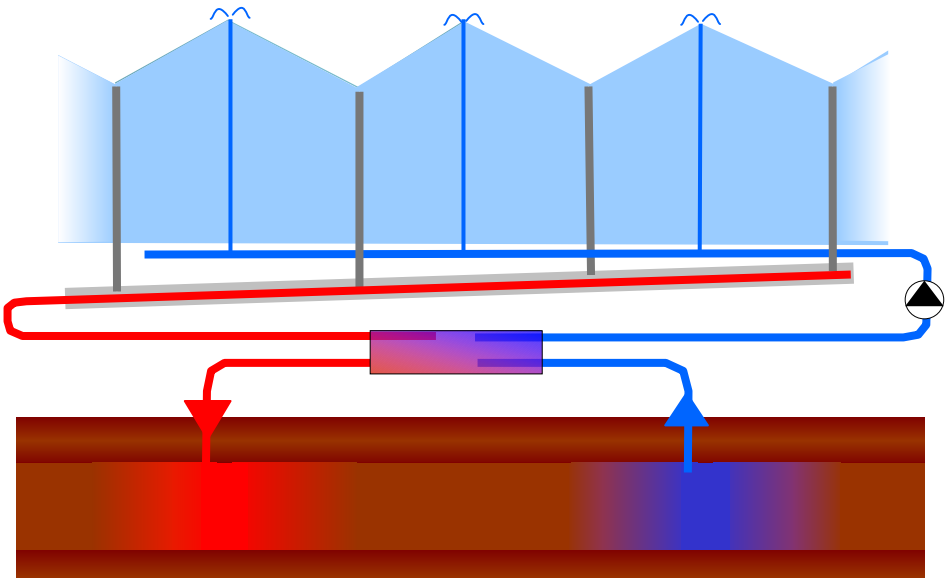
AGROTECHNOLOGY & FOOD INNOVATIONS
WAGENINGEN UR

# Praktijkexperiment Duurzame energie-verzameling door middel van daksproeiers

GLASTUINBOUW en MILIEU Energiescore



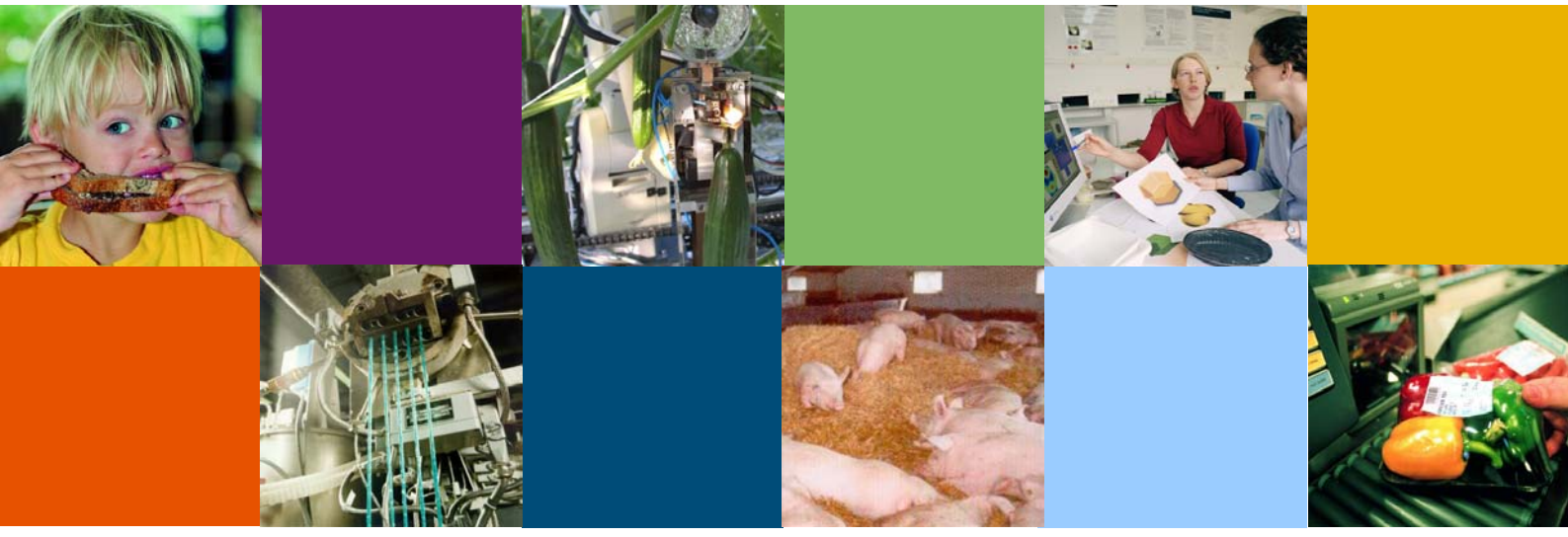
H.F. de Zwart

Report 233

**Onderzoek in het kader van het Convenant Glastuinbouw en Milieu**
In opdracht van:

Productschap Tuinbouw

landbouw, natuur en voedselkwaliteit



## Colofon

Dit project is uitgevoerd door
Agrotechnology and Food Innovations B.V.

en is gefinancierd door
het Productschap Tuinbouw
en het ministerie van Landbouw,
Natuur en Voedselkwaliteit


| | | |
|---|---|---|
| Title | Praktijkexperiment Duurzame energieverzameling door middel van daksproeiers | |
| Author(s) | H.F. de Zwart | |
| A&F number | Report 233 | |
| ISBN-number | 90-6754-808-1 | |
| Date of publication | September 2004 | |
| Confidentiality | non | |
| Project code. | PT-projectnr. 11462 | A&F-projectnr. 630.54741.01 |



Agrotechnology & Food Innovations B.V.
P.O. Box 17
NL-6700 AA Wageningen
Tel: +31 (0)317 475 024
E-mail: info.agrotechnologyandfood@wur.nl
Internet: www.agrotechnologyandfood.wur.nl



© 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.*


This report is authorised by: H.F. de Zwart

The quality management system of Agrotechnology & Food Innovations B.V. is certified by SGS International Certification Services EESV according to ISO 9001:2000.

## Samenvatting

Kassen hebben in de zomer veel warmte over en komen in de winter warmte tekort. Wanneer de overtollige warmte in de zomer verzameld en opgeslagen kan worden zou de kas in de winter met duurzame energie verwarmd kunnen worden.
Omdat het om grote hoeveelheden warmte gaat kunnen de zomerse overschotten niet in bovengrondse buffers worden opgeslagen, maar moeten hier ondergrondse watervoerende lagen worden gebruikt (aquifers, zie KADER 3). Warmteopslag in aquifers kan door water tussen twee putten heen en weer te pompen, waarbij de ene put zo'n 5 °C kouder dan de gemiddelde bodemteperatuur is en de andere zo'n 5 °C warmer. De warmte en koudeverliezen blijven hierdoor beperkt. Het zal duidelijk zijn dat voor de toepassing van warmte met een temperatuur van rond de 15 °C een warmtepomp gebruikt moet worden (Zie KADER 1). Deze warmtepomp koelt het water uit de warme put af naar zo'n 5 °C en maakt hiermee een bron met koud water. Om in de winter van het volgende jaar opnieuw van de warmtepomp gebruik te kunnen maken moet dit koude water weer worden opgewarmd.
A&F in Wageningen heeft onderzoek gedaan naar de mogelijkheid om deze opwarming te realiseren met standaard dekbesproeiingssystemen. Dit zijn relatief goedkope systemen die ook nu al op veel kassen gebruikt worden. Het belangrijkste verschil tussen het nu onderzochte systeem in de bestaande systemen is dat bij gangbare sproeiers kaskoeling plaatsvindt door verdamping van water, en in het voorgestelde nieuwe systeem de lage temperatuur van het opgespoten water koeling aan de kas geeft. Zo worden drie vliegen in één klap geslagen namelijk:

1. de sproeiers geven een groter koelvermogen
2. er wordt duurzame energie verzameld, waarmee in de winter gas kan worden bespaard
3. het verdampingsverlies wordt beperkt.

KADER 1

**Warmtepompen**

Een warmtepomp werkt warmte van een lage temperatuur op naar een hogere temperatuur. Het bekendste voorbeeld is de koelkast. Deze onttrekt warmte uit zijn binnenkant en verwarmt daarmee de omgeving via de spiralen aan de achterkant. Kenmerkend is dat er altijd meer warmte wordt afgegeven dan er aan koude wordt onttrokken. Het verschil tussen deze twee is het aandrijfvermogen van de warmtepomp (het elektriciteitsverbruik van de koelkast).
De warmtepomp kan elektrisch worden aangedreven of direct met een gasmotor. Er zijn ook thermisch aangedreven warmtepompen (de gas-koelkast in de caravan), maar deze zijn voor bovenbeschreven toepassingen niet geschikt.

Het voorgestelde systeem is experimenteel onderzocht bij een bedrijf in de praktijk (Ronald Bunnik Bromelia's te Pijnacker). Op dit bedrijf werden de deksproeiers op 1/6 van het kasdek

met koud water, in plaats van onbehandeld bassinwater gevoed. Er is gemeten hoeveel warmte op deze manier aan het kasdek kon worden onttrokken (= verzameling van zonne-energie) en er is gekeken naar verschillen in kasluchttemperatuur in de afdelingen onder het behandelde en het onbehandelde kasdek. Er is gepoogd een waterbalans op te stellen om het verdampingsverlies te bepalen, maar dit bleek in de gebruikte meetopstelling niet mogelijk.
Een andere tegenslag in dit onderzoek was de erg warme en droge zomer van 2003, waardoor de tuinder begrijpelijkerwijs heel terughoudend is geweest met het gebruik van de installatie. Er zijn daardoor in een jaarrond periode slechts 295 uur aan meetgegevens verzameld, terwijl dat in normale omstandigheden wel 4 keer hoger had kunnen zijn.
In deze 295 uur is 26 MJ per $m^2$ kasoppervlak aan zonne-energie verzameld. Wanneer deze warmte, na opslag in een ondergronds energieopslagsysteem, in de winter door een warmtepomp wordt benut zou er 0.8 $m^3$ aardgas per $m^2$ bespaard kunnen worden. In een normaal jaar zou dit dus minstens 4 keer zoveel zijn geweest, waarmee duidelijk wordt dat het aandeel duurzame energie wat in de bromeliateelt ingezet zou kunnen worden zonder technische problemen gemakkelijk op 5% gebracht zou kunnen worden (zie KADER 2).

KADER 2

**Zuinig én duurzaam**

In het nieuwe besluit glastuinbouw worden strakke eisen gesteld aan het energiegebruik per hectare. Daarnaast heeft de glastuinbouw in het convenant met de overheid (GLAMI) afgesproken om in 2010 4% duurzame energie te gebruiken. Allebei de eisen kunnen tegelijk ingevuld worden door gebruik te maken van kasdekbevloeiing. Hierbij wordt warmte in de zomer geoogst, die in de winter weer gebruikt kan worden voor verwarming.

Er werden geen significante verschillen gemeten tussen de kasluchttemperatuur in de afdeling waar koud water werd gebruikt en de afdeling waar gewoon bassinwater op het dek werd gesproeid. Dit zal zeker ook te maken hebben gehad met het feit dat de schaduwschermen tijdens het gebruik van de deksproeiers bijna altijd gesloten waren, waardoor de uitwisseling van warmte tussen de kas en het dek werd belemmerd. Voor intensief geschermde teelten, zoals de Bromelia, moet dan ook geconcludeerd worden dat er geen duidelijk effect van het gemiddeld koudere dek op de kastemperatuur verwacht mag worden.

**Modelvalidatie**

Aan de hand van de metingen die op het bedrijf zijn verricht is het kasklimaatsimulatiemodel van A&F uitgebreid met een module die het effect van deksproeiers op het kasklimaat beschrijft. Het model bleek zeer goed in staat de hoeveelheid warmte die aan het dek kan worden onttrokken te berekenen, en dat uitsluitend door toepassing van gebruikelijke natuurkundige formules. Omdat er niet allerlei onduidelijke parameters of evenredigheidsconstanten hoeven te worden ingevuld kan het model in het vervolg worden gebruikt om na te gaan wat van de gekoelde deksproeiers verwacht moet worden in andere teelten, andere jaren, of bij een andere besturing.

**Scenario's**

Een groot aantal van dit soort scenarioberekeningen is reeds gedaan. Het bleek dat wanneer in de Bromeliateelt maximaal gebruik zou worden gemaakt van standaard dekbesproeiingssystemen zo'n 10% van de warmtevraag met duurzame energie gedekt zou kunnen worden. De hoge kosten voor het ondergronds energieopslagsysteem en de warmtepomp staan in dat geval echter niet in verhouding tot de waarde van de energiebesparing, zodat de netto financiële jaaropbrengst maar net boven de 0 uitkwam.

Als het maximale sproeidebiet zou worden verhoogd van de gangbare 2 liter/($m^2$uur) naar 4 liter/($m^2$ uur) stijgen de opbrengsten harder dan de kosten, zodat het netto financieel resultaat onder de huidige economische randvoorwaarden oploopt naar € 0,15 per $m^2$/jaar. De energiebesparing loopt daarbij op tot 19% van het jaarverbruik (10 $m^3$ besparing op een gemiddeld verbruik van 52 $m^3$). De terugverdientijd blijkt echter ook in dit geval nog onacceptabel lang (17 jaar).

Er wordt dan ook geconcludeerd dat er belangrijke verminderingen in de investeringskosten nodig zijn wil dit energetisch interessante concept ook economisch toepasbaar kunnen worden.

Er is ook gerekend aan de toepassing van deksproeiers om in de tomatenteelt gebruik te kunnen maken van duurzame energie. Ook hier bleek een belangrijke hoeveelheid gas bespaard te kunnen worden, maar omdat een warmtepomp in de tomatenteelt minder draaiuren kan maken moet voor deze enenergiebesparing een relatief zware warmtepomp worden gebruikt. Dit drijft de investeringskosten op, waardoor het perspectief voor de toepassing van deze vorm van gebruik van duurzame energie in de tomatenteelt nog veel verder weg ligt dan de toepassing in de Bromelieateelt (of soortgelijke onbelichte potplantenteelten).

KADER 3

**Warmteopslag**

Voor een heel seizoen moet veel warmte opgeslagen worden. Bepaalde watervoerende lagen in de bodem kunnen dienen als opslag. Bij warmteopslag in de bodem worden twee bronnen geboord van 50 tot 100 meter diep. De een is de 'koude bron', de andere de 'warme bron'. In de winter wordt uit de warme bron water van ongeveer 16 °C opgepompt. Dat is een te lage temperatuur voor verwarming. Met een warmtepomp wordt deze laagwaardige warmte 'opgepompt' naar hoogwaardige warmte. Het warme bronwater wordt afgekoeld terwijl het de warmte afgeeft aan het verwarmingssysteem. Het afgekoelde bronwater wordt met een temperatuur van 6 °C weer geïnjecteerd in de koude bron.

Een voorwaarde van dit systeem is dat gewerkt wordt met lage temperaturen. Boven een watertemperatuur van 60°C neemt de besparing snel af. Daarom moet verwarmd worden via een laag-temperatuur verwarmingsnet of vloerverwarming. Met kasdekbevloeiing kan in de zomer voldoende warmte worden geoogst om de warmte te compenseren die in de winter uit de bodem gehaald wordt.

# Inhoud

**Tuinders samenvatting** **1**

**1 Inleiding** **7**

**2 Warmtepompen, lange termijn warmteopslag en warmteverzameling in een energiezuinige glastuinbouw** **9**

Inleiding 9

2.1 Warmtepompen 9

2.2 Ondergrondse warmteopslag 11

2.3 Overzicht totale installatie 12

**3 Meetopstelling en meetresultaten** **15**

Inleiding 15

3.1 Ronald Bunnik Bromelia's 15

3.2 Meetopstelling 18

3.3 Resultaten warmteonttrekking 21

3.4 Effect van de dekbevloeiing op de kasluchttemperatuur 26

**4 Validatie van het simulatiemodel KASPRO met behulp van de meetresultaten** **29**

Inleiding 29

4.1 Modelmatige beschrijving van een dekbevloeiingssysteem 29

4.2 Vergelijking van modelresultaten met metingen 31

**5 Scenarioanalyse** **33**

Inleiding 33

5.1 Perspectieven van deksproeiers voor de verzameling van duurzame energie in de Bromeliateelt 33

5.2 Perspectieven van deksproeiers voor de inzet van duurzame energie in de tomatenteelt 36

5.3 Conclusies 39

**6 Bedrijfseconomische beschouwing** **41**

Inleiding 41

6.1 Bedrijfseconomische uitgangspunten 41

6.1.1 Installaties en energie 41

6.1.2 Productie-effecten 43

6.2 Resultaten van de bedrijfseconomische berekeningen 43

**7 Conclusies en aanbevelingen** **47**

7.1 Aanbevelingen 48

**8 Literatuur** **49**

# 1 Inleiding

In de zoektocht naar mogelijkheden om het primaire energieverbruik van de glastuinbouw te verlagen zal een belangrijke rol zijn weggelegd voor de warmtepomp. Deze levert tevens een goede mogelijkheid om de doelstelling voor duurzame energie te halen. Met de warmtepomp kan namelijk zonne-energie die in de zomer is verzameld in de winter worden benut voor de klimatisering van de kas. Daartoe wordt gebruik gemaakt van warmteopslag in ondergrondse watervoerende lagen die in de zomer opgewarmd worden en in de winter met behulp van de warmtepomp weer worden uitgekoeld.

