

Kaskoeling en aquiferlading door middel van een dakbevoeiingssysteem



H.F. de Zwart
E.G.O.N. Janssen
H. Loeffen

A&F Rapport 082

Onderzoek in het kader van het Convenant Glastuinbouw en Milieu

Uitgevoerd door

Gefinancierd door:

Kaskoeling en aquiferlading door middel van een dakbevoeiingssysteem

H.F. de Zwart
E.G.O.N. Janssen
H. Loeffen

februari 2004

Colophon

Title	Kaskoeling en aquiferlading door middle van een dakbevoeiingssysteem
Author(s)	H.F. de Zwart; E.G.O.N. Janssen; H. Loeffen
A&F number	Report nr. 082
ISBN-number	90-6754-757-3
Date of publication	
Confidentiality	N/A
Project code.	N/A
Price	□

Agrotechnology and Food Innovations B.V.
P.O. Box 17
NL-6700 AA Wageningen
Tel: +31 317 475 024
E-mail: info.agrotechnologyandfood@wur.nl
Internet: www.agrotechnologyandfood.wur.nl

© 2004 Agrotechnology & Food Innovations B.V

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, hetzij mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.
De uitgever aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele fouten of onvolkomenheden.

*All right 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 permission of the publisher.
The publisher does not accept any liability for the inaccuracies in this report.*

Voorwoord

De warmtepomp neemt een belangrijke plaats in bij de ontwikkeling van energiezuinige glastuinbouwsystemen. Door de warmtepomp te combineren met de onttrekking van zomerse warmteoverschotten uit de kas kan het aandeel duurzame energie in de kasverwarming aanzienlijk oplopen.

Om warmteoverschotten uit de kas te benutten zijn een aantal systemen voorgesteld. Er zijn (bureau)studies verricht naar het gebruik van koude buizen in de kas en verschillende systemen die gebaseerd zijn op geforceerde ventilatie. De koude buizen blijken een zeer beperkte koelcapaciteit (onttrekkingscapaciteit) te hebben en de systemen op basis van geforceerde ventilatie leiden tot hoge vaste en/of variabele kosten.

Dit rapport belicht een systeem dat gebaseerd is op dakbevoeiing. Hierbij wordt het kasdek gebruikt als warmtecollector door het dek tijdens warme perioden met koud water te bevoeien. Oriënterende experimenten die in 2001 zijn uitgevoerd gaven een substantiële koelcapaciteit en naar verwachting lage vaste en variabele kosten.

Het A&F is verheugd dat het Productschap Tuinbouw en het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit de gelegenheid hebben gegeven de experimenten met dit nieuwe systeem uit te voeren.

In het voorliggende rapport worden de bevindingen met dit systeem in kwalitatieve en kwantitatieve zin beschreven.

Inhoud

Voorwoord	1
Inhoud	3
Samenvatting	5
Inleiding	7
1 Energiebesparing door middel van een warmtepomp	9
1.1 Warmtepompen	9
1.2 Overzicht totale installatie	11
2 Dakbevoeiingssystemen voor kassen	13
Inleiding	13
2.1 Bestaande systemen	13
2.2 Aanpassingen van bestaande sproeisystemen t.b.v. het oogsten van zonnewarmte	16
2.3 Uitvoeringsalternatieven voor dekbevoeiingssystemen met een hoog waterdebiet	17
2.3.1 Verbeterd dakbevoeiingssysteem	19
2.3.2 Beregeningssproeiers	20
2.3.3 Integratie dakbevoeiing met luchtraam	21
3 Opzet praktijkproef	23
Inleiding	23
3.1 Ontwerp van het toe te passen bevoeiingssysteem	23
3.2 Waterbereidings-systeem	24
3.3 Wateropvang en bufferings-systeem	26
4 Resultaten	29
Inleiding	29
4.1 Algemene bevindingen	29
4.1.1 Montage	29
4.1.2 Vervuiling	29
4.1.3 Lekken	29
4.2 Warmte-onttrekking	30
4.3 Effecten op CO ₂ -dosering en concentratie	31
4.4 Productie	33
4.5 Kasklimaat	34
4.6 Lichtdoorlatendheid	36
5 Modelberekeningen	37
Inleiding	37
5.1 Modelaanpassing	37
5.2 Modelvalidatie	38
5.3 Jaarronds simulaties voor praktijksituaties	41
5.3.1 Analyse van het effect van een dakbevoeiingssysteem op een praktijkkas	41
5.3.2 Zonne-energie verzameling als functie van debiet en retourtemperatuur	45
5.3.3 Waterverplaatsing als functie van debiet en retourtemperatuur	46
5.3.4 Totaal waterverbruik van de kas als functie van debiet en retourtemperatuur	48
5.3.5 Etmaaltemperatuur als functie van debiet en retourtemperatuur	49
5.3.6 CO ₂ -opname van het gewas als functie van debiet en retourtemp.	50
5.3.7 Conclusies uit de scenario-analyse	51
5.4 Energiebesparingspotentieel	52
6 Bedrijfseconomische beschouwing	55
7 Conclusies en aanbevelingen	57
8 Literatuur	59

Samenvatting

Kastuinbouw kan op een energiezuinige wijze worden bedreven indien de zomerse warmteoverschotten kunnen worden benut voor de verwarming van de kas in de winter. Bij toepassing van een warmtepomp is deze werkwijze technisch heel goed mogelijk. De installaties die hiervoor tot nu toe in verschillende publicaties naar voren zijn gekomen bleken echter in het algemeen zeer kostbaar. In de meeste studies kwam dan ook een negatief bedrijfseconomisch resultaat naar voren.

Naast de kosten voor het ondergrondse energieopslagsysteem en de warmtepomp bleken de kosten voor het systeem waarmee warmte in de zomer aan de kas kon worden onttrokken aanzienlijk. Teneinde deze kosten te beperken heeft het IMAG in 2001 het dakbevoeiingsconcept geëntameerd. Dit warmteverzamelingsconcept gebruikt het kasdek als warmtewisselend oppervlak en de regenwaterafvoervoorziening als leidingwerk voor de afvoer van opgewarmd water en behoeft daardoor alleen investeringen in een water-aanvoer systeem om een substantiële koeling van de kas op basis van vrije convectie te realiseren. In hoofdstuk 1 wordt een volledig doch beknopt overzicht gegeven van de werking van het systeem.

Het concept wat oorspronkelijk bij de ontwikkeling van voorliggend project voor ogen lag ging uit van de opwarming van koud water (minimaal 8 °C) naar 17 °C. en beoogde op zo'n 200 W/m² koelvermogen te leveren. Dit betekende dat water met een hoog debiet (20 liter/(m² uur) op de kas moest worden gespoten. Omdat het systeem zoals dat in 2001 was bedacht niet uitvoerbaar leek voor grote praktijk-kassen zijn aan het begin van voorliggend project verschillende alternatieve configuraties uitgewerkt waarmee de beoogde debieten zonder problemen konden worden gerealiseerd. In hoofdstuk 2 zijn de ontwerpen die hiertoe het meest perspectiefvol lijken beschreven. Er is onderscheid gemaakt in ontwerpen die alleen voor nieuwbouw geschikt zijn en ontwerpen die ook op bestaande kassen kunnen worden aangebracht. Het ontwerp dat op bestaande kassen toegepast kan worden is in het voorliggende project op een 200 m² metend kas-compartiment aangebracht en is gedurende de zomerperiode van 2002 op deze semi-praktijkschaal beproefd.

De opbouw van de installatie en de proef wordt in hoofdstuk 3 uitgebreid beschreven. In hoofdstuk 4 worden de resultaten met deze proefopstelling gepresenteerd. Het telen in een 'kas-met-dakbevoeiingssysteem' wordt vergeleken met eenzelfde teelt in een naastgelegen compartiment. Het blijkt dat de gekoelde kas een hogere biomassa-productie te zien (+4%) gaf bij een aanzienlijk lager CO₂ gebruik (9 kg/(m² jr) minder). Door problemen met de luchtvochtigheidsregeling in het begin van de teelt kon de hogere biomassa-productie echter niet tot een even zoveel hogere productie van een verkoopbaar product worden omgezet. Een relatief hoger percentage vruchten met een onacceptabele aantasting van neusrot maakte dat de hoeveelheid verkoopbare tomaten in beide afdelingen gelijk was.

De hoeveelheid zonne-energie die met het dakbevoeiingssysteem kon worden verzameld bedroeg 410 MJ/m². Indien deze warmte in de winter door een warmtepomp zou worden gebruikt om de kas te verwarmen zou deze kas 13 m³ aardgas hebben kunnen besparen, wat zo'n 25% is van gasverbruik wat door de bank genomen in de tomatenteelt ingezet wordt.

Teneinde de resultaten die in het experiment zijn behaald ook naar andere omstandigheden te kunnen vertalen is het kasklimaat-simulatiemodel KASPRO uitgebreid met modules die het fysisch gedrag van een koud en nat oppervlak aan de bovenzijde van het kasdek beschrijven en met een regelaar die de temperatuur en het sproeidebiet aan de hand van een aantal criteria regelt. Het aldus aangepaste simulatiemodel gaf een goede overeenkomst met de metingen en kon daardoor worden gebruikt voor een scenariostudie.

In deze scenariostudie is uitgegaan van een moderne praktijkkas voor een tomatenteelt in een gemiddeld Nederlands jaar. De drie belangrijkste parameters werden over een breed werkgebied veranderd. Deze parameters zijn:

- de laagste temperatuur van het water dat op het dak kan worden gesproeid
- het maximale debiet wat op de kas gespoten kan worden
- de keus voor de temperatuur waarop het water van het dak af mag stromen.

Het blijkt dat deze laatste parameter van zeer groot belang is. Verlaging van deze temperatuur van de 17 °C die in het experiment is aangehouden naar een veel lagere waarde van 13 °C bleek de warmte-onttrekkingscapaciteit sterk te vergroten. Dit komt vooral door het groter aantal uren waarop de installatie dan kan worden gebruikt (van 1600 naar 2000 uur). Een nadeel van deze verlaging van de temperatuur waarmee het water van het dek af mag stromen is de toename van de hoeveelheid water die over de aquifer moet worden verpompt om een bepaalde hoeveelheid warmte op te slaan. Dit blijkt echter minder belangrijk dan het voordeel in termen van een toename van de warmte-onttrekkingscapaciteit. Dit geldt met name wanneer ook het maximale debiet kleiner wordt gekozen.

De scenariostudie geeft aan dat in plaats van een systeem dat met een hoog debiet water op het dek kan sproeien teneinde een aquifer met water van tenminste 17 °C te kunnen regenereren beter gekozen kan worden voor een systeem dat werkt met een debiet van rond de 5 liter/(m² uur) en al genoeg neemt met een afstromende watertemperatuur van 13 °C. De geringe opwarming van het aquiferwater dat hierdoor in de voorjaar optreedt wordt in de zomer goed gecompenseerd met vele liters water die door het beperkte beschikbare debiet met veel hogere temperaturen het dek af stromen.

In de bedrijfseconomische analyse wordt dan ook uitsluitend op de laag-debiet systemen ingegaan. Het blijkt dat met een systeem dat een debiet heeft dat vergelijkbaar is met in de huidige potplantenteelt gangbare sproei-systemen (2 liter/(m² uur)) onder de genoemde uitgangspunten perspectief biedt op een systeem dat jaarlijks € 0.04 per m² meer opbrengt dan kost. Dit systeem geeft een netto energiebesparing van ruim 4 m³ per m² per jaar (bijna 8% op een niveau van 45 m³/(m² jaar)). Een uitgebreidere variant, uitgaande van een sproeidebiet van maximaal 5 liter/(m² uur), leidt tot een besparing van 9 m³ aardgas per m² per jaar en een positief bedrijfsresultaat van € 0.10 per m²/jaar.

De positieve bedrijfsresultaten zijn echter klein ten opzichte van het investeringsbedrag. De interne rentevoet van het 2 liter/(m² uur)-systeem is slechts 0.3% en het systeem dat 5 liter/(m² uur) op het dek versproeit heeft een interne rentevoet van 0.4%.

Bij een verdere toename van het maximaal debiet wordt het bedrijfseconomisch rendement negatief.

De belangrijkste kosten (70% van de investering en 45% van de jaarkosten) worden gevormd door het ondergronds energieopslagsysteem. In deze component kunnen de komende jaren door standaardisatie grote kostenreducties worden verwacht zodat het perspectief belangrijk kan verbeteren. Bovendien leent de aanleg van een dergelijke faciliteit zich ook goed voor eenmalige investeringssubsidies.

De opbrengsten worden voornamelijk door de energiebesparing gerealiseerd. Toename van de energieprijzen zal dan ook relatief sterk doorwerken in de verbetering van het perspectief.

Vanwege het feit dat laag-debiet systemen (tot 5 liter/(m² uur)) veel betere perspectieven lijken te geven dan de oorspronkelijk voorgestelde hoog-debiet systemen wordt tevens aanbevolen voor de verdere ontwikkeling aansluiting te zoeken bij de bestaande dakbevoeiingstechnieken en deze door de toepassing van gekoeld water in plaats van onbehandeld bassinwater geschikt te maken voor zonne-energie verzameling. Het perspectief daarbij is een netto energiebesparing in de orde van 8 tot 10 m³/(m² jaar).

Inleiding

Warmtepompen zullen een steeds belangrijkere rol gaan spelen in de reductie van het primaire energieverbruik in de tuinbouw en leveren tevens de mogelijkheid om de doelstelling voor duurzame energie te halen (4% duurzame energie in de sector in 2010). Met de warmtepomp kan zonne-energie die in de zomer is verzameld in de winter worden benut. Daartoe wordt gebruik gemaakt van aquifers die in de zomer opgewarmd worden en in de winter met behulp van de warmtepomp weer worden uitgeoeld.

In hoofdstuk 1 van dit rapport wordt een beknopt overzicht gegeven van de werking van de warmtepomp en worden een paar belangrijke vuistregels gepresenteerd.

Bij de verschillende onderzoeksprojecten die rond de ontwikkeling van deze techniek in de afgelopen tijd zijn uitgevoerd blijkt dat het moeilijk is om de kosten die samenhangen met de onttrekking van zomerse warmteoverschotten in overeenstemming te brengen met de baten daarvan.

Oriënterende experimenten in het voorjaar van 2001 laten echter zien dat de toepassing van een dakbevoeiingssysteem een perspectiefvol concept lijkt te zijn om de kosten/baten verhouding van kaskoeling en warmtepomp gebruik positief te beïnvloeden. Immers, het warmtewisselend oppervlak (het kasdek) is groot en reeds aanwezig. Ook voor de afvoer van het koelwater hoeven geen voorzieningen te worden getroffen. Elke kas heeft immers het bestaande regenwaterafvoer systeem dat het water terug kan voeren naar het waterbassin. Het systeem behoeft dus alleen investeringen in het pomp- en bevoeiingssysteem. Het dakbevoeiingssysteem is toepasbaar op alle enkeldeks kassen en in principe geschikt voor alle teelten

In dit rapport worden verschillende systemen bestudeerd waarmee koeling door middel van dakbevoeiing tot stand kan worden gebracht en worden de perspectieven daarvan in kaart gebracht. Er is gekeken naar geheel nieuwe concepten, waarmee grote waterdebieten op het kasdek kunnen worden gebracht en er is gekeken naar mogelijkheden om aan te sluiten op bestaande dakbesproeiings-systemen.

De ontwikkeling van systemen ten behoeve van grote debieten sluiten aan bij de eerste experimenten met dekbevoeiing (Campen, 2001). Teneinde de investeringen voor dergelijke systemen te beperken heeft TNO een uitgebreide studie gedaan naar de mogelijkheden tot integratie van dakbevoeiing met de kasconstructie. Hierbij moet gedacht worden aan het nokprofiel en aan de bovenlijst van raamprofielen. Behalve voor nieuwbouw situaties is door TNO ook een aantal uitvoeringsvormen voorgesteld die toegepast kunnen worden op het bestaande kassenbestand. De bijdrage van TNO is in dit rapport opgenomen in hoofdstuk 2. In hoofdstuk 3 wordt getoond op welke wijze het experiment is opgezet teneinde de prestatie te kunnen meten.

In hoofdstuk 4 worden de meetresultaten besproken.

In hoofdstuk 5 wordt ingegaan op de vergelijking van de metingen in het experiment met berekeningen aan het systeem middels een simulatiemodel. Vervolgens worden met het aan het experiment getoetste model een aantal scenario's doorgerekend en worden de resultaten daarvan besproken.

In hoofdstuk 6 wordt voor een aantal perspectievolle combinaties een bedrijfseconomische analyse uitgevoerd.

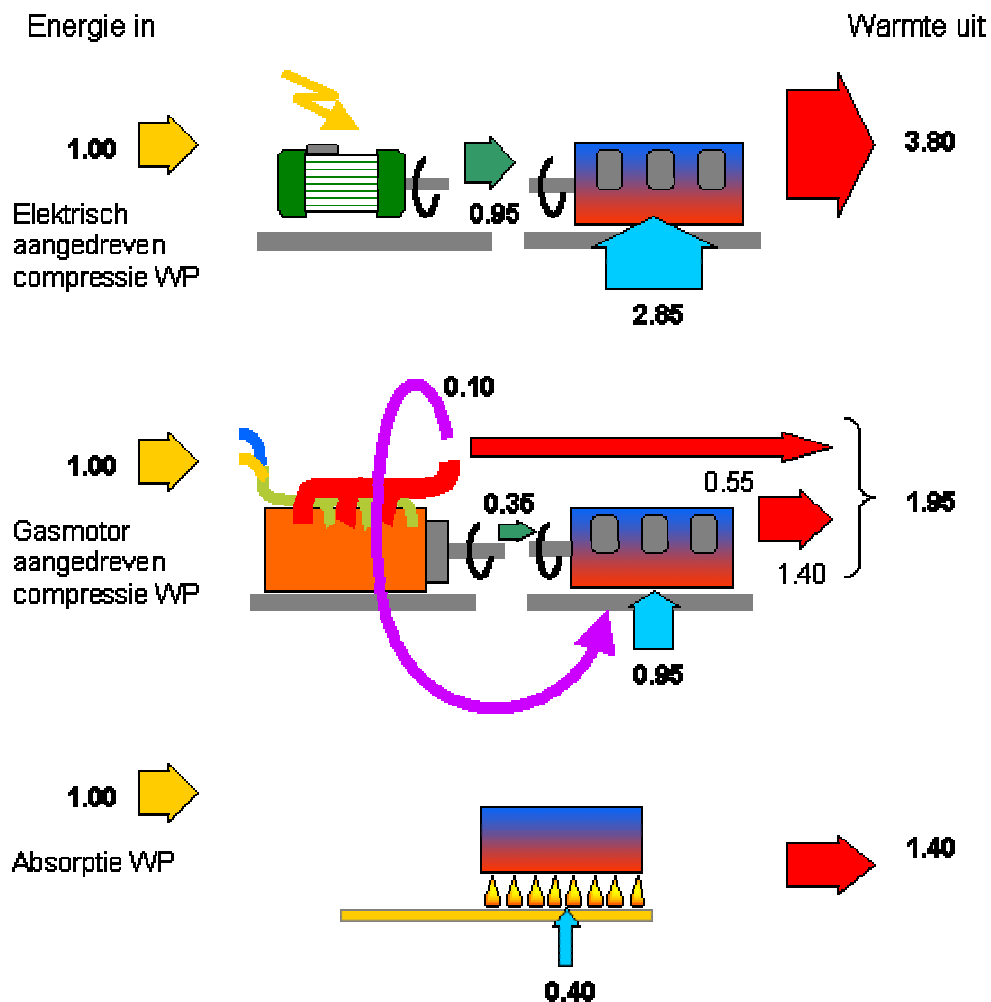
Hoofdstuk 7 geeft de belangrijkste conclusies en de daaruit volgende aanbevelingen.

1 Energiebesparing door middel van een warmtepomp

1.1 Warmtepompen

Een warmtepomp is een machine waarmee energie van een laag temperatuurniveau (de energie input) op een hoger temperatuurniveau kan worden gebracht (de energie output). Dit is een tegennatuurlijk proces, zodat dit proces alleen aan de gang kan worden gehouden door toevoer van een tweede, hoogwaardige energie input. De verhouding tussen de hoeveelheid warmte aan de output van de machine en de hoeveelheid hoogwaardige energie die nodig is voor de aandrijving van de installatie wordt de COP (Coefficient Of Performance, in het Nederlands: Opbrengstfactor) van de warmtepomp genoemd.

In onderstaande figuur worden een aantal typische kengetallen die voor verschillende typen warmtepompen gelden getoond.



Figuur 1-1 Typische kentallen voor verschillende typen warmtepompen.

In alle drie de gevallen wordt aan de linkerkant één eenheid aandrijf energie ingevoerd en wordt aangegeven langs welke weg de warmte-output aan de rechterzijde tot stand komt. De verhouding tussen het getal links en het getal rechts is de eerder genoemde COP. De figuur laat zien dat bij de elektrisch aangedreven warmtepomp het grootste deel (bijna $\frac{3}{4}$) van de warmte die rechts wordt afgegeven afkomstig is van de laagwaardige warmtebron (de dikke pijl naar de warmtepomp toe). Bij de gasmotor aangedreven warmtepomp is de bijdrage van de laagwaardig warmtebron nog niet een derde van de warmte-output. Bij de gasmotor aangedreven warmtepomp is ongeveer de helft van de warmte-output afkomstig uit de laagwaardige warmtebron.

