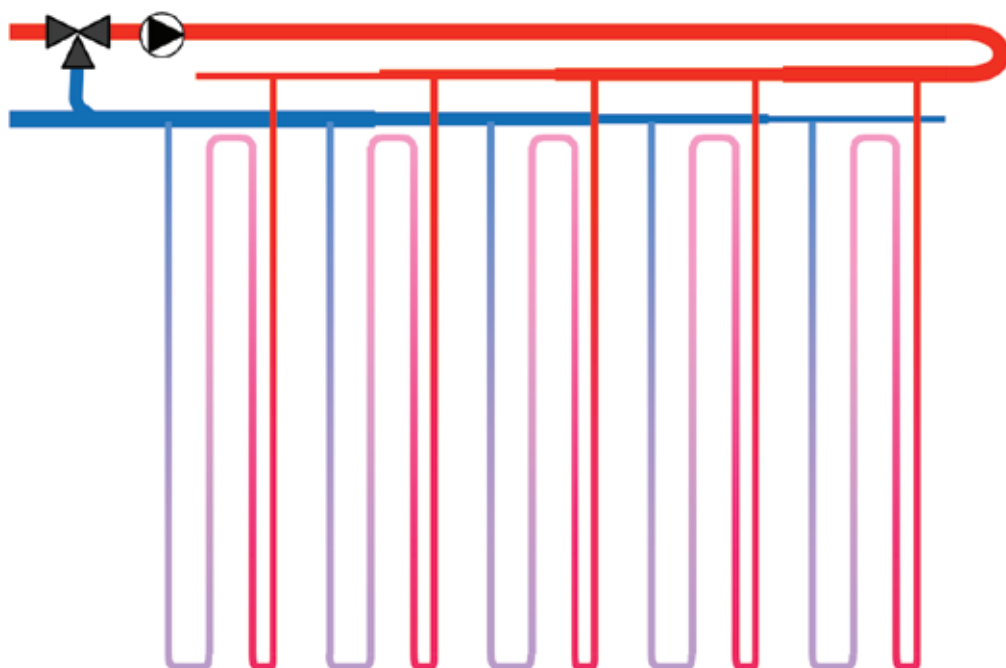




Lage temperatuurverwarming in de Glastuinbouw

H.F. de Zwart



Referaat

Dit rapport verwoordt de resultaten van een 1-jarig monitoringsproject aan de toepassing van een buitenlucht-aanzuiginstallatie op een modern Phalaenopsisbedrijf. Zo'n installatie maakt het mogelijk om verantwoord een hogere luchtvochtigheid aan te houden en maakt het mogelijk om bij gesloten schermen toch voldoende vocht af te kunnen voeren. Deze twee zaken vormen de belangrijkste basis voor de energiebesparing die met Het Nieuwe Telen kan worden gerealiseerd. Een voorwaarde voor daadwerkelijke energiebesparing in een praktijksituatie is dat de regeling van de buisverwarming en het schermregime wordt aangepast. De gebruikelijke minimumbuisinstelling moet drastisch worden verlaagd, schermen moeten bij een hogere buitenluchttemperatuur dichtlopen en kierstanden in het scherm moeten worden voorkomen. Gedurende de looptijd van het project zijn de kasklimaatregelaar-instellingen in eerste instantie met kleine stapjes zodanig aangepast dat er een duidelijke energiebesparing waarneembaar was. In het tweede kwartaal lag het energieverbruik in de afdelingen met een buitenlucht aanzuiginstallatie meer dan 1 m³ per m² lager dan in de referentie-afdelingen. Vanaf begin augustus tot aan het eind van de monitoringsperiode is de buitenluchtinstallatie echter gebruikt om een actiever en droger kasklimaat in de nieuwe afdelingen te realiseren. Hiervan werd verwacht dat daarmee de hoge groeisnelheid van de voorafgaande maanden nog beter gegarandeerd kon worden bij een laag uitvalpercentage. Vanaf toen is het energiebesparingseffect vrijwel helemaal weggefallen en is de absolute besparing aan het eind van het jaar uitgekomen op 40 MJ/m². Dit is 2.5% van het jaarverbruik van 51 m³/m². Indien de klimaatregelstrategie die in het voorjaar was ontwikkeld het hele jaar zou zijn toegepast zou de jaarlijkse besparing op 7% zijn uitgekomen, ofwel 4 m³/(m² jaar). Het elektriciteitsverbruik van de buitenluchtaanzuiging was in het monitoringsjaar 1.6 kWh/m², maar als deze installatie de komende jaren gebruikt gaat worden zoals dat in het laatste half jaar komt het jaarlijkse stroomverbruik op 4 kWh/(m² jaar). De tuinder was zeer tevreden over teeltresultaat in de nieuwe opkweekafdelingen met buitenluchtaanzuiging. De teelt verloopt zeer regelmatig en de nieuwe afdelingen hebben een hogere bladafplitsingssnelheid. Het diffuse glas en het feit dat het een nieuwe kas betreft die goed en kiervrij is gebouwd heeft hier echter ook aan bijgedragen.

Abstract

This report presents the results of a 1-year monitoring project on the use of an air distribution system on a modern greenhouse growing Phalaenopsis. Such a system makes it possible to accept higher humidities and enables to keep the thermal screens closed as much as possible. These two things are the main basis for the energy saving potential of The New Cultivation. A prerequisite for effective energy is that the greenhouse climate computer settings are adjusted according to the new possibilities of the hardware installed. The widely used minimum pipe temperature settings should be drastically reduced, screens must be kept closed at higher outside temperatures and partial opening of the screen should be avoided. During the course of the project, the climate controller setpoints were been adjusted step by step, resulting in a clear energy conservation result by the end of June. By that time the energy consumption in the departments with the air treatment units showed a more than 1 m³ per m² lower gas consumption compared with the reference. However, from early August until the end of the monitoring period, the grower decided to use the air treatment to achieve a drier 'active' climate, rather than a low energy consumption. This in order to secure the high growth rate experienced in the previous months. Due to this change in the use of the system, the energy saving effect in the second half of the year almost completely disappeared and the absolute savings at the end of the year amounted to 40 MJ/m². This is 2.5% of the annual consumption of 51 m³/m². If the climate control strategy used in spring had been continued throughout the year, the annual savings would have been 7%, which means a 4 m³/(m² year) reduction of energy use.

The electricity consumption of the air treatment unit in the monitoring year was 1.6 kWh/m², but if the installation in the coming years will be used like it was used in the last six months, the annual electricity consumption of the air treatment unit will become 4 kWh/(m² year).

© 2013 Wageningen, Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek (DLO) onderzoeksinstituut Wageningen UR Glastuinbouw.

Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk
: Postbus 20, 2665 ZG Bleiswijk
Tel. : 0317 - 48 56 06
Fax : 010 - 522 51 93
E-mail : glastuinbouw@wur.nl
Internet : www.glastuinbouw.wur.nl

Inhoudsopgave

	Samenvatting	5
1	Inleiding	7
2	Theorie	9
	2.1 Buisverwarmingssystemen	9
	2.2 Verwarmde betonvloeren	13
	2.3 Luchtverwarmingssystemen	14
	2.3.1 Air & Energy systeem	15
	2.3.2 Decentrale warmtewisselaars	16
	2.3.3 Buitenlucht voorverwarming	18
3	Effect van LT-verwarming	21
	3.3.1 Effect van LT-systemen op het condensorrendement	21
	3.3.2 Effect van LT-systemen op kassen met warmtepompsystemen	23
	3.3.3 Effect van LT-systemen op kassen met geothermie	24
4	Conclusies	27
Bijlage I	Kas- en klimaat-instellingen	29

Samenvatting

In dit rapport wordt met een laag-temperatuur verwarmingssysteem een stookinstallatie bedoeld die een bepaalde hoeveelheid verwarmingsvermogen bij een relatief lage aanvoer- en retourtemperatuur kan afgeven. Het rapport begint dan ook met een verhandeling over uitvoeringsvormen van dit soort systemen en opmerkingen over de inpassingsmogelijkheden en regelkarakteristieken daarvan tegen de achtergrond van de tuinbouwtoepassing. Het blijkt dat een laag-temperatuur verwarmingssysteem vooral betekent dat er een groot verwarmend oppervlak wordt gebruikt waar de warmte, al dan niet ondersteund door geforceerde convectie, aan de kas wordt overgedragen.

