Een statisch en een dynamisch simulatiemodel voor klimaatprocessen en energiestromen in kassen

A static and a dynamic simulation model for climate processes and energy fluxes in greenhouses

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

imag-dlo

LANDBOUW-ECONOMISCH INSTITUUT DEN HAAG BIBLIOTHEEK
SIGN: R606-94/9
EX. NO:
MLV: 1994410504

rapport 94-9
juni 1994
prijs *f* 40,–

CIP-GEGEVENS KONINKLIJKE BIBLIOTHEEK, DEN HAAG

Breuer, J.J.G.

Een statisch en een dynamisch simulatiemodel voor klimaatprocessen en energiestromen in kassen / J.J.G. Breuer, N.J. van de Braak. - Wageningen : IMAG-DLO. - III. (Rapport / Dienst Landbouwkundig Onderzoek, Instituut voor Milieu- en Agritechniek ; 94-9)
Met lit. opg. - Met samenvatting in het Engels.
ISBN-90-5406-078-6 geb.
NUGI 849
Trefw.: energieverbruik ; kassen ; simulatiemodellen.

© 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: Een statisch en een dynamisch simulatiemodel voor klimaatprocessen en energiestromen in kassen. *A static and a dynamic simulation model for climate processes and energy fluxes in greenhouses.* (Org. NL), IMAG-DLO (1994) rapport 94-9, 58 pag., 4 tab., 6 fig., 56 form., 42 ref., ISBN-90-5406-078-6.

A description of a static and dynamic simulation model for greenhouses is given. The static model (**JBDK90**) gives a simplified representation of the greenhouse production system and can be used to calculate, on an hourly basis, the effects of various (static) input variables on the energy requirements.
The dynamic model (**DESSIM90**) which describes the dynamic behaviour of the greenhouse production system is important when insight into the behaviour of the complex greenhouse production system is needed, for instance when effects of different control strategies or air conditioning systems on greenhouse climate, crop response and related energy requirements are studied. For both models examples are described. Results of both models are validated.

Keywords: energy consumption ; greenhouses ; simulation models.

Voorwoord

In de sector glastuinbouw wordt gezocht naar technologie en produktiemethoden die het milieu minder vervuilen. De eisen die gesteld worden aan de energie-efficiency en de reductie van de emissie van kooldioxyde (CO_2) bij kassen moeten op termijn leiden tot een duurzame glastuinbouw in Nederland.
Modelbouw en simulatie worden meer en meer een werktuig voor technisch/wetenschappelijk onderzoek en een hulpmiddel bij de besluitvorming. Zoals in een boek over simulatie wordt gezegd: "De periode lijkt aangebroken waarin we modellen en hun computersimulatie kunnen gebruiken om te evalueren wat we doen en in te schatten wat we willen, als we maar methodisch te werk gaan".
Simulatiemodellen zijn dan ook een belangrijk hulpmiddel bij het bereiken van deze doelstellingen. Met de simulatiemodellen is het mogelijk om een relatief snel antwoord te kunnen krijgen op de vraag 'n hoeverre bepaalde maatregelen effect zullen sorteren.
In dit rapport worden twee simulatiemodellen beschreven die direct toepasbaar zijn bij het berekenen van energie- en klimaattechnische aspecten in kassen.

Ir. A.A. Jongebreur
directeur

Inhoud

Samenvatting 8

1 Inleiding 9

2 Statisch simulatiemodel JBDK90 11
2.1 Opbouw model JBDK90 11
2.2 Invoergegevens 11
2.3 Modules 12
2.3.1 Constante of windafhankelijke U-waarde 12
2.3.2 Teeltkeuze 13
2.3.3 Weerdata 13
2.3.4 Transmissiecoëfficiënt 13
2.3.5 Minimumbuis 13
2.3.6 Droogstoken 14
2.3.7 Lichtafhankelijk regelen 14
2.3.8 Schermen 14
2.3.9 Temperatuurwijziging 14
2.3.10 Ketelrendement 15
2.4 Rekenprocedure 15
2.4.1 Bepaling temperatuurniveaus 15
2.4.2 Bepaling warmtedoorgangscoëfficiënt kas (U-waarde) 16
2.4.3 Berekening warmtebehoefte 17
2.4.3.1 Warmtebehoefte rekening houdend met transmissie en zoninstraling 18
2.4.3.2 Warmtebehoefte bij de toestand minimumbuis 18
2.4.3.3 Warmtebehoefte door droogstoken 19
2.4.3.4 Volgorde berekening 19
2.4.3.5 Sommaties 19
2.5 Uitvoer 20
2.6 Voorbeeld 21

3 Dynamisch simulatiemodel DESSIM90 25
3.1 Opbouw model DESSIM90 25
3.2 Invoergegevens 28
3.3 Modules 29
3.3.1 Temperatuurregeling 29
3.3.2 Relatieve vochtigheidsregeling 29
3.3.3 Scherm 29
3.3.4 Ventilatie 30
3.3.4.1 Natuurlijke ventilatie 30
3.3.4.2 Mechanische ventilatie met behulp van grondbuizen 30
3.3.4.3 Mechanische ventilatie met behulp van indirecte verdampingskoeling 31
3.4 Rekenprocedure 33

3.5 Uitvoer 35
3.6 Voorbeeld 35
3.6.1 Gemodelleerde kas 35
3.6.2 Berekeningen 35

4 Verificatie en validatie 38
4.1 Vergelijking met praktijk voor JBDK90 38
4.2 Vergelijking met praktijk voor DESSIM90 39
4.3 Onderlinge vergelijking JBDK90 en DESSIM90 39

5 Slotopmerkingen 41

Summary 42

Literatuur 43

Symbolen 46

Bijlagen 48
A. "Stroomschema" DESSIM90
B. Formules DESSIM90

Samenvatting

Kennis van fysische processen in kassen is van belang voor energie- en klimaatstudies in de glastuinbouw. Met behulp van simulatiemodellen kunnen de belangrijkste processen in de kas en hun effecten worden beschreven en geanalyseerd.
In dit rapport worden een statisch en dynamisch simulatiemodel beschreven. Met het statische model (**JBDK90**), dat de werkelijkheid sterk vereenvoudigd weergeeft, kan in veel gevallen worden volstaan. Het betreft dan bijvoorbeeld de indicatieve energieberekeningen op uurbasis.

Met het dynamische model (**DESSIM90**) kan het dynamische gedrag van het klimaat in een kas worden beschreven. Dit is van belang voor studies waarbij meer inzicht in het complexe produktiesysteem vereist is. Hierbij kan gedacht worden aan het bestuderen van effecten op het klimaat in de kas en de bijbehorende energiebehoefte van de verschillende regelstrategieën of klimaatbeheersingssytemen.
Dit model is niet in zijn geheel gevalideerd, maar is opgebouwd uit voor het merendeel gevalideerde onderdelen. Het levert daarom een goede basis voor vergelijkende berekeningen. Voor de modellering van het scherm is gekozen voor een grotendeels fysische benadering.
De uitkomsten van beide modellen zijn gedeeltelijk getoetst aan praktijkgegevens.

1 Inleiding

Modelbouw en simulatie worden meer en meer een werktuig voor technisch/wetenschappelijk onderzoek en een hulpmiddel bij de besluitvorming. Zoals in het voorwoord van een boek over simulatie wordt gezegd: "De periode lijkt aangebroken waarin we modellen en hun computersimulatie kunnen gebruiken om te evalueren wat we doen en in te schatten wat we willen, als we maar methodisch te werk gaan" (Kettenis, 1990). Vanuit die optiek zijn op het IMAG-DLO twee simulatiemodellen ontwikkeld ten behoeve voor de glastuinbouw.
Een simulatiemodel is een computerprogramma, gebaseerd op een wiskundige of andere beschrijving van een systeem. Door middel van het computerprogramma worden de toestandsveranderingen van het gemodelleerde systeem beschreven. Experimenten met een computerprogramma dat het gedrag van een systeem beschrijft, wordt een computersimulatie of kortweg een simulatie genoemd (Kettenis, 1990).

In dit rapport wordt een onderscheid gemaakt in een statisch en een dynamisch model. In een statisch simulatiemodel wordt bij elke stap in de tijd voor de berekening van de toestandsgrootheden uitgegaan van een evenwichtssituatie. Deze wordt bepaald door de randvoorwaarden. Wanneer men spreekt over dynamische simulatie wordt niet meer uitgegaan van een evenwichtssituatie. In de berekeningen worden de opslagcapaciteiten van het systeem niet verwaarloosd. De toestandsgrootheden op een bepaald tijdstip worden mede bepaald door de waarden van deze toestandsgrootheden op een eerder tijdstip. Beide kunnen ook worden ondergebracht onder de term continue simulatiemodellen; immers beide hebben te maken met de onafhankelijke variabele -de tijd-, die continu verandert.

Na de eerste energiecrisis (1973) heeft het IMAG-DLO een statisch simulatiemodel 'Rekenmodel Energiebehoefte in kassen' ontwikkeld waarmee het mogelijk was de energietechnische maatregelen op hun effecten door te rekenen (Breuer, 1976). Met geactualiseerde versies van het model is steeds opnieuw onderzoek verricht (Breuer, 1983, 1987 en 1989). Het computermodel is via de talen CSMP (voor main-frame), BASIC (voor HP-85, HP-200) laatstelijk vertaald in FORTRAN-77 voor gebruik op MS-DOS-achtige computers en VAX-4200 (Bolk, 1992). Dit laatste is gebeurd in het kader van het DLO-onderzoekprogramma 134 'Beperking energieverbruik en emissies in de beschermde teelten'. Bij deze nieuwe versie (JBDK90) is het mogelijk om het model vijf verschillende teelten (tomaten, sla, potplanten, anjers 1e-jaar en anjers 2e-jaar) bij meerdere grote weerdatabestanden, waaronder het referentiejaar voor de Nederlandse glastuinbouw –SEL – , (Breuer et al., 1991) te laten doorrekenen. In het statische simulatiemodel zijn weliswaar alle randvoorwaarden behorende bij de diverse gewassen (teelten) opgenomen, maar geen simulatie van het gedrag van het gewas.

In het kader van het DLO-onderzoekprogramma 'Beperking energieverbruik en emissies in de beschermde teelten' heeft het IMAG-DLO met behulp van CSMP ook een dynamisch simulatiemodel ontwikkeld, genaamd DESSIM90. Het dynamische simulatiemodel is voor een belangrijk deel gebaseerd op een fysisch klimaatmodel, beschreven door Bot (1983)

en De Jong (1985), een gewasmodel voor CO_2- en waterrelaties, zoals beschreven door Marcelis (1987), de fotosynthese en warmtestromen in het gewas over drie gewaslagen, door Goudriaan (1987), en een koppeling van het gewasmodel en het kasklimaatmodel, door Houter (1987).
Met DESSIM90 kan een tomatenteelt voor meerdere weerdatabestanden, waaronder het referentiejaar voor de Nederlandse glastuinbouw, worden doorgerekend. In het dynamische simulatiemodel is, naast de randvoorwaarden die bij een gewas horen, ook een gewasmodel opgenomen.

Veelal werken simulatiemodellen voor het kasklimaat met een beperkte dataset van weergegevens (Van Bavel en Damagnez, 1978; Bot, 1983; De Jong, 1985; Houter, 1987). Ook het HORTICERN-model (Jolliet et al., 1989) werkt met een beperkte dataset.
De door het IMAG-DLO ontwikkelde simulatiemodellen die hier beschreven worden, onderscheiden zich hiervan, omdat zij wel werken met een compleet jaarbestand (365 dagen van 24 uur) aan weergegevens. Daartoe heeft het IMAG-DLO, naast de aankoop van actuele, jaarlijkse weerbestanden ook een referentiejaar voor de Nederlandse glastuinbouw ontwikkeld (Breuer et al., 1991). Ook in het model van Houter (1990) en in een latere versie daarvan, het ECP-model, (Rijsdijk en Houter, 1993) wordt gewerkt met een weerdataset die een geheel jaar kan omvatten, waarbij gebruik gemaakt kan worden van hetzelfde referentiejaar voor de Nederlandse glastuinbouw.

De twee beschreven simulatiemodellen, ieder op zijn eigen wijze, zijn in staat de invloed van diverse factoren zichtbaar te maken. Het statische simulatiemodel (JBDK90) kan de invloed zichtbaar maken van factoren als: U-waarde, minimumbuis en verandering van stooktemperatuur etc. Het dynamische simulatiemodel (DESSIM90) kan de invloed zichtbaar maken van factoren als: temperatuurregeling en relatieve vochtigheidsregeling op gewasverdamping, op de energiebehoefte etc.

In dit rapport worden beide simulatiemodellen beschreven en worden enkele voorbeelden van toepassingen weergegeven.

2 Statisch simulatiemodel JBDK90

Het statische simulatiemodel **JBDK90** (JaarBelastingsDuurKromme voor de jaren negentig) is hoofdzakelijk gebaseerd op een uurlijkse berekening van de energiebehoefte (warmtebehoefte). Vooral in verband met de toepassing van rest- en afvalwarmte is in het model, naast de berekening van de energiebehoefte, de nadruk gelegd op de bepaling van belastingsduurkrommen.
Er bestaan twee versies van JBDK90 namelijk een versie voor de PC (80386 met MS-DOS) – **JBDK90PC** – en een versie voor de VAX-4200 – **JBDK90MV** –. De modelversies JBDK90PC en JBDK90MV zijn in algemene zin gelijk. Beide zijn gebaseerd op dezelfde set formules, kunnen dezelfde bestanden oproepen en geven gelijke uitkomsten.
Het simulatiemodel kan voor de verschillende teelten de invloed zichtbaar maken van factoren als: constante of windafhankelijke warmtedoorgangscoëfficiënt (U-waarde), verschillende weerbestanden, transmissiecoëfficiënt dek, minimumbuis, droogstoken, schermen, verlaging stooktemperatuur, ketelrendementen en een lichtafhankelijke regeling van teelt-, ventilatie- en aanvoerwatertemperaturen.

2.1 Opbouw model JBDK90

In het model JBDK90 zijn verschillende onderdelen van het kas-gewas systeem opgenomen. Daarin zijn te onderscheiden: het kasdek, de kaslucht, de verwarmingspijpen en de buitenlucht.

De belangrijkste processen die het model beschrijft zijn:
- de warmte-uitwisseling door transmissie tussen kas en buitenlucht
- de inkomende zonnestraling
- lekverlies door ventilatie (opgenomen in U-waarde).

Voor de verdamping van het gewas is een eenvoudige benadering gekozen, waarbij verondersteld wordt dat 2/3 van de binnenkomende zonnestraling wordt omgezet in latente warmte.

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 (in transmissiefile verwerkt)
- afmetingen van de constructiedelen (in transmissiefile verwerkt)
- de warmtedoorgangscoëfficiënt (bij constante U-waarde)
- grootte van de kas (in U-waarde verwerkt)
- minimumbuis (wel of niet toepassen)

- aantal verwarmingspijpen, standaard
- droogstoken (wel of niet toepassen)
- lichtafhankelijk regelen (wel of niet toepassen)
- scherm (wel of niet toepassen)
- constante verlaging streefwaarden voor kasluchttemperatuur
- ketelrendement.

Als tijdsafhankelijke gegevens worden ingevoerd:
- weergegevens (buitenluchttemperatuur, globale straling, windsnelheid)
- teeltregime (streefwaarden voor: kasluchttemperatuur en als optie een gewenste variabele verlaging daarvan, ventilatietemperatuur, minimumbuistemperatuur en de lichtafhankelijke aanpassingen van deze streefwaarden)
- de transmissiecoëfficiënt van de kas (enkel- of dubbelglas)
- aantal van de verwarmingspijpen bij minimumbuis
- ventilatievoud bij droogstoken
- U-waarde in het geval van windafhankelijkheid.

De gegevens die nodig zijn voor het programma, zijn, voorzover niet afkomstig van het IMAG-DLO, afkomstig van het KNMI te De Bilt en de proefstations te Naaldwijk en Aalsmeer. De weergegevens zijn, met uitzondering van het referentiejaar voor de Nederlandse glastuinbouw (SEL), dat door het IMAG-DLO is ontwikkeld (Breuer et al., 1991), afkomstig van het KNMI te De Bilt.
Alle gegevens nodig om een bepaald teeltregime te simuleren -teeltregime, aantal pijpen bij minimumbuis en het ventilatievoud bij droogstoken- zijn afkomstig van de beide proefstations (Breuer, 1989). Deze gegevens worden bewerkt en in een bepaald formaat naar bestanden weggeschreven. Het zijn deze bestanden waar JBDK90 bij de berekeningen gebruik van maakt.