Bij de verschillende onderzoeksprojecten, die rond de ontwikkeling van deze techniek in de afgelopen tijd zijn uitgevoerd, blijkt dat het moeilijk is om op een kostenefficiënte wijze de zomerse overschotten te verzamelen. Experimenten op zeer kleine schaal in 2001 en op iets grotere schaal in 2002 hebben echter laten zien dat het gebruik van het kasdek als oppervlak waaraan warmte kan worden onttrokken veel potentie biedt. In het beproefde systeem werd koud water op het kasdek gespoten, dat vervolgens op een hogere temperatuur via de bestaande regenpijpen weer kan worden afgevoerd. Wanneer dit afstromende water via een warmtewisselaar de warmte overdraagt aan een ondergronds opslagsysteem, kan dit op een goedkope wijze worden geregenereerd.

In hoofdstuk 2 wordt een beschrijving van het concept gepresenteerd.

De energiebesparingspotentie van dit systeem hangt voornamelijk af van de warmteoverdracht die gerealiseerd kan worden. Deze warmteoverdracht is met een uitgebreide meetopstelling gedurende de zomer van 2003 bij een praktijkbedrijf bepaald. In hoofdstuk 3 wordt de toegepaste meetopstelling besproken en worden de meetresultaten gepresenteerd.

Teneinde de metingen die in het praktijkexperiment zijn uitgevoerd te kunnen vertalen naar andere omstandigheden (een ander jaar, andere gewassen), zijn de meetresultaten gebruikt om de modules te valideren, die in het A&F simulatiemodel KASPRO een rol spelen in de beschrijving van het gedrag van dakbevloeiing. De wijze waarop deze validatie is uitgevoerd en de resultaten daarvan worden besproken in hoofdstuk 4.

In hoofdstuk 5 worden vervolgens verschillende scenario's met het gevalideerde model doorgerekend. Zo kunnen effecten van veranderde sproeidebieten en veranderde criteria waarop de installatie wordt aan- of uitgeschakeld worden bestudeerd.

In hoofdstuk 0 volgt een bedrijfseconomische beschouwing op het complete systeem en het rapport wordt afgesloten met een conclusies en aanbevelingen.

# 2 Warmtepompen, lange termijn warmteopslag en warmteverzameling in een energiezuinige glastuinbouw

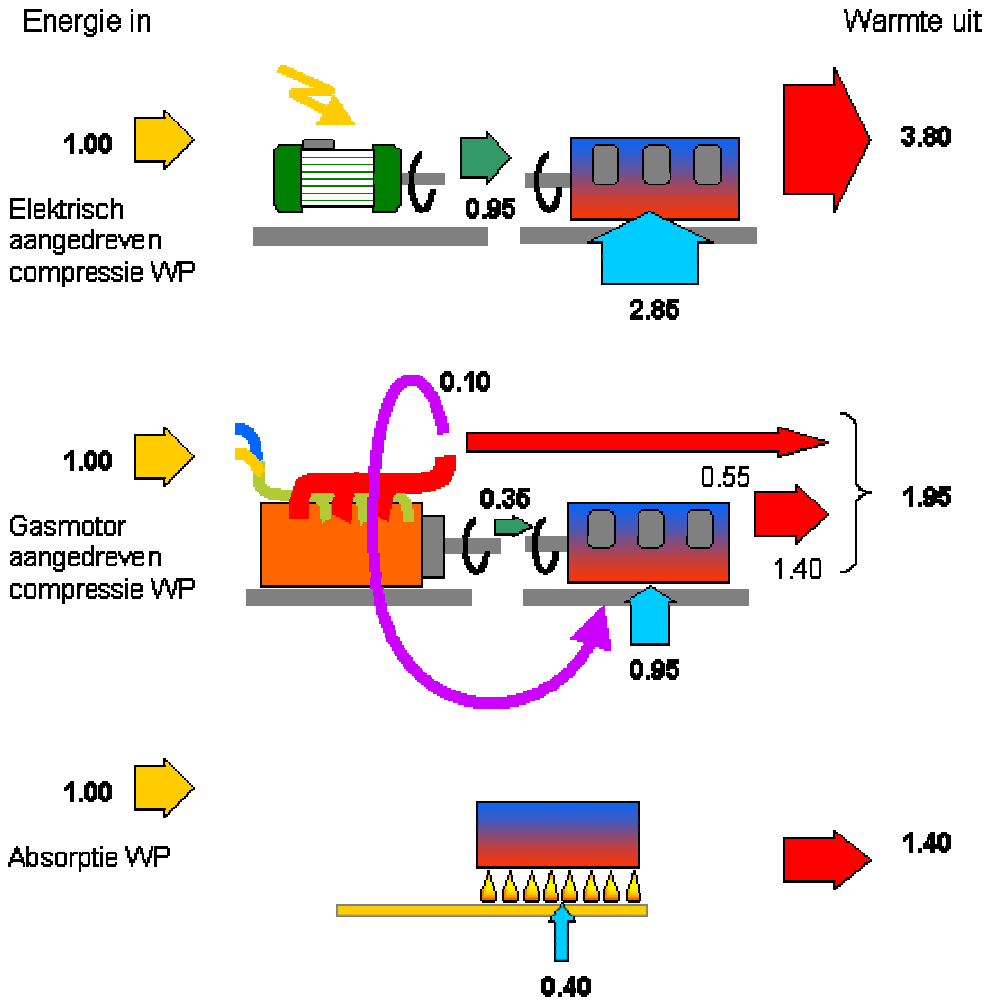
## Inleiding

Moderne, onbelichte kassen hebben een jaarlijkse warmtevraag die ligt tussen de 1200 en 1600 MJ/m$^2$. Het zomerse warmteoverschot van deze kassen (de hoeveelheid warmte die jaarlijks via de ramen wordt afgevoerd en/of middels schermen uit de kas wordt gehouden) ligt rond de 1800 MJ/m$^2$. Het zomerse warmteoverschot overstijgt daarmee de warmtevraag.
Om dit warmteoverschot te kunnen gebruiken moet deze warmte eerst worden verzameld, opgeslagen en later weer op een hoger temperatuurniveau worden gebracht met behulp van een warmtepomp.
In dit hoofdstuk wordt op elk van deze drie onderdelen van het systeem dieper ingegaan

## 2.1 Warmtepompen

Een warmtepomp is een machine, waarmee warmte 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 Figuur 1 wordt een aantal typische kengetallen, die voor verschillende typen warmtepompen gelden, getoond.
In alle drie de gevallen wordt aan de linkerkant één eenheid aandrijfenergie ingevoerd en wordt aangegeven langs welke weg de warmteoutput 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 ¾) 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 laagwaardige warmtebron nog niet een derde van de warmteoutput.
Bij de gasmotor aangedreven warmtepomp is ongeveer de helft van de warmteoutput afkomstig uit de laagwaardige warmtebron.
Figuur 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 rendement van 43%van een elektriciteitscentrale, 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 opwekkingsredement van meer dan 50% wordt de energiebesparingspotentie van de elektrische warmtepomp beter dan die van de warmtepomp aangedreven door een gasmotor. Vanwege het feit dat het gemiddeld opwekkingsrendement nog ver van deze 50% af ligt wordt in de rest van dit rapport uitgegaan van een warmtepomp aangedreven door een gasmotor.



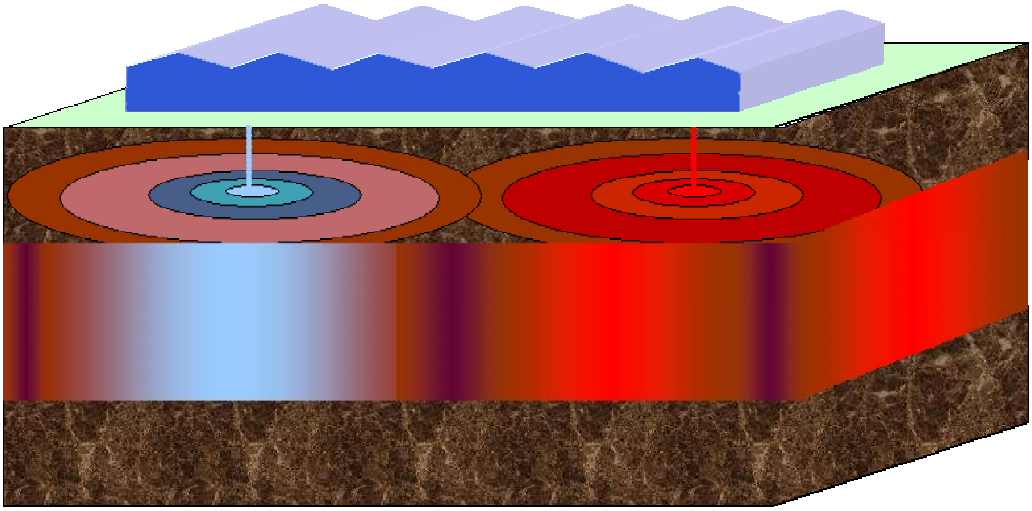

Figuur 1 Typische kentallen voor verschillende typen warmtepompen

Uitgaande van de gasmotor aangedreven warmtepomp wordt er per eenheid warmte die aan de output wordt afgegeven 0.95 / 1.95 = 0.49 eenheid warmte aan de laagwaardige warmtebron onttrokken. Indien alle restwarmteproducten bij het gebruik van de gasmotorwarmtepomp nuttig kunnen worden ingezet, zoals getekend in Figuur 1, is de energiebesparing precies gelijk aan de 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 warmteopslagsystemen de warmteonttrekking in de winter gelijk moet zijn aan de warmtetoevoer in de zomer kan gesteld worden dat de hoeveelheid warmte die het dekbevloeiingssysteem in de zomer weet te verzamelen, gelijk is aan het energiebesparingspotentieel.
Uiteraard geldt deze vuistregel uitsluitend zolang de totale warmteproductie van de gasmotor 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 MJ/($m^2$ jr). (16 $m^3$ aardgas). Verderop in dit rapport zal blijken dat er inderdaad dekbevloeiingssystemen zijn, die deze energiebesparing realiseerbaar maken.

## 2.2 Ondergrondse warmteopslag

Indien warmteopslag plaatsvindt met behulp van water dat zo'n 10 °C wordt opgewarmd dan moet er 12 $m^3$ water per $m^2$ kas worden opgewarmd en afgekoeld om de hierboven genoemde 500 MJ op te slaan. Een deel van deze warmteopslag zal op korte termijn weer voor verwarmingsdoeleinden worden gebruikt (bijvoorbeeld in het voorjaar), maar het overgrote deel moet voor langere tijd worden opgeslagen, zodat het niet realistisch is te veronderstellen dat dit zou kunnen plaatsvinden in een speciaal bassin. Indien dit namelijk onder het kasoppervlak zou worden geplaatst zou het hele kasoppervlak zo'n 12 meter diep moeten worden uitgegraven.
Een reeds veel toegepast warmteopslagsysteem voor kleine temperatuurverschillen en grote volumina is de benutting van ondergrondse watervoerende lagen, de zogenoemde aquifers. Deze aquifers worden gevormd door gestapelde dikke lagen zand (in de orde van 10 tot 20 meter), afgewisseld met dunne kleilagen. Wanneer zuig en persleidingen tot in deze zandlagen geboord worden, kan verwarmd of afgekoeld water in de ondergrond worden opgeslagen voor later gebruik.
In Figuur 2 wordt hiervan een schetsmatige situatie getoond.



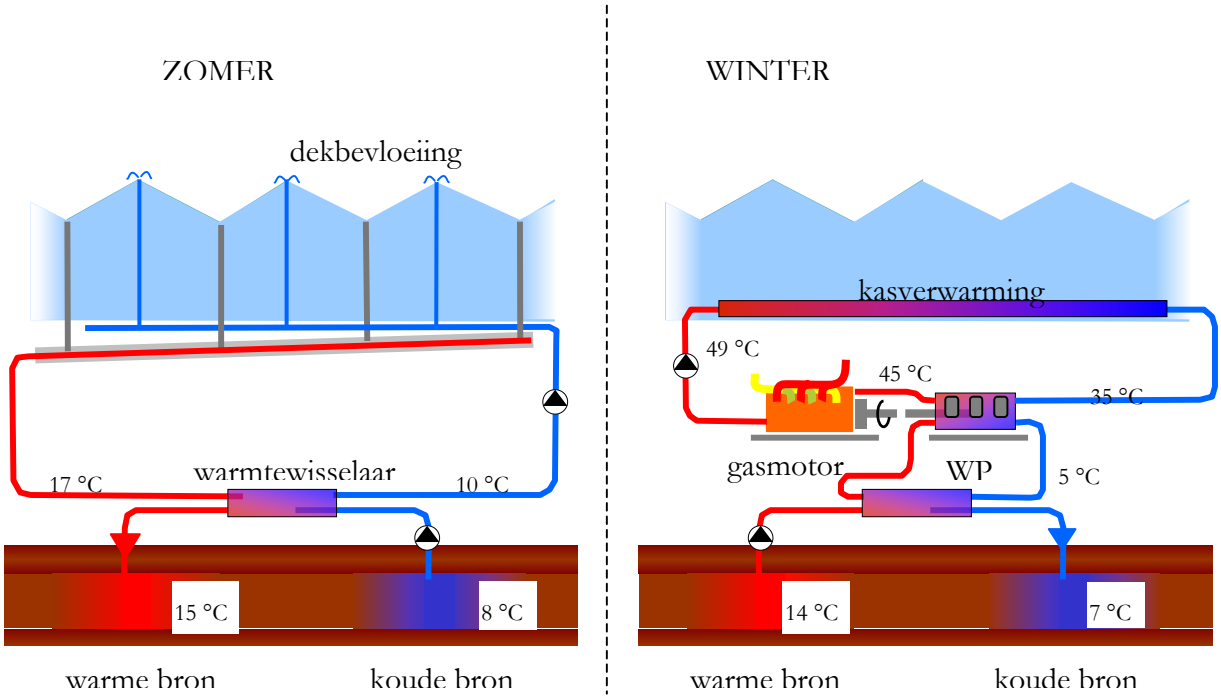
Figuur 2 Schets van een kas waaronder het watervoerende zandpakket wordt gebruikt voor de seizoensopslag van warmte

Wanneer bij het laden van het warmteopslagsysteem relatief koud water wordt opgepompt slinkt de koude 'waterbel' en wordt het gebied met relatief warm water groter. Bij het ontladen van het systeem gebeurt het tegenovergestelde. Als de watervoerende laag dik genoeg is (meer dan 15 meter) en de putten ver genoeg uit elkaar liggen (meer dan 100 meter) zullen de laad- en ontlaadstromen elkaar niet zoveel in de weg zitten. Een gedetailleerde verhandeling hierover is beschreven in het rapport "Onderlinge beïnvloeding van ondergrondse energieopslagsystemen voor tuinbouwkassen" (de Zwart en van Elswijk, 2002)

## 2.3 Overzicht totale installatie

Paragraaf 2.1 heeft laten zien energiebesparing met een warmtepomp niet los kan worden gezien van warmteverzameling in de zomer. In Figuur 3 wordt daarom een overzicht gegeven van het totale concept dat in dit onderzoek voor ogen staat.

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




Figuur 3 Warmte verzamelen in de zomer en energie besparen in de winter.

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 dit geval is 2 graden temperatuurverlies verondersteld.
Een tweede punt dat in de figuur is benadrukt, is de opwarming van de koude bron en 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. Dit is een nog niet genoemd voordeel van de gasmotor warmtepomp boven de andere typen warmtepompen. De hoogwaardige warmte (28% van de warmte-output van de combinatie gasmotor/warmtepomp) kan ook tijdelijk worden opgeslagen in een etmaalbuffer.

# 3 Meetopstelling en meetresultaten

## Inleiding

De experimentele opstelling dient ter beantwoording van de volgende drie vragen

1. Wat is de warmteverzamelcapaciteit van deksproeiers die met koud water het dek besproeien?
2. Wat is het effect van het extra koude water op het kasklimaat?
3. Hoe groot is de vermindering van het waterverlies door koud water in plaats van ongekoeld bassinwater te versproeien?