Uiteraard is het aantal uitvoeringsvormen praktisch onbegrensd. Om toch praktische handvaten en trends te kunnen tonen worden er in de verder berekeningen van het perspectief van deze systemen twee uitvoeringsvormen gebruikt die model staan voor een realistische implementatie van een laag-temperatuur verwarmingssysteem. Het eerste systeem is de eenvoudige verdubbeling van het aantal buizen in het primaire net. Deze uitvoeringsvorm betekent dat de benodigde overtemperatuur halveert, waardoor in een energiezuinige tomatenteelt de benodigde aanvoertemperatuur niet vaak meer boven de 45 °C uitkomt en nooit boven de 50 °C. Het tweede systeem wat in de verdere berekeningen als voorbeeld van een laag-temperatuursysteem wordt gebruikt is de voorverwarming van buitenlucht die via een luchtbehandelingskast wordt aangezogen ten behoeve van de doelgerichte ontvochtiging van de kaslucht. Vanwege de veel lagere tegentemperatuur (buitenlucht) kan de retourtemperatuur van verwarmingswater in zo'n voorverwarmingssysteem zeer laag worden (rond de 15 °C).

Met de hierboven beschreven systemen is vervolgens bekeken wat deze verlaging van verwarmingswatertemperaturen betekenen voor de vermindering van het fossiele energieverbruik van kassen.

Voor kassen die verwarmd worden met een ketel of een WKK betekent het gebruik van laag-temperatuurverwarming een gasbesparing van 3%, bij een ketelgestookte kas, tot 8% bij een kas die vooral middels WKK wordt verwarmd. De besparingen worden gerealiseerd door een beter functionerende condensor. De hoge besparing die genoemd staat voor de kas met WKK geldt alleen als de WKK geheel op warmtebehoefte wordt gebruikt en dus bij een beter functionerende condensor minder draaiuren gaat maken of kleiner gekozen wordt. Een deel van de besparing komt in dat geval dus uit een verlaagde elektriciteitsproductie. Van de twee genoemde vormen van laag-temperatuurverwarming levert het gebruik van buitenluchtvoorverwarming een groter effect dan het vergroten van het aantal buizen in de kas.

De toepassing van een laag-temperatuur verwarmingssysteem in kassen die voornamelijk met een warmtepomp worden verwarmd blijkt het resterend gasverbruik van de ketel met 1.7 tot 2.7 m³/(m² jaar) te laten dalen en het stroomverbruik met 2.3 tot 5 kWh/(m² jaar). Bij een gasprijs van 30 cent per m³ en een stroomprijs van 10 cent per kWh betekent dit een verlaging van de energiekosten met ongeveer 1 euro per m² per jaar. Op de totale variabele kosten voor de kasverwarming is dit ongeveer 13%. In dit soort kassen kan verreweg het grootste effect worden behaald met een vergroting van het VO in de kasruimte (dus meer buizen of bijvoorbeeld OPAC warmtewisselaars).

Bij gebruik van geothermie kan het resterende gasverbruik van het bedrijf door de toepassing van laag-temperatuurverwarming met 5 m³/(m² jaar) worden verlaagd. Hiervoor moeten dan beide systemen worden toegepast, laag-temperatuur buitenluchtvoorverwarming én een verdubbeld verwarmingsnet. Beide maatregelen dragen in ongeveer gelijke mate bij aan het effect, dus elk van de maatregelen afzonderlijk zullen ongeveer 2.5 m³ vermindering van het resterende gasverbruik opleveren. Procentueel zijn dit grote bijdragen, gezien het resterend gasverbruik dat voor een kas die door geothermie wordt verwarmd rond de 10 m³ per m² per jaar zal liggen.

1 Inleiding

Lage temperatuur verwarmingssystemen worden gekenmerkt door een relatief grote warmteoverdracht bij kleine temperatuurverschillen tussen de kaslucht en de verwarmingswatertemperatuur. Voor stookinstallaties waarin een condensor is opgenomen betekent een lagere watertemperatuur dat het condensorrendement toeneemt en er dus meer warmte uit een m³ aardgas kan worden verkregen. Een beter condensorrendement kan het energieverbruik van een praktijkbedrijf met 2 tot 8% laten afnemen, afhankelijk van het feit of het bedrijf verwarmd wordt met respectievelijk een ketel of een WKK.

Kassen die verwarmd worden door een warmtepomp hebben veel belang bij verwarming op een lage watertemperatuur omdat de COP van een warmtepomp sterk afhangt van de temperatuur waarop het verwarmingsvermogen wordt geleverd. Een lagere watertemperatuur kan het elektriciteitsverbruik van de warmtepomp 5 tot 10% verlagen en tegelijkertijd de dekkingsgraad van de warmtepomp in de warmtevoorziening nog wat verhogen.

Bij kassen die verwarmd worden door water uit een geothermiebron hangt het vermogen wat zo'n bron kan leveren lineair af van de uitkoeling die de kas kan realiseren. De dekkingsgraad van geothermie als warmtebron voor een kas kan hierdoor sterk verbeteren waardoor de benodigde inzet van de ketel tijdens piekvermogens wordt gereduceerd. Het resterend verbruik van fossiele energie kan in dit soort met situaties met 10 tot 30% verminderd worden.

De korte inleiding die hierboven is gegeven schetst dat de waarde van lage temperatuur verwarmingssystemen ten opzichte van een standaard verwarmingssysteem sterk afhangt van de wijze waarop de warmte wordt opgewekt. Daarom worden de drie genoemde situaties in dit rapport steeds apart behandeld.

Een tweede belangrijke invalshoek die in dit rapport aan bod komt is de wijze waarop de lage temperatuur verwarming wordt gerealiseerd. In het algemeen kan de benodigde verwarmingswatertemperatuur worden verlaagd door het oppervlak waaraan de warmte wordt overgedragen te vergroten, bijvoorbeeld door meer of dikkere verwarmingsbuizen te plaatsen, of door de overdrachtscoëfficiënt te vergroten. De vergroting van de overdrachtscoëfficiënt, door de lucht met een ventilator over het warme oppervlak te blazen, betekent dat er bij gelijke temperatuurverschillen tussen lucht en water meer warmte over een bepaald oppervlak wordt overgedragen.

Vergroting van de warmte-overdrachtscoëfficiënt betekent meestal dat er een zekere hoeveelheid elektriciteit moet worden ingezet, waardoor een deel van het voordeel van de verlaging van de verwarmingswatertemperatuur weer teniet gedaan kan worden.

Alle berekeningen worden gedaan voor een energiezuinige tomatenteelt, dat wil zeggen dat er wordt verondersteld dat de kas in de koudste maanden (december, januari en februari) gebruik maakt van een permanent foliescherm als aanvullende isolatie op de twee beweegbare doeken. Eén van de beweegbare doeken is transparant, waardoor het op donkere koude dagen overdag dicht gehouden kan worden. Ook wordt er geen gebruik gemaakt van een minimumbuis. Er wordt alleen selectief een buisverhoging ingezet wanneer de luchtvochtigheid in de kas te hoog oploopt.