Figuur 1-1 wekt de indruk dat vanuit energiebesparingsoogpunt de elektrisch aangedreven warmtepomp verreweg te verkiezen is boven de anderen. Deze geeft immers de meeste warmte per eenheid energie input. Wanneer echter het opwekkingsrendement van de elektriciteit in de beschouwing wordt meegenomen komt de gasmotor aangedreven warmtepomp bovenaan te staan. Immers, met het huidige gemiddelde centralerendement van 43% is er voor de productie van 1 eenheid elektriciteit 2.3 eenheden primaire energie nodig, wat de warmte-output per eenheid *primaire* energie terugbrengt tot $3.8/2.3 = 1.65$. Pas bij een opwekkingsrendement van meer dan 50% wordt de energiebesparingspotentie van de elektrische warmtepomp beter dan die van de gasmotor aangedreven warmtepomp. Vanwege het feit dat het gemiddeld opwekkingsrendement nog ver van deze 50% af ligt wordt in de rest van dit rapport uitgegaan van een gasmotor aangedreven warmtepomp. Een additioneel voordeel van de gasmotor aangedreven warmtepomp is dat deze een deel van de warmte op een hoog temperatuur-niveau afgeeft, wat gunstig is voor de mogelijkheid om warmte te kunnen bufferen. Hierdoor kan ook peak shaving te kunnen realiseren. Tenslotte is zelf geproduceerd asvermogen aanzienlijk goedkoper dan ingekochte elektriciteit.

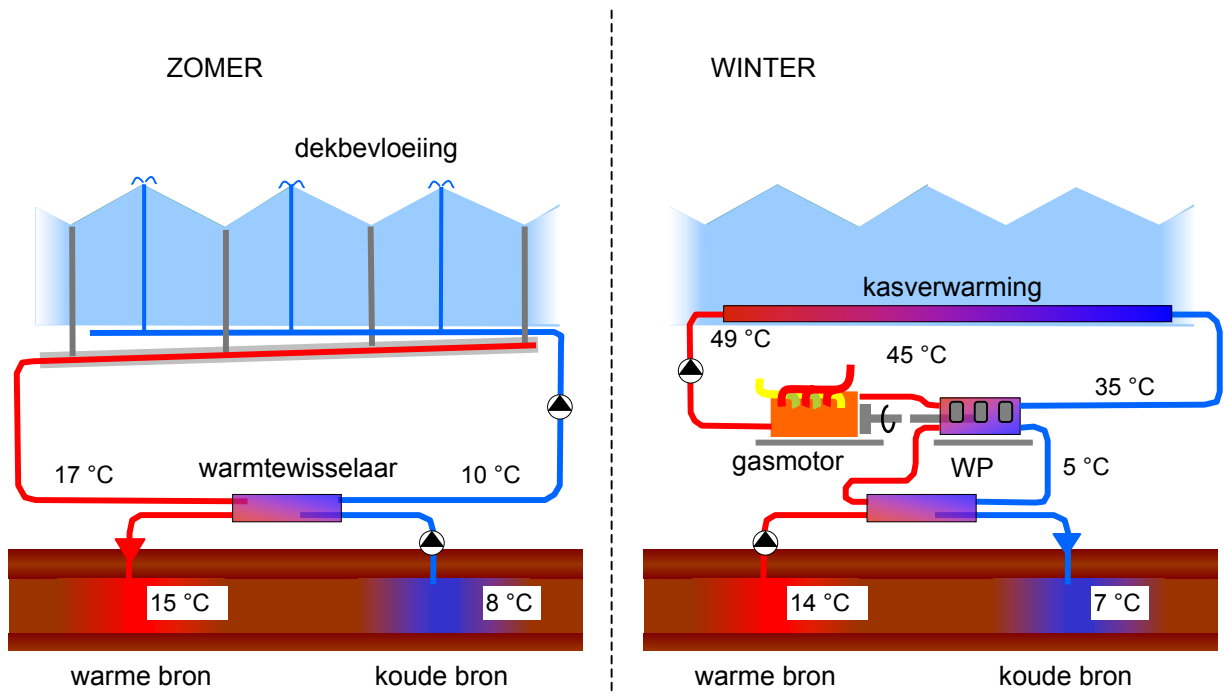
Uitgaande van de gasmotor aangedreven warmtepomp wordt per eenheid warmte die aan de output wordt afgegeven $0.95 / 1.95 = 0.49$ eenheid warmte aan de laagwaardige warmtebron onttrokken. Indien ook alle de warmte uit de rookgassen van de gasmotorwarmtepomp worden gebruikt, zoals getekend in figuur 1-1, is de energiebesparing precies gelijk aan hoeveelheid laagwaardige warmte die gebruikt wordt. Hierdoor kan gesteld worden dat bij gebruik van een gasmotor warmtepomp de energiebesparing gelijk is aan de hoeveelheid warmte die aan de laagwaardige bron (de aquifer) wordt onttrokken.

Gegeven de eis dat bij gebruik van grootschalige warmtepomp systemen de warmte-onttrekking in de winter gelijk moet zijn aan de warmtetoevoer in de zomer, kan gesteld worden dat de hoeveelheid warmte die het dekbevoeiingssysteem in de zomer weet te verzamelen gelijk is aan het energiebesparingspotentieel.

Uiteraard geldt deze vuistregel uitsluitend zolang de totale warmteproductie van de warmtepomp niet boven de totale warmtevraag uitkomt. Met het gegeven dat de warmtepomp voornamelijk in de basislast van de kasverwarming zal worden ingezet zal de warmteproductie van de warmtepomp in de huidige kastypen op zo'n 1000 MJ/m^2 blijven steken en komt de maximale energiebesparing van de warmtepomp op $500 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \text{ jr})$. (16 m^3 aardgas). In dit rapport zal blijken dat er dekbevoeiingssystemen zullen zijn die deze energiebesparing realiseerbaar maken.

1.2 Overzicht totale installatie

Het voorgaande heeft laten zien energiebesparing met een warmtepomp niet los kan worden gezien van warmte-verzameling in de zomer. In figuur 1-2 wordt daarom een overzicht gegeven van het totale concept dat in dit onderzoek voor ogen staat.



Figuur 1-2 Warmte verzamelen in de zomer en energie besparen in de winter.

In de figuur zijn een aantal karakteristieke temperaturen opgenomen. Deze temperaturen gelden hier als indicatief ter illustratie van het principe.

Een belangrijk gegeven is dat de scheidingwarmtewisselaar tussen ondergronds opslagsysteem en de rest van de installatie altijd een zeker temperatuurverlies te zien zal geven. In deze figuur is 2 graden temperatuurverlies verondersteld.

Een tweede punt dat in de figuur is benadrukt is de opwarming van de koude bron in de afkoeling van de warme bron. Water dat met 7 °C in de winter in de koude bron is gepompt zal niet met die temperatuur terugkomen (afgezien van water dat wordt opgepompt vlak nadat het geïnfiltreerd is).

Een derde punt dat in de figuur tot uitdrukking is gebracht is dat de (hoogwaardige) afvalwarmte van de gasmotor gebruikt kan worden om de aanvoertemperatuur van het verwarmingssysteem op te voeren. De hoogwaardige warmte (28% van de warmte-output van de gasmotor warmtepomp combinatie) kan ook tijdelijk worden opgeslagen in een etmaalbuffer.

2 Dakbevloeingsystemen voor kassen

Inleiding

In de huidige kassenbouw is reeds ervaring met kasdekberegeningsinstallaties. Deze worden met name in de potplantenteelt gebruikt om op zeer warme dagen voor verkoeling te zorgen in de kas. De koelcapaciteit van deze beregeningsinstallaties is geheel gebaseerd op verdampingskoeling.

In dit hoofdstuk wordt als eerste een overzicht gegeven van de nu reeds toegepaste systemen (§ 2.1).

In § 2.2 wordt uiteengezet dat de bestaande systemen weliswaar koelen, maar alle warmte die daarbij aan de kas- en buitenlucht onttrokken wordt vernietigen.

Toepassing van koud water in een dakbevloeingsstelsel kan deze warmtevernietiging voorkomen.

Teneinde een substantiële koeling te bereiken moet het waterdebiet in dat geval echter wel groter zijn dan bij verdampingskoeling het geval is.

In § 2.3 worden een aantal concepten geschetst waarmee deze grote debieten gerealiseerd kunnen worden.

2.1 Bestaande systemen

Bij dakberegening wordt het water gebruikt om het klimaat in de kas te koelen. Enerzijds gebeurt dit doordat het water verdampt van het glas, anderzijds doordat koele vochtige lucht de kas ingebracht wordt. Er moet dus altijd water op het dek aanwezig zijn. Droogt het water op, dan stopt het koelend effect, maar kan ook het vuil uit het water indrogen op het dak. De druppelgrootte moet niet te klein, en dus windgevoelig zijn, maar ook niet te groot, omdat dan de lucht boven het dek minder koelt. Bij dakberegening wordt in de praktijk uitgegaan van een maximale verdamping van 1 mm per m² per uur in de warmste perioden. De capaciteit van de beregening wordt dan op ongeveer 2 mm per m² per gesteld om enerzijds te voorkomen dat delen van het dak opdrogen en anderzijds zo min mogelijk water rond te pompen. Door deze lage capaciteit kunnen grote oppervlakken tegelijk beregend worden. De Mamkad-15 leent zich uitstekend voor dakberegening, als het gaat om lage afgifte te combineren met de vereiste druppelgrootte. Voor de randen kunnen de sproeiers worden voorzien van een beschermkap ('roadprotector') waarmee voorkomen wordt dat wegen, tuinen etc. meeberegend worden. Uitgaande van de kasafmetingen is door Revaho de onderstaande tabel opgesteld, zodat eenvoudig te bepalen is welke sproeier in welke situatie gebruikt kan worden.

Tabel 2-1 Sproeidebieten van verschillende Revaho sproeisystemen

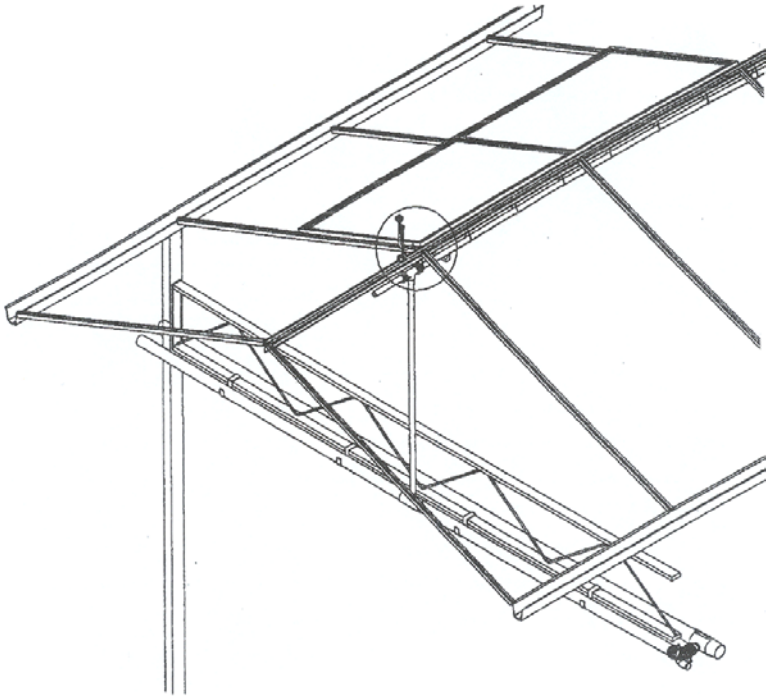
Kasmaat (m)	Sproeier afstand (m)	Sproeier (Afgifte l/u)	Neerslag * [mm/(m ² u)]
6.4 x 3	6.4 x 9	blauw (135)	2.3
	6.4 x 12	geel (180)	2.4
6.4 x 4	6.4 x 12	geel (180)	2.4
8 x 4	8 x 8	blauw (135)	2.0
	8 x 12	geel (180)	1.9
8 x 4.5	8 x 9	geel (180)	2.5
8 x 5	8 x 10	geel (180)	2.3
9.6 x 4.5	9.6 x 9	geel (180)	2.1
9.6 x 5	9.6 x 10	geel (180)	1.9
12.8 x 4	12.8 x 8	geel (180)	1.8
12.8 x 5	12.8 x 10	Violet (225)	1.7

* max. verdamping 1 mm/uur. Neerslag \pm 2 mm/uur, voor minimale watergift.
(Bron: Revaho)

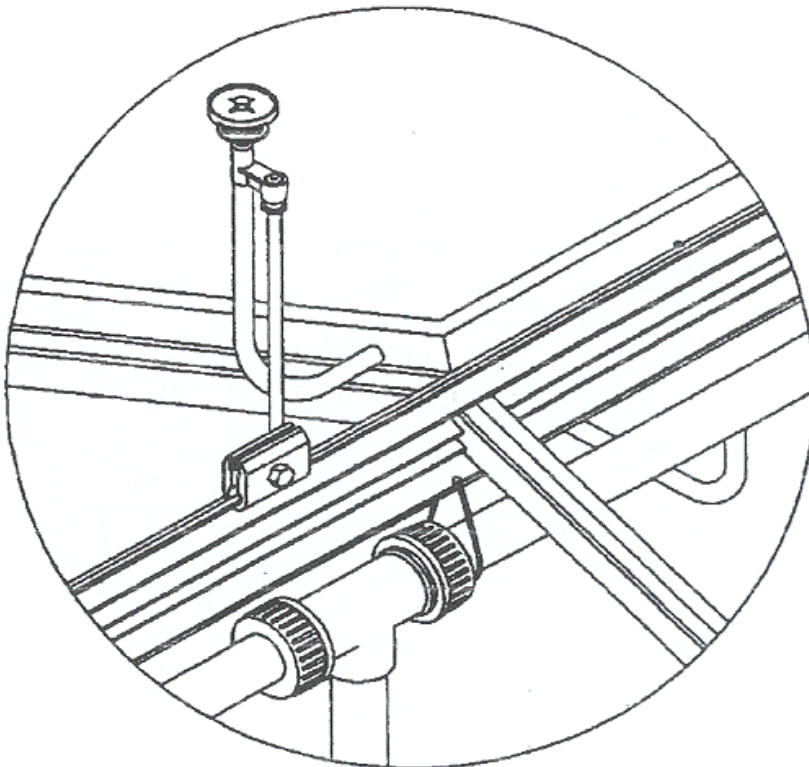
Het principe van de dakberegening berust op verdamping van water, waardoor met relatief weinig water een groot koelvermogen kan worden verkregen. Hieronder worden enkele kenmerkende eigenschappen van de huidige kasdekberegeningsinstallaties opgesomd:

- Er zijn een gering aantal leveranciers (Sosef, Brinkman, Revaho)
- Het betreft interne installaties, i.v.m. eenvoudige bevestiging en vorst
- De sproeiers beregenen in een cirkel van circa 6-8 meter.
- De systemen worden in de winter afgetapt tegen vorstschade en algengroei
- Er wordt gebruik gemaakt van kunststof slangen (tyleen, PVC) vanwege het lage debiet (150-250 liter per uur) en de werkdruk van 2 bar kan volstaan worden met relatief dunne slangen (8-10 mm aanvoerslang voor de sproeier).
- De systemen worden bevestigd aan de goot/roeden en nok.
- De dakdoorvoer geschiedt d.m.v. een ter plaatse geboord gat in het centrum van de roede of in de hoek van het glas.
- Er is een breed assortiment aan beugels, haken, etc. Om montage op praktisch iedere bestaande kas mogelijk te maken.

In figuur 2-1 en 2-2 wordt een gebruikelijke waterdoorvoer wijze getoond, waarbij de wateraanvoer door de zijkant van het raamprofiel loopt. Er zijn echter ook uitvoeringsvormen waarbij het aanvoerslangetje via een gat dat in het glas is geboord wordt gevoerd. Ook worden soms gaten door de roeden geboord, waarbij kleine stukjes glas aan de randen van de glaspanelen meegeboord worden.



Figuur 2-1 Overzichtstekening van een daksproeier waarvoor het water door het raamprofiel wordt aangevoerd.



Figuur 2-2 Detail illustratie van de waterdoorvoer

2.2 Aanpassingen van bestaande sproeisystemen t.b.v. het oogsten van zonnewarmte

Het verdampen van 1 liter water (1 mm per m²) kost ruim 2 MJ aan energie. Indien bij een sproeidebiet van ongeveer 2 mm per m² per uur de helft van het water dat op het dek gespreid wordt verdampt, zoals uit de bovenstaande tekst een leidend ontwerpcriterium blijkt te zijn, dan wordt hierbij 2 MJ/uur warmte gebruikt, ofwel ruim 550 W/m².

De keus voor deze vorm van verdampingskoeling betekent dat de overtollige warmte van de kas wordt weggevoerd in de vorm van latente warmte die aan de buitenlucht wordt afgegeven. In feite wordt het warmteoverschot dus ter plaatse vernietigd, waarbij ook nog eens een belangrijk waterverbruik optreedt.

De warmte die voor deze verdamping nodig is zal gedeeltelijk aan het kasdek worden onttrokken, maar voor het grootste deel aan de buitenlucht. Een klein deel van het koelvermogen vindt dus plaats door een afkoeling van het dek en een groot deel doordat de buitenlucht die de kas via de ramen uitwisselt kouder is gemaakt. Het grootste deel van de afgekoelde buitenlucht zal echter wegwaaien en levert voor de kas dus geen koeling.

Indien ditzelfde water met een temperatuur van bijvoorbeeld 7 °C op het warme glas zou worden gespreid en het water vervolgens op zou warmen tot 17 °C dan is de warmteopname 2 liter/uur * 4200 J/(liter K) * (17 – 7) = 84000 J/(m² uur) = 23 W/m². Hieruit blijkt dat bij gebruik van verdampingskoeling het koelvermogen per liter water dat versproeid wordt vele malen hoger is dan bij koeling door middel van de opwarming van water.

Wanneer gestreefd zou worden naar een koelcapaciteit die in de orde ligt van 250 W/m², waarmee in ongeveer de helft van de koelbehoefte van een kas zou kunnen worden voorzien, dan zal de sproeicapaciteit een factor 10 hoger moeten zijn, dus ongeveer 20 liter per uur.

Op grond van bovenbeschreven overweging is in het praktijkexperiment gekozen voor een waterdebiet dat in deze orde van grootte ligt.

Wanneer in tabel 2-1 wordt gekeken op welke onderlinge afstanden de sproeiers in de gebruikelijke systemen staan moet worden geconcludeerd dat in plaats van hart op hart afstanden van ongeveer 10 meter de sproeiers ongeveer één meter uit elkaar geplaatst zouden moeten worden. In de volgende paragraaf worden een aantal uitvoeringsvormen besproken die de mogelijkheid bieden om in deze grote waterbehoeften te voorzien.

2.3 Uitvoeringsalternatieven voor dakbevoeiingssystemen met een hoog waterdebiet.

In het kasexperiment dat in dit rapport besproken wordt is de dakbevoeiing gerealiseerd met behulp van 30 mm dikke buizen die op de nok van de kas waren gemonteerd. De wateraanvoer vond plaats via aanvoerleidingen die vlak langs de goot waren gemonteerd. Hierdoor bleef de goot dus gewoon beloopbaar. Teneinde een gelijkmatige water-uitstroom te bewerkstelligen bij een beperkte buisdiameter werden zijn er om de 10 meter aanvoerpunten in de nokbuis aangebracht. Elk aanvoerpunt verzorgde daarmee de watertoevoer naar 5 meter buis ter linkerzijde en 5 meter ter rechterzijde. Deze uitvoeringsvorm was anders dan in het eerste experiment met een dakbevoeiingssysteem, waar een lange buis vanaf de kopgevel van water werd voorzien. Deze uitvoeringsvorm maakte het namelijk noodzakelijke om een dikke buis (50 mm) te moeten gebruiken, die ook nog eens qua lengte beperkt was tot zo'n meter of 20.

De in het voorliggende experiment gekozen uitvoeringsvorm had een hoog modulair karakter en was op bestaande kassen uitvoerbaar.

In figuur 2-3 is een foto getoond van deze uitvoeringsvorm. De aanvoerleiding vlak langs de goot is goed te zien en de foto toont ook dat het water vanaf de nok in kleine straaltjes op het dek gespreid wordt.



Figuur 2-3 Het dakbevoeiingssysteem in werking op de proefkas van het IMAG.

Figuur 2-3 laat zien dat het dakbevoeiingssysteem het gebruik van luchtramen niet uitsluit. In het experiment moesten echter wel voorzieningen worden getroffen voor de afdichting van de scharnieren omdat deze niet waren ontworpen op de afvoer van grote hoeveelheden water bij een geopend raam.

De buis die op de nok lag had twee rijen kleine gaatjes met een diameter van 1.5 mm en een hart-op-hart afstand van 3 cm.

In figuur 2-4 is een detail-opname van deze buis getoond.



Figuur 2-4 Detail-opname van de sproeibuis.

Het experiment heeft echter uitgewezen dat ondanks filtering van het water de gaatjes in de sproeibuisen min of meer verstopt raakten. Deze verstopping werd mogelijk veroorzaakt door algengroei in het water en kalkaanslag in de uitstroom-openingen.

Doordat bij verstopping de openingen gemiddeld kleiner werden liep het debiet dat met de buis verspreid kon worden langzaam terug en gingen de buizen het water steeds verder weg spuiten. Na verloop van tijd kwam het water daardoor niet meer bovenaan de nok op het kasdek, maar pas halverwege het dek. Met name dit laatste probleem deed de koelcapaciteit teruglopen.

Een laatste belangrijke constatering die kon worden gedaan is dat op het onderste stuk van het kasdek (dus het stuk vlak bij de goot) verhoogde algenaanslag waargenomen kon worden. Dit betekent dat bij gebruik van een dakbevoeiingssysteem wellicht wat vaker een dakwasser gebruikt zal moeten worden.