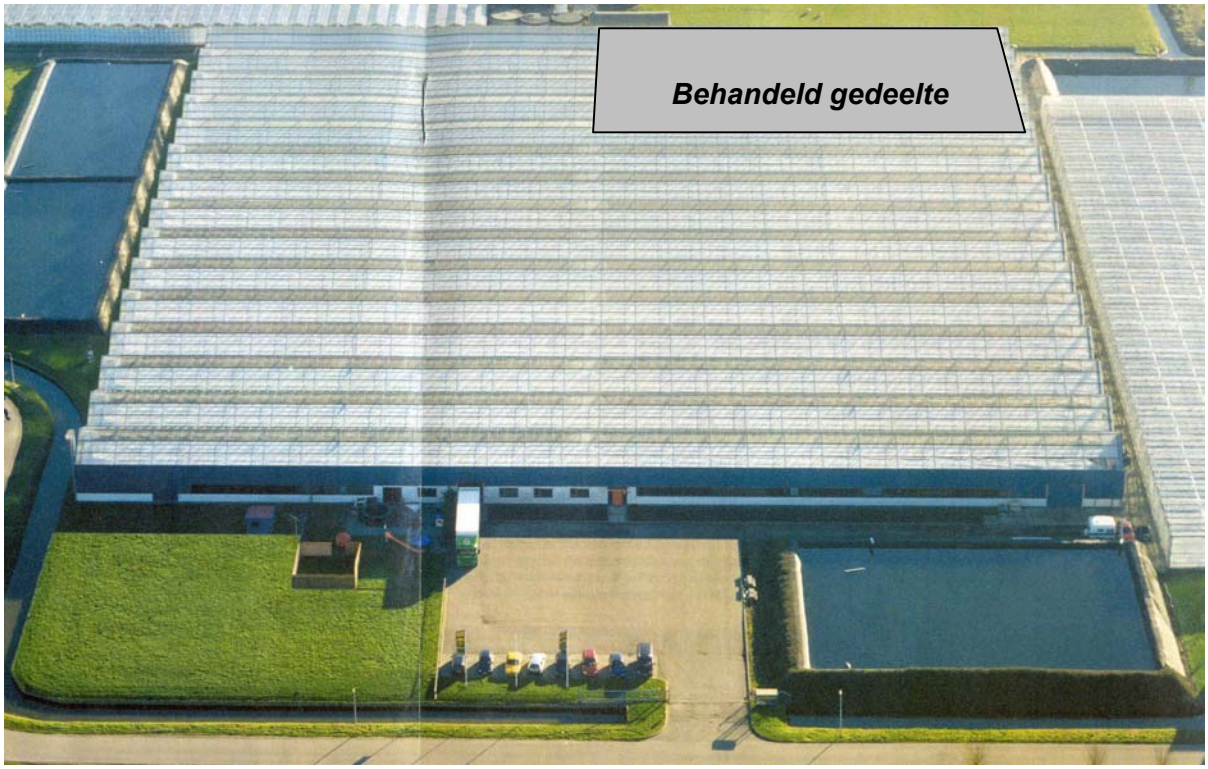
Om de antwoorden op deze vragen experimenteel te kunnen vaststellen hebben metingen plaatsgevonden bij Ronald Bunnik Bromelia's te Pijnacker. Hiermee zijn antwoorden op de eerste twee vragen verkregen. Het antwoord op de derde vraag bleek met de toegepaste meetopstelling niet te kunnen worden beantwoord.
In paragraaf 3.1 wordt een beschrijving gegeven van het bedrijf, de Bromeliateelt en de kasklimaateisen die daarin gehanteerd worden. In § 3.2 wordt de meetopstelling beschreven.
In § 3.3 worden de resultaten gepresenteerd die met deze opstelling zijn gerealiseerd

## 3.1 Ronald Bunnik Bromelia's

De Bromelia is een bijzondere potplant, die in een periode van ongeveer één jaar wordt opgekweekt van een klein uit weefselkweek verkregen plantje tot een verkoopbaar eindproduct. Figuur 4 toont de Bromelia in het begin- en in het eindstadium
Teneinde jaarrond te kunnen leveren heeft het tuinbouwbedrijf op ieder moment Bromelia's in alle groeistadia staan. Deze planten staan op roltabletten die met behulp van een robot door de kas worden verplaatst. Tabletten met jonge aanplant worden in de kas geschoven en doorlopen gedurende hun opgroeiperiode praktisch de hele kasruimte. Tabletten met planten die klaar zijn voor de verkoop, worden door de robot uit de kas geschoven en in de behandelingsruimte verzendklaar gemaakt.
Toevalligerwijs is er ook een luchtfoto van het bedrijf beschikbaar. Deze is afgebeeld in Figuur 5, waarin het gedeelte, waar het experiment heeft plaatsgevonden is gemarkeerd.




Figuur 4  Van jong plantje tot eindproduct.




Figuur 5  Luchtfoto van het bedrijf van Ronald Bunnik Bromelia's.

De Bromelia is een tropische schaduwplant, zodat er op het bedrijf intensief met schaduwschermen wordt gewerkt. Aan de zonkant wordt een scherm met 83% lichtonderschepping gebruikt. Aan de noordkant onderschept het scherm zo'n 20% van het licht. De gemiddelde lichtonderschepping van het scherm is daarmee 51%. De schermen gaan dicht als de stralingsintensiteit buiten boven 200 W/$m^2$ komt.

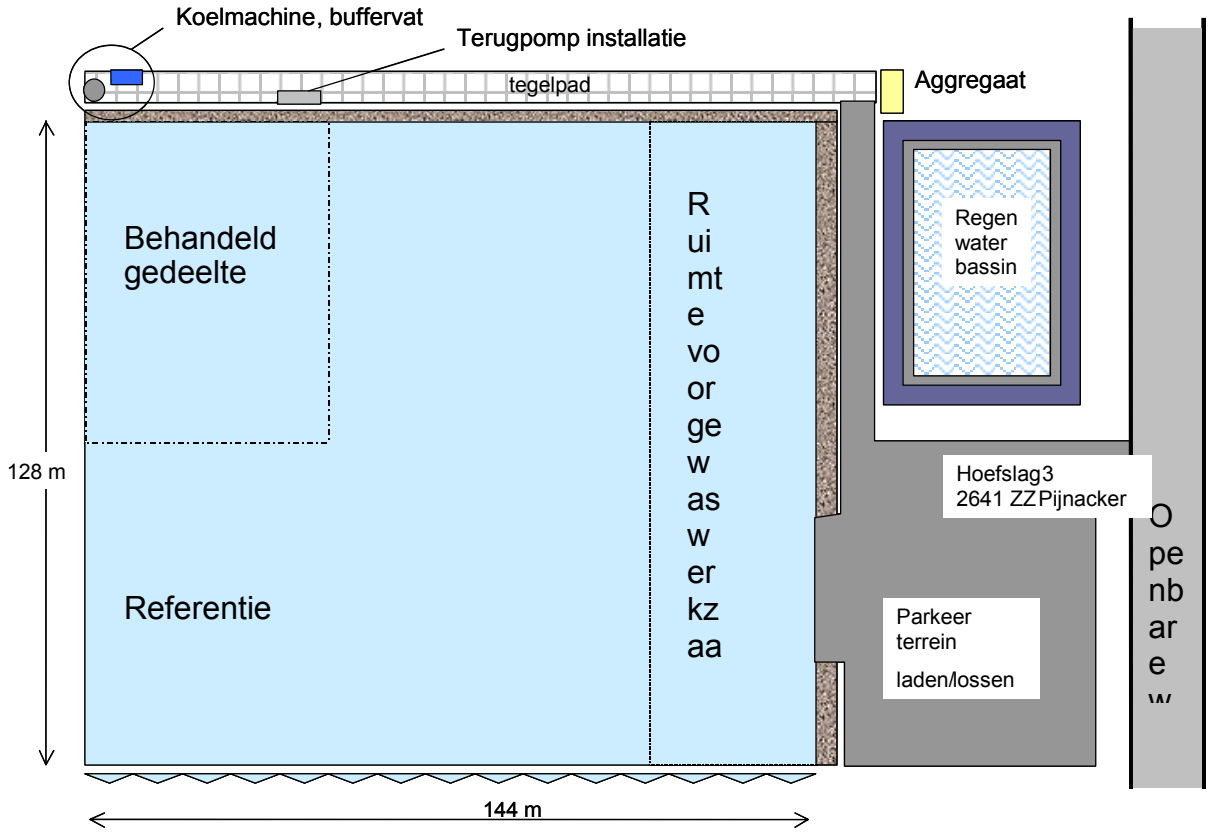
De gewenste teelttemperatuur en luchtvochtigheid zijn hoog. Het gehele jaar wordt een stooktemperatuur van 21 °C (dag en nacht) aangehouden. De ventilatietemperatuur staat 2.5 °C boven de stooklijn.

Lage luchtvochtigheden zijn ongunstig voor de groei van Bromelia, zodat de kaslucht bevochtigd wordt als de RV beneden 75% daalt. Naast actieve bevochtiging op een luchtvochtigheidscriterium, wordt de kaslucht ook vochtig wanneer het gewas wordt besproeid. Besproeiing van bovenaf is voor de Bromeliateelt essentieel, omdat de plant geen watervoerende wortels heeft. Al het water wordt onttrokken vanuit de blad-aanhechtingspunten. Na het water geven staat er in elke plant dan ook een plasje water.

Vanwege het belang van een hoge luchtvochtigheid, en dus van een beperkte ventilatie, wordt op het bedrijf al jaren gebruik gemaakt van deksproeiers. Wanneer het te warm wordt, worden deze ingeschakeld om het dek nat te houden en het daarmee een oppervlaktetemperatuur te geven die in de buurt komt van de natte-boltemperatuur van de buitenlucht.
Dit koelprincipe is gebaseerd op verdampingskoeling en verbruikt derhalve een aanzienlijke hoeveelheid water (zie ook hoofdstuk 2 van "Kaskoeling en aquiferlading door middel van een dakbevloeiingssysteem" (de Zwart *et.al.* 2004)). Ervaringscijfers geven aan dat in de zomer op warme dagen soms wel 50% van het versproeide water middels verdamping verdwijnt. In de praktijk betekent dit dat het waterverlies van standaard deksproeiers soms bijna een liter per $m^2$ per uur bedraagt. Ter vergelijking: een plant verdampt op hele warme dagen maximaal zo'n 0.6 liter/($m^2$ uur).
Het is vanwege dit hoge waterverlies, dat met de toepassing van gekoeld water vermindert en de verwachte extra koelcapaciteit dat Ronald Bunnik Bromelia's geïnteresseerd was in een experiment met het gebruik van gekoeld water in hun deksproei-installatie.
In § 3.2 wordt de meetopstelling, waarmee dit experiment is uitgevoerd, beschreven en toegelicht.

## 3.2 Meetopstelling

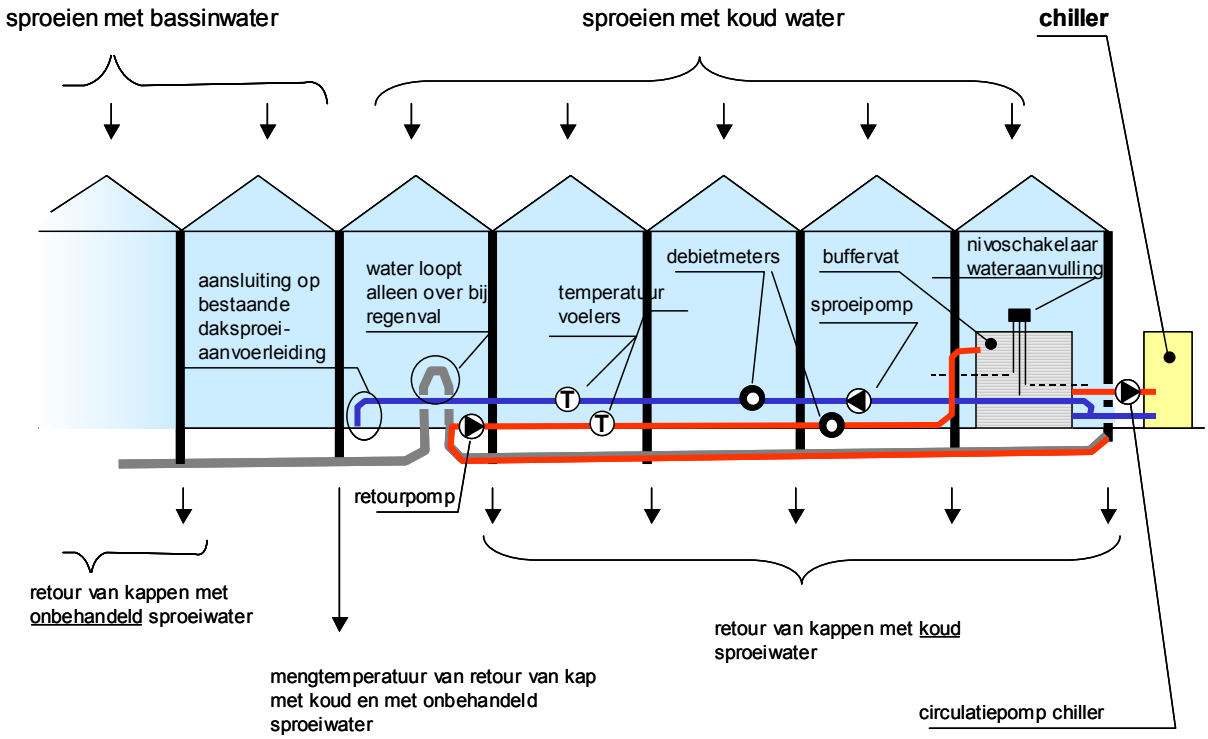
Het bedrijf van Ronald Bunnik beslaat een oppervlak van 18432 $m^2$ (15 kappen van 9.60 m en een gootlengte van 128 meter). Het bedrijf is opgedeeld in 6 verwarmings- en luchtingsgroepen. Het deksproeisysteem is eveneens verdeeld in 6 groepen die samenvallen met de verwarmings- en luchtingsgroepen.
Ten behoeve van het experiment is één van deze deksproeigroepen afgekoppeld van de sproei-installatie van het bedrijf en aangesloten op een aparte sproeipomp. Het water dat naar deze sproeipomp gaat wordt gekoeld door middel van een koelmachine.
In Figuur 6 is op de plattegrond aangegeven op welk deel van het bedrijf de deksproeiers met gekoeld water worden gevoed. Tevens is aangegeven welk deel als referentie wordt gehanteerd.




Figuur 6 Plattegrond van het tuinbouwbedrijf.

Buiten de kas zijn een buffervat, een koelmachine en een terugpompinstallatie geplaatst. De buffertank dient om de aanvoerwatertemperatuur te stabiliseren en maakt een rustige regeling van de koelmachine mogelijk.
De terugpompinstallatie maakt het mogelijk om een goede temperatuurmeting van het water, dat van het kasdek afstroomt, te realiseren. Bovendien zou met deze installatie een waterbalans

moeten kunnen worden opgesteld van het water dat het kasdek opstroomt en er weer af loopt. Het verschil tussen deze twee waterstromen zou het waterverlies door verdamping bepalen. Figuur 7 laat een schets zien van de waterzijdige installatie.




Figuur 7 Koelinstallatie (chiller), pompen, debietmeters en temperatuurvoelers in de proefopstelling.

Rechts in Figuur 7 is de koelmachine getekend. Deze machine gaat aan op het moment dat de sproei-installatie wordt ingeschakeld en produceert dan koud water (6 tot 8 °C) met een maximaal vermogen van 80 kW (26 W/m$^2$ behandeld kasoppervlak). Het buffervat zorgt voor stabilisatie van de temperatuurregeling van de koeler.
Wanneer de sproei-installatie wordt aangezet pompt de sproeipomp water uit het buffervat en verspreidt dit via de bestaande daksproeileiding over 5 kappen. In de aanvoerleiding is een temperatuursensor en een debietmeter opgenomen.
Na op het dek te zijn opgewarmd komt het water, met mogelijk enig verlies door verdamping, via de regengoten en de regenpijpen in de regenwaterafvoer. Door middel van een toogconstructie wordt voorkomen dat het water van het behandelde gedeelte naar het regenwaterbassin stroomt.

In plaats daarvan wordt het via de getekende retourpomp teruggepompt in het buffervat[1]. Ook van deze waterstroom worden debiet en temperatuur gemeten. Het retourdebiet en het temperatuurverschil tussen opgespoten en terugkomend water bepalen de hoeveelheid zonne-energie die van het dek verzameld kan worden.
De figuur laat zien dat de het water van slechts 9 van de 10 besproeide dakvlakken kan worden teruggepompt, zodat zelfs wanneer het verdampingsverlies 0 zou zijn altijd tenminste 10% van het opgespoten water niet in de buffer terugkomt. Hier wordt in alle verdere berekeningen uiteraard rekening mee gehouden.
Al het water dat niet via de retourpomp in het buffervat terugkomt wordt aangevuld met een aparte aanvoerleiding.

De metingen aan het systeem worden uitgevoerd door een datalogger die de volgende grootheden meet.

