Dienst Landbouwkundig Onderzoek
Instituut voor Mechanisatie, Arbeid en Gebouwen

Optimalisering energiegebruik bij toepassing van warmtekrachtkoppeling en assimilatiebelichting bij tomaten

Optimization of energy consumption with cogeneration of heat and power and supplementary lighting in tomatoes

Ing. J.P.G. Huijs
Ir. H.F. de Zwart

imag-dlo

LANDBOUW-ECONOMISCH INSTITUUT DEN HAAG BIBLIOTHEEK
SIGN: R 606 - 92/5
EX. NO:
MLV: 1993240523

rapport 92-5
augustus 1992
prijs *f* 35,–

CIP-GEGEVENS KONINKLIJKE BIBLIOTHEEK, DEN HAAG

Huijs, J.P.G.

Optimalisering energiegebruik bij toepassing van warmtekrachtkoppeling en assimilatiebelichting bij tomaten / J.P.G. Huijs, H.F. de Zwart. – Wageningen : DLO-Instituut voor Mechanisatie, Arbeid en Gebouwen. – Ill. – Rapport 92-5
Met lit. opg. – Met samenvatting in het Engels.
ISBN 90-5406-025-5
NUGI 849
Trefw.: kasgroenteteelt / energiebesparing ; kassen ; onderzoek.

© 1992
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.

Voorwoord

Gebleken is dat met behulp van assimilatiebelichting in de winter bij een aantal gewassen in de glastuinbouw zowel kwalitatieve als kwantitatieve produktieverbetering kan worden gerealiseerd. Assimilatiebelichting op tuinbouwbedrijven is het laatste decennium sterk toegenomen. Momenteel is ongeveer 8% van het totale glasareaal met assimilatiebelichting uitgerust. Het optimaliseren van de plantenfysiologische en energetische aspecten hierbij heeft de laatste jaren ruime aandacht gekregen.
Sinds 1986 is door het IMAG-DLO onderzoek verricht naar de energetische aspecten, waarbij de elektrische energie met behulp van een eigen warmtekrachtinstallatie wordt opgewekt.
Nadat in de eerste jaren het accent van het onderzoek vooral op bepaling van de energiestromen lag, is daarna aandacht besteed aan de energiebesparing met behulp van korte termijn warmte-opslag.
Het onderzoek kon worden uitgevoerd doordat er naast de door het Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij beschikbaar gestelde middelen, financiële en materiële ondersteuning is verstrekt door NOVEM en het bedrijfsleven. Over de teeltkundige en plantenfysiologische aspecten heeft overleg plaatsgevonden met medewerkers van de Landbouwuniversiteit, DLO-instituten, proefstations, voorlichting en het tuinbouwbedrijfsleven.
Een belangrijke ondersteuning bij de proefuitvoering is verleend door medewerkers van de proeftuin afdeling Glasgroenten, de afdeling Informatica en Statistiek en de Technische Ondersteuningsafdeling.
Wij verwachten dat dit onderzoek een bijdrage zal leveren aan een verantwoorde toepassing van assimilatiebelichting in de glastuinbouw.

Ir. A.A. Jongebreur
directeur

Inhoud

Voorwoord ... 3

Samenvatting ... 6

1 Inleiding ... 7

2 Doel van het onderzoek ... 8

3 Proefopzet en uitvoering ... 9
3.1 Kas en kasinrichting ... 9
3.2 Teeltsysteem ... 10
3.3 Regeling ... 11
3.3.1 Belichtingsstrategie ... 11
3.3.2 Warmte-opslag ... 12
3.3.3 Gewascompensatie ... 13
3.4 Meting en registratie ... 14

4 Onderzoekresultaten ... 16
4.1 Teelt en produktie ... 16
4.2 Temperatuur en lichttoevoer ... 21
4.3 Belichting ... 25
4.4 Warmte-opslag ... 32
4.5 Warmtetoevoer ... 32

5 Beïnvloedingsfactoren warmte-opslagcapaciteit ... 38
5.1 Inleiding ... 38
5.2 Algemene berekeningsmethoden ... 39
5.2.1 Berekening van buistemperaturen ... 39
5.2.2 Simulatie van de bufferwerking ... 43
5.3 Invloed van belichtingsstrategieën ... 48
5.3.1 Berekeningswijze van geëxtrapoleerde datasets ... 48
5.3.2 Verandering van de duur van de donkerperiode ... 49
5.3.3 Verandering van uit- en inschakelcriterium ... 50
5.3.4 Vergelijking van beide belichtingseffecten ... 50
5.4 Verandering van de warmtebehoefte in de kas ... 51
5.5 Effect van temperatuurcompensatie ... 52
5.6 Effect van CO_2-dosering ... 53
5.7 Gevoeligheidsanalyse ... 55

6 Samenvatting meerjarig onderzoek bij tomaten ... 56
6.1 Keuze tomaten als proefgewas ... 56
6.2 Teeltkundige ervaringen ... 56

6.3 Energetisch onderzoek 59
6.4 Rozen als teeltgewas 60

7 Conclusies 61

8 Onderzoek 1992 63

Summary 66

Literatuur 67

Samenvatting

In een proefkas is onderzoek verricht naar energetische en teeltkundige aspecten bij warmtekrachtkoppeling in combinatie met assimilatiebelichting. In de kas zijn gedurende het winterseizoen tomaten geteeld en zijn continu klimaat- en energiemetingen uitgevoerd, terwijl bovendien teelt- en produktiewaarnemingen hebben plaatsgevonden.
In de voorgaande jaren heeft het onderzoek zich gericht op de energetische en teeltkundige gevolgen van belichtingsstrategieën gebaseerd op resp. de globale straling en de warmtebehoefte van de kas. In deze verslaglegging zijn de activiteiten van seizoen 1990-1991 weergegeven. Het onderzoek in de proefkas was gericht op de mogelijkheden tot energiebesparing door tijdelijke opslag van overtollige warmte van een warmtekrachtinstallatie in een buffer en de besparingsmogelijkheden bij een klimaatregeling op basis van temperatuurcompensatie. De opgeslagen warmte werd overeenkomstig de teelteis via de twee distributienetten in de kas gebracht. In de proefopstelling kon, dankzij de tijdelijke opslag van te veel geproduceerde warmte door de warmtekrachtinstallatie, 8% van de totale warmtesuppletie worden toegevoerd. Met de temperatuurcompensatieregeling werd een verlaging van de warmtetoevoer van 4% gerealiseerd.
Met een daarvoor ontwikkeld simulatiemodel is de invloed van energiebesparing op de warmte-opslag en de buffergrootte bij gewijzigde bedrijfsomstandigheden nagegaan. Geconcludeerd kan worden dat de belichtingsduur, de warmtevraag van de kas en de CO_2-opwekking een grote invloed hebben op de warmte-opslag. Deze belangrijke invloedsfactoren blijken bij de teelt van tomaten op een relatief laag niveau te liggen, met een tendens tot nog verdere afname van het aantal belichtingsuren, waardoor directe vertaling van de onderzoekresultaten voor andere gewassen niet goed mogelijk is.
Met tomaten als teeltgewas voor dit onderzoek zijn een aantal jaren ervaringen opgedaan. Het produktieniveau kon dankzij een aantal teeltmaatregelen worden opgevoerd tot ongeveer 30% van de zomerproduktie. Dit kon worden gerealiseerd ondanks het terugdringen van het aantal belichtingsuren per jaar van 3350 naar ruim 1800. In de praktijk is gebleken dat assimilatiebelichting bij tomaten vooralsnog geen positief economisch resultaat oplevert. Om tot een betere aansluiting met de ontwikkelingen in de praktijk te komen, is voor het vervolgonderzoek – dat in een nieuwe onderzoekkas met 4 afdelingen zal worden uitgevoerd – voorgesteld rozen als teeltgewas te kiezen en de invloedsfactoren CO_2-warmte en meer belichtingsuren in het empirisch onderzoek te betrekken.

1 Inleiding

Assimilatiebelichting is in de glastuinbouw de laatste jaren sterk toegenomen. Het areaal uitgerust met assimilatiebelichting wordt geschat op ongeveer 800 ha. Sectoren met de hoogste toepassingsgraad zijn plantenopkweek- en rozenbedrijven. Bij de teelt van chrysanten, freesia, gerbera en potplanten vindt de toepassing op beperkte schaal plaats. Bij een aantal andere bloementeeltgewassen alsmede tomaten wordt incidenteel assimilatiebelichting toegepast. De toename van het belichtingsareaal heeft kunnen plaatsvinden dankzij de economisch gunstige resultaten, die bij de introductie van de belichting naar voren kwamen. Zowel kwantitatief als kwalitatief werd een betere produktie bereikt en brachten de produkten een hogere prijs op. Deze positieve resultaten kwamen vooral in de snijbloemensector naar voren (rozen).
Ook de opwekking van de voor assimilatiebelichting benodigde elektriciteit met behulp van warmtekrachtkoppeling is sterk in de belangstelling gekomen. De wijze van toepassen varieert sterk. Elektriciteit opgewekt door een eigen warmtekrachtinstallatie op het bedrijf wordt geschat op 150 MW (Faaij 1992). De warmtekracht werkt op veel bedrijven in eilandbedrijf en heeft een bedrijfstijd die gelijk is aan het aantal belichtingsuren. Door belichting in meerdere groepen en bij teruglevering van elektriciteit aan het centrale net kan het aantal bedrijfsuren van de warmtekrachtinstallatie worden vergroot. In opkomst is ook decentrale elektriciteitsproduktie. Hierbij plaatsen energiebedrijven warmtekrachtinstallaties bij tuinbouwbedrijven. De tijdstippen van aan- en uitschakelen van de WKK worden door het energiebedrijf en de tuinder contractueel vastgelegd. De vrijkomende warmte wordt naar de tuinbouwbedrijven gevoerd en de opgewekte elektriciteit naar het centrale net.
Op bedrijven waar de warmtekrachtinstallatie in eilandbedrijf werkt, wordt de opwekkingscapaciteit meestal bepaald door de elektriciteitsbehoefte. Aangezien gelijktijdig elektriciteit en warmte beschikbaar komen, is ook gelijktijdige behoefte aan warmte en elektriciteit een vereiste voor een nuttig gebruik van energie.
Sinds 1986 is door het IMAG onderzoek verricht naar deze gelijktijdigheid bij de teelt van tomaten in de winter. In een proefkas werd onderzoek verricht naar de energiestromen bij belichting met regelstrategieën gebaseerd op globale instraling en warmtebehoefte. Uit dit onderzoek kwam naar voren dat de door de warmtekrachtinstallatie opgewekte warmte niet altijd nuttig kon worden besteed. Daarom is vanaf 1989 een warmte-opslaginstallatie in het verwarmingssysteem opgenomen. Hiermee is nu twee seizoenen ervaring opgedaan.
Bij teeltonderzoek zijn positieve resultaten verkregen met temperatuurcompensatie in de klimaatregeling. Het energetisch aspect is in de proefkas nader onderzocht.
Met behulp van een simulatiemodel is de omvang van de overtollige warmte en de opslagcapaciteit geanalyseerd voor een aantal invloedsfactoren bij gewijzigde bedrijfsomstandigheden.

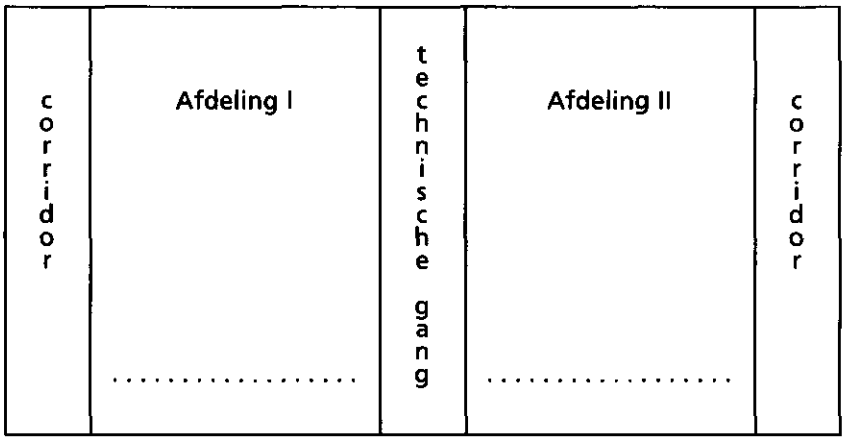
2 Doel van het onderzoek

De doelstelling is het ontwikkelen van een energievoorzieningssysteem met bijbehorende besturing, waarmee een relevante energiebesparing kan worden gerealiseerd door een betere integratie van warmtekrachtkoppeling en assimilatiebelichting in de klimaatbeheersing van de kas.
Om deze integratie mogelijk te maken wordt gebruik gemaakt van een opslagfaciliteit voor korte-termijnsynchronisatie.
In het winterseizoen 1990-1991 is gebruik gemaakt van een beter besturingssysteem voor het laden en ontladen van de buffer. Bovendien is in dit proefseizoen onderzoek verricht met een aangepaste klimaatregeling. In deze 'temperatuurcompensatie' regeling worden op tijden met een hoog warmte-aanbod door de warmtekracht hogere kasluchttemperaturen toegestaan. Op tijden met een geringer warmte-aanbod worden lagere kastemperaturen aangehouden.
Met behulp van een simulatiemodel wordt inzicht verschaft in effecten van energiebesparing bij gewijzigde bedrijfsomstandigheden.

3 Proefopzet en uitvoering

3.1 Kas en kasinrichting

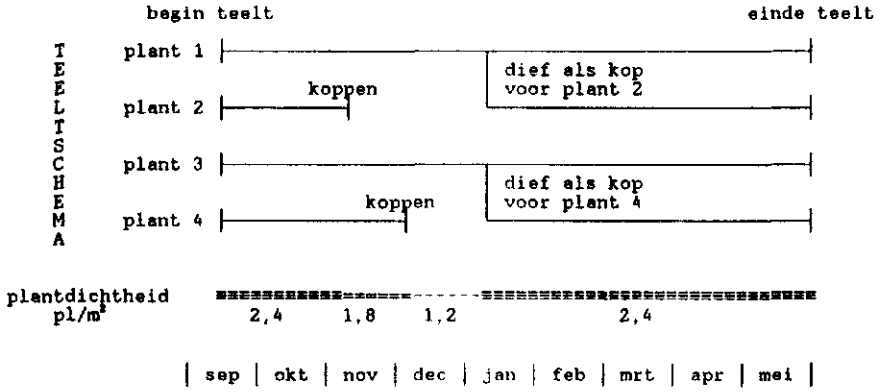
Het onderzoek werd uitgevoerd in WTK II van het IMAG. De kas heeft een enkelglas dek en dubbelglas gevels, maar geen energiescherm. Ze bestaat uit twee gescheiden teeltafdelingen van elk 192 m^2. Naast en tussen beide afdelingen bevinden zich corridors. In beide afdelingen is een belichtingsinstallatie aangebracht, bestaande uit 400 W SON/T lampen met SGR 104 armaturen. De gemiddelde verlichtingssterkte is ongeveer 3800 lux. Bij een ophanghoogte van 3,75 m kon op bloeihoogte van het gewas (2,50 m) een belichtingsintensiteit van ongeveer 9 W/m^2 PAR worden bereikt.
Per 8,6 m^2 kas was één lamp geïnstalleerd.
In de corridor naast teeltafdeling I werd een warmte-opslagvat met water (5 m^3) geïnstalleerd om een tijdelijk warmte-overschot van de warmtekrachtinstallatie op te vangen. In de proefopstelling was geen warmtekrachtinstallatie geïnstalleerd, maar werd met behulp van een ketel alleen de warmtecomponent opgewekt. Het door deze ketel geproduceerde vermogen (13,3 kW) komt overeen met het warmte-aandeel van in de praktijk opgestelde warmtekrachtinstallaties. Naast de door de warmtekracht opgewekte warmte kon worden beschikt over warmte uit het centrale verwarmingsnet van het IMAG-DLO.
De warmtedistributie vond plaats via twee netten, nl. het buisrail- en het groeinet.



Figuur 3.1.1 Plattegrond proefkas.
Figure 3.1.1 *Floor-plan of the experimental greenhouse.*

3.2 Teeltsysteem

De tomatenplanten werden geteeld op steenwolmatten in kunststofgoten. De matten waren geplaatst op tempexplaten met dwarshelling. De toediening van water en voedingsstoffen vond plaats met behulp van een substraatinstallatie. In principe werd het overtollige gietwater gerecirculeerd. Omdat echter in de winter het gewas extra gevoelig is voor infecties en geen ontsmettingsinstallatie aanwezig was, werd in de maanden december t/m februari niet gerecirculeerd. Het te veel gegeven voedingswater werd in die periode als drainwater afgevoerd. Het gewas werd geteeld volgens het hogedraad-teeltsysteem (draadhoogte 3,25 m). Indien de koppen van de planten boven het draad uit dreigden te komen, werden ze op een lager niveau gebracht door het onderste gedeelte van de stengel horizontaal te leiden. Op deze wijze konden de koppen en bloemtrossen maximaal gebruik maken van het beschikbare licht.
Mede op grond van de positieve ervaringen bij de eigen proeven en op praktijkbedrijven werd gekozen voor het ras Prelude (Bruinsma). Geplant werd op 13 september. De ervaringen in voorgaande jaren in praktijk en onderzoek met de plantdichtheid waren sterk verschillend. Duidelijk is geworden dat de dichtheid in december, januari en februari niet te groot mag zijn in verband met geringe hoeveelheid licht in die periode. De optimale plantdichtheid voor de winter geeft echter in de rest van de teeltmaanden een onderbezetting. In overleg met leden van de werkgroep assimilatiebelichting bij tomaten is voor het volgende systeem gekozen: De dichtheid bij het planten bedroeg 2,4 pl/m^2. In de eerste helft van november is bij 25% van de planten de kop weggehaald. Het aantal koppen liep daardoor terug naar 1,8 per m^2. Begin december is nogmaals 1/4 van de oorspronkelijke planten gekopt. Het aantal koppen werd daardoor teruggebracht tot 1,2 per m^2. Rond 10 januari werd op elke resterende plant één dief aangehouden, waardoor het aantal koppen werd verdubbeld en weer op het oorspronkelijke niveau van 2,4 per m^2 kwam.
Om in de winter de vruchtgrootte te bevorderen, werd bij de trossen 1 t/m 8 vruchtdunning toegepast. Deze vruchtdunning werd bereikt door het aantal vruchten per bloemtros tot vijf te beperken.
Het teeltschema en de plantdichtheid zijn in figuur 3.2.1 schematisch weergegeven.
De ziektebestrijding tegen witte vlieg werd vrijwel gedurende de gehele teeltperiode



Figuur 3.2.1 Schematische weergave teeltsysteem en plantdichtheid.
Figure 3.2.1 Schematic presentation of growing system and plant density.

met succes op biologische wijze uitgevoerd. Mogelijke aantastingen van het wortelgestel door zwakteparasieten werden preventief met Previcur bestreden.
Samenvattend kan worden opgemerkt dat teeltkundig de proef goed is verlopen.

3.3 Regeling

Eerst komen de algemene aspecten aan de orde, daarna zal afzonderlijk aandacht worden geschonken aan de specifieke regelaspecten van zowel warmte-opslag via buffering als de temperatuurcompensatieregeling.

3.3.1 Belichtingsstrategie

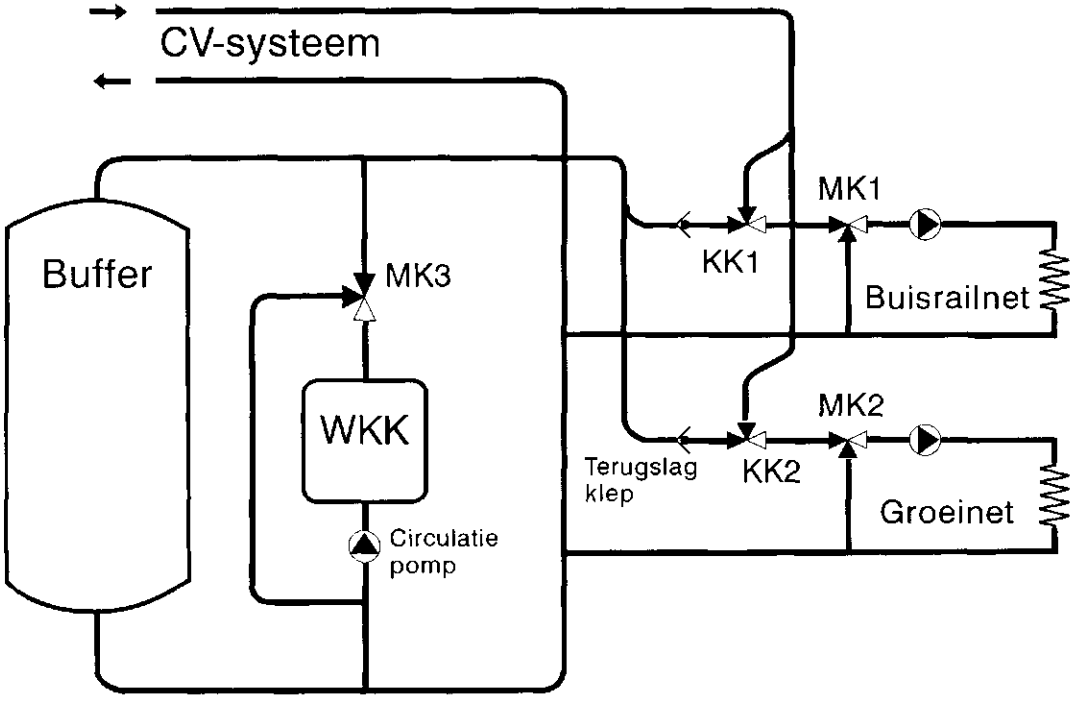
Naar aanleiding van positieve ervaringen met een langere donkerperiode in de nacht bij praktijkbedrijven in seizoen '89-'90, is na overleg met de werkgroep 'tomaten-belichting', besloten de donkerperiode in de nacht bij de nieuwe proefopzet 2 uur langer te maken dan in seizoen '89-'90. De belichtingsstrategie is voor beide proefafdelingen gelijk en is gebaseerd op drie criteria.
In de eerste plaats was de belichting uit gedurende een aantal uren per etmaal beginnend één uur voor zonsondergang. Het aantal 'uit' uren was afhankelijk van de periode in het jaar en is weergegeven in tabel 3.3.1. Naast deze geblokkeerde uren was de belichting afhankelijk van de gemeten globale straling. Wanneer de globale straling groter was dan 80 W/m^2 werd de assimilatiebelichting gedoofd. Wanneer de straling kleiner was dan 75 W/m^2 werd de assimilatiebelichting weer in werking gesteld.
Tot slot werden de lampen niet uitgeschakeld als ze nog geen half uur gebrand hadden en niet ingeschakeld als ze korter dan een half uur uit waren. Deze hysteresis was aangelegd om de levensduur van de installatie te verlengen.