2.3 Modules

In het simulatiemodel JBDK90 kan een groot aantal modules, vaak optioneel, worden toegepast. Zo kunnen er keuzen gemaakt worden ten aanzien van in te voeren U-waarden, teelten, weergegevens, transmissiecoëfficiënt, minimumbuis, droogstoken, lichtafhankelijk regelen, schermen, wijziging (stook)temperatuur en ketelrendement. Onderstaand worden de modules beschreven.

2.3.1 Constante of windafhankelijke U-waarde

De warmtedoorgangscoëfficiënt (U-waarde) is een maat voor de warmteverliezen in een kas per vierkante meter grondoppervlak en wordt uitgedrukt in $W/(m^2.K)$. In het model kan gekozen worden voor een constante U-waarde of een U-waarde die, afhankelijk van de heersende windsnelheid, door het model zelf wordt berekend. Een beschrijving van de U-waarden is gegeven in paragraaf 2.4.2. De constante U-waarde kan voor de dag- en de nachtperiode apart worden opgegeven.

2.3.2 *Teeltkeuze*

Bij het model kan gekozen worden voor vijf teelten, namelijk (1) tomaten, (2) sla, (3) potplanten, (4) anjers 1e-jaar en (5) anjers 2e-jaar.

Aan de teeltkeuze is gekoppeld het oproepen van teeltfiles met gegevens voor:
- teelttemperatuur ook wel stooktemperatuur genoemd (dit is de gewenste kasluchttemperatuur op ongeveer 1,5 meter hoogte in de kas)
- ventilatietemperatuur (kasluchttemperatuur, waarbij het nodig is om te ventileren)
- minimumbuistemperatuur (minimum-aanvoerwatertemperatuur bij de toestand minimumbuis).

2.3.3 *Weerdata*

Van de weerdata worden de buitentemperatuur, de globale straling en optioneel de windsnelheid ingelezen.

Er kan worden gekozen tussen:
- referentiejaar voor de Nederlandse glastuinbouw (SEL) (Breuer et al., 1991)
- gegevens van de KNMI-jaren 1989 t/m 1992 voor De Bilt
- gegevens voor de perioden okt. 1986 t/m sept. 1987 en okt. 1987 t/m sept. 1988 voor 5 stations te weten : het station Arendsduin direct aan de kust, een station op 0,7 km van de kustlijn, een in het centrum van het Westlandse glastuinbouwgebied (het Proefstation voor Tuinbouw onder Glas (PTG) op 5,2 km van de kust), een op 13 km landinwaarts vanaf de kust aan de rand van het glastuinbouwgebied en het KNMI-station te De Bilt op 54 km uit de kustlijn. Van het station Arendsduin en het station op 13 km zijn geen windgegevens bekend.

2.3.4 *Transmissiecoëfficiënt*

De transmissiecoëfficiënt van de kas, bepaalt hoeveel zonnestraling er daadwerkelijk in de kas komt. De transmissiecoëfficiënt hangt af van het bedekkingsmateriaal en de stand van de zon ten opzichte van het dek. Bij dit model zijn er twee transmissiefiles (voorheen doorlaatfiles geheten) oproepbaar, namelijk één met de transmissiecoëfficiënten gebaseerd op een kasdek van enkelglas en één gebaseerd op dubbelglas (Breuer, 1983).

2.3.5 *Minimumbuis*

In de kas kan het voorkomen dat er geen warmtetoevoer meer nodig is om de kas op een bepaalde temperatuur te houden. Om nu te voorkomen dat er voor verdamping een te lage luchtstroming in de kas optreedt, blijft warmtetoevoer noodzakelijk. De temperatuur van de verwarmingsbuizen wordt dan tot een minimumwaarde begrensd. Deze situatie wordt minimumbuis genoemd. Het aantal buizen dat hiervoor wordt gebruikt, is afhankelijk van het gewas en de maand.
In het model kan gekozen worden om minimumbuis wel of niet toe te passen.

2.3.6 *Droogstoken*

Tijdens het opstoken van nacht- naar dagniveau beginnen de planten sterk te verdampen. De zwaardere plantendelen stijgen echter vergeleken met de lichtere delen slechts langzaam in temperatuur. Op de zwaardere delen dreigt dan condensatie te ontstaan, die ongewenst is in verband met de ontwikkeling van pathogenen. Om dit te voorkomen, wordt er vocht afgevoerd door te ventileren. Het opstoken terwijl de lucht ververst wordt, wordt ook wel droogstoken genoemd. De hoeveelheid te verversen lucht is behalve van het gewas ook afhankelijk van de maand.
In het model kan gekozen worden om droogstoken wel of niet toe te passen.

2.3.7 *Lichtafhankelijk regelen*

Onder lichtafhankelijk regelen wordt hier verstaan een lichtafhankelijke verhoging of verlaging van de setpointtemperaturen.
In de praktijk wordt ervan uitgegaan dat, wanneer er meer zonnestraling (licht) in de kas komt, de fotosynthese van het gewas zal toenemen indien tegelijkertijd de kasluchttemperatuur wordt verhoogd. Bij een aantal gewassen wordt daarom in de modelberekening de temperatuur in de kas verhoogd. Deze extra (stook)temperatuurstijging als functie van de hoeveelheid globale zonnestraling, wordt lichtafhankelijke temperatuurverhoging genoemd. Deze verhoging wordt ook op de ventilatietemperatuur toegepast.
Bij de aanvoerwatertemperatuur bij minimumbuis gebeurt het omgekeerde. Hier wordt de aanvoerwatertemperatuur omlaag gebracht, als functie van de zonnestraling. Dit wordt lichtafhankelijke temperatuurverlaging genoemd.
In het model kan gekozen worden om lichtafhankelijk regelen wel of niet toe te passen.

2.3.8 *Schermen*

Bij het opgeven van de U-waarde moet rekening worden gehouden met het feit of men al dan niet 's nachts een scherm toepast. Bij de constante U-waarde kan dat door een lagere waarde op te geven. Bij de U-waarde afhankelijk van de windsnelheid moet dat expliciet worden opgegeven. In het programma is ook rekening gehouden met het feit dat bij tomaten (indien scherm wordt toegepast) en bij potplanten het scherm ook overdag wordt gesloten als de buitentemperatuur beneden een bepaalde waarde zakt.

2.3.9 *Temperatuurwijziging*

De teeltfiles bevatten gegevens over het verloop van de setpoints voor teelttemperatuur, ventilatietemperatuur en aanvoerwatertemperatuur bij minimumbuis gedurende de teelt. Bij het simulatiemodel JBDK90 is het mogelijk om het gewenste teeltemperatuurniveau te verlagen. Deze verlaging kan met eenzelfde constante waarde – overdag en 's nachts – gedurende het gehele jaar worden uitgevoerd. Het is echter ook mogelijk om de temperatuur desgewenst variabel per maand en verschillend voor dag en nacht te verlagen.

2.3.10 Ketelrendement

Het ketelrendement op bovenwaarde (bovenste verbrandingswaarde) moet worden opgegeven. Deze wordt alleen gebruikt voor de bepaling van het gasverbruik vanuit de berekende warmtebehoefte.

2.4 Rekenprocedure

Nadat het programma JBDK90 is gestart wordt er, met behulp van een menu, een aantal vragen gesteld over het toepassen van de in paragraaf 2.3 besproken modules. Nadat voor alle modules de gewenste waarde of keuze is bepaald begint het inlezen van de weerdata, teeltdata en de transmissiegegevens. De berekening wordt gestart met het bepalen van de uurlijkse warmtebehoeften. Dit geschiedt in een aantal fasen te weten: bepaling warmtebehoefte rekening houdend met transmissie en zoninstraling, bepalen warmtebehoefte bij de toestan ı minimumbuis en het bepalen van de warmtebehoefte door droogstoken. Dit gebeurt over 24 uur per dag gedurende 365 dagen lang (8760 uur). Sommaties bepalen de warmtebehoefte over een dag, een maand en een totaal jaar.

Na enkele minuten is de berekening afgerond en verschijnen de eerste resultaten (maandsommen van de warmtebehoefte) op het beeldscherm.
Met behulp van een menu is men nu in staat om de energiebehoefte in tabel- en/of grafiekvorm op het beeldscherm of op de printer te vragen.
Ook de dagverlopen van de warmtebehoefte, de week- en de maandbelastingsduurkrommen, of jaarbelastingsduurkrommen en de bijbehorende dekkingskrommen kunnen zowel tabellarisch of grafisch worden weergegeven.

In onderstaande paragrafen worden de toegepaste formules, waarop de berekeningen zijn gebaseerd, weergegeven.

2.4.1 Bepaling temperatuurniveaus

De teelttemperaturen kunnen lichtafhankelijk worden verhoogd. De aanvoerwatertemperatuur in de buizen kan lichtafhankelijk worden verlaagd.
De werkelijke basisbinnentemperatuur ($t_{w.bi}$ in °C) -setpoint voor de teelttemperatuur-, ook wel stooktemperatuur genoemd, kan worden berekend aan de hand van de basisbinnentemperatuur (t_{bi} in °C) en de maximaal toelaatbare binnentemperatuur ($t_{max.bi}$ in °C) in het geval dat de lichtafhankelijke verhoging wordt toegepast.
Hierbij spelen ook de momentane globale straling (S_{mom} in W/m^2) en een bepaalde maandafhankelijke maximale waarde van de globale straling (S_{max} in W/m^2) een rol (Breuer, 1983). De voorwaarde is dat de verhoging van de basisbinnentemperatuur alleen plaatsvindt tussen de grenzen 47 W/m^2 < $S_{mom} \leq S_{max}$. De 47 W/m^2 komt ongeveer overeen met de vroeger veel gebruikte grens van 2000 lux. Boven de S_{max}-waarde wordt de binnentemperatuur niet meer verhoogd.

Analoog kan ook de werkelijke ventilatietemperatuur ($t_{w.v.bi}$ in °C) – setpoint voor de ventilatietemperatuur – worden berekend aan de hand van de basisventilatietemperatuur ($t_{v.bi}$ in °C) en de maximaal toelaatbare ventilatietemperatuur ($t_{max.v.bi}$ in °C) in het geval dat de lichtafhankelijke verhoging wordt toegepast.
De werkelijke basistemperatuur $t_{w.bi}$ en de werkelijke ventilatietemperatuur $t_{w.v.bi}$ worden berekend met de volgende formules:

$$t_{w \cdot bi} = t_{bi} + \frac{S_{mom} - 47}{S_{max} - 47} \cdot (t_{max \cdot bi} - t_{bi}) \qquad (1)$$

en

$$t_{w \cdot v \cdot bi} = t_{v \cdot bi} + \frac{S_{mom} - 47}{S_{max} - 47} \cdot (t_{max \cdot v \cdot bi} - t_{v \cdot bi}) \qquad (2)$$

De werkelijke aanvoerwatertemperatuur ($t_{w.aanv}$ in °C) -setpoint aanvoerwatertemperatuur- bij de toestand minimumbuis kan worden berekend aan de hand van de basis-aanvoerwatertemperatuur (t_{aanv} in °C) en de minimum-aanvoerwatertemperatuur ($t_{min.aanv}$ in °C) in het geval dat de lichtafhankelijke verlaging wordt toegepast.
Binnen de grenzen 47 W/m^2 < $S_{mom} \leq C_1 \cdot S_{max}$ geldt:

$$t_{w \cdot aanv} = t_{aanv} + \frac{S_{mom} - 47}{C_1 \cdot S_{max} - 47} \cdot (t_{aanv} - t_{min.aanv}) \qquad (3)$$

hierin is C_1 een maandelijkse constante. In de zomermaanden wordt voor het verlagen van de aanvoertemperatuur een sterkere reductie toegepast. Voor jan. t/m april en sept. t/m dec. geldt $C_1 = 1$ en voor mei t/m aug.: $C_1 = 2/3$).

2.4.2 Bepaling warmtedoorgangscoëfficiënt kas (U-waarde)

De warmtedoorgangscoëfficiënt van een kas is, zowel voor een constante U-waarde op te geven als voor een U-waarde als functie van de windsnelheid, beschreven door Breuer (1989). Uitgangspunt voor de constante U-waarde is een moderne vierkante kas van 10.000 m^2 grondoppervlak met ongeïsoleerd dek en gevel en zonder scherm. In tabel 2.1 worden de U-waarde voor dit en andere veelvoorkomende gevallen weergegeven. Bij deze U-waarden is het lekverlies inbegrepen.

Tabel 2.1 Warmtedoorgangscoëfficiënt kas met constante U-waarde (W/(m^2.K)) (Bron: Breuer, 1989).
Table 2.1 *Coëfficiënt of heat transmission with fixed U-value (W/(m^2.K)) (Source: Breuer, 1989).*

Berekeningsgeval voor een vierkante kas met 10.000 m^2 grondoppervlak	Warmtedoorgangscoëfficiënt (U-waarde in W/(m^2.K))
ongeïsoleerd dek en gevel, zonder scherm	8,8
ongeïsoleerd dek, geïsoleerde gevel, zonder scherm	7,9
ongeïsoleerd dek, geïsoleerde gevel, met scherm	4,2

Voor de beschrijving van de U-waarde als een functie van de heersende windsnelheid (v in m/s) is gebruik gemaakt van een voor de U-waarde belangrijke factor α_{cu} (convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt buitenkant kasdek in W/(m^2.K)), en daarmee ook de α_u (totale warmteoverdrachtscoëfficiënt buiten in W/(m^2.K)) als functie van deze windsnelheid beschreven door Bot (1983). Een eveneens toegepaste belangrijke factor α_{ci} (convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt binnenkant kasdek in W/(m^2.K)) vinden we als functie van het temperatuurverschil tussen kasdek en binnenlucht beschreven door Stoffers (1979).
De U-waarden (U) met als referentiepunt de U-waarde voor de windsnelheid van 3,5 m/s (U_0 in W/(m^2.K)) zijn dan te berekenen met behulp van een correlatiecoëfficiënt (a) (Breuer, 1989):

$$U = U_0 + a \cdot v \qquad (4)$$

waarbij voor U_0 en a, voor een kas van 10.000 m^2 grondoppervlak, gelden de in tabel 2.2 weergegeven waarden.

Tabel 2.2 Warmtedoorgangscoëfficiënt kas met windafhankelijke U-waarde (W/(m^2.K)) (Bron: Breuer, 1989).
Table 2.2 *Coëfficiënt of heat transmission greenhouse with windspeed dependend U-value (W/(m^2.K)) (Source: Breuer, 1989).*

Berekeningsgeval voor een vierkante kas met 10.000 m^2 grondoppervlak	Warmtedoorgangscoëfficiënt (U_0-waarde) (W/(m^2.K))	Correlatiecoëfficiënt (a) (–)	Warmtedoorgangscoëfficiënt (U-waarde) (W/(m^2.K))
ongeïsoleerd dek en gevel, zonder scherm	7,72	0,31	8,8
ongeïsoleerd dek, geïsoleerde gevel, zonder scherm	6,82	0,31	7,9
ongeïsoleerd dek, geïsoleerde gevel, met scherm	3,96	0,07	4,2

2.4.3 Berekening warmtebehoefte

Het berekenen van de warmtebehoefte geschiedt in een aantal fasen, te weten:
- warmtebehoefte rekening houdend met transmissie en zoninstraling
- warmtebehoefte bij de toestand minimumbuis
- warmtebehoefte door droogstoken
- volgorde berekening
- sommaties.

Alle warmtestroomdichtheden worden berekend per m^2 grondoppervlak. Ook de te hanteren U-waarde geldt per m^2 grondoppervlak.

