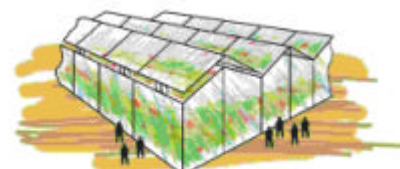


Koeling en Ontvochtiging in de Floriadekas



J.B. Campen
H.F. de Zwart
N.J. van de Braak



H.D.M. Kool
E.G.O.N. Janssen

IMAG Nota P 2001-102

Onderzoek in het kader van het
Convenant Glastuinbouw en
Milieu



Gefinancierd door:



landbouw, natuurbeheer
en visserij

Koeling en Ontvochtiging in de Floriadekas

J.B. Campen
H.F. de Zwart
N.J. van de Braak
H.D.M. Kool
E.G.O.N. Janssen

© 2001

Instituut voor Milieu- en Agritechniek (IMAG)
Mansholtlaan 10-12
Postbus 43, 6700 AA Wageningen
Telefoon 0317 - 476300
Telefax 0317 - 425670
www.imag.wageningen-ur.nl

Interne mededeling IMAG. Niets uit deze nota mag elders worden vermeld, of worden vermenigvuldigd op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van IMAG.

Bronvermelding zonder weergave van de feitelijke inhoud is evenwel toegestaan, op voorwaarde van de volledige vermelding van: auteursnaam, jaartal, titel, instituut en notanummer en de toevoeging: 'niet gepubliceerd'.

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

Voorwoord

Het initiatief van het provinciebestuur van Noord Holland om voor de Floriade in Hoofddorp in 2002 een “Kas voor de Toekomst” te ontwerpen, leidde ertoe dat er een projectgroep aan het werk is gegaan met ondermeer onderzoekers vanuit de instellingen IMAG, ECN, ECOFYS, TNO Bouw en het toenmalige Proefstation voor Bloemisterij en Glasgroente onder voorzitterschap van Ir. W.F.S. Duffhues om een programma van eisen te realiseren. Dit resulteerde in een eindrapport kortweg genaamd “Kas van de Toekomst”.

Daarmee brak het begin van de realisatiefase aan. Een fase waarin nog veel onderzoek en engineering moest plaatsvinden, voordat met de daadwerkelijke bouw begonnen kon worden. Dankzij de inspanningen van de voorzitter en de leden van de projectgroep zijn veel instellingen zoals de initiatief nemende partij, het provinciaal bestuur van Noord Holland, het Ministerie van LNV, Novem bv maar ook het bedrijfsleven bereid gevonden ook in de realisatiefase financieel deel te nemen.

Voor IMAG werd het daardoor mogelijk in onderzoek de energiezuinige ontvochtiging van de “Kas van de Toekomst” uit te werken. Dit project werd met name gefinancierd door het Productschap Tuinbouw en Novem bv. Ook vanuit het LNV sponsorprogramma “Energiebesparing in de beschermde teelten” is een bijdrage geleverd.

Dat initiatieven als die van de “Kas van de Toekomst” nieuwe impulsen aan het energiebesparingsonderzoek voor de Nederlandse glastuinbouw geven staat als een paal boven water. En dat dat soms leidt tot nieuwe verrassende inzichten en ontwikkelingen wordt geïllustreerd door de hier gepresenteerde uitkomsten van het door IMAG uitgevoerde onderzoek, die ongetwijfeld een bijdrage zullen leveren aan een duurzame Nederlandse glastuinbouw.

Inhoud

Voorwoord	1
Samenvatting.....	3
1 Inleiding.....	6
2 Koeling en Ontvochtiging.....	8
3 Theoretisch koelvermogen van verschillende oppervlakken.....	10
3.1 <i>Inleiding.....</i>	10
3.2 <i>Koelende gevinde tralieligger</i>	10
3.3 <i>Buisrailsysteem van 70 mm</i>	14
3.4 <i>Speciaal profiel onder hangende teeltgoot.....</i>	16
3.5 <i>Dakbevoeiing</i>	18
3.6 <i>Conclusies berekeningen theoretische warmteonttrekking.....</i>	20
4 Experimentele bepaling koelvermogen.....	21
4.1 <i>Inleiding.....</i>	21
4.2 <i>Koelende gevinde tralieligger</i>	22
4.3 <i>Buisrailsysteem van 70 mm</i>	24
4.4 <i>Speciaal profiel onder hangende teeltgoot.....</i>	25
4.5 <i>Dakbevoeiing</i>	27
4.6 <i>Resumé.....</i>	30
5 Energiebesparingsperspectief.....	31
6 Conclusies.....	34
7 Aanbevelingen.....	37
8 Literatuur	38

Samenvatting

De besparing van primaire energie in de glastuinbouw kan worden bereikt door

1. Het toepassen van een energiezuiniger kasklimaat
2. De beperking van onnodig warmteverlies
3. Het gebruik van verwarmingssystemen die minder primaire energie per eenheid geleverde warmte gebruiken.

In de "Kas van de Toekomst" op de Floriade in 2002, wordt met name de tweede en derde optie getoond. De tweede optie krijgt vooral een uitwerking in de demonstratie van dubbelwandig kunststof zigzag materiaal.

Bij de formulering van het project, waarvan het voorliggende rapport de resultaten verwoordt, werd ook de actieve ontvochtiging van kaslucht als een uitwerking van de beperking van onnodig warmteverlies gezien. Dit, en aanverwant onderzoek, heeft echter uitgewezen dat de toepassing van actieve ontvochtiging weliswaar tijdens de momenten van gebruik energiezuinig kan zijn, maar in de rest van de tijd dermate veel nadelen oplevert (niet in de minste plaats financiële) dat geconcludeerd is dat ontvochtiging geen doel op zich zou moeten zijn.

De derde optie om energie te besparen, het gebruik van verwarmingssystemen waar met weinig primaire energie kan worden verwarmd, krijgt op de Floriade veel aandacht. Deze optie krijgt namelijk uitvoering in de toepassing van de warmtepomp.

Bij alle toepassingen van de warmtepomp als energiezuinige warmtebron voor de glastuinbouw wordt gebruik gemaakt van seizoensopslag van warmte in een aquifer. Alleen dan is er immers gedurende de winter een zodanige hoeveelheid warmte beschikbaar dat een warmtepomp een groot aantal draaiuren met een substantieel verwarmingsvermogen kan maken. Bepalend voor de bijdrage van de warmtepomp in de totale verwarmingsbehoefte, en dus ook bepalend voor de te realiseren energiebesparing, is de hoeveelheid warmte waarmee de aquifer in de zomer weer kan worden geregenereerd.

De te behalen energiebesparing bij gebruik van een compressiewarmtepomp aangedreven door een gasmotor hangt recht evenredig af van de beschikbaarheid aan warmte in de aquifer. Dit betekent dat de warmte die in de zomer in de aquifer kan worden opgeslagen bepalend is voor de te behalen energiebesparing.

Behalve het feit dat warmteonttrekking aan de kaslucht in de zomer de tuinbouw in staat stelt in de winter met een lager primair energieverbruik te verwarmen, heeft deze warmteonttrekking als additioneel voordeel dat het (enigszins) verminderde ventilatieverlies van CO₂ in de zomer tot een hogere productie, en/of tot een verminderde vraag naar CO₂ leidt.

Het voorliggende onderzoek heeft middels praktijkmetingen en modevaluaties zicht gegeven op de perspectieven van verschillende systemen die door middel van natuurlijke convectie (dus zonder gebruik van extra ventilatoren) warmte kunnen onttrekken aan de kaslucht. Omdat dit gebeurt aan koude oppervlakken zal er ook ontvochtiging optreden. Nogmaals zij echter vermeld dat deze ontvochtiging geen doel op zich is, maar een bijkomstigheid van de onttrekking van warmte.

In de nazomer van 2000 zijn drie warmteonttrekkingssystemen onderzocht te weten:

1. Een speciale tralieligger die zowel een constructieve als een warmteonttrekkingsfunctie heeft bij een beperkte lichtonderschepping.
2. Een dikke buis van 70 mm die, behalve als koeler, ook dienst kan doen als verwarmingsbuis.

3. Een gevinde buis die gebruikt kan worden in geval het gewas in een hangende goot wordt geteeld.

De theoretische berekeningen en metingen aan deze systemen die in dit project zijn uitgevoerd leiden tot vrijwel gelijke resultaten. De theoretische berekeningen zijn gebaseerd op een combinatie van Computational Fluid Dynamics (CFD) voor de convectieve overdracht van voelbare en latente warmte en standaardformules voor de berekening van kort- en langgolvlige stralingsoverdracht.

Hoewel de uiteindelijke warmteoverdracht naar koude oppervlakken in de kas van deze vier verschillende warmtestromen afkomstig is en dus van tal van omgevingsfactoren afhankelijk is, kan als vuistregel een effectieve warmteonttrekkingscoëfficiënt worden gebruikt. Deze effectieve warmteonttrekkingscoëfficiënt relateert de onttrokken warmte uitsluitend aan een verschil tussen kasluchttemperatuur en gemiddelde temperatuur van het koelende oppervlak.

Uit de metingen is gebleken dat de volgende effectieve warmteonttrekkingscoëfficiënten gebruikt kunnen worden.

- voor de koelende tralieligger:
 $17.1 \text{ W}/(\text{m}_{\text{tralie}} \text{ K})$ of, uitgaande van een kapmaat van 4 m, $4.3 \text{ W}/(\text{m}_{\text{kas}}^2 \text{ K})$
- voor het verdikte buisrailnet dat tevens als koelnet wordt gebruikt:
 $3.6 \text{ W}/(\text{m}_{\text{buis}} \text{ K})$ of, uitgaande van 5 buizen per kap van 4 m, $4.5 \text{ W}/(\text{m}_{\text{kas}}^2 \text{ K})$
- voor een onder de hangende goot geplaatst speciaal collectornet:
 $4.2 \text{ W}/(\text{m}_{\text{buis}} \text{ K})$ of, uitgaande van 2.5 buizen per kap van 4 m, $2.6 \text{ W}/(\text{m}_{\text{kas}}^2 \text{ K})$

Indien de effectieve warmteonttrekkingscoëfficiënt uit de theoretische berekeningen wordt bepaald, worden de coëfficiënten per m^2 kas respectievelijk 4.5, 4.3 en 2.3. De metingen komen dus goed overeen met theoretisch bepaalde waarden.

Middels berekeningen met een simulatiemodel (KASPRO) zijn de perspectieven voor de onderzochte systemen doorgerekend. Hierbij zijn de theoretisch berekende (en door de metingen ondersteunde) warmteonttrekkingscoëfficiënten gebruikt om gesimuleerde koelende oppervlakken te parametriseren.

In deze simulaties is berekend hoeveel warmte met de bovengenoemde systemen op jaarbasis verzameld kan worden indien warmte geogst wordt op momenten dat de kasluchttemperatuur 2 graden boven het ventilatiesetpoint uitkomt. Bij de tomatenteelt (die in de berekeningen als voorbeeldgewas is gebruikt) betekent dit dat koude oppervlakken werden ingeschakeld op het moment dat kaslucht boven de 22 - 24 °C uitkwam (afhankelijk van de periode in het jaar en de lichtafhankelijke setpointverhoging).

In alle berekeningen is er van uitgegaan dat het vermogen dat aan de koelende systemen onttrokken werd, zodanig is dat de temperatuur van het water dat vanuit die systemen terugkomt ten behoeve van de opwarming van de aquifer 17 °C is. Onder deze condities blijkt uit de simulatieberekeningen dat de koelende tralie 166 MJ/(m^2 jaar) aan de kas onttrekt. Hierbij is uitgegaan van één koelende tralie per 4 meter kap.

Voor het verdikte buisrailnet, uitgaande van het standaard stramien van 5 buizen per kap, berekent het simulatiemodel een jaarlijkse warmteonttrekking van 174 MJ/(m^2 jaar). De gevinde buis levert 90 MJ per m^2 per jaar.

Berekeningen leiden vervolgens tot de conclusie dat de koelende tralie de warmtepomp in staat stelt ongeveer $5.3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ jr})$ aardgas te besparen, het verdikte ondernet een besparingspotentieel heeft van ongeveer $5.6 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ jr})$ en het speciale collectornet op een perspectief van $2.9 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ jr})$ uitkomt. Hierbij is uitgegaan van het gegeven dat het toepassen van in de zomer verzamelde warmte via een gasmotorwarmtepomp een besparingspotentieel geeft van 32 m^3 aardgas per GJ warmte die in de winter weer aan de aquifer wordt onttrokken.

Gezien de hoge kosten die voor de koelende tralie verwacht mogen worden (materiaal en montage) en ook de verwachte kosten rond het onderhoud (schoonhouden van de vinnen), en dit afgezet tegen het perspectief (met name in vergelijking met een verdikt uitgevoerd ondernet) ontstonden tijdens de uitvoering van het project grote twijfels over de haalbaarheid van de koelende tralieligger.

Zonder dit koelsysteem komt het besparingspotentieel van het oorspronkelijke concept voor de Floriadekas echter niet hoger dan $8,5 \text{ m}^3$ aardgas per jaar. Omdat de energiebesparingspotentie van warmtepompen in principe veel groter is (maximaal ca. 20 m^3 aardgas per m^2 per jaar) is in het tweede deel van het project gezocht naar nog andere warmtecollectorsystemen.