Tabel 3.3.1 Belichtingsschema.
Table 3.3.1 *Lighting schedule.*

Periode	Datum	Belichting	
		aan vanaf	uit gedurende
9	13-08 t/m 09-09	1 uur voor zonsondergang	13 uur/etmaal
10	10-09 t/m 07-10	.	11 uur/etmaal
11	08-10 t/m 04-11	.	9 uur/etmaal
12	05-11 t/m 02-12	.	9 uur/etmaal
13	03-12 t/m 30-12	.	9 uur/etmaal
1	31-12 t/m 27-01	.	9 uur/etmaal
2	28-01 t/m 24-02	.	9 uur/etmaal
3	25-02 t/m 24-03	.	11 uur/etmaal
4	25-03 t/m 21-04	.	13 uur/etmaal
5	22-04 t/m 19-05	geen belichting	
6	20-05 t/m -	geen belichting	

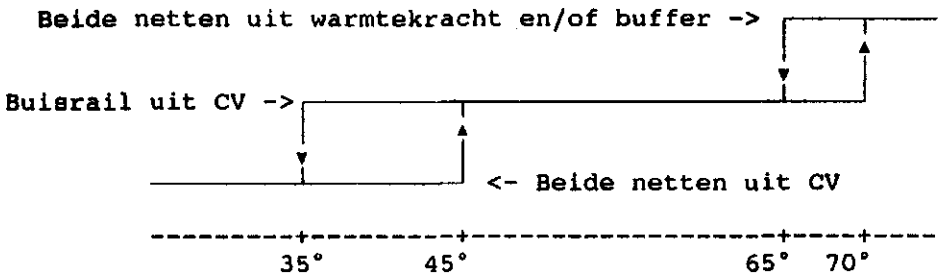
3.3.2 *Warmte-opslag*

De opslagcapaciteit van een warmtebuffer wordt, behalve door het opslagvolume ook bepaald door het temperatuurverschil tussen opgeladen en ontladen buffer. Het maximaal haalbare temperatuurverschil tussen opgeladen en ontladen buffer wordt bepaald door de configuratie van het verwarmingssysteem en de besturing ervan. Deze besturing heeft voor het seizoen '90-'91 een principiële wijziging ondergaan ten opzichte van het voorgaande seizoen.
De wijziging is een tegemoetkoming aan de teeltkundige eisen t.a.v. de verwarmingsregeling zonder de buffercapaciteit negatief te beïnvloeden.
De tegemoetkoming aan de teelteisen bestaat uit de vrijheid tot temperatuurinstelling door de teler van zowel het hoog-temperatuur verwarmingssysteem op de grond van de kas (het buisrailsysteem) en als het laag-temperatuur verwarmingsnet (maximaal 40 °C) tussen het gewas.
Een groot voordeel van de beschikbaarheid van een laag-temperatuurnet is dat hiermee de buffer goed koud gemaakt kan worden. Beide verwarmingsnetten kunnen zowel warmte uit de buffer, als uit de warmtekracht als uit de CV-installatie betrekken. Hierdoor kan opgeslagen warmte snel aan de buffer worden onttrokken, zonder dat warmtetekorten ontstaan als de buffer leeg is (zie figuur 3.3.1).
Opvallend is de mengregeling over de warmtekrachtinstallatie. Hiermee kan de watertemperatuur aan de uitgang van de warmtekrachtinstallatie op een constante, hoge temperatuur worden gehouden. Tevens wordt, wanneer het in de kas gedissipeerde



Figuur 3.3.1 Hydraulisch systeem.
Figure 3.3.1 Hydraulic system.

vermogen minder is dan het door de warmtekracht geleverde vermogen, de buffer opgeladen met hoogwaardige warmte. Dit vereenvoudigt de ontlading van de buffer omdat hoogwaardige warmte gemakkelijker gebruikt kan worden in het verwarmingssysteem van de kas dan laagwaardige warmte.
Wanneer de warmtekracht en/of de buffer onvoldoende warm water leveren, kunnen de beide verwarmingsnetten omschakelen naar water uit het CV-systeem. Het buisrailsysteem schakelt al op suppletie door het CV-systeem over als de temperatuur bovenin de buffer beneden de 60 °C zakt. Het groeinet gaat pas water uit het CV-systeem betrekken als de temperatuur van de buffer beneden de 35 °C is gedaald. Om ongewenste oscillaties in de keuze van de warmwaterbronnen te voorkomen is hysteresis ingebouwd in de voorwaarde waarop weer wordt overgeschakeld op water uit de buffer en/of de warmtekracht. Deze hysteresis is schematisch aangegeven in het volgende diagram.



Figuur 3.3.2 Voeding verwarmingsnetten.
Figure 3.3.2 *Supply heating pipes.*

Het gebruik van de temperatuur bovenin de buffer als criterium en bijvoorbeeld niet de temperatuur van het water vlak voor de keuzekleppen (KK1 en KK2) heeft besturingstechnische redenen. Wanneer namelijk geen warmte in de kas gevraagd wordt, komt het water voor de keuzekleppen (KK1 en KK2) stil te staan en zal de temperatuur ervan dalen tot kasluchttemperatuur.

3.3.3 Gewascompensatie

Bij de teelt van tomaten wordt een bepaald temperatuurregime opgesteld om de groei en de ontwikkeling van het gewas te stimuleren en te sturen. Het is gebruikelijk 's nachts andere temperaturen te hanteren dan overdag. Dit 'dag/nacht'-regime is vooral uit het oogpunt van beperking van het energieverbruik opgesteld. Het gewas reageert namelijk vooral op de etmaaltemperatuur (de gemiddelde temperatuur over een etmaal). Uit recent onderzoek blijkt echter dat het middelend vermogen van een tomatengewas veel verder strekt dan 24 uur. Op het Proefstation Naaldwijk bleek dat een gewas een 'tekort aan temperatuur' gedurende drie dagen zonder problemen kan compenseren, als dit tekort de drie dagen daaropvolgend weer aangevuld wordt door een hogere gemiddelde temperatuur (De Koning, 1989; De Koning 1990). In deze situatie zou gesproken kunnen worden van het nastreven van een gewenste zesdaagse temperatuur.
Naar aanleiding van deze bevindingen rees in de projectgroep de vraag of het dan wel zo zinnig is een vrij ingewikkeld systeem op te zetten om een tijdelijk warmte-overschot op te slaan, als de plant genoegen neemt met een zesdaagse temperatuur. Bovengemiddelde

temperaturen ten gevolge van een warmte-overschot gedurende een bepaalde tijd zouden dan immers gecompenseerd kunnen worden met ondergemiddelde temperaturen.
Indien de temperatuurcompensatieregeling een buffer niet geheel overbodig maakt, dan kan in ieder geval volstaan worden met een kleinere buffer.
Een en ander heeft geresulteerd in een proefopzet waarbij 13,3 kW (de warmte die door een warmtekrachtinstallatie werd geleverd) in de kas werd gebracht zodra de assimilatiebelichting in werking was, ongeacht de temperatuur in die afdeling. Hierdoor kon de temperatuur boven het temperatuursetpoint stijgen. De stijging werd echter begrensd op 3 °C. Kwam de temperatuur meer dan 3 graden boven het setpoint dan werd het toegediende vermogen alsnog teruggeschroefd. De hogere temperatuur in afdeling 2 ten opzichte van afdeling 1 werd door een temperatuurcompensatieprogramma in een later stadium weer naar beneden gecompenseerd.

3.4 Meting en registratie

De belangrijkste metingen (meetfrequentie 2 minuten) die ten behoeve van het onderzoek werden uitgevoerd zijn:

- Buitentemperatuur [°C]
- Relatieve vochtigheid van de buitenlucht [%]
- Globale straling [W/m^2]
- Windsnelheid [m/s]
- Brandduur assimilatiebelichting [min]
- Kasluchttemperatuur [°C]
- Relatieve vochtigheid in de kas [%]
- Luchttemperatuur vlak onder de lampen [°C]
- Aanvoertemperatuur buisrailnet [°C]
- Retourtemperatuur buisrailnet [°C]
- Warmte-afgifte buisrailnet [kWh]
- Aanvoertemperatuur groeinet [°C]
- Retourtemperatuur groeinet [°C]
- Warmte-afgifte groeinet [kWh]
- CO_2-concentratie [ppm]
- CO_2-dosering [mol/h]
- Warmteproduktie van warmtekrachtinstallatie [kWh]
- Vermogen in of uit de buffer [kWh]
- Watertemperatuur uit warmtekracht en/of buffer [°C]
- Watertemperatuur vanuit kas stromend naar warmtekracht en/of buffer [°C]

Niet alle metingen werden voor beide afdelingen uitgevoerd. De meetresultaten waren op het computersysteem van het IMAG-DLO toegankelijk en zijn allereerst verwerkt tot gemiddelde uurwaarden. Deze uurwaarden dienden als basis voor de verdere gegevensverwerking.

CO_2

Om een beeld te krijgen van het dynamisch CO_2-verbruik in een kas werd in afdeling 1

het CO_2-verbruik gemeten. De resultaten van deze metingen zullen worden toegepast bij model- en praktijkonderzoek, waarin naast de warmte die beschikbaar komt van de warmtekrachtinstallatie ook rekening wordt gehouden met de warmte afkomstig van CO_2-opwekking met de ketel.

Uitgangspunten bij de verwerking van de metingen:

Licht (PAR)

- Afdelingsoppervlakte (exclusief betonpad) 173 m^2.
- 1 SON-T 400 watt lamp per 8,6 m^2 kasoppervlakte. Bij een elektrisch bruto vermogen van 436 W per lamp, wordt per m^2 50,7 W opgenomen. Bij de gekozen lamp/armatuurcombinatie wordt van het totale door de lamp opgenomen vermogen 17,5% in fotosynthetisch actieve straling (PAR) omgezet, dus 8,9 W/m^2 PAR.
- Van de natuurlijke instraling is 45% fotosynthetisch actieve straling (PAR). Aangezien de lichtdoorlatendheid van de kas ongeveer 66% bedraagt, komt ongeveer 30% van de instraling als PAR voor de planten beschikbaar (IMAG- nota 385 PT).

Warmte

- Afdelingsoppervlakte inclusief betonpad bedraagt 192 m^2.
- Geïnstalleerd is 1 SON-T 400 watt lamp per 9,6 m^2 kasoppervlakte. Het bruto opgenomen vermogen per lamp bedraagt 436 W. Het opgenomen vermogen per m^2 kasoppervlakte bedraagt 436 W/9,6 = 45,4 W/m^2. In 1992 zal de bijdrage aan de verwarming van de kas bij het onderzoek worden betrokken.
- Verondersteld is dat 2/9 deel van de globale straling bijdraagt aan de verwarming van de kas (in overleg met dr. Stanghellini).

Energie

- Zoals eerder vermeld is de warmtekrachtopwekking in de proef gesimuleerd. De opwekking van de warmte vond plaats met een kleine verwarmingsketel. De dimensionering van de simulatie is conform de verhouding van warmte en elektriciteit bij warmtekrachtinstallaties in de praktijk. De elektriciteit werd toegevoerd uit het centrale elektriciteitsnet. Bij de omrekening van warmtekrachtverbruik naar gasverbruik is verondersteld dat het totaal nuttig rendement van een warmte-krachtinstallatie 90% bedraagt (op basis van onderste verbrandingswaarde), 10% wordt als verlies beschouwd.

De registratie had betrekking op plantkundige aspecten, als teelt- en produktiegegevens. Deze gegevens werden verkregen uit acht proefvelden per afdeling van elk vier planten. Zo werd gedurende de teelt het tijdstip van bloei van de trossen vastgelegd. Betreffende de produktie zijn oogstgegevens verzameld van aantal, kg-produktie en het gemiddeld vruchtgewicht.

4 Onderzoekresultaten

4.1 Teelt en produktie

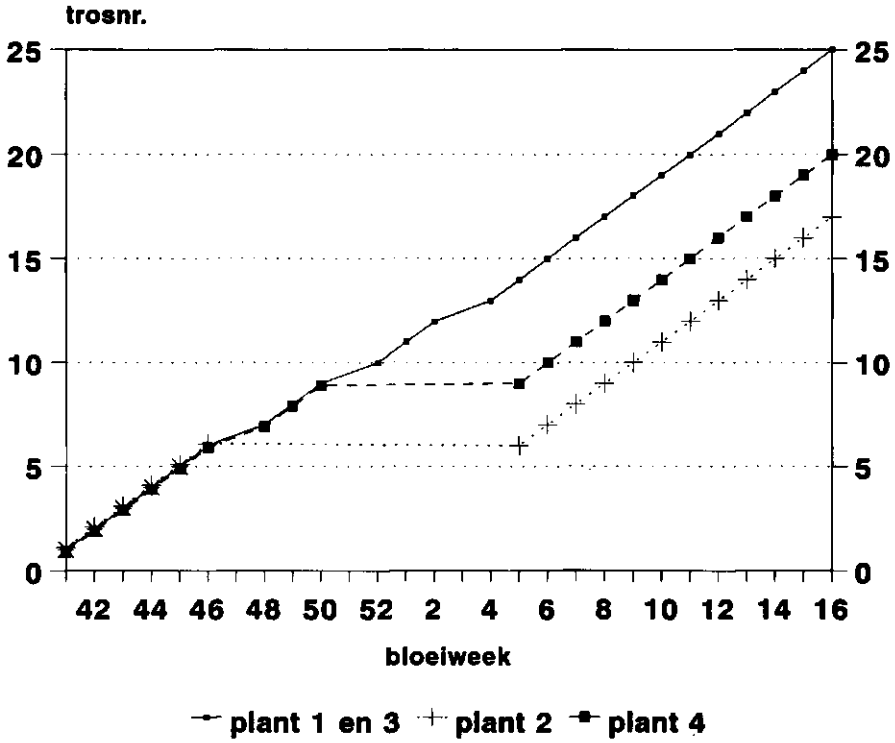
Hoewel het onderzoek in de eerste plaats gericht was op het verkrijgen van informatie over tot klimaat- en energetische aspecten, heeft ook het gewas ruime aandacht gekregen. Gedurende het winterseizoen heeft frequent overleg plaatsgevonden in werkgroepverband. In deze werkgroep waren vertegenwoordigd medewerkers van het Proefstation Naaldwijk, de voorlichtingsdienst, tuinders die op hun bedrijf belichting toepasten en een zaadfirma.

Tabel 4.1.1 Bloei- en oogstweek.
Table 4.1.1 *Week of flowering and harvest.*

Trosnummer plant				Bloei-week	Oogst-week
1	2	3	4		
1	1	1	1	41	48
2	2	2	2	42	49
3	3	3	3	43	50
4	4	4	4	44	51
5	5	5	5	45	52
6		6	6	46	1
7		7	7	48	3
8		8	8	49	4
9		9		50	5
10		10		52	7
11		11		1	8
12		12		2	9
13		13		4	10
14	6	14	9	5	11
15	7	15	10	6	12
16	8	16	11	7	13
17	9	17	12	8	14
18	10	18	13	9	15
19	11	19	14	10	16
20	12	20	15	11	17
21	13	21	16	12	18
22	14	22	17	13	19
23	15	23	18	14	20
24	16	24	19	15	21
25	17	25	20	16	22

Bloei

Bij de bespreking van de proefopzet is het teeltsysteem aan de orde gekomen. In tabel 4.1.1 is weergegeven in welke week de trossen in bloei kwamen en de week waarin de vruchten geoogst werden.
In figuur 4.1.1 is weergegeven in welke week de trossen in bloei waren. Bij de niet gekopte planten konden 25 trossen worden geoogst. De in november gekopte planten bereikten samen met de in januari uit dief verkregen planten 17 trossen, terwijl de in december gekopte planten samen met de diefplanten totaal 20 trossen behaalden. Indien niet tot koppen en het vormen van een nieuwe plant via diefscheut was overgegaan, dan zouden 13 trossen (15%) meer voortgebracht kunnen zijn. Uit het overzicht blijkt dat in de begin- en eindfase van de teelt elke week één tros in bloei kwam, in de maanden november t/m januari werd echter een langere aanlegtijd vereist. De tijdsduur van bloei tot oogst bedroeg in de herfst en de winter 7 weken en in het voorjaar 6 weken.



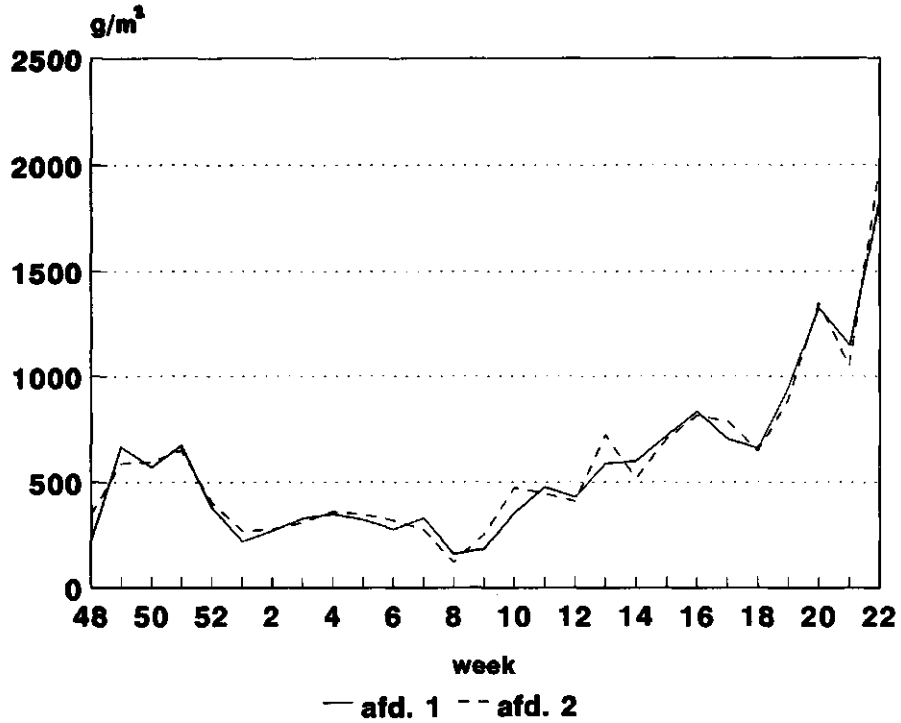
Figuur 4.1.1 Bloei van de trossen.
Figure 4.1.1 *Flowering of the clusters.*

Produktie

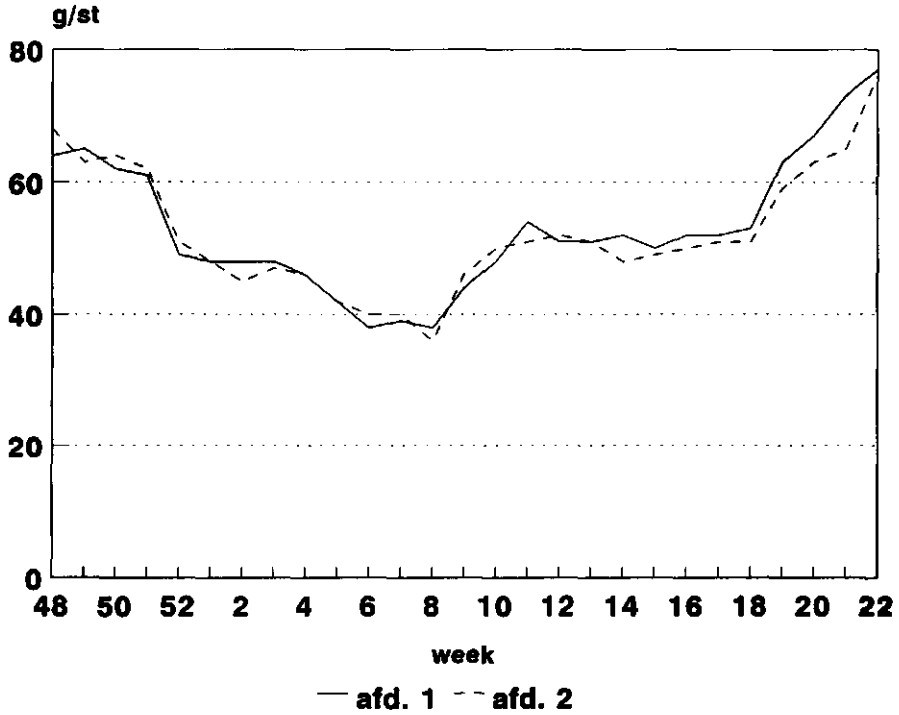
De produktie is bepaald aan de hand van de geoogste vruchten. In de proef zijn vier teeltvarianten opgenomen. Zowel in de controle-afdeling als in de temperatuurcompensatie geregelde afdeling zijn oogstgegevens verzameld bij vruchtdunning (vr.d.) en zonder vruchtdunning (z.vr.d.). De vruchtdunning is uitgevoerd tot de tweede helft van december (tros 9). In de tabel 4.1.2 en de grafieken 4.1.2 t/m 4.1.4 zijn de produktiegegevens weergegeven.

Tabel 4.1.2 Produktie en gemiddeld vruchtgewicht per week.
Table 4.1.2 *Production and average weight of the fruits per week.*

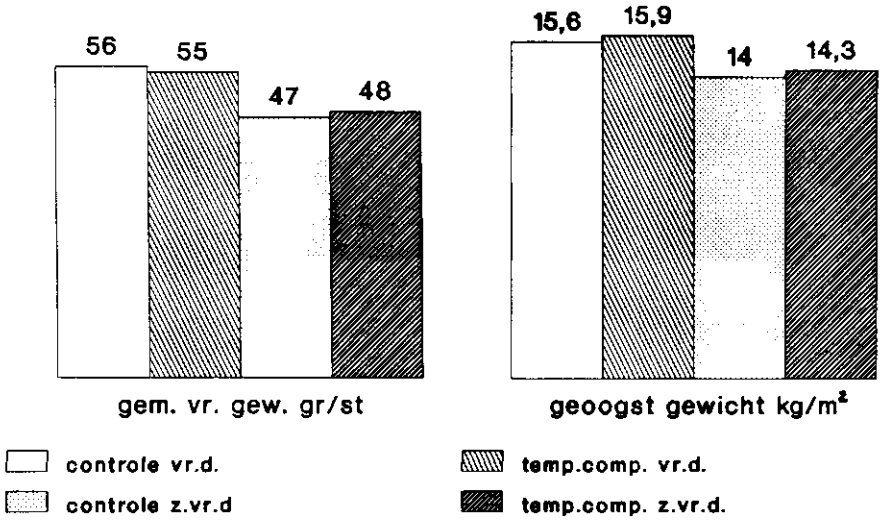
Week	Vruchtdunning				Zonder vruchtdunning			
	controle		temp. comp.		controle		temp. comp.	
	gew. kg/m²	vr.gew. g/st	gew. kg/m²	vr.gew. g/st	gew. kg/m²	vr.gew. g/st	gew. kg/m²	vr.gew. g/st
48	0,224	64	0,347	68	0,297	64	0,540	59
49	0,666	65	0,588	63	0,750	49	0,573	47
50	0,570	62	0,595	64	0,579	45	0,610	49
51	0,672	61	0,649	62	0,669	41	0,649	42
52	0,380	49	0,403	51	0,389	36	0,351	38
1	0,218	48	0,268	48	0,152	34	0,320	32
2	0,267	48	0,275	45	0,237	40	0,179	31
3	0,328	48	0,309	47	0,264	35	0,210	31
4	0,348	46	0,360	46	0,392	40	0,337	33
5	0,321	42	0,346	42	0,292	34	0,269	36
6	0,275	38	0,318	40	0,159	27	0,301	32
7	0,329	39	0,274	40	0,326	30	0,307	33
8	0,158	38	0,118	36	0,159	29	0,188	32
9	0,182	44	0,253	46	0,247	38	0,336	43
10	0,355	48	0,474	50	0,306	39	0,446	46
11	0,476	54	0,446	51	0,404	46	0,349	46
12	0,428	51	0,408	52	0,394	47	0,306	43
13	0,588	51	0,722	51	0,623	45	0,536	47
14	0,599	52	0,518	48	0,464	45	0,571	46
15	0,719	50	0,704	49	0,591	48	0,426	44
16	0,834	52	0,815	50	0,774	48	0,776	50
17	0,703	52	0,787	51	0,515	48	0,660	51
18	0,660	53	0,646	51	0,528	47	0,594	49
19	0,945	63	0,891	59	0,684	49	0,915	59
20	1,325	67	1,347	63	1,264	60	1,062	63
21	1,147	73	1,049	65	0,954	70	0,944	66
22	1,843	77	2,003	76	1,563	69	1,506	67



Figuur 4.1.2 Gewicht geoogste tomaten bij vruchtdunning.
Figure 4.1.2 *Weight of harvested tomatoes in case of thinning fruits.*



Figuur 4.1.3 Gemiddeld vruchtgewicht tomaten bij vruchtdunning.
Figure 4.1.3 *Average fruitweight tomatoes in case of thinning fruits.*



Figuur 4.1.4 Produktie en gemiddeld vruchtgewicht tomaten bij 4 verschillende teeltvarianten.