Vanuit de bevindingen die in het project zijn opgedaan komen dus de volgende eisen die aan een dakbevoeiingssysteem voor hoge debieten gesteld zouden moeten worden.

- Het waterdebiet moet regelbaar zijn tussen 10 en 20 liter per m² kasoppervlak per uur.
- Het water moet zoveel mogelijk als een egale film vanaf de nok naar de goot over het kasdek stromen.
- Het systeem moet een minimale kans op verstopping hebben
- Het systeem moet dakwassers niet in de weg zitten
- Er moet rekening gehouden worden met het lekken van scharnieren

Binnen het project zijn drie mogelijke oplossingsstrategieën bedacht om de tekortkoming van het beproefde systeem te verhelpen:

- Verbeterde versie van het beproefde dakbevoeiingssysteem waarbij vervuiling van de gaatjes wordt tegengegaan wordt door maatregelen als:
 - betere filtering
 - voorkomen van algengroei
 - hogere waterdrukken bij kleinere gaatjes en een andere oriëntatie van de gaatjes
 - kouder water en
 - het steeds leeg laten lopen van het systeem na een bevoeiingsperiode.
- Overstappen op de beproefde techniek van de daksproeiërs. Hierbij is het belangrijk dat voldoende debiet behaald wordt en dat op enige manier gestuurd kan worden tussen verdampingskoeling en koeling door opwarming van water.
- Aangepast dakbevoeiingssysteem dat geïntegreerd is in het bovenprofiel van het luchtraam.

Een algemeen punt is dat de afdichting van het bovenscharnier aandacht behoeft. In de volgende paragrafen worden de drie alternatieven behandeld.

2.3.1 Verbeterd dakbevoeiingssysteem

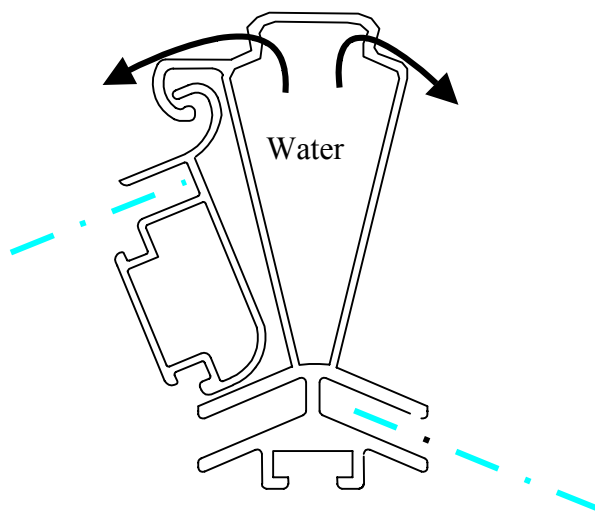
De dakbevoeiing zoals toegepast in het experiment kan met behulp van de onderstaande aanpassingen geschikt gemaakt worden voor “probleemloos dagelijks gebruik”

- Goede filtering van het water voordat het verpompt wordt door het systeem
- Biologische algenbestrijding toepassen, bijvoorbeeld m.b.v. watervlooiën
- De werkdruk van het systeem verhogen, gecombineerd met kleinere gaatjes die het water in een neerwaartse richting spuiten
- Automatisch aftapsysteem integreren in het systeem, zodat na het uitschakelen van het systeem de leidingen helemaal leeglopen. Hierdoor wordt algengroei tegengegaan en zal eventuele vulophoping in de buizen afnemen.

Een dergelijk aftapsysteem zal direct ook bijdragen aan vorstschade beveiliging.

In onderstaande schets is een uitvoeringsvorm getekend van een gaatjesbuis die in een nieuwbouwsituatie zou kunnen worden gebruikt. De getoonde uitvoeringsvorm zal geen problemen hebben met lekkende scharnieren zolang het raam minder dan 50% geopend is. Gesteld kan worden dat de raamopening bij gebruik van het bevoeiingssysteem ook niet zo groot hoeft te zijn. Immers, bij gebruik van de bevoeiing zal de koelbehoefte voor een groot deel door het koude kasdek plaatsvinden. De mogelijkheid om de ramen ver open te zetten moet dan ook vooral als nood-voorziening worden gezien.

De wateraanvoer naar de kamer in het nokprofiel kan plaatsvinden in de koppelstukken waarmee verschillende nok-lengten tijdens de bouw samengevoegd worden. De wateraanvoerbuizen zullen in dit systeem buiten de kas liggen.



Figuur 2-5 Schets van een in het nokprofiel geïntegreerde gaatjesbuis.

Het geschetste profiel geeft een minimale lichtonderschepping.

Een eenvoudige praktijkproef, die niet op een kasdek en niet op grote schaal hoeft te worden uitgevoerd is nodig om dit aangepaste systeem te toetsen.

2.3.2 Beregeningssproeiers

Als alternatief voor de dakbevloeiing met een geperforeerde buis is in de laatste maand van de proef geëxperimenteerd met de toepassing van standaard beregeningssproeiers. Deze hebben het beoogde 10 maal grotere debiet dan de sproeiers die in tabel 1-1 zijn genoemd en konden zonder problemen op de aanvoerleidingen die eerst voor de gaatjesbuizen waren gebruikt worden aangesloten. De kans op verstoppingen is met dit systeem veel lager dan met de gaatjesbuizen omdat de stroomsnelheid van het water en de sproeiopening veel groter is dan bij de gaatjesbuizen.

Een ander voordeel van dit sproeisysteem is dat tuinders bekend zijn met daksproeiers. Daksproeiers en dakbevloeiing is weliswaar niet hetzelfde (zie § 1.2), maar vertonen wel grote overeenkomsten. Introductie van een systeem met daksproeiers-met-hoog-debiet zou daardoor niet zo'n hoge drempel opwerpen, waardoor de drempel voor het "warmte-oogststelsel" lager wordt.

Figuur 2-5 toont een foto van een werkende proefopstelling met dit systeem.



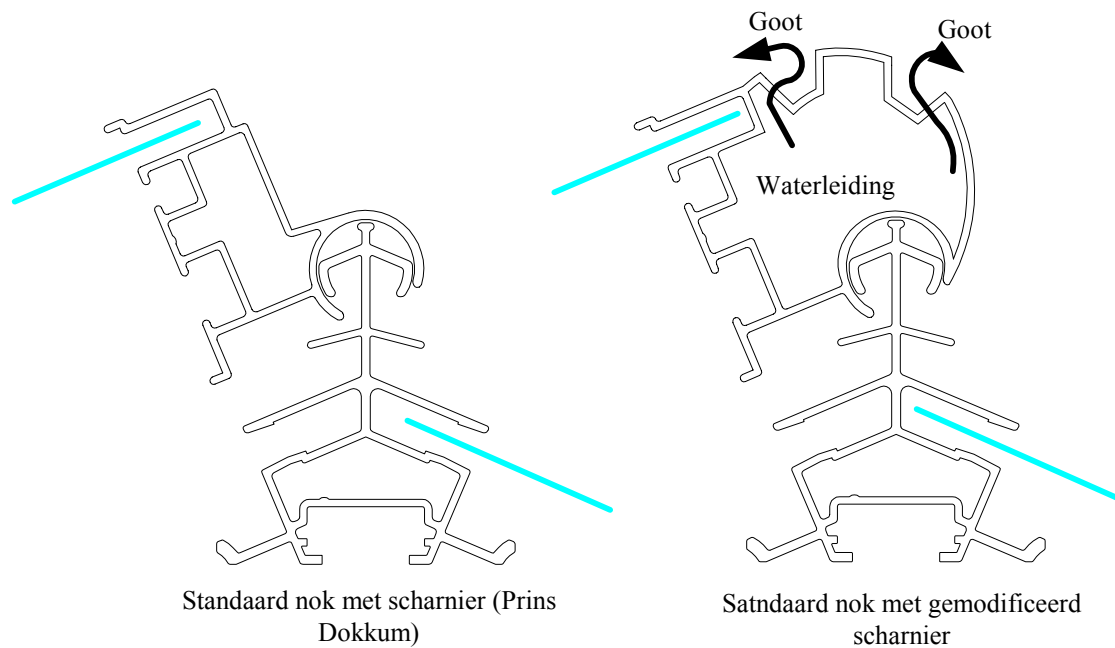
Figuur 2-6 Experiment met dakbevloeiing door middel van standaard beregeningssproeiers.

Het experiment met de beregeningssproeiers zoals getoond in figuur 2-5 kon echter niet gedurende enige periode worden beproefd omdat dit bij de gebruikte proefkas tot een onacceptabele inregeninge via de zij-openingen van de luchttingsramen leidde. Dit ondanks een zorgvuldige afstelling van de sproeipatronen.

Geconcludeerd is dan ook dat dekbevloeiing met behulp van hoog-debiet beregeningssproeiers alleen kan worden toegepast op kassen met een enkelzijdige doorlopende nokluchting

2.3.3 Integratie dakbevloeiing met luchtraam

Het derde alternatief voor de dakbevloeiing is een integratie van de dakbevloeiingsbuis met het scharnierende bovenraamprofiel. In figuur 2-7 is een bestaand profiel (links) en een voor de toepassing van dakbevloeiing aangepast profiel (rechts) getekend.



Figuur 2-7 Voorbeeld van een integratie van de dakbevloeiing met een doorlopend luchtraam. Het water stroomt via een beperkt aantal, maar vrij grote gaatjes uit de waterleiding, waarna de twee gootjes gevuld worden. Vanuit de gootjes stroomt het water gelijkmatig over het kasdek

Het grote voordeel van het in figuur 2-7 getoonde systeem is dat het niet meer dan een modificatie op een reeds bestaand profiel is. Een ander voordeel is dat de uitstroopeningen meedraaien met het luchtraam, waardoor het water boven een bepaalde raamopening vanzelf naar het niet geopende deel van het kasdek stroomt. Een derde aspect wat in het in figuur 2-7 getoonde ontwerp is meegenomen is dat de verdeling van het water niet plaatsvindt door veel kleine gaatjes te boren, maar door een gootje te creëren. Dit gootje zal over grotere lengten overlopen, waardoor de verdeling van het water over het dek tot stand komt. Het gootje wordt gevuld vanuit de waterleiding middels een aantal gaten (bijvoorbeeld één per 20 cm). Door hun geringere aantal kunnen deze gaten aanzienlijk groter zijn dan de gaatjes in de sproeibuizen die in § 1.3.1 zijn besproken moeten worden aangebracht. Dit beperkt het benodigd pompvermogen, verkleint de kans op verstoppingen en verlaagt de productiekosten.

De watertoevoer naar de kamer in het bovenraamprofiel vindt plaats van binnenuit. Bij de uitvoering hiervan dient rekening te worden gehouden met condensvorming op deze koude buizen.

Andere aandachtspunten zijn

- Vervuiling van het gootje
dit kan echter met de standaard dekwasser gereinigd worden.
- Vervormingen van de constructie.
Door de doorbuiging van het scharnierende profiel kan de werking van het gootje beïnvloed worden.

3 Opzet praktijkproef

Inleiding

Het praktijkexperiment rond het dakbevoeiingssysteem beoogt een aantal zaken experimenteel te bepalen

- Hoeveel warmte kan op jaarbasis met het voorgestelde systeem worden verzameld?
- Hoeveel kan de ventilatie, en daarmee het CO₂-verlies worden beperkt?
- Hoeveel hoger is de gemiddelde CO₂-concentratie?
- Heeft het dakbevoeiingssysteem effect op de lichtdoorlatendheid?
- Is er duidelijk een waarneembare productiestijging?

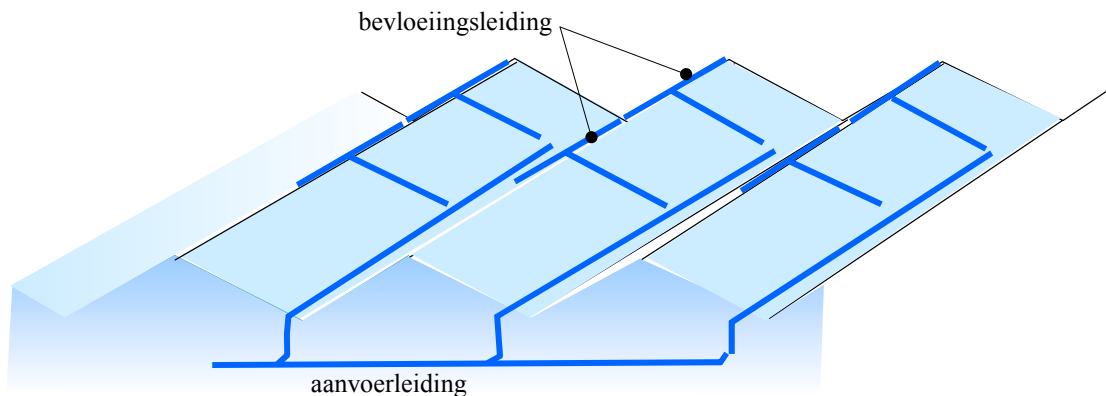
Om op deze vragen een praktisch antwoord te kunnen krijgen is in twee identieke kasafdelingen van 200 m² een tomatengewas geteeld, zoveel mogelijk overeenkomend met de huidige teeltwijzen. De temperaturen zijn in de beide afdelingen gelijk gehouden, maar in de afdeling met kasdekbevoeiing worden de ramen pas op het temperatuur-criterium geopend wanneer de koelcapaciteit van het dakbevoeiingssysteem maximaal is. Het openen van de ramen op het luchtvochtigheids-criterium bleef echter onverminderd prioriteit hebben. Door de (gedeeltelijke) vervanging van ventilatie als temperatuur-regelings instrument door de dekbevoeiing zal het ventilatiedebiet in de afdeling met dekbevoeiing gemiddeld genomen kleiner zijn en daarmee ook het CO₂-verlies. Deze afdeling zal daardoor bij gelijke doseercapaciteit hogere CO₂-concentraties kunnen realiseren dan de referentie afdeling. Bij niet al te hoge koellast zal de streefwaarde zelfs bij lagere doseersnelheden gerealiseerd kunnen worden. Het totaaleffect hiervan is dat de gemiddeld hogere concentratie bij een lager jaarverbruik tot stand komt.

3.1 Ontwerp van het toe te passen bevoeiingssysteem

In het oriënterende experiment dat in 2001 is uitgevoerd is gebruik gemaakt van een roestvrijstalen buis die over de nok van de kas was gelegd, en die vanuit één aan vulpunt aan de kopgevel werd gevoed. Dit gaf weinig leidingwerk, maar vereiste een dikke buis (50 mm). Deze dikke buis was nodig om een goed verdeelde uitloop van het water over het kasdek te realiseren. Wanneer een dunnere buis zou zijn gebruikt zou het water vooral aan het eind de buis zijn uitgelopen.

Indien kassen op praktijkschaal op deze manier met een dakbevoeiingssysteem zouden worden uitgerust kunnen de noklengtes oplopen tot zo'n 100 meter, waardoor een systeem met één invulpunt tot zeer dikke buizen zou leiden. Dit zou daarmee een duur, zwaar en onhandelbaar systeem worden, en bovendien een belangrijke hoeveelheid licht wegnemen. Om dit probleem te voorkomen is bij het ontwerp voor het praktijk experiment uitgegaan van een modulair systeem dat gebaseerd is op één invulpunt in het midden van een buis die in totaal 9 meter lang is (2 vakken in een standaard kasstramien).

Deze uitvoering is schetsmatig weergegeven in onderstaande figuur.



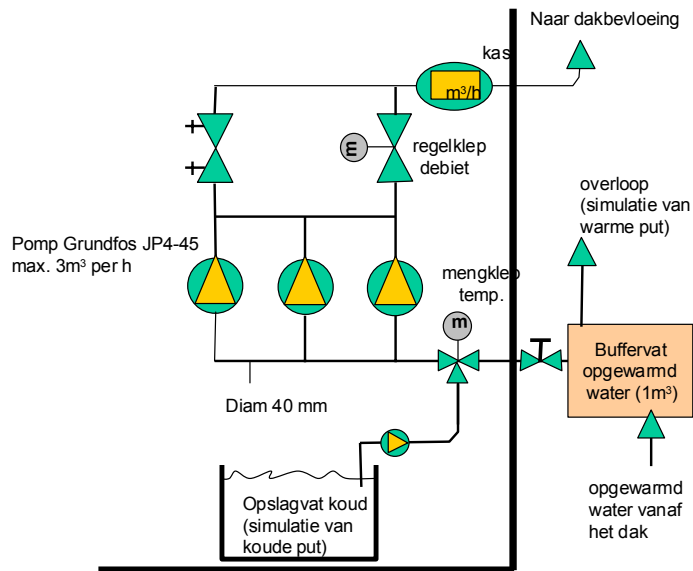
Figuur 3-1 Schematische weergave van het bevoeiingssysteem op het kasdek.

De kasafdeling waarin het experiment heeft plaatsgevonden bestaat uit drie kappen. De hoofdleiding splitst in drieën zodat er door elke goot een secundaire aanvoerleiding loopt. Vanaf deze secundaire aanvoerleiding lopen twee aftakkingen naar de bevoeiingsleidingen. De bevoeiingsleidingen zijn gemaakt van 30 mm aluminium buizen waarin twee rijen gaatjes zijn geboord. De onderlinge hoek van deze gaatjes is 90°. De gaatjes hebben een diameter van 1 mm en een onderlinge afstand van 3 cm. Er zijn in totaal dus 3600 gaatjes geboord.

3.2 Waterbereidings-systeem

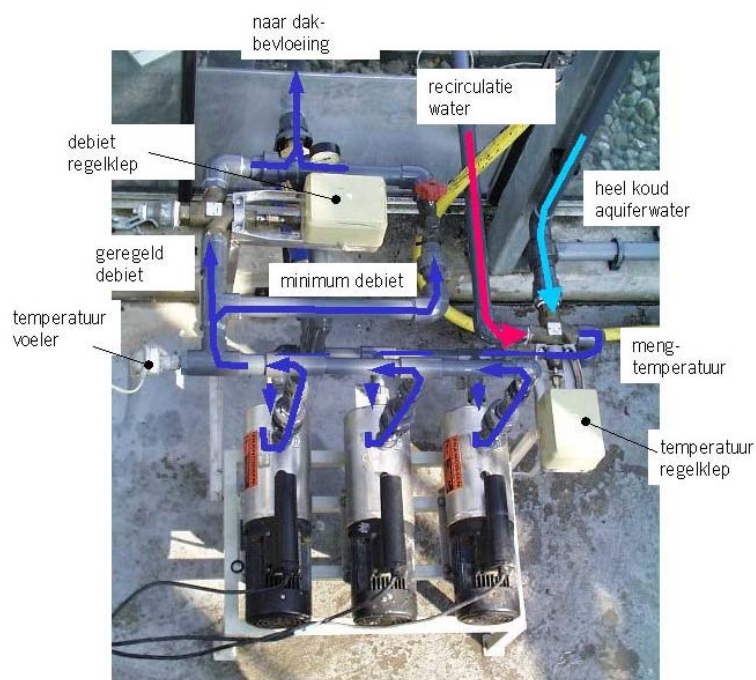
De koelcapaciteit van het dakbevoeiingssysteem kan op twee manieren worden geregeld. In de eerste plaats kan de temperatuur van het water dat op het dak wordt gespoten worden ingesteld en in de tweede plaats kan het debiet worden gevarieerd. Onderzoek van van 't Slot (2002) heeft laten zien dat het tegen de achtergrond van de maximalisatie van de koelcapaciteit tegen zo beperkt mogelijke pompkosten het verstandigste is om deze volgorde te gebruiken voor de regeling van de koelcapaciteit (dus eerst de temperatuur en daarna het debiet).

Om dit te kunnen realiseren is een opstelling gemaakt die in figuur 3-2 schematisch is weergegeven. Figuur 3-3 laat de opstelling zien zoals die in het experiment is gemaakt.



Figuur 3-2 Schematische weergave van de temperatuur- en debietregelingseenheid

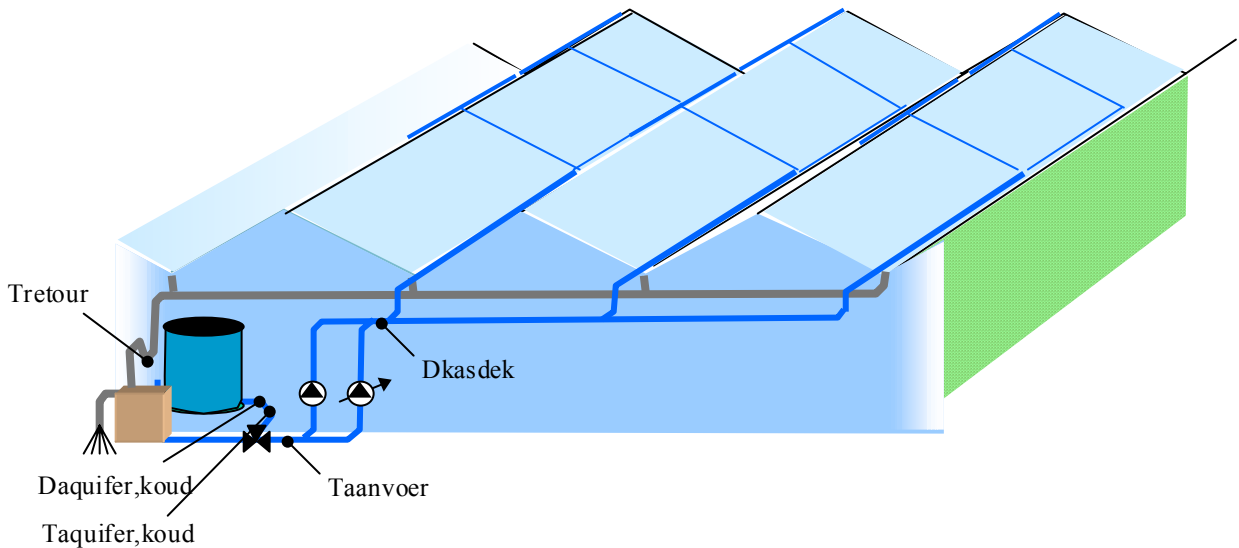
In het schema is te zien dat er drie pompen gebruikt worden. Dit geeft de mogelijkheid om bij lage debieten twee of één pomp uit te schakelen zodat het debiet niet alleen via een smookklep geregeld hoeft te worden. Uitvoeringsvormen in de tuinbouwpraktijk zouden hiervoor gebruik kunnen maken van frequentie geregelde pompen.