Gegeven de bovengenoemde analyse moesten deze alternatieven goedkoop aan te leggen zijn en bovendien geen (of nauwelijks) licht onderscheppen. De uitkomst van deze zoektocht is een dakbevoeiingssysteem geworden.

Op grond van theoretische berekeningen werd voor dit systeem een effectieve warmteonttrekkingscapaciteit verwacht van $13.7 \text{ W}/(\text{K m}^2_{\text{kas}})$. In vergelijking met de andere drie systemen is dit dus ruim 3 keer zo groot en derhalve als perspectiefvol beoordeeld en verder uitgewerkt.

Het systeem is in het voorjaar van 2001 beproefd en bleek geheel aan de verwachting te voldoen. De resultaten van de metingen zijn zodanig positief dat voorgesteld wordt om dit systeem op de Floriade te demonstreren. Op grond van de gemeten performance is namelijk berekend dat bij een uitgaande temperatuur van $17 \text{ }^\circ\text{C}$ de jaarlijkse warmteoogst $490 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \text{ jaar})$ bedraagt.

In combinatie met een gasmotor aangedreven compressiewarmtepomp kan dit leiden tot een primaire energiebesparing van ruim 15 m^3 aardgas per m^2 per jaar.

Afgezet tegen het gasverbruik in de huidige tomatenteelt gaat het hierbij om een besparingspercentage van ongeveer 26%.

1 Inleiding

Omwille van de maatschappelijke en politieke aandacht voor energiebesparing zullen toekomstige kassen met een veel lager primair energieverbruik verwarmd moeten kunnen worden. Tegelijkertijd moet het financieel rendement op peil blijven, zodat er geen ruimte is voor productiederving ten gevolge de energiebesparende maatregelen. Deze eisen leiden tot de behoefte aan energiezuinige, maar toch veel licht doorlatende kassen, waarin op efficiënte wijze tuinbouwgewassen kunnen worden geteeld.

De mogelijkheden om het (primair) energieverbruik te beperken kunnen worden onderverdeeld in vier richtingen. In de eerste plaats is de gehanteerde teelttemperatuur uiteindelijk de belangrijkste energieverbruik bepalende grootheid. Hierop wordt ingespeeld in de ontwikkeling van rassen die een blijvend hoge productie hebben bij lagere teelttemperaturen.

In de tweede plaats kan energiebesparing worden gerealiseerd door het verbeteren van de klimaatregeling. De toepassing van temperatuurintegratie, het verbeteren van de energieschermregeling en het preciseren van de vochtbeheersing zijn hierin de belangrijkste opties.

In de derde plaats kan de isolatiewaarde van een kas worden verbeterd. Hierop wordt ingespeeld in de ontwikkeling van isolerende kunststof kasdekken met een hoge lichtdoorlatendheid en lage warmtetransmissie. Ook energiezuinige ontvochtiging behoort binnen dit thema.

De vierde categorie opties grijpt, in tegenstelling tot de bovenstaande, niet in op de energievraag, maar op de beperking van de hoeveelheid primaire energie die voor de invulling van de warmtevraag van de kas gebruikt wordt. Bij deze opties behoren de toepassing van brandstofcellen, Warmte Kracht koppeling (WKK) en warmtepompen.

Op de Floriade zullen een aantal van de bovengenoemde elementen aan het grote publiek worden getoond. Nieuwe kasconstructies combineren een hoge lichttransmissie met een goede isolatiewaarde en het gebruik van brandstofcellen, WKK en warmtepompen wordt in concept uitgewerkt.

WKK is een bestaande techniek. Brandstofcellen staan nog aan het begin van een zeer perspectiefvolle ontwikkeling als schone en efficiënte opvolger van de huidige gasmotoren.

Warmtepompen grijpen in op het thema duurzame energie. Ze stellen de kas namelijk in staat de warmteoverschotten uit de zomer te gebruiken in de winter.

Bij aanvang van de realisatiefase van de "Kas van de toekomst" waren er nog geen uitgekristalliseerde systemen voor de uitwerking van de inpassing van warmtepompen voorhanden. Met name rond de wijze waarop de warmteonttrekking in de zomer plaats moest vinden was grote behoefte aan gemeten kentallen.

In de periode 2000-2001 zijn ter invulling van deze behoefte een tweetal praktijkexperimenten uitgevoerd. Een experiment uitgevoerd door Ecofys te Utrecht in samenwerking met PPO te Naaldwijk heeft betrekking op een geheel gesloten kas, waar met geforceerde ventilatie warmte en vocht aan de kas werd onttrokken. Dit system wordt onder andere beschreven door Raaphorst *et al.*(2001).

Het tweede experiment, waarvan de eindresultaten in dit rapport beschreven zijn, betreft het gebruik van koelende oppervlakken in de kas, waarmee via natuurlijke convectie warmte en vocht aan de kas kan worden onttrokken. De koelende systemen kunnen daarmee als eerste instrument worden gebruikt om de kas te koelen en worden dus ingeschakeld zodra de kaslucht boven de ventilatielijn uitkomt.

Als koelsysteem zijn vier opties uitgewerkt.

In eerste instantie is gekeken naar de integratie van koelende elementen in de dakconstructie. Hiervoor is met medewerking van TNO-Bouw een prototype ontwikkeld van een kasconstructie-element bestaand uit een geïntegreerde goot en tralieligger, waardoorheen koud water kan worden gevoerd.

Naast dit koelend oppervlak bovenin de kas is ook de mogelijkheid van het gebruik van koelende oppervlakken onder in de kas onderzocht. Deze locatie sluit verlies van lichtdoorlatendheid van de kas uit, maar heeft als nadeel dat het onder in de kas minder warm is. De doorgemeten systemen betroffen een verdikte uitvoering van het standaard verwarmingsnet (dat ook voor verwarming gebruikt zou kunnen worden) en een speciaal aluminium collectornet.

Omdat gedurende de looptijd van het project het perspectief van de drie bovengenoemde systemen klein leek te zijn, is er nog een dakkoelingssysteem als 4^e aan het meetprogramma toegevoegd. Voordeel van dit concept is, dat het makkelijk te integreren is in de kas. Bovendien vormt het kasdek een heel groot oppervlak en zal het effect op de lichttransmissie, bij gebruik van schoon water, klein zijn. Het is zelfs mogelijk dat de lichttransmissie toeneemt door de gunstiger brekingsindex van het kasdek wanneer er een waterfilm overheen ligt.

In dit rapport wordt in hoofdstuk 2 eerst beargumenteerd waarom in de uitvoering van het project is afgestapt van de oorspronkelijk beoogde inzet van koude oppervlakken voor de ontvochtiging van de kas.

Hoofdstuk 3 en 4 gaan vervolgens in op de warmteonttrekkende capaciteit van koude oppervlakken die als koelementen worden gebruikt. In hoofdstuk 3 vindt dit langs theoretische weg plaats en in hoofdstuk 4 wordt de warmteonttrekkende capaciteit van dezelfde systemen middels metingen bepaald.

In hoofdstuk 5 worden de gevonden fysische parameters van de warmteonttrekking toegepast om met een simulatiemodel het jaarrond perspectief van deze systemen te bepalen. Aan de hand van de aldus berekende jaarlijkse warmteonttrekking kan worden aangegeven hoe groot het energiebesparingspotentieel is dat deze warmteonttrekking met zich meebrengt, indien de verzamelde warmte wordt gebruikt voor de voeding van de koude kant van een compressiewarmtepomp aangedreven door een gasmotor.

In hoofdstuk 6 worden de conclusies van het onderzoek gepresenteerd en in hoofdstuk 7 volgen een aantal aanbevelingen.

2 Koeling en Ontvochtiging

Bij aanvang van de uitvoering van het project Koeling en Ontvochtiging van de Floriadekas werd de mogelijkheid om de kas actief te kunnen ontvochtigen gezien als één van de energiebesparende maatregelen die in de Floriadekas getoond zouden kunnen worden. In het begin van de looptijd van het project kwamen echter de resultaten van een ander project, getiteld “Energiezuinige vochtregulatie door middel van warmtepompen en warmteopslag” (De Zwart en Swinkels, 2001) beschikbaar. In dat onderzoek werd geconcludeerd en beargumenteerd dat het ontvochtigen van kaslucht aan een koud oppervlak in veruit de meeste gevallen meer verwarmingsenergie vraagt dan wanneer de kas wordt ontvochtigd door vochtige kaslucht te vervangen door droge buitenlucht. Dit kan worden begrepen aan de hand van het volgende voorbeeld.

Stel dat de kaslucht 20 °C is en een relatieve luchtvochtigheid heeft van 85%. Dit betekent dat deze kaslucht 12 gram vocht per m³ kaslucht bevat.

Als nu de buitenluchtconditie 10 °C en 85% RV is, dan bevat deze buitenlucht ongeveer 6 gram vocht per m³ lucht. Wanneer er nu een ontvochtiging van 20 gram per uur nodig is (dit is ongeveer de nachtelijke verdamping van volgroeide groentegewassen), dan moet er bij gebruik van de gebruikelijke kasventilatie 3,3 m³ lucht per uur worden uitgewisseld om aan de ontvochtigingsbehoefte te kunnen voldoen.

Hiermee wordt $3,3 * 1300 * 10 = 43$ kJ voelbare warmte verloren omdat die buitenlucht (met een warmtecapaciteit van 1300 J/K) 10 K moet worden opgewarmd. De warmtevraag die bij deze vorm van ontvochtiging optreedt is dus $43/20 = 2,1$ kJ/gram.

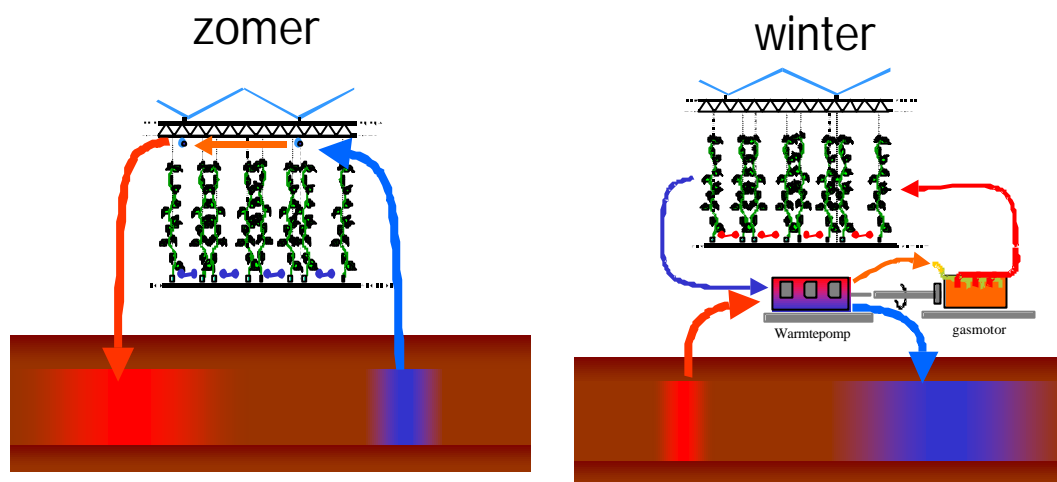
Als dezelfde hoeveelheid vocht moet worden afgevoerd via een oppervlak dat actief wordt gekoeld, dan wordt de warme vochtige kaslucht als het ware vervangen door de koude drogere lucht die vlak boven het koude oppervlak ligt. In tegenstelling tot de buitenlucht heeft deze lucht echter een relatieve vochtigheid van 100% (anders zou er immers geen condensatie plaats kunnen vinden). Lucht van 10 °C en 100% RV heeft een vochtgehalte van 7,6 gram per m³ lucht. Om dezelfde ontvochtiging te realiseren moet er dus geen 3,3 m³ kaslucht maar $20/(12-7,6) = 4,5$ m³ kaslucht langs het koude oppervlak worden gevoerd. Om deze 4.5 m³ kaslucht weer van 10 °C naar 20 °C op te warmen is 59 kJ nodig. Ontvochtiging aan dit koude oppervlak kost dus 2,9 kJ/gram en vraagt daarmee meer verwarmingsvermogen dan ontvochtiging met buitenlucht via de ramen.

Het feit dat actieve ontvochtiging in allerlei studies (ook in het rapport “Energiezuinige vochtregulatie door middel van warmtepompen en warmteopslag”) toch energiebesparing oplevert mag dus niet op het conto van de ontvochtiging worden geschreven, maar op het conto van de warmtepomp die in deze studies de verwarming op een energiezuinige wijze realiseert. De energiebesparing komt voort uit het feit dat toegenomen warmtevraag meer dan evenredig wordt gecompenseerd door de toegenomen omzettingsefficiëntie van primaire energie naar warmte. Aangezien in al deze studies sprake is van het gebruik van een lange termijn opslagsysteem, zou de te behalen energiebesparing echter nog groter zijn als de toegenomen omzettingsefficiëntie niet gedeeltelijk weer zou hoeven worden ingeleverd. Dit is mogelijk wanneer de warmte voor de warmtepomp niet tijdens de ontvochtiging wordt verzameld, maar gedurende perioden met een warmteoverschot. Dit geeft als extra voordeel dat hiermee de kaslucht gekoeld wordt en het verlies aan CO₂ beperkt wordt. Daar komt bij dat ten behoeve van de realisatie van een substantiële ontvochtigingsflux een erg groot koelend oppervlak moet worden aangebracht.

