn der verwachting aangezien een lagere plaatoppervlakte/kasoppervlakte-verhouding ook betekent dat er minder energie afgevoerd kan worden.
- Meer ventilatie bij toepassing van het weerbestand '1992' ten opzichte van 'SEL' wordt veroorzaakt door de relatief warme zomer van het jaar 1992. De gemiddelde buitentemperatuur in '1992' bedroeg 15,4 °C tegen 13,8 °C in het referentiejaar (SEL). De aanmerkelijk lagere energiebehoefte in '1992' is veroorzaakt doordat én de gemiddelde zomertemperatuur hoger was én de gemiddelde wintertemperatuur (gemiddelde over de maanden oktober tot en met maart) 5,7 °C bedroeg tegenover 4,9 °C in SEL. Bovendien is de minimumbuitentemperatuur in de winterperiode bij SEL aanmerkelijk lager dan in 1992.

Het gebruik van mechanische ventilatie zal vanzelfsprekend leiden tot een toename van het elektrisch energieverbruik. Vollebregt en De Jong (1993) geven als indicatie voor het elektriciteitsverbruik ten behoeve van de ventilatie, voor het geval dat de indirecte verdampingskoeler met een 0,5 m² per m² kas wordt toegepast bij een ventilatiedebiet van 100 m³/(m².h) en een drukval van ca. 60 Pa – uitsluitend de indirecte verdampingskoeler –, een benodigd nuttig ventilatorvermogen van 4 W per m² kas. In tabel 3.2 zien we dat in dat geval bij toepassing van het referentiejaar SEL het aantal uren per jaar dat het maximumventilatiedebiet geldt 1420 bedraagt, waardoor het elektriciteitsverbruik op basis van maximale ventilatie en een ventilatorrendement van 75%, per jaar 7,57 kWh/m² wordt. Bij een jaarlijkse ventilatiebehoefte van 162.000 m³/m² (tabel 3.1) wordt het jaarlijks energieverbruik aan elektriciteit dan ca. 8,6 kWh/m². Uitgaande van f 0,25/kWh bedragen de elektriciteitskosten voor bovengenoemd geval jaarlijks ca. f 2,15/m².

De Jong et al. (1993) berekenen bij temperatuurregeling een benodigd jaarlijks elektriciteitsverbruik van 30 kWh/m² voor de goedkoopste uitvoering van een verdampingskoeler (gesloten, decentraal) in de vorm van een platenwarmtewisselaar, inclusief toe- en afvoersecties. Voor de berekening geldt: een debiet van 90 m³/(m².h), een aantal ventilatie-uren van 1900, een drukverlies van 300 Pa en een ventilatorrendement van 75%. Bij een jaarlijkse ventilatiebehoefte van 162.000 m³/m² (tabel 3.1) wordt het energieverbruik dan ca. 28 kWh/m². Uitgaande van f 0,25/kWh bedragen de elektriciteitskosten voor dit geval jaarlijks ca. f 7,00/m².

5 Conclusies

Uit het onderzoek met het simulatiemodel DESSIM90 naar de effecten van verschillende ventilatiemethoden zijn de volgende conclusies te trekken:

- Met natuurlijke ventilatie (raamventilatie) is het mogelijk bij een normaal jaar (SEL) de maximale kasluchttemperatuur te begrenzen op ca. 32 °C.
- Bij mechanische ventilatie en een temperatuurregeling is het, afhankelijk van de gehanteerde maximale ventilatiecapaciteit, mogelijk om een zelfde maximale kasluchttemperatuur te handhaven als bij natuurlijke ventilatie.
- Gebruik van mechanische ventilatie en een temperatuurregeling leiden in het algemeen, maar zeker bij gebruikmaking van grondbuizen of een indirecte verdampingskoeler, tot meer ventilatie-uren ten opzichte van natuurlijke ventilatie. Het aantal uren dat er geventileerd wordt, neemt toe met 200 - 700 uur tot een niveau van 2000 - 2500 uur. Bij een regeling op relatieve vochtigheid zal het aantal uren verder toenemen. De toepassing van de grondbuizen of een indirecte verdampingskoeler leidt, ten opzichte van de natuurlijke ventilatie, echter wel tot een verlaging van het maximumventilatie-debiet.
- Mechanische ventilatie leidt, door het gebruik van ventilatoren, tot een verhoging van het elektriciteitsverbruik.
- Bij de onderzochte gevallen van mechanische ventilatie vormt het aantal uren dat op maximale capaciteit geventileerd moet worden een aanzienlijk deel (ca. 50% of meer) van het totaal aantal uren dat er geventileerd wordt.
- Bij mechanische ventilatie met behulp van grondbuizen, die alle warmte ongehinderd kunnen afvoeren, is een maximumventilatiecapaciteit van 40 m³/(m².h) bij een totale jaarlijkse ventilatie van ca. 50.000 m³/m² voldoende voor het handhaven van dezelfde maximale kasluchttemperatuur als bij natuurlijke ventilatie.
- Bij mechanische ventilatie met behulp van indirecte verdampingskoeling, met rendementen en een plaatoppervlak/kasoppervlak-verhouding conform het prototype, is een maximumventilatiecapaciteit van 100 m³/(m².h) bij een jaarlijkse ventilatie van 135.000 m³/m² voldoende voor het handhaven van dezelfde maximale kasluchttemperatuur als bij natuurlijke ventilatie. Bij een indirecte verdampingskoeler met een temperatuurrendement van 75% is zelfs een maximale ventilatiecapaciteit van 40 m³/(m².h) voldoende.
- Uitgaande van een temperatuurregeling in de kas en afgezien van een economische waardering blijkt dat mechanische ventilatie door middel van indirecte verdampingskoeling globaal gesproken, wellicht met uitzondering van de gevallen waarbij er minder m² plaat per m² kas verondersteld worden, tot de reële toepassingsmogelijkheden behoort.
- Het prototype indirecte verdampingskoeler met gunstiger oppervlakteverhoudingen blijkt klimaattechnisch geen echte verbetering in te houden.
- Indien bij indirecte verdampingskoeling de verhouding tussen plaat- en grondoppervlak, voor prototype 3,24 : 1, wordt verlaagd tot 0,5 : 1, moet er rekening worden gehouden met hogere benodigde ventilatiehoeveelheden om de maximale kasluchttemperatuur, zoals die bij natuurlijke ventilatie optreedt, te kunnen handhaven.