Het rapport begint met een verhandeling over verwarmingssystemen en het dynamische gedrag daarvan. Er wordt ingegaan op de praktische consequenties van het gebruik van een groter aantal buizen, luchtverwarming of de verwarmde betonvloer als mogelijkheden om een laag-temperatuur verwarmingssysteem te maken. Tevens worden de eigenschappen en capaciteiten van deze installaties met elkaar vergeleken.

In hoofdstuk 3 worden vervolgens de resultaten die met de verschillende systemen kunnen worden behaald doorgerekend in geval van een standaard ketelhuis, een verwarmingssysteem dat gebaseerd is op verwarming met een warmtepomp en een kas die door een geothermische warmtebron wordt verwarmd. Er wordt inzicht gegeven in het effect van LT-verwarming in de verschillende gebruikscondities van de kas, dus op koude en op minder koude dagen.

In hoofdstuk 4 worden de conclusies uit deze korte burostudie getrokken en worden aanbevelingen gedaan voor de oplossing van knelpunten in de verdere ontwikkeling van LT-systemen voor de tuinbouw.

2 Theorie

Verwarmde kassen worden gestookt ter compensatie van het energieverlies via het kasdek en via de (lek)ventilatie en voor de verdamping door het gewas. Deze warmte wordt in de regel via een buisverwarmingssysteem toegevoerd, hoewel er ook een aantal nieuwe kassen zijn die voor een deel met warme lucht worden verwarmd. In de potplantenteelt wordt bij planten die op de grond worden opgekweekt veelvuldig gebruik gemaakt van vloerverwarming.

Welk systeem er ook gebruik wordt, het principe is overal gelijk, namelijk dat het verwarmingswater een hogere temperatuur moet hebben dan de gewenste kasluchttemperatuur om warmte over te kunnen dragen. De benodigde overtemperatuur hangt daarbij af van het oppervlak waarover de warmte wordt afgegeven en de overdrachtscoëfficiënt van dat oppervlak. De gewenste kasluchttemperatuur legt daardoor een ondergrens aan de verwarmingswatertemperatuur, terwijl de bovengrens bepaald wordt door keuzes in het verwarmingssysteem. Keuzes die beïnvloed worden door kosten-aspecten en in verband staan met de homogeniteit in de kas. Eén heel hete buis in een kap kan net zoveel warmte afgeven als een groter aantal minder warme buizen, maar geeft zeker een slechtere verdeling van de warmte.

Dit hoofdstuk bespreekt technische- en gebruiksaspecten van de verschillende systemen en vertaalt de eigenschappen naar een relatie tussen de benodigde temperatuur voor een bepaald verwarmingsvermogen. Het volgende hoofdstuk gaat in op de betekenis daarvan voor het rendement van verwarmingssystemen.

2.1 Buisverwarmingssystemen

Nadat het gebruik van kachels in de tuinbouw vanaf de 60-er jaren van de vorige eeuw steeds meer vervangen werd door ketelverwarming is het buisverwarmingssysteem het dominante verwarmingssysteem in de tuinbouw geworden. De verwarmingsbuizen werden oorspronkelijk langs de poten van de kas gemonteerd, maar werden later op de grond geplaatst (vooral in de groenteteelt) of boven het gewas aan de tralie gehangen (vooral in de volveldse sierteelten of potplantenteelten). Het buisverwarmingssysteem heeft nog een extra stimulans gekregen toen de slimme tuinder Jaap Zegwaard in de 70-er jaren het buisrailsysteem ontwikkelde, waardoor de verwarmingsbuis een dubbele functie kreeg. Ook verwarmingsbuizen boven het gewas hebben vaak een mono-rail functie.

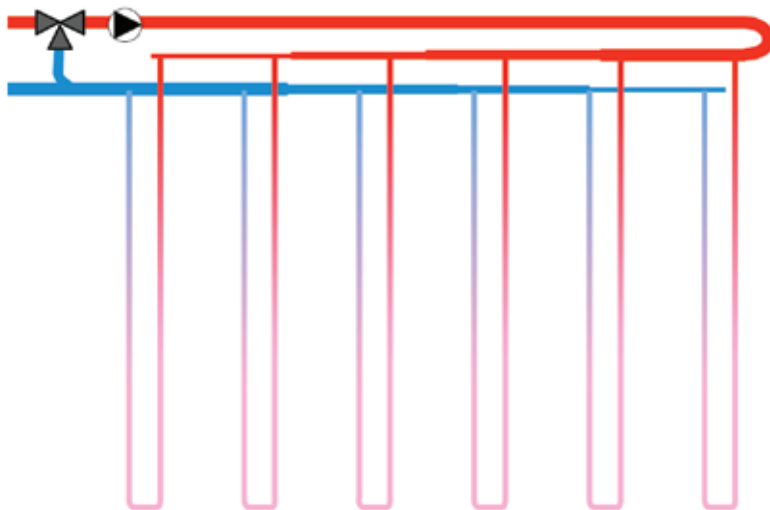
Vaak hebben kassen naast het buisrail- of bovennet nog een tweede verwarmingsnet in het gewas of onder teelttafels. De verwarmingscapaciteit van dit tweede net is echter in de regel aanzienlijk kleiner dan dat van het buisrail- of bovennet zodat het belang van dit tweede net in de verwarmingshuishouding van een kas beperkt is.

In Figuur 2.1. is een schematische tekening gemaakt van een buisverwarmingssysteem zoals dat in de tuinbouw gebruikelijk is. Het verwarmingssysteem heeft een circulatiepomp en een mengklep. De mengklep zorgt ervoor dat de aanvoerwatertemperatuur in het verwarmingssysteem lager kan zijn dan de temperatuur van het water dat vanuit het ketelhuis wordt aangevoerd. Hierdoor kunnen de verwarmingssystemen van verschillende afdelingen in de kas onafhankelijk van elkaar worden geregeld.

In Figuur 2.1. zijn de pomp en de klep vlak bij de verwarmingsbuizen getekend, dus alsof de menggroep zich in de kasafdeling bevindt. Vaak zijn de menggroepen in de praktijksituatie echter niet verspreid over de kas geplaatst, maar bij elkaar in het ketelhuis ondergebracht. Vanuit het ketelhuis wordt het op temperatuur geregelde water dan via een lange leiding naar de kasafdeling gevoerd. De lengte van zo'n aanvoer- en retourleiding kan dan oplopen tot 200 m. Ook zijn in de Figuur de verwarmingsspiralen, ook wel strangen genoemd, slechts schematisch weergegeven. Één verwarmingsgroep voor een buisrailnet heeft in een praktijkkas al gauw 50 strangen en de lengte van zo'n strang ligt in de regel tussen de 100 en 250 meter. Een gemiddeld buisrailsysteem bevat daarmee rond de 13 km verwarmingsbuis per hectare.