Met het gegroeide inzicht dat het niet de actieve ontvochtiging is die energie bespaart maar dat de besparing voortkomt uit de toepassing van de warmtepomp is al vroeg in de uitvoering van het project het aandachtspunt verlegd naar het onttrekken van warmte aan de kas in de zomer ten behoeve van het regenereren van een lange termijn warmteopslag in de vorm van een watervoerende bodemlaag (aquifer). Deze aquifer kan vervolgens in de winter worden gebruikt als voeding voor de warmtepomp.

Bij deze onttrekking van zomerse warmteoverschotten aan de kaslucht zal ook ontvochtiging optreden (condensatie op koude buizen). Deze ontvochtiging moet echter worden gezien als een bijkomend effect en niet als een doel op zich. Het is een gunstig effect omdat de effectieve warmteoverdracht van de kaslucht naar de buis vanwege de condensatie vaak bijna verdubbelt in vergelijking tot de situatie waarin geen condensatie zou optreden.

Met de nieuwe rol die de koelende oppervlakken wordt toegemeten staat het in dit project gehanteerde klimatiseringsconcept schematisch weergegeven in figuur 2-1.



Figuur 2-1 Principeschets van het verwarmingssysteem voor de Floriadekas

In figuur 2-1 wordt getoond dat water uit een koude aquifer in de zomer aan de kaslucht wordt opgewarmd om vervolgens te worden teruggepompt in een warme aquifer. In de figuur is dit geïllustreerd met koude buizen boven in de kas, maar hiervoor kunnen ook koude buizen onderin de kas worden gebruikt of een dakbevoeiingssysteem.

In de winter is de stroomrichting omgekeerd en wordt het warme water door een warmtepomp uitgekouled. De warmte wordt daarbij overgedragen op het verwarmingssysteem, waarbij de restwarmte van de gasmotor die de warmtepomp aandrijft voor extra naverwarming kan zorgen. Een ander gunstig effect van de toepassing van de gasmotor is dat de vrijkomende afvalwarmte van de motor op hoge temperaturen beschikbaar is (95 °C). Dit maakt buffering in de in de tuinbouw gebruikelijke buffersystemen mogelijk.

In alle berekeningen wordt ervan uitgegaan dat bij lading van het aquiferdoublet, water met een temperatuur van 15 °C naar de warme put wordt gepompt. Bij ontlading wordt water van 5 °C naar de koude put gepompt.

3 Theoretisch koelvermogen van verschillende oppervlakken

3.1 Inleiding

Warmte-uitwisseling vanuit de kas naar koelende elementen is gebaseerd op convectieve en latente warmteoverdracht en op straling. Convectieve warmteoverdracht vindt plaats wanneer de warme kaslucht langs het koude oppervlak stroomt. Latente warmteoverdracht vindt plaats wanneer er vocht vanuit de lucht op het koude oppervlak condenseert. Dit gebeurt alleen als het oppervlak kouder is dan de dauwpunttemperatuur van de lucht die er langs stroomt.

Warmteoverdracht via straling vindt plaats wanneer elektromagnetische straling (licht of warmtestraling) door het koelende oppervlak wordt geabsorbeerd.

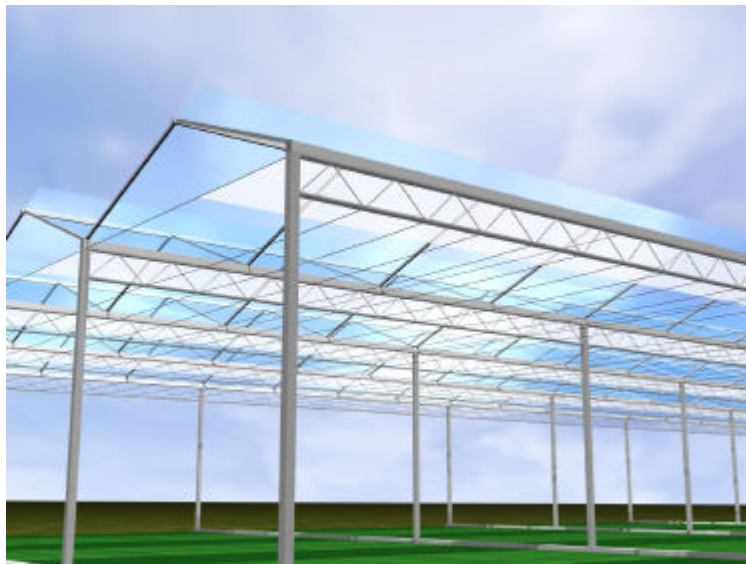
Met behulp van het CFD (Computational Fluid Dynamics) programma Fluent kan via de beschrijving van de geometrie van de te onderzoeken systemen en de plaatsing van deze systemen in een kasmodel de bijdrage van de eerste twee warmteoverdrachtstermen worden berekend. Voelbare en latente warmteoverdracht zijn in kaskoelingssituaties veruit de belangrijkste componenten in de koelcapaciteit. Door deze berekening voor een aantal kasluchtcondities en temperaturen van het koeloppervlak uit te voeren kan een gemiddelde voelbare warmteoverdrachtscoëfficiënt en de daaraan gekoppelde ontvochtigingscapaciteit worden bepaald. Wanneer de bijdrage van de straling daarbij wordt opgeteld, na deze op grond van de geometrie te hebben bepaald, kan een totale koelcapaciteit worden berekend.

In dit hoofdstuk wordt aldus voor de 4 koelsystemen een gemiddelde koelcapaciteit langs theoretische weg bepaald.

3.2 Koelende gevinde tralieligger

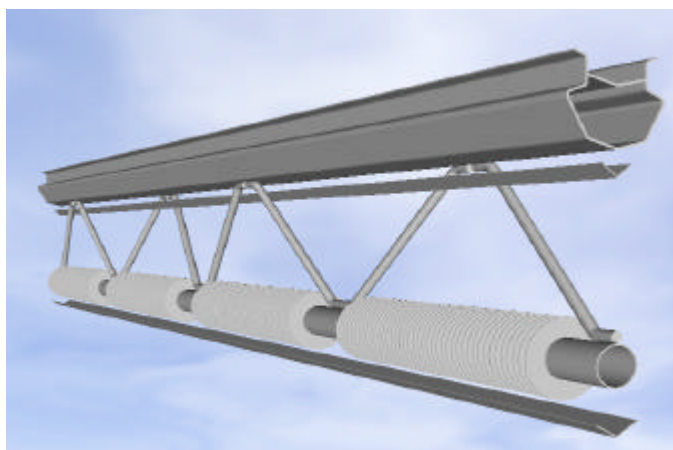
In de gedachten rond de toevoeging van koelende oppervlakken bovenin in de kasconstructie, die een minimale hoeveelheid licht onderscheppen, kwam de integratie van een ribbenbuis met de tralieconstructie als meest perspectiefvolle optie naar voren. Alle andere plaatsen bovenin de kas onderscheppen immers kostbaar licht.

In de door TNO voorgestelde constructie voor de “Kas van de toekomst”, die op het Floriadeterrein zal worden gebouwd zullen de tralieligger en de goot tot één constructiedeel worden samengevoegd (Janssen, 2001). Een impressie van deze kas is weergegeven in figuur 3-1



Figuur 3-1 Schets van een kas met een met de goot geïntegreerde tralie

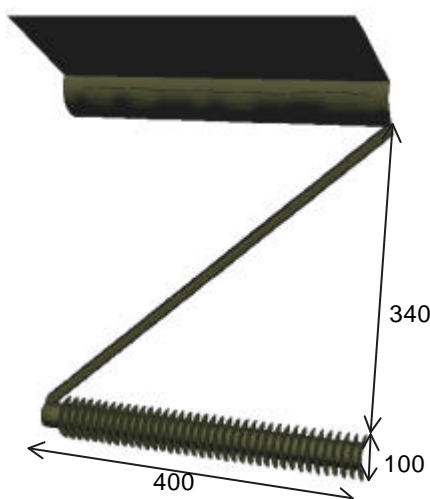
Dit is anders dan in de gebruikelijke kassen, waar tralieligger en goot haaks op elkaar staan. Wanneer aan de combinatie van tralieligger en goot ook een koelende functie wordt toegevoegd ontstaat een ontwerp zoals geschetst in figuur 3-2.



Figuur 3-2 Schets van een met de tralie en goot geïntegreerde ligger. Onder de gevinde buis is een condensgoot aangebracht.

Behalve de gevinde buis in het onderste deel van de tralie is er in de berekening vanuit gegaan dat ook door de onderste ruimte van de gootconstructie koud water kan worden gevoerd (dit is dus in de meeste uitvoeringen niet het gedeelte van de goot waardoorheen regenwater wordt afgevoerd).

Op grond van bovenstaand ontwerp, dat volgens TNO aan het vereiste sterktecriterium voldoet, is een schematisering ten behoeve van de CFD-berekeningen opgesteld.



Figuur 3-3 Schematisering van het in figuur 3-2 getoonde ontwerp ten behoeve van de CFD-berekening.

De schematisering betreft een weergave van het kleinste (spiegelsymmetrische) repeterende onderdeel dat zich in de constructie voordoet.

In de berekeningen worden de binnenkant van de goot en de onderste buis op een constante (lage) temperatuur gehouden en worden de temperaturen van de overige onderdelen door het CFD-programma berekend. De vinnen op de buis zijn daartoe in meerdere ringen verdeeld, zodat over deze vinnen een temperatuurgradiënt kan ontstaan. Om dezelfde reden is de schuine verbindingsstaf (volgens specificatie gemaakt van 14 mm staal) eveneens opgedeeld in stukjes. Het midden van de staf is hierdoor warmer (met het daaruit volgende kleinere koelvermogen) dan de punten waarmee hij aan de onder- en bovenkant aan de constructie is gelast.

Naast berekeningen aan het in figuur 3-3 getoonde ontwerp zijn ook gevoeligheidsanalyses voor het ontwerp met betrekking tot de diameter van de onderste buis, het aantal ribben op de buis en de vorm van de buis uitgevoerd. Deze berekeningen laten zien dat zowel bij het vergroten als bij het verkleinen van het aantal ribben op de buis het koelvermogen afneemt, dat een ronde buis beter is dan een vierkante buis en dat de diameter van de buis zo klein moet worden gekozen als voor het sterktecriterium nog toelaatbaar is. De buis zal dan nog groot genoeg zijn om voldoende waterdoorvoercapaciteit te hebben.

Het zijn deze gevoeligheidsanalyses geweest op grond waarvan het in figuur 3-2 getoonde ontwerp is gemaakt.

De resultaten van de CFD berekeningen leiden tot de conclusie dat de voelbare warmte-overdrachtscoëfficiënt van de gevinde onderligger, de goot en de schuine verbindingsstukken tezamen 4.5 W/K per strekkende meter tralie bedraagt.

In de kas, waar bij een gootafstand van 4 meter (zoals in figuur 1-1) één meter tralie per 4 m² kasoppervlak aanwezig is, kan een koelende tralie dus volgens de CFD-berekeningen 1.1 W/(m²

K) voelbare warmte onttrekken. Afhankelijk van de luchtvochtigheid in de kas komt hier door condensatie nog ongeveer eens zoveel latente warmte bij.

De gecombineerde goot en tralie zal in de kas een schaduwbaan opleveren van in totaal ongeveer 19 cm. Het zonlicht dat, getuige de schaduwbaan, door de constructie wordt onderschept zal slecht worden gereflecteerd. Immers, een belangrijk deel van de onderschepping komt voor rekening van de gevinde buis, waaruit lichtstralen moeilijk via reflectie zullen kunnen ontsnappen. De goot en de dwarsverbindingen zullen een betere reflectiecoëfficiënt hebben. Al met al is het aannemelijk om te veronderstellen dat ongeveer 75% van het licht dat in de schaduwbaan kwam door de constructie geabsorbeerd is. Dit betekent dat per meter buis een factor 0.20 (het schaduwoppervlak) * 0.75 van het opvallende licht wordt geabsorbeerd en omgezet in warmte.

In een kap van 4 meter zou de gecombineerde tralie dus $0.20 * 0.75 / 4 = 3.75\%$ licht onderscheppen. Dit getal komt overeen met de door TNO berekende lichtonderschepping van de tralieligger (Janssen, 2001).

De buis zal ook nog langgolvlige warmtestraling absorberen. Bij toepassing van de algemene formules voor de stralingsuitwisseling tussen vlakken en buizen blijkt dat de gelineairiseerde stralingsoverdrachtscoëfficiënt $0.6 \text{ W}/(\text{m}^2_{\text{kas}})$ bedraagt ($2.4 \text{ W}/(\text{m}_{\text{buis}})$, uitgaande van 1 buis per 4 meter kap).