Figure 4.1.4 *Production and average weight of tomatoes for 4 different growing systems.*

Opmerkingen n.a.v. de tabellen en grafieken.

Gewicht

- De produktie was in de winterperiode bij alle teeltvarianten erg gering.
- Van week 52 tot week 12 werd minder dan 500 g/m^2 per week geoogst. In de maanden januari en februari kwam de weekproduktie nauwelijks boven 300 g/m^2.
- De totale produktie gedurende de proefperiode was het hoogste bij temperatuurcompensatie en vruchtdunning ($\pm$ 16 kg/m^2) en het laagste bij controle zonder vruchtdunning ($\pm$ 14 kg/m^2).
- Vruchtdunning had een positief effect op de produktie ($\pm$ 2 kg/m^2).
- Klimaatregeling op basis van temperatuurcompensatie had vrijwel geen invloed op de produktie.

Gemiddeld vruchtgewicht

- Het gemiddeld vruchtgewicht was bij alle teeltvarianten in de winter beduidend lager dan in het voorjaar.
- Vruchtdunning had een positieve invloed op het vruchtgewicht. Bij toepassing van vruchtdunning was het gemiddeld vruchtgewicht ongeveer 15% hoger.
- Klimaatregeling op basis van temperatuurcompensatie had geen effect op het gemiddeld vruchtgewicht.

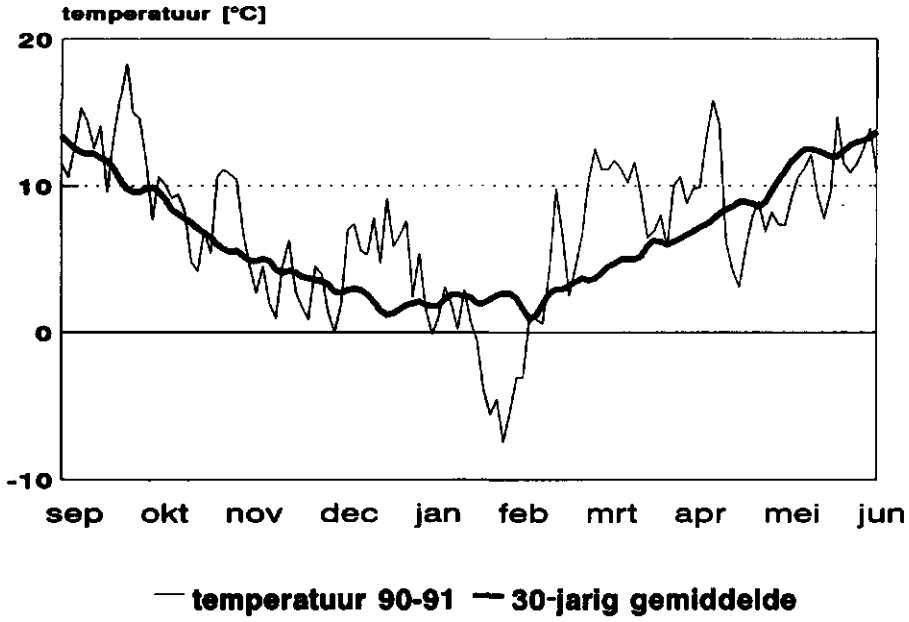
Financieel resultaat

De veilingprijzen waren in de winterperiode zeer laag. In de eerste drie maanden van 1991 was de gemiddelde veilingprijs f 3,46 per kg t.o.v. f 5,02 in het voorgaande jaar. Aangezien het economisch resultaat in het verleden zelfs bij hoge produktprijzen marginaal was, zal het duidelijk zijn dat - gezien de vrijwel ongewijzigde produktie-omvang - het bedrijfsresultaat negatief was.

4.2 Temperatuur en lichttoevoer

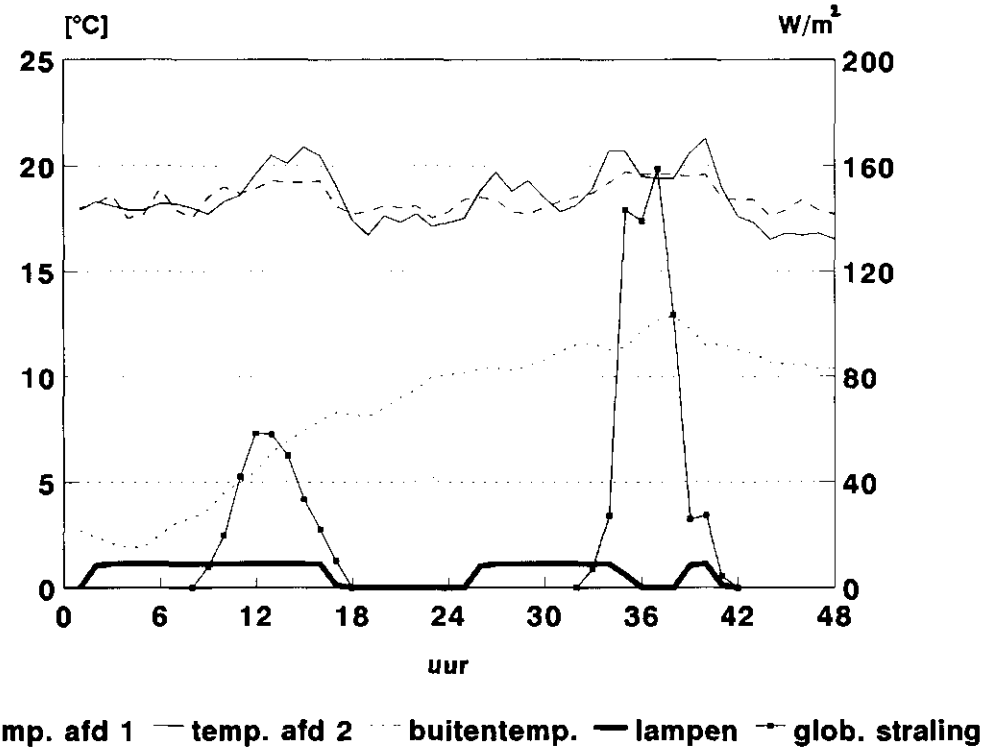
Temperatuur

Zoals reeds naar voren is gebracht bij de beschrijving van de meetgegevens, heeft registratie plaatsgevonden van de temperatuur in beide teeltafdelingen en de buitentemperatuur. Ten einde inzicht te krijgen in de verschillen in het klimaat in de proefperiode en het langjarig gemiddelde is in figuur 4.2.1 het daggemiddelde voor de buitentemperatuur en het 30-jarig gemiddelde in De Bilt (KNMI) weergegeven.



Figuur 4.2.1 Buitentemperatuur seizoen 1990-1991 en langjarig gemiddelde.
Figure 4.2.1 *Outside air temperature season 1990-1991 and average of long standing.*

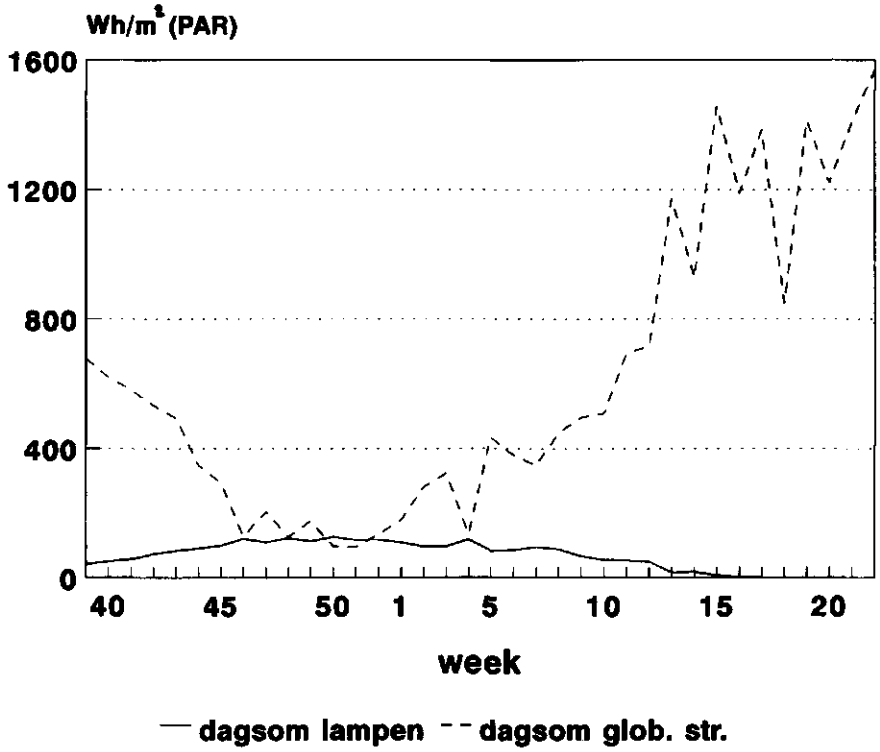
Gedurende de proefperiode weken de buitentemperaturen nogal af van het langjarig gemiddelde. De maanden december, maart en april waren aan de warme kant, terwijl januari, februari en mei duidelijk kouder waren dan normaal.
In de proefopzet is uitgebreid ingegaan op de wijze waarop de kastemperaturen werden gerealiseerd. In afdeling 1 werd de ingestelde temperatuur bereikt door de warmte-overschotten ten gevolge van globale straling af te luchten en de warmte-overschotten door de WKK tijdelijk op te slaan. In principe werden in beide afdelingen dezelfde temperaturen aangehouden. In afdeling 2 werd echter bij warmte-overschotten door de WKK een maximale temperatuurverhoging van 3 °C toegestaan. Ten einde voor beide afdelingen tot gelijke temperatuursommen te komen, werd op tijden van warmte-behoefte aan de hand van een vijf daags voortschrijdend temperatuurgemiddelde een maximaal 3 °C lagere temperatuur toegestaan dan in afdeling 1. In verband met teelteisen was de minimaal toelaatbare temperatuur 16 °C. In figuur 4.2.2 zijn de temperaturen voor beide afdelingen weergegeven van 10 en 11 november 1990.



Figuur 4.2.2 Kastemperatuur in beide afdelingen op 10 en 11 november 1990.
Figure 4.2.2 *Air temperature in both compartments on november 10th and 11th 1990.*

De temperatuur in afd. 2 vertoonde een grotere variatie dan in afd. 1. Op tijden dat de assimilatiebelichting in werking was en de buitentemperatuur niet erg laag, steeg de temperatuur boven de waarde van afd. 1. In de volgende periode werd dan een lagere temperatuur nagestreefd om hetzelfde gemiddelde als in afd. 1 te bereiken.

Lichttoevoer
De lichttoevoer door globale straling vertoonde in de winter en het voorjaar grote verschillen. In tabel 4.2.1 zijn per week de gemiddelde dagsommen en het procentuele aandeel van lampen en globale straling weergegeven. In de winter werden gedurende enkele weken dagsomwaarden bereikt van minder dan 100 Wh/m² PAR; in het voorjaar werd regelmatig meer dan 1500 Wh/m² gemeten. De lichttoevoer door lampen varieerde veel minder, doch de bijdrage bleef beperkt tot maximaal 125 Wh/m². In de weken 46 t/m 52 was de lichttoevoer van lampen en globale straling ongeveer gelijk; gedurende de rest van de proefperiode lag de hoeveelheid licht door globale straling op een hoger niveau dan de toevoer door lampen. In de gehele proefperiode werd ongeveer 10% van het licht door de lampen toegevoerd. In figuur 4.2.3 zijn de gemiddelde dagsommen lichttoevoer per week weergegeven.



Figuur 4.2.3 Gemiddelde dagsom licht per week.
Figure 4.2.3 *Average daily total light per week.*

Tabel 4.2.1 Lichttoevoer PAR per m^2 kas.
Table 4.2.1 *Supply of light PAR per m^2 greenhouse.*

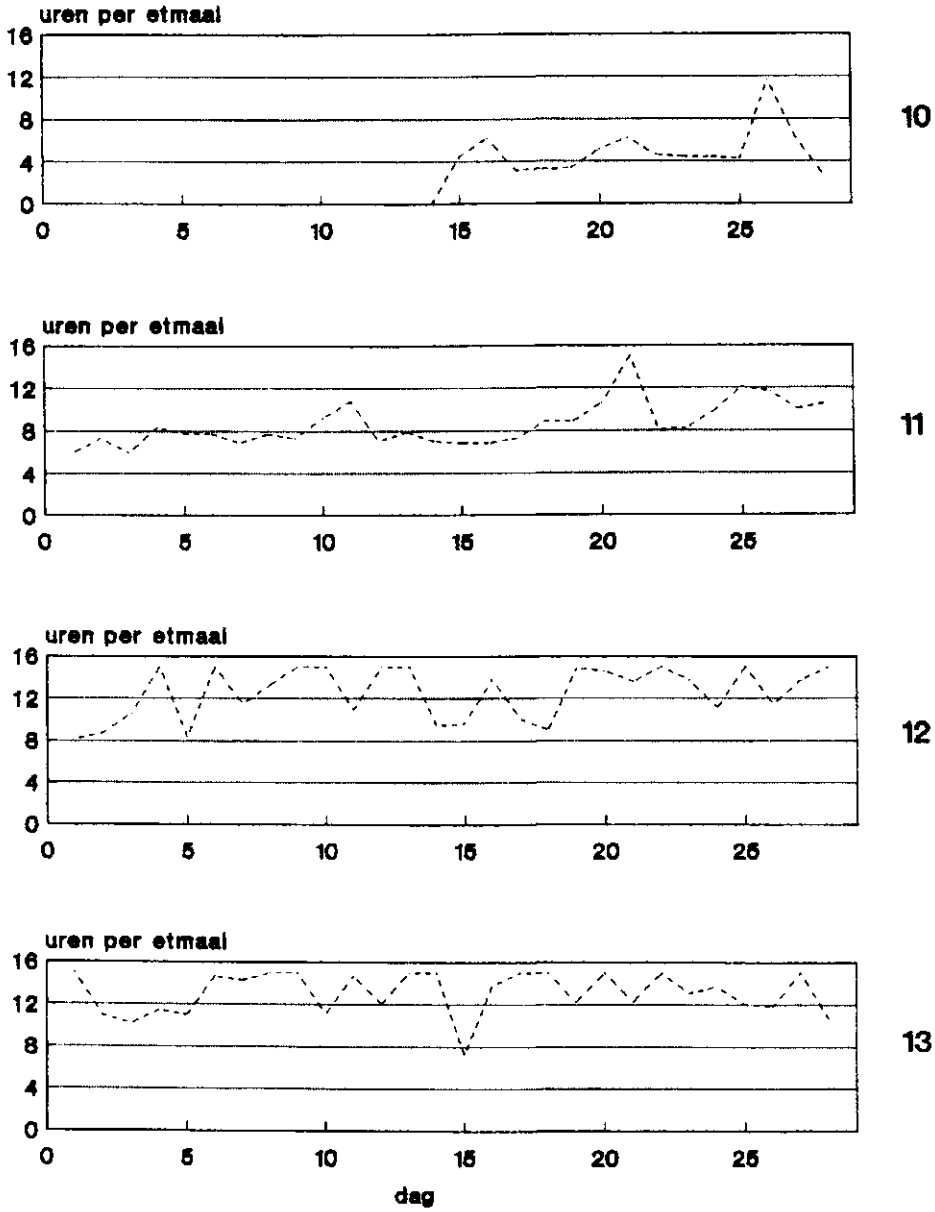
Week	Gem. per etmaal (Wh)			Percentage		Cumulatief (kWh)	
	lampen	gl. str.	totaal	lampen	gl. str.	lampen	gl. str.
39	41	677	718	6	94	0,3	4,7
40	50	619	669	7	93	0,6	9,1
41	56	580	637	9	91	1,0	13,1
42	73	532	576	14	86	1,5	16,9
43	83	493	576	14	86	2,1	20,3
44	91	348	438	21	79	2,8	22,8
45	99	294	394	25	75	3,5	24,8
46	120	127	247	49	51	4,3	25,7
47	110	203	313	35	65	5,1	27,1
48	122	125	247	49	51	5,9	28,0
49	113	174	287	39	61	6,7	29,2
50	126	97	223	56	44	7,6	29,9
51	116	94	210	55	45	8,4	30,6
52	118	135	252	47	53	9,2	31,5
1	109	176	285	38	62	10,0	32,7
2	96	279	376	26	74	10,7	34,7
3	97	323	420	23	77	11,3	37,0
4	118	133	251	47	53	12,2	37,8
5	83	434	517	16	84	12,7	40,9
6	85	381	466	18	82	13,3	43,6
7	94	347	441	21	79	14,0	46,0
8	88	450	537	16	84	14,6	49,2
9	67	497	563	12	88	15,1	52,6
10	55	509	564	10	90	15,5	56,2
11	53	694	748	7	93	15,8	61,1
12	49	716	765	6	94	16,2	66,1
13	16	1172	1188	1	99	16,3	74,3
14	18	928	946	2	98	16,4	80,8
15	7	1458	1465	0	100	16,5	91,0
16	4	1190	1193	0	100	16,5	99,3
17	1	1384	1384	0	100	16,5	109,0
18	0	848	848	0	100	16,5	114,9
19	0	1413	1413	0	100	16,5	124,8
20	0	1222	1222	0	100	16,5	133,4
21	0	1408	1408	0	100	16,5	143,2
22	0	1572	1572	0	100	16,5	154,2

4.3 Belichting

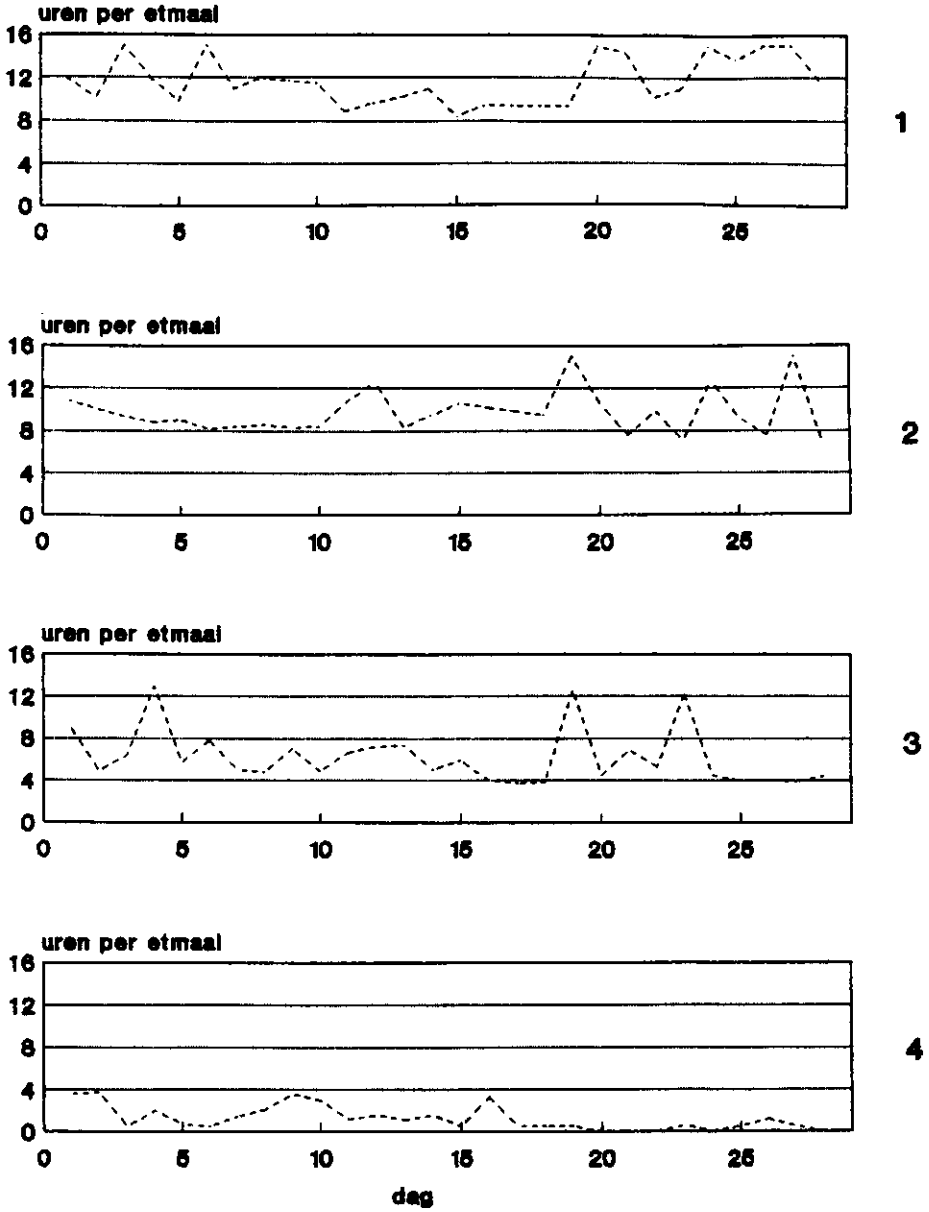
De branduren van de belichting gedurende de proefperiode zijn verzameld en in overzichten verwerkt. Uit de in hoofdstuk 3.3.1 beschreven regelstrategie blijkt dat de belichting afhankelijk was van de tijd van het jaar en de straling buiten. In de winter werd voor de lampen een brandduur van maximaal 15 uur per etmaal gehanteerd. De donkerperiode van minimaal 9 uur werd nodig geacht voor de afvoer van overdag gevormde assimilaten. In het vroege najaar en het voorjaar werd een kortere maximale brandduur gekozen. De geblokkeerde brandtijd begon een uur voor zonsondergang. In de tabellen 4.3.1 t/m 4.3.3 zijn de belichtingsuren resp. per etmaal, week en periode weergegeven; de grafische weergave hiervan is in de figuren 4.3.1 t/m 4.3.4 opgenomen.