2.4.3.1 Warmtebehoefte rekening houdend met transmissie en zoninstraling

In de hier gehanteerde hoofdformule wordt de warmtebehoefte (Q in W/m^2) berekend aan de hand van de transmissieverliezen (Q_{tr} in W/m^2) en de binnenkomende zonnestraling (I in W/m^2) die gedeeltelijk wordt omgezet in voelbare warmte (I/3). Daarbij wordt veronderstelt dat 2/3 gedeelte van de binnenkomende zonnestraling wordt gebruikt ten behoeve van de verdamping en daarbij wordt omgezet in latente warmte (Van der Post et al., 1974):

$$Q = Q_{tr} - \frac{I}{3} \tag{5}$$

Het transmissieverlies (Q_{tr}) is weer recht evenredig met de warmtedoorgangscoëfficiënt (U), de oppervlakte (A in m^2) en het temperatuurverschil tussen binnen en buiten ($t_{w.bi} - t_{buit}$) in °C. De binnenkomende straling I is afhankelijk van de straling buiten S_{mom} en de transmissiecoëfficiënt van het dek τ. In formulevorm geldt dan:

$$Q_{tr} = U \cdot A \cdot (t_{w.bi} - t_{buit}) \tag{6}$$

$$I = S_{mom} \cdot \tau \tag{7}$$

zodat:

$$Q = U \cdot A \cdot (t_{w.bi} - t_{buit}) - S_{mom} \cdot \tau \cdot \frac{1}{3} \tag{8}$$

2.4.3.2 Warmtebehoefte bij toestand minimumbuis

Voor het bepalen van de warmtebehoefte bij de toestand minimumbuis zijn van belang het aantal pijpen (P), de warmteafgifte bij 5 pijpen (C_2 in $W/(m^2.K)$), de werkelijke aanvoerwatertemperatuur ($t_{w.aanv}$), de warmtedoorgangscoëfficiënt (U) en de voelbare warmte ten gevolge van de binnenkomende zonnestraling (I/3). In het model wordt de gerealiseerde binnentemperatuur (t_x in °C) altijd berekend. Met uitzondering van de toestand minimumbuis en het droogstoken wordt t_x echter in het model verder niet gebruikt.
We berekenen eerst de gerealiseerde binnentemperatuur t_x met:

$$t_x = \frac{C_2 \cdot \frac{P}{5} \cdot t_{w.aanv} + U \cdot t_{buit} + \frac{I}{3}}{C_2 \cdot \frac{P}{5} + U} \tag{9}$$

Daarna wordt de gerealiseerde binnentemperatuur t_x vergeleken met zijn ondergrens $t_{w.bi}$ en de bovengrens $t_{w.v.bi}$ volgens:

$t_{w.bi} \leq t_x \leq t_{w.v.bi}$

In het geval van onder- of overschrijding door t_x van de gegeven grenzen, wordt de gerealiseerde binnentemperatuur (t_x) daaraan gelijkgesteld.
De afgegeven pijpwarmte bij toestand minimumbuis (Q_{min} in W/m^2) berekenen we nu met:

$$Q_{min} = C_2 \cdot \frac{P}{5} \cdot (t_{w.aanv} - t_x) \qquad (10)$$

2.4.3.3 Warmtebehoefte door droogstoken

In het model wordt de warmte, die nodig is voor het droogstoken (Q_{ds} in W/m^2), berekend met de warmte-inhoud van de lucht en de te verversen hoeveelheid. De te verversen hoeveelheid lucht is het produkt van de inhoud van de kas per m^2 grondoppervlak (V in m^3) en het ventilatievoud (vv in h^{-1}).

$$Q_{ds} = V \cdot vv \cdot C_p \cdot f \cdot (t_x - t_{buit}) \qquad (11)$$

Waarbij de volumieke warmte voor de lucht zowel het voelbare als het latente deel betreft (C_p in kJ/(m^3.K)) en f (= 0,27778) de omrekeningsfactor is van kJ/(m^2.h) naar W/m^2.

2.4.3.4 Volgorde berekening

Allereerst wordt de warmtebehoefte per m^2 grondoppervlakte berekend, als gevolg van transmissie en zoninstraling met vergelijking 8. Daarna wordt bepaald of de berekende warmtebehoefte niet het maximum van 291 W/m^2 (gelijkwaardig aan 250 kcal/(m^2.h)), de maximale ketelcapaciteit, overschrijdt.
Indien de toestand minimumbuis geldt, wordt de warmteafgifte van de verwarmingspijpen bepaald met vergelijking 10. Vervolgens worden Q en Q_{min} met elkaar vergeleken, waarbij steeds de hoogste van de twee gekozen wordt. Als onderwaarde voor Q en Q_{min} geldt de waarde 0.
Daarna volgt de berekening van de warmtebehoefte ten behoeve van het droogstoken met vergelijking 11.

2.4.3.5 Sommaties

De totale uurlijkse warmtebehoefte (Q_{tot} in W/m^2) is nu gelijk aan de som van de warmtebehoefte ten gevolge van transmissie en zoninstraling plus de warmtebehoefte ten behoeve van het droogstoken
òf
de som van de warmteafgifte van de verwarmingspijpen bij de toestand minimumbuis plus de warmtebehoefte ten behoeve van het droogstoken. In formulevorm vinden we dus:

$$Q_{tot} = U \cdot A \cdot (t_{w.bi} - t_{buit}) - S_{mom} \cdot \tau \cdot \frac{1}{3} + V \cdot vv \cdot C_p \cdot f \cdot (t_x - t_{buit}) \qquad (12)$$

òf

$$Q_{tot} = C_2 \cdot \frac{P}{5} \cdot (t_{w.aanv} - t_x) + V \cdot vv \cdot C_p \cdot f \cdot (t_x - t_{buit}) \tag{13}$$

Hierna wordt Q_{tot} weer aan zijn bovengrens van 291 W/m^2 en zijn ondergrens van 0 W/m^2 getoetst.
Nadat de warmtebehoefte (per uur) is berekend, worden in het geval van teeltwisseling, bijvoorbeeld bij tomaten of zelfs in het geheel niet stoken gedurende enkele maanden bij anjers 1e- en 2e-jaar, de berekende uurwaarden op nul gesteld. Daarna is het mogelijk door integratie de dag-, maand- en jaartotalen te bepalen.

$$Q_{per\ dag} = \int_0^{24} Q_{tot}\ dt = \sum_{h=1}^{h=24} Q_{tot(h)} \tag{14}$$

$$Q_{per\ maand} = \sum_{d_m=1}^{d_m=n} Q_{per\ dag(d_m)} \tag{15}$$

waarbij n = 28, 30 of 31 naargelang het aantal dagen in de maand.

$$Q_{per\ jaar} = \sum_{z=1}^{z=12} Q_{per\ maand(z)} = Q_{jan} + Q_{febr} + \ldots\ldots + Q_{dec} \tag{16}$$

2.5 Uitvoer

Als de berekeningen zijn uitgevoerd, kunnen de resultaten, via een menukeuze, met behulp van verdere bewerkingen nog op een aantal verschillende manieren, in de vorm van een tabel of grafiek, worden weergegeven.

De keuze bestaat uit:
- stoppen
- warmtebehoefte per uur voor dag, week, maand (tabel/grafiek)
- warmtebehoefte dagsom voor dag, week, maand, jaar (tabel)
- warmtebehoefte weeksom (tabel)
- warmtebehoefte maandsom (tabel)

- gemiddeld dagverloop per week (tabel/grafiek)
- gemiddeld dagverloop per maand (tabel/grafiek)
- gemiddeld dagverloop per kwartaal (tabel/grafiek)

- weekbelastingsduurkromme (tabel/grafiek)
- maandbelastingsduurkromme (tabel/grafiek)
- jaarbelastingsduurkromme (tabel/grafiek)
- (jaar)dekkingskromme (grafiek)

- andere teelt
- volgende run.

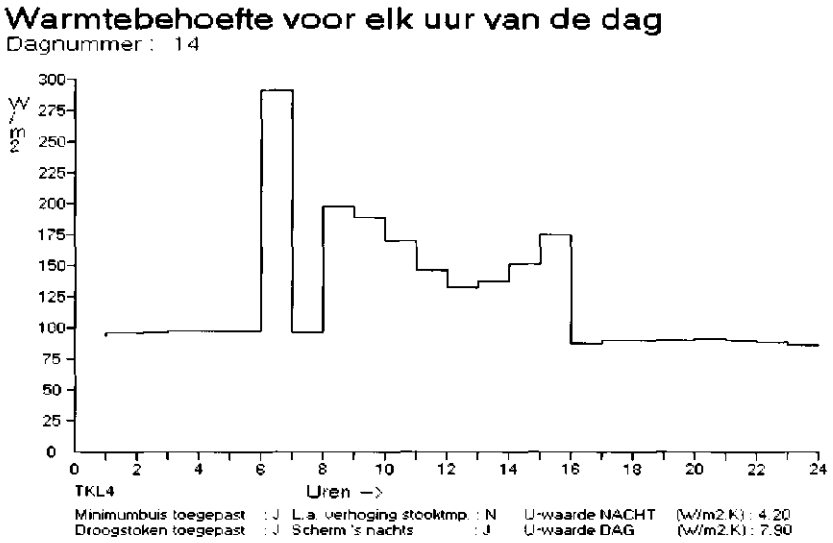
Alle gewenste uitvoer is voor JBDK90PC op beeldscherm of een printer uit te voeren. Voor JBDK90MV zijn de waarden in principe alleen in tabelvorm direct af te lezen. Met JBDK90MV op de VAX-4200 is het niet mogelijk om grafische output op het beeldscherm te krijgen. De week-, maand-, en de jaarbelastingsduurkrommen plus de bijbehorende (jaar)dekkingskromme zijn met behulp van een apart GENSTAT-programma (Genstat 5 Committee, 1987) wel op een printer grafisch uitvoerbaar. In paragraaf 2.6 zijn een aantal voorbeelden van de grafische uitvoer van JBDK90PC weergegeven.

2.6 Voorbeeld

Als voorbeelden worden gegeven de warmtebehoefte, twee belastingsduurkrommen en een dekkingskromme.

- *Warmtebehoefte*

De warmtebehoeftegrafiek toont voor alle uren van de dag (24 uur) hoe groot de warmtebehoefte voor een bepaalde teelt is. Dit hoeft niet per se voor één dag te zijn, het kan voor een hele week gekozen worden of een hele maand. De grafiek toont dan de gemiddelde warmtebehoefte voor elk uur per dag. Als voorbeeld wordt in figuur 2.1 de warmtebehoeftegrafiek van dagnummer 14 (14 januari 1987) voor het Proefstation Tuinbouw onder Glas -PTG- te Naaldwijk gegeven. Het weergegeven dagverloop geldt voor het gewas anjers 1e-jaar (TKL4).
Horizontaal staat het uur van de dag, terwijl verticaal de uurlijkse warmtebehoefte is weergegeven. In de figuur is te zien dat de berekening is uitgevoerd voor het geval dat er wel een toepassing is van minimumbuis en droogstoken, maar er geen lichtafhankelijke regeling van teelt-, ventilatie- en aanvoerwatertemperatuur plaatsvindt.
Het scherm is 's nachts gesloten. De U-waarde is constant en wel overdag 7,9 en 's nachts bij schermgebruik 4,2 W/(m^2.K).

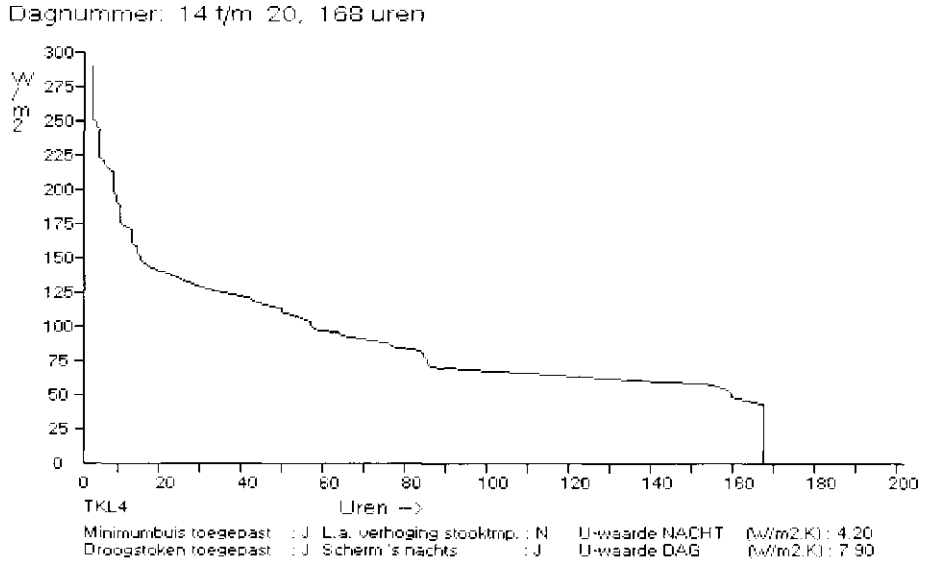


Figuur 2.1 Dagverloop warmtebehoefte (Bron: Bolk, 1992).
Figure 2.1 *Daily heat requirement curve (Source: Bolk, 1992).*

De figuur laat zien dat de warmtebehoefte overdag, als gevolg van de zonnestraling, rond het middaguur het laagst is. In de nachtperiode, tussen 16.00 uur en 08.00 uur, is de warmtebehoefte ten gevolge van het schermgebruik lager dan overdag. De piek in de warmtebehoefte van 291 W/m^2 's ochtends is het gevolg van droogstoken.

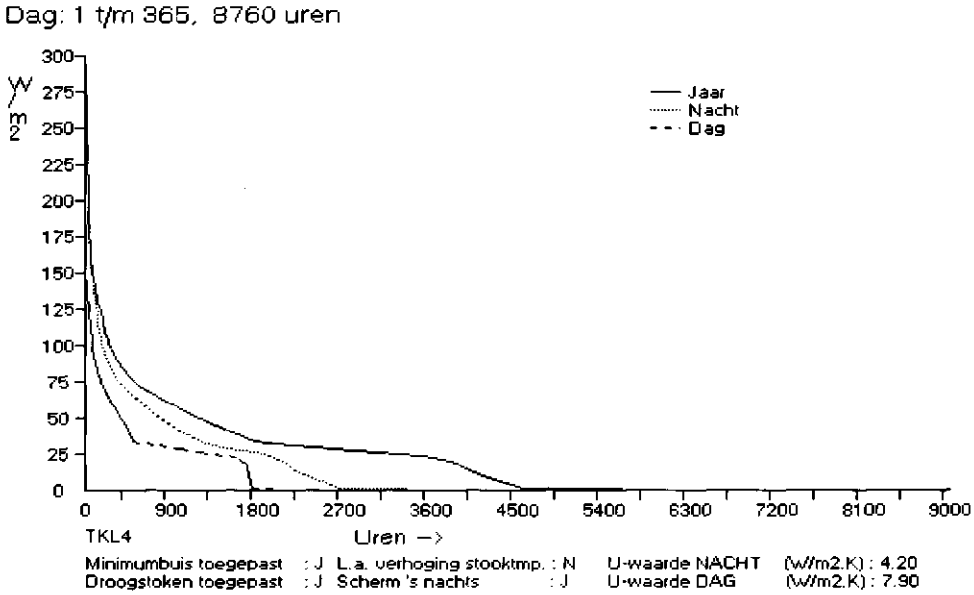
- *Belastingsduurkromme*

Voor de belastingsduurkromme wordt per week, maand of jaar gekeken, hoeveel uren van die week, maand, of jaar een bepaalde warmtebehoefte optreedt. Deze uren worden opgeteld en afgedrukt. In de figuur 2.2 is dit, voor dezelfde berekeningen als onder de warmtebehoefte genoemd, als voorbeeld voor één week (168 uur) die loopt van 14 t/m 20 januari 1987, gedaan voor het Proefstation voor Tuinbouw onder Glas (PTG) te Naaldwijk.
Op de horizontale as staat het aantal uren in een week dat een bepaalde warmtebehoefte wordt overschreden. In de figuur is te zien dat, voor de week 14 t/m 20 januari 1987, er maar ca. 15 uren zijn dat de warmtebehoefte hoger is dan bijvoorbeeld 150 W/m^2. De warmtebehoefte daalt in die week nooit onder ca. 44 W/m^2.