- Een warm jaar, zoals 1992, zal het aantal uren dat ventilatie nodig is met ca. 200 doen toenemen. De bijbehorende, gemiddelde ventilatie gaat iets omhoog. Het aantal uren dat er op maximale capaciteit zal worden geventileerd neemt echter toe met circa 300 uur. Ook de totale jaarlijkse ventilatie zal sterk toenemen tot een niveau van $185.000 \text{ m}^3/\text{m}^2$.

Het onderzoek naar het ventilatiegedrag is uitgevoerd in het kader van het ontwerp van luchtbehandelingsinstallaties voor gesloten kassen. In dat kader zijn de volgende constatering van belang:

- Bij gebruik van grondbuizen met een oneindige warmteafvoer is een maximumventilatie-debiet van $40 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ voldoende om dezelfde maximale kasluchttemperaturen te bereiken als bij natuurlijke ventilatie met buitenlucht. Bij het toepassen van een indirecte verdampingskoeler met een temperatuurrendement van ten minste 75% kan eveneens worden volstaan met $40 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. Bij een indirecte verdampingskoeler die qua rendement(en) gelijk is aan het onderzochte prototype is dan echter $100 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ vereist.
- Bij toepassing van indirecte verdampingskoeling met een gunstiger oppervlakteverhouding zal de kasluchttemperatuur, bij inzet van een zelfde maximale ventilatiehoeveelheid van $100 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, oplopen tot ruim $34 \text{ }^\circ\text{C}$. In een warm jaar, zoals 1992, kan dit zelfs bijna $36 \text{ }^\circ\text{C}$ worden.
- Indien louter op maximale kasluchttemperatuur geventileerd en/of gekoeld zou worden, is het aantal uren dat geventileerd wordt met natuurlijke ventilatie 1800 uur per jaar. Bij toepassing van mechanische ventilatie loopt dat op tot ongeveer 2000 - 2500 uur.
- De totale jaarlijkse ventilatiehoeveelheid ligt bij grondbuiskoeling ca. $65.000 \text{ m}^3/\text{m}^2$ lager dan bij natuurlijke ventilatie, terwijl die bij indirecte verdampingskoeling, conform het prototype, circa $18.000\text{-}45.000 \text{ m}^3/\text{m}^2$ hoger ligt.

Summary

Knowledge of the ventilation and related energy requirements of greenhouses is important with respect to the design and development of air conditioning systems for greenhouses without vents. By means of a computer simulation model, **DESSIM90**, the ventilation and cooling requirements of greenhouses with a tomato-crop have been investigated. The effects of mechanical ventilation in combination with soilpipes or indirect evaporative cooling are described and compared with natural ventilation. The data for indirect evaporative cooling were based on previous experimental research.

The results show that mechanical ventilation in combination with soilpipes or indirect evaporative cooling, from a climatic point of view, can be an alternative for natural ventilation.