Tabel 4.3.1 Belichtingsuren per etmaal.
Table 4.3.1 *Lighting time during 24 hours.*

Dag	Periode							
	10	11	12	13	1	2	3	4
1		5,9	8,2	15,0	11,9	10,8	9,0	3,6
2		7,3	8,7	10,9	10,1	10,0	4,9	3,7
3		6,0	10,6	10,2	15,0	9,3	6,4	0,5
4		8,3	15,0	11,5	11,9	8,8	13,0	2,0
5		5,8	8,3	11,0	9,8	9,0	5,7	0,7
6		7,7	15,0	14,7	15,0	8,2	7,8	0,5
7		6,9	11,5	14,3	11,0	8,4	5,0	1,5
8		7,7	13,3	15,0	12,0	8,6	4,8	2,1
9		7,3	15,0	15,0	11,7	8,3	7,0	3,6
10		9,2	15,0	11,1	11,5	8,4	4,9	3,0
11		10,8	10,9	14,7	8,9	10,8	6,7	1,2
12		7,0	15,0	12,1	9,6	12,6	7,2	1,6
13		7,9	15,0	15,0	10,2	8,3	7,3	1,1
14		7,0	9,4	15,0	10,9	9,5	5,0	1,6
15	4,5	6,9	9,6	7,2	8,4	10,6	5,9	0,5
16	6,2	6,9	13,9	13,8	9,4	10,2	4,0	3,3
17	3,2	7,3	10,0	15,0	9,4	9,8	3,7	0,5
18	3,3	8,9	9,0	15,0	9,4	9,5	3,9	0,5
19	3,4	8,9	14,9	12,2	9,4	15,0	12,6	0,5
20	5,2	10,6	14,6	15,0	15,0	10,6	4,5	0,0
21	6,2	15,0	13,6	12,3	14,5	7,6	6,9	0,0
22	4,6	8,1	15,0	15,0	10,2	9,8	5,3	0,0
23	4,4	8,2	13,7	13,1	10,9	7,0	12,2	0,6
24	4,4	9,8	11,1	13,7	15,0	12,7	4,5	0,0
25	4,3	12,1	15,0	12,0	13,7	9,2	4,0	0,5
26	11,7	11,7	11,4	11,9	15,0	7,6	4,1	1,2
27	6,3	10,0	13,7	15,0	15,0	15,0	3,9	0,5
28	2,7	10,5	15,0	10,7	11,8	7,0	4,4	0,0



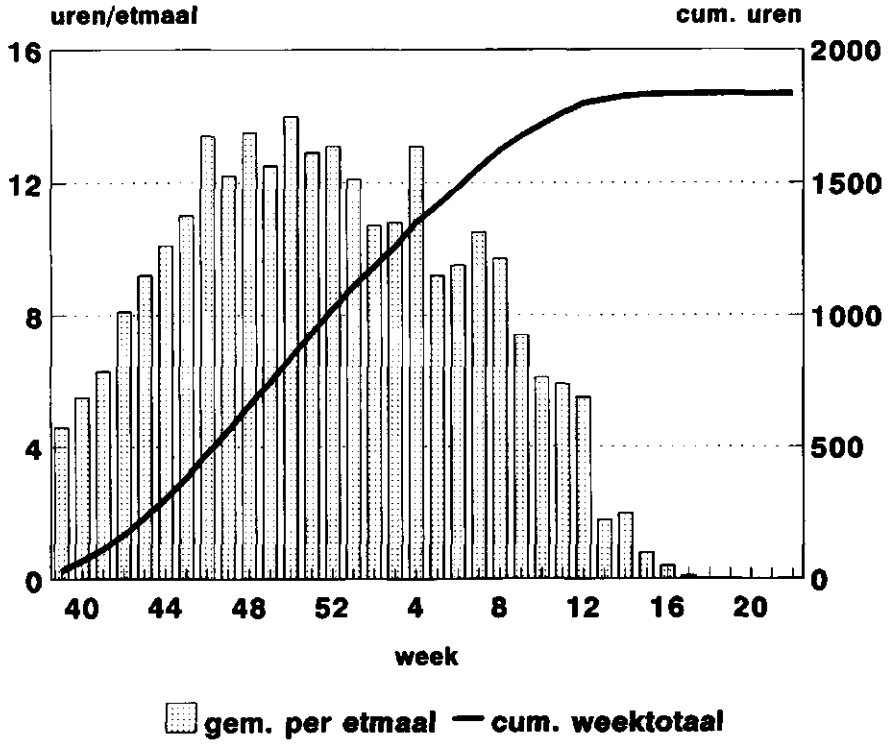
Figuur 4.3.1 Belichtingsuren perioden 10 t/m 13.
Figure 4.3.1 *Lighting hours periods 10 up to 13.*



Figuur 4.3.2 Belichtingsuren periode 1 t/m 4.
Figure 4.3.2 *Lighting hours periods 1 up to 4.*

Tabel 4.3.2 Belichtingsuren per week.
Table 4.3.2 *Lighting hours per week.*

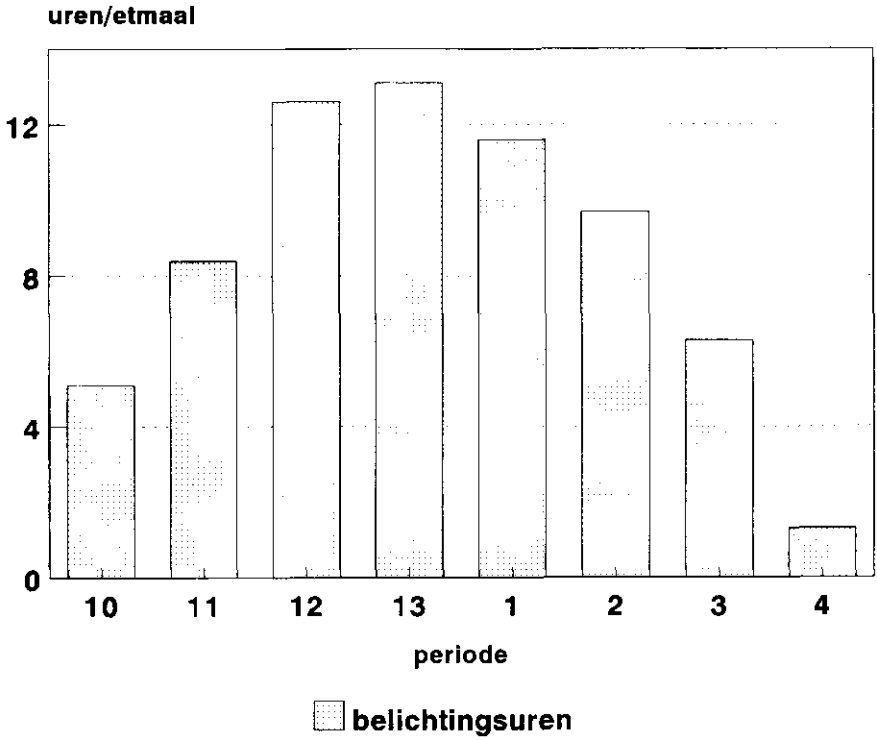
Week	Gem. per etmaal	Weektotaal	Cum. weektotaal
39	4,6	32	32
40	5,5	39	71
41	6,3	44	114
42	8,1	57	171
43	9,2	65	236
44	10,1	70	306
45	11,0	77	384
46	13,4	94	477
47	12,2	86	563
48	13,5	95	658
49	12,5	88	745
50	14,0	98	843
51	12,9	91	933
52	13,1	91	1025
1	12,1	85	1110
2	10,7	75	1184
3	10,8	75	1260
4	13,1	91	1351
5	9,2	64	1416
6	9,5	66	1482
7	10,5	73	1555
8	9,7	68	1623
9	7,4	52	1675
10	6,1	43	1718
11	5,9	42	1760
12	5,5	38	1798
13	1,8	13	1811
14	2,0	14	1825
15	0,8	5	1830
16	0,4	3	1833
17	0,1	0	1834
18	0,0	0	1834
19	0,0	0	1834
20	0,0	0	1834
21	0,0	0	1834
22	0,0	0	1834



Figuur 4.3.3 Belichtingsuren per week.
Figure 4.3.3 *Lighting hours per week.*

Tabel 4.3.3 Belichtingsuren per periode.
Table 4.3.3 *Lighting hours per period.*

Periode	Gem. per etmaal
10	5,1
11	8,4
12	12,6
13	13,1
1	11,6
2	9,7
3	6,3
4	1,3



Figuur 4.3.4 Belichtingsuren in de verschillende perioden.
Figure 4.3.4 *Lighting hours in the various periods.*

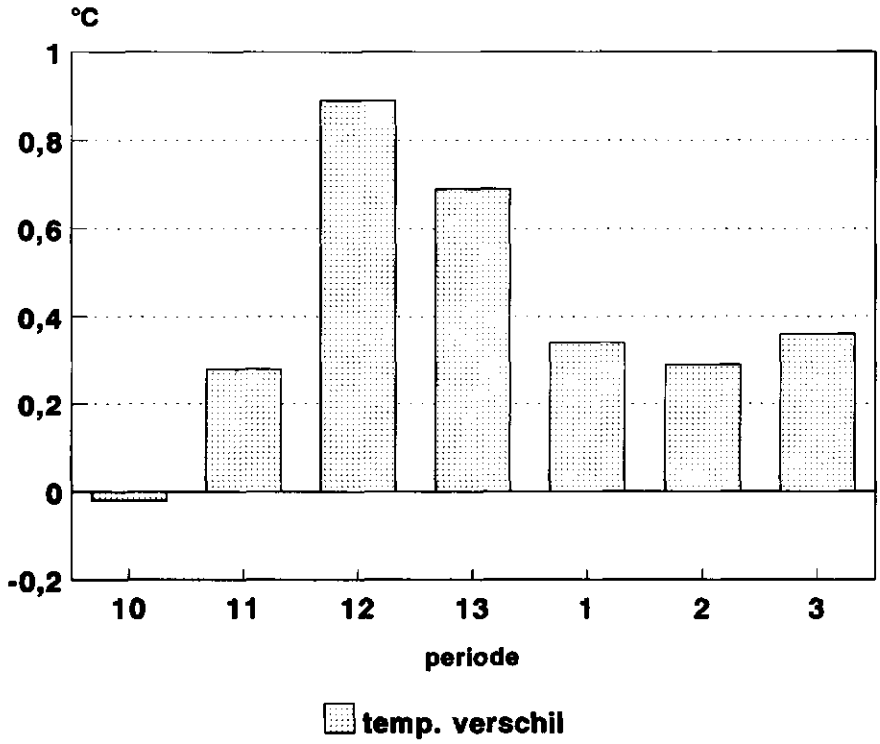
Opmerkingen
Het totale aantal belichtingsuren tijdens de proefperiode bedroeg 1833 uur. Dit aantal is veel lager dan bij praktijkbedrijven met belichting in de rozenteelt doorgaans wordt bereikt. Het hogere aantal belichtingsuren bij rozen is het gevolg van zowel een langere belichtingsperiode in het jaar als een hoger maximum aantal belichtingsuren per etmaal. Na half april is vrijwel niet meer belicht. Het gemiddeld aantal belichtingsuren per etmaal vertoonde grote verschillen. Hoewel in de periode 11 t/m 2 de maximale belichtingstijd 15 uur bedroeg, werd dit aantal alleen in de perioden 12 en 13 regelmatig bereikt. Het maximale aantal belichtingsuren werd alleen bereikt op dagen dat de globale straling niet hoger kwam dan 80 W/m^2.

Invloed lamptemperatuur
In voorgaande jaren werd rekking van de koppen van planten gesignaleerd, indien deze in de directe omgeving van de lampen groeiden. Vermoed werd dat deze rekking werd veroorzaakt door een hogere luchttemperatuur tijdens het branden van de lampen. Om de temperatuurinvloed van de lampen op de omgeving te bepalen, werd gedurende de proefperiode de luchttemperatuur gemeten op een afstand van 50 cm loodrecht onder de lamp. In tabel 4.3.4 is per periode het temperatuurverschil vermeld tussen lampen aan en uit, waarbij de gemeten kastemperaturen voor de afzonderlijke (aan of uit) situaties als basis dienden. Ten einde verstoring ten gevolge van temperatuureffecten door globale straling uit te sluiten, zijn alleen de meetwaarden tussen 19.00 uur en 7.00 uur in

de tabel opgenomen. In figuur 4.3.5 laat de temperatuur in de omgeving van de brandende lampen slechts een geringe verhoging zien. Deze verhoging bedroeg in periode 12 ongeveer 1 °C en was in de andere perioden nog geringer. Voor de lagere temperatuur in periode 10 is geen goede verklaring gevonden. Uit deze meetresultaten mag worden afgeleid dat de geconstateerde strekking van de koppen waarschijnlijk slechts in geringe mate het gevolg is geweest van de temperatuurverhoging door de lampen. Het vermoeden bestaat dat de lichtintensiteit en stralingsfrequentie van de lampen bij de strekking een belangrijke rol spelen.

Tabel 4.3.4 Temperatuurverschil door lampwarmte.
Table 4.3.4 *Temperature difference by heat of the lamps.*

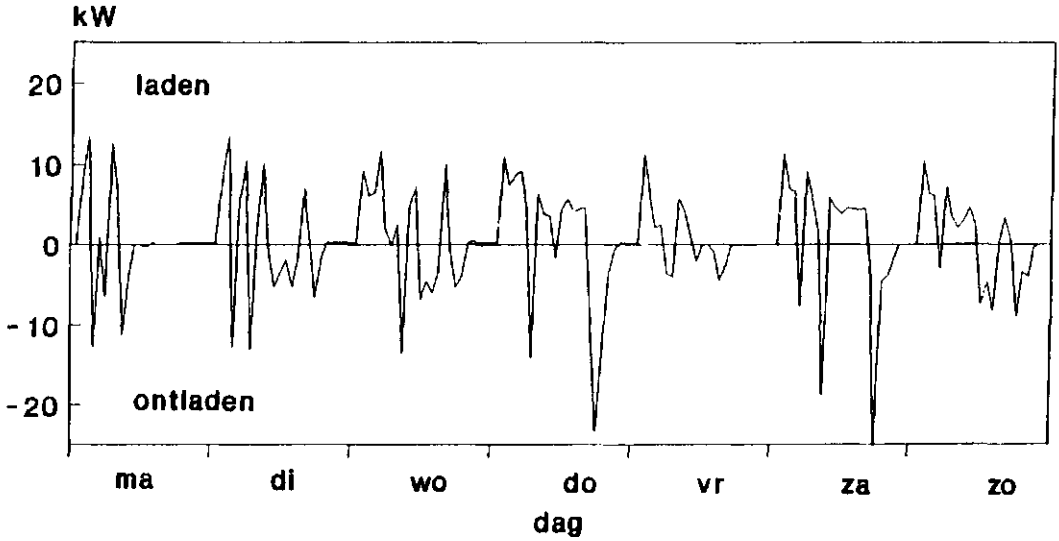
Periode	Temperatuurverschil
10	−0,02
11	0,28
12	0,89
13	0,69
1	0,34
2	0,29
3	0,36



Figuur 4.3.5 Temperatuurverschil door lampwarmte.
Figure 4.3.5 *Temperature difference by heat of the lamps.*

4.4 Warmte-opslag

Bij de reeds eerder beschreven proefopzet is vermeld dat het onderzoek zich in afdeling 1 heeft gericht op het verkrijgen van inzicht in de mogelijkheden van kortdurende warmte-opslag. De opslag heeft betrekking op het opvangen van verschillen in warmtevraag en warmte-aanbod gedurende een of enkele etmalen. De vrijkomende warmte van de warmtekracht werd in de kas en/of in het warmte-opslagvat gevoerd. Gedurende het onderzoek werden grote verschillen gesignaleerd in omvang van laden en ontladen van de warmtebuffer. Om inzicht te verschaffen in het vullen en legen van de buffer is in figuur 4.4.1 de bufferwerking weergegeven van de periode 5 t/m 11 november 1990.



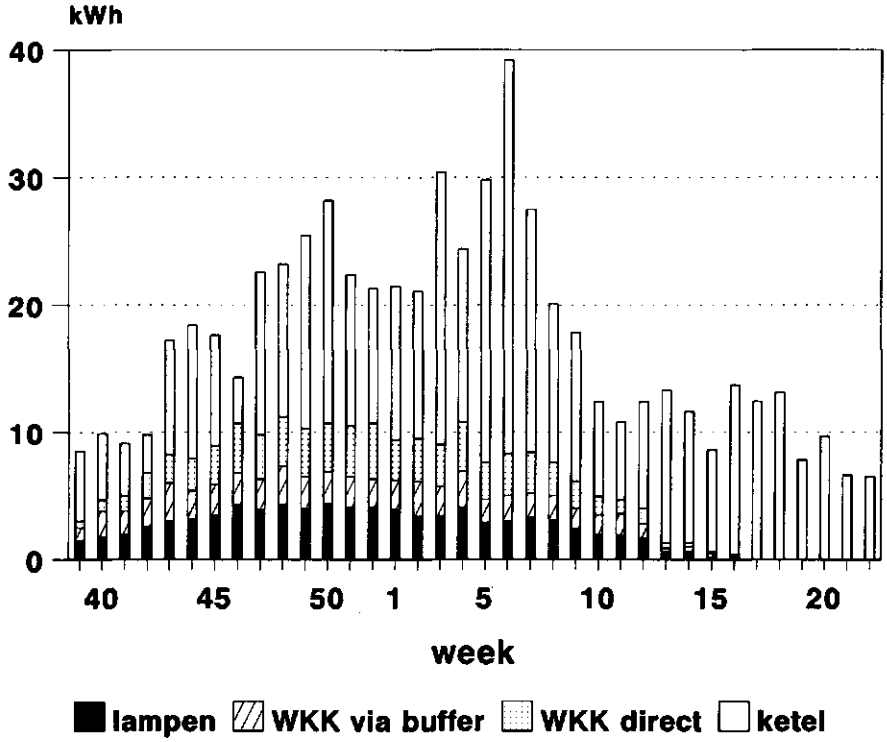
Figuur 4.4.1 Bufferwerking in de periode 5 t/m 11 november 1990.
Figure 4.4.1 *Buffer activity in period 5 up to 11 november 1990.*

De figuur toont dat vanaf ongeveer 1.00 uur in de nacht warmte werd opgeslagen in de buffer. Dit was het tijdstip waarop de belichting werd ingeschakeld en niet alle WKK-warmte aan de kas kon worden toegevoerd. Gedurende de dagperiode werd de buffer geladen, indien de belichting aan was en er bovendien een warmte-overschot optrad. Op tijden dat de belichting niet brandde werd de buffer veelal ontladen. In de figuur is tevens te zien dat aan het eind van het etmaal de buffer in rust is. Alle tijdelijk opgeslagen warmte was op dat tijdstip weer naar de kas afgevoerd.

4.5 Warmtetoevoer

Aan de warmtetoevoer in afdeling 1 werd bijgedragen door lampen, globale straling, ketel, warmtekracht en warmte-opslag.
Verondersteld is dat alle toegevoerde elektrische energie naar de lampen vrij kwam in de vorm van warmte (in 1992 zal nader onderzoek naar de effectieve warmtebijdrage door lampen worden verricht).

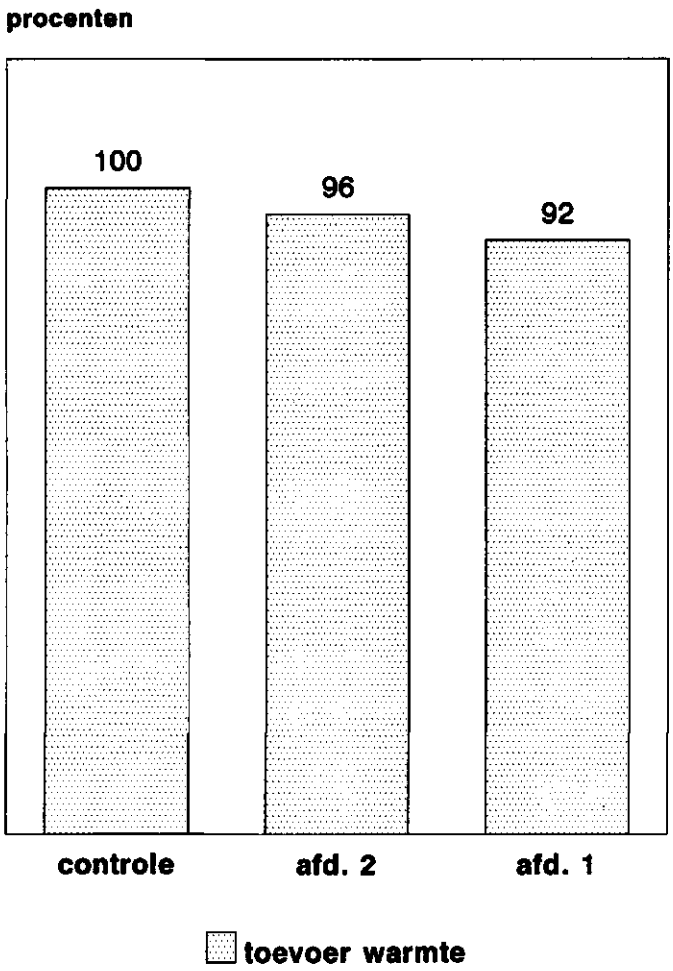
De warmte van lampen en warmtekracht kwam beschikbaar op tijden dat de lampen branden. De door de warmtekrachtinstallatie geproduceerde warmte werd, indien mogelijk, direct in de kas gebracht. Bij een overschot aan warmte werd deze tijdelijk opgeslagen in een warmtebuffer en op momenten met een warmtetekort toegevoerd aan de kas. Indien alle genoemde bronnen ontoereikend waren om aan de warmtevraag te voldoen, werd warmte via de ketel toegevoerd.
In de tabellen 4.5.1 en 4.5.2 alsmede in de figuren 4.5.1 t/m 4.5.3 is de omvang van de totale warmtesuppletie en het aandeel van de warmte-opslag voor de gehele onderzoekperiode weergegeven.