Figuur 3-3 Uitvoeringswijze van de temperatuur- en debietregelingseenheid.

3.3 Wateropvang en bufferings-systeem

Omdat het koelvermogen geregeld moet kunnen worden en omdat deze regeling in eerste instantie via de temperatuur moet worden geregeld zal, bij beperkt koelvermogen, een deel van het water moeten recirculeren. Met name bij de opstart van het systeem duurt het een hele poos (3 minuten in experiment, maar aanzienlijk langer op een praktijkkas) voordat het water dat het dak op wordt gespoten weer via het regenafvoer systeem terug is. Om gedurende die tijd toch te kunnen recirculeren moet er dus een buffer-systeem aanwezig zijn. Onderstaande figuur laat zien hoe het totale systeem er uit ziet.



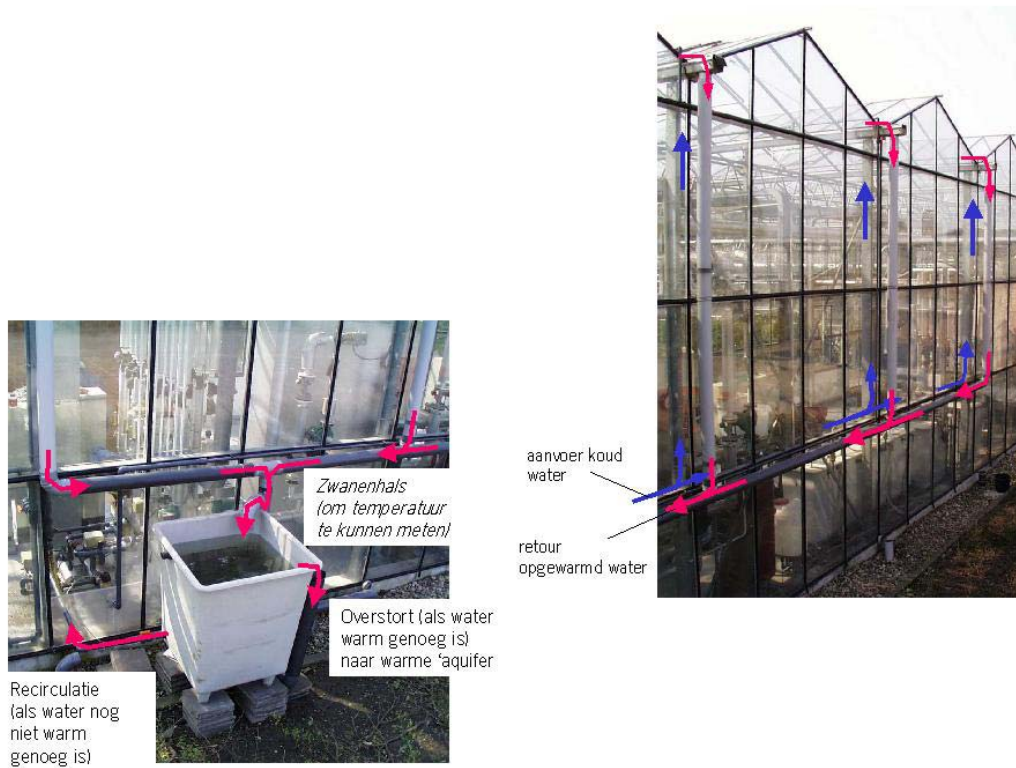
Figuur 3-4 Schematische weergave van het complete systeem, inclusief de meetinstrumenten. De temperatuur van het aanvoerwater (Taanvoer) komt tot stand door menging van koud water (Taquifer,koud) met retourwater van het dak (Tretour). Het waterdebiet (Dkasdek) heeft een minimumdebiet, waarbovenop een variabel debiet kan toegevoegd. Het vermogen dat in een praktijksysteem naar de aquifer wordt gevoerd is $Daquifer,koud * \rho c_p (Tretour-Taquifer,koud)$.

Figuur 3-4 toont de bevoeiingsleidingen van figuur 3-1, de waterbereidings-unit (de pompen en de regelklep) van figuur 3-2 en het opvangreservoir waarin het water dat de kas afloopt wordt opgevangen.

Met de regeling van de temperatuur van het water dat het dak op wordt gespoten wordt koud water uit de aquifer aan de waterkringloop toegevoegd, waardoor op een gegeven moment het opvangreservoir gaat overlopen. Dit water heeft dezelfde temperatuur als het retourwater dat van het dak afloopt zodat de facto het koude aquifer-water wordt vervangen door opgewarmd overstort water. Deze temperatuur-stijging is de beoogde zonne-energie verzameling.

In de bovenbeschreven experimentele situatie wordt het koude en warme water vanuit open systemen betrokken. In grootschalige situaties, waarbij echte aquifers zouden moeten worden gebruikt moet het systeem in een gesloten vorm worden uitgevoerd middels het gebruik van een warmtewisselaar.

In figuur 3-5 is de praktische uitvoering van het systeem voor de onderzoekssituatie afgebeeld.



Figuur 3-5 Uitvoeringswijze van het water-opvang en bufferingssysteem

Watertemperaturen en –debieten zijn continu gemeten, alsmede de overige kasklimaat-parameters.

4 Resultaten

Inleiding

Vanaf 15 april tot 1 september 2002 is op één van twee overigens identieke kasafdelingen kasdekbevoeiing toegepast. Door metingen aan het dakbevoeiingssysteem is de onttrekking van warmte, het CO₂-gebruik en CO₂-concentratie, invloed op de lichtdoorlatendheid, het kasklimaat en de kwaliteit en opbrengst van het gewas (tomaat) bepaald ten opzichte van een referentieafdeling.

In dit hoofdstuk worden de ervaringen met het plaatsen, onderhoud en gebruik van het dakbevoeiingssysteem besproken en worden de resultaten m.b.t. de onderzoeksvragen gepresenteerd.

4.1 Algemene bevindingen

4.1.1 Montage

In het experiment is gekozen voor bevestiging van buizen met klemmetjes op de nok en de aanvoerleidingen vlak naast de goot. Deze montage maakt het mogelijk dat gangbare dakwassers gebruikt kunnen blijven worden en er nauwelijks ingrepen in de bestaande constructie aangebracht hoeven te worden.

De gekozen montagewijze gaf geen problemen.

4.1.2 Vervuiling

Bij aanleg van het systeem was de waterverdeling op het dak bij het minimumdebiet gelijkmatig verdeeld. Doordat er echter vuil en algen uit de goot in het bevoeiingswater terecht kwamen raakten sommige gaatjes verstopt en verslechterde de waterverdeling aanzienlijk. Behalve dat sommige stukken ruit hierdoor droog bleven spoot het water uit de resterende gaatjes veel harder, waardoor het bovenste stuk van de ruiten die wel bespoten werden ook nog eens droog bleven.

Hierdoor nam de effectiviteit van het koelsysteem enorm af.

De eerste stap in de oplossing van dit probleem bestond uit het filteren van het retourwater vanaf het dak bij het recirculatievat. Dit leverde een enorme "oogst" van algen. Aanvullend is gedurende twee uur 1 m³ water gerecirculeerd met daarin opgelost 50g methanol. Later is dit ook herhaald met het algen bestrijdingsmiddel "Menno ter Forte". Na deze behandelingen zijn de leidingen ook nog eens gespoeld met koud water (8 °C).

Door al deze ingrepen verminderde de algengroei en het aantal verstopte gaten en verbeterde het sproei patroon. De behandeling is regelmatig (1 x per maand) herhaald.

Een meer structurele oplossing zou kunnen bestaan uit het verminderen van het aantal gaten in de bevoeiingsbuizen en het vergroten van de gatdiameters. Suggesties hiervoor zijn in hoofdstuk 1 terug te vinden.

4.1.3 Lekken

De luchtingssystemen van de kasafdelingen waarin het experiment heeft plaatsgevonden zijn niet gebouwd op het afvoeren van veel water bij geopende ramen. Reeds bij geringe openingshoeken bleek water bovenin het scharnier op te hopen, wat al snel de kas in lekte.

Om dit te voorkomen zijn de scharnieren aan de bovenkant afgerubberd. Dit voorkwam het lekken van het scharnier bij openingshoeken tot 45%. Boven deze openingshoek bleef de lek echter nog steeds onacceptabel, zodat een maximale raamopening van 45% is ingesteld. Dit betekent dat de ramen altijd behoorlijk op afschot blijven staan.

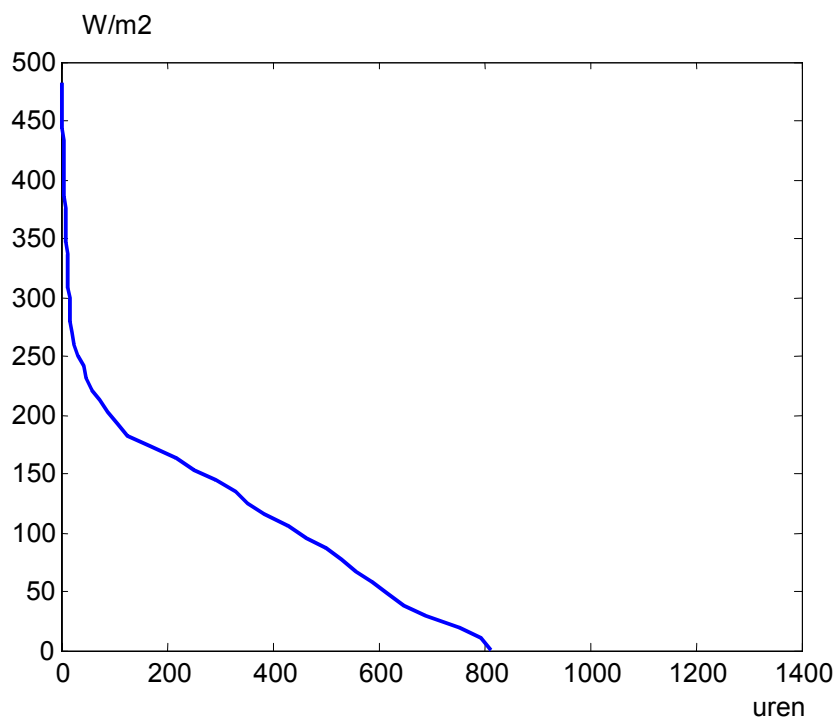
Naast lekken door het scharnier leidt het bevoeiingssysteem tot het inregenen van water door het spetteren van water dat bij een geopend raam van de voor-lijst afstroomt. Dit is echter een vrij geringe hoeveelheid. Bij raamstanden tot 20% is deze vorm van inregenen zeer beperkt. Wel zal deze vorm van inregenen een verhogend effect op de luchtvochtigheid hebben (maar wat ook weer een koelend effect heeft).

Het lekken van het scharnier is met een goede afrubbering te voorkomen en is ook opgelost in het ontwerp dat TNO voor de watervoerende bovenraamlijst ontwikkeld heeft (zie figuur 2-5 en 2-7). Het binnenspetterende water zou verminderd kunnen worden wanneer ruiten iets verder zouden doorsteken, maar zou ook opgelost kunnen worden door het bovenlijst-profiel zodanig te ontwerpen dat al bij raamstanden boven de 20% het water over slechts één dakvlak gaat lopen. Dit betekent overigens wel dat in dat geval het effectieve oppervlak vaak beperkt wordt (zie hoofdstuk 5).

4.2 Warmte-onttrekking

De overvloedige hoeveelheid koud water op het kasdek heeft een groot koelvermogen. In onderstaande figuur is de jaarbelastingduurkromme van het koelvermogen getoond. De installatie heeft ongeveer 800 uur gewerkt. Er zijn een aantal dagen verloren gegaan wegens aanpassingen aan de filterinstallatie en er zijn ook een paar dagen geweest waarin er problemen waren met de koud water voorziening.

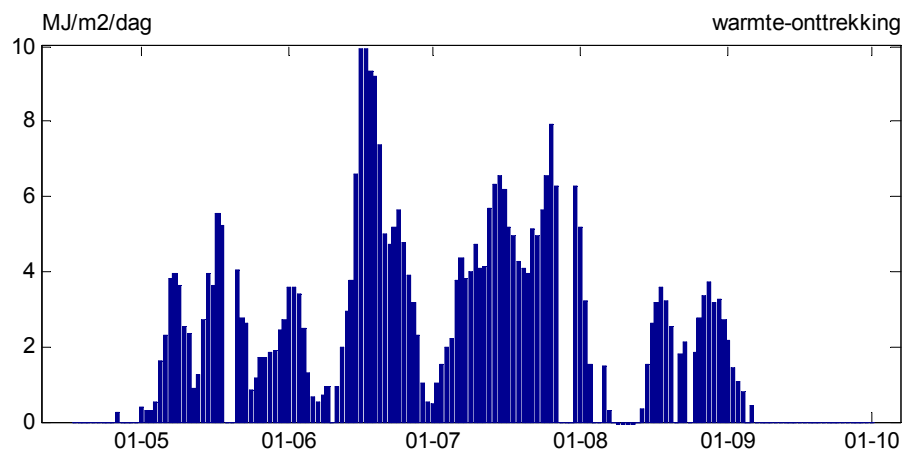
Het maximaal koelvermogen bedroeg zo'n 250 W/m^2 (enkele korte uitschieters, met name bij een inschakeling van het systeem buiten beschouwing gelaten).



Figuur 4-1 Koelvermogen

De dagelijkse warmte-onttrekking in de periode tussen 1 mei 2002 en 1 september 2002 is weergegeven in figuur 4-1.

Heel duidelijk in de grafiek zijn de twee hoge pieken op 17 en 18 juni. Dit waren de twee warmste dagen in 2002, waarin tropische temperaturen heersten.



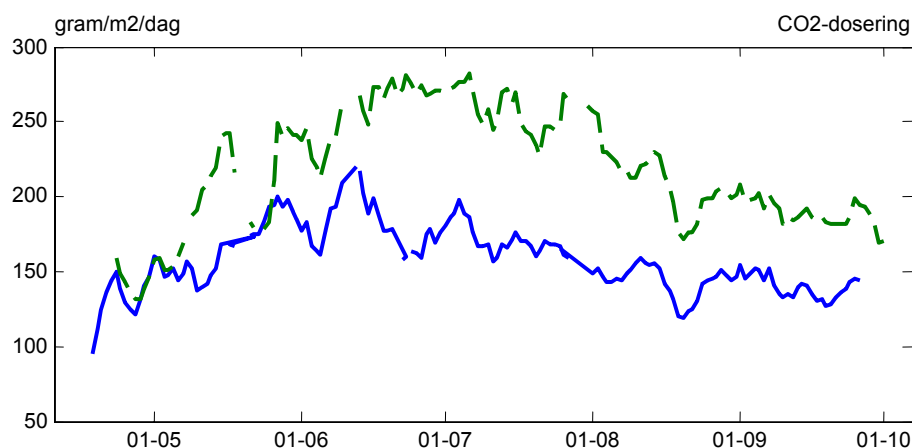
Figuur 4-2 Dagelijkse warmteonttrekking

De totale hoeveelheid warmte die in deze periode aan de kas is onttrokken bedroeg 410 MJ/m². Dit vertegenwoordigt ruim 13 m³ aardgas equivalenten.

De grafiek laat zien dat er een aantal perioden van een paar dagen zijn waarin de installatie niet gewerkt heeft (rond 20 mei, eind juli, de tweede week van augustus).

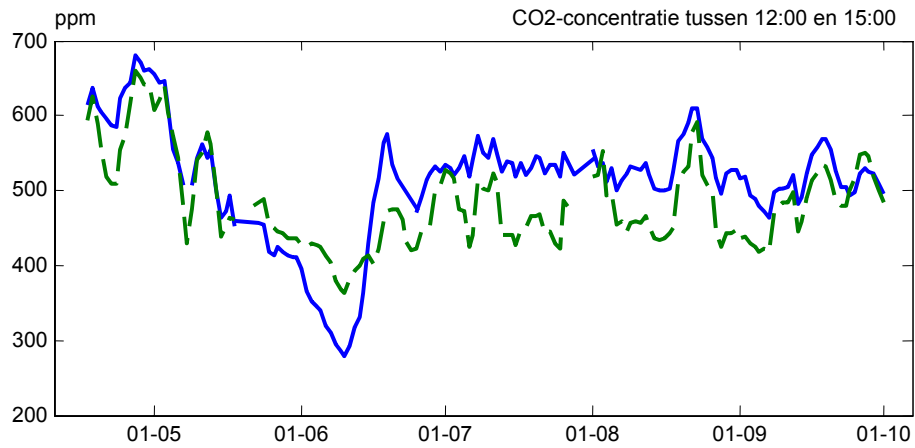
4.3 Effecten op CO₂-dosering en concentratie

In figuur 4-3 is de CO₂-dosering in de periode van 25 mei en 6 juni weergegeven. De grafiek laat zien dat de dosering in de gekoelde afdeling structureel lager lag dan in de niet gekoelde afdeling. Over de totale meetperiode is er in de afdeling met dekbevoeiing volgens de metingen 25 kg per m² gegeven en in de niet gekoelde afdeling 34 kg/m².



Figuur 4-3 CO₂-dosering in de afdeling met dekbevoeiing (getrokken) en in de referentieafdeling (gestreept).

De benutting van de CO₂ in de vorm van een hogere concentratie, en daarmee een hoger productie is in de afdeling met dekbevoeiing groter. Door het koelende effect van de dakbevoeiing gaan de ramen in deze afdeling later open dan in de referentieafdeling en blijft de CO₂-concentratie in de gekoelde afdeling hoger. In figuur 4-2 is het verschil in CO₂-concentratie weergegeven in de vorm van de gerealiseerde concentratie per dag tussen 12:00 en 15:00, dus op het warmste en lichtrijkste deel van de dag.



Figuur 4-4 CO₂-concentratie in afdeling met dekbevoeiing (getrokken) en in de referentieafdeling (gestreept).

4.4 Productie

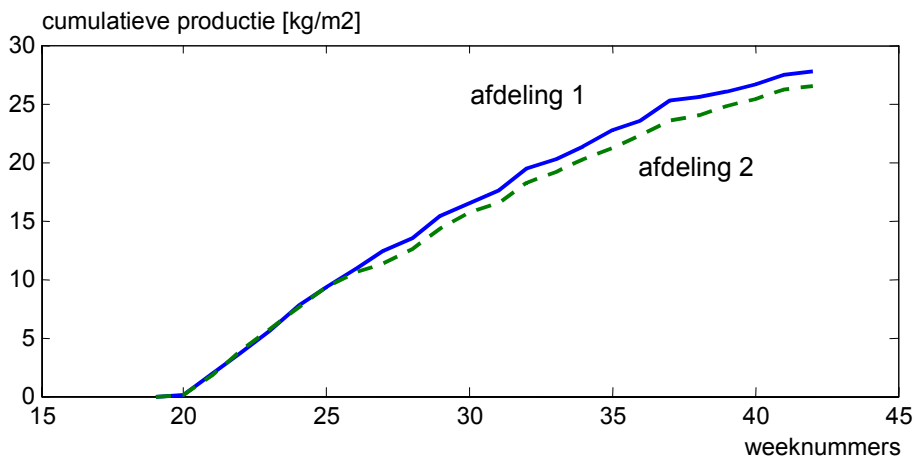
In onderstaande tabel zijn de oogstgegevens per week weergegeven.

Tabel 3.1 Oogstresultaten in kg per m² in de situatie met dekbevloeiing (afdeling 1) en zonder dekbevloeiing (afdeling 2).

	Met dekbevloeiing			Referentie afdeling		
	goede kwaliteit	slechte kwaliteit	totaal	goede kwaliteit	slechte kwaliteit	totaal
20	0.126	0.000	0.126	0.062	0.000	0.062
21	1.723	0.032	1.755	1.667	0.022	1.689
22	1.804	0.025	1.829	2.054	0.023	2.077
23	1.804	0.083	1.887	1.843	0.029	1.873
24	1.969	0.103	2.073	1.829	0.028	1.858
25	1.512	0.092	1.604	1.647	0.020	1.667
26	1.479	0.178	1.657	1.256	0.031	1.286
27	1.361	0.085	1.446	0.737	0.079	0.816
28	1.146	0.049	1.196	1.233	0.042	1.275
29	1.611	0.175	1.786	1.729	0.025	1.754
30	0.858	0.283	1.142	1.363	0.009	1.372
31	0.981	0.081	1.061	0.804	0.000	0.804
32	1.869	0.022	1.892	1.689	0.000	1.689
33	0.807	0.038	0.846	0.963	0.005	0.968
34	1.071	0.000	1.071	0.985	0.000	0.985
35	1.292	0.018	1.310	1.019	0.003	1.023
36	0.886	0.013	0.899	0.975	0.027	1.002
37	1.507	0.104	1.611	1.202	0.123	1.325
38	0.299	0.005	0.304	0.421	0.006	0.427
39	0.464	0.000	0.464	0.731	0.009	0.741
40	0.633	0.025	0.658	0.624	0.013	0.637
41	0.721	0.017	0.738	0.882	0.007	0.889
42	0.301	0.009	0.310	0.279	0.000	0.279
totaal	26.23	1.44	27.66	26.00	0.50	26.50

De productie van goede kwaliteit tomaten is in beide afdelingen praktisch gelijk. De totale biomassa productie is in de afdeling waar de bevloeiing is toegepast echter duidelijk hoger. Helaas kon in dit experiment die extra productie niet in extra verkoopbaar product worden omgezet. Er is veel verloren gegaan door neusrot. Volgens de teeltbegeleider is de neusrot vooral ontstaan door problemen met de luchtvochtigheid aan het begin van de teelt. De regeling van de raamstand op luchtvochtigheid is toen aangepast waardoor het neusrot-probleem is verminderd, dat wil zeggen, niet groter dan in de referentieafdeling.