Figuur 2.2 Weekbelastingsduurkromme (Bron: Bolk, 1992).
Figure 2.2 *Weekly cumulative frequency distribution curve (Source: Bolk, 1992).*

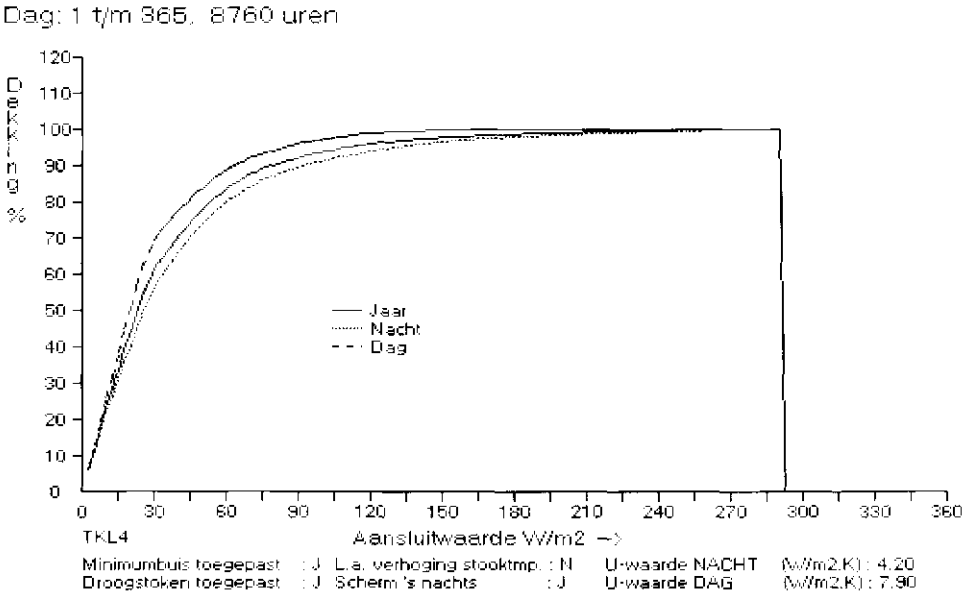
Bij een jaarbelastingsduurkromme geldt de kromme voor een geheel jaar (8760 uur). Figuur 2.3 geeft, voor dezelfde uitgangspunten als bij de warmtebehoefte zijn genoemd, een voorbeeld van deze jaarbelastingsduurkromme voor het Proefstation voor Tuinbouw onder Glas (PTG) te Naaldwijk voor de gehele periode oktober 1986 t/m september 1987. In de figuur zijn ook de jaarbelastingsduurkrommen voor de dag- en de nachtperiode apart weergegeven. Dag en nacht opgeteld, in horizontale richting, levert de totale belastingsduurkromme op.



Figuur 2.3 Jaarbelastingsduurkrommen.
Figure 2.3 *Yearly cumulative distribution curves.*

Op de horizontale as staat het aantal uren in een jaar dat een bepaalde warmtebehoefte wordt overschreden. Op de verticale as staat de warmtebehoefte. In de figuur is te zien dat er gedurende ca. 4600 uur wel en ca. 4100 niet gestookt wordt, maar dat er maar zeer weinig uren -ca. 75- zijn met een warmtebehoefte boven 150 W/m^2. Bij een rendement, voor ketel+condensor, van 90% op bovenwaarde is de jaarlijkse hoeveelheid gas die bij deze teelt van anjers 2e-jaar wordt verstookt gelijk aan 21,3 m^3/m^2.

• *Dekkingskromme*
De dekkingskromme toont welk percentage van de totale jaarlijkse warmtebehoefte door een warmtebron gedekt wordt met een aangegeven aansluitwaarde. Net als de jaarbelastingsduurkromme is de dekkingskromme opgesplitst in dag, nacht en totaal. De dekkingskromme hoort bij de jaarbelastingsduurkromme en kan niet los ervan worden getoond. Figuur 2.4 geeft een voorbeeld van de dekkingskromme, zoals die behoort bij de jaarbelastingsduurkromme uit figuur 2.3 voor het Proefstation voor Tuinbouw onder Glas (PTG) te Naaldwijk voor de gehele periode oktober 1986 t/m september 1987.
Op de horizontale as staat de aansluitwaarde in W/m^2 terwijl verticaal het dekkingspercentage staat. Bij een aansluitwaarde van 60 W/m^2 is het dekkingspercentage ongeveer 83%, dat wil zeggen dat 83% van de totale jaarlijkse warmtebehoefte te dekken is met een (mogelijk alternatieve) aansluitwaarde van 60 W/m^2.



Figuur 2.4 Dekkingskrommen.
Figure 2.4 *Covering curves.*

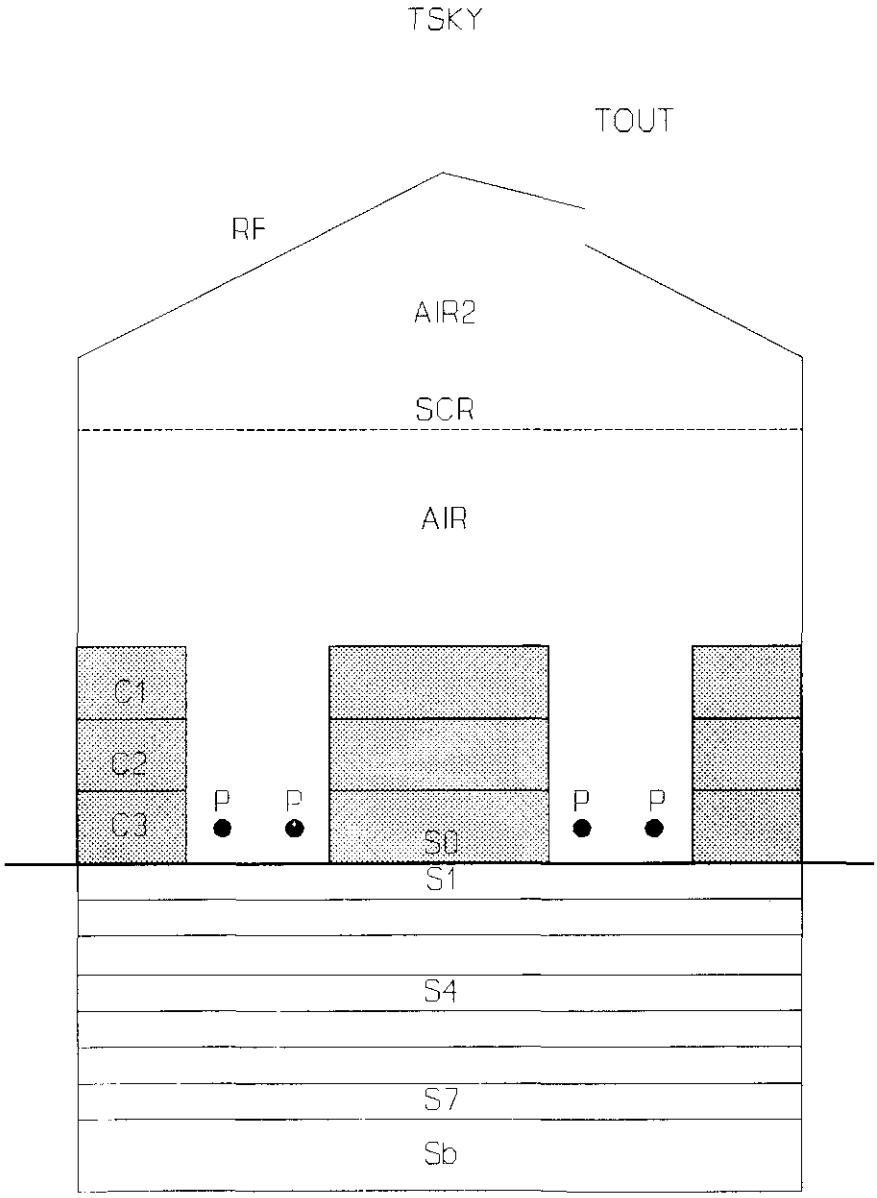
3 Dynamisch simulatiemodel DESSIM90

Het dynamische simulatiemodel **DESSIM90** (greenhouse DESign and SImulation Model for the nineties) is een computermodel met energie-, water- en CO_2-balansen van kas en gewas, dat wordt gebruikt voor het bestuderen van klimaatprocessen en voor het ontwerpen van klimaatbeheersingsapparatuur voor tuinbouwkassen.
Het model, geschreven in de simulatietaal CSMP-III en voorzien van FORTRAN-77 subroutines, beschrijft de fysische processen die van belang zijn bij het tot stand komen van het kasklimaat. In het model is ook een beschrijving opgenomen van het gedrag van het gewas aangaande fotosynthese en warmte-, vocht- en CO_2-uitwisseling met de omgeving. In het model is eveneens een scherm gemodelleerd. Daarnaast zijn in het model een systeem voor grondkoeling (SOILP) en een systeem voor koeling door middel van indirecte verdampingskoeling (IEC) opgenomen.
DESSIM90 kan de invloed zichtbaar maken van factoren als: temperatuurregeling en relatieve vochtigheidsregeling op de koelbehoefte, de verdamping van het gewas, de energiebehoefte, de relatieve vochtigheid in de kas en de ventilatiehoeveelheid.

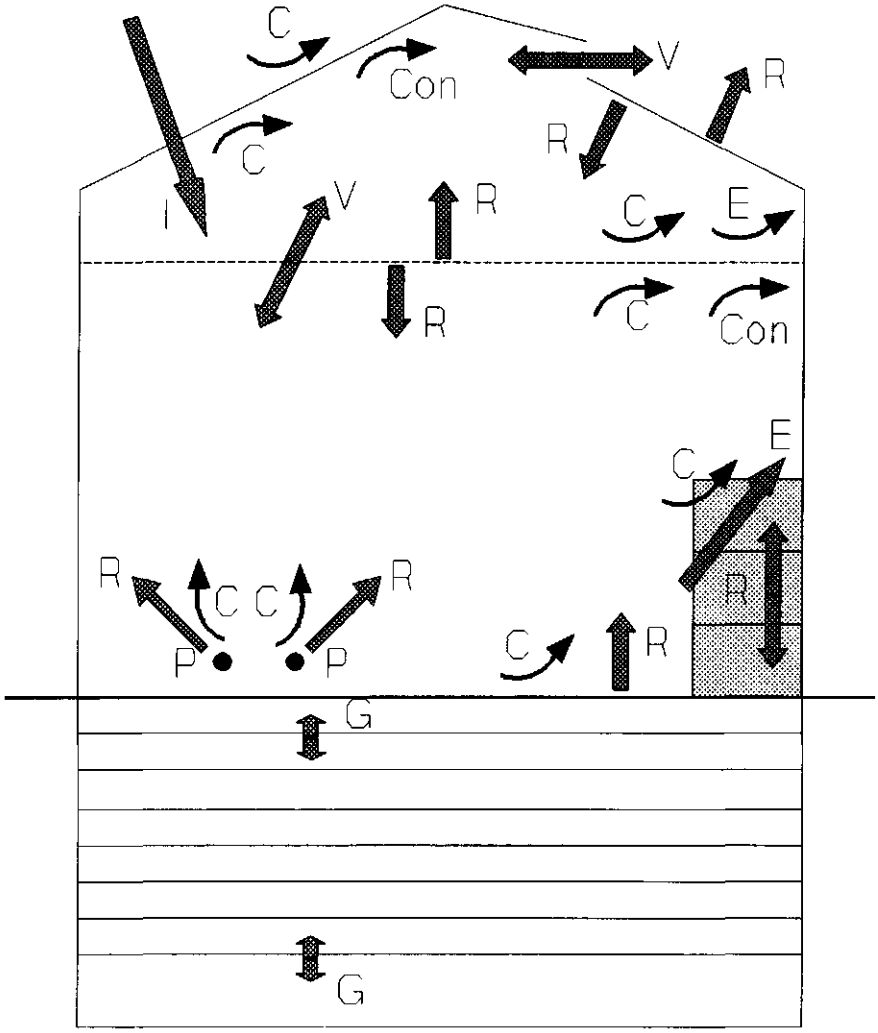
3.1 Opbouw model DESSIM90

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

De volgende entiteiten zijn te onderscheiden (figuur 3.1):
- een diep gelegen bodemlaag (S_b)
- zeven horizontale bodemlagen, van boven naar beneden in dikte toenemend (S_1 t/m S_7)
- het bodemoppervlak (S_0)
- drie lagen in het gewas (C_1 t/m C_3)
- de verwarmingspijpen (P)
- de kaslucht onder en boven het scherm (AIR en AIR2)
- het scherm (SCR)
- het kasdek (RF)
- de buitenlucht (TOUT)
- de stralingsomgeving van het kasdek buiten (TSKY).



Figuur 3.1 Kas-gewas systeem voor DESSSIM90.
Figure 3.1 *Greenhouse crop system for DESSIM90.*



Figuur 3.2 Processen DESSSIM90.
Figure 3.2 *Processes DESSIM90.*

De belangrijkste processen die het model beschrijft zijn (figuur 3.2):

- de warmte-uitwisseling door geleiding (G), convectie (C), straling (R) en ventilatie (V)
- de transmissie en absorptie van globale straling door gewas en kasonderdelen (I)
- de verdamping door het gewas en aan bovenzijde scherm (E)
- de condensatie tegen het kasdek en scherm (Con)
- vochtuitwisseling tussen kasluchtcompartimenten (enerzijds) en buitenlucht (anderzijds) via ventilatie (V)
- vochtuitwisseling tussen kasluchtcompartimenten en omgeving via luchtbehandelingssysteem (niet in figuur weergegeven).

DESSIM90 is zodanig omvangrijk dat het ondoenlijk is om, zoals onder JBDK90 wel is gedaan, alle formules te geven. Voor de modules die samenhangen met de ventilatie worden een aantal formules beschreven in paragraaf 3.3.4. Verder worden een aantal belangrijke formules weergegeven in bijlage B. Voor de rest wordt volstaan met een algemene beschrijving. Het simulatiemodel is een synthese tussen een aantal eerder gebouwde en gevalideerde modellen en praktijkonderzoeken. Daarnaast zijn een groot aantal nieuwe formules toegevoegd. In onderstaande wordt een kort overzicht gegeven van de bronnen waarop DESSIM90 is gebaseerd.

- gevalideerd fysisch klimaatmodel voor kassen (Bot, 1983 en De Jong, 1985)
- gevalideerd gewasmodel voor CO_2 en waterrelaties (Marcelis, 1987)
- Gauss-integratie over drie gewaslagen (Goudriaan, 1986, 1987)
- fotosynthese en warmtestromen in het gewas over drie gewaslagen (Goudriaan, 1987 en Houter, 1987)
- splitsing globale straling in diffuse en directe straling in relatie tot fotosynthese (Spitters, 1986 en Spitters et al., 1986)
- metingen aan en simulatie van het klimaat in een geschermde kas (Van 't Ooster, 1983)
- transmissie kasdek (Bot, 1983 en Gijzen, 1989)
- gevalideerde koppeling gewasmodel en kasklimaatmodel (Houter, 1987)
- onderzoek naar natuurlijke ventilatie (De Jong, 1990)
- een literatuurstudie (Bokhorst et al., 1990)
- een statisch rekenmodel (Breuer, 1983, 1987 en 1989)
- een onderzoek naar toepassing grondbuizen bij ventilatie (Lange, 1992)
- een onderzoek naar indirecte verdampingskoeling (Vollebregt en De Jong, 1993).

3.2 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:
- gewas
- locatie en oriëntatie van de kas
- afmetingen van de constructiedelen
- afmetingen van de verwarmingspijpen
- diverse fysische eigenschappen
- minimumbuis (wel of niet gebruiken)
- temperatuurregeling (standaard) of relatieve vochtigheidsregeling
- verlagen/verhogen streefwaarden voor kasluchttemperatuur
- lichtafhankelijk temperatuurregelen (wel of niet toepassen)
- toepassen scherm (wel of niet toepassen)
- sluiten scherm boven gewenst lichtniveau
- porositeit scherm
- natuurlijke ventilatie (standaard) of mechanische ventilatie
- mechanische ventilatie met behulp van grondbuizen òf indirecte verdampingskoeling.