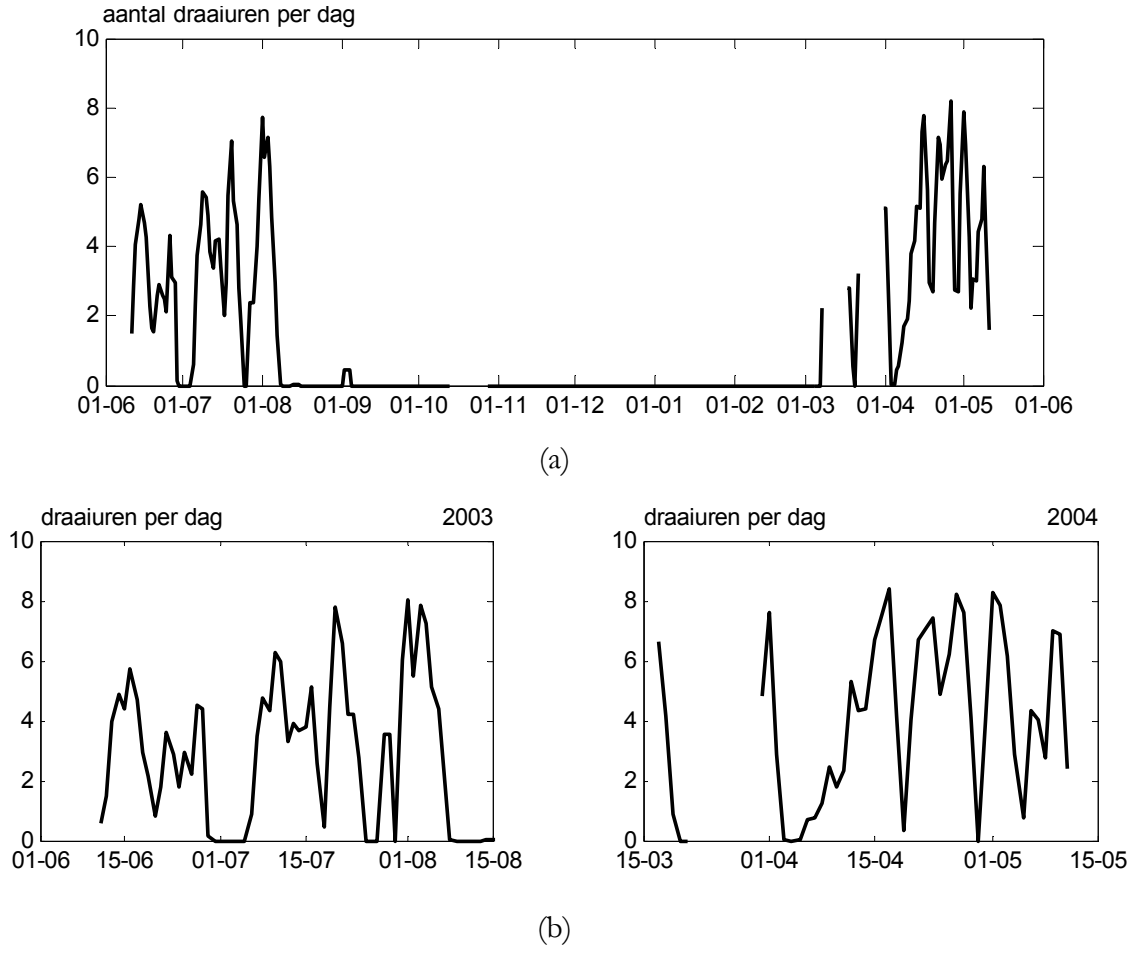
- Staan de deksproeiers in behandelde gedeelte aan of uit?
- Staan de deksproeiers in het referentiegedeelte aan of uit? De voor dit experiment aangebrachte installatie kan namelijk behalve door de klimaatcomputer van de tuinder, en dus tegelijk met de rest van de kas, ook handmatig worden aangezet.
- volumestroom van het water dat het dek opstroomt
- temperatuur van het opgespoten water
- volumestroom van het water dat van het dek afstroomt (wordt door 0.9 gedeeld om te corrigeren voor het feit dat slechts 90% van het afstromende water gemeten kan worden).
- temperatuur van het afstromende water
- kasluchttemperatuur en luchtvochtigheid in het behandelde vak
- kasluchttemperatuur en luchtvochtigheid in het referentievak

Bovengenoemde metingen worden per 5 minuten vastgelegd in een bestand. De meetgegevens worden ongeveer eens per week opgehaald en geanalyseerd.

*1 De retourpomp draait alleen als de dekbevloeiingsinstallatie in werking is, zodat bij regenval het water toch in het bassin terechtkomt. Na een regenbui staan de regenpijpen en de verzamelbuis evenwel tot op de hoogte van de toogconstructie vol met water dat niet via de sproei-installatie is opgebracht. Dit water wordt bij de start van een nieuwe sproeibeurt genegeerd en dus niet in de berekening van waterverliezen en vermogens betrokken.*

### 3.3 Resultaten warmteonttrekking

De installatie is half juni 2003 operationeel geworden met de bedoeling tot eind september te worden ingezet voor het experiment. In onderstaande grafiek is getoond hoeveel draaiuren de installatie gedurende de meetperiode per dag heeft gemaakt.

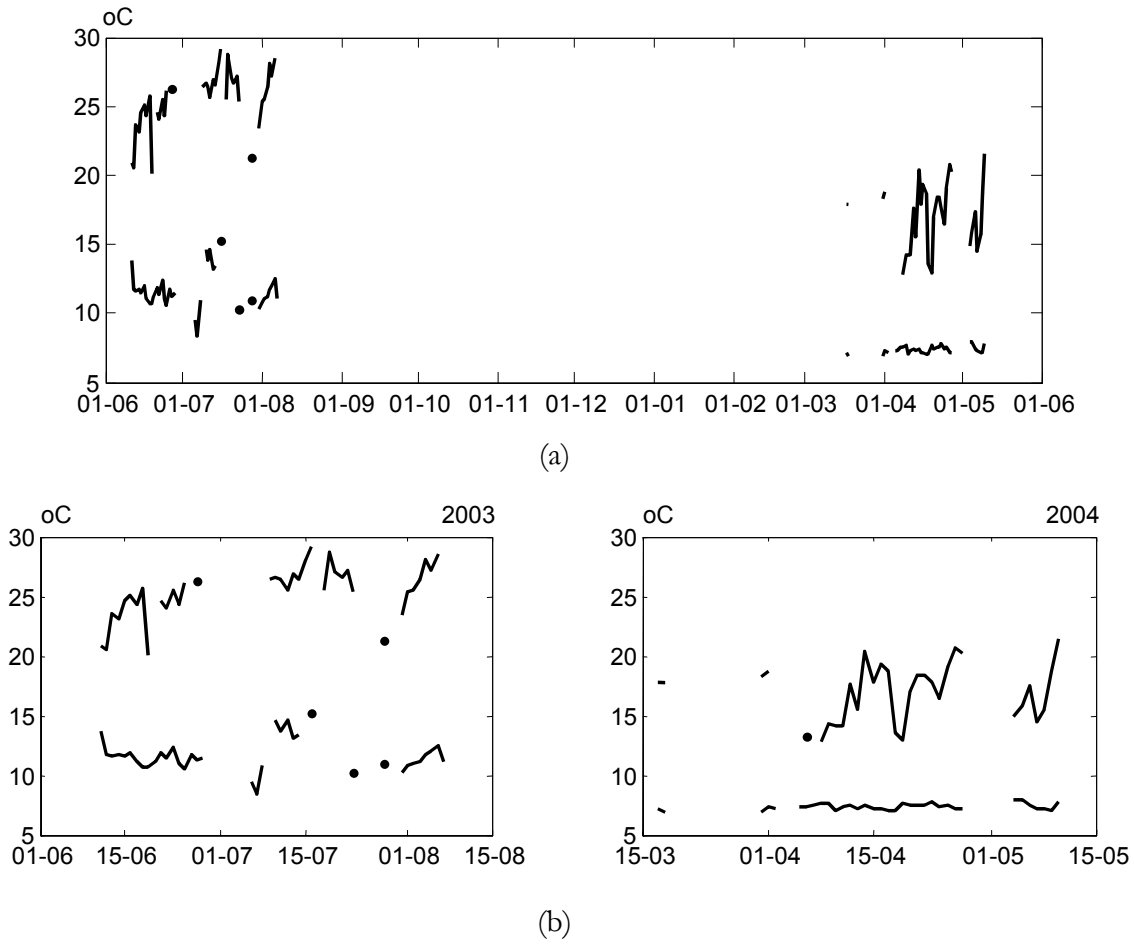



Figuur 8 Aantal draaiuren per dag van de dakbevloeiingsinstallatie gedurende de gehele meetperiode (a) en gedurende de essentiële gedeelten (b).

In de periode van 28 juni tot 7 juli heeft de installatie niet gedraaid, omdat er door de uitzonderlijk droge zomer een dermate ernstig watertekort was in het regenwaterbassin van de tuinder, dat hij zijn bassinwater volledig reserveerde voor de gietwatervoorziening. Op 25 en 26 juli heeft de installatie niet gedraaid, omdat het aggregaat door het warme weer oververhit was geraakt en daarom was afgeslagen. Vanaf 9 augustus is de tuinder helemaal gestopt met dekbesproeiing, omdat de bodem van het regenwaterbassin zichtbaar was en waterbesparing de hoogste prioriteit kreeg.

In de tweede meetserie (2004) is de installatie 10 dagen uit bedrijf geweest door werkzaamheden die aan de kas hebben plaatsgevonden (aanpassingen aan de scherminstallaties).

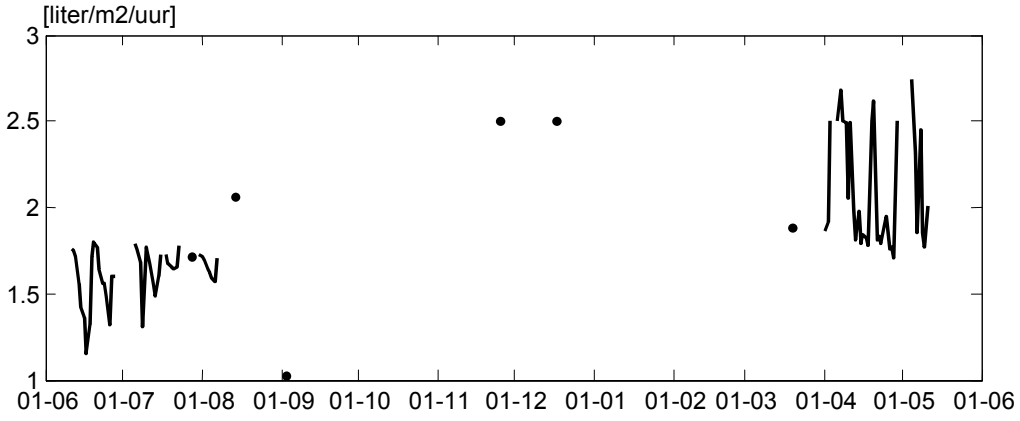
Over de gehele meetperiode is er 375 uur met metingen beschikbaar gekomen, waarvan er 295 geschikt zijn voor nadere analyse. De 80 uren die niet gebruikt konden worden zijn afgevallen omdat de koelmachine een paar dagen niet gewerkt heeft en omdat het met name in 2003 vaak voorkwam dat de installatie steeds maar voor korte tijd werd aangezet (bijvoorbeeld een kwartier per uur).
De 295 draaiuren die voor de verdere analyse worden gebruikt zijn gerealiseerd in 53 dagen. In de grafieken in Figuur 9 is weergegeven wat op die dagen de gemiddelde aanvoer- en retourtemperatuur was van het water dat in de installatie omging.



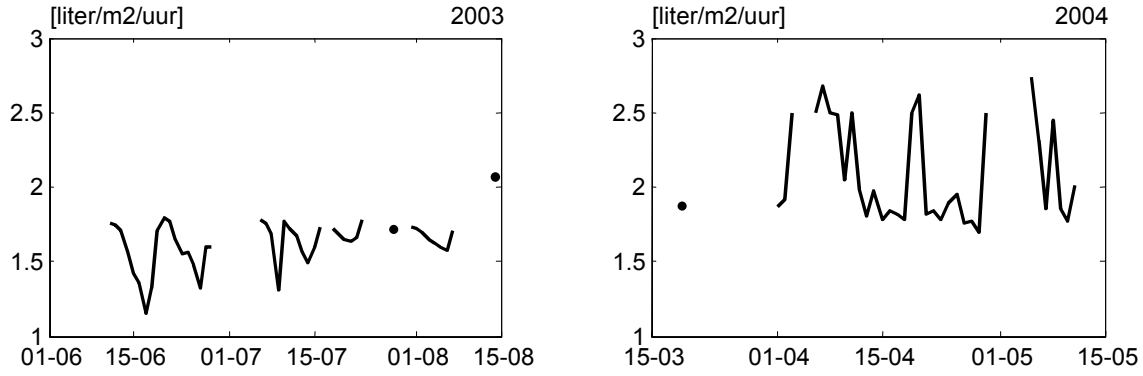

Figuur 9 Gemiddelde temperatuur waarmee het water het dek wordt opgespoten (onderste lijnen) en waarmee het water van het dek afstroomt (bovenste lijnen) gedurende de gehele meetperiode (a) en gedurende de essentiële gedeelten (b).

De eerste meetperiode werd gekenmerkt door zeer hoge buitentemperaturen en een hoge temperatuur van het water in het regenwaterbassin. De koelmachine kon daardoor vrijwel nooit

de aanvoertemperatuur onder de 10 °C krijgen. De aanvoertemperatuur was daardoor wat hoger dan oorspronkelijk was beoogd. In de tweede meetperiode (voorjaar 2004) waren de buitenomstandigheden veel milder en kon de koelmachine zonder problemen koud water van circa 7 °C maken. De hiaten in de lijnen van de grafieken worden veroorzaakt door dagen waarop de bevloeiingsinstallatie niet is gebruikt, of waarop er problemen waren met de koelmachine.




(a)

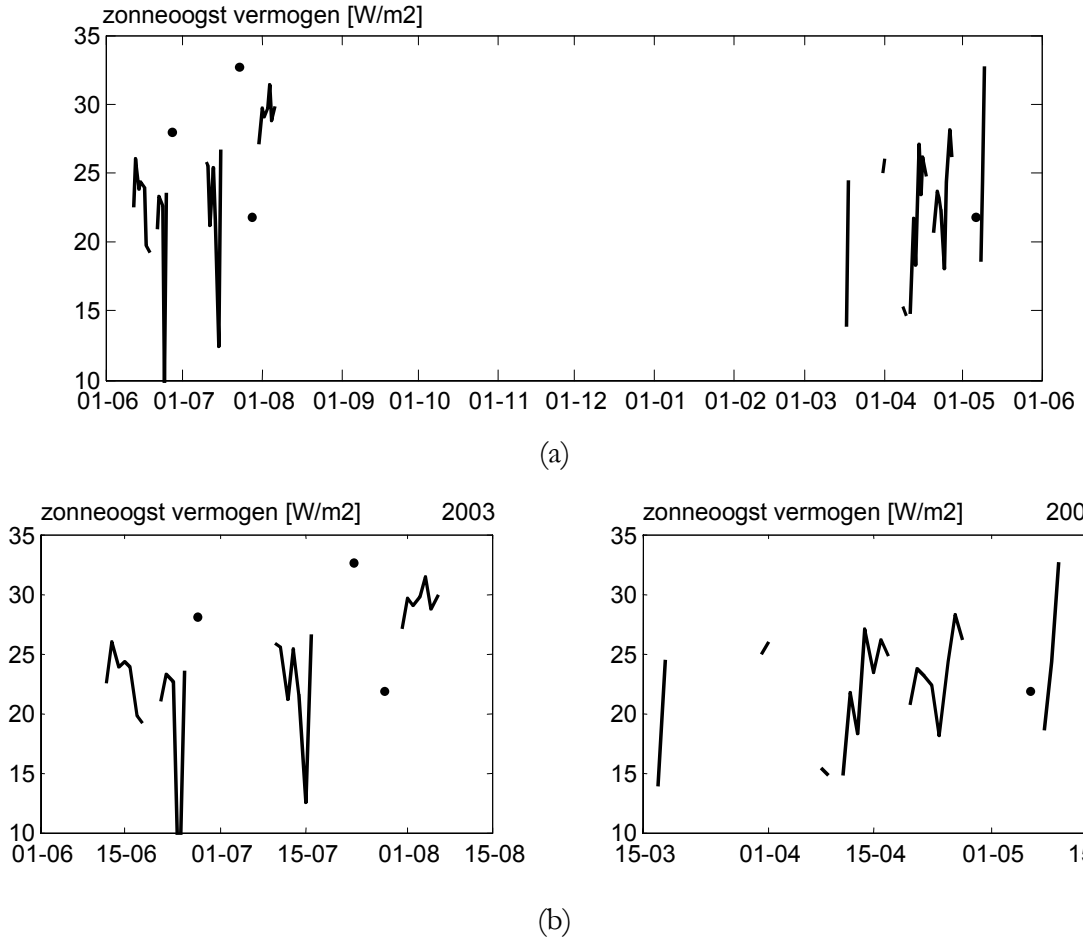



(b)

Figuur 10 Gemeten sproeidebiet gedurende de gehele meetperiode (a) en gedurende de essentiële gedeelten daaruit (b).

De combinatie van opwarming van het water en het debiet dat van het kasdek afstroomt geeft het vermogen waarmee warmte van het kasdek kan worden verzameld. Bij het ontwerp van de installatie was uitgegaan van een sproeidebiet van 2 liter/($m^2$ uur). Bij realisatie bleek echter dat er in de eerste meetperiode niet meer dan 1.8 liter/($m^2$ uur) geleverd kon worden. Bovendien liep dit maximale niveau door vervuiling van filters steeds terug. Figuur 10 toont grafieken met het gemeten sproeidebiet. Het effect van de schoonmaakbeurten van de filters is steeds goed te zien. In de tweede meetperiode lagen de sproeidebieten duidelijk hoger dan in de eerste periode. Dit komt omdat de sproeidoppen in het voorjaar allemaal zijn nagelopen en schoongemaakt.

Hierdoor gaf de installatie in het voorjaar (2004) gemiddeld bijna 1 liter per $m^2$ per uur meer. Het effect van de reiniging van het filter blijft onverminderd duidelijk zichtbaar.