In tabel 3-1 is een voorbeeld berekening gegeven van de totale warmteonttrekking

Tabel 3-1 Theoretische warmteonttrekking van de in de vorige figuren geschetste koelende tralieligger, uitgaande van een watertemperatuur van 15 °C, een kasluchttemperatuur van 25 °C, een kaslucht RV van 75% en een globale straling van $500 \text{ W}/\text{m}^2$ (buiten)

Warmtestroom	Berekening per meter buis	Vermogen	
		$[\text{W}/\text{m}_{\text{buis}}]$	$[\text{W}/\text{m}^2_{\text{kas}}]$
Voelbaar	$4.5 * (25 - 15)$	45	11
Latent	$4.5 * 6.75\text{e-}9 (\text{psatu}(25)*75\% - \text{psatu}(15)) * 2.45\text{e}6$	50	12.5
Langgolvlige straling	$2.4 * (25 - 15)$	24	6
Geabsorbeerd zonlicht	$500 * 0.8 * 0.75 * .20$	60	15
Totaal		179	44.5

6.75e-9 is de evenredigheidsfactor tussen warmte- en vochttransport indien de voelbare warmteoverdrachtscoëfficiënt is uitgedrukt in $\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ en het dampdrukverschil in Pa als drijvende kracht voor de condensatie wordt gebruikt.
 psatu is een functie die de verzadigde dampspanning bij een bepaalde temperatuur berekent en 2.45e6 is de condensatiewarmte van waterdamp.
 0.8 is de veronderstelde lichttransmissie van het kasdek.

De tabel laat zien dat de 4 termen elk van duidelijk belang zijn, en dat de warmteonttrekking dus van veel factoren afhankelijk is. Om toch over een eenvoudig kental te kunnen beschikken kan het totale warmteverlies van $44.5 \text{ W}/\text{m}^2$ worden gedeeld door het temperatuurverschil tussen kaslucht en buistemperatuur teneinde een effectieve warmteonttrekkingscapaciteit te bepalen. Dit getal heeft geen echte fysische betekenis maar is handig om verschillende systemen eenvoudig te kunnen vergelijken. De koelende tralieligger heeft dan een overall koelcapaciteit van $4,5 \text{ W}/(\text{m}^2_{\text{kas}} \text{ K})$.

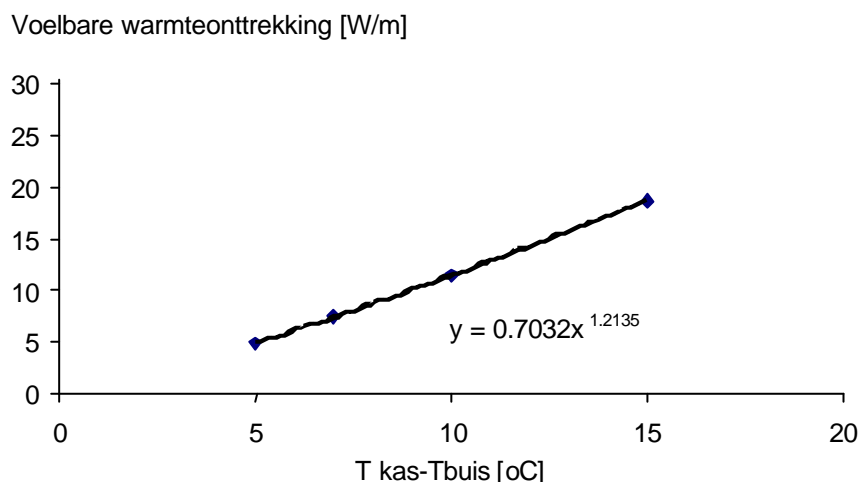
Uitgedrukt per meter buis is de theoretisch berekende overall koelcapaciteit van $18 \text{ W}/(\text{m}_{\text{buis}} \text{ K})$.

Hierbij moet men zich echter wel realiseren dat deze term voor bijna 1/3 wordt bepaald door de geabsorbeerde zonnestraling.

3.3 Buisrailsysteem van 70 mm

In de brainstormbijeenkomsten die zijn gevoerd om ideeën te genereren voor technieken waarmee warmte en vocht aan de kas kan worden onttrokken is geopperd om de verwarmingsbuizen, die in warme perioden toch niet voor verwarming gebruikt worden, te gebruiken om de kas te koelen. Dit dubbel gebruik van het verwarmingssysteem maakt het mogelijk om met relatief geringe investeringen een koelsysteem in de kas aan te brengen. Omdat het verwarmend oppervlak van een standaard verwarmingssysteem vrij klein is ($0,20 \text{ m}^2 \text{ buis/m}^2 \text{ kas}$), is voorgesteld de buis die voor gecombineerd gebruik bedoeld is, verdikt uit te voeren. Gekozen is voor een buis van 70 mm, waarmee het verwarmend/koelend oppervlak stijgt naar $0,27 \text{ m}^2 \text{ buis/m}^2 \text{ kas}$.

De voelbare warmteoverdrachtscoëfficiënt is met behulp van het CFD-programma berekend. Het resultaat van deze berekeningen is voor toenemend temperatuurverschil tussen buis en kaslucht weergegeven in figuur 3-4.



Figuur 3-4 Voelbare warmteoverdracht van de kaslucht naar de buis, uitgedrukt in W per strekkende meter buis als functie van het temperatuurverschil tussen buis en kaslucht. (berekend met CFD om rekening te houden met het stromingsprofiel rond de koude buis)

Hoewel de gevonden relatie (beste fit) door de vier berekende punten een niet lineair verband is (een macht 1,21) laat de figuur zien dat in het beschouwde temperatuurtraject de curve vrijwel recht is. Wanneer door deze curve een rechte lijn wordt getrokken blijkt de warmteoverdrachtscoëfficiënt $1.14 \text{ W}/(\text{m}_{\text{pijp}} \text{ K})$, wat in een kas met 1.25 meter pijp¹ in het ondernet per m^2_{kas} neerkomt op $1,42 \text{ W}/(\text{m}^2_{\text{kas}} \text{ K})$. De gelineariseerde stralingsoverdrachtscoëfficiënt

¹ 1.25 meter pijp per m^2 kas komt overeen met 5 buizen in een 4 meter kap.

berekend op temperatuurverschillen tussen kas en buis van 5 tot 15 °C is 1,31 W/(m_{pijp} K) en dus 1,64 W/(m²_{kas} K).

In Tabel 3-2 is analoog aan tabel 3-1 een berekening voor de theoretische warmteonttrekking van de 70 mm buis gemaakt.

Tabel 3-2 Theoretisch berekende warmteonttrekking van een 70 mm buis onderin de kas (5 buizen per kap van 4 meter) uitgaande van een watertemperatuur van 15 °C, een kasluchttemperatuur van 25 °C, een kaslucht RV van 75% en een globale straling van 500 W/m² (buiten) (voor uitleg over de getallen 6.75e-9, 2.45e6 en de functie psatu wordt verwezen naar het commentaar bij tabel 3-1)

Warmtestroom	Berekening per meter buis	Vermogen	
		[W/m _{buis}]	[W/m ² _{kas}]
Voelbaar	1.14 * (25 – 15)	11.2	14
Latent	1.14 * 6.75e-9 (psatu(25)*75% - psatu(15)) *2.45e6	10.4	13
Langgolvrige straling	1.31 * (25 – 15)	18	16
Geabsorbeerd zonlicht	Verwaarloosbaar	-	-
Totaal		34.4	43

In vergelijking met de koelende tralieligger is het eerste dat opvalt de aanzienlijk kleinere koelcapaciteit per meter voor de dikke buis. De stralingswarmteoverdracht is groter dan de voelbare warmteoverdracht, terwijl de stralingsterm bij de koelende tralieligger veel kleiner is dan de voelbare warmteoverdracht. Dit komt doordat bij de koelende tralieligger een grote convectieve overdracht wordt gerealiseerd door de vinnen, terwijl deze vinnen elkaar voor de stralingsoverdracht sterk beschaduwden.

De effectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt van de 70 mm buis is volgens de theoretische berekening dus 3.44 W/(m_{buis} K), wat in een moderne kas met een lay-out van 5 buizen per 4 meter kap in het ondernet op een koelcapaciteit van 4.3 W/(m²_{kas} K) zou neerkomen. In het standaard stramien is het koelend vermogen per m² kas van een 70 mm buisrailsysteem dus vrijwel gelijk aan dat van het in figuur 3-2 geschetste systeem van de koelende tralieligger.

3.4 Speciaal profiel onder hangende teeltgoot.

In de “Kas van de Toekomst” zal gebruik worden gemaakt van hangende goten. Een impressie van de een kas waarin hangende goten worden gebruikt ziet u in figuur 3-5.



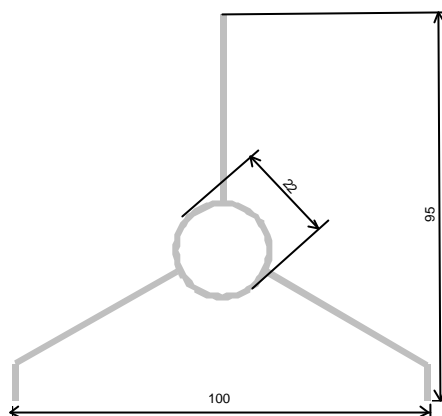
Figuur 3-5 Hangende goten waaronder ruimte is voor een apart collectornet.

Onder de hangende goten is veel ruimte en kan gemakkelijk luchtcirculatie tot stand komen. Ook is het onder deze goten geen probleem als er grote warmte uitwisselende oppervlakken worden aangebracht. Lichtonderschepping onder het gewas leidt immers niet tot productieverlies.

Na oriëntatie op buismaterialen die voor deze toepassing in aanmerking zouden komen, is het in figuur 3-6 getoonde buisprofiel geselecteerd. Dit profiel heeft een zeer groot oppervlak en daardoor ondanks de beperkte waterinhoud een niet onaanzienlijk warmteonttrekkend vermogen.

Om rekening te houden met de geometrische opstelling van de buizen onderin de kas is de voelbare warmteoverdrachtscoëfficiënt berekend met een CFD programma. Net als voor de 70 mm buis bleek de voelbare warmteoverdracht goed via een lineaire coëfficiënt te kunnen worden beschreven. Deze bedraagt 1.1 W/K per strekkende meter buis. De gelineairiseerde stralingsoverdracht coëfficiënt blijkt ook hier iets groter dan de voelbare warmteoverdrachtscoëfficiënt, namelijk 1.2 W/K per strekkende meter.

In de CFD berekeningen is ook onderzocht wat het effect is van andere oriëntaties van het profiel. De gevoeligheid blijkt beperkt, maar de getoonde oriëntatie kwam als beste naar voren.



Figuur 3-6 Gevinde buis bestaande uit een aluminium profiel (Alcoa)

De voelbare warmteoverdrachtscoëfficiënt per m^2_{kas} is een factor 1.6 kleiner (uitgaande van 2.5 teeltgoot in een 4 meter brede kap, de lay-out van de Kas van de Toekomst) dan de getallen per strekkende meter van het profiel.

Hiermee kan in tabel 3-3 de theoretische warmteonttrekking worden berekend.

Tabel 3-3 Theoretisch berekende warmteonttrekking van een gevinde Alcoa buis onder de hangende teeltgoten, uitgaande van een watertemperatuur van 15 °C, een kasluchttemperatuur van 25 °C, een kaslucht RV van 75% en een globale straling van 500 W/m² (buiten) (voor uitleg over de getallen 6.75e-9, 2.45e6 en de functie psatu wordt verwezen naar het commentaar bij tabel 3-1)

Warmtestroom	Berekening per meter buis	Vermogen	
		[W/m _{buis}]	[W/m ² _{kas}]
Voelbaar	1.1 * (25 – 15)	11	7
Latent	1.1 * 6.75e-9 (psatu(25)*75% - psatu(15)) * 2.45e6	12	8
Langgolfige straling	1.2 * (25 – 15)	12	8
Geabsorbeerd zonlicht	Verwaarloosbaar	-	-
Totaal		35	23

Tabel 3-3 laat zien dat de gevinde buis onder de teeltgoot slechts een potentieel heeft dat ongeveer de helft is van dat van de eerdere twee systemen. Dit komt vooral door het geringer aantal buizen. De warmteoverdrachtscoëfficiënt per strekkende meter buis is namelijk goed vergelijkbaar met die van de 70-mm buis.

De effectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt van het in fig 3-6 getoonde profiel is volgens de tabel 3.5 W/(m_{buis} K), wat in een moderne kas met een lay-out van 2.5 buizen per 4 meter kap in het ondernet op een koelcapaciteit van 2.3 W/(m²_{kas} K) zou neerkomen.

3.5 Dakbevoeiing

De theoretisch berekende warmteoverdracht aan koude oppervlakken in de kas in geval er geen ventilatoren worden gebruikt is niet al te hoog. Bovendien is het aannemelijk dat met name de koelende tralieligger hoge investeringen met zich meebrengt (materiaalkosten, doorkoppeling van de water toe- en afvoerslangen langs de poten etc). Met de resterende koelende oppervlakken in de kas zou dit betekenen dat ook het potentieel van de toepassing van de warmtepomp voor een kas zonder geforceerde luchtbeweging beperkt is.

Omdat hiermee een belangrijke bron van duurzame energie onbenut zou blijven, is in het kader van dit project gezocht naar alternatieven voor het gebruik van buizen voor de onttrekking van warmte. Een perspectiefvol alternatief lijkt het gebruik van het warme dakoppervlak. Wanneer hier koud water overheen gevoerd wordt neemt dit water warmte van het dek op, en zelfs warmte uit de buitenlucht (aangenomen dat dit water kouder is dan de natte bol temperatuur van de buitenlucht). Als de watertemperatuur lager is dan het dauwpunt van de buitenlucht zal de waterfilm die over het dek stroomt niet verdampen, maar zelfs vocht aantrekken. Vaak zal de watertemperatuur op het dek echter boven het dauwpunt van de buitenlucht liggen zodat enige verdamping plaats zal vinden. Verderop in deze paragraaf wordt hieraan nadere aandacht geschonken

Om het perspectief van een dakbevoeiingssysteem te beoordelen zijn eerst enkele theoretische berekeningen gemaakt, waarna de in figuur 3-7 getoonde experimentele opstelling is gebouwd.