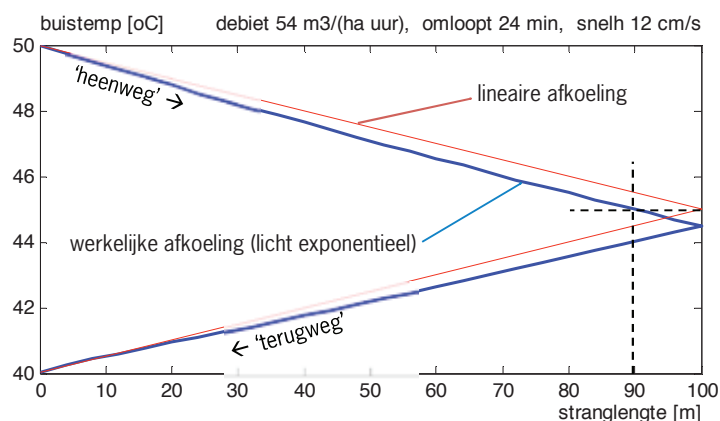
Een kenmerkende eigenschap van een kasverwarmingssysteem is de toepassing van het Tichelmann-systeem in de aanvoer- en retourleiding. Dit houdt in dat de diameter van de aanvoerleiding afneemt met de stroomrichting en de diameter van de retourleiding toeneemt met de stroomrichting. Hierdoor is de stroomsnelheid van het water in de aanvoer- en retourleiding min of meer constant, waardoor een min of meer homogene waterdrukverdeling wordt verkregen. Echt homogeen is de drukverdeling nooit omdat het diameterverloop van de aanvoer- en retourleidingen in een kleiner aantal stappen verloopt dan dat er strangen zijn. Hierdoor zal in de praktijk het water in de ene strang wat sneller stromen dan in de andere strang, maar doordat er bewust extra weerstand in de aansluiting van de strang op de aanvoer- en retourpijp wordt aangebracht blijven de verschillen in stroomsnelheid beperkt.

Het Tichelman-systeem maakt het noodzakelijk dat het dikke deel van de aanvoerleiding in de andere hoek zit dan het dikke deel van de retourleiding. Hierdoor moet er altijd een extra lus in het dikke deel van de aanvoer- of de retourleiding worden gemaakt. In deze tekening is de extra lus in de aanvoerleiding gemaakt omdat deze daarmee gelijk een substantiële bijdrage in de gevelverwarming kan leveren. De aanvoer- en retourleidingen liggen immers altijd aan de gevelzijde van de kas en vooral bij lage-temperatuur verwarmingssystemen levert de warme dikke aanvoerleiding een welkome bijdrage aan de compensatie van het warmteverlies langs de gevel.



Figuur 2.1. Principeschets van een buisverwarmingssysteem

Figuur 2.1. laat ook zien dat door de gekozen lay-out het temperatuurverschil tussen twee naast elkaar liggende buizen aan de gevelkant groot is en aan de padkant klein. Indien de temperatuurafname van de buis aan de aanvoer-kant naar de retourkant lineair zou verlopen, zou de bovengemiddelde warmte-afgifte van de hete buis precies de ondergemiddelde warmte-afgifte van het koudere deel van de strang compenseren. In werkelijkheid is de afname van de temperatuur in de buis echter niet lineair, maar verloopt via een lichte exponentiële kromme. Het effect daarvan wordt getoond in Figuur 2.2.



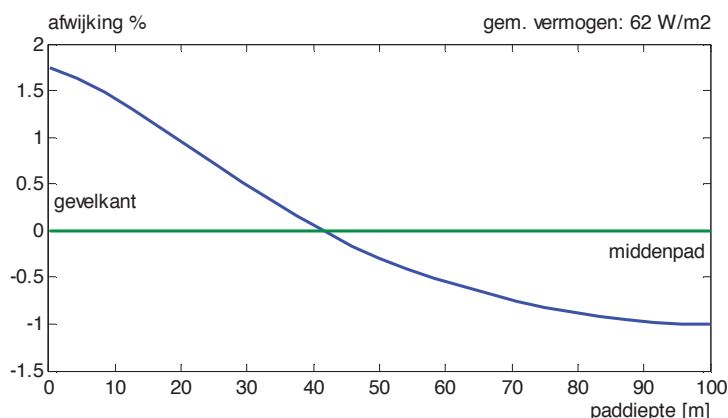
Figuur 2.2. Temperatuurverloop over een verwarmingsstrang en het resulterende gemiddelde vermogen van de twee buizen.

In Figuur 2.2. wordt het verloop van de temperatuur van een 200 meter lange strang getoond bij een aanvoertemperatuur van 50 °C en een waterdebiet van 54 m³/(ha uur). Het water stroomt daarbij vanaf de gevel 100 meter in de richting van het pad en daarna weer 100 meter terug. Bij een kasluchttemperatuur van 20 °C en een buisdiameter van 51 mm (de meest gebruikte maat voor een buisrailnet) en bij gebruik van 10 buizen in een 8 meter kap koelt het water in de 24 minuten dat het door de buis onderweg is precies 10 °C af. Een afkoeling van 10 °C bij een debiet van 54 m³/(ha uur) betekent in deze buisconfiguratie een afgegeven vermogen van 62 W/m².

De afkoeling loopt echter niet lineair maar licht exponentieel. Dit blijkt bij vergelijking van de blauwe (kromme lijn) met de rode lijn (een rechte lijn die halverwege de strang (dus bij het pad) 45 °C zou zijn). Door die exponentiële afkoeling is het

water in werkelijkheid al op 90 meter vanuit de gevel naar die 45 °C afgekoeld, dus nadat het bijna 11 minuten onderweg is in plaats van dat het na 12 minuten (halverwege de strang) 45 °C zou zijn.

Het gevolg van het feit dat de watertemperatuur niet lineair afloopt maar exponentieel is dat het bekende buisverwarmingssysteem aan de gevel bovengemiddeld warmte afgeeft en aan de middenpadzijde ondergemiddeld. Dit wordt getoond in Figuur 2.3.



Figuur 2.3. Afwijking van het afgegeven vermogen van de buis over de lengte van de strang.

Figuur 2.3. toont dat in de eerste 10 meter (gerekend vanaf de gevel) ongeveer 1.5% meer warmte wordt gegeven dan gemiddeld en dat er aan de padzijde ongeveer 1% minder dan het gemiddelde vermogen wordt afgegeven. Het effect van deze verschillen in afgifte is dus klein en het is daarom dat hier in de praktijk geen rekening mee gehouden wordt.

Deze onbalans wordt groter naarmate de uitkoeling over de buis toeneemt. In geval de aanvoertemperatuur 60 °C is en de retourtemperatuur op diezelfde 40 °C wordt gehouden stijgt de onbalans aan de gevelzijde naar +5% en de onbalans aan de padzijde naar -3%. Bij een aanvoertemperatuur van 70 °C en een retourtemperatuur van weer diezelfde 40 °C loopt de onbalans verder op naar +10% aan de gevel en -5% aan de padzijde.

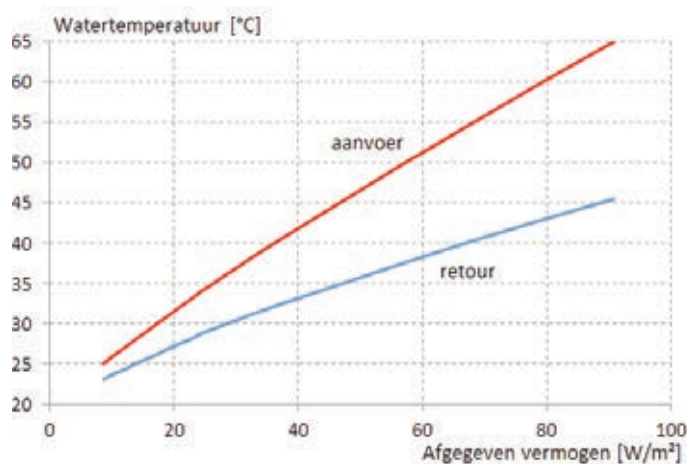
Het effect van de aanvoertemperatuur bij een gestelde retourtemperatuur van 40 en 30 °C op het afgegeven vermogen, de onbalans en de omlooptijd is weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 2.1. Verband tussen aanvoer- en retourtemperatuur op het afgegeven vermogen, de vermogensonbalans en de omlooptijd bij een verwarmingssysteem van 10 51-ers in een 8 meter tralie bij een 100 m pad.