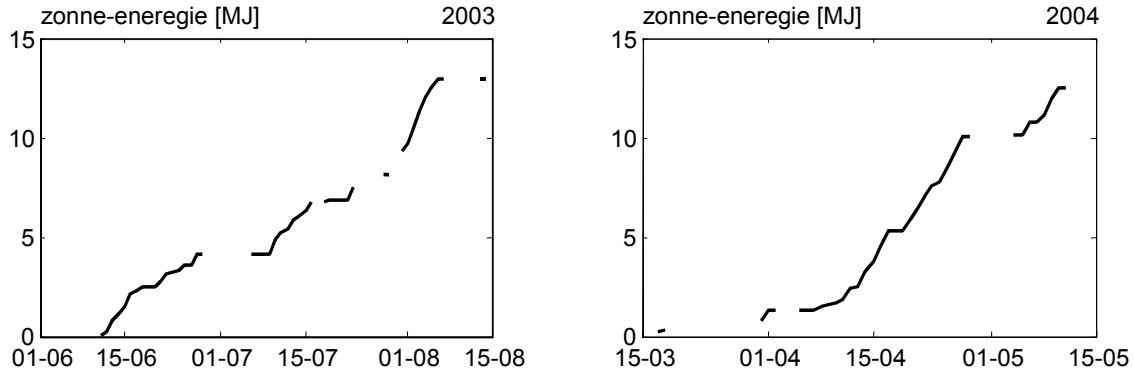

Figuur 11 Warmteverzamelvermogen van het dekbevloeiingssysteem, gemiddeld over de draaitijd van de installatie per dag voor de gehele meetperiode (a) en voor de essentiële gedeelten daaruit (b).

Het product van opwarming en sproeidebiet geeft het verzamelvermogen van zonne-energie, dat met de deksproeiers gerealiseerd kan worden. Hierbij is als debiet niet het opgespoten debiet, maar met afstromende debiet gebruikt (dus het sproeidebiet minus de verdamping). Dit omdat alleen het terugkerende water gebruikt kan worden om een aquifer op te warmen[2]. Het verdampingsverlies kon evenwel niet uit de meetdata worden afgeleid, omdat er daarvoor teveel

[2] *In de tekst wordt steeds uitgegaan van een zeker verdampingsverlies. In theorie kan bij gebruik van erg koud water en een groot debiet echter ook vocht uit de buitenlucht condenseren in de koude waterdruppels zodat het afstromende debiet groter is dan het opgespoten debiet. Dit vereist echter hoge debieten, koud water, een zeer goede verdeling en vochtige buitenlucht. Aan deze combinatie van voorwaarden zal in de praktijk zelden worden voldaan.*

problemen waren met de meting van het terugstromende debiet (zie bijlage I). Daarom is hiervoor een schatting gemaakt, uitgaande van de simulaties die in het volgende hoofdstuk worden besproken.
De grafieken in Figuur 11 laten zien dat het vermogen waarmee het dakbevloeiingssysteem duurzame energie aan het kasdek kan onttrekken rond de 20 tot 25 W/m$^2$ ligt. Het is opvallend is dat de warme maanden juli en augustus tot niet zoveel extra zonne-energie verzameling leiden in vergelijking met het voorjaar van 2004. Hierin speelt echter mee dat het opgespoten water in deze warme periode zo'n 12 °C was. Indien in die periode water van de beoogde 8 °C beschikbaar zou zijn geweest had het verzamelvermogen van zonne-energie 30 tot 40% hoger uitgekomen (dus op zo'n 35 W/m$^2$). Ook dit komt in het volgende hoofdstuk uitgebreid aan de orde.

Indien de onttrekkingsvermogens worden vermenigvuldigd met de draaiuren van de installatie, dan wordt het energieverzamelpotentieel berekend. In Figuur 12 is de cumulatieve zonne-energie verzameling in het najaar van 2003 en het voorjaar van 2004 afgebeeld.



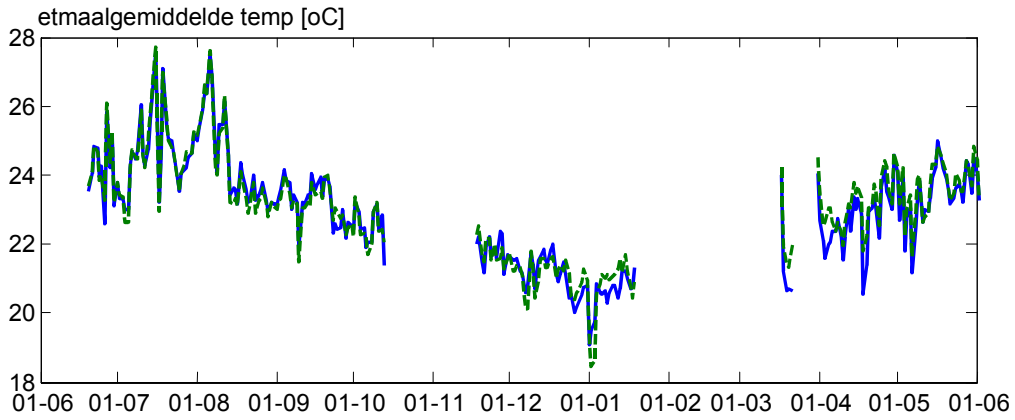

Figuur 12 Cumulatieve zonne-energie verzameling in de eerste meetperiode (links) en in de tweede meetperiode (rechts).

In de grafieken zitten een aantal gaten. Dit zijn dagen waarop de installatie niet goed gefunctioneerd heeft. Opvallend is dat de helling van de lijnen in het voorjaar hoger is dan in het warme najaar van 2003. Dit komt in de eerste plaats door het zeer terughoudend gebruik van de installatie in de periode met het grote watertekort (zomer 2003), maar ook door het feit dat het aanvoerwater in die periode niet op de beoogde 8 °C gebracht kon worden (veroorzaakt door de hoge temperatuur van het bassinwater in combinatie met de gelimiteerde koelcapaciteit van de koeler).
In totaal is in het experiment met behulp van het sproeisysteem 26 MJ/m$^2$ aan duurzame energie verzameld. Gegeven het feit dat dit in 295 uur heeft plaatsgehad was het overall gemiddelde warmteverzamelvermogen dus 25 W/m$^2$. Indien de aanvoertemperatuur altijd op 8 °C zou hebben gelegen en er geen beperkingen waren gesteld aan het aantal uren waarop de installatie kon worden ingeschakeld zouden er ruim 4 keer zoveel draaiuren met een gemiddeld groter vermogen gemaakt zijn. De totale warmteoogst zou daarmee op zo'n 120 MJ/m$^2$ per jaar kunnen

komen, zodat het gebruik van een warmtepomp in dat geval tot een energiebesparing van bijna 4 $m^3$ aardgas per $m^2$ per jaar zou leiden. Voor detailberekeningen aan deze scenario's wordt verwezen naar het volgende hoofdstuk.

### 3.4 Effect van de dekbevloeiing op de kasluchttemperatuur

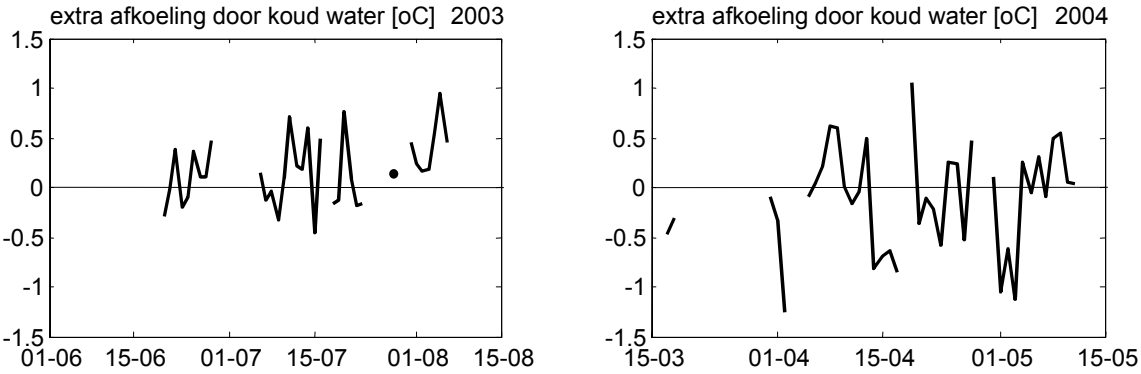
In het experiment zijn de kasluchttemperatuur en luchtvochtigheid in het behandelde gedeelte en in het onbehandelde gedeelte gemeten. Hierdoor kan worden nagegaan of de temperatuur in het behandelde gedeelte lager is wanneer de dekbevloeiing met koud water plaatsvindt. Het kan ook zijn dat de temperatuur niet lager is, maar het koelend effect van het koudere dek wordt gecompenseerd middels een verminderde ventilatie. In dat geval zou de luchtvochtigheid in het behandelde gedeelte wat hoger moeten zijn.
Figuur 13 laat de etmaaltemperaturen in de beide afdelingen zien.




Figuur 13 Etmaaltemperatuur in het behandelde gedeelte (getrokken) en in het naastliggende referentiegedeelte (gestreept). Voor beschrijving van behandelde- en referentiegedeelte: zie Figuur 6.

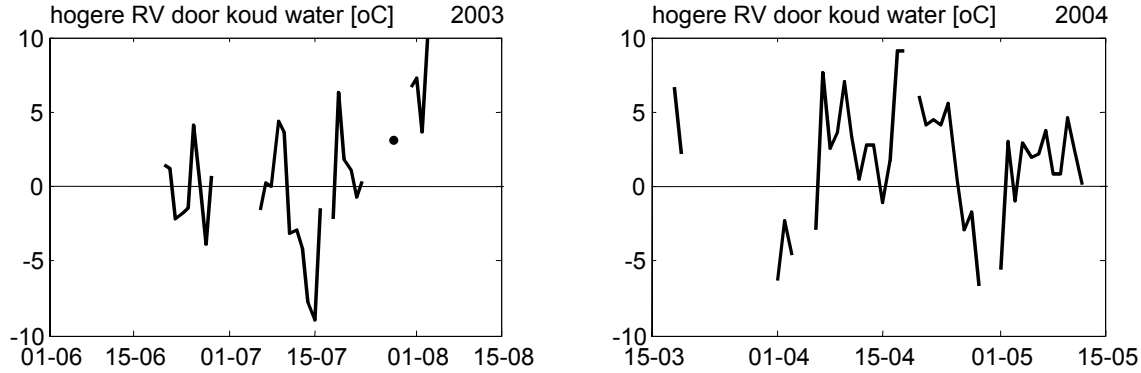
In de grafiek zijn de beide lijnen meestal niet van elkaar te onderscheiden. Op de gemiddelde etmaaltemperatuur heeft het feit of er met gekoeld, of met niet gekoeld water wordt gesproeid dan ook geen effect. Als er al enig effect zou zijn, dan zou dat echter in de etmaaltemperaturen sterk verkleind worden, omdat er binnen een etmaal ook altijd veel uren zijn, waarop de installatie niet in werking is ('s nachts en in dit experiment ook vaak overdag omdat er door het watergebrek in de zomer van 2003 zeer terughoudend is gesproeid).
Om te corrigeren voor dit effect worden in Figuur 14 grafieken gepresenteerd, die laten zien in welke mate de behandelde afdeling **op de momenten dat de sproeiers daadwerkelijk aan staan** kouder is dan de naastliggende referentieafdeling. De figuur laat zien dat over de eerste periode gezegd zou kunnen worden dat de behandelde afdeling neigt naar een kasluchttemperatuur die 0.2 tot 0.5 °C lager is dan de temperatuur in de referentieafdeling. Op een paar dagen was de behandelde afdeling echter iets warmer. In het voorjaar van 2004 tekent

zich geen systematisch verschil af, en dat terwijl juist in die periode het sproeiwater de bedoelde temperatuur van 8 °C haalde, en af en toe zelfs kouder was. De conclusie is dan ook dat het sproeien met koud water in plaats van onbehandeld bassinwater in de Bromeliateelt geen noemenswaardig effect op de kasluchttemperatuur heeft.




Figuur 14 Mate waarin de behandelde afdeling gedurende de tijd dat het sproeisysteem in werking is kouder is dan de referentieafdeling in de eerste meetperiode (links) en in de tweede meetperiode (rechts).

In Figuur 15 is het effect van de temperatuur van het sproeiwater op de luchtvochtigheid in beeld gebracht. Ook uit deze figuur blijkt dat er geen sprake is van een enigszins structureel effect van het gebruik van koud water in plaats van onbehandeld bassinwater op de luchtvochtigheid in de kas.
Aan de hand van de resultaten van de scenariostudies, die in het volgende hoofdstuk met behulp van een simulatiemodel zijn uitgevoerd, zal worden getoond dat het feit dat er nauwelijks effecten worden waargenomen voor een belangrijk deel te maken heeft met het intensieve gebruik van schaduwschermen in de Bromeliateelt. Volgens de berekeningen aan een ongeschermde groenteteelt lijkt het effect wat groter.




Figuur 15 Mate waarin de behandelde afdeling gedurende de tijd dat het sproeisysteem in werking een hogere RV heeft dan de referentieafdeling in de eerste meetperiode (links) en in de tweede meetperiode (rechts).

# 4 Validatie van het simulatiemodel KASPRO met behulp van de meetresultaten

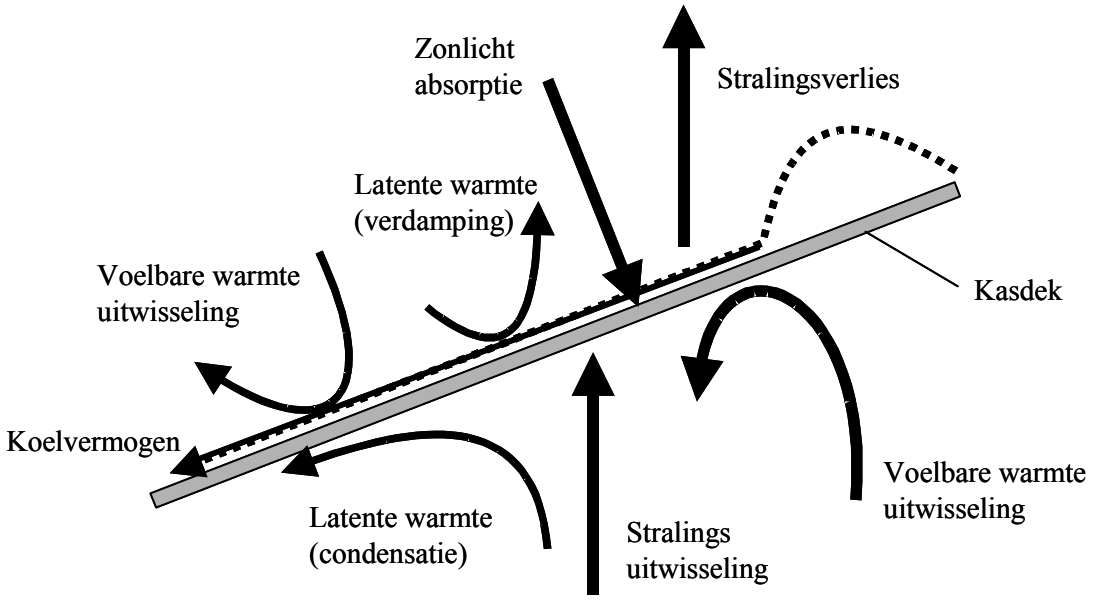
**Inleiding**

Meetresultaten van een kasexperiment geven altijd alleen informatie over effecten van het bestudeerde in een gegeven kas, bij een gegeven teelt en in een specifiek jaar. Om algemenere uitspraken te kunnen doen, en daarmee perspectieven te kunnen schetsen is het noodzakelijk over een voorspellend model te beschikken.
In het project "Kaskoeling en aquiferlading door middel van een dakbevloeiingssysteem" is daartoe het A&F kasklimaatsimulatiemodel KASPRO uitgebreid met een module die het fysisch gedrag van een dekbevloeiingsinstallatie beschrijft. In dit hoofdstuk wordt deze uitbreiding beschreven met betrekking tot het fysisch model en met betrekking tot de regeling die het gebruik van zo'n systeem vereist.
Vervolgens worden de resultaten van het aldus uitgebreide model vergeleken met de meetresultaten. Deze worden als zodanig betrouwbaar bestempeld dat van het model mag worden verwacht dat het de juiste perspectieven schetst voor de potenties van dekbevloeiingsinstallaties in andere gewassen, andere klimaatomstandigheden en andere sproeicapaciteiten. Deze exercities worden in hoofdstuk 5 gepresenteerd.

## 4.1 Modelmatige beschrijving van een dekbevloeiingssysteem

Wanneer het kasdek wordt besproeid met koud water wordt een groot koud oppervlak gecreëerd. Naarmate dit oppervlak kouder is neemt de warmteoverdracht naar het kasdek toe via convectie vanuit de kaslucht en via straling vanaf oppervlakken in de kas. Ook aan de bovenkant van het kasdek zal de warmte-uitwisseling met de omgeving veranderen met de temperatuur van het kasdek. De energiestromen die in dit proces een rol spelen zijn geschetst in Figuur 16.
In de figuur is geen onderscheid gemaakt tussen de temperatuur aan de bovenkant en aan de onderkant van het dek. Bij gebruik van enkel glas is dit geoorloofd omdat de warmteoverdracht van de ene naar de andere kant van de glasplaat 200 W/K bedraagt en dus bij koelvermogens die in de orde van 40 W/m$^2$ liggen de temperaturen hooguit 0.2 °C zullen verschillen.
Aan beide zijden van het glas vindt voelbare en latente warmteoverdracht plaats. Aan de binnenzijde zal er meestal sprake zijn van condensatie vanwege de hoge luchtvochtigheid van de kaslucht. Aan de buitenkant zal er vaak verdamping plaatsvinden, maar als de buitenlucht warm en vochtig is zal ook daar nog condensatie plaatsvinden.
Naast de bovengenoemde fluxen draagt ook de absorptie van zonlicht door het dek bij aan de opwarming van het water. Schoon glas absorbeert zo'n 4% van het zonlicht en enigszins vervuild glas nog wat meer, zodat deze warmteflux naar het kasdek al gauw meer dan 10 W/m$^2$ is en daarmee een wezenlijke bijdrage levert.
In het plaatje is niet opgenomen dat het water, nadat het over het kasdek is gestroomd, in de goot terecht komt. De bodem van de goot absorbeert zonlicht, zodat ook hierdoor nog enige extra

opwarming plaatsvindt. De goot heeft echter, net als het kasdek ook een verlies van warmte wanneer het water warmer is dan de omgeving.