Figuur 4.5.1 Warmtesuppletie afdeling 1 per m^2 per week.
Figure 4.5.1 *Heat supply compartment 1 per m^2 per week.*

Tabel 4.5.1 Warmtesuppletie afdeling 1 per m^2 per week.
Table 4.5.1 *Heat supply compartment 1 per m^2 per week.*

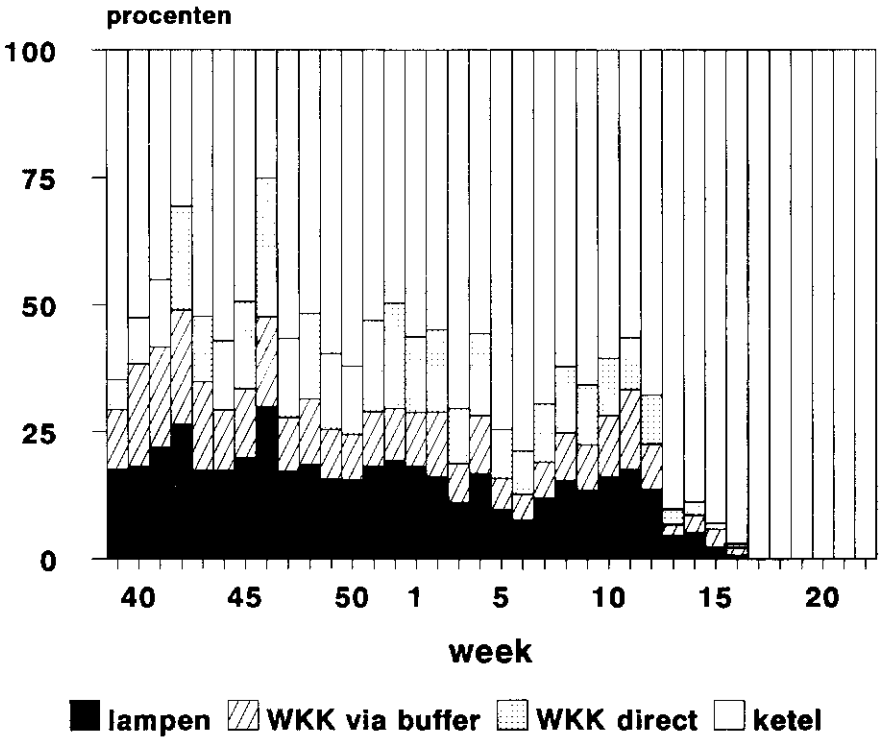
Week	Warmtekracht				Ketel	Totaal
	lampen	buffer direct	warmte	totaal		
	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
39	1,5	1,0	0,5	3,0	5,5	8,5
40	1,8	2,0	0,9	4,7	5,2	9,9
41	2,0	1,8	1,2	5,0	4,1	9,1
42	2,6	2,2	2,0	6,8	3,0	9,8
43	3,0	3,0	2,2	8,2	9,0	17,2
44	3,2	2,2	2,5	7,9	10,5	18,4
45	3,5	2,4	3,0	8,9	8,7	17,6
46	4,3	2,5	3,9	10,7	3,6	14,3
47	3,9	2,4	3,5	9,8	12,8	22,6
48	4,3	3,0	3,9	11,2	12,0	23,2
49	4,0	2,5	3,8	10,3	15,2	25,5
50	4,4	2,5	3,8	10,7	17,5	28,2
51	4,1	2,4	4,0	10,5	11,9	22,4
52	4,1	2,2	4,4	10,7	10,6	21,3
1	3,9	2,3	3,2	9,4	12,1	21,5
2	3,4	2,7	3,4	9,5	11,6	21,1
3	3,4	2,3	3,3	9,0	21,4	30,4
4	4,1	2,8	3,9	10,8	13,6	24,4
5	2,9	1,8	2,9	7,6	22,2	29,8
6	3,0	2,0	3,3	8,3	30,9	39,2
7	3,3	1,9	3,2	8,4	19,1	27,5
8	3,1	1,9	2,6	7,6	12,5	20,1
9	2,4	1,6	2,1	6,1	11,7	17,8
10	2,0	1,5	1,4	4,9	7,5	12,4
11	1,9	1,7	1,1	4,7	6,1	10,8
12	1,7	1,1	1,2	4,0	8,4	12,4
13	0,6	0,3	0,4	1,3	12,0	13,3
14	0,6	0,4	0,3	1,3	10,3	11,6
15	0,2	0,3	0,1	0,6	8,0	8,6
16	0,1	0,2	0,1	0,4	13,3	13,7
17					12,4	12,4
18					13,1	13,1
19					7,8	7,8
20					9,7	9,7
21					6,6	6,6
22					6,5	6,5
	83,3	56,9	72,1	212,3	406,4	618,7



Figuur 4.5.2 Procentuele warmtesuppletie.
Figure 4.5.2 *Proportional heat supply.*

Uit tabel 4.5.1 en figuur 4.5.1 blijkt dat de totale warmtesuppletie tot week 43 en na week 9 op een beduidend lager niveau lag dan in de tussenliggende periode. Vooral in week 3 t/m 7 moest er door de lage buitentemperatuur veel warmte worden toegevoerd. Daar de belichting na week 12 vrijwel niet meer in bedrijf was, werd in die periode de warmtetoevoer bijna volledig door de verwarmingsketel verzorgd. In week 6 werd met bijna 40 kWh/m^2 (ongeveer 4 m^3 gas/m^2) de grootste warmtetoevoer bereikt.
De door lampen en WKK geleverde warmte schommelde in de periode week 46 t/m week 4 rond 10 kWh/m^2. Gedurende de rest van de proefperiode was de bijdrage geringer of geheel afwezig.
De figuren 4.5.2 en 4.5.3 tonen de procentuele bijdrage m.b.t. de warmtesuppletie. De door de warmtekracht toegevoerde warmte bedroeg tot week 2 ongeveer de helft van het totaal. Daarna werd het aandeel van de verwarmingsketel steeds groter om uiteindelijk de gehele warmtevoorziening te verzorgen. In totaal werd 212 kWh/m^2 warmte direct of indirect door de WKK in de kas gevoerd. De tijdelijk in het opslagvat opgeslagen warmte bedroeg ongeveer 57 kWh/m^2, hetgeen 9,2% uitmaakte van de

totale warmtetoevoer. De belangrijkste warmtebron was de verwarmingsketel met 406 kWh/m^2 ofwel ruim 65% van de totale aanvoer.
Zoals in hoofdstuk 3 al uitvoerig is beschreven, werd in afdeling 2 de warmte toegevoerd op basis van een temperatuurcompensatieregeling. Alle warmte van de WKK werd direct in de kas gebracht. Op tijden dat de WKK in bedrijf was,
werd een maximale verhoging van de kastemperatuur van 3 °C boven het ingestelde temperatuursetpoint in afdeling 1 toegestaan. Aangezien in beide afdelingen gelijke temperatuursommen werden nagestreefd, werd gedurende de periode dat de WKK niet actief was een lagere kastemperatuur gehanteerd.
Om inzicht te krijgen in het effect op de warmtetoevoer voor de gekozen regelsystemen in beide afdelingen is de warmtetoevoer voor afdeling 1 berekend indien het tijdelijk warmte-overschot van de WKK niet gebufferd kan worden. Alle nu tijdelijk opgeslagen WKK-warmte zou dan moeten worden afgelucht en later door ketelwarmte worden aangevuld. In tabel 4.5.2 is de warmtetoevoer van de verschillende componenten weergegeven, zoals die voor beide proefafdelingen is gemeten en bovendien is vermeld wat de warmtetoevoer zou zijn geweest indien in afdeling 1 geen warmte-opslag had plaatsgevonden (controle).



Figuur 4.5.3 Procentuele warmtesuppletie.
Figure 4.5.3 *Proportional heat supply.*

Tabel 4.5.2 Overzicht warmtetoevoer 3 varianten.
Table 4.5.2 *Survey heat distribution 3 variants.*

	Afd. 1 kWh/m^2	Afd. 2 kWh/m^2	Controle kWh/m^2
lampen	83,3	83,3	83,3
WKK direct	72,1	129,0	129,0
WKK-opslag	56,9	–	–
ketel	406,4	437,7	463,3
totaal	618,7 (92%)	650,0 (96%)	675,6 (100%)

Uit tabel 4.5.2 blijkt dat door de opslag van warmte in de buffer de warmtetoevoer verminderd kon worden van 675,6 kWh/m^2 tot 618,7 kWh/m^2. De verwarmingsketel hoefde daardoor 56,9 kWh/m^2 minder warmte te produceren. Bij een verondersteld nuttig rendement voor de ketel van 90% op de calorische bovenwaarde van aardgas (b.w. 9,8 kWh/m^3) bedroeg de energiebesparing 6,5 m^3 aardgaseq. per m^2.
De in afdeling 2 toegepaste regelstrategie van temperatuurcompensatie leidde tot een verlaging van de warmtetoevoer door de ketel van 25,6 kWh/m^2. Uitgaande van genoemd ketelrendement kon door de temperatuurcompensatieregeling een besparing worden gerealiseerd van 2,9 m^3 aardgas e.q. per m^2.
Opmerkelijk is de relatief grote energiebesparing bij de temperatuurcompensatie-regeling. Bij toepassing van dit regelsysteem zijn geen extra investeringen vereist, terwijl bij het onderzoek ook geen opbrengstderving werd geconstateerd. Bij toekomstig optimaliseringsonderzoek wordt aandacht aan deze optie wenselijk geacht.

5 Beïnvloedingsfactoren warmte-opslagcapaciteit

5.1 Inleiding

Bij de toepassing van kortdurende warmte-opslag van WKK-warmte ontstaan tal van vragen. In dit hoofdstuk staat de vraag naar de vereiste buffercapaciteit als functie van een viertal invloedsfactoren centraal. Deze zal worden beantwoord met behulp van simulatietechnieken, waarbij extrapolaties worden uitgevoerd waarin de invloedsfactoren worden vergroot en verkleind. De volgende invloedsfactoren worden onderscheiden.

- Aantal belichtingsuren.
  Het aantal uren wordt in belangrijke mate bepaald door de duur van de donkere periode in de nacht. Daarnaast beïnvloedt het criterium waarop de belichting overdag uitgeschakeld wordt het aantal belichtingsuren. Beide invloedsfactoren worden in § 5.3 geëvalueerd.
- Het energieverbruik van de kas (§ 5.4).
- Gebruik van een temperatuurcompensatieprogramma.
  In § 5.5 worden variaties aangebracht op het temperatuurcompensatie-algoritme. Dit om de effecten van ruimere en krappere temperatuurgrenzen in kaart te brengen.
- Gebruik van rookgas CO_2.
  In § 5.6 wordt de buffering van overschotten ten gevolge van CO_2-dosering aan het warmte-opslagvraagstuk toegevoegd.

In § 5.7 worden alle extrapolaties bij elkaar gebracht en wordt de gevoeligheid van de bufferafmeting voor de verschillende gevarieerde factoren beoordeeld.
In alle te onderzoeken alternatieven wordt de buffer zodanig gedimensioneerd dat niet alle warmte-overschotten, maar het warmte-overschot op 5 $kWh \cdot m^{-2}$ na kan worden opgeslagen. De eis dat alle overschotten opgeslagen moeten kunnen worden, zou leiden tot veel grotere bufferafmetingen omdat deze dan gedimensioneerd zou moeten worden op de extreme situatie. Vanuit economisch oogpunt zou hierbij altijd een (veel) te groot buffer geplaatst worden. De acceptatie van een af te luchten warmte-overschot van 5 $kWh \cdot m^{-2}$ (½ m^3 aardgas) is naar onze mening zeer acceptabel.
De simulaties die in de aftasting van invloedsfactoren gebruikt worden, lopen alle volgens een zelfde concept. In de eerste stap worden de met de alternatieven gepaard gaande veranderingen in de warmtebehoefte van de kas berekend. Door alleen de veranderingen t.o.v. de uitgangssituatie te berekenen, wordt zo min mogelijk van de oorspronkelijke metingen afgeweken. De tweede stap wordt gevormd door het berekenen van aanvoer- en retourtemperaturen die horen bij de gewijzigde warmtevraag. De derde stap bestaat uit de berekening van de bufferwerking. Hiervoor is een buffersimulatieprogramma gemaakt. De tweede en derde stap worden in § 5.2 toegelicht.

5.2 Algemene berekeningsmethoden

5.2.1 Berekening van buistemperaturen

Algemeen
Een verwarmingssysteem bestaat doorgaans uit een aantal verwarmingslussen. Wanneer een verwarmingslus wordt verwarmd, ontstaat een hogere buistemperatuur dan de temperatuur van de kaslucht. Door de warmte-afgifte koelt het water dat door de lus stroomt onderweg af. In dit rapport wordt de term 'afkoeling' gebruikt om dit temperatuurverlies over een verwarmingslus aan te duiden.
Het afgegeven vermogen door een verwarmingsbuis hangt af van het temperatuurverschil tussen buis en kaslucht. Ofschoon niet van hét temperatuurverschil tussen buizen en kaslucht kan worden gesproken, omdat de buizen vanaf het warmwateraanvoerpunt naar het afvoerpunt afkoelen, wordt hier toch een temperatuurverschil berekend. Dit temperatuurverschil wordt gedefinieerd als het verschil tussen gemiddelde buistemperatuur en kaslucht. De gemiddelde buistemperatuur is het gemiddelde van aanvoer- en retourtemperatuur in een verwarmingssysteem.
De verschillende extrapolaties die in dit rapport zijn uitgevoerd hebben alle effect op het warmtebehoeftepatroon van de kas. Wanneer de consequenties hiervan op warmtebuffering doorgerekend moeten worden, dienen aanvoer-, maar met name de retourwatertemperaturen van de beide verwarmingssystemen in de nieuwe situatie te worden berekend. Daarom is in deze paragraaf gezocht naar relaties tussen afgegeven vermogen en temperatuurverschil tussen verwarmingsbuis en kaslucht en relaties tussen afkoeling en afgegeven vermogen.

Beschrijving van gezochte relaties

– *Relatie tussen vermogensafgifte en temperatuurverschil*
De relatie tussen temperatuurverschil en afgegeven vermogen is niet lineair. Bij grotere temperatuurverschillen zal de warmte-afgifte steeds gemakkelijker verlopen door de verbeterde convectieve warmte-overdracht. Ook de afgifte van stralingsenergie verbetert naarmate temperatuurverschillen groter worden. Hoe de warmte-afgifte precies tot stand komt, wordt niet in dit bestek opgenomen. Er wordt volstaan met een eenvoudige input-outputrelatie.
De relatie zal worden beschreven met een wortelfunctie. De functie krijgt slechts één parameter, omdat de functie door (0,0) moet lopen.

– *Relatie tussen vermogensafgifte en afkoeling*
Het verschil tussen aanvoer- en retourtemperatuur, in het vervolg de afkoeling genoemd, is bij constant debiet door het verwarmingssysteem lineair afhankelijk van het afgegeven vermogen. Het debiet door een verwarmingsnetwerk zal echter niet precies constant zijn. Om enige correctie op dit niet constante debiet te kunnen uitvoeren, zal daarom een 2^e-orde polynoom worden gebruikt voor de functie die het verband tussen vermogensafgifte en afkoeling legt. Ook deze functie moet de waarde 0 leveren als het afgegeven vermogen 0 is.

Bepaling van de relaties voor het buisrailnet

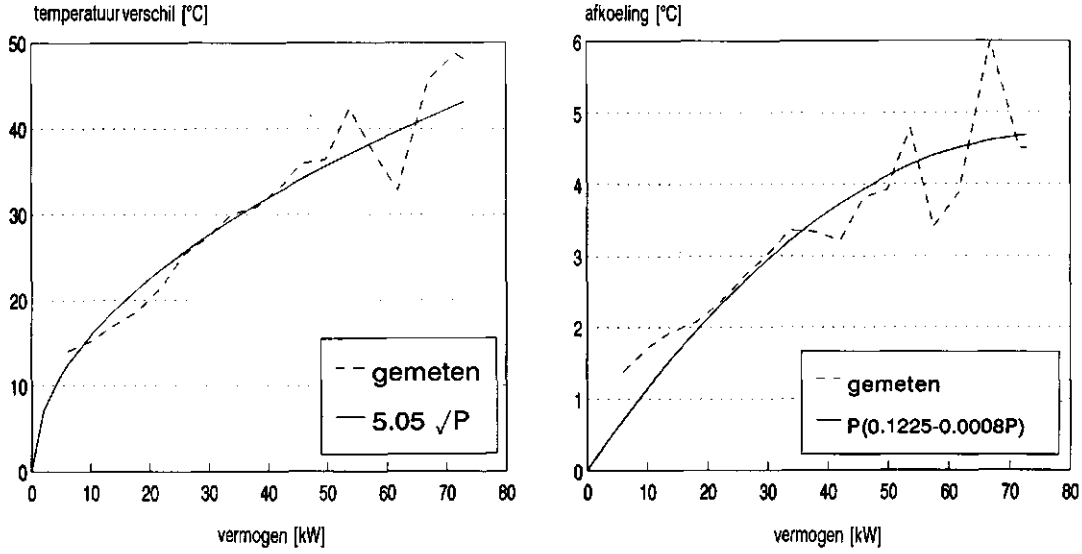
Gedurende het meetseizoen zijn duizenden uurgemiddelde meetwaarden opgeslagen. Hierdoor is voor elk uur van het meetseizoen het gemiddelde afgestane vermogen, de gemiddelde aanvoertemperatuur en de gemiddelde retourtemperatuur van het buisrailnet bekend. In het vervolg wordt de toevoeging dat meetwaarden uurgemiddelden zijn achterwege gelaten.
Door voor elk uur van het meetseizoen de kasluchttemperatuur te vergelijken met het gemiddelde van de gemeten aanvoer- en retourtemperatuur wordt een goede schatting verkregen van het temperatuurverschil tussen kaslucht- en buistemperatuur voor alle uren van het meetseizoen.
Om nu een indruk te krijgen van de gezochte relaties zijn de meetwaarden gegroepeerd in 19 categorieën. Elke categorie beslaat een bepaald vermogensdissipatietraject. In onderstaande tabel is voor elk traject het gemiddelde gedissipeerde vermogen, het gemiddelde temperatuurverschil en de gemiddelde afkoeling tussen aanvoer en retour aangegeven. Ook is in de tabel het aantal waarnemingen binnen elk traject opgenomen.

Tabel 5.2.1 Verband tussen vermogen, temperatuurverschil en afkoeling bij het buisrailsysteem.
Table 5.2.1 *Connection between power, difference of temperature and cooling down of the main heating system.*

Traject kW	Vermogen kW	Temp. versch. °C	Afkoeling °C	Aantal metingen
4 - 8	6,12	14,03	1,38	444
8 - 12	10,19	15,29	1,72	868
12 - 16	13,80	17,01	1,93	753
16 - 20	17,96	18,78	2,07	532
20 - 24	22,02	21,62	2,35	477
24 - 28	25,88	25,47	2,70	353
28 - 32	29,83	27,37	3,01	252
32 - 36	33,75	29,99	3,36	156
36 - 40	37,91	30,83	3,34	92
40 - 44	42,00	33,18	3,22	62
44 - 48	45,83	35,94	3,82	36
48 - 52	49,75	36,35	3,92	32
52 - 56	53,69	42,36	4,78	46
56 - 60	57,43	37,63	3,40	8
60 - 64	61,78	32,85	3,90	3
64 - 68	66,89	45,70	6,00	1
68 - 72	71,55	48,75	4,50	1
> 72	72,86	48,15	4,50	1

Het traject 0 - 4 is bewust weggelaten. In dit traject zouden namelijk alle situaties terechtkomen waar de buizen aan het afkoelen zijn zodat daar nauwelijks evenwichtssituaties zouden optreden.

De gegevens uit de tabel zijn in figuur 5.2.1a en 5.2.1b opgenomen. Tevens zijn in deze figuren de functies getekend die in het vervolg zullen worden gebruikt om de gezochte verbanden te leggen. Opvallend zijn de grote afwijkingen ten opzichte van de trend in het hogere vermogensgebied. Hiervoor kan geen goede verklaring worden gevonden. Omdat de afwijkingen ten opzicht van de trend geen fysische betekenis kunnen hebben, zijn de metingen bij hoge vermogens niet in de schatting van de functie meegenomen.



Figuur 5.2.1 Metingen en berekend verband tussen vermogen en temperatuurverschil en vermogen en afkoeling bij het buisrailsysteem. P is het afgegeven vermogen.

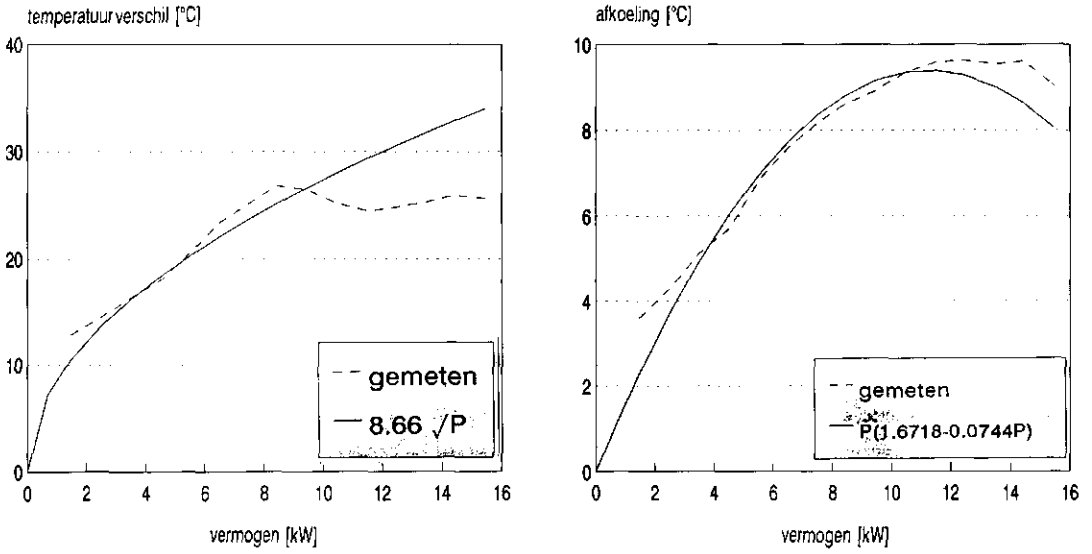
Figure 5.2.1 *Data and fit for connection between power versus difference of temperature and power versus cooling down of the main heating system. P denotes the supplied power.*

Bepaling van de relaties voor het groeibuisnet

Het verkrijgen van de gezochte relaties voor het groeibuisnet loopt geheel analoog aan het voorgaande. Voor het afgegeven groeibuisvermogen zijn 15 trajecten gebruikt. De resultaten staan in tabel 5.2.2.
Ook hier is het eerste traject (0-1 kW) achterwege gelaten. De grafieken en de berekende functies zijn aangegeven in figuur 5.2.2a en 5.2.2b.
Uit de grafiek blijkt dat met name de functie voor de afkoeling tussen aanvoer en retour van de groeibuis als functie van het temperatuurverschil bij grotere vermogens een vreemd verloop vertoont. Echter, omdat het merendeel van de tijd het door de groeibuis afgegeven vermogen minder dan 9 kW was (70% van de tijd), wordt niet zwaar aan dit vreemde meetresultaat getild.