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

3.3 Modules

Bij de invoergegevens (CASINP) wordt al rekening gehouden met een aantal mogelijke keuzes omtrent het wel/niet toepassen van een optie. Deze opties zijn deels in de vorm van modules en deels in het programma zelf opgenomen. De belangrijkste modules zijn die voor de regeling, te weten een temperatuurregelmodule en een relatieve vochtigheidsregelmodule, en de modules voor een scherm, natuurlijke ventilatie en mechanische ventilatie met behulp van gronbuizen (incl. seizoenafhankelijke bodemtemperatuur) of indirecte verdampingskoeling.

3.3.1 Temperatuurregeling

De temperatuurregelmodule (CONTRL) berekent voor elke tijdstap een aangepaste pijptemperatuur en ventilatiehoeveelheid. Hierbij worden als invoergegevens de kasluchttemperatuur en de setpoints van de kaslucht-, ventilatie- en de pijptemperatuur bij minimumbuis gebruikt.
Bij de invoergegevens (CASINP) kan worden aangegeven of de kas op temperatuur dan wel op relatieve vochtigheid geregeld moet worden.

3.3.2 Relatieve vochtigheidsregeling

De relatieve vochtigheidsregelmodule (CONTRH) berekent voor elke tijdstap een aangepaste pijptemperatuur en ventilatiehoeveelheid.
Hierbij worden naast de kasluchttemperatuur en de setpoints van de kaslucht-, ventilatie- en pijptemperatuur bij minimumbuis ook de relatieve vochtigheid en het setpoint daarvan als invoergegevens gebruikt.

3.3.3 Scherm

Bij de invoergegevens wordt aangegeven of men een scherm wil toepassen. Als er bij een gewas een scherm wordt toegepast zal dat scherm, als functie van de tijd van de dag en eventueel als functie van een minimumbuitentemperatuur, met een looptijd van 900 seconden open of dichtgaan. De schermmodule (SCREEN) berekent de nieuwe positie van het scherm. Afhankelijk van het setpoint, de werkelijke positie en de tijdstap wordt de specifieke oppervlakte berekend die het scherm ten opzicht van de totale oppervlakte inneemt. Er kan tevens worden aangegeven boven welk lichtniveau buiten, het scherm eveneens dichtgaat (schaduwscherm).

3.3.4 Ventilatie

In DESSIM90 kan zowel natuurlijke ventilatie als mechanische ventilatie worden gesimuleerd. Het momentane maximale ventilatiedebiet 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). Als standaard geldt de natuurlijke ventilatie. Bij de invoergegevens kan worden aangegeven welke optie wordt toegepast.

3.3.4.1 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 dekoppervlak 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 kaslucht boven het scherm (t_{air2} in °C) en buitenlucht (t_{out} in °C) (De Jong, 1990).

$$FVENT_{max} = \sqrt{a \cdot v_w^2 + b \cdot (t_{air2} - t_{out})} \qquad (17)$$

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

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

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

3.3.4.2 Mechanische ventilatie met behulp van 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 in te bouwen is het mogelijk de buitenlucht of kaslucht 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):

$$t_{soil\,(3m)} = a_y + b_y \cdot \sin\left(\frac{N - N_0}{365}\right) \cdot 360 \qquad (18)$$

met voor Nederlandse omstandigheden:

$a_y = 12{,}8$ °C

$b_y = 4{,}7$ °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 een waarde van 81% vond, is conservatief op 70% gesteld en is te schrijven als een functie van de luchtintrede-temperatuur – buitenlucht (t_{out}) of kaslucht (t_{air} in °C) –, de luchtuittrede-temperatuur (t_{spout}) en de grondtemperatuur ($t_{soil(3m)}$).

$$\eta_{Tsoilpipe} = \frac{t_{out} - t_{spout}}{t_{out} - t_{soil(3m)}} \tag{19}$$

$$\eta_{Tsoilpipe} = \frac{t_{air} - t_{spout}}{t_{air} - t_{soil(3m)}} \tag{20}$$

De grondbuizenmodule werkt alleen indien gekozen is voor het toepassen van temperatuurregeling.

Voorts moet tijdens de berekening één van de volgende combinaties van voorwaarden gelden:
- 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 bovendien mogelijk om kaslucht in plaats van buitenlucht door het grondbuizensysteem te leiden. Er treedt dan een volledige recirculatie van de kaslucht op.
Bij luchtdoorvoer 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.

3.3.4.3 Mechanische ventilatie met behulp van 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 theoretisch temperatuurrendement (η_{Tec}) van bijvoorbeeld 75% maar ook met experimenteel bepaalde temperatuur- (η_{Tec}) en absolute vochtigheidsrendementen (η_{Xec}) (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 (η_{Tec}) 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 (η_{Xec}) is een functie van de absolute vochtinhouden van kaslucht (x_{air} in g/kg), de uittrede-lucht uit de koeler (x_{ecout} in g/kg) en de lucht direct aan de plaat (x_{pliec} in g/kg). Het temperatuurrendement (η_{Tec}) en het absolute vochtigheidsrendement (η_{Xec}) zijn als volgt te gedefinieerd:

$$\eta_{Tec} = \frac{t_{air} - t_{ecout}}{t_{air} - t_{pliec}} \tag{21}$$

$$\eta_{Xec} = \frac{x_{air} - x_{ecout}}{x_{air} - x_{pliec}} \tag{22}$$

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

De in het model gehanteerde waarden voor de rendementen zijn door Vollebregt en De Jong (1993) experimenteel bepaald en zijn als volgt weer te geven:
Voor het geval dat de langsstromende luchthoeveelheid (FV_{iec} in $m^3/(m^2.s)$) kleiner is dan 0,024 $m^3/(m^2.s)$ gelden:

$$\eta_{Tec} = 0{,}50888 \tag{23}$$

$$\eta_{Xec} = 1{,}4622 \tag{24}$$

terwijl voor luchthoeveelheden gelijk aan of groter dan 0,024 $m^3/(m^2.s)$ gelden:

$$\eta_{Tec} = 0{,}3494 + \left(\frac{0{,}00383}{FV_{iec}}\right) \tag{25}$$

$$\eta_{Xec} = 0{,}2874 + \left(\frac{0{,}0282}{FV_{iec}}\right) \tag{26}$$

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

Randvoorwaarden waarbij de module tijdens de berekening niet wordt ingeschakeld zijn:
- buitentemperatuur lager dan 5 °C (in verband met bevriezingsgevaar)
- droge-boltemperatuur kaslucht lager dan de natte-boltemperatuur van de buitenlucht.

3.4 Rekenprocedure

Alle berekeningen worden uitgevoerd voor een kas waarvan de grootheden genormeerd zijn op 1 m^2 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.
De dampspanning van water in de beide kascompartimenten en de temperatuur van het scherm worden niet dynamisch berekend maar na elke tijdstap als stationair beschouwd; dit om rekentijd te beperken.

De kern van het 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.

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.
In het onderstaande zijn de verschillende fasen van de berekening globaal weergegeven. In bijlage A is een uitgebreider stroomschema van DESSIM90 gegeven.

- *voorbereiden invoergegevens*
  De parameters voor een berekeningsgeval worden in een aparte datafile (CASINP) opgegeven. Deze zijn de begindag van de berekening (STRTDY), het al dan niet gebruiken van een scherm (SWSCRN), sluiten scherm boven bepaalde lichtintensiteit (SHSCRN), keuze uit een aantal weerdatafiles – jaarfile van 365 dagen met uurgegevens – (CHWTHR), een keuze uit 5 teeltcombinatiefiles (CHCROP) en het wel/niet toepassen van minimumbuistemperaturen, kortweg minimumbuis genoemd (SWMINP). Verder een keuze voor de regeling op basis van relatieve vochtigheid – standaard wordt de conventionele temperatuurregeling verondersteld – (SWRHC). Tevens het opgeven van de maximale hoeveelheid ventilatielucht bij mechanisch ventileren (SWVENT) en het wel/niet toepassen van een lichtafhankelijke temperatuurverhoging/verlaging van stook-, ventilatietemperatuur en een aanvoerwatertemperatuur bij minimumbuis (SWLDC). Daarnaast het verhogen/verlagen van de gewenste kasluchttemperatuur met een bepaald aantal graden (CSPAIT) en de porositeit van het scherm (PERSCR). Verder wordt aangegeven of men gebruik wil maken van mechanische ventilatie met behulp van grondbuizen of indirecte verdampingskoeling (SWSOIL).

- *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. Zoals: de datafile met de casusparameters (CASINP), de teeltgegevens afhankelijk van het gekozen gewas (bijv. TKL1 bij tomaten), de datafile met lichtafhankelijke verande-

ringen van de teelttemperatuur (bijv. LKL1 bij tomaten), de kasafhankelijke gegevens (GHPROP), de fysische eigenschappen (FYPROP), de weergegevens (bijvoorbeeld het referentiejaar voor de glastuinbouw – SEL – (Breuer et al., 1991) of KNMI-gegevens van De Bilt vanaf het jaar 1989) en de bepaling van de transmissie van de kas voor diffuse straling in een subroutine (TRNSM).

- *dynamic segment*
  In het dynamic segment worden alle berekeningen op een nader in het terminal segment aan te geven tijdstap (DELT) doorlopen over een totaal in te stellen berekeningstijd (FINTIM). In onze berekeningen is de waarde van DELT 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 met behulp van de gegevens uit de teeltfiles, door interpolatie de setpoints voor verschillende temperaturen berekend. Met de regelroutines (CONTRL of CONTRH) worden de buistemperatuur en de ventilatiehoeveelheid berekend, waarbij voor natuurlijke ventilatie de maximaal mogelijke ventilatie in een aparte subroutine (MXVENT) wordt bepaald. Bij mechanische ventilatie wordt de maximaal mogelijke ventilatie bepaald door de opgegeven waarde (SWVENT) in de datafile voor invoergegevens (CASINP). Binnen het dynamic segment worden ook alle warmte- en waterdampstromen berekend, waarbij rekening wordt gehouden met de schermstand (SCREEN). Een belangrijke plaats is ingeruimd voor het gewas-submodel (CANOPY). Hierin worden de lichtverdeling en fotosynthese in het gewas, voor de dag- en nachtsituatie berekend. Hierbij wordt gebruikgemaakt van een aantal andere subroutines voor de berekening van de positie van de zon (SOLDAT), de transmissie van de kas voor directe straling (TRNSM), de stomatale weerstand van de plant (STOMRS) en de fotosynthese per bladlaag, rekening houdend met al dan niet beschaduwde bladlagen en met de hoeken van de onderhavige bladlagen (LPHOT). De berekende stomatale weerstand wordt ook gebruikt voor de berekening van de verdamping van het gewas. Optioneel zijn de berekeningen met de grondbuizen (SOILP) en de indirecte verdampingskoeling (IEC).

- *terminal segment*
  In het terminal segment worden DELT (berekeningstijdstap), FINTIM (totale berekeningstijd) en tijdstip van uitvoer van gegevens opgegeven, evenals de integratiemethodiek (keuze uit acht). Bij berekeningen met DESSIM90 is voor een eerste orde Euler-integratie RECT (rectangular) 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. Daarnaast zijn er subroutines geschreven voor het opslaan van dag- en weeksommen (DAYSUM en WKSUM) van bepaalde grootheden.
  Een aantal subroutines is ontwikkeld voor het maken van datafiles met gegevens van de warmte- en koelbehoefte, de verdamping, de relatieve vochtigheid, de temperatuur in de kas en het ventilatiedebiet.

3.5 Uitvoer

De CSMP-uitvoerroutine levert desgewenst alle gevraagde variabelen als functie van een in te stellen tijdstap in de vorm van een datafile (FOR06) op. Tevens worden automatisch van alle gevraagde variabelen de maximum- en de minimumwaarde weergeven. Op die manier is het gedrag van een variabele te bestuderen.

Een groot aantal variabelen kan worden uitgevoerd. Hierbij is te denken aan:
- temperaturen (bodemlagen, buizen, kasdek, kaslucht onder en boven scherm)
- dampdruk (kaslucht)
- verdamping, wateropname en fotosynthese van het gewas
- warmtestroom (grond, buizen, kaslucht)
- luchtstromen (kaslucht onder en boven scherm, natuurlijke ventilatie, mechanische ventilatie).

Het is mogelijk om de datafile FOR06.DAT met behulp van texteditorprogramma's om te bouwen tot handzame datafiles die als invoer zijn te gebruiken voor softwarepakketten als LOTUS 1-2-3 en HARVARD GRAPHICS.

Een aantal berekeningsresultaten met betrekking tot de warmte- en koelbehoefte, de verdamping, de relatieve vochtigheid, de temperatuur in de kas en het ventilatiedebiet wordt met behulp van een aantal subroutines (FREQH, FREQC, FREQET, FREQRH, FREQT, FREQV) door het simulatiemodel in datafiles vastgelegd. Daarna zijn deze datafiles met behulp van GENSTAT (Genstat 5 Committee, 1987) ter verdere analyse om te zetten in jaarbelastingsduurkrommen.

3.6 Voorbeeld

3.6.1 Gemodelleerde kas

De met DESSIM90 uitgevoerde berekeningen voor dit voorbeeld zijn gebaseerd op 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° en een goothoogte van 3,2 m. Verder een vak van 3,2 m × 4 m, smalle aluminiumgoot van 0,158 m × 0,171 m, wel/geen scherm en oriëntatie van de nok N-Z. De ventilatie kan hetzij langs natuurlijke weg -een kas met ramen- hetzij langs mechanische weg -ventilatoren, grondbuizen, en indirecte verdampingskoeling- worden gerealiseerd. Bij natuurlijke ventilatie wordt gerekend voor een kas met ramen, waarbij het mogelijk is in de programmatuur aanpassingen te doen voor een raamoppervlak van 1/4 of 1/8 van het dekoppervlak.

3.6.2 Berekeningen

De berekeningen met DESSIM90 kunnen de invloed zichtbaar maken van vele zaken, zoals temperatuurregeling of relatieve vochtigheidsregeling op de energiebehoefte, de koelbehoefte, de ventilatiebehoefte, de verdamping, de kasluchttemperatuur, de rela-

tieve vochtigheid in de kas etc. Daarbij kan er rekening worden gehouden met natuurlijke ventilatie, mechanische ventilatie, grondbuizen, indirecte verdampingskoeling etc.

Als voorbeeld wordt de ventilatiebehoefte besproken.
Hierbij is het gemiddelde ventilatiedebiet gedurende de uren dat er geventileerd wordt en het aantal uren dat maximale ventilatie optreedt van belang.
In tabel 3.1 zijn de resultaten weergeven van berekeningen voor drie gevallen van mechanische ventilatie met temperatuurregeling òf relatieve vochtigheidsregeling op 75 of 85%. en voor drie gevallen van natuurlijke ventilatie, waarbij ook nog verschillende weerbestanden zijn gekozen. De invloed van het wel of niet toepassen van minimumbuis op het aantal ventilatie-uren, het gemiddelde ventilatiedebiet en de benodigde hoeveelheid energie (warmtebehoefte) bij verschillende invloedsfactoren is daarbij weergegeven (Van de Braak en Breuer, 1991).

Tabel 3.1 Invloed minimumbuis en wijze van regelen op aantal ventilatie-uren, gemiddeld ventilatiedebiet en de energiebehoefte (Bron: Van de Braak en Breuer, 1991).
Table 3.1 *Influence minimum pipe temperature and means of control on the number of ventilation hours, mean ventilation flux and the energy requirement (Source: Van de Braak and Breuer, 1991).*

Berekeningsgeval	Minimum-buis	Ventilatie-uren (h/a)	Gem. Ventilatie-debiet ($m^3/(m^2.h)$)	Energiebehoefte per jaar (kWh/m^2)
temperatuurregeling VENT = 300 $m^3/(m^2.h)$	ja	3098	113	590
	nee	1921	145	419
RV-regeling 75% VENT = 300 $m^3/(m^2.h)$	ja	5445	122	1059
	nee	5456	125	1020
RV-regeling 85% VENT = 300 $m^3/(m^2.h)$	ja	3847	98	677
	nee	3769	115	624
temperatuurregeling VENT = $f(v_w,\Delta T)$	ja	3128	52	586
	nee	1936	59	418
temperatuurregeling weerdata SEL-jaar VENT = $f(v_w,\Delta T) \times 0,5$	ja	3163	34	581
temperatuurregeling weerdata 1990 VENT = $f(v_w,\Delta T) \times 0,5$	ja	3404	33	528

VENT = 300 $m^3/(m^2.h)$: mechanische ventilatie met een maximumventilatiedebiet van 300 $m^3/(m^2.h)$.
VENT = $f(v_w,\Delta T)$: natuurlijke ventilatie met een maximumventilatiedebiet als functie van windsnelheid en het temperatuurverschil. Het verschil tussen de gevallen $f(v_w,\Delta T)$ en $f(v_w,\Delta T) \times 0,5$ is dat in het laatste geval, in verband met de halvering van het oppervlak van de luchtingsramen, de maximumventilatie op de helft van de waarde wordt bepaald. Een energiebehoefte per jaar van 8,8 kWh/m^2 komt overeen met 1 m^3 aardgas per m^2 per jaar.