Figuur 16 Schematische weergave van de warmte-uitwisselingsprocessen rond een kasdek waarop een sproei-installatie is aangebracht.

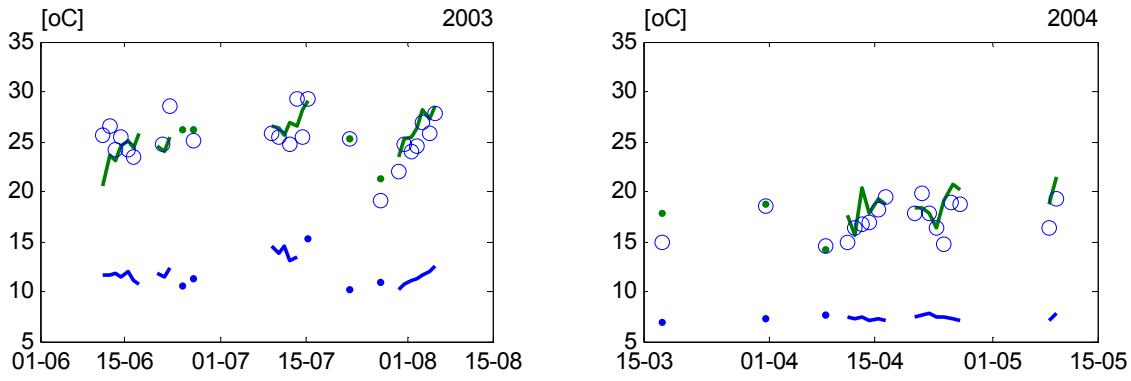
Figuur 16 toont de situatie in een kas zonder scherm. In de Bromeliateelt wordt echter intensief gebruik gemaakt van schaduwschermen. In de breedkapper zoals die door het praktijkbedrijf wordt gebruikt, ligt dit scherm aan de binnenzijde langs het dek. Dit leidt tot een belangrijke vermindering van de hoeveelheid warmte die aan het dek geoogst kan worden omdat de reflecterende schaduwschermen een groot deel van het invallende zonlicht niet absorberen, maar reflecteren. Ook dit effect is in het simulatiemodel meegenomen, maar staat feitelijk los van het fysisch model rond het deksproeisysteem.

Bij de bepaling van het moment waarop de dekbevloeiing in werking wordt gesteld, neemt het simulatiemodel twee criteria in beschouwing. In de eerste plaats moet de temperatuur in de kas boven de ventilatietemperatuur zijn uitgekomen. In dat geval is er immers sprake van een ongewenst warmteoverschot. In de tweede plaats moet de dektemperatuur hoger zijn dan 13 °C. Deze temperatuur is gesteld omdat anders op erg inefficiënte wijze warmte wordt verzameld en de opslagcapaciteit van het aquiferdoublet zeer slecht wordt benut.
Wanneer een dekbevloeiingssysteem wordt aangelegd met een groot maximaal debiet (bijvoorbeeld meer dan 4 liter/($m^2$ uur)), kan het vaak voorkomen dat bij uitgeschakelde sproeiers aan beide voorwaarden wordt voldaan terwijl bij ingeschakelde sproeiers het

terugstromend water niet boven de 13 °C uit komt. In dat geval regelt de besturing het debiet terug tot een minimumniveau dat 50% van de maximale waarde bedraagt.

## 4.2 Vergelijking van modelresultaten met metingen

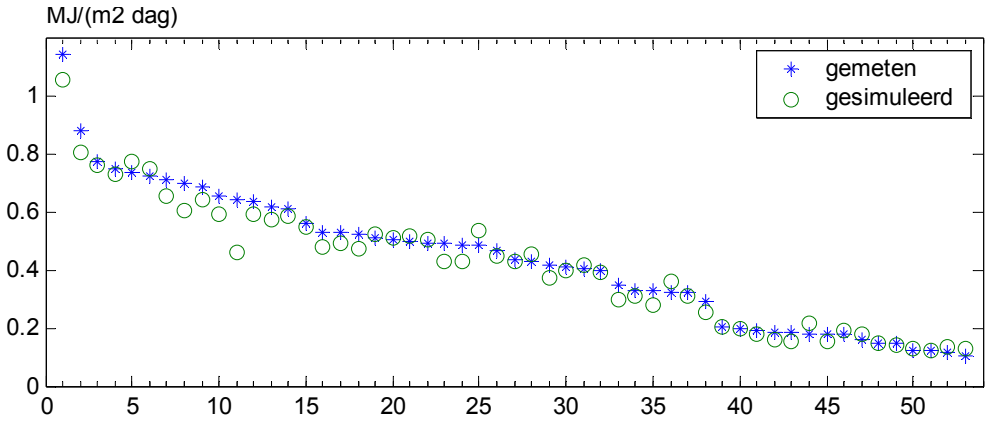
Met het in § 4.1 beschreven model is het gedrag van een dekbevloeiingssysteem gesimuleerd onder de condities die zich ook in het experiment hebben voorgedaan. Om de vergelijking op een juiste manier uit te voeren moeten het sproeidebiet en de momenten waarop de installatie in werking wordt gesteld niet door het simulatiemodel worden bepaald (zoals normaliter met de hierboven beschreven regelaar gebeurt), maar gesynchroniseerd worden met de situatie in het praktijkexperiment. Het model berekent vervolgens de temperatuur van het water dat het dek af stroomt, die vergeleken kan worden met de gemeten temperatuur, waarmee het water van het dek af stroomt.
In de grafieken in Figuur 17 is het resultaat van deze exercitie getoond. De onderste lijnen in de grafieken geven de temperatuur van het opgespoten water aan. Doordat deze temperatuur aan het model is opgedrukt zijn model en metingen per definitie gelijk. Daarom is hier dus slechts één lijn te onderscheiden.
De getrokken bovenste lijn is de gemiddelde gemeten temperatuur van het water dat van het dek af stroomde. De getrokken lijnen zijn dus dezelfde als de lijnen die in Figuur 9 zijn getoond. De open rondjes zijn de gemiddelde afstromende temperaturen, zoals die door het model zijn berekend.




Figuur 17 Opgespoten watertemperatuur (onderste lijnstukken) en terugkomende dagelijks gemiddelde watertemperatuur volgens de metingen (bovenste lijnstukken) en volgens het model (open rondjes) in de eerste meetperiode (links) en in de tweede meetperiode (rechts).

De conclusie die uit de grafieken getrokken kan worden is dat het simulatiemodel in de regel een temperatuur berekent die erg dicht bij de gemeten temperatuur ligt. Op sommige dagen wijkt de gemeten temperatuur echter nogal af van de berekende temperatuur. Dit is zorgelijk wanneer dat nou net dagen zijn waarop heel veel liters water zijn versproeid. Een graad afwijking geeft dan

immers een fout van zo'n 10% in de hoeveelheid zonne-energie die verzameld is. Als de dagen met grote verschillen, die dagen zijn waarop weinig water is versproeid, is het probleem minder groot. Dit in de eerste plaats omdat in die omstandigheden de gemeten temperatuur van het water dat het dek af stroomt nogal onbetrouwbaar is. Dit is een gevolg van het feit dat het water in de meting van het dek afstroomt en vervolgens enige tijd in de onder de grond lopende regenleiding verblijft voordat het in de toogconstructie wordt opgepompt en gemeten wordt. Kleine hoeveelheden water ondervinden dan een grote invloed van de bodemtemperatuur rond de regenpijp. In de tweede plaats is een verkeerd berekende afstromende temperatuur op dagen waarop een kleine hoeveelheid water is versproeid niet zo'n probleem, omdat dit hooguit tot een kleine afwijking in de berekende hoeveelheid zonne-energie leidt.
Om te analyseren of de af en toe groot lijkende afwijkingen die in Figuur 17 naar voren komen een serieus probleem vormen, zijn de gesimuleerde en de gemeten opwarming vermenigvuldigd met de hoeveelheid water die van het dek is afgestroomd en vervolgens omgerekend tot een hoeveelheid zonne-energie die per dag volgens het model en volgens de metingen verzameld is. Figuur 18 toont de resultaten gesorteerd naar afnemende verzamelde zonne-energie om gemakkelijker trends te kunnen herkennen.




Figuur 18 Vergelijking tussen gemeten en gesimuleerde dagelijks verzamelde hoeveelheid zonne-energie volgens het model en volgens de metingen op de 53 geschikte meetdagen. De data zijn gesorteerd op afnemende waarde.

De grafiek leidt tot de conclusie dat het model tot een erg goede benadering komt van de hoeveelheid zonne-energie die vanaf het dek kan worden verzameld.
Gezien het feit dat deze resultaten zijn behaald met een volledig op reële fysische relaties gebaseerd simulatiemodel kan het model goed worden gebruikt om extrapolaties uit te voeren ten behoeve van de bepaling van het perspectief in de Bromeliateelt onder andere klimaatomstandigheden en voor andere teelten.

# 5 Scenarioanalyse

**Inleiding**

In de gangbare tuinbouwpraktijk worden deksproeiers gebruikt om de nadelige effecten van extreme weersomstandigheden te dempen. Deze sproeiers brengen dan in de regel water uit het gietwaterbassin op het dek, waar een deel van dit water zal verdampen. Het koelvermogen wordt in dit geval vrijwel geheel gerealiseerd door de warmte-onttrekking ten gevolge van de verdamping.

Bij het gebruik van gekoeld water zal het verdampingsverlies belangrijk afnemen. Simulatieberekeningen laten zien dat er niet zozeer een vermindering van de verdamping vanaf het kasdek plaats zal vinden, maar vooral een vermindering van de verdamping van water dat vanaf de sproeier door de lucht onderweg is naar het kasdek. De verdamping vanaf het kasdek komt volgens de simulatieberekeningen namelijk zelden boven de 100 gram/($m^2$ uur), terwijl de praktijk vertelt dat verdampingsverliezen kunnen oplopen tot 1 liter/($m^2$ uur).

Indien de beperking van het verdampingsverlies de noodzaak verminderd, om terughoudend met het gebruik dekbevloeiing om te gaan, kan het aantal draaiuren van het sproeisysteem fors worden vergroot. In dat geval kan een veelvoud aan zonne-energie worden verzameld ten opzichte van de hoeveelheid die in het experiment op het bedrijf van Ronald Bunnik is gemeten.

In § 5.1 wordt het perspectief geschetst van het gebruik van de deksproeiers wanneer als criterium wordt gehanteerd, dat de sproeiers in werking worden gesteld, zodra de kasluchttemperatuur boven de ventilatielijn uit komt en dus een warmteoverschot heeft. Deze gebruikswijze maximaliseert het verzamelen van duurzame energie.

In § 5.2 wordt een soortgelijke exercitie gedaan voor de tomatenteelt, dat als representatief gewas wordt gehanteerd voor de energie-intensieve glasgroenten sector.

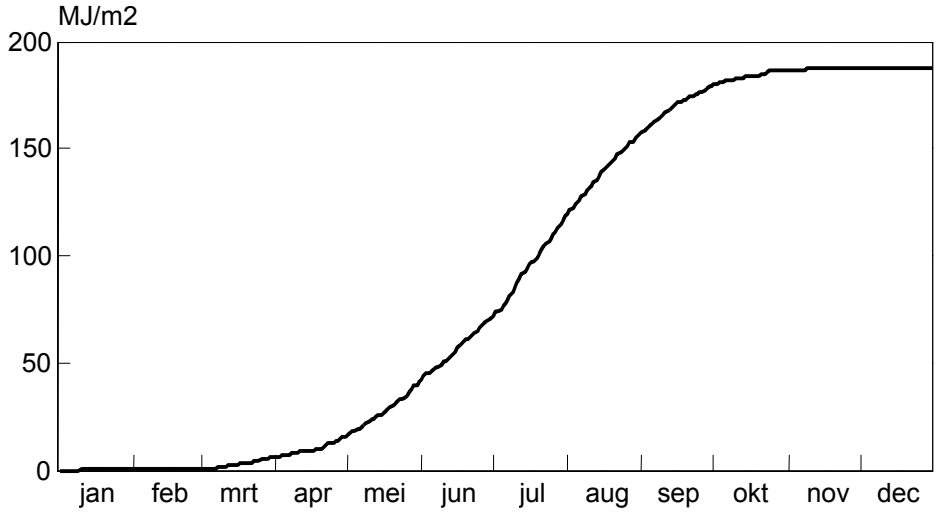
In § 5.3 worden de conclusies uit de scenarioanalyse gepresenteerd, waarmee tevens een goed beeld wordt gegeven van de bijdrage die deksproeiers kunnen leveren in de verduurzaming van de sector.

## 5.1 Perspectieven van deksproeiers voor de verzameling van duurzame energie in de Bromeliateelt

Het gebruik van koud water maakt het mogelijk om zonder veel waterverlies een groot aantal draaiuren te maken.

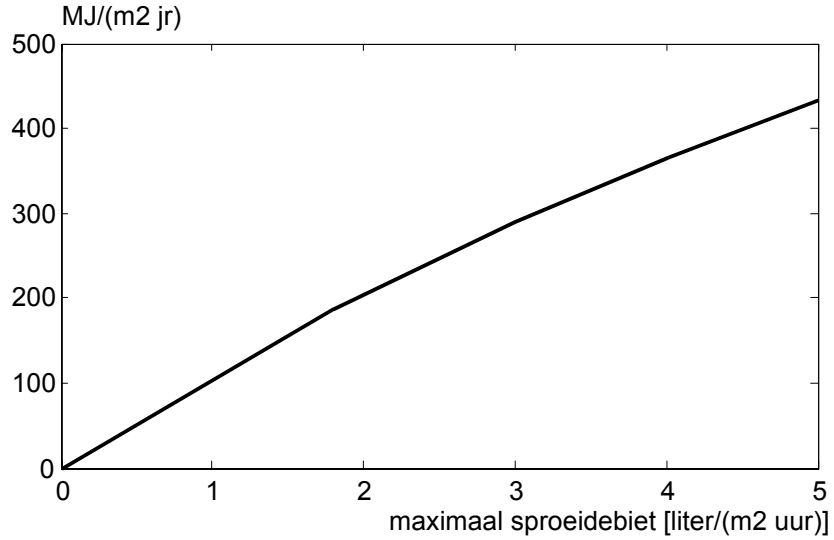
Figuur 19 toont de simulatieresultaten van de hoeveelheid zonne-energie die met een installatie, zoals aanwezig bij Ronald Bunnik Bromelia's, verzameld kan worden in geval de installatie wordt gebruikt zodra de kas te warm wordt en het water met minimaal 13 °C terug komt (dit is de besturing die in § 4.1 is beschreven).

Figuur 19 laat zien dat met het intensief gebruik van de standaard deksproei-installatie 187 MJ/$m^2$ aan duurzame energie verzameld kan worden. Dit gebeurt in 2000 draaiuren, waarmee kan worden geconcludeerd dat het overall gemiddelde warmteonttrekkingsvermogen van een systeem met 1.8 liter/($m^2$ uur) in dit geval bijna 26 W/$m^2$ is.




Figuur 19 Cumulatieve hoeveelheid duurzame energie die in een standaard Nederlands jaar op een bedrijf als Ronald Bunnik Bromelia's verzameld kan worden met deksproeiers die 1.8 liter water per $m^2$ per uur opbrengen bij een opgespoten watertemperatuur van 8 °C.

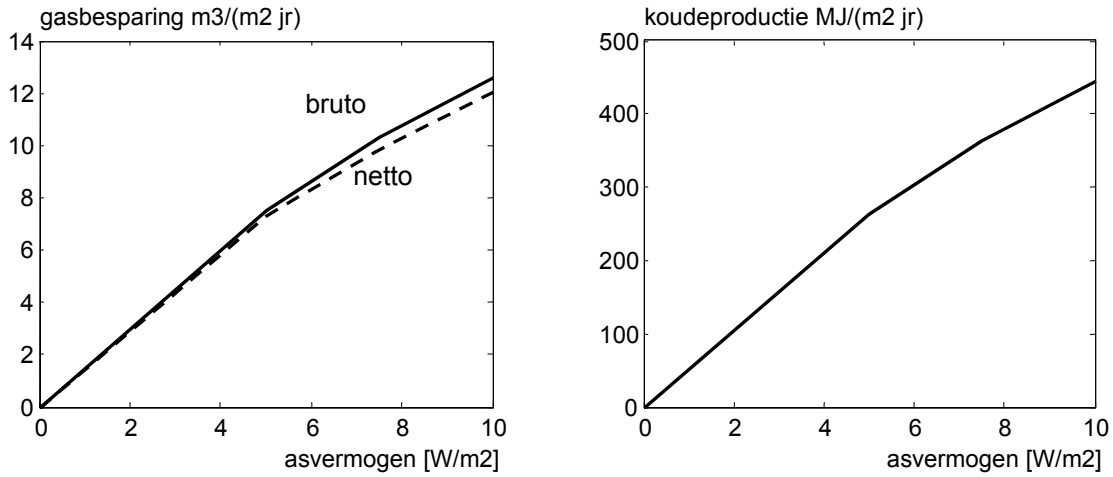
In warme perioden van het jaar komt het echter regelmatig voor dat het water erg warm van het dek afstroomt (tot 25 °C toe, zie Figuur 17). Dit betekent dat het kasdek niet erg koud gehouden kan worden en dus de warmteonttrekkingscapaciteit beperkt is. Een vergroting van het maximale waterdebiet (door meer sproeiers of andere typen sproeiers te plaatsen) zal op die momenten leiden tot een vergroting van de hoeveelheid zonne-energie die verzameld kan worden. Hoe de jaarlijkse warmteonttrekking toeneemt met de vergroting van het maximale sproeidebiet wordt in Figuur 20 getoond.