Aanvoertemp	Retourtemp	Vermogen	Extra aan gevel	Minder bij pad	Omlooptijd
50 °C	40 °C	62 W/m ²	1.5%	1%	24 min
60 °C	40 °C	73 W/m ²	5%	3%	40 min
70 °C	40 °C	85 W/m ²	10%	5%	53 min
40 °C	30 °C	33 W/m ²	5%	3%	44 min
50 °C	30 °C	43 W/m ²	12%	6%	69 min
60 °C	30 °C	53 W/m ²	15%	10%	83 min
70 °C	30 °C	62 W/m ²	25%	12%	93 min

Tabel 2.1. laat zien dat de onbalans toeneemt bij een groter temperatuurverschil tussen aanvoer en retour, maar ook dat het verlagen van een gewenste retourtemperatuur van 40 naar 30 °C de onbalans sterk vergroot. Bovendien wordt bij het verlagen van de retourtemperatuur het afgegeven vermogen sterk beperkt.

Omdat een onevenwichtige temperatuurverdeling tussen gevel en padzijde ongewenst is wordt in de praktijk de omlooptijd van een verwarmingsnet tussen de 30 en 45 minuten gekozen. Bij een circulatiedebiet van 40 m³ per ha per uur en een standaard buisconfiguratie van 10 51-ers in een tralie van 8 meter is de omlooptijd 32 minuten en gelden de hieronder getoonde aanvoer- en retourtemperatuur als functie van het afgegeven vermogen.

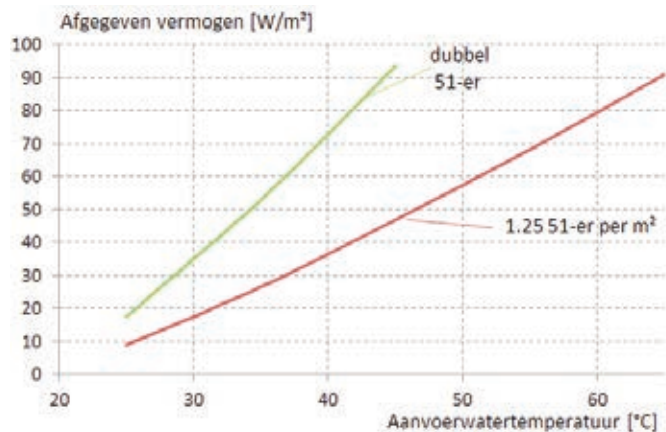


Figuur 2.4. Aanvoer en retourtemperatuur van een standaard buisrail verwarming als functie van het afgegeven vermogen.

In de bespreking van Tabel 2.1 is naar voren gekomen dat een ander gebruik van de standaard buisverwarming praktisch gesproken geen mogelijkheden biedt om met lagere watertemperaturen te gaan verwarmen. Het verlagen van de retourtemperatuur is mogelijk, maar gaat ten koste van de temperatuurverdeling en ook ten koste van een hogere benodigde aanvoertemperatuur.

Het simpelweg vergroten van het aantal buizen biedt wel een oplossing voor de wens om kassen te verwarmen met een lagere watertemperatuur. In principe werkt zo'n aanpassing lineair. Bij een gelijke aanvoertemperatuur en omlooptijd levert een dubbel aantal buizen twee keer vermogen. Het circulatiedebiet per oppervlakte-eenheid moet dan natuurlijk ook twee keer zo groot worden om de omlooptijd gelijk te houden.

Figuur 2.5. visualiseert de enorme stap in de verlaging van de gemiddeld benodigde aanvoertemperatuur bij een verdubbeling van het aantal buizen in het buisrailnet.



Figuur 2.5. Warmte-afgifte van een verwarmingssysteem met 20 51-ers in een 8 meter tralie als functie van de aanvoerwatertemperatuur bij een kasluchttemperatuur van 20 °C. Ter vergelijking is ook de overdrachtskarakteristiek van een standaard buisrail systeem (10 51-ers per 8 meter tralie) in de grafiek geplaatst.

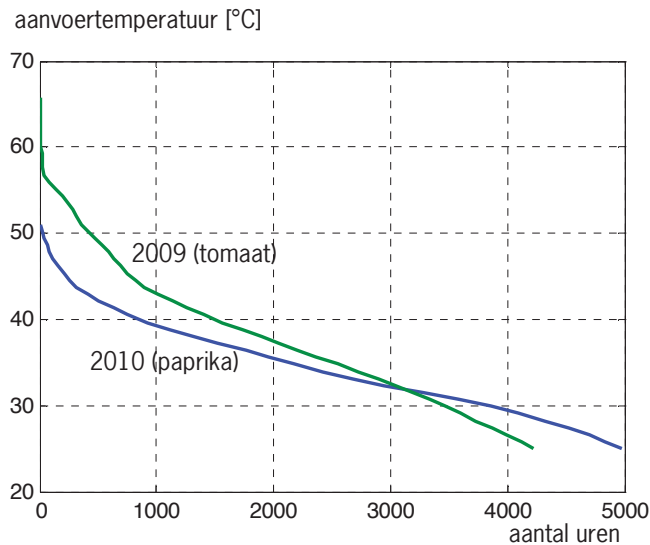
Doordat wordt uitgegaan van een vergroting van het circulatiedebiet die gelijk op gaat met de vergroting van het aantal buizen wordt het verwarmingsnet niet trager regelbaar. Sterker nog, bij gebruik van een buffer kan het opvoeren van het verwarmingsvermogen bij een plotseling oplopende warmtevraag (bij het openlopen van het scherm bijvoorbeeld) zelfs sneller plaatsvinden dan bij een klein verwarmingsnet. Het hoge benodigde debiet kan immers gemakkelijk gedurende een korte tijd uit de buffer worden getrokken.

Het gevaar bestaat echter wel dat als zo'n opregel-actie onvoldoende doordacht wordt uitgevoerd er een overshoot in de toegevoerde energie optreedt. Er liggen dan twee keer zoveel buizen op een hoge temperatuur die dus twee keer zoveel warmte afgeven wanneer ze bij een plotseling dichtgedraaide mengklep af moeten koelen. Als de opregel-actie echter in de juiste proporties is uitgevoerd hebben het dubbele aantal buizen gemiddeld een half zo grote overtemperatuur en komt

er weer evenveel warmte vrij bij een daarop volgende afkoeling.

Uiteraard geeft een vergroting van het circulatiedebiet een toename van het elektriciteitsverbruik maar deze toename ligt rond de 1 kWh/m² per jaar en is daarmee een bijna te verwaarlozen aspect.

Dit verdubbelen van het aantal buizen in het ondernet is in het teeltjaar 2010 beproefd in de Sunergie kas op het Innovatie en DemoCentrum. Onderstaande Figuur laat zien dat er door het vergroten van het aantal buizen nauwelijks nog uren zijn waarop heter water dan 45 °C nodig was (ongeveer 200 uur). Teelttechnisch is er geen enkel nadeel van dit verdubbelde verwarmingssysteem bemerkt.