Tabel 5.2.2 Verband tussen vermogen, temperatuurverschil en afkoeling bij het groeibuisnet.
Table 5.2.2 *Connection between power, temperature difference and cooling down of the supplementary heating system.*

Traject kW	Vermogen kW	Temp. versch. °C	Afkoeling °C	Aantal metingen
1 - 2	1,46	12,84	3,60	244
2 - 3	2,54	14,59	4,32	310
3 - 4	3,49	16,34	5,13	373
4 - 5	4,54	18,06	5,72	389
5 - 6	5,54	20,67	6,86	446
6 - 7	6,52	23,42	7,60	563
7 - 8	7,54	25,24	8,19	639
8 - 9	8,42	26,82	8,61	650
9 - 10	9,42	26,47	8,91	211
10 - 11	10,46	25,21	9,35	89
11 - 12	11,51	24,47	9,59	53
12 - 13	12,46	24,83	9,62	44
13 - 14	13,52	25,34	9,55	13
14 - 15	14,44	25,94	9,61	8
> 15	15,46	25,64	9,04	5



Figuur 5.2.2 Metingen en berekend verband tussen vermogen en temperatuurverschil en vermogen en afkoeling bij het groeibuisnet. P is het afgegeven vermogen.
Figure 5.2.2 *Data and fit for connection between power contra temperature difference and power contra cooling down of the supplementary heating system. P denotes the supplied power.*

Gebruik van gevonden functies

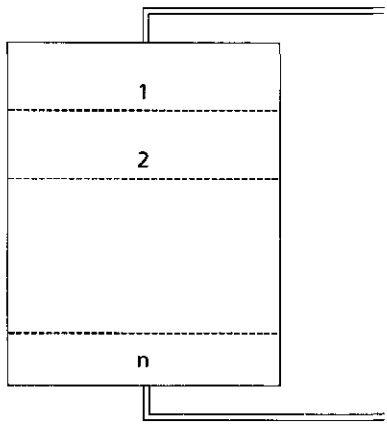
Nadat in een extrapolatie een nieuwe dataset met gedissipeerde vermogens voor de beide verwarmingssystemen is bepaald, kan met de gevonden functies voor het temperatuurverschil en met de dataset met kasluchttemperatuurgegevens een gemiddelde buistemperatuur voor de beide netten worden berekend. Vervolgens wordt voor elk verwarmingssysteem deze gemiddelde buistemperatuur vermeerderd met de helft van de afkoeling om de aanvoer- en, verminderd met de helft van de afkoeling, om de retourwatertemperatuur te berekenen.
Om de onnauwkeurigheden, die met simulatie gepaard gaan, zo beperkt mogelijk te houden, is zoveel mogelijk van de oorspronkelijke gegevens gebruik gemaakt. Derhalve worden aanvoer- en retourwatertemperaturen alleen voor die tijdstippen berekend waarop de warmtedissipatie van de netten door de extrapolaties is veranderd. Op alle andere tijdstippen worden de oorspronkelijke meetwaarden gebruikt.

5.2.2 Simulatie van de bufferwerking

De buffer is een opslagvat voor warm water. In de gebruikte uitvoeringsvorm kan de buffer worden beschouwd als een verdringingsbuffer. Hierdoor zal wanneer van bovenaf de buffer met warm water wordt gevuld een vrij scherpe scheiding ontstaan tussen een gedeelte met heet water aan de bovenkant van de buffer en een gedeelte met koud water aan de onderkant.
Continue registraties aan de temperatuuropbouw in de buffer konden in de afgelopen winterperiode niet gemaakt worden, maar incidentele observaties aan de thermometers die op de buffer waren geplaatst, rechtvaardigen de veronderstelling van de gelaagde structuur. Het eerste deel van deze paragraaf is gewijd aan de modellering van een gelaagd buffer.
Simulatie van de bufferwerking omvat niet alleen de simulatie van de buffer zelf, maar ook van de besturingstechniek er omheen. Dit betekent dat de essentie van het volledig hydraulisch systeem rond de buffer moet worden nagebootst. Hierop zal in het tweede deel van deze paragraaf worden ingegaan.
Tot slot zal een vergelijking worden gemaakt tussen de gesimuleerde en de gemeten bufferwerking.

Simulatie van een verdringingsbuffer

Figuur 5.2.3 is een schets van een buffervat dat in een n-tal denkbeeldige compartimenten is onderverdeeld. Bij het laden stroomt warm water aan de bovenkant het vat binnen en drukt daarmee (kouder) water aan de onderkant van het vat naar buiten. Bij het ontladen stroomt het water in omgekeerde richting.
Elk compartiment wordt verondersteld een homogene temperatuur te hebben.
De buffersimulatie is uitgevoerd met een numerieke methode. Dit wil zeggen dat de tijd is gediscretiseerd en dat compartimenttemperaturen op een nieuw tijdstip worden berekend met behulp van temperaturen op het vorig tijdstip.



Figuur 5.2.3 Gecompartimenteerd buffervat

De temperatuur van elk compartiment wordt beïnvloed door een 3-tal factoren. In de eerste plaats kan er water met een andere temperatuur het compartiment instromen. Elke liter die een compartiment instroomt, moet er aan de andere kant weer uit (de dichtheidsverandering wordt buiten beschouwing gelaten). Het water in een compartiment wordt dus gedeeltelijk ververst. De tweede factor is geleiding van warmte door het water. De derde factor is verlies van warmte aan de buitenkant van elk compartiment. Alle drie factoren zullen successievelijk worden uitgewerkt.

– *Verversingseffect*
De temperatuurverandering op tijdstip t = t + 1 ten gevolge van de verversing kan worden uitgedrukt met:

$$\Delta T_{ververs} = \frac{f\, t_s\, (T_{in} - T_{comp})}{V_{comp}} \qquad (5.1)$$

Waarin: ΔT_{vers} = temperatuurverandering tgv verversing in een tijdstap [K]
f = ingaande flow [$m^3\, s^{-1}$]
t_s = rekenstap [s]
T_{in} = temperatuur van het instromende water [K]
T_{comp} = huidige temperatuur van een compartiment [K]
V_{comp} = volume van een simulatiecompartiment [m^3]

– *Geleiding tussen compartimenten*
De gediscretiseerde vergelijking voor één dimensionaal warmtetransport vanuit een compartiment naar een buurcompartiment luidt:

$$P_{g,\,1\rightarrow 2} = \lambda\, opp_{comp}\, \frac{(T_1 - T_2)}{h_{comp}} \qquad [W] \quad (5.2)$$

Waarin: $P_{g,1\rightarrow 2}$ = warmtestroom van compartiment 1 naar compartiment 2 door geleiding [W]
λ = warmtegeleidingscoëfficiënt [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
opp_{comp} = uitwisselend oppervlak tussen de compartimenten [m^2]
T_1 = temperatuur van compartiment 1 [K]
T_2 = temperatuur van compartiment 2 [K]
h_{comp} = hart-op-hart afstand tussen compartimenten [m]

Staan meerdere compartimenten in serie, dan kan $P_{g,2\rightarrow 3}$ analoog aan $P_{g,1\rightarrow 2}$ worden berekend. De nettowarmtestroom naar compartiment 2 wordt vervolgens berekend met:

$$P_{g,2,netto} = P_{g,1\rightarrow 2} - P_{g,2\rightarrow 3} \qquad [W] \quad (5.3)$$

De nettowarmtestroom leidt tot een temperatuurverandering volgens:

$$\Delta T_{geleiding} = \frac{t_s P_{g,netto}}{\varrho C_p V_{comp}} \qquad (5.4)$$

Waarin: $\Delta T_{geleiding}$ = temperatuurverandering t.g.v. geleiding [K]
t_s = rekenstap [s]
$P_{g,netto}$ = nettowarmtestroom naar compartiment t.g.v. geleiding [W]
ϱ = dichtheid van water [$kg \cdot m^{-3}$]
C_p = soortelijke warmte [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
V_{comp} = volume van een simulatiecompartiment [m^3]

Voor het eerste en het laatste compartiment bestaat vergelijking 5.3 niet uit twee termen maar slechts uit één, omdat deze compartimenten maar één buurcompartiment hebben.

– *Geleiding door de bufferwand naar buiten*
Elk compartiment staat in contact met de wand van het buffervat. Aan de wand zal enig warmteverlies optreden door geleiding naar buiten. De warmtestroom wordt berekend met:

$$P_{g,comp\rightarrow omg} = G_{wand}\, opp_{wand,comp} (T_{comp} - T_{omg}) \qquad [W] \quad (5.5)$$

Hierin is G_{wand} de geleidbaarheid van de wand, uitgedrukt in $W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}$. Het totale warmte-uitwisselend oppervlak voor een compartiment wordt in de vergelijking aangeduid met $opp_{wand,comp}$. Voor het eerste en het laatste compartiment is dit oppervlak de bufferomtrek maal de hoogte van een compartiment vermeerderd met het oppervlak van een compartimentdoorsnede.
Voor de overige compartimenten is alleen de omtrek maal de compartimenthoogte het warmte-uitwisselend oppervlak.
De temperatuurverandering ten gevolge van deze warmtestroom wordt weer berekend met vergelijking 5.4.

– *Uitwerking van de buffersimulatie*
In de uitwerking van bovenstaande theorie is gekozen voor de opdeling van de buffer in 9 compartimenten, elk met een inhoud van 0,556 m^3, een compartimentdoorsnede van 1,67 m en een compartimenthoogte van 0,33 m.
Voor de berekening van de warmtestromen ten gevolge van geleiding naar de bufferomgeving wordt de waarde 0,4 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ als warmtegeleidbaarheid (100 mm steenwolisolatiemateriaal) gebruikt.
De rekenstap (t_s) is in het simulatiemodel variabel gemaakt. Bij elke simulatiestap wordt t_s zodanig begrensd dat de som van $\Delta T_{ververs}$ en $\Delta T_{geleiding}$ kleiner dan 0,5 °C blijft.

Simulatie van het hydraulisch systeem

Het hydraulisch systeem wordt onderscheiden in twee onderdelen. Het eerste is het warmteleverantiesysteem en het tweede wordt gevormd door de beide distributienetten. Warmte kan worden geleverd door drie bronnen, te weten de buffer, de WKK en de centrale verwarming. Elk distributienet is voorzien van een klep waarmee de keuze kan worden gemaakt of warmte wordt betrokken uit de centrale verwarming of uit de beide andere bronnen (zie ook fig 3.2.1). Het criterium voor deze keuze is de temperatuur bovenin de buffer (zie § 3.3.2).
In de simulatie wordt iedere 120 seconden het criterium voor de stand van de keuzekleppen voor de beide netten geëvalueerd. Dit tijdsinterval is conform het in de praktijkproef gehanteerde interval; 120 seconden is dus tevens de maximale rekenstap. Iedere nieuwe simulatiestap begint met het opzetten van de vermogensbalans. Er wordt gebruik gemaakt van de volgende vergelijking.

$$P_{over} = on_{WK} P_{WK} - (on_{BR} P_{BR} + on_{Gr} P_{Gr}) \qquad (5.6)$$

Waarin: P_{over} = vermogensoverschot [kW]
on_{WK} = WKK aan (1) of uit (0)
P_{WK} = door de WKK geleverd vermogen (13,3 kW)
on_{BR} = buisrailsysteem gevoed door centrale verwarming (0) of door WKK en/of buffer (1)
P_{BR} = door buisrailsysteem opgenomen vermogen [kW]
on_{Gr} = groeinet gevoed door centrale verwarming (0) of door WKK en/of buffer (1)
P_{Gr} = door groeinet opgenomen vermogen [kW]

Door het gebruik van de 1/0-variabelen kan met één vergelijking het warmte-overschot berekend worden.
P_{WK} is een vast getal voor warmtekrachtinstallaties in eilandbedrijf (13,3 kW). Het aan- en uitschakelen van de warmtekracht kan op elk moment in het uur geschieden. P_{BR} en P_{Gr} krijgen elk uur nieuwe waarden vanuit de datasets.
Een positief vermogensoverschot zal worden gebufferd. Dit overschot wordt aan de buffersimulatie aangeboden. In de buffersimulatie wordt hieruit een flow berekend met behulp van:

$$flow_{in} = \frac{P_{over}}{4{,}18 \cdot 10^3 \, (75 - T_g)} \qquad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (5.7)$$

De factor $4{,}18 \cdot 10^3$ is de warmtecapaciteit van water in $kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$. 75 Is de temperatuur van het instromend water. T_g is de temperatuur van het onderste compartement.
Na berekening van de rekenstap (t_s) worden de nieuwe temperaturen in de buffer berekend, zoals in het voorgaande gedeelte is uitgewerkt.

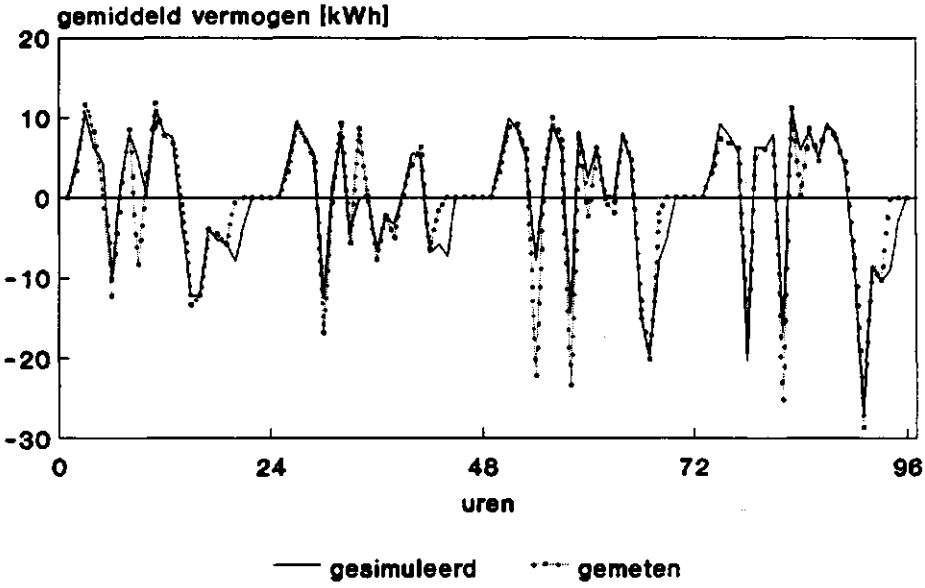
Behalve een overschot kan er ook een vermogenstekort ontstaan. De buffer wordt dan ontladen. De temperatuur van het water dat de buffer instroomt, is daarbij het gewogen gemiddelde van de retourtemperaturen van de beide netten. De ingaande flow wordt dan berekend met:

$$flow_{in} = \frac{P_{over}}{4{,}18 \cdot 10^3 \, (T_1 - T_{in})} \qquad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (5.8)$$

Waarin P_{over} (een negatief getal) berekend is met vergelijking 5.6. Met T_1 wordt de buffertemperatuur in het eerste compartiment (het bovenste) bedoeld. T_{in} is een mengtemperatuur van de beide retourwatertemperaturen (zie figuur 3.3.1).

Resultaten met de buffersimulatie

Om enig inzicht te geven in de behaalde resultaten met de buffersimulatie is in figuur 5.2.3 het verloop van de bufferlading en -ontlading zoals die is gemeten en gesimuleerd grafisch afgebeeld. Uit de figuur blijkt dat over het algemeen simulatie en meting synchroon lopen. Dat er op een aantal plaatsen verschillen tussen simulatie en meting optreden wordt vooral veroorzaakt doordat het aan- en uitschakelen van de buffer ontlading op de beide netten niet precies nagebootst kan worden. Hoofdoorzaak is de



Figuur 5.2.3 Gemeten en gesimuleerde uurlijkse warmtestromen (een negatieve waarde betekent een bufferontlading).

Figure 5.2.3 *Measured and simulated hourly heat flow (a negative value means discharging the buffer).*

onmogelijkheid om de sensor die voor voor de schakeling van netten in de praktijkproef gebruikt werd goed te simuleren. De gebruikte sensor zat bovenin de buffer aan de buitenkant tegen de wand bevestigd. Het punt dat in de simulatie het meest met het in de praktijk gebruikte meetpunt overeenkomt is de temperatuur van het bovenste buffercompartiment. Dat hiermee af en toe toch discrepanties optreden is echter onvermijdelijk.
Bij de bespreking van de meetresultaten (§ 4.4) is reeds opgemerkt dat de exacte overeenkomst van de aan de buffer toegevoerde warmte en de aan de buffer onttrokken warmte theoretisch onmogelijk is. Immers, een buffervat is nooit perfect geïsoleerd. Met behulp van het model kan echter wel een uitspraak over de warmteverliezen naar de omgeving worden gedaan. Aangenomen dat de uitgangspunten van de isolatiewaarde juist zijn kan met het model worden berekend dat de totale warmtetoevoer aan de buffer over de meetperiode 11301 kWh bedroeg en de totale (nuttige) warmteonttrekking 11003 kWh was. Het verschil tussen beide warmtestromen, 298 kWh, is de naar de omgeving afgevloeide warmte.

5.3 Invloed van belichtingsstrategieën

5.3.1 Berekeningswijze van geëxtrapoleerde datasets

Centraal in de extrapolaties met betrekking tot de belichting staat de dataset met belichtingsuren. Verderop zal voor beide extrapolaties uiteengezet worden hoe de dataset met belichtingsuren wordt veranderd. Parallel aan deze veranderingen wijzigen echter ook andere datasets.
In de eerste plaats verandert de dataset met het door de warmtekracht geleverd thermisch vermogen. Deze verandering is evenredig aan de verandering van de belichtingsdataset.
Een belangrijke wijziging, die door een veranderde belichting moet worden doorgevoerd, betreft het vermogen dat middels het verwarmingssysteem in de kas moet worden gesuppleerd. Immers, het vermogen dat door de lampen in de kas wordt gebracht, is door de wijziging in de belichting veranderd. Op de uren dat de lampen extra branden ten opzichte van de oorspronkelijke belichtingstijden, moet de door het verwarmingssysteem ingebrachte hoeveelheid warmte worden verminderd. Op uren dat de lampen minder branden dan in de uitgangssituatie, moet de nieuwe warmtevraag groter zijn.
De vermindering en vermeerdering van de totale via de buizen in de kas gebrachte warmte wordt verondersteld evenredig te zijn met de vermeerdering en vermindering van de afgegeven warmte door de lampen. Het opgenomen vermogen van de lampen is $20 \cdot 436 = 8720$ W. Dit vermogen kan echter niet gelijkwaardig worden gesteld met de hoeveelheid warmte geleverd door het verwarmingssysteem, omdat convectieve warmtetoevoer door de hoog in de kas gelegen lampen 10% tot 20% minder effectief is met het oog op kasverwarming dan onderin de kas geplaatste buizen (Knies, pers. inf.). Uit produktinformatie betreffende de Son-T-lamp blijkt dat het aandeel, dat door convectie aan de omgeving wordt afgestaan, de helft is van het totale vermogen. Daarom wordt er in de extrapolaties vanuit gegaan dat deze 8720 W lampvermogen overeenkomt met $4360 + (4360 \cdot 0{,}85) = 8066$ W buisvermogen. Hierbij is aangenomen dat de stralingsfractie (zichtbaar en infra-rood) in het lampvermogen geheel bijdraagt aan de kasverwarming.

Nu kan met het bepalen van de verschillen tussen de nieuwe belichtingsdataset en de oorspronkelijke een nieuwe dataset met het totaal in de kas opgenomen buisvermogen worden bepaald. Het nieuw berekende totaal opgenomen vermogen wordt vervolgens verdeeld over buisrailnet en groeinet. Hierbij wordt de door het groeinet afgegeven warmte zoveel mogelijk ongemoeid gelaten omdat hiervoor de ingestelde minimum- en maximumbuistemperatuur vlak bij elkaar lagen. Pas wanneer de warmtedissipatie vanuit de buisrail daardoor negatief zou worden (wat alleen kan als de nieuwe afgegeven hoeveelheid warmte kleiner is dan de oorspronkelijke), wordt de dataset van de groeibuis aangepast.
Nadat de nieuwe datasets voor de afgegeven warmte door de beide verwarmingssystemen zijn verkregen, worden de nieuwe buistemperaturen berekend volgens de methode die in paragraaf 5.2.1 is uitgewerkt.
Tenslotte wordt de werking van de buffer gesimuleerd. De uitkomsten, gebaseerd op de kleine proefaccomodatie van het IMAG-DLO worden vertaald naar een kas van 1 ha door deze te vermenigvuldigen met 10000/192 (192 m^2 is het oppervlak van een afdeling van WTK-II).

5.3.2 Verandering van de duur van de donkerperiode

De donkerperiode gaat een uur vóór zonsondergang in en eindigt een aantal uren later. De duur van deze periode varieert gedurende het teeltseizoen (zie hiervoor tabel 3.3.1). Verandering van de donkerperiode kan plaatsvinden door het tijdstip waarop de lampen in de nacht aangaan vooruit of achteruit in de tijd te verschuiven.
In de extrapolatie wordt de donkerperiode verkort met 1, 2, 3, 4 en 5 uur en verlengd met 1, 2, 3 en 4 uur. De uiterste verkorting resulteert in een maximale belichtingsduur van 20 uur in de koudste tijd van het jaar. In tabel 5.3.1 worden de effecten weergegeven van een verandering van de donkerperiode op het aantal belichtingsuren, op de hoeveelheid te bufferen warmte en op de vereiste afmeting van de buffer om alle overschotten, op 5 kWh/m^2 na, te kunnen opslaan.

Tabel 5.3.1 Effect van verandering van de donkerperiode.
Table 5.3.1 *Effect of changing period of darkness.*

Donkerperiode	Aantal uren	Via buffer [kWh·m^{-2}]	Buffercap. [m^3·ha^{-1}]
5 uur korter	2844	66	88
4 uur korter	2642	59	58
3 uur korter	2440	54	46
2 uur korter	2238	49	36
1 uur korter	2036	44	29
onveranderd	1834	39	24
1 uur langer	1645	35	20
2 uur langer	1464	31	17
3 uur langer	1284	27	14
4 uur langer	1118	23	13

5.3.3 Verandering van uit- en inschakelcriterium

Behalve het veranderen van het aantal belichtingsuren in de nacht kan door verandering van het uit- en inschakelcriterium op de dag het aantal belichtingsuren veranderen.
Het berekenen van de belichtingstijdstippen bij een ander uit- en inschakelcriterium is gebaseerd op de dataset met uurgemiddelde globale stralingsniveaus. Om nog enige informatie te genereren over het verloop van het stralingsniveau binnen het uur, is tussen elke twee uurgegevens een lineaire interpolatie uitgevoerd. Het voldoen aan de in- of uitschakelcriteria kon hiermee op elk tijdstip van de dag plaats hebben.
De gesimuleerde belichtingsregeling is geheel conform de gebruikte regeling die in de praktijkproef is uitgevoerd.
De resultaten zijn in een soortgelijke tabel als tabel 5.3.1 geplaatst.