In tabel 3.1 is te zien dat in het geval van temperatuurregeling het weglaten van minimumbuis sterk reducerend is op het aantal ventilatie-uren en de energiebehoefte. Bij temperatuurregeling en natuurlijke ventilatie is het gemiddelde ventilatiedebiet aanmerkelijk lager dan bij mechanische ventilatie, terwijl het aantal ventilatie-uren vrijwel gelijk is. Verder is te zien dat een regeling op relatieve vochtigheid meer ventilatie-uren en meer energie vraagt dan een standaardtemperatuurregeling. Vooral het regelen op het relatieve vochtigheidsniveau van 75% werkt sterk verhogend op de ventilatie-uren en de energiebehoefte. Voor het jaar 1990 (relatief warm jaar) is het aantal ventilatie-uren ca. 8% hoger dan bij het referentiejaar voor de Nederlandse glastuinbouw SEL. De energiebehoefte is daarentegen zo'n 9% lager.

4 Verificatie en validatie

Het vervaardigen van een simulatiemodel is een buitengewoon arbeidsintensieve zaak. Er kan een onderscheid gemaakt worden tussen validatie en verificatie (Kettenis, 1990). Validatie is aantonen dat het model een goede vervanger is van het werkelijke systeem. Van een model wordt de controle van de implementatie in de vorm van een computerprogramma een verificatie genoemd.
Beide hebben tot doel de resultaten, die uit de experimenten met het model komen, binnen bepaalde grenzen overeen te laten komen met uitkomsten van dezelfde experimenten met het werkelijke systeem.
De beste manier om een model te valideren zijn experimenten met het werkelijke systeem en dezelfde experimenten met het model uit te voeren. Dat een model 100% betrouwbaar is, kan nooit bewezen worden want een model is niets anders dan een hypothese, waarvan nooit bewezen kan worden dat deze waar is; het is slechts mogelijk aan te tonen dat een hypothese aannemelijk is.
De beide beschreven modellen zijn wel geverifieerd maar in de meeste strikte zin van het woord nooit gevalideerd, dat wil zeggen: vergeleken met een werkelijk systeem dat alle facetten omvat die ook in het model zitten.
Er bestaat geen onderzoek aan het werkelijke systeem om de simulatiemodellen 'JBDK90' en 'DESSIM90' te valideren, aangezien het uitvoeren van een dergelijk onderzoek te kostbaar zou zijn.

4.1 Vergelijking met praktijk voor JBDK90

Het statische model (JBDK90) is meerdere malen op zijn uitkomsten vergeleken met gegevens uit de praktijk.
Dit is voor het maken van jaarbelastingsduurkrommen gedaan door Huizing et al. (1984) en Knies (1991). Bij de jaarbelastingsduurkrommen uit de praktijk werden de theoretische dekkingsgraden uit het model niet altijd gehaald. In de praktijk blijken echter grote verschillen te bestaan in de dekkingsgraden. Voor het jaar 1982/1983 scoort een tomaten/komkommerteelt bij een aansluitwaarde van 35% van de maximale ketelcapaciteit een dekkingspercentage van 35%; terwijl in hetzelfde jaar bij chrysanten bij een aansluitwaarde van 37% zelfs 92% dekking wordt gehaald (Sterke, 1984 en 1986). De onderzoekers wijten het niet halen van de theoretische waarden aan diverse technische tekortkomingen. In de praktijk blijkt er een verschil te bestaan tussen de warmtehoeveelheid die men wenst te geven en men werkelijk geeft (ten gevolge van problemen met de getrapte branderregeling, deellastproblematiek, kleplekkage, inregeling aandeel restwarmte etc.). Zij geven aan dat gedurende het verloop van de metingen, doordat men een deel van de technische problemen aan de praktijkinstallaties overwint, de dekkingsgraden hoger worden. Al met al is het duidelijk dat de discrepantie tussen de aanvankelijk lagere praktijkwaarden en de uitkomsten van de modelberekeningen, na opheffing van de technische tekortkomingen aan de praktijkinstallaties, gedeeltelijk kan worden weggenomen (Sterke, 1984, 1986 en Knies, 1991). Praktijkinstallaties zijn echter erg gevoelig voor storingen die de praktische dekkingsgraden drukken.

Het model JBDK90 is ook voor wat betreft de energiebehoeften op zijn uitkomsten vergeleken met gegevens uit de praktijk door Breuer (1987) en Van Winden (1989). De berekeningen voor de energiebehoefte vertoonden een grote mate van overeenstemming met de praktijkgegevens.

4.2 Vergelijking met praktijk voor DESSIM90

Het continue simulatiemodel DESSIM90 is opgebouwd uit diverse gedeelten die elk in een eerder stadium wel zijn gevalideerd. Het totale model DESSIM90 is voor wat betreft de ventilatiebehoefte vergeleken met praktijkmetingen door Van de Braak en Breuer (1991). De ventilatie in een praktijkbedrijf bleek meer uren te omvatten dan volgens het model nodig was. Er zijn een aantal factoren opgesomd die het verschil kunnen verklaren.
Over de gesimuleerde verdamping van het gewas kan worden gesteld dat de onderhavige verdampingsroutine is vergeleken met een door Stanghellini (1987) gevalideerd verdampingsmodel, waaruit bleek dat de uitkomsten eenduidig dezelfde waarden gaven.

4.3 Onderlinge vergelijking JBDK90 en DESSIM90

Het totale model DESSIM90 is twee keer vergeleken met JBDK90. De energiebehoefte voor JBDK90 blijkt in geval van natuurlijke ventilatie, met minimumbuis, max. 5% lager te zijn dan voor DESSIM90 (Van de Braak en Breuer, 1991).
Voor een vergelijkbaar geval van natuurlijke ventilatie, maar nu zonder minimumbuis is met behulp van JBDK90 een vergelijking gemaakt met DESSIM90. Bij DESSIM90 wordt het maximumventilatiedebiet berekend als functie van de windsnelheid en het temperatuurverschil tussen kas- en buitenlucht.
Verder zijn bij JBDK90 dezelfde algemene uitgangspunten als bij DESSIM90 gehanteerd: dezelfde teelt tomaten met bijbehorend teeltregime, het referentiejaar SEL wordt gebruikt als weerdatafile, behalve geen minimumbuis ook geen droogstoken, maar wel een lichtafhankelijke verhoging van teelt- en ventilatietemperatuur.
De U-waarde (warmtedoorgangscoëfficiënt) van de kas wordt berekend als functie van de windsnelheid. De met JBDK90 berekende energiebehoefte is daarna gecorrigeerd voor het feit dat er in DESSIM90 geen rekening wordt gehouden met een gevel. Deze correctiefactor voor de energiebehoefte is vrijwel lineair met de verandering van de U-waarde en bedraagt 0,9.
Om een vergelijking te kunnen maken met een actueel warm jaar is het bovenstaande ook in een simulatierun voor het jaar 1992 toegepast.

In tabel 4.1 zijn de resultaten van de berekening met JBDK90 naast die van het vergelijkbare model met DESSIM90 weergegeven.

Tabel 4.1 Energiebehoefte bepaald met simulatiemodellen 'DESSIM90' en 'JBDK90'.
Table 4.1 *Energy requirement determined by simulation models 'DESSIM90' and 'JBDK90'.*

Berekeningsgeval voor kas met natuurlijke ventilatie		Energiebehoefte per jaar	Energiebehoefte-index
model	weerdata	(kWh/m^2)	(%)
DESSIM90	SEL	410	100
JBDK90	SEL	402[1)]	98
JBDK90	1992	368[1)]	92 [2)]

[1)] Gecorrigeerd voor afwezigheid gevels. Ongecorrigeerde energiebehoeften per jaar zijn resp. 447 en 409 kWh/m^2.

[2)] Index ten opzichte van JBDK90 met SEL als weerdata.

De energiebehoefte per jaar voor natuurlijke ventilatie bij JBDK90 met SEL als weerdata bedraagt 402 kWh/m^2 tegenover 410 met DESSIM90. Overigens is deze waarde van 410, berekend met behulp van DESSIM90-versie 2.7, iets lager dan de 418 kWh/m^2 zoals genoemd in tabel 3.1, die gebaseerd is op een inmiddels verouderde versie 1.4 van DESSIM90.
Tabel 4.1 laat ook zien dat bij JBDK90 de energiebehoefte in 1992 afneemt met 8% ten opzichte van SEL.
Het statisch model JBDK90 heeft een 2% lagere energiebehoefte dan DESSIM90. Dit is een opmerkelijk laag percentage als we er rekening mee houden dat in het model JBDK90 in tegenstelling tot DESSIM90 wel een begrenzing opgenomen is van de maximaal optredende kasluchttemperatuur.

5 Slotopmerkingen

- Het IMAG-DLO heeft twee simulatiemodellen ontwikkeld voor het verrichten van onderzoek in de glastuinbouw. Het heeft met deze twee modellen goed gereedschap om gedurende de komende jaren relevante vragen op het gebied van energiehuishouding en klimaatprocessen in de kas te beantwoorden.

- Het statisch simulatiemodel 'JBDK90' is vooral geschikt om vragen die samenhangen met de energiebehoefte te beantwoorden.
- Het dynamisch simulatiemodel 'DESSIM90' is geschikt om processen die samenhangen met het kasklimaat te bestuderen.
- Het blijft arbitrair of de simulatiemodellen voldoende zijn gevalideerd. Over JBDK90 kan gesteld worden dat de energieberekeningen voldoende betrouwbaar zijn. Met betrekking tot de dekkingsgraden van de jaarbelastingsduurkrommen is het duidelijk dat de discrepantie tussen de aanvankelijk lagere praktijkwaarden en de uitkomsten van de modelberekeningen, na opheffing van de technische tekortkomingen aan de praktijkinstallaties, gedeeltelijk kan worden opgeheven. Praktijkinstallaties zijn echter erg gevoelig voor storingen die de praktische dekkingsgraden drukken.
- DESSIM90 is in het verleden op ingebouwde onderdelen gevalideerd. Verificatie van het nieuwe model DESSIM90 is verricht voor de energiebehoefte en de ventilatiehoeveelheden. Voor het uitvoeren van vergelijkende berekeningen is DESSIM90 voldoende betrouwbaar.
- Het verschil in energiebehoefte tussen DESSIM90 en JBDK90, bij natuurlijke ventilatie zonder minimumbuis, bedraagt 2%. Dit is binnen de geschatte nauwkeurigheid van ca. 5% voor de berekeningen.

- Het verdient aanbeveling om deelaspecten van het model, onder andere de regeling en het aspect schermen, aan een nadere vergelijking met de praktijk te onderwerpen.

Summary

Knowledge of the physical processes in greenhouses is of importance with regard to climate and energy studies in horticulture. Computer simulation models are powerful tools to describe the processes in greenhouses and to study their effects.
A description of a static and dynamic simulation model is given. The static model (**JBDK90**) gives a simplified representation of the greenhouse production system and can be used to calculate, on an hourly basis, the effects of various (static) input variables on the energy requirements.
The dynamic model (**DESSIM90**), which describes the dynamic behaviour of the greenhouse production system, is important when insight in the behaviour of the complex greenhouse production system is needed, for instance when effects of different control strategies or air conditioning systems on greenhouse climate, crop response and related energy requirements are studied.
The model has not been validated as a whole, but it consists of parts of which the majority have been validated. It therefore provides a good basis for comparative calculations. The modelling of the screen has been based mostly on basic physics.
The results of both models are partly compared with results of practice.

Literatuur

Bavel, C.H.M. van and J. Damagnez, 1978. A simulation model for energy storage and savings of a fluid-roof solar greenhouse. International Society of Horticultural Science, Wageningen, Netherlands, Acta Horticulturae 76, p. 229-236.

Bokhorst, D., J.J.G. Breuer en N.J. van de Braak, 1990. Ontwikkeling van een simulatiemodel voor kasklimaatprocessen; Verslag van een literatuuronderzoek. Instituut voor Mechanisatie, Arbeid en Gebouwen, Wageningen, IMAG-Nota P-555, 81 pp.

Bolk, R.P.T., 1992. JBDK90; Jaarbelastingsduurkromme. DLO Instituut voor Mechanisatie, Arbeid en Gebouwen, Wageningen, IMAG-DLO Nota 92-1, 57 pp.

Bot, G.A.P., 1983. Greenhouse Climate: from physical processes to a dynamic model. Landbouwhogeschool, Wageningen. Ph. D. Dissertation, 240 pp.

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., 1976. Rekenmodel energiebehoefte in kassen. Instituut voor Mechanisatie, Arbeid en Gebouwen, Wageningen, IMAG-publikatie 77, 28 pp.

Breuer, J.J.G., 1983. Rekenmodel energiebehoefte in kassen (2e uitgave); Deel I: Handleiding, Deel II: Tabellen en figuren. Instituut voor Mechanisatie, Arbeid en Gebouwen, Wageningen, IMAG-rapport 49, 72 en 152 pp.

Breuer, J.J.G., 1987. Jaarbelastingsduurkromme en energiebesparing voor de Nederlandse glastuinbouw; Een studie naar relevante invloeden. Instituut voor Mechanisatie, Arbeid en Gebouwen, Wageningen, IMAG-rapport 90, 67 pp.

Breuer, J.J.G., 1989. Energiebehoefte voor kasteelten afhankelijk van de afstand tot de kustlijn; Deelstudie naar de gevolgen van het verleggen van de kustlijn tussen 's-Gravenhage en Hoek van Holland. Instituut voor Mechanisatie, Arbeid en Gebouwen, Wageningen, IMAG-rapport 113, 138 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.

France, J. and J.H.M. Thornley, 1984. Mathematical models in agriculture. Butterworths & Co (publishers) Ltd.,London, 335 pp.

Genstat 5 Committee, 1987. Genstat 5 Reference Manual. Clarendon Press, Oxford, United Kingdom, 749 pp.

Gijzen, J.G., 1989. Persoonlijke mededeling, CABO-DLO, Wageningen.

Goudriaan, J., 1986. A simple and fast numerical method for the computation of daily totals of crop photosynthesis. Agricultural and Forest Meteorology 38, p. 249-254.

Goudriaan, J., 1987. Simulatie van gewasgroei. Landbouwuniversiteit, Wageningen, Collegedictaat Theoretische Teeltkunde ['87/'88].

Ham, Ph.J., 1984. Mollier-h/x-diagrammen voor vochtige lucht, geconstrueerd door middel van de computer. Klimaatbeheersing 13(8), p. 269-273.

Houter, G., 1987. Koppeling van gewasmodel aan kasklimaatmodel. Landbouwuniversiteit, Vakgroep Theoretische Teeltkunde, Wageningen, Doctoraalverslag, 150 pp.

Houter, G., 1990. Simulation of CO_2 consumption, heat demand and crop production of greenhouse tomato at different CO_2 strategies. International Society of Horticultural Science, Wageningen, Netherlands, Acta Horticulturae 268, p. 157-164.