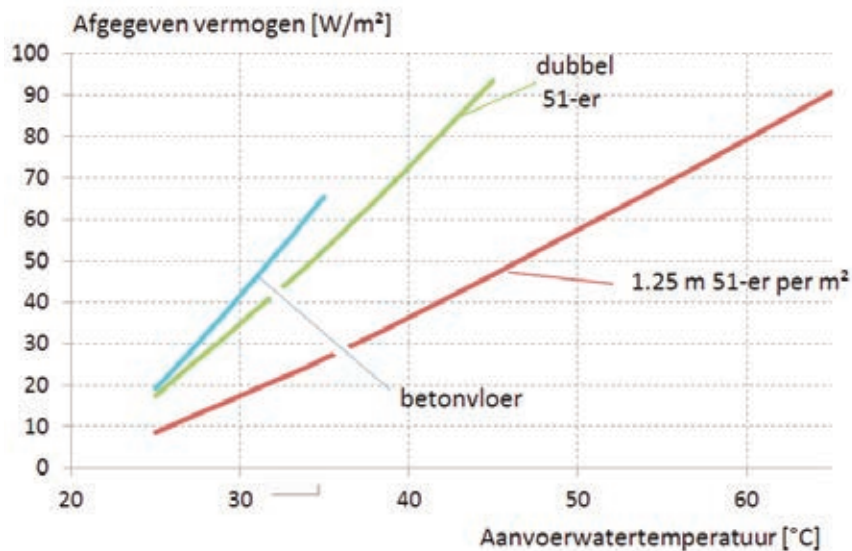


Figuur 2.6. Jaarbelastingduurkromme van de benodigde aanvoertemperatuur in 2009, toen er nog een standaard net werd gebruikt, en in 2010, toen het buisrailnet was verdubbeld. Verdubbeling van het aantal buizen verlaagt het aantal uren waarop er 'heet' water nodig is.

2.2 Verwarmde betonvloeren

De vloer van de kas heeft met een oppervlak van 1 m² per m² kas een grote warmte-afgiftecapaciteit in vergelijking met buizen. Een standaard buisrailsysteem heeft slechts 0.2 m² verwarmend oppervlak per m² kas. Daar staat tegenover dat de vrije convectie van lucht langs een buis veel gemakkelijker verloopt dan de convectie van warme lucht aan een horizontaal oppervlak. Toch is het veel grotere oppervlak van de vloer doorslaggevend, vooral ook omdat de stralingsoverdracht vanaf het grote vloeroppervlak een grote bijdrage levert aan de totale warmte-afgifte.

Dit is getoond in onderstaande grafiek waar de relatie tussen aanvoertemperatuur en warmteafgifte van een verwarmde betonvloer is weergegeven, samen met de eerder getoonde afgifte-karakteristieken.



Figuur 2.7. Warmte-afgifte van een standaard betonvloer (25 mm slangen met een hart-op-hart afstand van 25 cm) als functie van de aanvoertwatertemperatuur bij een kasluchttemperatuur van 20 °C. Ter vergelijking zijn ook de overdrachtskarakteristieken van eerder beschreven verwarmingssystemen toegevoegd.

De curve voor de betonvloer loopt tot een warmte-afgifte van 65 W/m². Bij zo'n vermogen is de vloertemperatuur ongeveer 9 °C warmer dan de kasluchttemperatuur, wat als praktisch maximum wordt gezien. De aanvoertwatertemperatuur is in dat geval 6 °C warmer dan de gemiddelde vloertemperatuur en dus 15 °C warmer dan de kasluchttemperatuur die in deze grafiek op 20 °C is gesteld.

Het beperkte gebruik van de verwarmde betonvloer in de sector heeft vooral te maken met de kosten voor zo'n vloer. De referentie is immers een kas met een onverharde teeltruimte waarbij het loopfolie de 'vloer' vormt. Ook het feit dat een betonvloer slechts langzaam regelbaar is wordt als nadeel gezien.

2.3 Luchtverwarmingssystemen

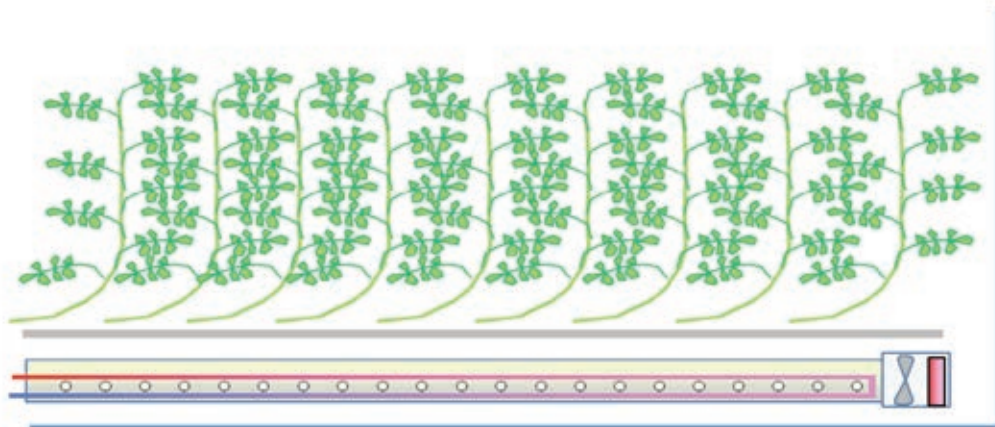
Naast de verwarmingssystemen die gebaseerd zijn op het creëren van een warm oppervlak in de teeltruimte, zoals een buisverwarmingssysteem of een betonvloer, kennen we in de kas ook luchtverwarmers waarbij de kaslucht via een ventilator langs het verwarmend oppervlak wordt geblazen. De bekendste hiervan zijn de luchtbehandelingskasten in de semigesloten kassen. Meestal zijn dit systemen langs de gevels die de verwarmde lucht middels slurven door de kas verspreiden, maar er zijn ook decentrale systemen in de vorm van luchtverwarmers die verspreid over de kas zijn opgehangen (bijvoorbeeld 1 unit per 100 m²). Dit soort verwarmingssystemen zijn niet automatisch een laag-temperatuursysteem. De ontwerper van de verwarmingsunit kan kiezen voor kleine warmte-uitwisselende oppervlakken die met heet water moeten worden gevoed, of voor grote oppervlakken die met minder warm water eenzelfde hoeveelheid energie kunnen overdragen. De keus op de markt is onbeperkt, maar om een beeld te geven worden in dit rapport van een tweetal systemen besproken die toevallig recent bestudeerd zijn, de OPAC 106 warmtewisselaar en het luchtverwarmingssysteem van Climeco dat onder de naam Air & Energy is ontwikkeld. Dit systeem bestaat uit een luchtslurf waar binnenin kunststof verwarmingsbuizen zijn opgenomen. Het thermisch gedrag van dit systeem is in 2012 op het IDC in Bleiswijk bestudeerd. De OPAC 106 is een luchtbehandelingsunit die verspreid door de kasafdeling kan worden opgehangen. In de winter van 2010/2011 zijn er metingen verricht aan een installatie waarbij deze units in een dichtheid van 1 per 80 m² in een rozentuin zijn opgehangen.

Een aparte categorie luchtverwarmingssystemen wordt gevormd door de voorverwarmingssystemen die buitenlucht opwarmen naar de kasluchttemperatuur voordat deze lucht in de kas wordt verspreid voor de ontvochtiging. In tegenstelling tot systemen in de kas, is het bij deze systemen direct de koude buitenlucht waarop de energie moet worden overgedragen, waardoor het verwarmingswater in principe tot onder de kasluchttemperatuur kan worden afgekoeld. Paragraaf 2.3.3 gaat hier nader op in.

2.3.1 Air & Energy systeem

Een luchtverwarmingssysteem kan in principe met een lage verwarmingswatertemperatuur energie op de kaslucht overgedragen. Daarom heeft Climeco Engineering gezocht naar een lucht-inblaassysteem op basis van slurven waarmee een homogene uitblaastemperatuurverdeling wordt verkregen. De gebruikelijke systemen, waarbij een warmteblok de lucht aan het begin van de slang opwarmt, hebben namelijk de eigenschap dat het verwarmingsvermogen aan het begin van de slurf veel hoger is dan aan het eind van de slurf.