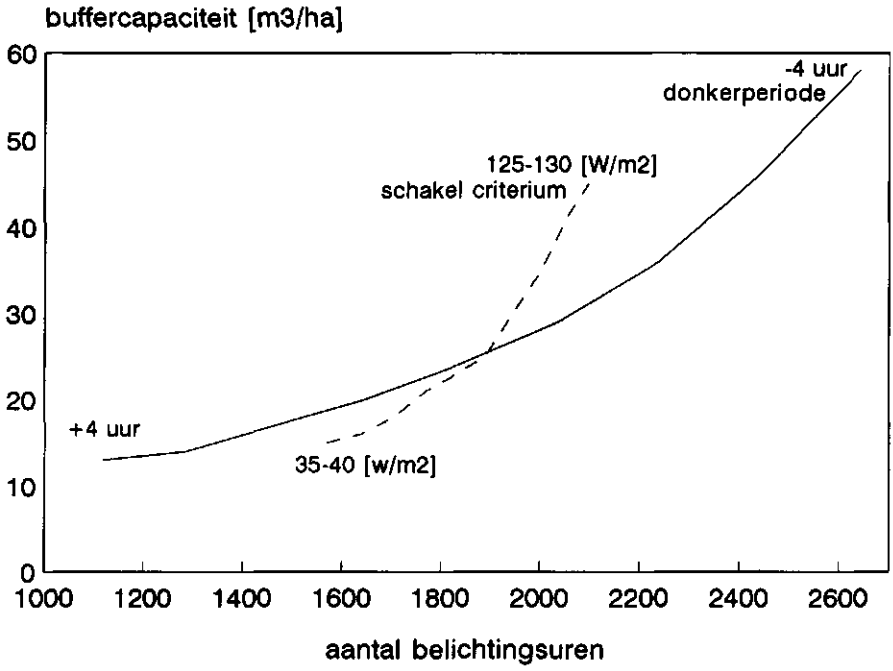
Tabel 5.3.2 Effect van verandering van het uitschakelcriterium.
Table 5.3.2 *Effect of changing the criterion to switch off the ligths.*

Uitschakelcriterium [$W \cdot m^{-2}$]	Aantal uren	Via buffer [$kWh \cdot m^{-2}$]	Buffercap. [$m^3 \cdot ha^{-1}$]
125 - 130	2098	52	45
115 - 120	2053	50	41
105 - 110	2002	47	35
95 - 100	1945	44	30
85 - 90	1890	42	25
75 - 80	1832	39	23
65 - 70	1770	37	21
55 - 60	1705	35	18
45 - 50	1637	32	16
35 - 40	1569	31	15

De simulatie-output voor het uitschakeltraject 75 - 80 (de uitgangssituatie) stemt niet precies overeen met de output, zoals die in de voorgaande extrapolatie geproduceerd werd. Dit komt doordat het globale stralingsniveau slechts als uur-gemiddelde beschikbaar was. Hierdoor is veel informatie over de stralingsintensiteit gedurende het uur verloren gegaan en week de gesimuleerde belichtingregelaar nogal eens af van de belichting in de praktijkproef.

5.3.4 Vergelijking van beide belichtingseffecten

Beide genoemde invloedsfactoren werken via de verandering van het aantal belichtingsuren in op de vereiste buffercapaciteit. Daarom zijn beide factoren in een grafiek geplaatst, waarin de relatie tussen belichtingsuren gedurende het seizoen en vereiste buffercapaciteit tegen elkaar zijn uitgezet (figuur 5.3.1).
Het meest opvallende bij vergelijking van de beide extrapolatieresultaten is de veel grotere verandering van het aantal belichtingsuren wanneer de nachtelijke belichting wordt gevariëerd dan wanneer het schakelcriterium gewijzigd wordt. Dit wordt veroorzaakt door de korte dagen en lange nachten in de winter.



Figuur 5.3.1 Relatie tussen belichtingsuren en benodigde buffercapaciteit.
Figure 5.3.1 *Connection between lighting hours and required buffer capacity.*

Het tweede wat opvalt, is de veel grotere invloed van verandering van belichting gedurende de dag op de buffercapaciteit. Deze grotere gevoeligheid is niet verwonderlijk. Immers, de warmtebehoefte in een kas is gedurende de dag over het algemeen lager dan in de nacht, zodat belichting overdag eerder tot warmte-overschotten zal leiden dan belichting in de nacht.

5.4 Verandering van de warmtebehoefte in de kas

Een kas met een hoog energieverbruik zal minder vaak een warmte-overschot te zien geven dan een kas met een laag energieverbruik. Daarom is een serie extrapolaties gewijd aan het inschatten van de effecten van verhoging of verlaging van het energieverbruik.
Voor ieder uur van het meetseizoen wordt de totale warmtebehoefte in de kas, zoals die uit de meetgegevens afgeleid kan worden, in twee keer vier sessies met respectievelijk 5, 10, 15, en 20% verlaagd en met 5, 10, 15 en 20% verhoogd. Het nieuw berekend kasvermogen wordt weer verdeeld over beide verwarmingsnetten, zoals beschreven in de vorige paragraaf. Tenslotte wordt met het buffersimulatieprogramma berekend hoeveel buffercapaciteit vereist is en hoeveel warmte via de buffer wordt toegediend.
De resultaten staan in tabel 5.4.1

Tabel 5.4.1 Effect van verandering van energiebehoefte.
Table 5.4.1 *Effect of changing required energy.*

Verandering energieverbruik [%]	Via buffer [kWh·m^{-2}]	% van warmte-behoefte	Buffercap. [m^3·ha^{-1}]
+20	36	9	10
+15	37	9	13
+10	37	10	16
+ 5	38	10	20
0	39	11	24
− 5	41	11	32
−10	43	12	40
−15	45	13	49
−20	46	14	59

5.5 Effect van temperatuurcompensatie

Temperatuurcompensatie kan bijdragen de synchronisatie van warmtevraag en -aanbod te verbeteren. In het uitgevoerde praktijkonderzoek was het de regelaar toegestaan de kasluchttemperatuur 3 graden te laten stijgen, om deze in een later stadium weer naar beneden toe te compenseren.
In deze paragraaf wordt de invloed van temperatuurcompensatie op een meer continue schaal afgetast. Vanuit de uitgangssituatie (0 °C temperatuurcompensatie) wordt het effect van 1, 2, 3 en 4 °C op het te bufferen vermogen in een tabel geplaatst. In alle situaties is de minimumkastemperatuur van 16 °C gehandhaafd.
De nieuwe dataset met door de buizen opgenomen vermogens is verkregen vanuit een geëxtrapoleerde dataset met door de kas opgenomen vermogen. Dit nieuwe totale vermogen is berekend door op tijdstippen met een vermogensoverschot de temperatuur zoveel als nodig, met een maximum van respectievelijk 1, 2, 3 of 4 °C, te laten stijgen en op andere tijdstippen te verlagen. De temperatuurstijging cq. -daling is bepaald met behulp van de u-factor van de kas (vroeger heette dit kental k-factor). De temperatuurverlagingen werden berekend met een op dit probleem toegesneden variant op het temperatuurcompensatieprogramma. De u-factor van de kas is voor iedere dag afzonderlijk berekend en schommelde over de periode tussen de 10 en 15 W·m^{-2}.

Tabel 5.5.1 Effect van verandering van de temperatuurcompensatiemarge.
Table 5.5.1 *Effect of changing the margin of temperature compensation.*

Temperatuurcompensatie [°C]	Via buffer [kWh·m^{-2}]	Buffercap. [m^3·ha^{-1}]
0	39	24
1	33	14
2	29	7
3	0	0
4	0	0

Uit de tabel valt op te maken dat al bij 3 °C temperatuurcompensatie het warmte-overschot onder de 5 $kWh \cdot m^{-2}$ blijft. Hierdoor is er geen buffer meer nodig.
In de hydraulische opstelling, zoals in de praktijksituatie het geval was, moet een bepaald aandeel van de warmtestroom over de buffer als overhead worden beschouwd. Daardoor ontstaat een scherpe overgang in de hoeveelheid warmte die via de buffer wordt toegediend wanneer het temperatuurcompensatieniveau van 2 °C naar 3 °C wordt veranderd.

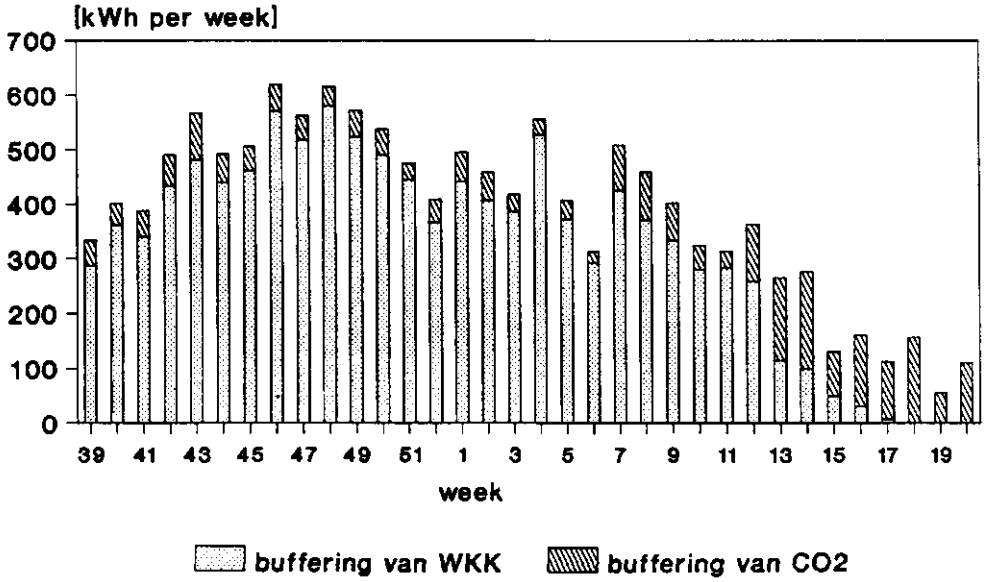
5.6 Effect van CO_2-dosering

In de huidige tuinbouwpraktijk wordt op veel bedrijven die CO_2-doseren toepassen door middel van ketelrookgassen gebruik gemaakt van kortdurende warmte-opslag. Vooral in het voorjaar en het najaar worden deze 'CO_2-buffers' intensief gebruikt. Gedurende de winter blijven deze buffers vrijwel ongebruikt.
Belichting speelt juist gedurende de winter een belangrijke rol. Daarom rijst al gauw de vraag of een CO_2-buffer ook ten behoeve van de opslag van overschotwarmte vanuit een warmtekrachtinstallatie gebruikt kan worden. Op deze wijze zou de investering voor een buffer beter benut worden.
Om hierin inzicht te verkrijgen is het CO_2-verbruik gedurende het meetseizoen geregistreerd. Vervolgens is dit verbruik (zuivere CO_2) vertaald naar de warmte die een CO_2-ketel zou hebben geproduceerd om dezelfde kooldioxideproduktie te realiseren. De aldus berekende warmteproduktie is op dezelfde wijze behandeld als warmte die door een warmtekrachtinstallatie wordt geproduceerd. Immers, ook een CO_2-ketel slaat aan en uit op andere overwegingen dan de warmtebehoefte van de kas. Vervolgens is het buffersimulatiemodel gebruikt om de bufferbehoefte bij gecombineerd gebruik van de buffer te kunnen inschatten.
De resultaten staan in de volgende tabel.

Tabel 5.6.1 Effect van CO_2-dosering.
Table 5.6.1 *Effect of CO_2-supply.*

Alternatief	Via buffer [$kWh \cdot m^{-2}$]	Buffercap. [$m^3 \cdot ha^{-1}$]
zonder CO_2-dosering	39	29
met CO_2-dosering	51	36

De verwachting dat de buffercapaciteit gedurende de winter vooral ten behoeve van warmtekracht werd gebruikt en in het voorjaar vooral ten behoeve van CO_2 is getoetst en weergegeven in figuur 5.6.1.

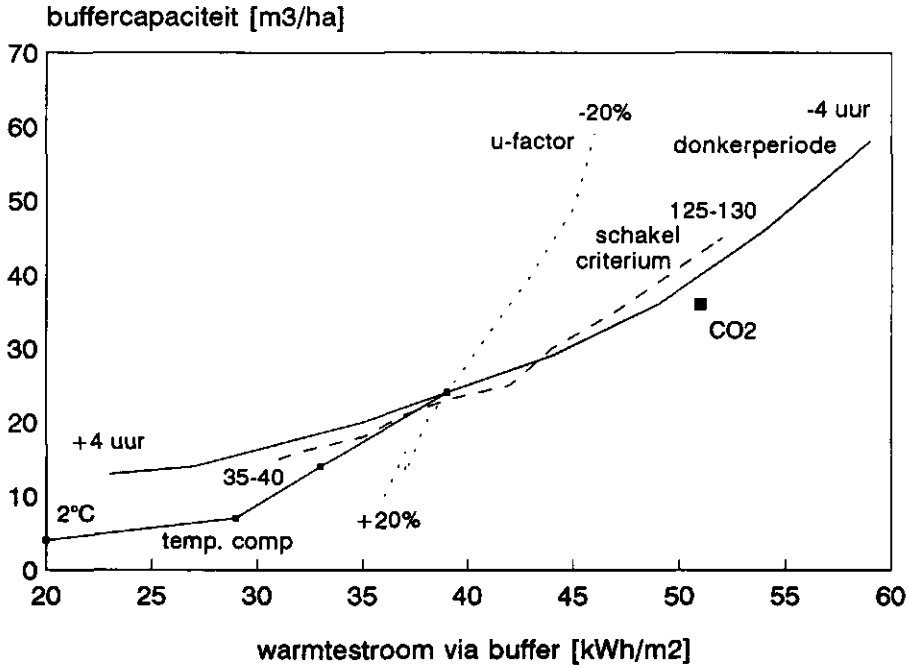


Figuur 5.6.1 Wekelijkse warmtestroom vanuit WKK en CO_2-ketel via de buffer naar de kas.
Figure 5.6.1 *Weekly heat flow from heat and power installation and CO_2 boiler via buffer tank to the greenhouse.*

De verwachting dat het gebruik van een zelfde buffer voor zowel CO_2-warmte als voor warmtekrachtwarmte de vereiste afmeting nauwelijks zou beïnvloeden blijkt niet bewaarheid. In het voorjaar was de bufferbehoefte voor CO_2 maar heel gering. Hierbij moet wel worden aangetekend dat het CO_2-verbruik in het voorjaar gering was in verband met de aflopende teelt. In een jaarrondteelt of bij de teelt van rozen waarbij een hogere CO_2-concentratie wordt aangehouden, kan de situatie aanmerkelijk anders komen te liggen.

5.7 Gevoeligheidsanalyse

Tot slot van dit hoofdstuk worden de in het voorgaande gegenereerde tabellen samen in figuur 5.7.1 geplaatst.



Figuur 5.7.1 Relatie tussen buffergebruik en vereiste buffercapaciteit.

Figure 5.7.1 *Connection between use of buffer tank and required buffer capacity.*

Uit figuur 5.7.1 valt op te maken dat met name de verandering van het energieverbruik grote invloed heeft op de vereiste capaciteit van de buffer. CO_2-dosering leidde tot een relatief grote benutting van de beschikbare buffercapaciteit (veel kWh over een relatief klein buffer).

6 Samenvatting meerjarig onderzoek bij tomaten

In verband met de wijziging van het teeltgewas tomaten naar rozen vanaf het teeltjaar 1992 zijn in dit hoofdstuk de ervaringen van de afgelopen jaren met assimilatiebelichting bij tomaten kort samengevat.

6.1 Keuze tomaten als proefgewas

Hoewel uit onderzoek en praktijkervaringen naar voren was gekomen dat toepassing van belichting bij gewassen als bijv. opkweek van jonge planten, lelies, rozen en chrysanten goede economische perspectieven te zien gaven, werd bij de proef gekozen voor tomaten. Bij de relatief kortdurende tomatenteelt zouden wijziging van proefopzet en regelstrategie meer flexibel gehanteerd kunnen worden dan bij een meerjarig rozengewas. Aan de hand van de bij tomaten verkregen onderzoekresultaten werd het mogelijk geacht tot inschatting te komen van te verwachten energetische effecten bij teelten met vergelijkbare klimaateisen. Ook de omvang van de potentiële toepassingsmarkt bij een economisch gunstig bedrijfsresultaat gold als argument voor de gedane gewaskeuze.
Een interessant aspect bij de keuze van tomaten was bovendien de vraag of en zo ja in welke mate het mogelijk zou zijn met behulp van assimilatiebelichting in de wintermaanden tot produktie te komen. De aanvoer van de in Nederland geteelde tomaten begint immers doorgaans in maart en eindigt eind november. Aangezien de teelt van tomaten in de winter in de praktijk niet plaatsvond en bovendien belichting van tomaten in de produktieve fase niet werd toegepast, was er vrijwel geen teelttechnische informatie beschikbaar. Om informatie te verkrijgen over aspecten, zoals het meest geschikte ras, belichtingsniveau en -tijd, plantdatum, plantdichtheid en klimaataspecten (kastemperatuur en CO_2) als ook over de meest wenselijke voeding en om bij het onderzoek op genoemde aspecten te kunnen inspelen, is een werkgroep 'Assimilatiebelichting bij tomaten' ingesteld. Deze werkgroep werd gevormd door medewerkers van het proefstation Naaldwijk, DLV, enkele tomatentelers die op hun bedrijf belichting toepasten, Grodan, zaadfirma Bruinsma en het IMAG-DLO. Gedurende het teeltseizoen werden meestal één keer per maand de teeltervaringen uitgewisseld en geanalyseerd. Na het teeltseizoen werden de ontwikkelingen en ervaringen geanalyseerd en plannen voor het nieuwe seizoen besproken. De activiteiten in de werkgroep werden als zeer positief ervaren.

6.2 Teeltkundige ervaringen

Rassenkeuze
Aangezien in de praktijk de teelt van tomaten in de winter niet wordt toegepast, hadden zaadfirma's geen specifiek voor deze teelt geschikte rassen in hun assortiment. In overleg met de firma Bruinsma werd het eerste jaar gekozen voor het ras Allegro. Bij beoordelingen door genoemde firma bleek dit ras onder lichtarme omstandigheden relatief goed tot bloemvorming en vruchtzetting te kunnen komen. Mede dankzij een intensieve uitwisseling van teeltervaringen zijn door Bruinsma in de latere teeltjaren

achtereenvolgens de rassen nr. 2079 en Prelude beschikbaar gesteld voor het onderzoek. Het ras Prelude bleek het meest geschikte ras te zijn voor een belichte teelt in de winter, omdat vooral de vruchtkwaliteit goed voor de dag kwam.

Plantdatum
Over de meest wenselijke plantdatum waren er grote vraagtekens. Uitgangspunt was een produktiegewas in de periode tussen het einde van een late teelt en vóór het begin van de oogst bij een vroege stookteelt (december-maart). Er was onduidelijkheid over de gewasreactie op de overgang van de relatief lichtrijke periode in de nazomer en herfst en de donkere wintersituatie. Ook de reacties van een ouder gewas op toenemende lichthoeveelheden in het voorjaar waren onbekend. De vroegste plantdatum in de verschillende jaren was 4 augustus, terwijl 10 oktober als meest late datum werd gekozen. Hoewel de omstandigheden jaarlijks sterk verschillend waren, werd uit het onderzoek de indruk verkregen dat een plantdatum rond 15 september uit teeltkundig oogpunt de voorkeur verdiende.

Plantdichtheid
In verband met de geringe natuurlijke instraling in de winter werd een geringere plantdichtheid aangehouden dan bij stookteelten gebruikelijk is. Er werden in de teeltjaren plantdichtheden gehanteerd tussen 2 en 2,5 planten per m^2 kas. De totale produktie gaf geen grote verschillen te zien tussen de diverse plantdichtheden. De vruchtgrootte was bij een plantdichtheid van 2,5 pl/m^2 echter beduidend minder. Om het gemiddeld vruchtgewicht op te voeren, werd de laatste twee jaar vruchtdunning toegepast. De in november en december aangelegde trossen werden gedund op 5 vruchten. In het teeltjaar '90-'91 werd de plantdichtheid gedurende de teelt enkele keren gewijzigd. De oorspronkelijke dichtheid van 2,4 pl/m^2 werd begin november verlaagd naar 1,8 pl/m^2 en begin december naar 1,2 pl/m^2 door de plant te toppen. Rond 10 januari werd de dichtheid weer opgevoerd naar 2,4 pl/m^2 door één dief te laten staan. Hoewel deze teeltwijze leidde tot kwalitatief prima vruchten met een goede vruchtgrootte kon de totale produktie nauwelijks worden verhoogd.

Teeltsysteem
Er werd geteeld op steenwolmatten in kunststofgoten. De toediening van water en voedingsstoffen vond plaats met behulp van een substraatinstallatie met recirculatiesysteem zonder ontsmetting. Omdat het gewas in de winter extra gevoelig is voor infecties, werd in de maanden december t/m februari niet gerecirculeerd. Er werd geteeld volgens het hogedraadteeltsysteem (draadhoogte 3,25 m). Indien de koppen van de planten boven het draad uit dreigden te komen, werden deze op een lager niveau gebracht door het onderste gedeelte van de stengel horizontaal te leiden. Op deze wijze konden de koppen en bloemtrossen maximaal gebruik maken van het beschikbare licht.

Bloei en vruchtzetting
De bloei en vruchtzetting verliep in de winter minder goed dan in de zomer. Gebleken is dat de periode tussen bloei van opeenvolgende trossen in de winter maximaal 12 dagen bedroeg, terwijl in voorjaar en zomer elke week een nieuwe tros werd gevormd.
De vruchtzetting gaf in de meerjarige proefperiode grote verschillen te zien. Zo bleek in het eerste teeltjaar dat, indien geen belichting werd toegepast in de maanden november t/m januari, geen vruchtzetting plaatsvond. Ook is naar voren gekomen dat, indien geen

vruchtdunning werd toegepast, de vruchtzetting in de maanden november t/m februari meestal niet hoger kwam dan ongeveer 50%. Bij toepassing van vruchtdunning in de maanden november en december tot 5 vruchten per tros kon een vrijwel volledige vruchtzetting worden gerealiseerd.

Belichting
De wijze van inzet van de assimilatiebelichting heeft gedurende de gehele proefperiode grote veranderingen ondergaan. Deze wijzigingen kwamen tot stand na overleg in de werkgroep.
Het eerste teeltjaar werd geëxperimenteerd met belichten op basis van de warmtebehoefte in de kas. Per etmaal werd maximaal 20 uur belicht. Als controle werd een afdeling niet belicht. In het volgende teeltjaar werd in één afdeling op basis van de warmtebehoefte en in de andere afdeling op basis van zonlicht belicht. Per etmaal werd nog maximaal 18 uur belicht. Het belichtingsniveau werd teruggebracht van 12 kWh/m^2 PAR naar 9 kWh/m^2 PAR. De laatste jaren van het onderzoek werd belicht op basis van zonlicht buiten. Het maximaal aantal belichtingsuren liep jaarlijks terug tot 15 uur per etmaal in het laatste jaar. De wijzigingen in de belichtingsstrategie hadden grote invloed op het aantal belichtingsuren per jaar. Het totale aantal belichtingsuren liep terug van ruim 3300 uur in het eerste jaar tot ruim 1800 uur in het laatste teeltjaar.