Figuur 20 Zonne-energie verzameling door middel van deksproeiers als functie van het maximale sproeidebiet bij een opgespoten watertemperatuur van 8 °C.

Figuur 20 laat een gestaag toenemende lijn zien, hoewel naar het eind toe al enige afbuiging zichtbaar wordt. De lijn is niet verder doorgetrokken omdat een sproeisysteem dat 5 liter per $m^2$ per uur afgeeft al een forse uitbreiding ten opzichte van de gangbare praktijk betekent, zodat nog grotere debieten steeds moeilijker realiseerbaar zullen worden.

Wanneer nu Figuur 3 in herinnering wordt teruggeroepen, zal het duidelijk zijn dat pas nadat in de winter gebruik wordt gemaakt van een warmtepomp de verzamelde zonne-energie een bijdrage kan gaan leveren in de besparing van primaire energie. In Figuur 21 wordt een grafiek getoond van de te behalen energiebesparing met een warmtepomp, in afhankelijkheid van het asvermogen en een grafiek voor de hoeveelheid warmte die zo'n warmtepomp aan een ondergronds energieopslagsysteem onttrekt. In de linker grafiek is een bruto gasbesparing getekend en een netto gasbesparing. Bij de netto gasbesparing is rekening gehouden met het primaire energieverbruik dat gepaard gaat met het verpompen van water over het ondergronds energieopslagsysteem (zowel in de winter als in de zomer). Hierbij is een elektriciteitsverbruik van 0.4 MJ per verpompte $m^3$ aangehouden en wordt een centralerendement van 0.43 aangehouden.




Figuur 21 Jaarlijkse gasbesparing en jaarlijkse koudeproductie (=regeneratiebehoefte) van een gasmotor aangedreven warmtepomp in de Bromeliateelt in een kas zoals die van Ronald Bunnik Bromelia. Het referentieverbruik in een gemiddeld jaar bedraagt 53 $m^3$ per $m^2$ kas. Het verschil in de bruto en de netto besparing zit in het primaire energieverbruik voor het verpompen van water over het ondergronds energieopslagsysteem.

Figuur 21 laat een duidelijk afbuigende lijn zien. Het aandeel van de warmtepomp in de verwarming van kassen is namelijk beperkt doordat de ketel ook wordt gebruikt voor CO2-dosering. Dit betekent dat de warmtepomp in de warmere perioden van het jaar bijna niet gebruikt kan worden. Ook het feit dat de warmtepomp slecht werkt bij hoge gewenste buistemperaturen zorgt voor een afvlakking van de kromme. De extra energiebesparing die een

zwaardere machine oplevert wordt immers behaald in perioden met hogere warmtevraag, en dus perioden met hogere buistemperatuur. Dit zijn nou juist perioden waar de COP van de warmtepomp terugloopt en dus de energiebesparing beperkt is.
Door combinatie van Figuur 21 met Figuur 20 kan een tabel worden opgesteld waarmee de juiste warmtepomp wordt gekozen bij elk sproeidebiet. Ook kan dan per sproeidebiet de te behalen energiebesparing worden bepaald. Het resultaat is weergegeven in Tabel 1.

Tabel 1 Asvermogen van en netto energiebesparing door de gasmotorwarmtepomp die past bij de duurzame energie verzameling van deksproeiers in de Bromeliateelt in afhankelijkheid van het maximale sproeidebiet.

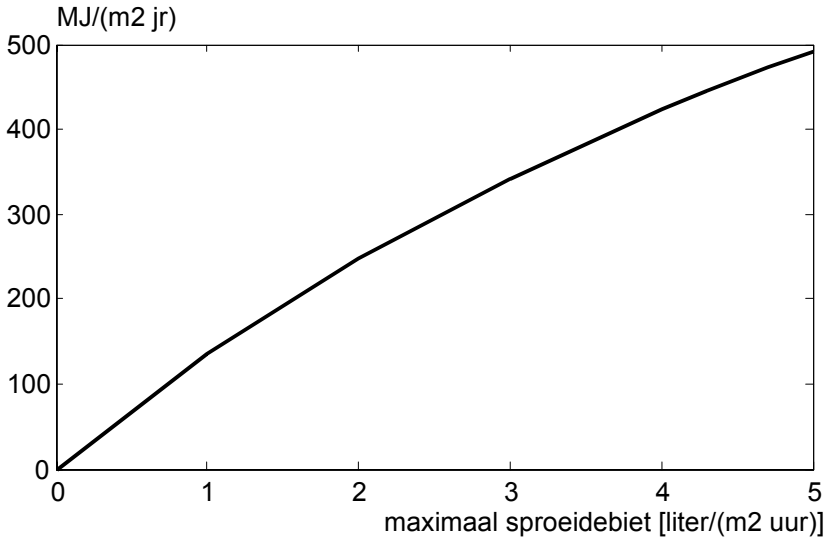
| Maximaal sproeidebiet [liter/($m^2$ uur)] | Asvermogen gasmotor WP [W/$m^2$] | Primaire energiebesparing [$m^3$/($m^2$ jr)] |
|---|---|---|
| 1.8 | 3.5 | 5.2 (10%) |
| 2 | 3.7 | 5.6 (11%) |
| 3 | 5.7 | 8.0 (15%) |
| 4 | 7.6 | 10 .0 (19%) |
| 5 | 9.6 | 11.7 (22%) |

De tabel geeft aan dat met het deksproeisysteem dat in de standaardsituatie bij Ronald Bunnik Bromelia's aanwezig is, bij gebruik van gekoeld water en een gasmotor aangedreven warmtepomp een besparing op primair energiegebruik van 10% gerealiseerd kan worden (5.2 $m^3$ aardgas per $m^2$ per jaar). Wanneer het maximale sproeidebiet wordt vergroot naar 5 liter per $m^2$ per uur, kan tot 22% energiebesparing worden gerealiseerd (11.7 $m^3$ aardgas per $m^2$ per jaar).
In hoofdstuk 6 wordt aan deze besparingspotenties een bedrijfseconomische analyse gekoppeld.

## 5.2 Perspectieven van deksproeiers voor duurzame energie in de tomatenteelt

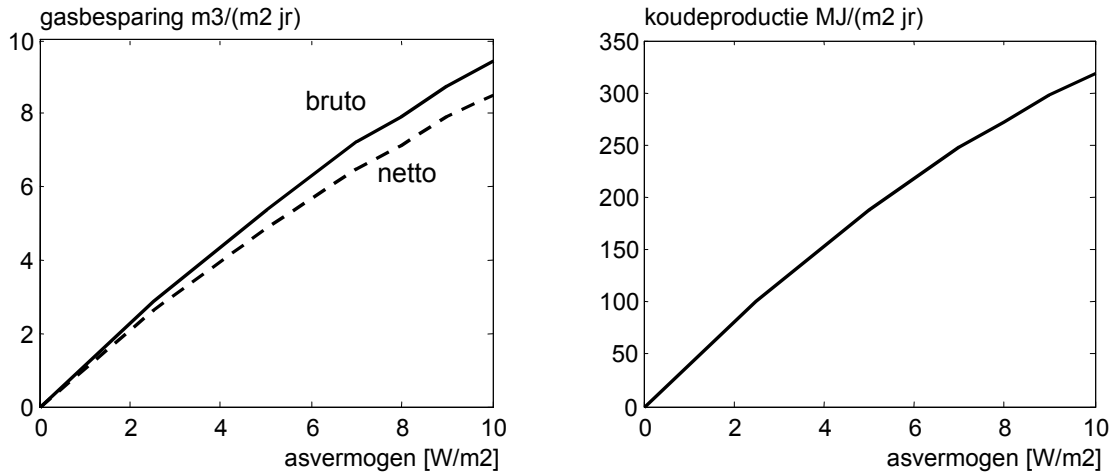
In de vorige paragraaf kwamen voor de Bromeliateelt grote besparingspotentiëlen naar voren. Er is echter slechts een beperkt glasareaal waarop dit gewas gekweekt wordt. Daarom wordt in dit rapport een uitstap gemaakt naar de berekening van het perspectief van dekbevloeiing in de tomatenteelt. Dit gewas vormt met ruim 1200 ha, samen met paprika (eveneens ruim 1200 ha), de grootste gewasgroep in de Nederlandse tuinbouw.
In de tomatenteelt wordt erg veel gelucht, omdat voor een optimale groei en ontwikkeling van de tomaat gemiddelde etmaaltemperaturen van rond de 20 °C gewenst zijn (vergelijk dit met Figuur 13, waaruit blijkt dat de etmaaltemperaturen bij de Bromeliateelt heel wat hoger zijn). De grotere ventilatiebehoefte maakt dat het aantal draaiuren groter is. Het simulatiemodel berekent deze op ruim 2600 uur per jaar. Daar staat echter wel tegenover dat de kaslucht kouder zal zijn dan in de Bromeliateelt en het gemiddeld vermogen waarmee warmte aan het kasdek kan worden onttrokken navenant lager.

In Figuur 22 wordt de verzamelcapaciteit van zonne-energie van kasdekbevloeiing in de tomatenteelt getoond.




Figuur 22 Zonne-energie verzameling door middel van deksproeiers als functie van het maximale sproeidebiet in de tomatenteelt. De opgespoten watertemperatuur is 8 °C.

In vergelijking met Figuur 20 valt op dat de curve grofweg dezelfde vorm heeft en wat hoger uitkomt. De toename van de hoeveelheid verzamelde zonne-energie is ongeveer 10%. De toename van het aantal draaiuren is meer dan 25%. Hieruit blijkt dus ook kwantitatief dat de gemiddelde warmteonttrekkingscapaciteit in de tomatenteelt kleiner is dan in de Bromeliateelt gerealiseerd kan worden.
Ook hier geldt dat de hoeveelheid verzamelde zonne-energie pas waarde heeft in termen van primaire energiebesparing, als er met behulp van een warmtepomp gebruik wordt gemaakt van de deze warmte. In Figuur 23 is een soortgelijke figuur gegenereerd als Figuur 21. Het belangrijkste verschil hiermee is dat de besparingspotentie bij een warmtepomp met een gelijk asvermogen in de tomatenteelt veel lager ligt dan in de Bromeliateelt. Dit komt doordat de warmtepomp in de tomatenteelt nog veel meer gehinderd wordt door het gebruik van de ketel voor $CO_2$-dosering. Immers in de tomatenteelt wordt, anders dan in de Bromeliateelt, gebruik gemaakt van grote warmtebuffers. Deze buffers worden in de warmere periode overdag geheel gevuld tijdens de $CO_2$-dosering, met als gevolg dat in de periode mei t/m september bijna 100% van de warmtevraag vanuit de buffer wordt geleverd.
Uit de vergelijking van de koudeproductie (rechter grafiek in Figuur 23) en de regeneratie die een kasdekbevloeiingssysteem in de tomatenteelt kan leveren, blijkt dat de koudeproductie (en feitelijk de $CO_2$-behoefte) veruit de belangrijkste beperkende factor is voor het besparingspotentieel.




Figuur 23 Jaarlijkse gasbesparing en jaarlijkse koudeproductie (=regeneratiebehoefte) van een gasmotor aangedreven warmtepomp in de tomatenteelt. Het referentieverbruik in een gemiddeld jaar bedraagt 43 $m^3$ per $m^2$ kas. Het verschil tussen de bruto en de netto besparing zit in het primaire energieverbruik voor het verpompen van water over het ondergronds energieopslagsysteem.

Door combinatie van Figuur 22 met Figuur 23 kan een tabel worden opgesteld, waarmee de juiste warmtepomp wordt gekozen bij elk sproeidebiet. Ook kan dan per sproeidebiet de te behalen energiebesparing worden bepaald. Het resultaat van deze exercitie wordt getoond in Tabel 2.

Tabel 2 Asvermogen van en netto energiebesparing door de gasmotorwarmtepomp die past bij de duurzame energie verzameling van deksproeiers in de tomatenteelt in afhankelijkheid van het maximale sproeidebiet.

| Maximaal sproeidebiet [liter/($m^2$ uur)] | Asvermogen gasmotor WP [W/$m^2$] | Primaire energiebesparing [$m^3$/($m^2$ jr)] |
|---|---|---|
| 1 | 3.5 | 3.5 (8%) |
| 2 | 7.0 | 6.5 (15%) |
| 2.5 | 8.9 | 7.8 (18%) |
| 3 | >10 en daardoor n.v.t | - |

Tabel 2 laat zien dat de toepassing van het concept dat in dit rapport beschreven wordt, procentueel gezien tot vergelijkbare resultaten komt als in de Bromeliateelt, maar dat de besparingen in absolute zin kleiner zijn. Ook is het duidelijk dat er een zwaardere warmtepomp nodig is om tot een vergelijkbare gasbesparing te komen.

Dit alles komt met name door de centrale rol van de buffer en de ketel in verband met $CO_2$-dosering, maar ook omdat het verbruiksniveau in de tomatenteelt al een stuk lager ligt dan in de Bromeliateelt. De beduidend lagere stooktemperaturen maken het aantal uren waarop de verwarming wordt gebruikt kleiner en de warmtepompcapaciteit die nodig is om een substantiële bijdrage te leveren navenant groter.
Omdat het aantal draaiuren groter is en de regeneratiebehoefte in absolute zin geringer is, kan in de tomatenteelt evenwel met een kleiner bemeten sproeisysteem worden gewerkt.
Een sproeisysteem met een gangbaar sproeidebiet van 2 liter/($m^2$ uur) verzamelt in de tomatenteelt 250 MJ duurzame energie per $m^2$ per jaar en kan, in combinatie met een warmtepomp van 7 W/$m^2$ asvermogen een netto energiebesparing realiseren van 6.5 $m^3$ per $m^2$ per jaar.

## 5.3 Conclusies

De bovenbeschreven modelmatige scenariostudies laten zien dat de regeneratie van een ondergronds energieopslagsysteem dat in de winter met een gasmotor aangedreven warmtepomp is uitgekoeld in de zomer goed kan worden geregenereerd met behulp van in de praktijk beschikbare dekbesproeiingssystemen.
In de bromeliateelt kan op deze manier met een sproeisysteem dat met vergelijkbare technologie als de gangbare systemen op de nok van de kas kan worden gemonteerd een netto primaire energiebesparing van bijna 12 $m^3$ per $m^2$ per jaar worden gerealiseerd (meer dan 20% van het verbruik in de bromeliateelt).
In de tomatenteelt kan maximaal bijna 8 $m^3$ aardgas equivalenten aan primaire energie worden bespaard (zo'n 18% van het jaarverbruik).
In de bromeliateelt lijkt vooral de zonne-energieverzamelingscapaciteit de bovengrens te leggen aan het potentieel, terwijl in de tomatenteelt de beperkte inzetbaarheid van de warmtepomp een begrenzing vormt voor het energiebesparingsperspectief.
Voor het behalen van de genoemde besparing is een warmtepomp met een asvermogen in de orde van 10 W/$m^2$ vereist (ongeveer 400 kW thermisch per ha).

# 6 Bedrijfseconomische beschouwing

**Inleiding**
In de vorige hoofdstukken is gebleken dat het door A&F ontwikkelde simulatiemodel, dat zeer goed vergelijkbare resultaten geeft vergeleken met metingen, perspectiefvolle besparingspotentiëlen berekent. De berekeningen zijn gedaan voor een bromelia en voor een tomatenteelt. In dit hoofdstuk worden de bedrijfseconomische perspectieven berekend bij de energie-resultaten die in tabel 1 en tabel 2 zijn genoemd.
In § 6.1 worden de gehanteerde uitgangspunten beschreven en in § 6.2 worden de daarmee behaalde resultaten gepresenteerd.