Figuur 3-7 Dakbevoeiingssysteem om warmte aan het kasdek te onttrekken.

Voorafgaand aan de theoretische berekeningen rond de warmteoverdracht, is berekend hoeveel water per tijdseenheid op het dek moet worden gespoten en hoe een buis moet worden gemaakt die dit water netjes over het dek verdeelt.

In tegenstelling tot de situatie bij de berekeningen aan de warmteonttrekking door buizen in de kas speelt de buitenluchttemperatuur bij de warmteonttrekking vanaf het dek een belangrijke rol. Om te komen tot een benchmark tabel, zoals tabel 3-1 t/m 3-3 moet er dus een typische buitenlucht

conditie aan de set uitgangspunten worden toegevoegd. Uitgaande van gemiddeld zomerweer in de Nederlandse situatie lijkt 21 °C een goed gemiddelde. Analyse van jaarlijkse data geeft aan dat bij die temperatuur de RV van de buitenlucht gemiddeld 62% is en de windsnelheid gemiddeld 3 m/s.

De voelbare warmteoverdrachtscoëfficiënt van een kasdek bij die windsnelheid is volgens Bot (1983) $6.5 \text{ W}/(\text{K m}^2_{\text{dek}})$. Vanwege het feit dat het kasdek onder een hoek staat en het buitenoppervlak daardoor groter wordt dan het vloeroppervlak is de warmteoverdracht per eenheid kasoppervlak een factor 1.08 groter dus $7.0 \text{ W}/(\text{K m}^2_{\text{kas}})$. Aan de binnenzijde is de voelbare warmteoverdrachtscoëfficiënt via CFD-berekeningen bepaald op $4 \text{ W}/(\text{K m}^2_{\text{kas}})$. Hierin is al rekening gehouden met de helling van het kasdek

De gelineariseerde warmteoverdrachtscoëfficiënt voor straling ligt rond de $5 \text{ W}/(\text{K m}^2_{\text{kas}})$. De absorptie van zonlicht is verwaarloosbaar vanwege het feit dat water doorzichtig is (zeker wanneer het slechts een waterfilm betreft).

Bovengenoemde getallen resulteren in 'bench-mark' tabel 3-4.

Tabel 3-4 Theoretisch berekende warmteonttrekking door een met een dakbevoeiingssysteem gekoeld dak. Uitgangspunten zijn voor de buitenkant:

Gemiddelde water temperatuur op het dek: 15 °C, Buitenlucht temperatuur: 21 °C, buitenlucht RV: 62%, windsnelheid: 3 m/s hemeltemperatuur 11 °C.

Voor de binnenkant:

dektemperatuur: 15 °C (gelijkgesteld aan de temperatuur aan de buitenkant van het dek) kasluchttemperatuur van 25 °C, een kaslucht RV van 75% van (voor uitleg over de getallen $6.75e-9$, $2.45e6$ en de functie $psatu$ wordt verwezen naar het commentaar bij tabel 3-1)

Warmtestroom	berekening	Vermogen [W/m ² _{kas}]
Buitenkant		
Voelbaar	$7 * (21 - 15)$	42
Latent	$7 * 6.75e-9 (psatu(21)*62\% - psatu(15)) * 2.45e6$	-19
Langgolvlige straling	$5 * (11 - 15)$	-20
Subtotaal		3
Binnenkant		
Voelbaar	$4 * (25 - 15)$	40
Latent	$4 * 6.75e-9 (psatu(25)*75\% - psatu(15)) * 2.45e6$	44
Langgolvlige straling	$5 * (25 - 15)$	50
Subtotaal		134
Totaal		137

Tabel 3-4 laat zien dat er aan de binnenkant van de kas erg veel warmte wordt onttrokken (134 W/m²_{kas}), maar dat er aan de buitenkant maar weinig netto warmte aan de buitenlucht wordt onttrokken. Dit komt door de verdamping van water (een negatieve latente warmte-onttrekking) en het verlies van warmte via langgolvlige straling (een negatieve langgolvlige stralingsterm) naar de

atmosfeer (via de lage hemeltemperatuur²). Overigens is de condensatie aan de binnenkant van het kasdek groter dan de verdamping aan de buitenkant. In termen van het voorkomen van waterverlies is er in het hierboven getoonde voorbeeld nog steeds sprake van waterwinning. Het mag dus worden gesteld dat deze wijze van warmte-onttrekking geen waterverbruik met zich meebrengt. Dit in tegenstelling tot bijvoorbeeld daksproeiers, waar het de bedoeling is dat via het versproeien van water de buitenlucht nabij de luchtingsramen op de natte-boltemperatuur van die lucht wordt gebracht (en daarmee een paar graden wordt afgekoeld).

De warmteonttrekking aan de buitenkant van het kasdek loopt sterk op wanneer de temperatuur een paar graden lager wordt gekozen. Zo wordt de warmteonttrekking bij een temperatuur van 12 °C maar liefst $255 \text{ W/m}^2_{\text{kas}}$ (dus 50% groter dan bij 15 °C). In dat geval vindt er condensatie vanuit de buitenlucht naar de waterfilm plaats. De warmteonttrekking (voelbaar en latent) vanuit de buitenlucht vormt in dat geval bijna 30% van de $255 \text{ W/m}^2_{\text{kas}}$.

Als vanuit de gegevens van tabel 3-4 op dezelfde wijze als in de vorige gevallen een effectieve warmteonttrekkingscoëfficiënt wordt berekend komt deze op $13.7 \text{ W/(K m}^2_{\text{kas}})$.

Tot slot moet nog wel de opmerking gemaakt worden dat dit systeem op een dubbeldeks kas-omhulling veel minder perspectiefvol zal zijn. Het bovenste paneel van zo'n kas-omhulling zal immers veel meer van de (koelere) buitenlucht dan van de warme kaslucht afhangen.

3.6 Conclusies berekeningen theoretische warmteonttrekking

Op grond van de in de vorige paragrafen besproken theoretische berekeningen blijkt dat het dakbevoeiingssysteem veruit het beste perspectief biedt voor de koeling van kassen. De koelende tralieligger en het gebruik van een 70-mm ondernet staan op afstand op de tweede plaats en het speciale collectornet onder de hangende teeltgoten heeft een erg beperkte warmteonttrekkingscapaciteit.

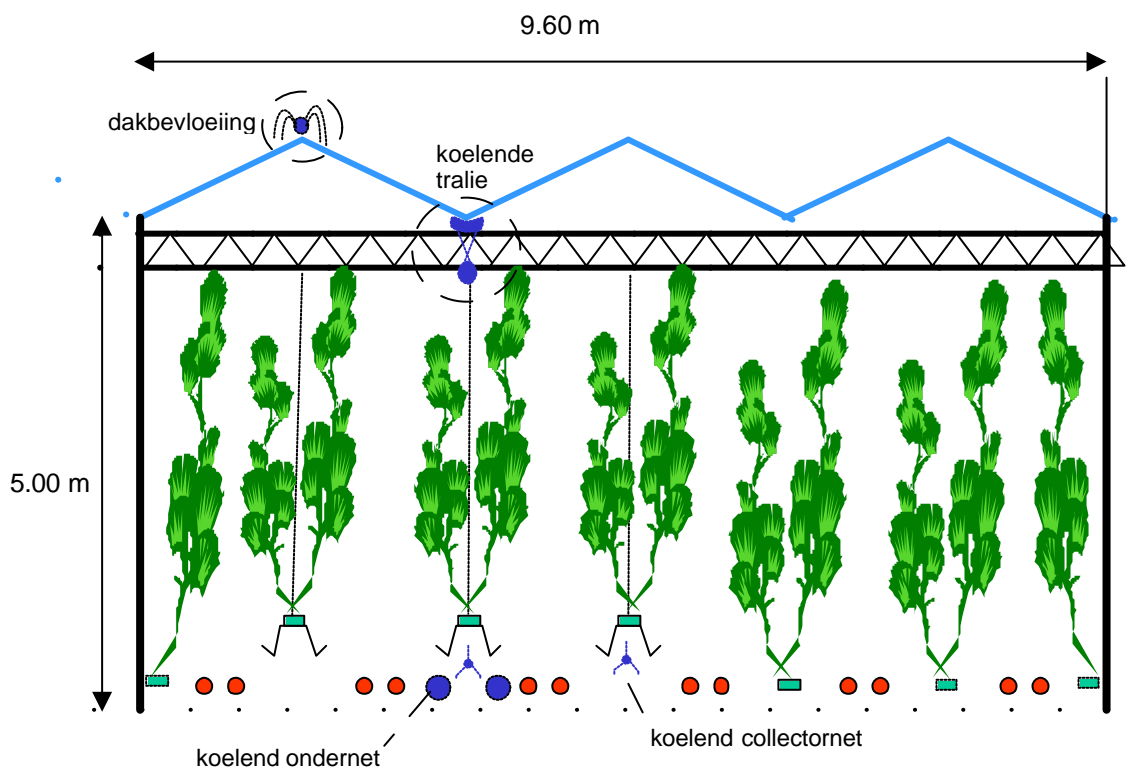
² De hemeltemperatuur kan worden beschouwd als een gemiddelde temperatuur van de moleculen in de atmosfeer, waarmee dus straling kan worden uitgewisseld

4 Experimentele bepaling koelvermogen

4.1 Inleiding

Teneinde de theoretisch ontwikkelde concepten en theoretisch bepaalde capaciteiten te verifiëren in een kas zijn alle in hoofdstuk 3 besproken systemen ook in de praktijk beproefd. In deze experimenten is gebruik gemaakt van een proefafdeling van de "Lichtkas", een modern uitgeruste kas van 9.60 meter breed (3 kappen) en 20 meter lang (waarvan 18 meter gewas en 2 meter pad) op het IMAG-terrein.

De opstelling van de experimenten in de kas is weergegeven in figuur 4-1.



Figuur 4-1 Opstelling van de 4 doorgemeten koelsystemen in de Lichtkas van IMAG.

Wat opvalt in deze figuur, is dat, in tegenstelling in tot figuur 3-1, de tralie in de experimentele kas niet evenwijdig aan de goot ligt, maar, zoals in vrijwel alle praktijkkassen, haaks op de goot. De metingen aan de warmteoverdracht naar de koelende tralie zijn dan ook niet aan de bestaande tralieliggers uitgevoerd maar aan een extra tralie die onder de goot, tussen de bestaande tralies is geplaatst. In figuur 4-1 is hiervan dus de dwarsdoorsnede zichtbaar. Verder valt het op dat de

kappen van de lichtkas 3,2 meter breed zijn, en niet 4 meter, waarmee in het vorige hoofdstuk is gerekend. Dit is echter voor de validatie geen probleem omdat de vergelijking van metingen en theorie net zo goed per meter pijp kunnen worden uitgevoerd als per m² kas.

Het derde wat opvalt is dat de doorgemeten systemen niet over de hele kas zijn aangebracht, maar zijn teruggebracht tot de minimale afmeting die nog een goede representatie van het te onderzoeken overdrachtsproces geeft. Dit is op deze manier uitgevoerd om geen onnodige kosten aan de installatie te hoeven maken.

Alle vier de opties zijn gedurende één of twee maanden (afhankelijk van de hoeveelheid kinderziekten die bij het begin van de metingen naar voren kwamen) in werking geweest. De werking berustte hierop dat op het moment dat de kasluchttemperatuur boven de 23 °C kwam het warmteonttrekkend systeem van koud water werd voorzien. De toevoer van koud water werd daarbij zodanig geregeld dat de gemiddelde temperatuur van een koelsysteem gedurende een uur op hetzelfde niveau bleef. Na een uur werd de temperatuur waarop geregeld werd een graad verhoogd. En na een uur nogmaals, enzovoort.

Hierdoor werden er steeds perioden van ongeveer 3 kwartier gerealiseerd waarin de watertemperatuur constant was, zodat een goede warmteonttrekkingsmeting kon plaatsvinden.

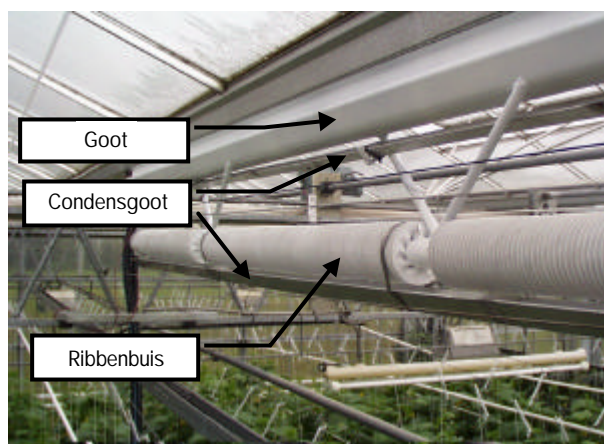
De warmteonttrekking werd bepaald uit de meting van het temperatuurverschil tussen aanvoer en retour en een debietmeting. De temperatuursensoren en de debietmeter zijn daartoe van tevoren geijkt (de temperatuursensoren zijn daarbij vooral beoordeeld op het feit of ze, bij plaatsing naast elkaar in hetzelfde medium dezelfde temperatuur aangaven).