Ziekten
De gevoeligheid voor ziekten is in de winter aanzienlijk groter dan in de zomer. De fotosynthese en daardoor de groei ligt op een lager peil. In de eerste proefjaren kwam de grote gevoeligheid van het gewas in de winter tot uitdrukking in het optreden van ziekten als valse meeldauw, spint en phoma. De laatste jaren kon, mede door de gewaskeuze en een preventieve ziektebestrijding, het optreden van ziekten worden voorkomen en bleef het gewas ook tijdens de winter gezond.

Produktie
Hoewel vergelijking van de produktie in de teeltjaren moeilijk is door verschillen in teeltduur ten gevolge van ongelijke plantdata, kunnen toch enkele algemene conclusies worden getrokken. Gebleken is dat het in de winter mogelijk is met behulp van assimilatiebelichting tomaten te telen van uitstekende kwaliteit. In de wintermaanden bedroeg de produktie echter slechts 20-30% van in de zomer te realiseren produkties. Hoewel er de laatste jaren enige stijging was van de produktie in het winterseizoen, gaf de totale produktie in de diverse teeltjaren geen grote verschillen te zien. Opmerkelijk waren echter de vorderingen met de produktie-efficiëncy. De produktie-omvang gaf de laatste jaren immers geen daling te zien, terwijl het aantal belichtingsuren bijna werd gehalveerd en het belichtingsniveau met 25% werd verlaagd. De raskeuze, betere plantdichtheid, vruchtdunning en verbetering van de teelt- en klimaatbeheersing worden als mogelijke factoren gezien voor deze verhoging van de produktie-efficiëncy. Hoewel de produktiekosten door genoemde wijzigingen aanzienlijk konden worden teruggebracht, werd dit positieve effect op de opbrengst overschaduwd door een prijsverlaging in de winter van ongeveer 50%. E.e.a. heeft ertoe geleid dat het economisch resultaat enkele jaren geleden marginaal of gering positief was, terwijl bij kosten- en opbrengstverhoudingen van het laatste jaar een duidelijk negatief bedrijfsresultaat mag worden verwacht.

6.3 Energetisch onderzoek

Regelstrategie belichting en WKK
De regelstrategie voor de belichting en WKK werd jaarlijks op grond van opgedane ervaringen in de proefkas in overleg met de werkgroep aangepast. De aanpassingen m.b.t. belichtingsaspecten zijn in het voorafgaande reeds besproken. De gekozen WKK-strategieën kunnen als volgt worden samengevat.
Gedurende de gehele proefperiode werd uitgegaan van een volledige koppeling van WKK en belichting, d.w.z. op elk moment dat de lampen brandden, kwam er WKK-warmte vrij die volledig beschikbaar was voor de belichte kas. In de eerste 2 proefjaren werd belicht op basis van warmtebehoefte. De lampen waren in bedrijf op tijden dat er een warmtetekort in de kas was. Alle door de WKK opgewekte warmte werd bij dit regelsysteem in principe in de kas gevoerd. In latere jaren werden de belichtingstijden gekoppeld aan de lichtintensiteit buiten. Daar de belichtingstijden bij deze strategie vaak niet overeen kwamen met de tijden dat er warmtebehoefte was in de kas, konden warmte-overschotten ontstaan. Onderzoek is verrricht naar de omvang en de bepaling van de opslagcapaciteit bij tijdelijke opslag van genoemd warmte-overschot. In het laatste teeltjaar werd in een kasafdeling bij een warmte-overschot door de WKK tijdelijk een hogere kastemperatuur getolereerd. Om toch een gelijke gemiddelde kastemperatuur te krijgen als in de andere afdeling, werd bij een warmtetekort tijdelijk een lagere kastemperatuur geaccepteerd (temperatuurcompensatieregeling).

Warmte en energie
De energievoorziening in het proefproject week vrij sterk af van de traditionele warmtevoorziening in de glastuinbouw. Uit literatuur en onderzoek was nog weinig informatie beschikbaar over omvang en tijden van de diverse energiestromen bij toepassing van assimilatiebelichting in combinatie met WKK. De eerste 2 jaar is dan ook uitgebreid aandacht geschonken aan de analyse van de energiestromen (licht en warmte) door de diverse energiebronnen (lampen, instraling, WKK en verwarmingsketel) en de distributiekanalen (verwarmingsbuizen en lampen). De laatste 2 jaar werd ook de opslag in een waterbuffer van een tijdelijk warmte-overschot door de WKK in het programma opgenomen. Geconcludeerd kan worden dat de energiestromen zeer sterk fluctueerden. Deze fluctuaties vertoonden een golfbeweging op zowel korte termijn (etmaal) als op lange termijn (seizoen). Vooral klimaatfactoren als de zon met in de nacht geen straling en 's zomers een 10 voudige straling van 's winters, alsmede de buitentemperatuur hebben grote invloed op de omvang en het aandeel van de aanwezige energiebronnen. Het elektriciteitsverbruik werd onder invloed van het geringere aantal belichtingsuren en een verlaging van de belichtingsintensiteit teruggebracht van 130 kWh/m^2 in het eerste jaar tot 71 kWh/m^2 in het laatste teeltjaar.
Het onderzoek naar de mogelijkheden voor tijdelijke opslag van het warmte- overschot van de WKK resulteerde in besparingen van 6 tot 8% van de toegevoerde energie. Toepassing van de genoemde temperatuurcompensatieregeling leidde tot een besparing van ongeveer 4%.
Bij de beoordeling van de gerealiseerde besparingen dient de proefsituatie goed voor ogen te worden gehouden. Verandering van de bedrijfssituatie leidt tot andere besparingen. Aangezien de WKK en de belichting bij tomaten in vergelijking met teelten als rozen en chrysanten een minder belangrijke energiebron vormen, mag worden verwacht dat de besparingsmogelijkheden bij deze teelten groter zullen zijn.

6.4 Rozen als teeltgewas

De keuze van rozen als nieuw teeltgewas bij verder onderzoek is o.a. om de volgende redenen tot stand gekomen.

- Een doorbraak voor een uitgebreide toepassing van assimilatiebelichting op glasgroentenbedrijven ligt niet in de lijn der verwachting, gezien de recente negatieve ontwikkeling van de prijzen voor tomaten in de winter.
- De tomatenbedrijven, die tot voor kort bij wijze van proef of op meer uitgebreide schaal assimilatiebelichting hebben toegepast, zijn ten gevolge van de negatieve bedrijfsresultaten inmiddels geheel afgestapt van dit teeltsysteem.
- Er treden grote verschillen op tussen o.a. het aantal branduren van de lampen en de CO_2-dosering bij tomaten en andere in de praktijk met assimilatiebelichting geteelde gewassen als rozen en chrysanten, waardoor de energetische onderzoekresultaten – verkregen met tomaten – niet direct bruikbaar zijn voor de andere gewassen.
- Er is veel kennis en ervaring aanwezig bij onderzoek, voorlichting en bedrijven betreffende de teelt van rozen met assimilatiebelichting.
- Bij rozen als proefgewas wordt met het onderzoek aangesloten op een toepassingsgebied van meer dan 300 ha belichte rozen in de praktijk.

7 Conclusies

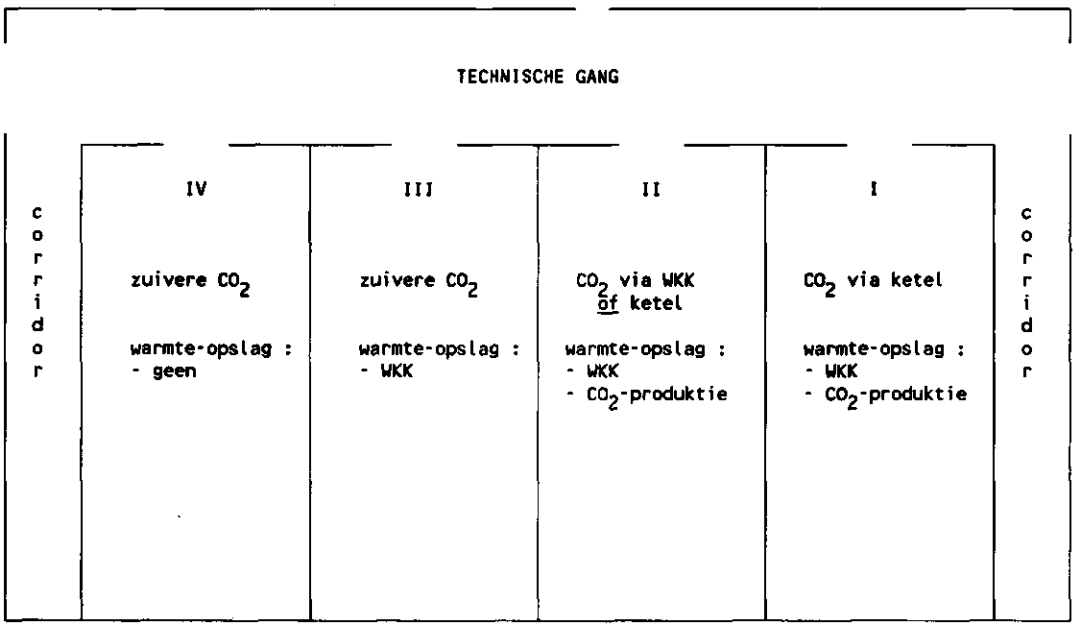
- Onderzoek in de proefkas heeft aangetoond dat het, met behulp van een beperkt aantal uren (1833) aanvullende belichting (intensiteit 9 W/m^2 PAR), mogelijk is in de winter tomaten van goede kwaliteit te produceren.
- Aangepaste teeltmaatregelen, als vruchtdunning en geringere plantdichtheid in de winter, hebben het mogelijk gemaakt een gezond gewas te behouden en de vruchtgrootte te doen toenemen.
- Vruchtdunning leidde tot een positief effect van ongeveer 15% op zowel de produktie-omvang als op het gemiddeld vruchtgewicht.
- De teeltresultaten bij de temperatuurcompensatieregeling en de standaard-temperatuurregeling waren vrijwel gelijk.
- Hoewel in de winter een kwalitatief goed produkt kon worden geteeld, bleef de produktie-omvang in deze periode veelal beperkt tot een niveau van 20-30% van de voorjaarsproduktie.
- De produktprijs lag in de wintermaanden op een niveau van ongeveer 50% van de prijs in voorafgaande jaren. E.e.a. leidde tot een negatief economisch bedrijfs-resultaat. Tomatenbedrijven zullen in de nabije toekomst dan ook geen assimilatie-belichting toepassen.
- De buitentemperatuur was in de proefperiode veelal hoger dan het langjarig gemiddelde, doch was in januari duidelijk lager.
- De lichttoevoer door globale straling varieerde per etmaal van 100 Wh/m^2 PAR in de winter tot 1500 Wh/m^2 PAR in het voorjaar. De lichttoevoer door de lampen bedroeg maximaal 125 Wh/m^2 PAR. In de weken 46 t/m 52 was de lichttoevoer door lampen en globale straling ongeveer gelijk. Gedurende de rest van de teeltperiode was de toevoer door globale straling veelal beduidend hoger.
- Bij de gekozen belichtingsstrategie kon een maximaal aantal belichtingsuren van 15 uren per etmaal worden bereikt. In de periode week 44 t/m week 4 werd gemiddeld meer dan 10 uren per etmaal belicht. In de overige teeltperioden was het aantal uren geringer, terwijl na week 17 helemaal geen belichting meer werd toegepast.
- De warmte van de belichtingslamp bleek slechts een geringe directe temperatuur-verhoging te veroorzaken. Uit metingen is gebleken dat 50 cm onder de lamp een temperatuursverhoging van maximaal 1 °C optrad.
- Hoewel de omvang van de te bufferen warmte grote fluctuaties te zien gaf, is gebleken dat het vullen van de buffer veelal tijdens belichtingsuren in de nacht en vroege ochtend plaatsvond en het legen op tijden dat de belichting uit was en bovendien de globale straling zeer gering was.
- De direct danwel indirect door de WKK toegevoerde warmte bedroeg ongeveer 35% van de totale toevoer. In het opslagvat werd tijdelijk ongeveer 57 kWh/m^2 ofwel 9,2% van de totale warmtevraag van de kas gebufferd.
- In de proefkas werd bij toepassing van opslag van het warmte-overschot van de WKK een besparing gerealiseerd van 6,5 m^3 aardgasequivalent per m^2 (8,4%) en bij klimaatregeling op basis van temperatuurcompensatie 2,9 m^3 aardgasequivalent (3,8%).
- Er is een simulatieprogramma ontwikkeld, waarmee de omvang van de te bufferen warmte en de grootte van het buffervat kan worden bepaald. Gebleken is dat de kasklimaatfactoren een grote invloed hebben.

- Bij extrapolatie van de belichtingsstrategie in het simulatieprogramma is naar voren gekomen dat de duur van de donkerperiode in de nacht een grotere invloed heeft op de warmte-overschotten en buffergrootte dan het schakelcriterium i.v.m. het globale stralingsniveau.
- Ook is met behulp van het simulatieprogramma aangetoond dat de warmtevraag van de kas en het warmte-overschot door CO_2-opwekking grote invloed hebben op de totale warmte-opslag en de buffergrootte.
- Uit de samenvatting van het meerjarig onderzoek voor toepassing van WKK en assimilatiebelichting is naar voren gekomen dat het produktieniveau in de winter, dankzij teeltmaatregelen als vruchtdunning en rassenkeuze, kon worden opgevoerd naar 30% van het zomerniveau. Zonder belichting werd 12% gerealiseerd.
- Duur en intensiteit van de belichting zijn in de proefjaren geleidelijk verlaagd. Ondanks deze verlaging kon het produktieniveau worden gehandhaafd. Het aantal belichtingsuren daalde van 3350 uur naar ruim 1800 uur per jaar, terwijl bovendien de belichtingsintensiteit met 25% werd verminderd. Door deze veranderingen daalde het elektriciteitsverbruik van 130 kWh/m^2 in '87-'88 tot 71 kWh/m^2 in '90-'91.
- Aangezien is gebleken dat assimilatiebelichting bij tomaten vooralsnog geen economisch positief resultaat oplevert, is er om toch een goede aansluiting met de ontwikkelingen in de praktijk mogelijk te maken, besloten het onderzoek te vervolgen met rozen als teeltgewas.
- Dankzij een nieuwe proefaccomodatie met 4 teeltafdelingen, voorzien van uitgebreide meet- en regelapparatuur, wordt het mogelijk beter in te spelen op nieuwe onderzoekwensen.

8 Onderzoek 1992

Algemeen

Dit jaar staat voor het onderzoek naar kortdurende warmte-opslag een proefaccomodatie met vier afdelingen ter beschikking. Er zal worden ingehaakt op ervaringen die zijn opgedaan bij de belichting van tomaten in WTK II. Als proefgewas is gekozen voor rozen. Dit omdat de roos een van de belangrijkste belichte gewassen is. Daarbij geniet de teelt en de verzorging van de roos grote aandacht bij proefstations en het universitair tuinbouwonderzoek, zodat een goed onderzoekklankbord aanwezig is.
Centraal in het onderzoek staat het effect van kortdurende opslag van warmte-overschotten op het energieverbruik. Een tijdelijk warmte-overschot kan ontstaan indien de geproduceerde hoeveelheid warmte van de warmtekrachtinstallatie of de CO_2-ketel groter is dan de warmtebehoefte.
De warmte-opslag zal worden bepaald bij verschillende vormen van CO_2-toediening in combinatie met eigen warmtekrachtopwekking en assimilatiebelichting. Ook zullen de effecten op het energieverbruik worden nagegaan indien de overtollige warmte wordt afgelucht. Tenslotte biedt het onderzoek inzicht in de effecten van belichten in groepen.
In alle afdelingen zal de belichting worden geregeld op basis van de globale straling.
De warmte vanuit de verschillende bronnen kan naar elk verwarmingsnet en/of naar de buffer worden gevoerd.
In afdeling I worden warmte-overschotten van zowel de WKK als de CO_2-ketel gebufferd.
In afdeling II worden warmte-overschotten van de WKK *of* de CO_2-dosering gebufferd.



Figuur 8.1 Plattegrond lichtkas met onderzoekschema.
Figure 8.1 *Floorplan of the experimental greenhouse with scheme of research.*

Tabel 8.1 Overzicht activiteiten en wijze van uitvoering.
Table 8.1 *Survey activities and way of execution.*

Activiteit	Uitvoering
gewas	roos
cultivar	Madelon
planten	januari 1992
teeltduur	5 jaar
teeltsysteem	verrolbare kweektafels
teeltmedium	steenwol in goten
voeding en water	recirculatie van het voedingswater
ontsmetting voedingswater	geen ontsmetting
belichting	
armatuur	SGR 140 K
lamp	SON/T AGRO
kasopp. per lamp	10,8 m^2
intensiteit	9 W/m^2 (PAR)
regeling overdag	op basis van lichtniveau buiten
lampen aan	glob. straling < 75 W
lampen uit	glob. straling > 80 W
max. brandduur per etmaal	18 uur
min. brandduur	30 minuten
min. tijdsduur uit-aan	10 minuten
gelijktijdigheid	3 afd. in bedrijf
CO_2	
niveau	900 ppm
afd. I	zuivere CO_2 (sim. ketel)
afd. II	zuivere CO_2 (sim. via WKK of ketel)
afd. III en IV	zuivere CO_2
temperatuur kas	
alle afd.	instelling via setpoint
warmte-opwekking	
warmtekracht	simulatie warmte- en elek. opwekking
verwarmingsketel	via terreinnet
verwarming	
ondernet	temp. en warmtebron naar keuze
bovennet	temp. en warmtebron naar keuze
regeling	
minimum buistemp.	lichtafhankelijk
ventilatie	temp. en vochtafhankelijk
warmte-opslag	
afd. I	warmtekracht en CO_2 (WKK of ketel)
II	warmtekracht en CO_2 (ketel)
III	warmtekracht
IV	geen warmte-opslag

Bij deze proefopstelling gaat men ervan uit dat rookgassen van de WKK zodanig zijn gezuiverd dat ze geschikt zijn voor CO_2-dosering.
In afdeling III wordt alleen WKK-warmte gebufferd. CO_2-dosering gebeurt in deze afdeling met zuivere CO_2.
In afdeling IV tenslotte wordt alle overtollige WKK-warmte afgelucht en wordt eveneens gebruik gemaakt van zuivere CO_2.
In figuur 8.1 wordt het proefplan en de verdeling van de proeven over de verschillende afdelingen schematisch weergegeven.
De meetresultaten uit de afdelingen zullen worden gebruikt voor de validatie van het simulatiemodel. Nadat het model voldoende is gevalideerd en getest, kan het worden gebruikt om de resultaten uit het onderzoek op te schalen naar de tuinbouwpraktijk.
Het onderzoek naar de modelvorming van het totale systeem kas-gewas-energie-voorziening zal worden gecontinueerd en zonodig worden bijgesteld. Aandacht zal worden besteed aan het ontwerp van methoden om de produktiemiddelen optimaal aan te wenden bij de teelt van rozen in verschillende omstandigheden.
Tevens zal het model worden gebruikt om de effecten van wijzigingen in de uitgangspunten in de proefkas door te rekenen. Deze wijzigingen kunnen betrekking hebben op o.a. temperatuurregimes in de kas, de isolatiewaarden van de kas en de belichtingsregimes. Ook zouden middels het model andere regelstrategieën beoordeeld kunnen worden.
Iedere afdeling afzonderlijk kan worden beschouwd als een representatie van een bedrijf met belichting in één groep. De 4 afdelingen samen vormen een representatie van een bedrijf dat in 4 groepen belicht, waarbij elke groep 3/4 van de tijd krijgt toebedeeld.
Inzicht in de energetische consequenties en gevolgen van belichting in groepen voor de warmte-opslagcapaciteit kunnen echter niet zonder meer uit de meetresultaten worden verkregen. Ook hierbij zal derhalve het simulatiemodel intensief worden gebruikt.

Summary

In an experimental greenhouse IMAG-DLO has investigated energy and cultivation aspects of supplementary lighting which is powered by a cogeneration unit. In the greenhouse tomatoes were cultivated during winter. Greenhouse climate and energy consumption were measured continuously. Plant growth and production were also observed. In former years research was focused on the effect of energy and cultivation of several strategies of illumination control, such as lighting based on outside radiation intensity or illumination coupled to the actual heat demand of the greenhouse. This research showed the necessity of a synchronization system to solve the problem that heat production and heat demands not occur simultaneously.
Therefore, in the winter of 1990-1991 an experiment was carried out to determine the possibilities of two solutions to the synchronization problem. The first was, using temporary storage of superfluous heat in a storage unit. In the second experiment the temperature controller of the greenhouse was equipped with a temperature integration module.
The stored heat was supplied to the house by a selected heat distribution net. Buffering temporary storage of superfluous heat of the heat and power installation delivered 8% of the total heat supply of the house. Climate control by temperature integration resulted in 4% energy saving.
A simulation model was developed to investigate influences on heat storage and size of the buffer by changing circumstances. The model proved that length of the darkness period as well as heat demand of the house and CO_2 supply all have a great influence on the required size of the superfluous heat storage medium. In the cultivation of tomatoes the level of the factors of influence is rather low. Therefore, direct translation of the test results is difficult. Experiments with growing tomatoes in winter showed that production level thanks to improved cultivation could be increased to 30% of summer production level. This increase could be realised in spite of a decrease in the yearly number of lighting hours from 3350 to 1830.
In practical growing it appeared that the economic results of using supplementary lighting were not positive.
In order to have better connection with developments in practice, it is proposed to continue the experiments in a new greenhouse with 4 compartments cultivated with roses. Factors of influence such as heat from CO_2 production and increased lighting hours will be involved in the empiric research.

Literatuur

Warmtekrachtkoppeling in combinatie met assimilatiebelichting. Wageningen, IMAG-nota 385 PT, 41 pp.

Huijs, J.P.G. Warmtekrachtopwekking met warmtebuffer bij tomaten. Wageningen, IMAG-nota 544, 54 pp.

Faaij, A. en A.J.M. van Wijk. Tijdpatronen voor de electriciteitsproductie door kleinschalig warmte/kracht vermogen. Vakgroep Natuurwetenschap en Samenleving RU - Utrecht. Rapportnr. 92003, januari 1992.

Koning, A.N.M. de. Long-term temperature integration of tomato. Growth and development under alternating temperature regimes. Scientia Horticulturae, 45 (1990) 117-127.

Koning, A.N.M. de, M. van Logten en J.P. Schellekens. Grenzen aan compensatietemperatuur vrij ruim. Groenten en fruit, 10 november 1989.