## 6.1 Bedrijfseconomische uitgangspunten

### *6.1.1 Installaties en energie*
Het energiezuinige concept dat in dit rapport wordt besproken vereist het drie onderscheidbare investeringen, namelijk een warmtepomp, een ondergronds energieopslagsysteem en deksproeiers. Met de eerste twee componenten is in de tuinbouw nog weinig ervaring, zodat er nog niet zo'n duidelijk beeld is van de kosten die hiervoor in rekening moeten worden gebracht. In het onlangs afgeronde project Energiebesparing Op Maat (Swinkels, 2004) wordt voor de investering in een warmtepomp een formule genoemd.

$$I_{WP} = 26000 + 460 \times \text{asvermogen (kW)} \qquad \text{[euro]}$$

De afschrijvingstermijn voor de warmtepomp wordt gesteld op 10 jaar en de onderhoudskosten bedragen 2% van de investering (Hondeman *et.al*, 2001)
De kosten voor een ondergronds energieopslagsysteem kunnen worden gevonden in "Kostenberekeningsschema voor warmte- en koudeopslagssystemen ten behoeve van de inzet van warmtepompen in de Nederlandse glastuinbouw" (Zwart, de en Knies, 2002).

$$I_{aquifer} = 78000 + 1930 \times \text{maximum debiet (m}^3\text{/u)} \qquad \text{[euro]}$$

In dit rapport wordt tevens aangegeven dat voor zo'n opslagsysteem een technische levensduur van 30 jaar kan worden gekozen en eveneens een onderhoudspercentage van 2% moet worden aangehouden.
Gezien de hoge kosten per eenheid debiet zal het vrijwel altijd lonend zijn om gebruik te maken van etmaalbuffers. Watertanks van metalen golfplaat kosten ongeveer 1500 + 11 × inhoud ($m^3$) (KWIN, 2003). Om zo'n systeem te kunnen laten werken moet zo'n vat in tweeën gedeeld

kunnen worden waardoor enige extra kosten in rekening gebracht moeten worden. Daarom wordt verder gerekend met bufferkosten van 2000 + 16 × inhoud ($m^3$).
Ervan uitgaande dat zo'n etmaalbuffer het maximale debiet halveert en een opslagcapaciteit moet hebben van het halve maximale debiet × 12 uur kan de investering in een aquifer met etmaalbuffer worden beschreven met

$$I_{\text{aquifer met buffer}} = 78000 + 2000 + (1930 + 16*12)/2 \times \text{maximum debiet } (m^3/u)$$

Voor de berekening van de jaarkosten wordt ook voor de etmaalbuffer 2% van de investering in rekening gebracht en de afschrijvingskosten voor deze buffer worden op 10% gesteld.
De investeringen voor deksproeiers zijn in het rapport "Kaskoeling en aquiferlading door middel van een dakbevloeiingssysteem" (de Zwart *et.al.*, 2004) gesteld op

$$I_{\text{deksproei}} = 500 \times \text{maximaal sproeidebiet } (m^3/uur) \qquad [\text{euro}]$$

Ook voor deze investering geldt een levensduur van 10 jaar en een onderhoudspercentage van 2%.
Bij de berekening van de jaarkosten is uitgegaan van een rentepercentage van 4.5% (zie ook het rapport "Energiebesparing Op Maat"). De jaarkosten van een investering worden berekend middels:

Jaarkosten = Investering * (renteperc./2 + onderhoudsperc. + afschrijvingsperc. per jaar)

De variabele kosten voor deze apparaten bestaan uit gaskosten voor de warmtepomp en elektriciteitskosten voor het verplaatsen van water over het aquiferdoublet en voor de pompen die het water op het dek sproeien. Het gebruik van de warmtepomp maakt echter dat de ketel minder gas gaat gebruiken en het netto effect is (uiteraard) een besparing op gaskosten. Deze worden in dit rapport berekend uitgaande van 15 cent per $m^3$. Dit bedrag is het gemiddelde van de commodity kosten (rond de 11 ct per $m^3$) voor gas en de gemiddelde gaskosten (rond de 19 ct per $m^3$). Er is niet met 19 cent gerekend omdat het gebruik van een warmtepomp slechts beperkt de mogelijkheid biedt om ook de aansluitcapaciteit te verminderen. Immers, juist in de perioden dat het gasverbruik het hoogst is, is de COP van een warmtepomp slecht, waardoor de benodigde gas-afname capaciteit precies op die piekuren niet veel afneemt.

De kosten voor elektriciteit worden gesteld op gemiddeld 0.04 cent per kWh. Dit getal is ontleend aan het rapport "Energiebesparing Op Maat" (Swinkels, 2004), waarbij een gemiddelde is bepaald tussen energiekosten tijdens plateau- en daluren en er daarbij wat extra gewicht is toegekend aan de kosten in plateau-uren. De deksproeiiers zullen immers meestal tijdens plateau-uren in werking gesteld worden.

De hoeveelheid elektriciteit die in de verschillende opties wordt gebruikt wordt door KASPRO berekend. Hierbij wordt door het model 0.4 MJ (= 0.11 kWh) per $m^3$ water die over het ondergronds energieopslagsysteem wordt verplaatst in rekening gebracht en wordt voor de deksproeiers gerekend met 0.22 kWh per $m^3$ water die op het dek wordt gespoten (dit geldt voor een sproeidruk van 4 bar en een pomprendement van 50%).

### *6.1.2 Productie-effecten*

De toepassing van deksproeiers geeft een geringe, maar merkbare vermindering van de koellast van kassen. Hierdoor zullen ramen gemiddeld wat minder ver open staan. In de bromeliateelt wordt dit als voordeel gezien omdat dit helpt de luchtvochtigheid hoger te houden. In de tomatenteelt wordt een verminderd ventilatieverlies vooral als voordeel gezien vanwege de verhoogde $CO_2$ concentratie. Ook zien tomatentuinders die momenteel experimenteren met gewastemperatuur-sensoren een positief effect van de toepassing van deksproeiers op de temperatuur van de koppen van het gewas.
De twee laatstgenoemde positieve effecten kunnen door KASPRO niet gekwantificeerd worden. Daarom zijn deze niet in de bedrijfseconomische beschouwingen opgenomen. Het $CO_2$-effect, wat bij de tomatenteelt merkbaar is, is echter in de berekeningen voor die teelt wel meegenomen.

## 6.2 Resultaten van de bedrijfseconomische berekeningen

Uitgaande van de in de vorige paragraaf genoemde bedrijfseconomische uitgangspunten kunnen de tabellen 1 en 2 worden omgezet in bedrijfseconomische overzichten.

Tabel 3. Bedrijfseconomische data van de toepassing van een warmtepomp, ondergronds energieopslagsysteem en deksproeiers in de bromeliateelt. De referentiesituatie beschikt reeds over een dekbesproeiingssysteem met een sproeidebiet van 1.8 liter per $m^2$ per uur. Alle getallen zijn in € per $m^2$, uitgaande van een schaalgrootte effect voor een bedrijf van 2 ha.

| sproeideb | jaarkosten | | | | | jaaropbrengst | | TVT |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| [lit/($m^2$ u)] | aquif. | wp | dekbv | elek | **totaal** | **gasbesp** | **netto** | [jaar] |
| 1.8 | 0.36 | 0.42 | 0.00 | 0.03 | **0.80** | **0.80** | **0.00** | - |
| 2 | 0.37 | 0.44 | 0.01 | 0.03 | **0.85** | **0.88** | **0.02** | 23 |
| 3 | 0.44 | 0.56 | 0.09 | 0.05 | **1.13** | **1.25** | **0.12** | 18 |
| 4 | 0.51 | 0.68 | 0.16 | 0.07 | **1.41** | **1.56** | **0.15** | 17 |
| 5 | 0.57 | 0.81 | 0.23 | 0.09 | **1.70** | **1.83** | **0.13** | 18 |

Tabel 3 laat zien dat een systeem met een sproeidebiet van 4 liter/($m^2$ uur) het beste resultaat geeft. De terugverdientijd blijft echter lang omdat er forse investeringen zijn gedaan om van de

duurzame zomerse warmte-overschotten gebruik te kunnen maken. Voor een het systeem met een sproeidebiet van 4 liter per $m^2$ per uur moet voor een bedrijf van 2 ha een aquiferdoublet met een debiet van 40 $m^3$/uur worden geboord (kosten € 116.000) en een gasmotor aangedreven warmtepomp met een asvermogen van 150 kW worden aangeschaft (kosten € 96.000). Het zwaarder uitgevoerde dekbevloeiingssysteem geeft een investering van € 22.000. De totale investeringen bedragen daarmee rond de € 250.000.
Als vervolgens de terugverdientijd word berekend uit deze investering gedeeld door de jaarlijkse cashflow resulteert dit in een terugverdientijd van 17 jaar. De cashflow is hierbij berekend uit de besparing op gaskosten, verminderd met de onderhoudskosten (2% van de investering), de rentelasten en de elektriciteitskosten. In de cashflow berekening zitten dus geen afschrijvingskosten. De rentelasten worden daarom echter, anders dan bij de berekening van de jaarkosten, met het volledige rentepercentage en niet met het halve rentepercentage berekend. Anders dan de netto jaaropbrengst kan de terugverdientijd dus niet zondermeer uit de data die in de tabel genoemd staan afgeleid worden.

Voor de tomatenteelt is een zelfde exercitie gedaan. Ook hier is er van uitgegaan dat er in de referentie reeds een dekbesproeiingsinstallatie aanwezig is. In de tomatenteelt zal het hier om sproeiers met een beperkt debiet gaan zodat in de referentie een systeem met een sproeidebiet van 1 liter/($m^2$ uur) is verondersteld.
Het enige verschil is dat er bij de tomatenteelt een duidelijke meeropbrengst door een verminderd ventilatieverlies, en daardoor een hogere $CO_2$-concentratie verwacht mag worden. Om die reden is een extra kolom bij de jaaropbrengsten toegevoegd.

Tabel 4. Bedrijfseconomische data van de toepassing van een warmtepomp, ondergronds energieopslagsysteem en deksproeiers in de tomatenteelt. De referentiesituatie beschikt reeds over een dekbesproeiingssysteem met een sproeidebiet van 1 liter per $m^2$ per uur. Alle getallen zijn in € per $m^2$, uitgaande van een schaalgrootte effect voor een bedrijf van 4 ha.

| sproeideb | jaarkosten | | | | | jaaropbrengst | | | | TVT |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| [lit/($m^2$ u)] | aquif. | wp | dekb | elek | **totaal** | **gasbesp** | | **ext.pr.** | **netto** | [jaar] |
| 1.00 | 0.24 | 0.41 | 0.00 | 0.06 | **0.70** | **0.48** | **+** | **0.02** | -0.20 | - |
| 1.50 | 0.28 | 0.52 | 0.04 | 0.08 | **0.92** | **0.74** | **+** | **0.08** | -0.10 | - |
| 2.00 | 0.33 | 0.64 | 0.07 | 0.11 | **1.16** | **1.01** | **+** | **0.16** | **0.01** | 20 |
| 2.50 | 0.37 | 0.78 | 0.11 | 0.12 | **1.38** | **1.20** | **+** | **0.15** | -0.03 | - |

Tabel 4 laat zien dat de perspectieven voor de tomatenteelt op één uitzondering na negatief zijn. Er is slechts één conditie waarin positieve netto jaarkosten worden behaald en deze zijn erg klein, resulterend in een zeer lange terugverdientijd. Dit komt met name door de veel geringere energiebesparing die per eenheid warmtepomp-vermogen kan worden gerealiseerd. Bij

vergelijking tussen tabel 3 en tabel 4 blijkt bijvoorbeeld dat een warmtepomp met jaarkosten van 41 cent, geldend voor een machine met een asvermogen van 3.5 W/m2 (zie tabel 2) een besparing van 48 cent op de gaskosten oplevert. Vrijwel dezelfde warmtepomp resulteert volgens tabel 3 bij de bromeliateelt in een bijna 2 maal zo hoge besparing op de gaskosten. Bij de discussie rond tabel 2 is reeds ingegaan op de achtergrond van dit fenomeen. Tabel 4 laat zien dat de grotere warmtepomp capaciteiten die in de tomatenteelt nodig zijn de toepassing van warmtepompen in deze sector onder de huidige bedrijfseconomische randvoorwaarden onmogelijk maakt.

# 7 Conclusies en aanbevelingen

Met een standaard dekbevloeiingssysteem kan een substantiële hoeveelheid overtollige zomerwarmte vanaf het kasdek worden onttrokken.
In een experiment waarbij een standaard dekbevloeiingsinstallatie zodanig was gemodificeerd dat koud water in plaats van onbehandeld water uit het regenwaterbassin op het dak werd gespoten bleek 26 MJ/$m^2$ zonne-energie in 295 uur te kunnen worden verzameld.
Deze hoeveelheid was veel minder dan verwacht, wat voornamelijk werd veroorzaakt door de zeer terughoudende inzet van de installatie in de warme nazomer van 2003. Het terughoudend gebruik was begrijpelijk omdat de experimentele opstelling op 1/6 van het bedrijfdsoppervlak niet onafhankelijk van de rest van de installatie kon worden gebruikt. Van het gebruik van gekoelde water mag dan weliswaar een forse vermindering van de verdampingsverliezen worden verwacht, maar deze zouden in de experimentele opstelling slechts op 1/6 van het bedrijf hebben opgetreden, waardoor het begrijpelijk was dat de betreffende tuinder de installatie terughoudend heeft gebruikt.
Aan de hand van de metingen is ook een simulatiemodel gevalideerd (een uitbreiding op het A&F kasklimaatsimulatiemodel KASPRO). De overeenkomsten tussen het op de fysische processen gebaseerde model en metingen waren erg goed, zodat het betrouwbare scenariostudies naar de verwachte zonne-energieverzameling bij ongelimiteerd gebruik konden worden gedaan.
Voor het sproeisysteem op de bromeliakwekerij van Ronald Bunnik Bromelia's kan volgens het model bij een sproeitemperatuur van 8 °C en een maximaal sproeidebiet van 1.8 liter/$m^2$ uur jaarlijks zo'n 180 MJ/$m^2$ aan zonne-energie worden verzameld. Na opslag van deze warmte in een ondergronds energieopslagsysteem en toepassing hiervan in de winter kan hiermee een netto gasbesparing van 5.2 $m^3$/($m^2$ jr) tot stand worden gebracht (10% van het jaarverbruik).
De investeringskosten van het ondergronds energieopslagsysteem en de warmtepomp zijn echter hoog, waardoor de netto financiële jaaropbrengst maar net boven de 0 uitkomt € 0,01 per $m^2$/jaar. Zou het standaard sproeisysteem wat worden opgerekt naar een maximaal sproeidebiet van 4 liter/($m^2$ uur), dan kan de gasbesparing voldoende toenemen om een netto financieel rendement van € 0,15 per $m^2$/jaar te realiseren. De netto energiebesparing is in dit geval 10 $m^3$/($m^2$ jr), wat oveeernkomt met 19% van het gemiddeld jaarverbruik in de bromeliateelt.
De terugverdientijd blijft evenwel onder de gebruikte economische randvoorwaarden onacceptabel lang (17 jaar).
Voor de tomatenteelt worden procentueel gezien vergelijkbare energiebesparingspotenties berekend. De absolute besparingen zijn evenwel zo'n 20% minder omdat het standaard gasverbruik bij een tomatenteelt rond de 42 $m^3$ ligt in plaats van 52 bij de bromeliateelt.
De geringere absolute beasparingen, maar vooral het feit dat de warmtepomp een grotere capaciteit nodig heeft (de besparing moet in minder uur tot stand worden gebracht) maakt dat de bedrijfseconomische perspectieven voor de tomatenteelt ronduit slecht genoemd moeten worden.

Er moet dan ook worden geconcludeerd dat het in dit rapport beschreven concept vanuit energetisch oogpunt veel te bieden heeft en beslist bij zou kunnen dragen aan een substantiële inzet van duurzame energie in de glastuinbouw (rond de 20% van de warmtevraag). Bovendien zouden deze besparingen niet tot een afname van de productie hoeven te leiden (wat bij veel andere besparingsmaatregelen wel het geval is).
De bedrijfseconomische analyse laat evenwel zien dat de investeringskosten belangrijk lager, of de energiekosten belangrijk hoger moeten zijn alvorens de besparingspotentie ook in de praktijk gerealiseerd zou kunnen worden.

## 7.1 Aanbevelingen

Het verdient aanbeveling om bedrijven die gespecialiseerd zijn in de aanleg van ondergrondse energieopslagsystemen een oordeel te laten vellen over de mogelijkheden om kostenreducties in de ontwikkeling van deze systemen voor de tuinbouw te realiseren. Ook zou onderzocht kunnen worden of een samenwerking tussen WKK en Warmtepomp-leveranciers, waarbij met name de eersten veel ervaring hebben in de tuinbouw, tot een duidelijke kostenvermindering zouden kunnen leiden. Een kostenreductie van 30% in de investeringen op het ondergrondse deel en de warmtepomp brengt deze energetisch perspectiefvolle technologie voor de onbelichte, warme potplantenteelt (zoals bromelia) binnen bereik.

# 8 Literatuur

Hondeman, H., C. Pulles en K. Jansen, 2001, Warmtepompen in de kas, Apeldoorn, Gastec zakelijke gastoepassingen, rapport ZGT020

Zwart, H.F. de en R. van Elswijk, 2002, Onderlinge beïnvloeding van ondergrondse energieopslagsystemen voor tuinbouwkassen Warmteonttrekkingssystemen. Wageningen, IMAG rapport

Zwart, H.F. de en P. Knies, 2002, Kostenberekeningsschema voor warmte- en koudeopslagssystemen ten behoeve van de inzet van warmtepompen in de Nederlandse glastuinbouw. Wageningen, IMAG rapport P2002-65

Zwart, H.F. de, E.G.O.N. Janssen en H. Loeffen, 2004, Kaskoeling en aquiferlading door middel van een dakbevloeiingssysteem, Wageningen, A&F Rapport nummer 082