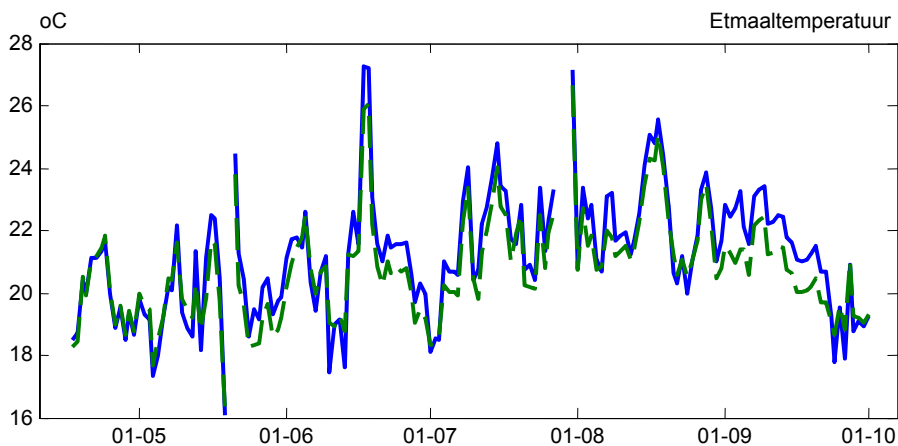
In figuur 4-5 is de cumulatieve totale productie getoond. De afdeling met dekbevloeiing laat hier duidelijk de meerproductie zien. Dit is dus de product van goede en ondermaatse kwaliteit bij elkaar.



Figuur 4-5 Cumulatieve productie (inclusief tweede kwaliteit) in de afdeling met dekbevloeiing (getrokken) en in de referentieafdeling (gestreept).

4.5 Kasklimaat

Tijdens de teelt is de luchttemperatuur en het vochtdeficit gemeten. In figuur 4-6 is de luchttemperatuur en in figuur 4-7 het vochtdeficit in de beide afdelingen weergegeven.



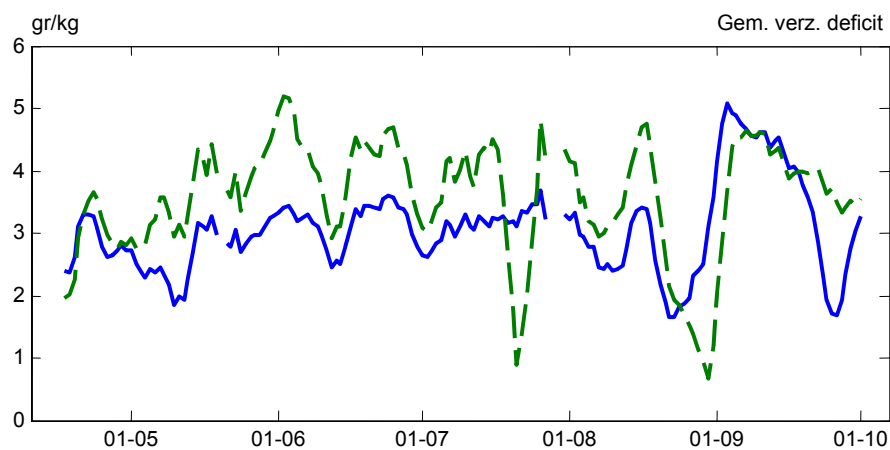
Figuur 4-6 Gemiddelde kasluchttemperatuur in de afdeling met dekbevloeiing (getrokken) en in de referentieafdeling (gestreept).

De figuur laat zien dat in de eerste weken van het experiment de temperaturen in beide afdelingen gelijk waren. Dit is ook te verwachten, aangezien de voor dit project geïmplementeerde kasklimaatregelaar er op was ingericht om de temperatuur in de gekoelde afdeling gelijk te houden aan die in de referentieafdeling.

Vanaf half mei laat de figuur echter zien dat de temperatuur in de gekoelde afdeling stelselmatig hoger ligt dan in de referentieafdeling. Dit komt omdat vanaf die tijd de klimaatregelaar een extra instelling heeft gekregen waarmee voor de temperatuur in de afdeling met dekbevloeiing een verhoging ten opzichte van de referentieafdeling kon worden ingesteld. Deze mogelijkheid is geïmplementeerd omdat begin mei bleek dat de stand van het gewas in de gekoelde afdeling minder optimaal was dan bij de referentie. Op grond van de

ervaring die toen op het PPO rond het onderzoek in de gesloten kas is gecommuniceerd, is dit toegeschreven aan de te lage temperatuur in de gekoelde afdeling in verhouding tot het daar aanwezige assimilaten aanbod. In het gesloten kasexperiment werden in die tijd namelijk ook veel hogere temperaturen aangehouden dan op dat moment in de gangbare tomatenteelt teneinde de sink-functie van het gewas in overeenstemming te brengen met de veel grotere source van assimilaten die voortkomt uit de hoge CO₂-concentratie. In de kas met het dakbevoeiingssysteem is de CO₂-concentratie lang niet zo hoog als in een gesloten kas, maar wel duidelijk hoger dan in een normaal geventileerde kas. Sinds deze verandering van de programmatuur is de balans in de gewasontwikkeling in de gekoelde afdeling gelijk komen te liggen aan die in de referentieafdeling. De ervaringen van het PPO, namelijk dat hogere CO₂-concentraties in het voorjaar en in de voorzomer vragen om hogere etmaaltemperaturen worden dus door de bevindingen in dit experiment onderschreven.

In de referentieafdeling is het verzadigingsdeficit (figuur 4-7) groter dan in de gekoelde afdeling (de kaslucht is in de referentieafdeling droger). Dit is het gevolg van de raamstanden die vaker open zijn om de temperatuur te handhaven.



Figuur 4-7 Gemiddeld verzadigingsdeficit in de gekoelde afdeling (getrokken) en in de referentieafdeling (gestreept).

4.6 Lichtdoorlatendheid

Naar aanleiding van de eerste experimenten met de toepassing van dekbevloeiing is geconcludeerd dat de bevloeiing van het kasdek leidde tot een verbetering van de lichtdoorlatendheid op de momenten dat de bevloeiing in werking was. Om dit te toetsen zijn in dit experiment in beide experimenten lichtmeters onder het kasdek geplaatst waarmee continu de lichttransmissie gemeten kon worden. In nevenstaande figuur is te zien hoe deze meter ter hoogte van de goot, midden onder de nok aan een van de stangen die voor het kruisverband in het dek zorgen is bevestigd.

De getoonde constructie is in beide afdelingen op dezelfde wijze aangebracht.



In het vorige experiment (Campen, 2002) is de indicatie afgegeven dat de lichttransmissie tijdens het gebruik van de bevloeiing gemiddeld hoger was dan op het moment dat de bevloeiing buiten werking was. Deze conclusie was gebaseerd op de vergelijking van de gemeten lichttransmissie op momenten dat de bevloeiing aan was met de lichttransmissie op momenten dat de bevloeiing uit was.

Deze zelfde benadering is toegepast in het voorliggende experiment en ook nu leek de lichttransmissie op momenten met dakbevloeiing gemiddeld groter dan op momenten zonder bevloeiing.

Echter, met het gegeven dat de bevloeiing vooral midden op de dag in werking was en de perioden zonder dekbevloeiing vooral aan de randen van de dagperiode liggen, moet geconstateerd worden dat de eerder gekozen berekeningswijze een vermenging oplevert van het effect van de dekbevloeiing en het effect van de zonstand op de lichttransmissie.

Inderdaad bleek dat de oorspronkelijk gehanteerde berekeningswijze niet alleen voor de bevoeide kas (afdeling1), maar ook voor de onbevoeide kas tot verschillen in gemeten lichttransmissie leidde. In de referentieafdeling kunnen de verschillen in lichttransmissie alleen aan het verschil in gemiddelde zonstand tijdens bevoeiingsuren en niet-bevoeiingsuren worden toegeschreven. Deze afdeling werd immers niet bevoeid.

Het gebruik van de gemiddelde transmissie tijdens bevoeiings- en niet-bevoeiingsuren als maat voor het effect van de bevloeiing op de lichttransmissie was daarmee gediskwalificeerd. Daarom is in een tweede berekenings-methode dankbaar gebruik gemaakt van het feit dat er door de hele meetperiode heen verschillende dagen zijn geweest waarop de dakbevloeiingsinstallatie niet heeft gewerkt. Hierdoor kon de gemiddelde berekende transmissie tussen 12:00 en 14:00 op dagen met bevloeiing worden vergeleken met de gemiddelde transmissie tussen 12:00 en 14:00 op dagen zonder bevloeiing.

Dit leidde tot de conclusie dat er geen significante invloed van de dekbevloeiing op de lichtdoorlatendheid geconstateerd kon worden.

5 Modelberekeningen

Inleiding

Teneinde de perspectieven van het dekbevoeiingssysteem in andere omstandigheden dan die zich tijdens de experimenten hebben voorgedaan te kunnen bepalen is een modelmatige uitwerking van het dekbevoeiingssysteem aan het kasklimaatmodel KASPRO toegevoegd. In dit hoofdstuk wordt eerst uiteengezet op welke wijze die uitbreiding tot stand is gebracht (§. 5.1).

Vervolgens wordt aan de hand van de vergelijking van de modelresultaten met de metingen een oordeel gegeven over de kwaliteit van het model. (§.5.2).

Met het bruikbaar gebleken model kan nu worden bepaald wat het perspectief is van het ontwikkelde systeem voor een gemiddeld Nederlands jaar en bij gebruik van enigszins aangepaste uitvoeringsvormen en regelbaar-instellingen van het bevoeiingssysteem (§ 5.3). In § 5.4 worden conclusies getrokken ten aanzien van het energiebesparingspotentieel.

5.1 Modelaanpassing

Het tot nu toe door A&F gebruikte kasklimaatmodel KASPRO kent één dektemperatuur. Aan de hand van deze temperatuur wordt het stralingsverlies naar de hemel en het convectieve verlies naar de buitenlucht berekend. Aan de energie-input kant wordt het kasdek opgewarmd door de warmtestroom vanuit de kaslucht en de stralingsuitwisseling tussen het gewas, de buizen en de vloer. Ook de condensatie van vocht tegen het kasdek wordt in het model meegenomen.

Wanneer het dek bevoeid wordt, ontstaat er een extra warmte-onttrekkende energiestroom aan de buitenkant van het dek (door de opwarming van het koude water dat er op stroomt). Daarnaast kan dit natte oppervlak water verdampen, maar er kan ook vocht uit de buitenlucht op het koude wateroppervlak condenseren. Het eerste proces vindt plaats als de buitenlucht zeer droog is (schraal zomerweer bij oostenwind). Het tweede proces vindt plaats als de buitenlucht warm en vochtig is (drukkend zomerweer).

De uitbreiding van het simulatiemodel omvat dus het toevoegen van een warmte-onttrekkende energiestroom aan het kasdek en implementeren van de verdampings/ en condensatie eigenschappen.

Daarnaast moet in het simulatiemodel rekening gehouden worden met het feit dat bij gebruik van een bevoeiingssysteem niet altijd het hele kasdek bevoeid wordt. Gedeeltelijke bevoeiing vindt plaats wanneer luchtramen in een scheppende stand staan, waardoor water over de nok naar de andere kant stroomt, en wanneer de bevoeiing het water niet bovenop de nok, maar ergens halverwege het kasdek spuit. Dit laatste is aan de orde gesteld in § 4.1.2.

Beide aanpassingen aan het model zijn geïmplementeerd door niet langer één dektemperatuur te berekenen maar de temperatuur van een droog dek (origineel) en een bevoeid dek (nieuw). Tijdens de simulatie wordt continu bepaald hoeveel procent van het dek nat en hoeveel procent droog is. Alle warmte-uitwisselings en verdampings- en condensatiestromen worden vervolgens naar rato berekend en verdisconteerd.

Nadat het water het kasdek heeft afgekoeld, en daarmee is opgewarmd, wordt het water in de goot nog wat naverwarmd. De goot is relatief goed geïsoleerd van de kas, waardoor de warmte-ontwikkeling in de goot geen invloed heeft op het kasklimaat, maar wel op de opwarming van het water. In een praktijkkas onderschept de goot bijna 4% van het zonlicht, wat bij een stralingsintensiteit van 500 W/m^2 (een warme zomerse dag) in de orde van 10% extra zonne-energie verzameling oplevert. Voor de experimentele kas, waar het water vanuit

3 nokken over 4 goten loopt en de goot niet alleen over de kasafdeling, maar ook over een brede corridor loopt, wordt zelfs 12% van het zonlicht via de goot aan het water toegevoerd^a.

Naast de modelmatige aanpassingen aan de wamte en vochtbalansen in het simulatiemodel is het model uitgebreid met een regelaar die het waterdebiet en de watertemperatuur van het bevoeiingswater regelt. De regeling begint met sproeien, op minimaal debiet, wanneer de kasluchttemperatuur boven het ventilatiesetpoint ligt. De temperatuur wordt daarbij zodanig geregeld dat het water met een temperatuur die niet onder de 17 °C ligt het dek af stroomt. Zolang het water niet warmer is dan deze temperatuur laat de regeling het water alleen circuleren, en wordt er dus geen warmte verzameld. Pas als het water warmer wordt opent de regeling de koudwater toevoer en zal er dus ook een warmwater overstort gaan stromen. Door deze beperking op de minimale afstromende temperatuur (in het model, maar net zo in het experiment) zal de dekbevoeiing op koude dagen (vroeg in het voorjaar) vaak niet gebruikt kunnen worden.

De keus om het water tot tenminste 17 °C op te doen warmen is ingegeven door de wens om het ondergronds energieopslagsysteem op te warmen naar 15 °C. Rekening houdend met een temperatuur verlies van 2 °C moet hiervoor dus water van tenminste 17 °C gebruikt worden (zie ook figuur 1-2 waar het temperatuurverlies over de warmtewisselaar wordt uitgelegd).

Naast de parameter die aangeeft met welke temperatuur het water van het dek af mag stromen is er ook een parameter die aangeeft wat de minimale temperatuur is waarmee het water op het dek gespreeid wordt en wat het maximale sproeidebiet is. Wanneer de situatie die in figuur 1-2 is afgebeeld zou worden gesimuleerd komt deze parameter op 10 °C. Het maximale debiet was in het experiment 25 liter/(m² uur).

5.2 Modelvalidatie

Met het bovenbeschreven aangepaste model zijn vergelijkingen gemaakt tussen het gemeten en het gesimuleerde gedrag. Omdat tijdens het experiment, met name in de maanden mei en juni, telkens situaties voorkwamen waarin de effectiviteit van het systeem werd beperkt door het dichtslibben van gaatjes zijn de detailvergelijkingen gebaseerd op een aantal aaneengesloten dagen, vlak na reiniging van het systeem.

Het dakbevoeiingsmodel wordt beoordeeld op de berekende warmte-onttrekking en de temperatuur waarmee het water van het dak afstroomt. Naast de omgevingscondities en het gewenste binnenklimaat is de temperatuur van het water in het koude voorraadvat aan het model opgelegd, en is dus vaak anders dan de 8 °C die hierboven genoemd is. Hiermee is het model dus reeds voorbereid op de situatie die zich in praktijksituaties voor zal doen, namelijk dat de temperatuur van het beschikbare koude water nogal kan schommelen en aan het eind van de zomer waarschijnlijk zal gaan oplopen omdat de voorraad koud water begint op te raken.

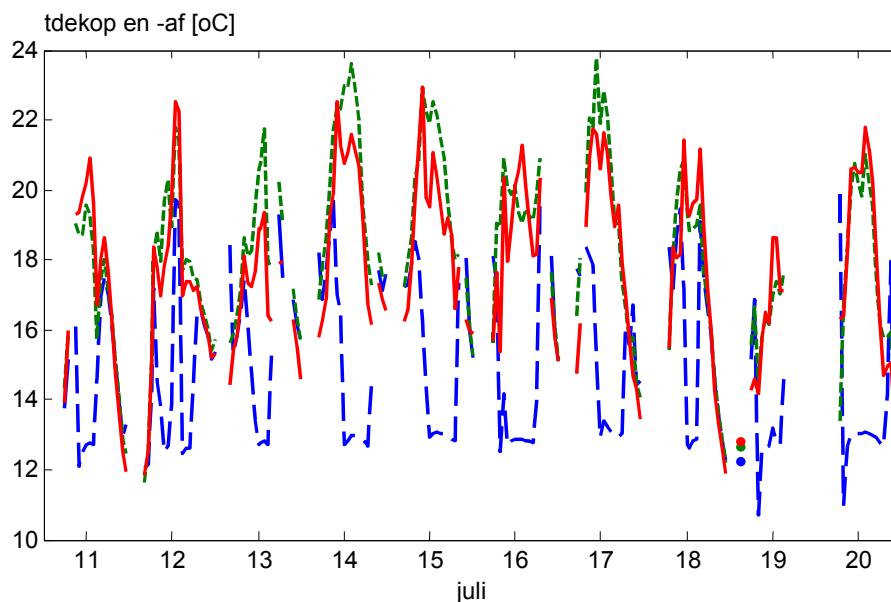
Figuur 5.1 laat het temperatuursverloop zien van de gemeten aanvoer en retourtemperatuur naar het kasdek (getrokken lijnen) en de gesimuleerde retourtemperatuur van het water dat van het dak afstroomt. De aanvoer en retourtemperaturen zijn alleen aangegeven voor die

^a Hier lijkt ten onrechte dat de goot een lichtonderschepping van 12% geeft. Het hoge percentage komt doordat er

1. relatief veel goten zijn (4 goten op 3 nokken in plaats van bijvoorbeeld 41 goten op 40 nokken in een praktijkkas)
 2. De totale gootlengte 26/18-de groter is dan het kasoppervlak.
 3. De gootbreedte 15 cm is in plaats van 10 cm wat voor moderne kassen is aangehouden
- Het gecombineerde effect van deze factoren levert een factor $\frac{4}{3} * \frac{26}{18} * \frac{15}{10} = 3$, waardoor voor de goot van de experimentele kas gerekend moet worden met een 12% lichtonderschepping in plaats van de 4% die voor een praktijkkas gebruikt moet worden.

perioden waarin er een waterdebiet was omdat bij stilstaand water de temperatuurmetingen (en simulaties) geen valide informatie geven.

Het simulatiemodel is uitgerust met een regelaar die op een vergelijkbare wijze als in het praktijkexperiment de watertemperatuur en waterdebiet regelt. In de berekeningen ten behoeve van de modelvalidatie wordt deze regelaar echter niet gebruikt maar worden debiet en aanvoertemperatuur zoals die in het experiment zijn gemeten aan het model opgelegd. Het precieze gedrag van de regelaar is namelijk zowel in het experiment als in het model een kwestie van programmeren. Hierbij is alleen checking en debugging aan de orde, wat uiteraard bij de ontwikkeling van de programmatuur heeft plaatsgevonden. Een vergelijking met metingen behoeft hiervoor niet te worden uitgevoerd. De validatie van het fysisch model kan echter uitsluitend op basis van de vergelijking van metingen met modelberekeningen plaatsvinden. Het onderstaande plaatje laat de vergelijking zien van de gemeten temperatuur die van het kasdek terugkomt (de temperatuur in de zwanenhals van figuur 3-5) en diezelfde grootte zoals die door het simulatiemodel wordt berekend. De gesimuleerde lijn is een resultante van de fysische beschrijving van straling, verdamping, convectie en condensatie.

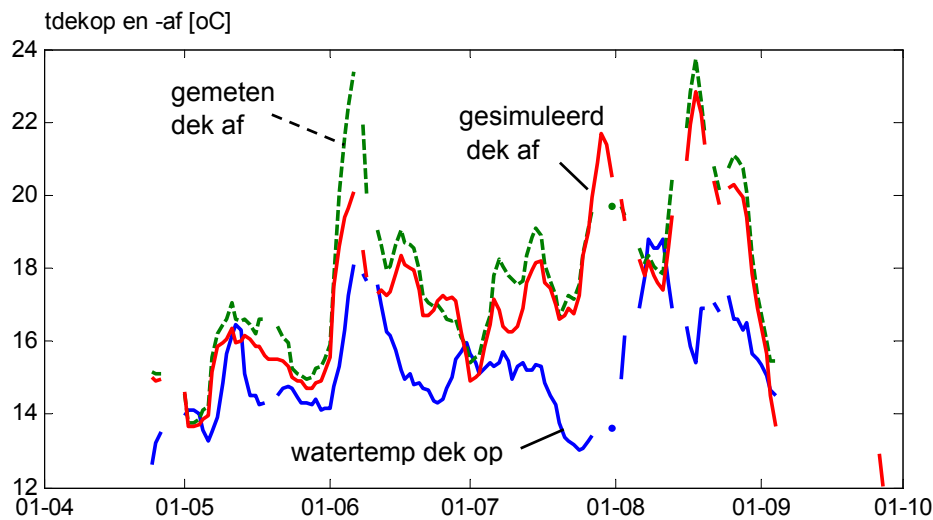


Figuur 5-1 Gesimuleerde en gemeten temperatuur van het water dat het dek af komt voor een aantal dagen in juli 2002. De temperatuur van het water dat het dak op wordt gespreid is aan het model opgelegd vanuit de metingen (blauw, breed gestreept). De gemeten temperatuur die van het dak af stroomt is groen (smal gestreept) en gesimuleerde rood (getrokken).