Huizing, J.A., C.A.F. Keuls, J.P.H. Karsmakers, N.J.A. van der Velden, A. Sonneveld en P.M. van 't Verlaat, 1984. Technische en economische evaluatie van kolenstookprojecten

in de glastuinbouw. Vereniging Krachtwerktuigen, Amersfoort, 101 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.
Jolliet, O., J.B. Gay and G.L. Munday, 1989. A 2nd generation static model for predicting greenhouse energy inputs, as an aid for production planning. International Society of Horticultural Science, Wageningen, Netherlands, Acta Horticulturae 248, p. 121-128.
Jong, T. de, 1985. Metingen aan- en simulatie van het kasklimaat (Deel I + II). Landbouwhogeschool, Vakgroep Natuur- en Weerkunde, Wageningen, Doctoraalverslag, 53 + 23 pp.
Jong, T. de, 1990. Natural ventilation of large multi-span greenhouses. Landbouwuniversiteit, Wageningen, Ph. D. Dissertation, 117 pp.
Kettenis, D.L., 1990. Simulatie; Met continue en discrete modellen. Stenfert Kroese Uitgevers Leiden/Antwerpen, 188 pp.
Knies, P., 1991. Drie kasverwarmingssystemen voor restwarmte; Deel I en Deel II. DLO Instituut voor Mechanisatie, Arbeid en Gebouwen, Wageningen, IMAG-DLO rapport 91-15, 127 pp.
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.
Marcelis, L.F.M., 1987. Simulatie van de waterhuishouding en de fotosynthese van kasgewassen. Landbouwuniversiteit, Vakgroep Theoretische Teeltkunde, Wageningen, Doctoraalverslag, 124 pp.
Ooster, A. van 't, 1983. Metingen aan en simulatie van het klimaat in een geschermde kas; Deel I en Deel II. Landbouwhogeschool, Vakgroep Natuur- en Weerkunde, Wageningen, Doctoraalverslag, 150 + 163 pp.
Oud, R., 1981. Bepaling van de natuurlijke ventilatie van tuinbouwkassen. Instituut voor Mechanisatie, Arbeid en Gebouwen, Wageningen, IMAG-stagerapport, 38 pp.
Poly-energie zakboekje, 1986. Koninklijke PBNA B.V., Arnhem, p. 496.
Post, C.J. van der, J.J. van Schie and R. de Graaf, 1974. Energy balance and water supply in glasshouses in the West-Netherlands. International Society of Horticultural Science, Wageningen, Netherlands, Acta Horticulturae 35, p. 13-23.
Rijsdijk, A.A. and G. Houter, 1993. Validation of a model for energy consumption, CO_2 consumption and crop production (ECP-model). International Society of Horticultural Science, Wageningen, Netherlands, Acta Horticulturae 328, p. 125-131.
Spitters, C.J.T., 1986. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis. Part II. Calculation of canopy photosynthesis. Agricultural and Forest Meteorology 38, p. 231-242.
Spitters, C.J.T., H.A.J.M. Toussaint and J. Goudriaan, 1986. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis. Part I. Components of incoming radiation. Agricultural and Forest Meteorology 38, p. 217-229.
Stanghellini, C., 1987. Transpiration of greenhouse crops; an aid to climate management. Instituut voor Mechanisatie, Arbeid en Gebouwen, Wageningen, Ph. D. Dissertation, 150 pp.
Sterke, H.J. de, 1984. Warmtebehoefte patronen van glastuinbouwbedrijven (Jaarbelastingsduurkrommen). Consulentschap voor de Tuinbouw, Naaldwijk, Intern verslag nr. 16, 33 pp.

Sterke, H.J. de, 1986. Samenvatting van de metingen 'jaarbelastingsduurkrommen' glastuinbouwbedrijven. Consulentschap voor de Tuinbouw, Naaldwijk, 40 pp.

Stoffers, J.A., 1979. Energiestromen in geschermde kassen. Instituut voor Mechanisatie, Arbeid en Gebouwen, Wageningen, IMAG-jaarverslag 1978 Tuinbouw en Recreatie, p. 38-40.

Tammes, E. en B.H. Vos, 1980. Warmte- en vochttransport in bouwconstructies. Kluwer Technische Boeken B.V. Deventer, 415 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.

Weele, A.M. van, 1986. Energiegebruik in kassen berekend met verschillende bestanden klimaatgegevens. Stichting Instituut voor studie en stimulering van onderzoek op het gebied van verwarming en luchtbehandeling (ISSO), Rotterdam, ISSO-rapport nr. 10.02/IMAG-Nota 208 (PT)/THD nr. K-112, 95 pp.

Winden, C.M.M. van, 1989. Gevolgen van het verleggen van de kustlijn tussen 's-Gravenhage (Scheveningen) en Hoek van Holland op de energiekosten en de geldelijke omzet van de Westlandse glastuinbouw. Proefstation voor Tuinbouw onder Glas, Naaldwijk, 7 pp.

Symbolen

Symbolen Model JBDK90			Eenheid
A	=	grondoppervlakte, standaard 1 m^2	m^2
C_p	=	volumieke warmte lucht (voelbare + latente deel)	$kJ/(m^3.K)$
C_1	=	maandafhankelijke constante (jan. t/m april en sept. t/m dec. = 1 en voor mei t/m aug. = 2/3)	–
C_2	=	constante voor warmteafgifte bij 5 pijpen per 3,2 m kapbreedte	$W/(m^2.K)$
d_m	=	index voor aantal dagen in de maand (28, 30 of 31)	–
f	=	omrekeningsfactor van $kJ/(m^2.h)$ naar W/m^2	–
h	=	index voor uren	–
I	=	zonnestraling in de kas	W/m^2
P	=	aantal werkelijk gebruikte verwarmingspijpen bij minimumbuis	–
Q	=	warmtebehoefte kas per m^2 grond	W/m^2
Q_{ds}	=	warmtebehoefte voor droogstoken per m^2 grond	W/m^2
Q_{min}	=	warmteafgifte pijpen bij toestand minimumbuis per m^2 grond	W/m^2
$Q_{per\ dag}$	=	dagsom totale warmtebehoefte per m^2 grond	Wh/m^2
$Q_{per\ jaar}$	=	jaarsom totale warmtebehoefte per m^2 grond	Wh/m^2
$Q_{per\ maand}$	=	maandsom totale warmtebehoefte per m^2 grond	Wh/m^2
Q_{tot}	=	totale warmtebehoefte (min. 0, max. 291) per m^2 grond	W/m^2
Q_{tr}	=	warmteverlies kas door transmissie per m^2 grond	W/m^2
S_{max}	=	maandafhankelijke maximale waarde globale straling, waarboven geen verdere verhoging meer plaatsvindt van de binnentemperatuur $t_{max.bi}$ en $t_{max.v.bi}$	W/m^2
S_{mom}	=	momentane waarde globale zonnestraling (buiten de kas)	W/m^2
t_{aanv}	=	basis-aanvoerwatertemperatuur	°C
t_{bi}	=	basisbinnentemperatuur	°C
t_{buit}	=	buitentemperatuur	°C
$t_{max.bi}$	=	maximaal toelaatbare binnentemperatuur	°C
$t_{max.v.bi}$	=	maximaal toelaatbare ventilatietemperatuur	°C
$t_{min.aanv}$	=	minimaal toelaatbare aanvoerwatertemperatuur	°C
$t_{v.bi}$	=	basisventilatietemperatuur	°C
$t_{w.aanv}$	=	werkelijke aanvoerwatertemperatuur	°C
$t_{w.bi}$	=	werkelijke basisbinnentemperatuur (stooktemperatuur)	°C
$t_{w.v.bi}$	=	werkelijke ventilatietemperatuur	°C
t_x	=	gerealiseerde binnentemperatuur	°C
U	=	warmtedoorgangscoëfficiënt kas per m^2 grond	$W/(m^2.K)$
U_0	=	warmtedoorgangscoëfficiënt kas per m^2 grond bij v = 3,5 m/s	$W/(m^2.K)$
V	=	inhoud kas per m^2 grond	m^3
v	=	windsnelheid	m/s
vv	=	ventilatievoud	h^{-1}
z	=	index voor maanden	–

α_{cu}	=	convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt buitenkant kasdek	$W/(m^2.K)$
α_{ci}	=	convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt binnenkant kasdek	$W/(m^2.K)$
α_u	=	totale warmteoverdrachtscoëfficiënt buiten	$W/(m^2.K)$
τ	=	transmissiecoëfficiënt dek	–

Symbolen Model DESSIM90			**Eenheid**
a_y	=	gemiddelde grondtemperatuur over een geheel jaar	°C
b_y	=	gemiddelde amplitude grondtemperatuur over een geheel jaar	°C
$FVENT_{max}$	=	maximale luchthoeveelheid bij natuurlijke ventilatie	$m^3/(m^2.s)$
FV_{iec}	=	langsstromende luchthoeveelheid (kaszijde) bij indirecte verdampingskoeler	$m^3/(m^2.s)$
$f(v_w, \Delta T)$	=	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, v_w	=	windsnelheid	m/s
x_{air}	=	absolute vochtigheid kaslucht rondom gewas	g/kg
x_{ecout}	=	absolute vochtigheid uittredelucht indirecte verdampingskoeler	g/kg
x_{pliec}	=	absolute vochtigheid bij plaat indirecte verdampingskoeler (kaszijde)	g/kg
$\eta_{Tsoilpipe}$	=	temperatuurrendement van het grondbuizensysteem	–
η_{Tec}	=	temperatuurrendement van de indirecte verdampingskoeler	–
η_{Xec}	=	absolute vochtigheidsrendement van de indirecte verdampingskoeler	–

Bijlagen

Bijlage A *'Stroomschema' DESSIM90*

INITIAL

Inlezen casus parameters
- Subroutine CASINP

Inlezen teeltregime
- Subroutine CROPD

Inlezen lichtafhankelijke correcties op teeltregime
- Subroutine LIGHTD

Inlezen kaseigenschappen
- Subroutine GRHPRP

Berekening diffuse transmissie
- Subroutine TRNSM
  - Subroutine FRESNEL

Inlezen weergegevens
- Subroutine READIN

Berekening begintemperaturen kaslucht, plant, dek en bodemoppervlak; dampdrukken en CO_2-concentraties kaslucht

Inlezen fysische eigenschappen
- Subroutine FYSPRP

Berekening warmtecapaciteiten bodem

Berekening geleiding bodemlagen

Berekening begintemperaturen bodemlagen

Berekening constante gedeelte van de warmteoverdrachtscoëfficiënten voor straling en vrije convectie

Bepaling uitgangspositie scherm

Additionele berekening voor beginwaarden

DYNAMIC (alle fluxen per m^2 grondoppervlakte)

Berekening setpoints temperaturen gecorrigeerd voor invloed zonnestraling

Berekening maximale ventilatie bij natuurlijke ventilatie
- Subroutine MXVENT

Berekening setpoints scherm

Berekening absolute minimum-aanvoerwatertemperatuur bij minimumbuis

Berekening pijptemperatuur en ventilatie
- Subroutine CONTRL òf
- Subroutine CONTRH

Berekening uitgaande luchttemperatuur bij gebruik van grondkoeling òf indirecte verdampingskoeling
- Subroutine SOILP òf
- Subroutine IEC

Berekening schermpositie
- Subroutine SCREEN

Berekening warmte- en dampfluxen met o.a.
- Berekening convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt buitenzijde dek (functie windsnelheid)
- Berekening convectieve warmteoverdracht gewas (Gauss integratie over 3 lagen)
- Berekening warmtefluxen via straling gewas (Procedure THERPL)
- Berekening geabsorbeerde zonnestraling door dek en scherm
- Berekening warmtefluxen door ventilatie
  - Berekening lekkage
  - Berekening warmteflux door ventilatie bij gebruik van grondkoeling òf indirecte verdampingskoeling (Procedure PROHVS)
  - Berekening luchtstroom door scherm (Procedure SCRFLW)
- Berekening warmtestromen in bodem
- Berekening gewasverdamping (Procedure STAVAP)
  - Berekening stomatale weerstand
- Berekening condensatie tegen dek
- Berekening dampflux via ventilatie (Procedure VAPMAX)
  - Berekening dampflux via ventilatie bij gebruik van grondkoeling òf indirecte verdampingskoeling (Procedure PROVS òf PROVEC)
  - Berekening ventilatiestromen (Procedure PROVFL)
  - Dampflux via luchtstroom door scherm
- Berekening dampflux via diffusie door scherm
- Berekening dampflux via condensatie -capillair transport- en verdamping door scherm
- Berekening condensatiewarmte in scherm

Berekening van temperaturen van dek, bodem en kaslucht

Berekening van gewastemperaturen (Procedures SUMPL en ARRTPL)

Berekening schermtemperaturen stationair (Procedure SCRTMP)

Berekening CO_2-concentraties kas

Berekening lichtverdeling in gewas en fotosynthese
- Subroutine CANOPY
  - Berekening zonnepositie
    - Subroutine SOLDAT
  - Berekening verhouding diffuus/direct zonlicht
    - Berekening directe transmissie kas
      - Subroutine TRNSM
    - Berekening stomatale weerstand voor fotosynthese
      - Subroutine STORMS
    - Berekening fotosynthese
      - Subroutine LHPHOT

Berekening van de dampdrukken stationair
- Subroutine STEADY

Omrekening naar absolute vochthoeveelheden en relatieve vochtigheid (RV)

Sommaties van warmtestromen met o.a.
- Berekening van het verwarmingsvermogen PIPE

Wegschrijven van gegevens in datafiles
- Subroutines
  - DAYSUM (aantal waarden per dag)
  - WKSUM (aantal waarden per week)
  - FREQC (frequentie koelingsuren)
  - FREQET (frequentie verdampingsuren)
  - FREQH (frequentie verwarmingsuren)
  - FREQRH (frequentie uren relatieve vochtigheid)
  - FREQT (frequentie uren met bepaalde temperatuur)
  - FREQV (frequentie ventilatie-uren)

Als einde berekening (FINTIM) niet is bereikt, tijd met tijdstap (DELT) verhogen en opnieuw beginnen bij **DYNAMIC**. Anders

TERMINAL

Gevraagde uitvoergegevens (OUTPUT) wegschrijven in FOR06.DAT

STOP

Bijlage B *Formules DESSIM90*

Lijst met gebruikte symbolen in rapportbijlage B

Luchtuitwisselingen door en langs het scherm

A_{screen}	=	oppervlakte die scherm inneemt	m^2/m^2
FVENT	=	hoeveelheid ventilatielucht	$m^3/(m^2.s)$
g	=	zwaartekrachtsversnelling	m/s^2
h	=	gemiddelde kashoogte	m
PERSCR	=	porositeit scherm	–
T_{air}	=	luchttemperatuur onder het scherm	°C
T_{air2}	=	luchttemperatuur boven het scherm	°C
$Q_{screen\ \Delta p}$	=	luchthoeveelheid door convectieve stroming door scherm tengevolge van drukverschil	$m^3/(m^2.s)$
$Q_{screen\ \Delta T}$	=	luchthoeveelheid door convectieve stroming door scherm tengevolge van temperatuurverschil	$m^3/(m^2.s)$
$Q_{space\ \Delta p}$	=	luchthoeveelheid door convectieve stroming langs scherm tengevolge van drukverschil	$m^3/(m^2.s)$
$Q_{space\ \Delta T}$	=	luchthoeveelheid door convectieve stroming langs scherm tengevolge van temperatuurverschil	$m^3/(m^2.s)$
v	=	luchtsnelheid	m/s
β	=	kubieke uitzettingscoëfficiënt	1/K
ΔT	=	temperatuurverschil	°C

Convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënten

ABS	=	absolute waarde	–
T_{air}	=	luchttemperatuur onder het scherm	°C
T_{air2}	=	luchttemperatuur boven het scherm	°C
T_{pipe}	=	temperatuur verwarmingspijp	°C
T_{roof}	=	temperatuur dek	°C
T_{screen}	=	temperatuur scherm	°C
T_{soil}	=	temperatuur bodemoppervlak	°C
v	=	windsnelheid	m/s
α_{ci}	=	convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt voor binnen	$W/(m^2.K)$
$\alpha_{ci\ air\text{-}screen}$	=	convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt voor binnen tussen de lucht onder het scherm en het scherm	$W/(m^2.K)$
$\alpha_{ci\ air\text{-}soil}$	=	convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt voor binnen tussen de lucht onder het scherm en het bodemoppervlak	$W/(m^2.K)$
$\alpha_{ci\ air2\text{-}roof}$	=	convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt voor binnen tussen de lucht boven het scherm en het dek	$W/(m^2.K)$
$\alpha_{ci\ air2\text{-}screen}$	=	convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt voor binnen tussen de lucht boven het scherm en het scherm	$W/(m^2.K)$
$\alpha_{ci\ pipe\text{-}air}$	=	convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt voor binnen tussen de verwarmingspijp en de lucht onder het scherm	$W/(m^2.K)$
α_{cu}	=	convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt voor buiten	$W/(m^2.K)$