De oplossing die Climeco hiervoor heeft aangebracht is een uitvoeringsvorm waarbij er verwarmingsbuizen in de slurf zijn aangebracht. Dit is geschetst in de onderstaande tekening.



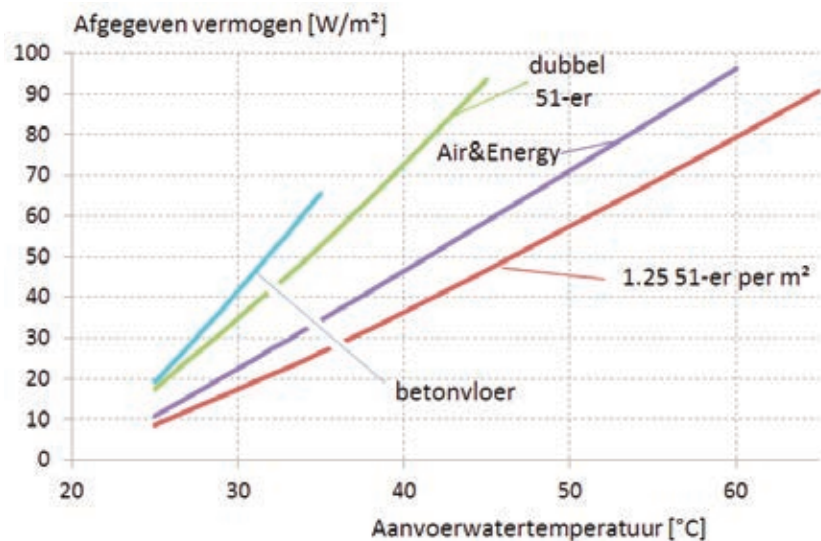
Figuur 2.8. Het Air & Energy systeem van Climeco Engineering waarbij lucht vanuit de kopgevel via een slurvensysteem door de kas kan worden verspreid. De opwarming van de lucht gebeurt voor een klein deel door een warmtewisselaarblok bij de ventilator en verder door een buisverwarmingssysteem dat in de slurf is aangebracht.

Het luchtverwarmingssysteem van Air & Energy is een onderdeel van een groter systeem waarbij middels een regelbare afvoer- en toevoerventilator ontvochtiging met buitenlucht kan plaatsvinden. Het balansventilatiesysteem met een afvoer- en toevoerventilator maakt het gebruik van een lucht/lucht warmtewisselaar mogelijk, waardoor ontvochtiging met terugwinning van (het grootste deel van) de voelbare warmte kan plaatsvinden. Hoewel dit systeem een kenmerkend onderdeel van het Air & Energy systeem vormt doet dit voor het LT-karakter van het systeem niet terzake. De warmteterugwinning uit de balansventilatie zorgt er immers voor dat de temperatuur van de instromende buitenlucht (nagenoeg) op kasluchttemperatuur is gebracht.

In de waarnemingen op het IDC in 2012 is inderdaad gebleken dat het systeem de kas kan verwarmen zonder Door de lucht in de slang onderweg op te warmen wordt het grote nadeel van De gedachte is dat hiermee de kas homogeen verwarmd kan worden vanuit deze luchtsturven met een laag luchtdebiet. Andere slurvensystemen die verwarmde lucht inblazen vanuit luchtbehandelingskasten hebben de neiging om aan het begin van de slurf aanzienlijk meer warmte de kas in te brengen dan aan het eind van de slurf. Als dit effect niet opgevangen wordt door te werken met een hoog luchtdebiet, met geïsoleerde slurven of door lucht vanuit telkens twee tegenover elkaar liggende zijden in te blazen, zal het ingebrachte verwarmingsvermogen aan het begin van de slurf al gauw 20 tot 50% hoger zijn dan aan het eind van de slurf. Indien zo'n systeem het hoofd-verwarmingssysteem is zal zo'n verschil tot een duidelijk inhomogene kasluchttemperatuur leiden.

De van binnenuit verwarmde slurf in het Climeco-systeem kent dit probleem nauwelijks. De jaarrond teelt in de VenLow Energy kas, waar zo'n verwarmingssysteem als hoofdnet is gebruikt, heeft geen symptomen van lokale koude plekken aan het licht gebracht en metingen aan de luchttemperaturen die zijn ingeblazen verschilden meestal nog geen graad over het begin en het eind van de slurf.

Gedurende het teeltseizoen 2011/2012 is continue het afgegeven vermogen van dit verwarmingssysteem gemonitord en de daarvoor benodigde watertemperaturen. Zo'n vergelijking levert een puntenwolk met gegevens op en daaruit is een 'gemiddeld gedrag' gedestilleerd zodat de warmte-afgifte van dit systeem gemakkelijk vergeleken kan worden met de andere beschreven systemen.



Figuur 2.9. Warmte-afgifte van het Climeco Air&Energy-systeem met verwarmingsbuizen in de luchtdistributieslurf als functie van de aanvoerwatertemperatuur. De getoonde grafiek geldt bij een kasluchttemperatuur van 20 °C en bij een luchtcirculatie-debiet van 6 tot 8 m³/(m² uur). Ter vergelijking zijn ook de overdrachtskarakteristieken van eerder beschreven verwarmingssystemen toegevoegd.

Op grond van de bovenstaande Figuur kan worden geconcludeerd dat het verwarmen van de kas middels verwarmingsbuizen in de luchtverdelingsslang bij de gekozen buisdiameters een wat lagere verwarmingswatertemperatuur oplevert dan bij de standaard 51-er, maar dat het verschil niet groot is. De lage watertemperaturen die in 2012 in de VenLowEnergy kas gebruikt zijn, zijn dan ook niet zozeer door het bijzondere verwarmingssysteem gerealiseerd, maar vooral door de lage warmtevraag van de kas als geheel ten gevolge van het dubbel glas dek en de warmteterugwinning middels het balansventilatiesysteem.

Het elektriciteitsverbruik van het Air & Energy systeem is laag. Het verbruik bij maximale capaciteit was 2 W/m², maar doordat de ventilator zelden op maximaal toerental is ingezet was het jaarlijkse stroomverbruik voor deze manier van luchtverwarming in 2012 niet meer dan 4 kWh/m² per jaar.

2.3.2 Decentrale warmtewisselaars

Behalve met systemen die lucht via een slurvensysteem door de kas verplaatsen is er de afgelopen jaren ook ervaring opgedaan met warmtewisselaars met een vrije uitworp. In deze systemen zijn er veel kleine warmtewisselaars met elk een eigen ventilator over de kas verspreid. Net als bij de andere luchtverwarmingssystemen licht de keus voor de benodigde overtemperatuur geheel bij de ontwerper van de installatie.

Recent is de OPAC 106 op de markt gekomen als opvolger van de FiWiHex warmtewisselaar. In de winter van 2010-2011 is het gedrag van de OPAC bestudeerd op een modern rozenbedrijf.