De figuur laat zien dat de gesimuleerde waarden meestal erg dicht rond de gemeten waarden liggen, hoewel er ook perioden zijn waarin de verschillen groter waren (maximaal 1 graad). In figuur 5-2 is een soortgelijke figuur gemaakt, maar dan over de gehele proefperiode. Om de grafiek gemakkelijk leesbaar te maken zijn de temperaturen tot daggemiddelden omgewerkt. Ook in deze figuur komen een aantal gaten voor, die ook hier veroorzaakt worden door problemen met de meetinstallatie en/of de hardware. Zo is begin augustus de waterbron van het IMAG defect geraakt, waardoor er een aantal dagen geen dakbevoeiing heeft kunnen plaatsvinden.

De figuur laat zien dat de gemiddelde aanvoertemperatuur vaak een stuk hoger is geweest dan de minimale temperatuur die beschikbaar was. In het begin van de dat was die zo'n 8 °C, maar gedurende de dag liep die op tot zo'n 12 °C.

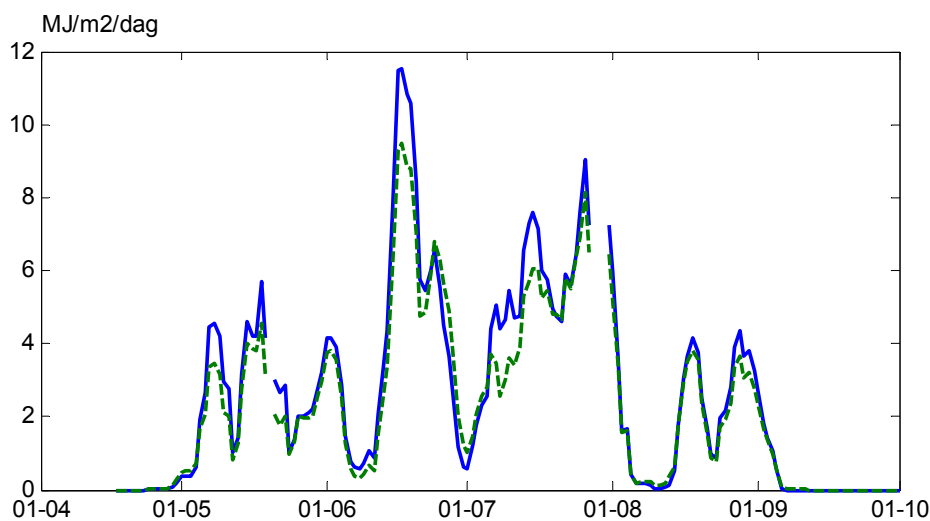
Blijkbaar was het bij het gekozen minimale waterdebiet de opwarming van het water vrij beperkt, waardoor de aanvoertemperatuur niet veel onder de gewenste retourtemperatuur van 17 °C geregeld kon worden.



Figuur 5-2 De gemeten temperatuur die het dek op wordt gestuurd en die ook in de simulatie als watertemperatuur wordt gebruikt waarmee het dak wordt bevoeid (blauw, getrokken) en de gemeten (groen, gestippeld) en gesimuleerde (rood, getrokken) temperatuur van het water dat van het dak af stroomt. De gaten in de lijnen worden veroorzaakt door dagen waarop er problemen waren met de installatie.

Uit het product van temperatuurverschil, bevoeiingsdebiet en soortelijke warmte van water kan het koelvermogen worden uitgerekend, en daarmee de hoeveelheid warmte die van het dek kan worden geoogst.

Figuur 5-3 toont de vergelijking van de gemeten en gesimuleerde warmte-onttrekking over de proefperiode. De gemeten totale hoeveelheid warmte die aan het kasdek werd onttrokken was 410 MJ/m² en de gesimuleerde warmteonttrekking was 407 MJ/m². Het simulatiemodel geeft dus gemiddeld een zeer goede overeenkomst met de meetresultaten.



Figuur 5-3 Gemeten (blauw, getrokken) en gesimuleerde (groen, gestreepte) dagelijkse warmte-onttrekking in het experiment.

Nu gebleken is dat het fysisch model rond het dakbevoeiingssysteem een goede beschrijving geeft van het koelingsproces kan het simulatiemodel, uitgerust met een zelfstandig regelsysteem voor temperatuur en debiet van het sproeisysteem worden gebruikt om andere situaties dan die zich in het experiment hebben voorgedaan door te rekenen. Hierop wordt ingegaan in de volgende paragraaf.

5.3 Jaarrondsimulaties voor praktijksituaties

Met het simulatiemodel KASPRO, waaraan het dakbevoeiingssysteem en de daarbij behorende regeling is toegevoegd, kunnen gevoeligheidsanalyses worden gemaakt, waarmee het effect van beschikbare watertemperatuur, maximaal debiet en de keus voor de minimale temperatuur waarmee het water dat het dek af mag stromen bepaald kan worden.

De belangrijkste effecten die veranderingen van deze variabelen opleveren betreffen

1. de hoeveelheid zonne-energie die verzameld wordt;
2. de hoeveelheid water die gedurende het koel-seizoen over het ondergrondse opslagsysteem moet worden verplaatst
3. het totale waterverlies van de kas
4. de gemiddelde kaslucht temperatuur
5. de invloed van het koelsysteem op de gewasproductie

Deze 5 aandachtsgebieden zullen in § 4.3.2 t/m 4.3.6. worden bestudeerd.

Om enige toelichting te kunnen geven op de wijze waarop de drie invloedsfactoren op het kassysteem ingrijpen wordt in § 4.3.1 voor één van de combinaties van aanvoertemperatuur, maximaal debiet en minimale retourtemperatuur een nadere analyse gepresenteerd.

5.3.1 Analyse van het effect van een dakbevoeiingssysteem op een praktijkkas

Zoals verderop in dit rapport zal worden beargumenteerd lijkt de toepassing van een dakbevoeiingssysteem met een waterdebiet van 5 liter/(m² uur) in de nabije toekomst een reële mogelijkheid. Dit is aanzienlijk lager dan de hoeveelheid water die in het kasexperiment is gebruikt (25 liter/(m² uur)), maar levert volgens het simulatiemodel desalniettemin nog een grote warmteverzamelingscapaciteit.

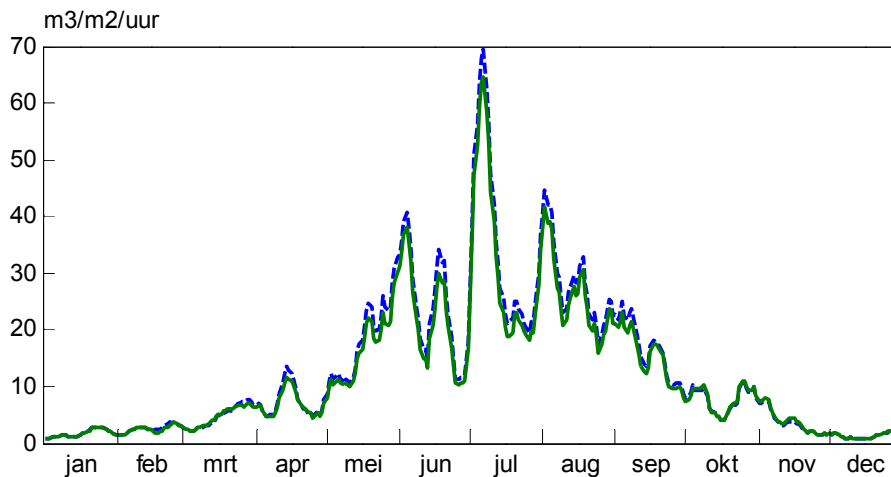
Wanneer het dakbevoeiingssysteem wordt beschouwd als methode om een ondergronds energieopslagsysteem dat in de winter is afgekoeld in de zomer weer te regenereren kan worden uitgegaan van de beschikbaarheid van een aanvoertemperatuur van 8 °C (de laagste temperatuur in de scenarioberekeningen van de volgende paragrafen).

De minimale temperatuur waarmee het water van het kasdek af mag stromen is in deze paragraaf ingesteld op 15 °C. Dit omdat uit de simulaties blijkt dat een lage tdekaf temperatuur positief inwerkt op CO₂-behoefte en warmteverzamelingscapaciteit en geen grote invloed heeft op de totale waterverplaatsing over het ondergrondse energie opslagsysteem.

Het aldus ingestelde dakbevoeiingssysteem is toegepast op een kas waarin tomaten worden geteeld. De uitgangspunten voor de gesimuleerde teelt zijn weergegeven in bijlage I.

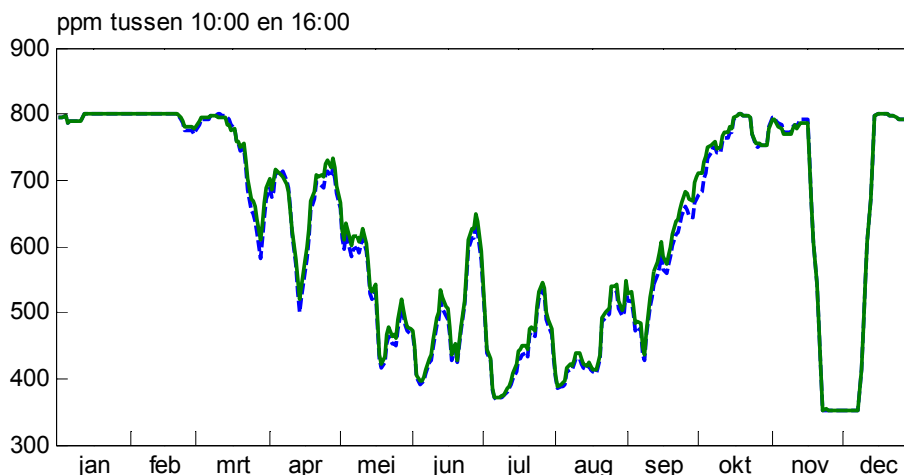
Het dakbevoeiingssysteem treedt in werking zodra het ventilatiesetpoint wordt overschreden, mits de kasdektemperatuur boven de 15 °C uitkomt.

In figuur 5-4 is het verschil in ventilatiedebiet tussen de standaard situatie (zonder dakbevoeiing) en de situatie met dakbevoeiing weergegeven.



Figuur 5-4 Brekend etmaalgemiddeld ventilatiedebiet in een standaard tomatenkas (blauw, gestreept) en in een kas met dezelfde klimaatinstellingen, maar voorzien van een dakbevoeiingssysteem (groen, getrokken)

De grafiek laat zien dat in de warme periode van het jaar een beperkte afname van het ventilatiedebiet optreedt. Deze afname van het ventilatiedebiet leidt tot een kleine verhoging van de CO₂-concentratie, wat te zien is in figuur 5-5.

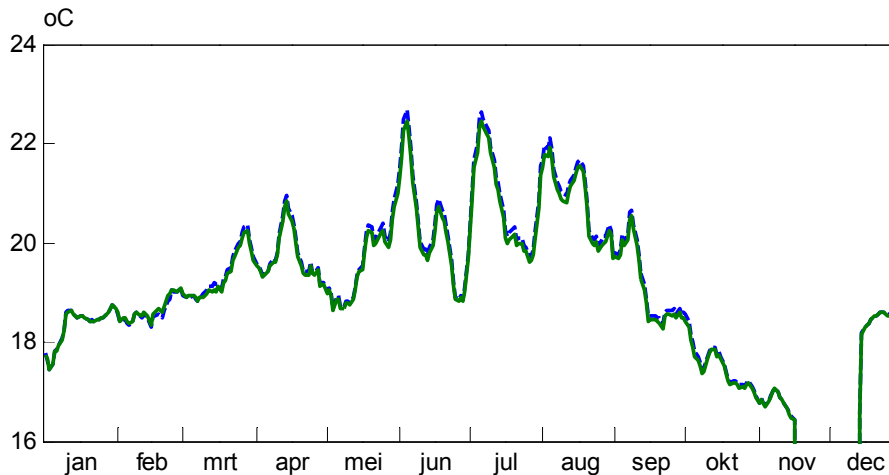


Figuur 5-5 Berekende CO₂-concentratie tussen 10:00 en 16:00 in de gesimuleerde een standaard tomatenkas (blauw, gestreept) en in een kas met dezelfde klimaatinstellingen, maar voorzien van een dakbevoeiingssysteem (groen, getrokken)

Omdat in de berekeningen is uitgegaan van het gebruik van ketelrookgassen als CO₂-bron is de totale hoeveelheid CO₂ die gedoseerd wordt gelijk gebleven. Gezien het feit dat de concentratie desalniettemin enigszins toeneemt kan evenwel worden gesteld dat de benuttingsefficiëntie van de gedoseerde CO₂ is toegenomen. Het simulatiemodel geeft aan dat de gewasproductie hierdoor met zo'n 1.5% toeneemt.

De gemiddelde kasluchttemperatuur wordt slechts weinig verlaagd. Dit is ook logisch gezien de klimaatregelaar, die de dakbevoeiing vooral behandelt als een systeem 'in plaats van ventilatie' en niet als een systeem 'additioneel aan de ventilatie'. Alleen op momenten waarop de standaardkas de ramen volop open heeft geeft de dakbevoeiing wat extra koeling. Dit is goed te zien in figuur 5-6.

Op de warmste dagen (begin juni) ligt de etmaaltemperatuur in de gekoelde afdeling maximaal 0.3 graad lager, maar door de bank genomen is de luchttemperatuur in de kas met dakbevoeiing gelijk. In de periode mei t/m september is de gemiddelde temperatuur in de standaardkas 21°C en in de kas met dakbevoeiing 20.8 °C.



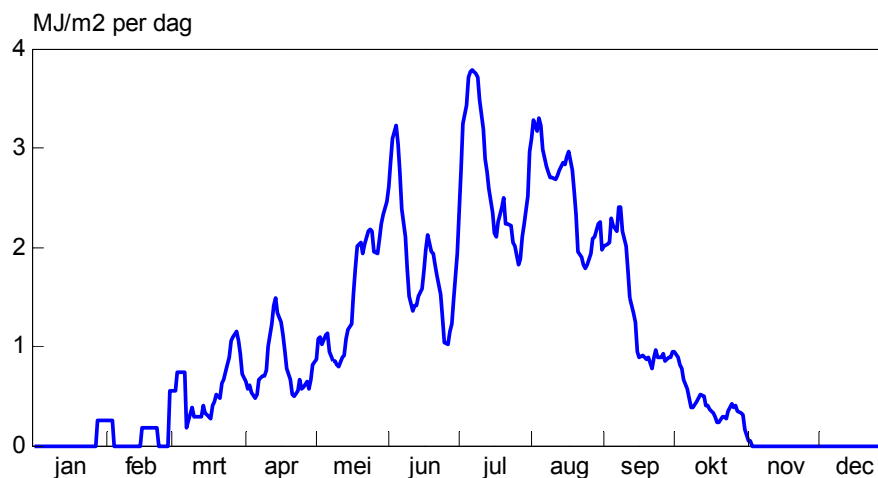
Figuur 5-6 Etmaaltemperatuur in de gesimuleerde standaard tomatenkas (blauw, gestreept) en in een kas met dezelfde klimaatinstellingen, maar voorzien van een dakbevoeiingssysteem (groen, getrokken)

Door de dekhoeling en de verminderde ventilatie verdampt het gewas 30 liter/(m² jaar) minder. Ten opzichte van de totale verdamping is dit ruim 5%.

Door het lage waterdebiet verliest het dekbevoeiingssysteem echter ook een aanzienlijke hoeveelheid water. Het simulatiemodel berekent dat er 75 liter per m² per jaar van het dekkoppervlak verdampt. Dit is ongeveer 1% van de totale hoeveelheid water die op het dek gespoten wordt (ruim 7 m³ per m² per jaar).

Desalniettemin moet geconstateerd worden dat het waterverbruik van de kas zoals die in deze berekeningen gesimuleerd wordt met ongeveer 7% toeneemt.

Vanuit het oogpunt van energiebesparing en de inzet van duurzame energie is het natuurlijk van groot belang om te weten hoeveel warmte met het dakbevoeiingssysteem kan worden verzameld. In figuur 5-6 is de dagelijkse warmte-onttrekking aan de kas weergegeven.



Figuur 5-7 Dagelijkse warmteonttrekking middels het dakbevoeiingssysteem.

De totale warmteonttrekking is $275 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \text{ jaar})$. Dit komt overeen met 9 m^3 aardgas equivalenten, welke bespaard kunnen worden wanneer deze warmte in de winter wordt gebruikt middels een warmtepomp. Deze warmtepomp zal daartoe een dekkingsgraad van ongeveer 35% van de warmtevraag van de kas moeten realiseren.

Het primaire energieverbruik van de pompen die water over de aquifer en over het dek moeten verplaatsen is berekend op 1 m^3 a.e. (zie § 5.4). Het netto energiebesparingpotentieel is dus $9 - 1 = 8 \text{ m}^3$ aardgas per m^2 per jaar.

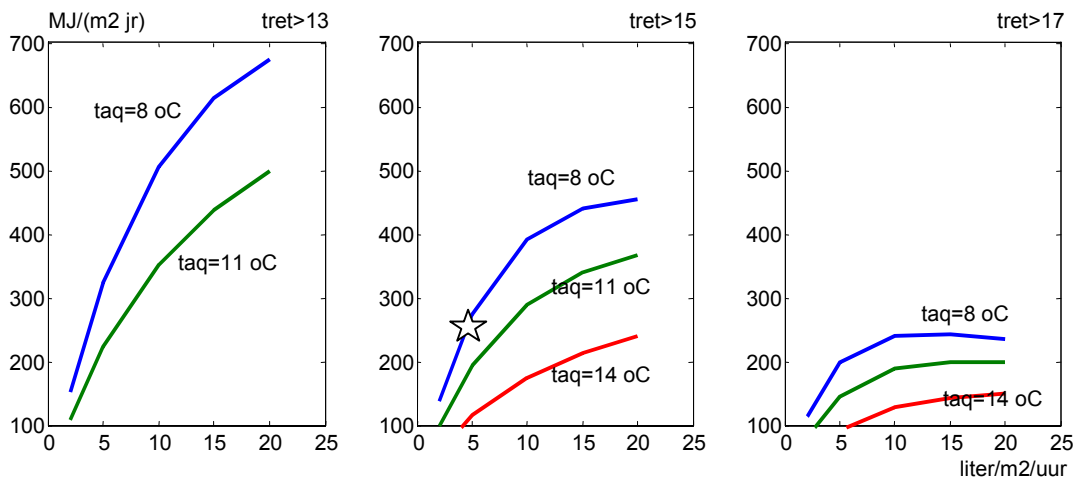
De gemiddelde watertemperatuur van het water dat van het dak af stroomt (gewogen naar het debiet) is $18 \text{ }^\circ\text{C}$, en daarmee dus duidelijk hoger dan de minimaal ingestelde temperatuur van $15 \text{ }^\circ\text{C}$. Het totale watervolume dat voor de opslag van de verzamelde warmte moet zorgen kan eenvoudig worden uitgerekend uit $275/((18 - 8) * 4.18) = 6.6 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ kasoppervlak})$. Hierbij is geen rekening gehouden met het gebruik van een etmaalbuffer die overdag via het kasdek wordt opgewarmd en 's nachts via de warmtepomp weer wordt afgekoeld. Het is echter nog maar de vraag of het wenselijk is om ook in de warmere periode van het jaar gebruik te maken van de warmtepomp. Immers, in dat geval komt de beschikbaarheid van rookgas CO_2 ernstig in het gedrang.

5.3.2 Zonne-energie verzameling als functie van debiet en retourtemperatuur

Het totale warmte-overschot van een Nederlandse tuinbouwkas waarin tomaten worden geteeld is ongeveer 1800 MJ/(m² jaar). Een dekbevoeiingssysteem zal echter slechts een deel daarvan kunnen onttrekken. De onttrekkingscapaciteit wordt namelijk beperkt door een aantal zaken. In de eerste plaats kan het water dat het dek afstroomt niet warmer zijn dan de temperatuur van het kasdek. In het voorjaar is dit kasdek ook bij hoge zonstralings-intensiteiten en een warme kas vrij koud omdat de buitentemperaturen laag zijn. Zeker wanneer een grote opwarming van het water gewenst wordt (dus $T_{ret} > 17\text{ °C}$) zullen er in het voorjaar veel momenten zijn waarop de kas moet ventileren om warmte af te voeren in plaats van het dekbevoeiingssysteem te gebruiken.

De capaciteitsbeperkingen door het beperkte debiet en door de beperkte minimale temperatuur van het water dat op het dak kan worden gespoten laten zich vooral in de zomer gelden. Bij lage debieten en/of hoge temperaturen van de koude put in het doublet kan het kasdek niet zo koud worden gehouden en is de warmte-overdracht van kaslucht naar kasdek en de waterfilm daarbovenop beperkt.

In onderstaande figuur wordt de invloed van de drie genoemde variabelen getoond.