De gemeten warmteonttrekking is vervolgens uitgezet tegen verschil tussen kasluchttemperatuur en de gemiddelde buistemperatuur. De op deze manier verkregen warmteonttrekkingscoëfficiënt is daardoor vergelijkbaar met de effectieve warmteonttrekkingscoëfficiënt die in het vorige hoofdstuk aan de hand van de bench-mark tabel is opgesteld.

4.2 Koelende gevinde tralieligger

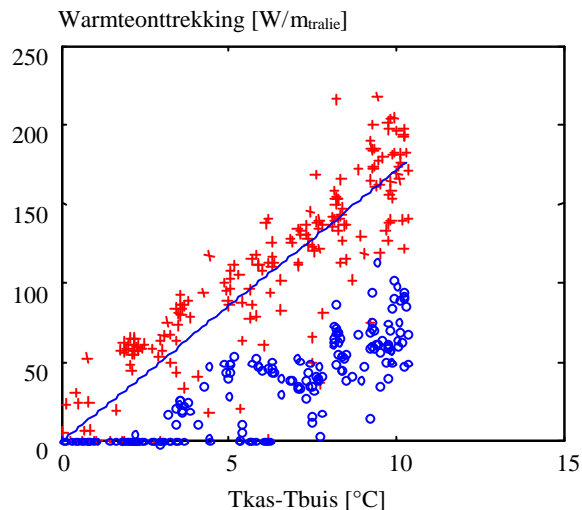
Om de warmteoverdracht naar de speciale tralie te kunnen meten is een stuk tralie gemaakt en in de proefkas tegen de bestaande goot geklemd. Het resultaat wordt getoond in figuur 4-2.

In de goot bevindt zich een gesloten compartiment waar water doorheen kan stromen. De onderzijde van de tralie wordt gevormd door een pijp (Ø 48 mm) met daarop ribben met een hoogte van 28 mm die de warmteoverdracht vergroten. Onder de goot en de ribbenbuis is een driehoekig profiel geplaatst om het condens op te vangen. Het water stroomt eerst door de ribbenbuis en vervolgens door de goot. Deze experimentele tralie heeft een lengte van 3,5 meter.



Figuur 4-2 Foto van de koelende tralieligger in de kas.

In het experiment worden, net als in het voorgestelde concept de goot en de ribbenbuis gekoeld. De temperatuur van het water dat door het systeem werd gepompt, werd door een regelaar steeds een bepaalde periode constant gehouden. Door meting van het rondgepompte debiet en het temperatuurverschil tussen ingang en retour kan het gemiddelde warmteonttrekkend vermogen bij de dan geldende condities worden gemeten. Resultaten van de metingen zijn in figuur 4-3 te zien.



Figuur 4-3 Metingen van de totale warmteoverdracht van de koelende tralieligger (+) en het berekende aandeel van de latente warmtestroom door condensatie daarin (o) als functie van het temperatuurverschil tussen de kaslucht en de buis.

De grafiek laat zien dat van de totale warmteonttrekking ongeveer 1/3 afkomstig is van de bij de condensatie vrijkomende latente warmte ((O) in vergelijking met (+))

De helling van de getekende lijn in de grafiek voldoet aan $y = 17.1 x$, wat aangeeft dat deze lijn een warmteoverdrachtscoëfficiënt van $17.1 \text{ W}/(\text{m}_{\text{buis}} \text{ K})$ weerspiegelt.

Dit meetresultaat komt goed overeen met de langs theoretische berekeningen bepaalde effectieve warmteonttrekkingscoëfficiënt (in § 3.2 berekend op $18 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$).

De grafiek laat een behoorlijke spreiding zien rond de getrokken lijn. Dit valt ook wel te verwachten gezien de grote invloed van de kortgolvlige stralingsonderschepping op de warmteonttrekking. In de in § 3.2 bepaalde term was bijna 1/3 van de warmteonttrekking afkomstig van onderschept licht.

4.3 Buisrailsysteem van 70 mm

Omdat tijdens warme dagen het ondernet niet gebruikt wordt voor verwarming kan dit net op die momenten gebruikt worden voor koeling. Om over voldoende VO te kunnen beschikken is in dit project uitgegaan van een 70 mm buis als ondernet. Het gebruik van zo'n dikkere buis past goed in het verwarmingsconcept voor de Floriadekas, waar de verwarming met een warmtepomp zal worden gerealiseerd.

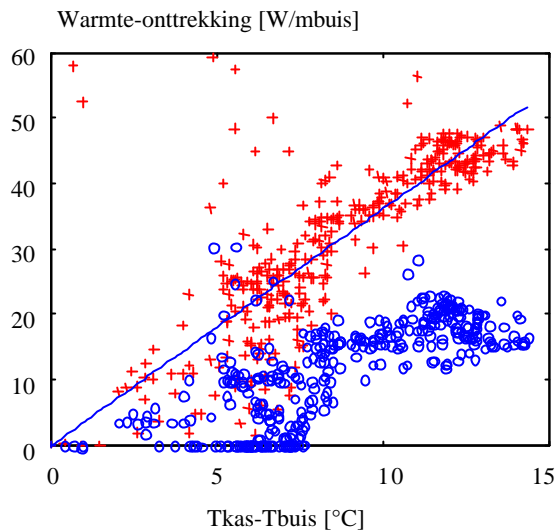
In figuur 4-4 wordt de uitvoeringsvorm van het experiment getoond.



Figuur 4-4 Foto van de 70 mm buis onderin de kas.

Een nauwkeurige bestudering van de figuur laat zien dat de koelende buis naast de bestaande buisrail geplaatst is. Dit is in dit experiment uit praktische overwegingen gedaan. Het bestudeerde concept geeft echter uitdrukkelijk de mogelijkheid om de bestaande buisrailfunctie te integreren met de koelfunctie.

De resultaten van de metingen zijn afgebeeld in figuur 4-5.



Figuur 4-5 Meetresultaten van de warmteonttrekking door de 70 mm buis. '+' de totale warmteonttrekking (voelbaar + langgolvlige straling + latent) en 'o' de berekende latente component in de totale warmteonttrekking.

De in figuur 4-5 getoonde rechte lijn voldoet aan de beschrijving $y = 3.6x$, wat aangeeft dat de effectieve koelcapaciteit van de 70 mm buis volgens de meting gemiddeld $3.6 \text{ W}/(\text{m}_{\text{buis}} \text{ K})$ is. De metingen komen daarmee goed overeen met de theoretische berekeningen waar de effectieve warmteonttrekkingscoëfficiënt op $3.4 \text{ W}/(\text{m}_{\text{buis}} \text{ K})$ werd berekend. Het verschil bedraagt slechts ongeveer 5%.

4.4 Speciaal profiel onder hangende teeltgoot.

Het derde systeem dat als mogelijkheid voor warmteonttrekking naar voren is gekomen bestaat uit speciale buizen onder de hangende teeltgoten. De toegepaste opstelling is afgebeeld in figuur 4-6. De foto geeft een impressie van de ruimte die onder de hangende goten aanwezig is en het gemak waarmee de speciale buis kan worden aangebracht.



Figuur 4-6 Foto van de speciale aluminium buis onder de hangende teeltgoot.

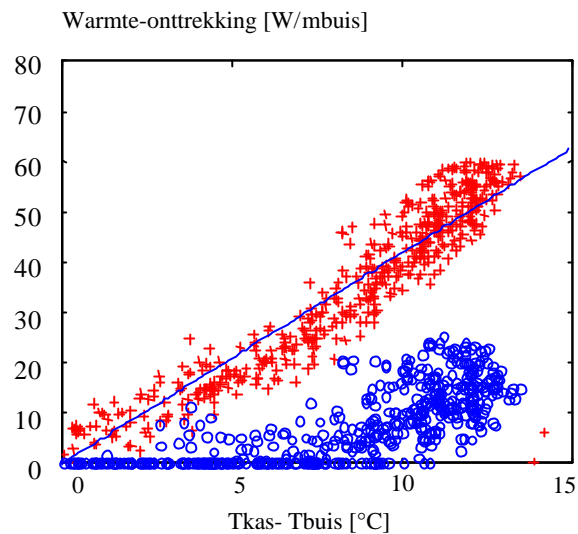
Ook aan deze buis zijn gedurende een maand metingen aan de warmteoverdracht gedaan. De resultaten van deze metingen zijn weergegeven in figuur 4-7.

De meetresultaten laten een vrij consistente relatie zien tussen het temperatuurverschil en warmteonttrekking. De in de figuur getekende rechte lijn voldoet aan de beschrijving $y = 4.2 x$, waaruit geconcludeerd kan worden dat de experimenteel bepaalde overall warmteonttrekkingscapaciteit van deze buis $4.2 \text{ W}/(\text{m}_{\text{buis}} \text{ K})$ bedraagt.

De theoretisch berekende effectieve warmteonttrekkingscoëfficiënt kwam uit op $3.5 \text{ W}/(\text{m}_{\text{buis}} \text{ K})$. Voor deze configuratie wijken de metingen dus nogal af van de verwachte waarde. Om hier een verklaring voor te vinden zouden veel intensiever metingen en gedetailleerdere berekeningen moeten worden gemaakt.

Omdat de metingen met van tevoren gekalibreerde meetinstrumenten zijn uitgevoerd wordt in het kader van dit project verder gewerkt met de gemeten waarde van $4.2 \text{ W}/(\text{m}_{\text{buis}} \text{ K})$.

Opvallend in figuur 4-7 is dat de latente warmte component in de totale warmte-onttrekking relatief klein is in vergelijking met de latente warmte-onttrekking in de andere systemen. Ook om dit verschijnsel te verklaren zouden uitgebreidere metingen en een nadere analyse moeten worden uitgevoerd, wat buiten het kader van dit project valt.



Figuur 4-7 Meetresultaten met de speciale aluminium buis onder de hangende teeltgoot. '+' de totale warmteonttrekking (voelbaar + langgolvlige straling + latent) 'o' de berekende latente component in de totale warmteonttrekking.

4.5 Dakbevoeiing

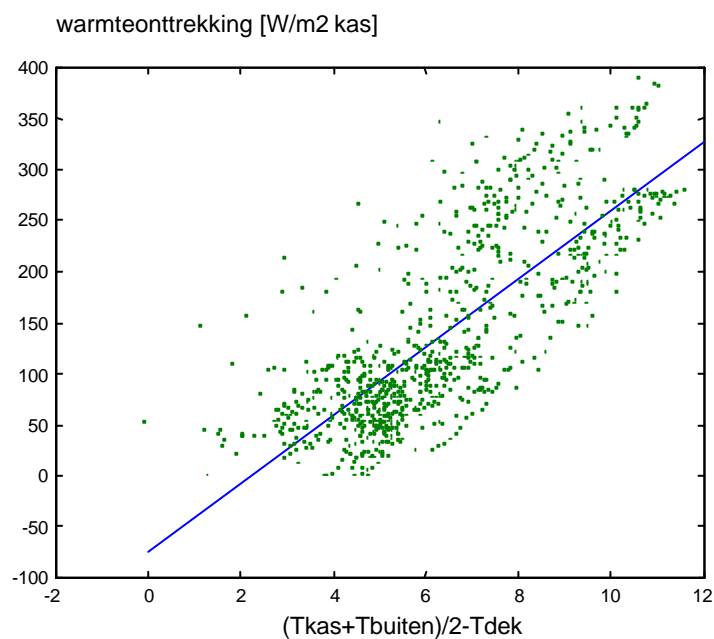
Vanwege het feit dat de totale warmteonttrekkingscapaciteit van de eerder genoemde systemen beperkt bleken te zijn, is gezocht naar een alternatief systeem. Dit systeem moest tegen geringe investeringen veel warmte kunnen onttrekken. Op grond van de veelbelovende theoretische berekeningen, zoals verwoord in § 3.5, is besloten het dakbevoeiingssysteem in een verkennend experiment te onderzoeken.

De projectbeschrijving bood ruimte om op basis van de ervaringen met koelsystemen in de nazomer van 2000 en analyse daarvan in het najaar van 2000 in het voorjaar van 2001 te experimenteren met dit additionele systeem. De proefopstelling wordt getoond in figuur 4-8



Figuur 4-8 Dakkoeling door middel van een koud-waterfilm op het kasdek (zie ook figuur 3-7). De waterfilm is goed te zien aan de rimpelingen op het kasdek.

De resultaten van de metingen aan de warmte-onttrekkingscapaciteit van het dakbevoeiings systeem worden getoond in figuur 4-9.



Figuur 4-9 Meetresultaten van de effectieve warmteonttrekking door koeling van het kasdek door middel van een waterfilm als functie van het temperatuurverschil tussen kasdek en het gemiddelde van kaslucht en buitentemperatuur.

Figuur 4-9 verschilt in een aantal opzichten met de vorige figuren met meetresultaten. In de eerste plaats staat op de y-as de warmteonttrekking per m² **kas**. Dit is gedaan omdat het dakbevoeiings-systeem per definitie aan het vloeroppervlak gekoppeld is.

In de tweede plaats valt op dat de getallen op de y-as veel groter zijn dan in de andere figuren. Dit is in overeenstemming met de theoretische berekeningen, waarin voor het gekoelde kasdek zeer hoge warmteonttrekkingscapaciteiten worden gevonden.