Comparison of mechanical ventilation in combination with soilpipes with natural ventilation show in the case of mechanical ventilation plus cooling by soilpipes that by a maximum ventilation flux of $40 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, the mean ventilation flux $25 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ is against the $65 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ by natural ventilation and the yearly air exchange of about $50.000 \text{ m}^3/\text{m}^2$ is much lower than the $117.000 \text{ m}^3/\text{m}^2$ for natural ventilation but that the number of ventilation hours of around 2000 hours against 1800 by natural ventilation are somewhat higher. In case of mechanical ventilation in combination with indirect evaporative cooling, and using experimentally determined efficiencies of a prototype indirect evaporative cooler, requires maximum ventilation fluxes of $100 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. The number of ventilation hours is a good 2200 - 2300, that means 400 - 500 hours more than for natural ventilation. The yearly total ventilation is $18.000 - 45.000 \text{ m}^3/\text{m}^2$ higher. By using an indirect evaporative cooler with a high efficiency compared to the prototype (e.g. 75%), a maximum ventilation flux of $40 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ appeared to be sufficient. In that case, the number of ventilation occurs for a good 2100 hours and the yearly total ventilation is $64.000 \text{ m}^3/\text{m}^2$ lower than by natural ventilation.

Literatuur

- Braak, N.J. van de en J.J.G. Breuer, 1991. Ventilatie in kassen. DLO Instituut voor Mechanisatie, Arbeid en Gebouwen, Wageningen, IMAG-DLO rapport 91-14, 21 pp.
- Breuer, J.J.G., A.M. van Weele en A.H.C. van Paassen, 1991. Referentiejaar voor de Nederlandse glastuinbouw. Klimaatbeheersing 20(4) p. 110-113.
- Breuer, J.J.G. en N.J. van de Braak, 1994. Een statisch en een dynamisch simulatiemodel voor klimaatprocessen en energiestromen in kassen. DLO Instituut voor Milieu- en Agritechniek, Wageningen, IMAG-DLO rapport 94-9, 58 pp.
- France, J. and J.H.M. Thornley, 1984. Mathematical models in agriculture. Butterworths & Co (publishers) Ltd., London, 335 pp.
- IBM, 1975. Continuous System Modeling Program III (CSMP-III); Program Reference manual. International Business Machines Corporation, New York, USA, Fourth Edition, SH 19-7001-3, 206 pp.
- Jong, T. de, 1990. Natural ventilation of large multi-span greenhouses. Landbouw-universiteit, Wageningen, Ph. D. Dissertation, 117 pp.
- Jong, T. de, N.J. van de Braak, J.J.G. Breuer, P. Knies en H.J.M. Vollebregt, 1993. Ontwerp van klimaatbeheersingsapparatuur voor gesloten kassysteem; Rapportage van de eerste fase van het onderzoek. DLO Instituut voor Mechanisatie, Arbeid en Gebouwen, Wageningen, IMAG-DLO rapport 93-20, 31 pp.
- Knies, P., 1992. Beheersing kasklimaat in een gesloten bedrijfssysteem. Vakblad voor de Bloemisterij 47(2), p. 44-47.
- Lange, J.M., [1992]. Verslag van het demonstratieproject "Toepassing van grondbuizen bij de ventilatie op een champignonbedrijf". DLO Instituut voor Mechanisatie, Arbeid en Gebouwen, Wageningen, IMAG-DLO rapport, 198 pp.
- Vollebregt, H.J.M. en T. de Jong, 1993. Experimenteel onderzoek aan indirecte verdampingskoeling. DLO Instituut voor Mechanisatie, Arbeid en Gebouwen, Wageningen, IMAG-DLO rapport 93-13, 57 pp.

Symbolen

Symbolenlijst

		Eenheid
a_y	= gemiddelde grondtemperatuur over een geheel jaar	°C
b_y	= gemiddelde amplitude grondtemperatuur over een geheel jaar	°C
$FVENT_{max}$	= maximale luchtdebiet bij natuurlijke ventilatie	$m^3/(m^2 \cdot s)$
FV_{iec}	= langsstromend luchtdebiet (kaszijde) bij indirecte verdampingskoeler	$m^3/(m^2 \cdot s)$
$f(v_w, \Delta T)$	= functie van windsnelheid en temperatuurverschil tussen kas- en buitenlucht	-
N	= dagnummer	-
N_0	= dagnummer waarbij gemiddelde grondtemperatuur a_y wordt bereikt	-
t_{air}	= kasluchttemperatuur (rondom gewas)	°C
t_{air2}	= kasluchttemperatuur bovenste deel kas	°C
t_{ecout}	= uittrede-temperatuur van de lucht uit de indirecte verdampingskoeler	°C
t_{out}	= buitenluchttemperatuur	°C
t_{pliec}	= plaattemperatuur indirecte verdampingskoeler	°C
$t_{soil(3m)}$	= grondtemperatuur op 3 m diepte (8e laag) op dag N	°C
t_{spout}	= uittrede-temperatuur van de lucht uit de grondbuizen	°C
v_w	= windsnelheid	m/s
x_{air}	= absolute vochtigheid kaslucht (rondom gewas)	g/kg
x_{ecout}	= absolute vochtigheid uittrede-lucht indirecte verdampingskoeler	g/kg
x_{pliec}	= absolute vochtigheid bij plaat indirecte verdampingskoeler (kaszijde)	g/kg
η_{Tec}	= temperatuurrendement van de indirecte verdampingskoeler	-
$\eta_{Tsoilpipe}$	= temperatuurrendement van het grondbuizensysteem	-
η_{Xec}	= absolute vochtigheidsrendement van de indirecte verdampingskoeler	-