Figuur 5-8 Totale warmteonttrekking middels het dakbevoeiingssysteem als functie van de drie belangrijkste ontwerpparameters (het sproeidebiet op de x-assen, de minimale temperatuur van het water middels de drie lijnen en de keus voor de retourtemperatuur in de drie grafieken)
Op de y-as staat overal de hoeveelheid zonne-energie die verzameld kan worden. De set instellingen die in de vorige paragraaf nader is geanalyseerd is in de middelste grafiek met een ster gemarkeerd.

In de meest linkse figuur ontbreekt de curve voor de aquifertemperatuur van 14 °C. Dit is namelijk een onmogelijke combinatie aangezien de instellingen van de regelaar bij de meest linkse figuur streeft naar een retourtemperatuur van 13 °C. Uitgaande van een aquifertemperatuur van 14 °C zou dit een afkoeling van het water in plaats van een opwarming betekenen, wat uiteraard niet de bedoeling is

De figuren laten duidelijk zien dat de keus voor de minimale watertemperatuur waarmee het water van het dak af mag stromen sterk bepalend is voor de warmte-onttrekkingcapaciteit. Dat er in het praktijkexperiment voor 17 °C als retourtemperatuur is gekozen had zijn achtergrond in de benuttingsgraad van de aquifer als opslagmedium. Hierop wordt in paragraaf 4.3.3 verder ingegaan. In ieder geval kan geconcludeerd worden dat deze keus achteraf niet verstandig is geweest. Immers, een dergelijk hoge eis aan de retourtemperatuur

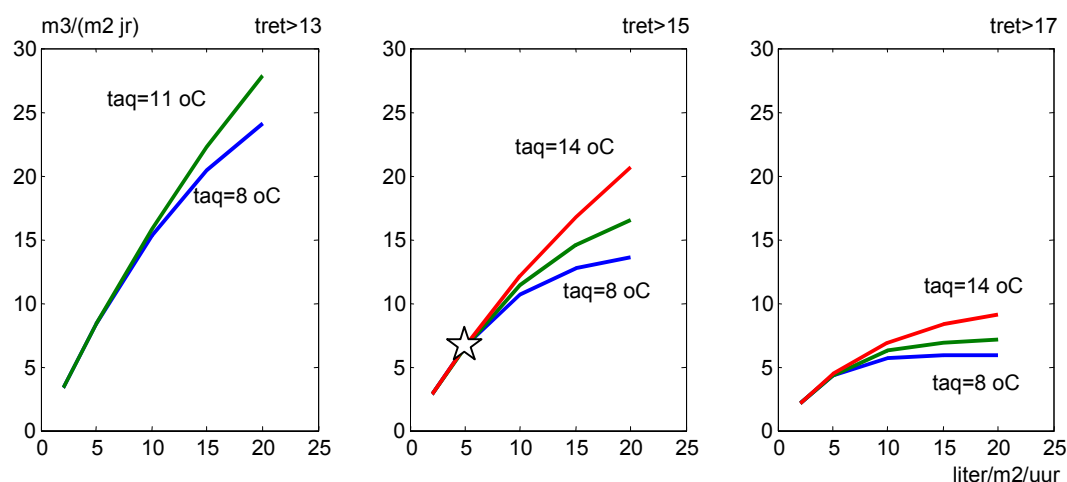
van het water dat van dak stroomt geeft een forse beperking van de zonne-oogst capaciteit. Het feit dat in de metingen een aanmerkelijk hogere warmteonttrekking is gerealiseerd dan de bovenste curve in de meest rechtse grafiek van figuur 5-8 doet vermoeden komt doordat de kasklimaatregelaar ondanks de gewenste temperatuur van 17 °C toch vaak lagere retourtemperaturen opleverde (zie figuur 5-2) en doordat de experimentele kas aanzienlijk meer goot-oppervlak heeft dan een praktijk-kas (zie § 4.1).

Het feit dat een aantal curven een maximum hebben en vervolgens weer afnemen komt doordat er in alle berekeningen vanuit is gegaan dat het minimale debiet niet kleiner kan zijn dan de helft van het maximale debiet. Hierdoor kan de keus voor een hoog maximaal debiet een nadeel worden.

De belangrijkste reden voor de toename van het perspectief voor een systeem dat lagere afstroomtemperaturen accepteert is de toename van het aantal uren waarop de installatie ingezet kan worden. Zo is het systeem 2000 uur in werking bij een stopcriterium van 13 °C, 1800 uur als de installatie in werking is zolang de afstromende temperatuur boven de 15 °C blijft en 1600 uur in werking als het water met een temperatuur die niet lager dan 17 °C is van het dak mag afstromen.

5.3.3 Waterverplaatsing als functie van debiet en retourtemperatuur

De totale waterverplaatsing over de aquifer wordt bepaald door de warmte-onttrekking middels het dakbevoeiingssysteem en het temperatuurverschil tussen warme en koude put. Een groot temperatuur-verschil zal de waterverplaatsing doen afnemen, evenals een kleinere warmte-onttrekking. Deze algemene tendensen zijn goed waarneembaar in de onderstaande drie grafieken.



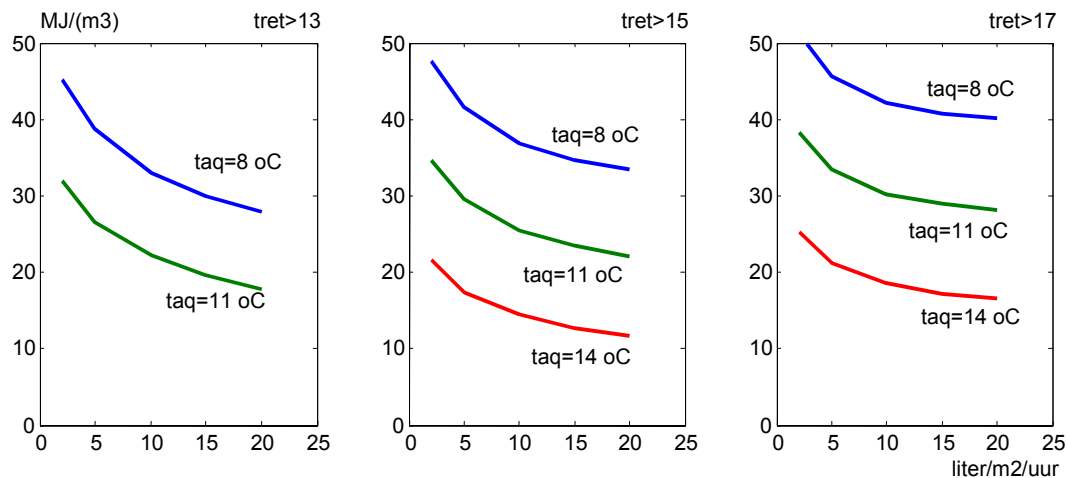
Figuur 5-9 Totale waterverplaatsing van de koude naar de warme put van het aquiferdoublet als functie van de drie belangrijkste ontwerpparameters van het dakbevoeiingssysteem.

Het sproeidebiet staat op de x-assen, de minimale temperatuur van het water is middels de drie lijnen weergegeven en de keus voor de retourtemperatuur is via de drie subgrafieken weergegeven.

De set instellingen die in de vorige paragraaf nader is geanalyseerd is in de middelste grafiek met een ster gemarkeerd..

In een praktijksituatie is het maximale opslagvolume wat onder een tuinbouwkas kan worden geëxploiteerd zonder burens noemenswaardig te hinderen tussen de 10 en 20 m³/m².

In combinatie met de gegevens over de verzamelde zonnewarmte kan de benuttings-efficiëntie van de aquifer worden berekend in MJ/m³. Een hoge benuttingsefficiëntie is gunstig omdat het heen en weer pompen van water energie kost.



Figuur 5-10 Benuttings-efficiëntie van het energieopslagsysteem als functie van de drie belangrijkste ontwerpparameters van het dakbevoeiingssysteem.

In figuur 5-10 komt duidelijk naar voren dat een koudere aquifer de benuttings-efficiëntie van het opslagsysteem doet toenemen net als een hoger gekozen minimale temperatuur van het water dat het kasdek afstroomt (de curven schuiven naar de rechterbovenhoek). Verder laten de grafieken een afname van de benuttings-efficiëntie van het opslagsysteem zien bij oplopend maximaal debiet (het zijn allemaal dalende curven).

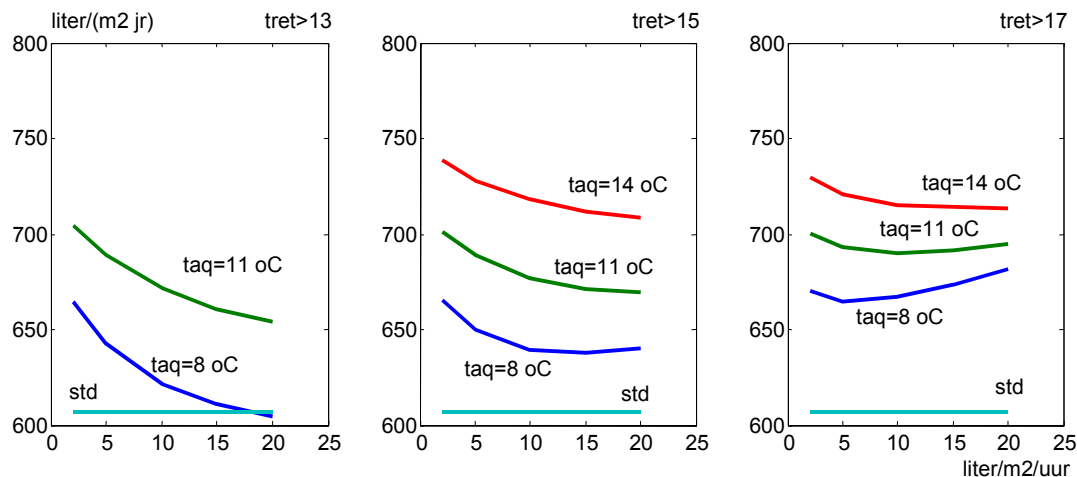
Bij vergelijking van figuur 5-10 met figuur 5-8 is het echter opvallend dat een toenemende efficiëntie meer dan evenredig ten koste gaat van de onttrekkingscapaciteit van het dakbevoeiingssysteem. Zo is de efficiëntie (de energieopslag per m³ water) in de rechter grafiek maar een beetje hoger dan in de linker grafiek, maar de warmte-onttrekking in de rechtergrafiek van figuur 5-8 is ongeveer de helft van die in de linker grafiek. Dit betekent dat het voor de warmteverzameling lonend is om geen hoge eisen te stellen aan de minimale temperatuur van het water dat van het dek af stroomt. Perioden met een wat lage retourtemperatuur worden namelijk later in de zomer goed gecompenseerd met hoge retourtemperaturen. Dit geldt zeker in geval met lage maximale waterdebieten wordt gewerkt (tussen 2 en 10 liter/(m² uur)).

5.3.4 Totaal waterverbruik van de kas als functie van debiet en retourtemperatuur

Een gekoelde kas kent een lagere gewasverdamping. Het versproeien van water op het kasdek zal echter leiden tot verdamping van water vanaf het dek. Bij een toenemend koelvermogen zal de gewasverdamping afnemen en bij een lagere gemiddelde temperatuur van het water op de kas zal de verdamping vanaf het dek afnemen.

Dit laatste kan worden gerealiseerd met een lagere minimale temperatuur van het afstromende water en met een vermindering van het maximale waterdebiet.

In onderstaande grafiek wordt het effect van de drie beïnvloedingsparameters op het totale waterverbruik van de kas in beeld gebracht.



Figuur 5-11 Totale waterverbruik van de kas (gewasverdamping + verdamping vanuit de waterfilm op het kasdek) als functie van de drie belangrijkste ontwerpparameters van het dakbevoeiingssysteem.

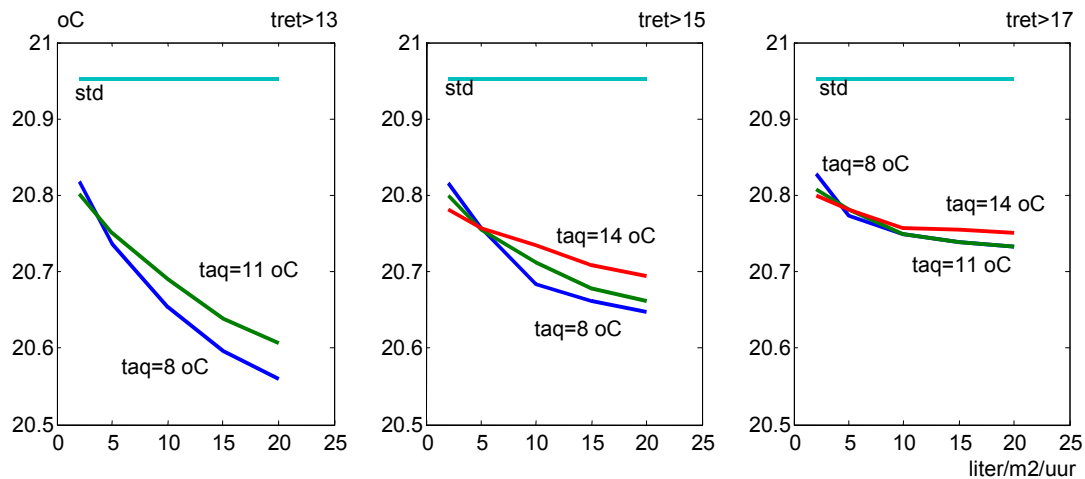
Het sproeidebiet staat op de x-assen, de minimale temperatuur van het water is middels de drie lijnen weergegeven en de keus voor de retourtemperatuur is via de drie subgrafieken weergegeven.

Het standaard waterverbruik van de kas zonder dekbevoeiing is middels de rechte lijn weergegeven.

Het maximale totale waterverbruik in de hier berekende cases is 730 liter per m² per jaar. Dit betekent dus een toename van het waterverbruik van de kas met ongeveer 20%. De simulaties waarin de grootste warmte-onttrekking wordt gerealiseerd leiden echter tot een totale verdamping die onder de standaard verdamping van de kas uitkomt (610 liter/(m² jaar)). Bij meer praktisch realiseerbare sproeidebieten van 2 tot 5 liter/(m² uur) zal het overall waterverbruik (afgenomen gewasverdamping + verdamping vanaf het kasdek) echter met zo'n 40 liter/(m² jaar) toenemen. Dit extra water zal net als het gietwater uit het regenwaterbassin worden betrokken. In droge zomers en/of bij een beperkte bassincapaciteit zal een eventueel tekort moeten worden aangevuld met leiding- of oppervlaktewater. Tenslotte laat figuur 5-11 zien dat ook vanwege het waterverbruik gekozen moet worden voor laag ingestelde minimale temperatuur van het water dat het dek af stroomt.

5.3.5 Etmaaltemperatuur als functie van debiet en retourtemperatuur

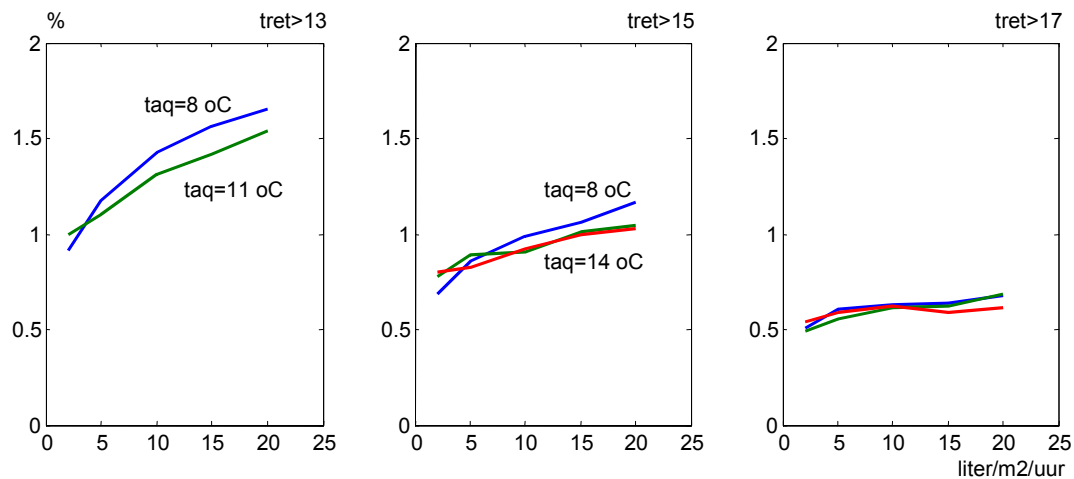
De vermindering van de gemiddelde etmaaltemperatuur was in de nader ge-analyseerde situatie gering. Ook figuur 5-12 toont een bescheiden effect. Ook hier blijkt weer uit dat het dakbevoeiingssysteem beoogt de ventilatie gedeeltelijk te vervangen en niet extra koelcapaciteit toe te voegen. Bij de maximale warmte-onttrekkingscapaciteiten daalt de gemiddelde kaslucht temperatuur immers slechts zo'n 0.2 °C.



Figuur 5-12 Gemiddelde kasluchttemperatuur tussen mei en september als functie van de drie belangrijkste ontwerpparameters van het dakbevoeiingssysteem. Het sproeidebiet staat op de x-assen, de minimale temperatuur van het water is middels de drie lijnen weergegeven en de keus voor de retourtemperatuur is via de drie subgrafieken weergegeven. De gemiddelde temperatuur in de standaard kas zonder dekbevoeiing is middels de rechte lijn weergegeven.

5.3.6 CO₂-opname van het gewas als functie van debiet en retourtemp.

Door de verminderde ventilatie zal de beperkte hoeveelheid CO₂ die in de rookgassen beschikbaar is beter benut kunnen worden. Dit leidt tot een hogere CO₂-concentratie en een hogere productie. Figuur 5-13 laat het procentuele effect dat het simulatiemodel voor de toename van de CO₂-opname door het gewas berekent zien. Doordat de gewasproductie vooral afhangt van de netto CO₂-opname (fotosynthese – groei-ademhaling) zal het procentuele effect van de verminderde ventilatie in termen van extra gewasproductie nog wat hoger liggen.



Figuur 5-13 Relatieve toename van de CO₂-opname van het gewas door de verbeterde benuttingsgraad van de beschikbare CO₂ als functie van de drie belangrijkste ontwerpparameters van het dakbevoeiingssysteem.

5.3.7 Conclusies uit de scenario-analyse

De belangrijkste conclusie die uit de vorige paragrafen naar voren komt is dat het voor vrijwel alle aspecten waarop een dakbevoeiingssysteem beoordeeld kan worden het oordeel beter uitpakt naarmate gekozen wordt voor een lagere instelling van de minimale temperatuur waarmee het water van het dak af mag stromen.

Het enige nadeel van een lage waarde voor de minimale afstroomtemperatuur is een wat verlaagde opslagefficiëntie van het aquiferdoublet. Wanneer echter om deze reden de keus voor de minimale temperatuur zou worden verhoogd loopt de zonne-energie verzamelingscapaciteit, plus de daarbij behorende voordelen, meer dan evenredig terug. Een tweede belangrijke conclusie is dat, indien gekozen wordt voor een lagere minimale afstroomtemperatuur, het sproeidebiet aanzienlijk lager gekozen kan worden dan in het praktijk-experiment is aangehouden. Bij gebruik van een in de tuinbouwpraktijk gebruikelijk sproeidebiet van rond de 2 liter/(m² uur) kan volgens het model zo'n 150 MJ/(m² jaar) aan zonne-energie worden verzameld, wat een tuinbouw bedrijf met behulp van een warmtepomp in staat zou stellen ongeveer 10% van zijn warmtevraag middels duurzame energie in te vullen.

Een verhoging van het sproeidebiet naar 5 liter/(m² uur) biedt volgens het simulatiemodel zicht op een warmteverzameling van zo'n 300 MJ/(m² uur). De dekkingsgraad van duurzame energie voor standaard tuinbouwbedrijven zou daarmee op waarden rond de 20% gebracht kunnen worden. Het is reëel om te veronderstellen dat een dergelijke verruiming van het sproeidebiet zonder al te grote aanpassingen aan de huidige daksproeiers gerealiseerd zou kunnen worden.

Tenslotte is het een belangrijke constatering dat het dakbevoeiingssysteem middels een verbeterde benutting van de beschikbare CO₂ tot een enigszins verhoogde productie kan leiden. Al met de reeds beschikbare sproeisystemen kan rond de 1,5% productietoename worden gerealiseerd.

De laatste belangrijke conclusie is dat het dakbevoeiingssysteem bij gebruik van een lage afstroomtemperatuur en een debiet van 5 tot 10 liter/(m² uur) tot een beperkte toename van het totale waterverbruik leidt (respectievelijk 6 tot 3%).

5.4 Energiebesparingspotentieel

In hoofdstuk 1 is uitgelegd dat bij gebruik van een gasmotor aangedreven warmtepomp en bij het uitgangspunt dat een ondergronds warmteopslagsysteem over de langere termijn in evenwicht moet zijn kan worden gesteld dat de hoeveelheid opgeslagen warmte gelijk is aan het primaire energiebesparingspotentieel. Hierbij is tevens genoemd dat een warmtepomp onder omstandigheden zoals die zich in de huidige tuinbouw voordoen, maximaal rond de 500 MJ/m² per jaar aan het opslagsysteem kan onttrekken.

De curven in figuur 5-8 zijn hiermee dus direct te vertalen in besparing op gasverbruik ten behoeve van de verwarming.