In de derde plaats valt op dat de gefitte curve niet, zoals de andere curven door de coördinaten (0,0) loopt. Dit komt doordat het open wateroppervlak ook warmte kan verliezen aan de buitenlucht. Dit treedt op als de buitenlucht een lage luchtvochtigheid heeft en er veel verdamping vanaf de waterfilm optreedt. De puntenwolk laat echter ook zien dat de regeling van het systeem ervoor zorgt dat het systeem op die momenten niet gebruikt wordt (er zitten geen punten onder de 0).

In de vierde plaats is de grootte die op de x-as is uitgezet wat ingewikkelder dan in de andere grafieken. Dit komt doordat, naast de kasluchttemperatuur, de buitenluchttemperatuur ook grote invloed heeft op de warmteonttrekking.

In de vijfde plaats laat de grafiek een zeer grote spreiding zien rond de gefitte lijn. Dit is evenwel niet verwonderlijk gezien het feit dat bij de theoretische berekeningen bleek dat er 6 termen op de warmteonttrekking inwerken en er in figuur 4-9 slechts ruimte is voor één verklarende variabele. Dit is desalniettemin zo gedaan omdat meerdimensionale grafieken moeilijk af te lezen zijn. Bovendien geeft de helling in de grafiek zoals die in figuur 4-9 is afgebeeld de effectieve warmteonttrekkingscoëfficiënt zoals die ook in § 3.5 is bepaald.

De getrokken lijn in de grafiek voldoet aan 33.5×-74.5 , waaruit kan worden geconcludeerd dat het kasdek minimaal 2.1 °C kouder moet zijn dan het gemiddelde van kaslucht- en buitenluchttemperatuur alvorens warmte te kunnen onttrekken. Dit komt doordat de waterfilm naar de buitenlucht kan verdampen, en daarmee warmte verliest. Nogmaals zij gezegd dat de regeling van het dekbevoeiingssysteem bij de besturing rekenschap moet geven van de actuele meteorologische condities.

Wanneer de in tabel 3-4 genoemde conditie in de grafiek wordt geplaatst zou dit een punt opleveren met een x-coördinaat $(25 + 21)/2 - 15 = 8$ en y-coördinaat 137.

Invulling van $x=8$ in de vergelijking van de getrokken lijn levert dat de uit de metingen gefitte curve een warmteonttrekking van 194 W/m² berekent. De scattering laat echter zien dat 137 W/m² nog ruim binnen de grenzen van de puntenwolk ligt.

Gezien het feit dat de buitenluchtvochtigheid en de langgolvlige uitstraling een belangrijke rol in de warmteonttrekking spelen, is dit gesignaleerde verschil geen reden voor grote zorg over het veronderstelde warmteuitwisselingsproces. Voor berekeningen waarbij vuistregels voldoende zijn kan dus de relatie

$$\text{Warmteonttrekking} = 33,5 * ((T_{\text{kas}} + T_{\text{buiten}})/2 - T_{\text{dek}}) - 74,5 \quad [\text{W/m}^2]$$

worden gebruikt, terwijl in nauwkeuriger berekeningen in simulatiemodellen de formules zoals die ten grondslag liggen aan tabel 3-4 kunnen worden gebruikt.

Naast metingen aan de warmteonttrekking zijn bij het experiment ook globale metingen aan de lichttransmissie van het bevoeide kasdek gedaan. De metingen waren indicatief van opzet, maar gaven aan dat de dekbevoeiing eerder tot een verbetering van de lichtdoorlatendheid dan tot een verslechtering leidt.

4.6 Resumé

De experimenten hebben voor vier systemen waarmee warmte aan de kas kan worden onttrokken informatie opgeleverd over de warmteonttrekking als functie van relevante parameters. Omwille van een gemakkelijke hanteerbaarheid zijn voor alle systemen eenvoudige formules opgesteld waarmee de warmteonttrekking als functie van gemakkelijk te meten, en overal voorhanden grootheden kan worden berekend. De resultaten voor situaties waarin warmte aan de kas werd onttrokken wanneer deze op zonnige dagen warmer dan 23 °C is luiden:

Koelende Tralieconstructie:

$$\begin{aligned} \text{Warmteonttrekking} &= 17.1 * (T_{\text{kas}} - T_{\text{buis}}) && [\text{W/m}_{\text{tralie}}] \\ \text{bij een 4 m kap} &&& \\ \text{Warmteonttrekking} &= 4.3 * (T_{\text{kas}} - T_{\text{buis}}) && [\text{W/m}_{\text{kas}}^2] \end{aligned}$$

Buis van 70 mm als buisrail

$$\begin{aligned} \text{Warmteonttrekking} &= 3.6 * (T_{\text{kas}} - T_{\text{buis}}) && [\text{W/m}_{\text{buis}}] \\ \text{bij 5 buizen per kap} &&& \\ \text{Warmteonttrekking} &= 4.5 * (T_{\text{kas}} - T_{\text{buis}}) && [\text{W/m}_{\text{kas}}^2] \end{aligned}$$

Speciale gevinde buis onder hangende teeltgoten

$$\begin{aligned} \text{Warmteonttrekking} &= 4.2 * (T_{\text{kas}} - T_{\text{buis}}) && [\text{W/m}_{\text{buis}}] \\ \text{bij 2.5 buizen per kap} &&& \\ \text{Warmteonttrekking} &= 2.6 * (T_{\text{kas}} - T_{\text{buis}}) && [\text{W/m}_{\text{kas}}^2] \end{aligned}$$

Middels dakbevloeiing gekoeld dek

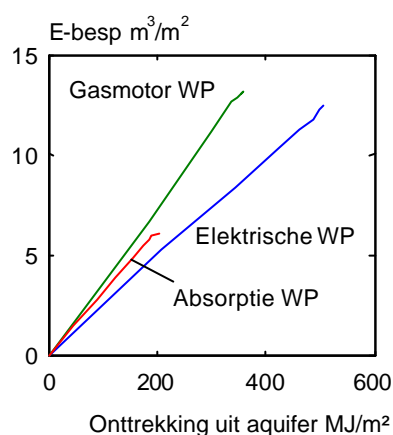
$$\text{Warmteonttrekking} = 33.5 * ((T_{\text{kas}} + T_{\text{buiten}}) / 2 - T_{\text{dek}}) - 74.5 \quad [\text{W/m}^2]$$

De gemeten resultaten komen voor drie van de vier systemen goed overeen met de warmteonttrekking die op grond van de warmteoverdrachtstheorie en CFD berekeningen verwacht werd. Alleen voor de speciale gevinde buis gaven de metingen een aanzienlijk hogere (meer dan 10%) warmteonttrekking dan de berekeningen.

5 Energiebesparingsperspectief

De onttrekking van warmte aan de kaslucht stelt de tuinbouw in staat gedurende de zomer een aquifer te regenereren waarmee een warmtepomp in de winter de kas kan verwarmen. Op deze manier levert de zomerse warmteonttrekking perspectief op energiebesparing.

In het rapport "De kas als zonne-energie oogster" (De Zwart en Swinkels, 2001) wordt voor drie typen warmtepompen een relatie gelegd tussen de hoeveelheid warmte die uit een aquifer wordt onttrokken en de energiebesparing die dat uiteindelijk oplevert. Deze relatie wordt in grafiekvorm weergegeven in figuur 5-1



Figuur 5-1 Verband tussen warmteonttrekking uit een aquifer en primaire energiebesparing voor drie verschillende warmtepompen die worden ingezet in een verwarmingssysteem zoals beschreven in hoofdstuk 2.

Omdat bij het duurzaam gebruik van de aquifer de eis wordt gesteld dat de warmte die gedurende de winter aan de aquifer wordt onttrokken in de zomer weer moet worden aangevuld, vormt de hoeveelheid warmte die in de zomer kan worden verzameld een beperking op de potentiële energiebesparing. Gezien het lineaire verloop van de lijnen in figuur 5-1 kan dan gemakkelijk een vuistregel voor de relatie tussen warmteonttrekking en energiebesparing worden gelegd. In geval een elektrisch aangedreven compressiewarmtepomp wordt gebruikt, geldt:

$$\text{Primaire E-besparing [m}^3 \text{ aardgas]} = 18 * \text{Warmteonttrekking [GJ]} \quad (\text{elektrische WP})$$

Voor een gasmotor aangedreven compressie warmtepomp geldt

$$\text{Primaire E-besparing [m}^3 \text{ aardgas]} = 32 * \text{Warmteonttrekking [GJ]} \quad (\text{gasmotor WP})$$

En voor een gasgestookte absorptiewarmtepomp

$$\text{Primaire E-besparing [m}^3 \text{ aardgas]} = 29 * \text{Warmteonttrekking [GJ]} \quad (\text{absorptie WP})$$

Uit de bovenstaande relaties blijkt dat de gasmotor aangedreven warmtepomp de hoogste besparing oplevert per eenheid warmte die aan de aquifer (en dus in de zomer aan de kaslucht) wordt onttrokken.

Naast bovenstaande relaties worden in hetzelfde rapport ook jaarrond berekeningen gemaakt om de jaarlijkse warmteoogst te bepalen van systemen die gebaseerd zijn op warmteonttrekking door middel van vrije convectie langs koude buizen. Van de zeven configuraties die in dat rapport besproken worden zijn er twee overeenkomstig met de systemen die ten behoeve van de ontwikkeling van de Floriadekas zijn onderzocht, namelijk de 70 mm buis in het ondernet en de gevinde buis onder de hangende teeltgoot. Het rapport geeft voor de 70 mm buis een jaarlijkse warmteonttrekking van $174 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \text{ jaar})$ en voor het speciale collectornet onder de hangende teeltgoot een warmteonttrekking van $90 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \text{ jaar})$. Als kasklimaat is hierbij gebruik gemaakt van het binnenklimaat zoals dat in een gangbare tomatenteelt wordt gebruikt.

De bovenstaande warmte-onttrekking is berekend door de theoretische beschouwing die in § 3.5 is gebruikt voor de berekening van de warmteonttrekking van koelende oppervlakken toe te voegen aan het kasklimaatmodel KASPRO (De Zwart, 1996). Dit model beschrijft het dynamisch gedrag van een kas als functie van het buitenklimaat, het door de tuinder gewenste binnenklimaat en de eigenschappen van het verwarmingssysteem.

In de berekeningen ten behoeve van het rapport "De kas als zonne-energie oogster" zijn de in hoofdstuk 3 gepresenteerde theoretische gegevens toegepast. De resultaten van de gevinde buis, die in de metingen ruim 10% meer warmte onttrok dan op grond van de theoretische berekeningen werd verwacht, zou hierbij dus wat onderschat kunnen zijn.

Een belangrijke randvoorwaarde die alle berekeningen rond de warmteoverdracht van de kaslucht naar koude oppervlakken een rol speelt is de temperatuur waarop het water aan het eind van het warmteonttrekkingssysteem wordt geregeld. Het verschil tussen kaslucht en buistemperatuur is immers de drijvende kracht voor de warmteoverdracht.

Een groot temperatuurverschil, en dus een lage buistemperatuur is voor de onttrekking van warmte zeer aantrekkelijk. Aan de andere kant moet de warmte echter worden opgeslagen in een aquifer die over een langere periode gemiddeld de omgevingstemperatuur moet hebben (anders zou er namelijk voortdurend warmte weglekken of aan de omgeving onttrokken worden). Dit betekent dat warme en koude puttemperatuur symmetrisch rond de $11-12 \text{ }^\circ\text{C}$ moeten liggen. De temperatuur waarmee het water na opwarming naar de aquifer kan worden gepompt moet dus tenminste boven de $12 \text{ }^\circ\text{C}$ liggen. Wanneer echter het temperatuurverschil tussen warme en koude put klein is moet meer water worden verpompt om een bepaalde hoeveelheid warmte op te slaan of te onttrekken dan wanneer het temperatuurverschil groot is. Bovendien neemt het benodigde volume voor het opslagsysteem af naarmate het temperatuurverschil tussen warme en koude put toeneemt.

Aangezien de benodigde infiltratie-snelheid een belangrijke kostenpost vormt en de ruimte die voor een opslagsysteem beperkt is (maximaal de ruimte onder de kas), wordt er voor het ontwerp van de Floriadekas vanuit gegaan dat gestreefd moet worden naar een temperatuur van $15 \text{ }^\circ\text{C}$ voor de warme put. Dit betekent dat vanwege de temperatuurval over de (vereiste) warmtewisselaar het water aan de uitgang van een systeem waarmee warmte wordt onttrokken $17 \text{ }^\circ\text{C}$ moet zijn.

De effectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt van de koelende tralie is per m^2 kas vrijwel gelijk aan die van de 70 mm buis (4.3 voor de tralie ten opzichte van 4.5 voor de 70 mm buis, zie § 4.6). Bij toepassing van deze verhoudingsgetallen zal de jaarlijks warmteonttrekking van de koelende tralie dus $174 \cdot 4.3/4.5 = 166 \text{ MJ}/(\text{m}^2_{\text{kas}} \text{ jr})$ bedragen.