Rapportenoverzicht 1994

- 94-1 Bleijenberg, R. en J.P.M. Ploegaert 1994 – Handleiding voor de IMAG-DLO meetmethode ter bepaling van ammoniakemissies uit mechanisch geventileerde stallen. Wageningen, IMAG-DLO rapport, 77 pp. f 40,00
- 94-2 Hendriks, J.G.L. en J.F.M. Huijsmans 1994 – Trekkkrachtbehoefte van sleepvoeten en zodebemestertechnieken op grasland. Wageningen, IMAG-DLO rapport, 44 pp. f 35,00
- 94-3 Elderen, E. van en G.H. Kroeze 1994 – Operational decision making for arable and grassland farms. Wageningen, IMAG-DLO rapport, 74 pp f 35,00
- 94-4 Huis in 't Veld, J.W.H., Kroodsmā, W. en W.J. de Boer 1994 – Vermindering ammoniakemissie uit een ligboxenstal door spoelen van een hellende betonvloer. Wageningen, IMAG-DLO rapport, 24 pp f 30,00
- 94-5 Arts, W.B.M., Verwijs, B.R. en J. van Maanen 1994 – De invloed van berijding op de fysische bodemconditie van zandgrond en de gevolgen daarvan voor de grasproductie. Wageningen, IMAG-DLO rapport, 69 pp. f 35,00
- 94-6 Boer, W.J. de, Keen, A. en G.J. Monteny 1994 – Het effect van spoelen op de ammoniakemissie uit melkveestallen. Het schatten van behandelingseffecten en nauwkeurigheden door tijdreeksanalyse. Wageningen, IMAG-DLO rapport, 32 pp. f 30,00
- 94-7 Huis in 't Veld, J.W.H., Boer, W.J. de en W. Kroodsmā 1994 – Ammoniakemissiereductie door spoelen van een hellende, gecoate betonvloer in een rundveestal. Wageningen, IMAG-DLO rapport, 25 pp. f 30,00
- 94-8 Breemhaar, H.G. en A. Bouman 1994 – Mechanische oogst en schoning van nieuwe oliehoudende gewassen. Wageningen, IMAG-DLO rapport, 34 pp. f 30,00
- 94-9 Breuer, J.J.G. en N.J. van de Braak 1994 – Een statisch en dynamisch simulatiemodel voor klimaatprocessen en energiestromen in kassen. Wageningen, IMAG-DLO rapport, 58 pp. f 40,00
- 94-10 Breuer, J.J.G. en N.J. van de Braak 1994 – Effect van grondbuiskoeling en indirecte verdampingskoeling op de ventilatie in kassen. Wageningen, IMAG-DLO rapport, 27 pp. f 30,00
- 94-11 Lokhorst, C., Smits, A.C., Niekerk, Th. van en A.M. van de Weerdhof 1994 – Programma van Eisen voor de inrichting van volièrestallen voor leghennen. Wageningen, IMAG-DLO rapport, 51 pp. f 30,00
- 94-12 Straelen, B.C.P.M. van 1994 – Remsystemen voor landbouwwagens. Wageningen, IMAG-DLO rapport, 65 pp. f 30,00
- 94-13 Swierstra, D., Huis in 't Veld, J.W.H., Kroodsmā, W. en M.C.J. Smits 1994 – Ammoniakemissie en stroefheid van roostervloeren en dichte vloeren in ligboxenstallen voor rundvee. Wageningen, IMAG-DLO rapport, 26 pp. f 30,00

94-16 Ketelaar-de Lauwere, C.C. en E. Benders, 1994. – De invloed van het additioneel verstrekken van krachtvoer in de selectiebox en het melken op de bezoeken van koeien aan het automatisch melksysteem.
Wageningen, IMAG-DLO rapport, 21 pp. f 30,00

De rapporten kunt u schriftelijk bestellen door overmaking van het genoemde bedrag op Postbanknummer 3514771 ten name van IMAG-DLO te Wageningen, onder vermelding van het rapportnummer.

Reports must be ordered by transferring the appropriate amount (in Dutch Guilders) to the IMAG-DLO account, no. 3514771, at the Postbank, Wageningen, quoting the relevant report number(s)