Stofoverdrachtscoëfficiënten

ABS	=	absolute waarde	–
$h_{air2\text{-}roof}$	=	stofoverdrachtscoëfficiënt voor waterdamp	$W/(m^2.K)$
T_{air2}	=	luchttemperatuur boven het scherm	°C
T_{roof}	=	temperatuur dek	°C

View factoren

$F_{(l)}$	=	view factor	–
K_{bl}	=	extinctiecoëfficiënt zwart blad voor warmtestraling	–
LAI	=	leaf area index	m^2/m^2
$\Delta X_{GAUSS(l)}$	=	hulpvariabele voor bladoppervlak-afhankelijke afstand ten behoeve van GAUSS-integratie gewaslaag(l)	–

Lekverlies

F_{ai}	=	luchtinfiltratiefactor (lek)	–
F_{leak}	=	lekverlies	$m^3/(m^2.s)$
v	=	windsnelheid	m/s

Dampdrukken lucht

RH	=	relatieve vochtigheid	%
T	=	temperatuur lucht	°C
T_{air}	=	temperatuur lucht onder het scherm	°C
T_{air2}	=	temperatuur lucht boven het scherm	°C
$T_{evap\ cooler}$	=	temperatuur lucht uit indirecte verdampingskoeler	°C
$T_{plant(l)}$	=	temperatuur lucht bij gewaslaag(l)	°C
T_{out}	=	temperatuur buitenlucht	°C
T_{roof}	=	temperatuur lucht aan kasdek	°C
$T_{soilpipe}$	=	temperatuur lucht uit grondbuis	°C
VP_{out}	=	dampdruk buitenlucht	Pa
VPMAX	=	verzadigde dampdruk	Pa
$VPMAX_{air}$	=	verzadigde dampdruk lucht onder het scherm	Pa
$VPMAX_{air2}$	=	verzadigde dampdruk lucht boven het scherm	Pa
$VPMAX_{evap\ cooler}$	=	verzadigde dampdruk lucht uit indirecte verdampingskoeler	Pa
$VPMAX_{plant(l)}$	=	verzadigde dampdruk lucht bij gewaslaag(l)	Pa
$VPMAX_{roof}$	=	verzadigde dampdruk lucht aan kasdek	Pa
$VPMAX_{soilpipe}$	=	verzadigde dampdruk lucht uit grondbuis	Pa
$VPMAX_{out}$	=	verzadigde dampdruk buitenlucht	Pa

Luchteigenschappen

h_{out}	=	enthalpie lucht	kJ/kg
T_{out}	=	temperatuur buitenlucht	°C
$T_{wb\ out}$	=	natte-boltemperatuur buitenlucht	°C
VP_{out}	=	dampdruk lucht	Pa
x_{out}	=	absolute waterhoeveelheid in lucht	kg/kg lucht

Gegevens met betrekking tot zon

DAYNR	=	dagnummer vanaf 1 januari	–
cos	=	cosinus	–
h	=	uurhoek	°
HOUR	=	uurtijd in UT	h
N	=	dagnummer vanaf 1 maart (meteorologisch begin van het jaar)	–
$Time_{eq}$	=	tijdvereffening	h
sin	=	sinus	–
SOLARC	=	zonneconstante	W/m^2
z	=	elevatie zon	°
β	=	azimut	°
γ	=	jaarhoek	°
δ	=	declinatie	°
ϕ	=	breedtegraad	°

Formules

Luchtuitwisselingen door en langs het scherm

De stromingssnelheid over de hoogte Δh tengevolge van het temperatuurverschil wordt door De Jong (1990) aangegeven als:

$$v = (2 \cdot g \cdot \Delta h \cdot \beta \cdot \Delta T)^{0,5} \tag{27}$$

Met bovenstaande als basis is de luchtuitwisseling ($Q_{screen\ \Delta T}$) dóór het scherm tussen de luchtcompartimenten onder (AIR) en boven het scherm (AIR2) tengevolge van temperatuurverschil:

$$\phi_{screen\ \Delta T} = 0,5 \cdot (2 \cdot g \cdot \frac{h}{2} \cdot \beta)^{0,5} \cdot A_{screen} \cdot PERSCR \cdot (T_{air} - T_{air2})^{0,5} \tag{28}$$

Luchtuitwisseling ($Q_{space\ \Delta T}$) langs het scherm tussen de luchtcompartimenten onder (AIR) en boven het scherm (AIR2) tengevolge van temperatuurverschil:

$$\phi_{space\ \Delta T} = 0,5 \cdot (2 \cdot g \cdot \frac{h}{2} \cdot \beta)^{0,5} \cdot (1 - A_{screen}) \cdot (T_{air} - T_{air2})^{0,5} \tag{29}$$

Luchtuitwisseling ($Q_{screen\ \Delta p}$) dóór het scherm tussen de luchtcompartimenten onder (AIR) en boven het scherm (AIR2) tengevolge van drukverschil, is aangenomen afhankelijk te zijn van de (raam)ventilatie en is benaderd met:

$$\phi_{screen\ \Delta p} = 0,5 \cdot A_{screen} \cdot PERSCR \cdot FVENT \tag{30}$$

Luchtuitwisseling ($Q_{space\ \Delta p}$) langs het scherm tussen de luchtcompartimenten onder (AIR) en boven het scherm (AIR2) tengevolge van drukverschil, is aangenomen afhankelijk te zijn van de (raam)ventilatie en is benaderd met:

$$\phi_{space\ \Delta p} = 0,5 \cdot (1 - A_{screen}) \cdot FVENT \tag{31}$$

De maximale luchtuitwisseling ($Q_{screen\ \Delta T} + Q_{space\ \Delta T} + Q_{screen\ \Delta p} + Q_{space\ \Delta p}$) over het scherm bedraagt 0,1 $m^3/(m^2.s)$, terwijl de minimale luchtuitwisseling 5.10^{-4} $m^3/(m^2.s)$ bedraagt.

Convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënten

Convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt van kasdek naar buitenlucht (α_{cu}) voor windsnelheid v < 4 m/s, zoals aangegeven door Bot (1983):

$$\alpha_{cu} = 2,8 + 1,2 \cdot v \tag{32}$$

Convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt van kasdek naar buitenlucht (α_{cu}) voor windsnelheid $v \geq 4$ m/s (Houter, 1987):

$$\alpha_{cu} = 2{,}5 \cdot v^{0{,}8} \tag{33}$$

Naar analogie voor vrije convectie aan een vlakke plaat zijn de volgende formules, zoals door Houter (1987) aangegeven, af te leiden. Convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt (α_{ci}) lucht boven het scherm (AIR2) naar kasdek (ROOF):

$$\alpha_{ci\ air2\text{-}roof} = 1{,}54 \cdot (ABS\,(T_{air2} - T_{roof}))^{0{,}333} \tag{34}$$

Convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt (α_{ci}) lucht onder het scherm (AIR) naar scherm (SCREEN):

$$\alpha_{ci\ air\text{-}screen} = 1{,}54 \cdot (ABS\,(T_{air} - T_{screen}))^{0{,}333} \tag{35}$$

Convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt (α_{ci}) lucht boven het scherm (AIR2) naar het scherm (SCREEN):

$$\alpha_{ci\ air2\text{-}screen} = 3{,}43 \cdot (ABS\,(T_{air2} - T_{screen}))^{0{,}333} \tag{36}$$

Convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt (α_{ci}) lucht onder het scherm (AIR) naar de bodem (SOIL):

$$\alpha_{ci\ air\text{-}soil} = 3{,}43 \cdot (ABS\,(T_{air} - T_{soil}))^{0{,}333} \tag{37}$$

Convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt (α_{ci}) van pijp (PIPE) naar lucht (AIR) volgens De Jong (1985):

$$\alpha_{ci\ pipe\text{-}air} = a + b \cdot (T_{pipe} - T_{air}) + c \cdot (T_{pipe} - T_{air})^2 + d \cdot (T_{pipe} - T_{air})^3 \tag{38}$$

met:
a = 1,171
b = $3{,}373.10^{-2}$
c = $-8{,}8.10^{-4}$
d = $1{,}067.10^{-5}$

Stofoverdrachtscoëfficiënten
Stofoverdrachtscoëfficiënt voor waterdamp (h) van lucht boven het scherm (AIR2) naar dek (ROOF) wordt beschreven door Houter (1987) met:

$$h_{air2\text{-}roof} = 8{,}92 \cdot 10^{-9} \cdot (ABS\,(T_{air2} - T_{roof}))^{0{,}333} \tag{39}$$

View factoren
View factor ($F_{(l)}$) voor straling van gewaslagen naar dek/scherm voor laag(l), zoals aangegeven door Houter (1987), afgeleid uit het werk van Goudriaan (1987):

$$F_{(l)} = K_{bl} \cdot e^{-(K_{bl} \cdot \Delta X(GAUSS(l)))} \tag{40}$$

Lekverlies
Praktische metingen aan een drietal kassen (Van Wijk, Feterus en IMAG), zoals beschreven door Oud (1981), zijn opnieuw geanalyseerd. Het lekverlies kan als volgt worden beschreven.
Lekverlies (F_{leak}) met infiltratiefactor (F_{ai}):

$$F_{leak} = 8{,}3 \cdot 10^{-5} + 3{,}5 \cdot 10^{-5} \cdot v \cdot F_{ai} \tag{41}$$

Dampdrukken lucht
Verzadigde dampdrukken voor lucht (VPMAX) zijn, voor 0 °C ≤ T ≤ 40 °C, berekend volgens Tammes en Vos (1980) met :

$$VPMAX = 611{,}0 \cdot e^{(a \cdot T + b \cdot T^2 + c \cdot T^3)} \tag{42}$$

met:
a = 0,0725
b = $-288{,}1 \cdot 10^{-6}$
c = $0{,}79 \cdot 10^{-6}$

Meer specifiek, met dezelfde coëfficiënten a, b en c, zijn daarmee berekend:
Verzadigde dampdruk voor buitenlucht ($VPMAX_{out}$) met:

$$VPMAX_{out} = 611{,}0 \cdot e^{(a \cdot T_{out} + b \cdot T_{out}^2 + c \cdot T_{out}^3)} \tag{43}$$

De dampdruk van de buitenlucht (VP_{out}) wordt berekend met:

$$VP_{out} = VPMAX_{out} \cdot \frac{RH}{100} \tag{44}$$

Verzadigde dampdruk voor lucht in gewaslaag(l) ($VPMAX_{plant(l)}$) met:

$$VPMAX_{plant(l)} = 611{,}0 \cdot e^{(a \cdot T_{plant(l)} + b \cdot T_{plant(l)}^2 + c \cdot T_{plant(l)}^3)} \tag{45}$$

Verzadigde dampdruk voor lucht aan kasdek ($VPMAX_{roof}$) met:

$$VPMAX_{roof} = 611{,}0 \cdot e^{(a \cdot T_{roof} + b \cdot T_{roof}^2 + c \cdot T_{roof}^3)} \tag{46}$$

Op analoge wijze, met dezelfde coëfficiënten a,b en c, zijn de verzadigde dampdrukken berekend voor:
- Kaslucht beneden scherm ($VPMAX_{air}$) met T_{air}
- Kaslucht boven scherm ($VPMAX_{air2}$) met T_{air2}
- Uittredelucht uit grondbuizen ($VPMAX_{soilpipe}$) met $T_{soilpipe\ out}$
- Uittredelucht uit indirecte verdampingskoeler (indirect evaporative cooler) ($VPMAX_{evap\ cooler}$) met $T_{evap\ cooler\ out}$

Luchteigenschappen
Bij het bepalen van de eigenschappen, voor 101,325 kPa en 0 °C ≤ $T_{wb\ out}$ ≤ 25 °C, van de buitenlucht voor de indirecte verdampingskoeler zijn de volgende formules (Van Ham, 1984) toegepast:

Waterdampinhoud lucht (x_{out}):

$$x_{out} = 0{,}662 \cdot \frac{VP_{out}}{(101330 - VP_{out})} \tag{47}$$

Enthalpie lucht (h_{out}):

$$h_{out} = T_{out} + 2500 \cdot x_{out} + 1{,}86 \cdot x_{out} \cdot T_{out} \tag{48}$$

Natte-boltemperatuur lucht ($T_{wb\ out}$):

$$T_{wb\ out} = 27{,}8 + \ln((h_{out} + 36) / 45{,}5) \tag{49}$$

Gegevens met betrekking tot zon
Zonneconstante (SOLARC) (Poly-energie zakboekje, 1986 en Spitters et al., 1986):

$$SOLARC = 1370 \cdot (1 + 0{,}033 \cdot \cos(\frac{DAYNR}{365} \cdot 360)) \tag{50}$$

Jaarhoek (γ) (op 21 maart $\gamma = 0$) (France and Thornley, 1984):

$$\gamma = \frac{N - 21}{365} \cdot 360 \tag{51}$$

Declinatie (δ) (France and Thornley, 1984):

$$\delta = 0{,}38092 + a_1 \cdot \cos(\gamma) + b_1 \cdot \sin(\gamma) + a_2 \cdot \cos(2\gamma) + b_2 \cdot \sin(2\gamma) + a_3 \cdot \cos(3\gamma) + b_3 \cdot \sin(3\gamma) + a_4 \cdot \cos(4\gamma) + b_4 \cdot \sin(4\gamma) + a_5 \cdot \cos(5\gamma) + b_5 \cdot \sin(5\gamma) + a_6 \cdot \cos(6\gamma) \quad (52)$$

met:

$a_1 = -0{,}76996$	$b_1 = +23{,}26500$
$a_2 = +0{,}36958$	$b_2 = +0{,}10868$
$a_3 = +0{,}01834$	$b_3 = -0{,}16650$
$a_4 = -0{,}00392$	$b_4 = +0{,}00072$
$a_5 = -0{,}00051$	$b_5 = +0{,}00250$
$a_6 = +0{,}00442$	

Tijdvereffening ($Time_{eq}$) (France and Thornley, 1984):

$$Time_{eq} = (-0{,}00198 + a_1 \cdot \cos(\gamma) + b_1 \cdot \sin(\gamma) + a_2 \cdot \cos(2\gamma) + b_2 \cdot \sin(2\gamma) + a_3 \cdot \cos(3\gamma) + b_3 \cdot \sin(3\gamma) + a_4 \cdot \cos(4\gamma) + b_4 \cdot \sin(4\gamma) + a_5 \cdot \cos(5\gamma) + b_5 \cdot \sin(5\gamma) + a_6 \cdot \cos(6\gamma)) / 60 \quad (53)$$

met:

$a_1 = -7{,}12965$	$b_1 = -1{,}84002$
$a_2 = -0{,}68841$	$b_2 = +9{,}92299$
$a_3 = +0{,}30260$	$b_3 = +0{,}10635$
$a_4 = +0{,}03508$	$b_4 = -0{,}21211$
$a_5 = -0{,}00895$	$b_5 = -0{,}00773$
$a_6 = +0{,}00061$	

Uurhoek (h) voor De Bilt op (5°,11' Westerlengte) in °

$$h = (HOUR + 1 - 0{,}65444 - Time_{eq}) \cdot 15 \quad (54)$$

Elevatie zon (z) als functie van de Latitude (ϕ), de declinatie (δ) en de uurhoek (h) (Van Weele, 1986):

$$\sin(z) = \sin(\phi) \cdot \sin(\delta) - \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(h) \quad (55)$$

Azimut zon (β) als functie van de declinatie (δ), de uurhoek (h) en de elevatie (z) (Van Weele, 1986):

$$\sin(\beta) = \frac{\cos(\delta) \cdot \cos(h)}{\cos(z)} \quad (56)$$

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 – Trekkrachtbehoefte 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., Kroodsma, 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 grasproduktie.
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
in voorbereiding

94-7 Huis in 't Veld, J.W.H., Boer, W.J. de en W. Kroodsma 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* 35,00

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., Kroodsma, 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)