De te verwachten warmteonttrekking via het dak is berekend door de formules die voor

Deze berekeningen gaven aan dat voor het dakbevoeiingssysteem een warmteogst van 490 MJ/(m² jaar) mag worden verwacht. Hierbij is uitgegaan van een gemiddelde dektemperatuur van 16 °C, teneinde het perspectief te berekenen voor de situatie waarbij water op 17 °C van het dek zal aflopen. Hiermee wordt het dakbevoeiingssysteem dus in een vergelijkbare context geplaatst als de andere drie systemen.

Worden deze cijfers gecombineerd met de informatie uit figuur 5-1 dan kunnen de energiebesparingspotentiëlen die voortvloeien uit de vier warmteonttrekkingssystemen worden bepaald (tabel 5-1).

In tabel 5-1 is uitgegaan van het gebruik van de gasmotor aangedreven warmtepomp omdat deze de meeste primaire energiebesparing oplevert per eenheid aan de aquifer onttrokken warmte.

Tabel 5-1 Energiebesparingspotentieel dat ontstaat wanneer de 4 onderzochte collectornetten in de zomer warmte aan de kaslucht onttrekken zodat een gasmotor aangedreven warmtepomp in de winter de kas daarmee (gedeeltelijk) kan verwarmen.

Omschrijving	warmteogst [MJ/m ² jr]	Gasbesparing [m ³ /m ² jr]
Koelende tralieligger	166	5.3
70 mm ondernet (10 buizen in 8 m tralie)	174	5.6
Speciaal collectornet (5 buizen in 8 m tralie)	90	2.9
Dakbevoeiingssysteem	490	15.7

Tabel 5-1 laat zien dat van de vier onderzochte systemen het perspectief van het dakbevoeiingssysteem verreweg het grootst is. Het effect van de koelende tralieligger is klein, vooral wanneer het wordt afgezet tegen de te verwachten bouwkundige complicaties bij de daadwerkelijke integratie van dit systeem in de kas (doorkoppeling van de watervoerende leidingen rond de poten, afvoer van condenswater, kans op vuilophoping tussen de ribben etc.). Het verdikte ondernet heeft weliswaar een nauwelijks hogere warmteonttrekkende capaciteit, maar is wel gemakkelijk te integreren in het bestaande kassysteem. Daarmee is het verdikte ondernet (op afstand ten opzichte van het dakbevoeiingssysteem) het tweede alternatief.

Het collectornet onder de hangende goten heeft een klein potentieel. Ook hier moet worden meegewogen dat het potentieel klein is, omdat het een investering in een compleet additioneel collectornet betreft.

Afgezet tegen de 60 m³ gas die in de reguliere tomatenteelt per jaar per m² kas wordt verbruikt (KWIN, 1998) biedt het dakbevoeiingssysteem een besparingsperspectief van zo'n 26%. De warmteonttrekking met behulp van het 70 mm ondernet en de koelende tralieligger geeft tegen deze achtergrond een besparing van bijna 10% en het speciale collectornet biedt perspectief op ongeveer 5% energiebesparing.

6 Conclusies

In tegenstelling tot het oorspronkelijke uitgangspunt dat energiebesparing kon worden bereikt door ontvochtiging van de kaslucht via actief gekoelde oppervlakken (in plaats van ventilatie via de ramen) is (uit ander onderzoek) gebleken dat het oorspronkelijk beoogde ontvochtigingsconcept dat oorspronkelijk voor de Floriadekas zou worden ontwikkeld de warmtevraag belangrijk doet toenemen. Dit energieverbruiksverhogend effect kan weliswaar worden gemaskeerd door het grotere (besparende) effect van de toepassing van de warmtepomp, de energiebesparing is echter nóg groter als de warmtepomp wordt gebruikt in combinatie met ontvochtiging via ventilatie. In dit verwarmingsconcept wordt gebruik gemaakt de zomerse warmteoverschotten om een aquifer-doublet dat in de winter is ontladen weer te regenereren.

Vanuit dit gedurende de uitvoering van dit project gegroeide inzicht, moeten warmteonttrekkende systemen dus vooral worden beoordeeld op hun mogelijkheid om in de zomer warmte aan de kaslucht te onttrekken. Het ontvochtigingsvermogen speelt een ondergeschikte rol en wordt beschouwd als een prettig bijkomend aspect omdat condensatie sterk bijdraagt aan de warmteoverdracht.

Om systemen die in dit concept gebruikt kunnen worden voor de onttrekking van zomerse warmteoverschotten te beoordelen zijn vier verschillende warmteonttrekkende oppervlakken theoretisch en experimenteel bestudeerd. Dit zijn:

1. een met de tralieligger geïntegreerde dakgoot en gevinde buis, waarbij zowel goot als buis gekoeld kunnen worden;
2. een verdikt uitgevoerd buisrailnet dat zowel voor verwarming (in koude perioden) als warmteonttrekking (in warme perioden) gebruikt kan worden;
3. een gevinde buis die onder hangende teeltgoten kan worden geplaatst;
4. een dakbevoeiingssysteem dat op warme dagen koud water over het dek laat stromen.

Om de theoretisch berekende prestaties onderling te kunnen vergelijken is voor elk van de 4 systemen de warmteoverdracht berekend in geval de kasluchttemperatuur 25 °C is bij een RV van 75%, de temperatuur van het warmteuitwisselend oppervlak 15 °C is en de stralingsintensiteit van de zon 500 W/m² bedraagt. Als typische buitencondities (relevant voor het dakbevoeiingssysteem) is uitgegaan van een temperatuur van 21 °C, bij een RV van 62%, een windsnelheid van 3 m/s en een hemeltemperatuur van 11 °C.

De resultaten van deze berekeningen zijn gevat in tabel 6-1. De tabel laat zien dat op theoretische gronden de koelende tralieligger en de 70 mm buis ongeveer vergelijkbare prestaties leveren, dat een gevinde buis onder de hangende teeltgoot ongeveer de helft minder warmte aan de kaslucht onttrekt en dat het dakbevoeiingssysteem ruim drie keer zoveel warmte als de eerste twee verzamelt.

Tabel 6-1 Bench-mark tabel ter vergelijking van de warmteonttrekkingscapaciteit van de 4 systemen in geval de onderzochte systemen worden geplaatst in een kas met een kapbreedte van 4 meter en een standaard inrichtingsstramien bij een typische (en overall dezelfde) kaslucht- en buitenconditie waaronder de warmteonttrekking plaatsvindt. In alle gevallen is de kasluchttemperatuur 10 °C hoger dan de temperatuur van het warmteonttrekkende systeem

Omschrijving	warmteonttrekking [W/m ² _{kas}]
Koelende tralieligger	45
70 mm ondernet (10 buizen in 8 m tralie)	43
Speciaal collectornet (5 buizen in 8 m tralie)	23
Dakbevoeiingssysteem	137

Om de theoretische berekeningen te verifiëren zijn alle vier systemen in een experimentele kas geplaatst en doorgemeten. De experimentele gegevens kwamen voor de meeste systemen goed overeen met de metingen, dat wil zeggen dat de resultaten van de bench-mark berekeningen goed binnen het gebied van de puntenwolk waarin de resultaten zijn weergegeven terecht kwam. Alleen voor het speciale collectornet onder de hangende goot gaven de metingen een 10% hogere warmteonttrekking dan op theoretische gronden verwacht werd.

De meetresultaten zijn bewerkt tot de volgende vuistregels:

Tabel 6-2 Vuistregels voor de experimenteel bepaalde warmteonttrekkingscoëfficiënt van de vier onderzochte systemen.

Omschrijving	warmteonttrekking	
	per meter buis	per m ² kas
Koelende tralieligger (1 per 4 m kap)	$17,1 \times (T_{kas} - T_{buis})$	$4,3 \times (T_{kas} - T_{buis})$
70 mm ondernet (10 buizen in 8 m tralie)	$3,6 \times (T_{kas} - T_{buis})$	$4,5 \times (T_{kas} - T_{buis})$
Speciaal collectornet (5 buizen in 8 m tralie)	$4,2 \times (T_{kas} - T_{buis})$	$2,6 \times (T_{kas} - T_{buis})$
Dakbevoeiingssysteem	n.v.t.	$33,5 \times ((T_{kas} + T_{buiten}) / 2 - T_{dek}) - 74,5$

De metingen aan het effect van het dakbevoeiingssysteem op de lichttransmissie gaven eerder een indicatie in de richting van een verbetering dan van een verslechtering van de lichtdoorlatendheid van de kas.

Het uiteindelijke doel van de onttrekking van warmte aan de kaslucht is de regeneratie van een aquifer zodat deze in de winter gebruikt kan worden voor de voeding van een warmtepomp. Gebruik makend van de vuistregel dat een gasmotor aangedreven compressie warmtepomp 32 m³ a.e. bespaart per GJ warmte die de warmtepomp aan een aquifer onttrekt (uitgaande van gebruik van de warmtepomp in een 'standaard' kasklimaat) en de eis dat, voor een duurzaam systeem, de

jaarlijkse warmteonttrekking en -accumulatie in evenwicht moeten zijn, kan op grond van de jaarrond warmteonttrekking het energiebesparingspotentieel worden berekend.

Om de jaarrond warmteonttrekking te kunnen berekenen is gebruik gemaakt van het kasklimaat simulatiemodel KASPRO, waaraan de theorie rond de warmteonttrekking via koude oppervlakken zoals verwoord in hoofdstuk 3 is toegevoegd. Het simulatiemodel onderscheidt namelijk de verschillende componenten waaruit de warmteonttrekking is opgebouwd en, omdat theorie en praktijk blijkens dit rapport goed overeenkomen, zijn de vuistregels van hoofdstuk 4 en de theorie van hoofdstuk 3 uitwisselbaar. Een extra voordeel van het gebruik van KASPRO is dat dan rekening wordt gehouden met het feit dat het gebruik van de kaskoeling de kasluchtcondities doet veranderen.

De jaarrond berekeningen laten het volgende besparingspotentieel zien.

Tabel 6-3 Energiebesparingspotentieel dat ontstaat wanneer de 4 onderzochte collectornetten in de zomer warmte aan de kaslucht onttrekken zodat een gasmotor aangedreven warmtepomp in de winter de kas daarmee (gedeeltelijk) kan verwarmen.

Omschrijving	Gasbesparingspotentieel [$\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ jr}$]
Koelende tralieligger	5,3
70 mm ondernet (10 buizen in 8 m tralie)	5,6
Speciaal collectornet (5 buizen in 8 m tralie)	2,9
Dakbevoeiingssysteem	15,7

Zoals te verwachten valt geeft tabel 6-3 hetzelfde patroon te zien als in alle andere tabellen uit dit hoofdstuk het geval is, namelijk dat de energetische prestatie van de koelende tralieligger en het verdikte ondernet vergelijkbaar zijn, dat de prestatie van het collectornet onder de hangende teelgoot beperkt is, en dat het perspectief van het dakbevoeiingssysteem zeer groot is.

Afgezet tegen het jaarlijks gasverbruik in de tomatenteelt van zo'n $60 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ jr})$ zijn de besparingspotenties respectievelijk 10%, 5% en 26%.

7 Aanbevelingen

De goede overeenkomst tussen de theoretische berekeningen en de experimenten geeft aanleiding om te concluderen dat bij het onderzoek naar nieuwe concepten een bureaustudie middels CFD-berekeningen en kasklimaat simulatiemodellen een goede schifting kan opleveren tussen perspectiefvolle en minder perspectiefvolle concepten. De resultaten van bureaustudies kunnen dan ook als belangrijke tools worden ingezet om richting te geven aan in de praktijk te beproeven innovatieve systemen.

De berekende jaarrond perspectieven en de resultaten van de metingen voor het dakbevoeiingssysteem zijn zodanig positief, dat voorgesteld wordt om dit systeem op de Floriade te demonstreren.

Voorts is aanbevelenswaardig dit concept middels onderzoek verder uit te werken. Er dient dan niet alleen naar warmteonttrekking te worden gekeken maar ook naar de beperking op de ventilatie, die bij deze grote onttrekkingscapaciteit substantieel zal zijn. De beperking van de ventilatie zal via het CO₂-regime een productieverhogend en/of een CO₂-vraag beperkend effect hebben. Tevens is denkbaar dat het bij de toepassing van dakbevoeiing verantwoord is de ventilatiecapaciteit te verkleinen in de vorm van de montage van minder en/of kleinere ramen. Dit zal de lichtdoorlatendheid van het kasdek kunnen verhogen.

8 Literatuur

- Bot, G.P.A., 1983, Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model. Wageningen, Proefschrift Landbouwniversiteit.
- Janssen, E.G.O.N., H.D.M. Kool en J.M.C. Mol, 2001, Geïntegreerde ligger met ontvochtiging voor de Floriadekas, Delft, TNO-Rapport 2001-BC-R7013
- KWIN, 1998, Kwantitatieve informatie voor de Glastuinbouw 1998-1999, Proefstation voor Bloemisterij en Glasgroente, Naaldwijk
- Raaphorst, M.G.M, M.N.A. Ruijs, J.K. Nienhuis, N.J. van de Braak, H.F. de Zwart, G.G. Schoonderbeek, R.E.M.B. Heller, 2001, Evaluatie systeemontwerpen voor ontvochtigen en energievoorziening, in press.
- De Zwart, H.F., 1996, Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model, Wageningen, Proefschrift Landbouwniversiteit
- De Zwart, H.F. en G.L.A.M. Swinkels, 2001, De kas als zonne-energie oogster, Wageningen, IMAG rapport, in prep..