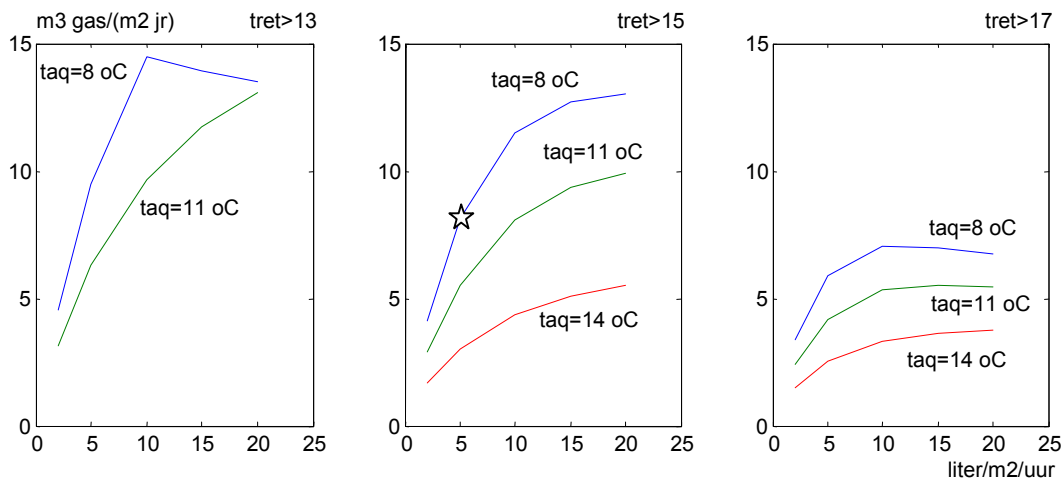
Om de overall primaire energiebesparing te berekenen moet echter het energieverbruik voor het verpompen van het water eveneens in beschouwing worden genomen en in mindering worden gebracht op de energiebesparing.

Voor het verpompen van water over het kasdek is uitgegaan van 0.8 MJ/m³. Dit geldt bij een drukval van 4 bar over het sproeisysteem en een pomp rendement (de omzetting van elektriciteit naar waterdruk) van 50%.

Voor het heen en weer pompen van water over het aquiferdoublet is uitgegaan van een energieverbruik van 0.6 MJ/m³. Dit is gesteld op grond van de 0.7 MJ/m³ die in het rapport "Onderlinge beïnvloeding van ondergrondse energieopslagsystemen voor tuinbouwkassen" (de Zwart, 2003) wordt genoemd voor een goed ontworpen systeem dat op volle capaciteit water oppompt. Dit getal is vervolgens enigszins verlaagd vanwege het feit dat het systeem vaak niet op maximale capaciteit zal werken (met name tijdens het benutten van de opgeslagen warmte in de winter).

Voor de omrekening van elektriciteitsverbruik naar primaire energie is een gemiddeld centralerendement van 43% gebruikt.

Bij gebruik van deze uitgangspunten worden de in figuur 5-15 getoonde energiebesparingspotenties berekend.



Figuur 5-14 Netto primaire energiebesparing door de toepassing van de verzamelde zonne-energie middels een warmtepomp in de winter als functie van de drie belangrijkste ontwerpparameters van het dakbevoeiingssysteem.

De case die in paragraaf 5.3.1. is uitgewerkt is met een ster gemarkeerd.

Zoals verwacht kon worden uit het verloop van de curven in figuur 5-8 leiden de systemen met een laag ingestelde minimumtemperatuur voor de temperatuur van het afstromende water en de laagste aquifertemperatuur tot het hoogste energiebesparingspotentieel. Een verruiming van het maximale sproeidebiet leidt in de meeste gevallen tot een vergroting van het besparingspotentieel maar boven de 10 liter/(m² uur) zijn de toenames beperkt. Het scherpe maximum in de linker grafieken komt voort uit het feit dat in de berekening is aangenomen dat grotere hoeveelheden koude dan 500 MJ niet nuttig gebruikt kunnen worden. De warmtevraag van de kas, en zeker dat deel dat met een warmtepomp kan worden ingevuld, is dan de beperkende factor.

De conclusie ten aanzien van het energiebesparingspotentieel is dat het dekbevoeiings-systeem de mogelijkheid biedt om een aquifer waaraan een warmtepomp in de winter 500 MJ warmte per m² kasoppervlak onttrekt te regenereren (16 m³ aardgas equivalenten). Na aftrek van het primaire energieverbruik dat met het verpompen van water gemoeid is blijft hiervan een netto energiebesparing over van maximaal 14 m³/(m² jr).

Dit kan worden gerealiseerd met een systeem dat 10 liter/(m² uur) op het dek sproeit met een temperatuur die kan zakken tot 8 °C, en waarbij de installatie wordt gebruikt zolang het sproeiwater met 13 °C of hoger van het dak af stroomt.

Ten overvloede wordt op deze plaats nog vermeld dat alle warmte die uit de aquifer wordt onttrokken afkomstig is van warmte-overschotten in de zomer en dus als duurzame energie kan worden aangemerkt.

6 Bedrijfseconomische beschouwing

Gezien het positieve perspectief van systemen die op de bestaande daksproei-systemen geënt zijn worden in dit hoofdstuk de kosten en opbrengsten van een dekbevoeiingssysteem doorgerekend, gecombineerd met een ondergronds energie-opslag systeem en een warmtepomp.

De berekeningen worden gemaakt voor 3 sproei-debietten, namelijk 2, 5 en 10 liter/(m² uur). Gezien de relatief gunstige perspectieven van de gasmotor aangedreven warmtepomp in vergelijking met de een elektrisch aangedreven warmtepomp of een absorptiewarmtepomp (zie rapport "De kas als Zonne-energie oogster", de Zwart & Swinkels, 2002) wordt de evaluatie alleen gemaakt voor dit type warmtepomp.

In tabel 6-1 worden de meerkosten en meeropbrengsten opgesomd van een kas met een dakbevoeiingssysteem bij de drie bovenbeschreven maximale sproeidebietten. De kosten voor het opslagsysteem zijn ontleend aan het rapport "Kostenberekeningsschema voor warmte- en koudeopslagsystemen ten behoeve van de inzet van warmtepompen in de Nederlandse glastuinbouw" (de Zwart en Knies, 2002).

De kosten voor de warmtepomp zijn ontleend aan het rapport "De kas als Zonne-energie oogster" (de Zwart & Swinkels, 2002), na eveneens vanuit dat rapport te hebben bepaald welk warmtepomp vermogen nodig is. Dit warmtepomp vermogen is zodanig gekozen dat de door de dakbevoeiing onttrokken warmte van respectievelijk 150, 300 en 500 MJ/(m² jaar) in de winter door de warmtepomp aan de aquifer wordt onttrokken. Volgens dit rapport is bij gebruik van een gasmotor aangedreven compressiewarmtepomp voor de onttrekking van 150 MJ een asvermogen van 2.3 W/m² nodig. Voor de onttrekking van 300 MJ is een asvermogen van 4.5 W/m² nodig. Een jaarlijkse warmte-onttrekking van 500 MJ kan worden gerealiseerd met asvermogen van 7.5 W/m².

De investerings- en jaarkosten voor deze warmtepompen zijn ontleend aan de Zwart en Pulles (2002), waarbij voor de warmtepomp een afschrijvingperiode van 10 jaar is gehanteerd en een rentepercentage over het geïnvesteerde kapitaal van 6% is gebruikt. De onderhoudskosten zijn op 1% van de investering gesteld.

De electriciteitskosten worden berekend uitgaande van een kWh-prijs van € 0.10 per kWh. De pompenergie is berekend volgens de stelregel dat het verpompen van water over een aquifer een energieverbruik van gemiddeld 0.6 MJ/m³ met zich meebrengt (zie ook § 5.4). De pomp die het water op het kasdek sproeit bij een werkdruk van 4 bar gebruikt 0.8 MJ/m³.

Tenslotte zijn ook kosten opgenomen voor het toegenomen waterverbruik. Deze zijn berekend, op basis van 1.10 euro per m³. Dit zijn de variabele kosten voor leidingwater en vormt dus een worst-case prijs omdat in de praktijk een deel van het extra waterverbruik aan het regenwaterbassin zal kunnen worden onttrokken.

Het rapport "De kas als Zonne-energie oogster" geeft ook een relatie voor de gasbesparing als functie van de hoeveelheid warmte die aan de aquifer wordt onttrokken, welke gelijk moet zijn aan de hoeveelheid warmte die in de zomer in het ondergrondse opslagsysteem wordt opgeslagen. Deze is voor een gasmotor aangedreven compressiewarmtepomp 0.032 m³ aardgas per MJ. De aldus berekende energiebesparing, vermenigvuldigd met de gasprijs, welke op € 0.18 per m³ is gesteld (prijspeil begin 2003) levert de energiekosten besparing. De inkomsten uit extra gewasproductie worden berekende door de relatieve productietoename te vermenigvuldigen met de gemiddelde productiewaarde (€ 40,- voor tomaat), maar hier nog een factor 0.72 op toe te passen om rekening te houden met het feit dat extra productie ook extra arbeids- en veilingkosten met zich meebrengt.

Hoewel er via de toepassing van een buffer wellicht enige vermindering van het benodigde maximale aquiferdebiet kan worden behaald wordt er in dit hoofdstuk voorsnog vanuit gegaan dat het maximale aquiferdebiet gelijk is aan het maximale sproeidebiet.

Alle investeringen zullen een zeker schaal-effect hebben. Aangezien de vooruitstrevende bedrijven een glasoppervlak hebben in de orde van 2 tot 4 ha zijn de investeringen en jaarkosten berekend voor een bedrijf van 3 ha.

Tabel 6-1 Uitgangspunten, kosten- en opbrengst-effecten van een kas (€/m² jaar) waarin tomaten worden geteeld en waarop een dakbevoeiingssysteem wordt aangelegd bij drie sproeidebieten.

	maximaal sproeidebiet		
	2 liter/(m ² uur)	5 liter/(m ² uur)	10 liter/(m ² uur)
Investeringsen			
dakbevoeiingsinstallatie	30000	60000	90000
aquiferdoublet	193800	367500	657000
warmtepomp	76600	130000	200000
totaal investeringen (3 ha)	300400	557500	947000
Kosten			
dakbevoeiingsinstallatie	0.10	0.20	0.30
aquiferdoublet (9% vd. invest.)	0.58	1.10	1.97
elektriciteit (aquifer + sproeisyst)	0.19	0.47	0.86
warmtepomp	0.36	0.61	0.93
extra water	0.06	0.04	0.02
totaal jaarkosten	1.29	2.42	4.08
Opbrengsten			
energiebesparing	0.89	1.87	2.94
productietoename	0.44	0.65	0.90
totaal jaarlijkse opbrengsten	1.33	2.52	3.84
Netto kosteneffect	0.04	0.10	-0.24

De tabel laat zien dat de systemen met een maximaal sproeidebiet van 2 en 5 liter/(m² uur) beide een positief bedrijfseconomisch resultaat opleveren.

De interne rentevoet (jaarlijks netto kosteneffect/investering) is echter erg laag (0.3 % bij 2 liter/(m² uur) en 0.4 % bij 5 liter/(m² uur)).

De belangrijkste investeringskosten, en (daarmee) de belangrijkste jaarkosten, worden gevormd door het ondergrondse energie-opslag systeem. Een investeringssubsidie in dit duurzame energiebesparings-systeem zou het perspectief dan ook op eenvoudige wijze sterk kunnen verbeteren.

De tabel laat ook zien dat de opbrengsten voor het grootste deel worden bepaald door de uitgespaarde gaskosten (rond de 70%). Een 10% verandering van de gasprijs leidt dus tot een 7% verandering van de opbrengsten. Zo leidt bijvoorbeeld een gasprijs van 20 ct per m³ tot een toename van de opbrengsten met 10 €ct voor het kleinste, en 20 €ct voor het 5 liter/(m² uur) systeem. De interne rentevoet wordt dan 1.3% en 1.6% respectievelijk.

7 Conclusies en aanbevelingen

Het onderzoeksproject naar de toepassingsmogelijkheden van het kasdek als zonne-energie verzamelaar door dit te besproeien met koud water op momenten dat de kas een warmteoverschot heeft duidelijk perspectief aangetoond. Er werd een substantiële hoeveelheid zonne-energie verzameld (meer dan 400 MJ/m²). Het CO₂-verbruik in de kas met dakbevloeiing lag aanmerkelijk lager (25 kg/m² in plaats van 35 kg/m²) en de productie in de kas met het dakbevloeiingssysteem lag hoger, hoewel dit door teelttechnische problemen in het begin van de teelt niet tot een groter verkoopbaar tomatenvolume leidde.

Voor de technische uitvoeringsvorm van het oorspronkelijk dakbevloeiingsconcept, waarbij waterdebieten tot 25 liter/(m² uur) werden toegediend, zijn door TNO een aantal uitgewerkte tekeningen opgesteld en op hun merites beoordeeld. De in het experiment aangebrachte uitvoeringsvorm was goed op bestaande kassen aan te brengen, maar gaf wel aanzienlijke verstoppingsproblemen. Voor kassen met enkelzijdige doorlopende nokluchting zouden deze problemen verholpen kunnen worden door gebruik te maken van beregeningssproeiers. Voor nieuwbouwsituaties zijn een tweetal goed reinigbare ontwerpen geschetst, waarvan verwacht mag worden dat deze niet gauw verstopt zullen raken en bovendien goed reinigbaar zijn.

De scenariostudie, die met het aan het uitgevoerde experiment gevalideerde simulatiemodel is uitgevoerd, laat echter zien dat bij een andere keus voor de minimale watertemperatuur waarmee het water van het dek af mag stromen (13 °C in plaats van 17 °C) veel grotere hoeveelheden warmte aan het dak kunnen worden onttrokken bij veel lagere debieten. Zo berekent het model dat met een debiet van 10 liter/(m² uur) rond de 500 MJ/(m² jaar) aan duurzame energie kan worden verzameld (16 m³). Bij een maximaal sproeidebiet van 5 liter/(m² uur) kan 300 MJ/(m² jaar) aan het kasdek worden onttrokken. Voor het debiet waarop gangbare daksproei-systemen die in de potplantenteelt worden gebruikt werken (2 liter/(m² uur) berekent het model een warmte-onttrekkingspotentieel van 150 MJ/m² (bijna 5 m³ a.e.).

De prijs voor de keus van de combinatie van een lager debiet met een lagere afstroomtemperatuur is een afname van de opslagefficiëntie (de warmte-opslag per m³ water in de aquifer). Er is ongeveer 25% meer aquiferruimte nodig per eenheid opgeslagen energie. Echter, gegeven het feit dat ook in dat geval de maximale wateropslagbehoefte niet hoger dan 10 tot 15 m³ water wordt, en deze opslagbehoefte in de belangrijkste tuinbouwgebieden gerealiseerd kan worden, weegt dit nadeel zeker niet op tegen de voordelen van een lagere minimale afstroomtemperatuur (namelijk een kleiner bemeten sproei installatie per hoeveelheid verzamelde warmte).

De belangrijkste reden voor het veel groter perspectief voor een systeem dat lagere afstroomtemperaturen accepteert is de grote toename van het aantal uren waarop de installatie ingezet kan worden. Wanneer aan de eis voor een afstroomtemperatuur van 17 °C wordt vastgehouden worden namelijk vele uren met een warmte-overschot (voorjaar en in de ochtend) uitgesloten voor zonne-energieverzameling.

De verlaging van het temperatuur criterium waaronder de installatie wordt uitgezet leidt tot een beperkte afname van de opslagefficiëntie als er tevens voor een laag sproeidebiet wordt gekozen. In dat geval wordt namelijk het kouder afstromende water in het voorjaar goed gecompenseerd doordat in warme perioden water met een hoge temperatuur (>20 °C) wordt verzameld.

Indien een laag-debiet systeem wordt gebruikt vermindert ook de benodigde capaciteit van het aquiferdoublet waardoor deze goedkoper zal zijn dan wanneer een hoog sproeidebiet wordt aangehouden. De bedrijfseconomische evaluatie van systemen met een debiet van 2 en 5 liter per m²/uur laten dan ook een voordelig saldo van respectievelijk € 0,04 tot € 0,10 per m² per jaar zien.

Het grootste deel van het positief saldo komt voort uit de vermindering van energiekosten. Bij een gasprijs van € 0.18 per m² is deze energiekostenbesparing respectievelijk € 0.89 en

€ 1.87 per m² per jaar. De berekende toename van de inkomsten uit extra productie is voor het systeem met een sproeidebiet van 2 liter/(m² uur) € 0,44 per m² per jaar. Voor het systeem met 5 liter/(m² uur) is dit € 0.60 per m² per jaar.

De belangrijkste kosten liggen in de aanleg van het opslagsysteem (ruim de 60%).

Aanbevelingen

Het in dit rapport vastgelegde onderzoek heeft laten zien dat de oorspronkelijk verwachtingen van het dakbevoeiingsconcept worden bevestigd, maar dat de perspectieven voor een relatief laag-debiet systeem beter zijn, zowel qua koelprestatie en zonne-energieverzamelingspotentieel als qua installatie-eenvoud en bedrijfseconomie.

Deze perspectieven worden echter geschetst door een simulatiemodel dat gevalideerd is (en geschikt bevonden) aan de metingen in een nogal afwijkend werkgebied. Zo werd de afstroomtemperatuur van het water in het experiment waarmee het model is gevalideerd op een 4 °C hoger niveau gehouden en was het sproeidebiet zo'n 5 keer hoger.

Gezien het feit dat de door het model berekende potenties voor een relatief laag-debiet dakbevoeiingssysteem de perspectieven voor het systeem dat in het afgelopen experiment is beproefd belangrijk doen verbeteren verdient het aanbeveling om ook bij dit lage debiet een praktijkexperiment uit te voeren.

Slotwoord

Op grond van tussentijdse rapportages in de uitvoering van voorliggend project is reeds een aanvang gemaakt met de realisatie van de aanbevelingen. In de zomer van 2003 is een experiment met een laag-debiet dekbevoeiingssysteem bij een praktijktuinder uitgevoerd. De eerste serie metingen uit dat project, en daarmee de validatie van het model bij een laag-debiet systeem, hebben tot een kleine maar belangrijke wijziging in de programmatuur geleid^b. De consequenties van deze wijziging zijn reeds in voorliggend rapport opgenomen zodat gesteld kan worden dat de scenario-studie is uitgevoerd met een model dat zowel voor een hoog-debiet als voor een laag-debiet systeem is gevalideerd.

De resultaten van het vervolgproject kunnen in het najaar van 2004 worden verwacht.

^b Het betrof de wijze waarop de extra opwarming van het water in de goot (zie § 5.1) in het model was opgenomen. In de oorspronkelijke versie van het model was geen rekening gehouden met warmteverliezen vanuit de goot. Deze bij een hoog-debiet systeem namelijk verwaarloosbaar. De grote waterstroom leidt tot een geringe opwarming zodat het water kouder blijft dan de omgevingslucht en er dus geen verlies optreedt .

Bij een kleiner debiet leidt een gegeven vermogensinput echter tot een evenredig grotere temperatuurstijging. Indien er dan geen verlies-term wordt opgenomen kan het water met een temperatuur van het dek afstromen die veel warmer is dan de buitenlucht. Het veronachtzamen van warmteverlies uit de goot leidt dan tot een serieuze overschatting de hoeveelheid energie die van het dak kan worden verzameld.

8 Literatuur

Campen., J.B, H.F. de Zwart, N.J. van de Braak, H.D.M. Kool, E.G.O.N. Janssen, 2001, Koeling en Ontvochtiging in de Floriadekas, IMAG rapport 2001-102

Zwart, H.F. de en G.L.A.M. Swinkels, 2002, De kas als zonne-energie oogster, IMAG rapport 2002-04.

Zwart H.F. de, C.J.A. Pulles, D. Waaijenberg en H. Loeffen, 2002, Detail engineering voor een waterbak gekoelde kas, IMAG Nota 2002-29

Zwart, H.F. de en P. Knies, 2002, Kostenberekeningsschema voor warmte- en koudeopslagssystemen ten behoeve van de inzet van warmtepompen in de Nederlandse glastuinbouw, IMAG rapport 2002-65.

Zwart, H.F. de en R. Van Elswijk, 2003, Onderlinge beïnvloeding van ondergrondse energieopslagssystemen voor tuinbouwkassen, IMAG rapport

Bijlage I – Teeltbeschrijving van een standaard tomatenteelt

Teelttemperatuur

Na het planten van de tomaat worden hoge temperaturen gewenst, 20 °C overdag en 18 °C 's nachts. In april worden deze instellingen verlaagd naar 19 overdag en 17 's nachts.

Vanaf mei wordt het dagsetpoint op 17 °C ingesteld en het nacht-setpoint op 16 °C.

De stooktemperatuur wordt lichtafhankelijk verhoogd met 3 °C in het zonstralingstraject van 100 tot 300 W/m²

De ventilatielijn ligt 1 graad boven de stooklijn.

Luchtvochtigheidsbeheersing

De luchtvochtigheid wordt beheerst door de ramen te openen indien de luchtvochtigheid boven de 85% RV komt. De ramen worden in dat geval geopend met 2% raamopening per procentpunt RV overschrijding.

Verwarmingssysteem

De tomatenkas heeft een ondernet van vijf 51-ers per 4 meter kap en een bovennet/condensornet met 2.5 buizen van 28 mm per 4 meter kap.

Minimumbuis

Er wordt jaarrond overdag een minimumbuis van 45 °C aangehouden en 's nachts 40 °C. Overdag wordt deze afgebouwd op licht in een stralingstraject van 150 tot 300 W/m².

Schermen

Er wordt 's nachts een energiescherm (LS 10-plus) gebruikt indien de buitentemperatuur onder de 10 °C zakt.

Buffer/CO₂

In de simulaties wordt uitgegaan van een warmteopslagtank van 100 m³/ha en wordt een CO₂-branderstand van 100 m³/ha/uur aangehouden. De branderstand wordt getemperd als de buffertemperatuur tegen zijn buffervulcurve aanloopt.