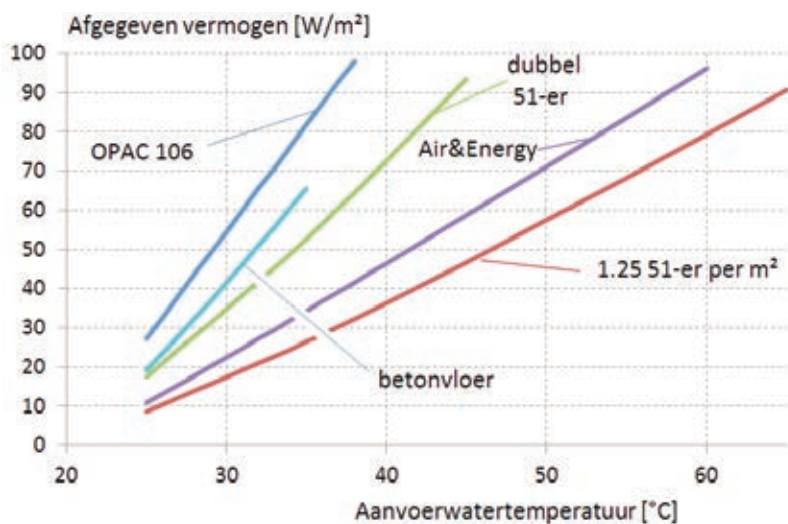


Figuur 2.10. De OPAC 106 in een moderne rozenkas. De warmtewisselaar wordt zowel voor koelen als voor verwarmen gebruikt. In de verwarmingsmodus gedraagt het systeem als Laag-temperatuur verwarmingssysteem.

Op het betreffende bedrijf waren de units met een dichtheid van 1 per 80 m² opgehangen. Door deze hoge dichtheid en de goede efficiëntie van het warmtewisselaarblok kon de installatie bij lage temperatuur een zeer hoge warmte-overdracht realiseren. Dit is goed te zien in Figuur 2.11. waar de OPAC als systeem met de steilste overdrachtskarakteristiek naar voren komt. De grafiek is gebaseerd op een ventilatordebiet van 2500 m³/uur, wat bij het gebruikte aantal units per m² neerkomt op een luchtdebiet van ruim 30 m³/(m² uur). In principe kan de overdracht nog wat verhoogd worden door het ventilatortoerental op te voeren. Het geluidsniveau en het stroomverbruik lopen bij hogere toerentallen echter fors op, waardoor aan het genoemde debiet de voorkeur wordt gegeven. Bij dit toerental is het stroomverbruik ongeveer 160 W/unit, wat neerkomt op een verbruik van 2 W/m². Daarmee is het elektriciteitsverbruik van deze installatie vergelijkbaar met het verbruik van systemen die lucht via slurven rondblazen, zoals het Air&Energy systeem. Het jaarlijks stroomverbruik zal bij een vergelijkbaar aantal draaiuren dus eveneens vergelijkbaar zijn, ondanks het feit dat de OPAC 3 tot 4 keer meer lucht verplaatst.

Op het betreffende bedrijf vond de regeling van het verwarmingsvermogen plaats door de aanvoerwatertemperatuur aan te passen. In principe kan het afgegeven vermogen ook middels de variatie van het ventilatortoerental of het waterdebiet worden geregeld. Vermindering van het luchtdebiet zal echter de verdeling van de warmte over de kasafdeling verminderen en bij vermindering van het waterdebiet neemt de kans toe dat het water niet netjes over alle units wordt verdeeld. Het variëren van de aanvoertemperatuur is dus de veiligste weg om het vermogen te regelen.

Op grond van de overdrachtskarakteristieken die voor deze warmtewisselaar bekend zijn kan onderstaande grafiek gemaakt worden voor het afgegeven vermogen als functie van de aanvoertemperatuur van het verwarmingswater. Ter vergelijking zijn ook de eerder getoonde relaties in de grafiek geplaatst.



Figuur 2.11. Warmte-afgifte van de OPAC 106 warmtewisselaar als functie van de aanvoerwatertemperatuur. De getoonde grafiek geldt bij een kasluchttemperatuur van 20 °C en bij gebruik van 1 OPAC per 80 m² kas die 30 m³/(m² uur) lucht verplaatsen. Ter vergelijking zijn ook de overdrachtskarakteristieken van eerder beschreven verwarmingssystemen toegevoegd.

2.3.3 Buitenlucht voorverwarming

Daar waar in alle voorgaande systemen gesproken werd op de overdracht van warmte op de kaslucht draagt een warmtewisselaar die bestemd is voor de voorverwarming van buitenlucht alvorens die voor ontvochtiging de kas wordt ingeblazen de warmte over op buitenlucht. Figuur 2.12. toont een schematisch plaatje van zo'n systeem.



Figuur 2.12. Schets van een eenvoudig buitenlucht aanzuigsysteem.

De aangezogen lucht heeft doorgaans een veel lagere temperatuur dan de kaslucht, zodat het verwarmingswater dat door het warmtewisselaar blok stroomt tot een veel lagere temperatuur kan worden teruggekoeld. Daar waar de retourtemperatuur van verwarmingsinstallaties in de kas het water terug kunnen koelen naar 25 tot 30 °C, kan verwarmingswater voor de voorverwarming van buitenlucht in principe naar waarden rond de 15 °C worden teruggekoeld. De praktisch realiseerbare uitkoeling hangt overigens, net als bij verwarmingssystemen die in de kas liggen, helemaal af van het VO van de toegepaste warmtewisselaar. In sommige installaties is gekozen voor een goedkoop blok met een klein oppervlak waardoor er hoog-temperatuur water nodig is voor de voorverwarming van de buitenlucht. Voor de uitkoeling van het water naar de genoemde temperaturen van zo'n 15 °C moet het warmtewisselaarblok qua ordegrrootte over 0.5 m² warmtewisselend oppervlak per m² kas beschikken. Bij een lamellen warmtewisselaar betekent dit 0.25 m² plaatoppervlak omdat een plaat dubbelzijdig wordt aangestroomd. Dit is vergelijkbaar met het warmtewisselend oppervlak zoals toegepast in het genoemde experiment met de OPAC 106.

Een belangrijk verschil tussen het gedrag van een buitenluchtvoorverwarmingsinstallatie en een gewoon verwarmingssysteem is dat de retourtemperatuur van het verwarmingswater voor buitenluchtvoorverwarming niet zoveel verandert door het jaar heen. Immers, als de te verwarmen buitenlucht erg koud is, is deze ook erg droog en hoeft er weinig lucht te worden opgewarmd voor een bepaalde ontvochtigingsflux. Als de lucht minder koud is zijn er meer m³ nodig omdat het absoluut vochtverschil tussen de binnen en buitenlucht in die situatie kleiner is.

Daarom is het reëel te stellen dat een buitenlucht voorverwarmingsinstallatie verwarmingswater naar 15 °C kan uitkoelen. Het is echter niet zo dat bij gebruik van een buitenluchtvoorverwarming al het verwarmingswater naar die genoemde 15 °C wordt teruggekoeld omdat het totale vermogen dat voor die voorverwarming nodig is beperkt is.

Als we een gemiddelde situatie voor ogen nemen waarbij 5 m³/(m² uur) buitenlucht van 8 °C wordt opgewarmd naar een kasluchttemperatuur van 18 °C (waarmee zo'n 30 gram/(m² uur) kan worden ontvochtigd) dan vergt dit 17 W/m² verwarmingsvermogen. Als de kas op dat moment 40 W/m² verwarming vraagt, met een aanvoertemperatuur van 40 °C en een retourtemperatuur van 31 °C (uitgaande van een circulatiedebiet van 40 m³/(ha uur) door het standaard 51-er verwarmingssysteem) dan zal de buitenlucht voorverwarming de overall gemiddelde watertemperatuur naar $31 - 17/40 \cdot 9 = 27$ °C kunnen terugbrengen. In deze formule is 17/40 de verhouding tussen het verwarmingsvermogen in de buitenluchtvoorverwarming en de kasverwarming en is 9 de uitkoeling in het buisrailnet.

Dit kan ook anders worden berekend. Wanneer wordt verondersteld dat de buitenluchtvoorverwarming wordt gevoed met het 31 °C retourwater wat wordt uitgekoeld naar 15 °C, dan is het waterdebiet voor de buitenluchtvoorverwarming $17 \cdot 10^4 \cdot 3600 / (31 - 15) / 4.18 \cdot 10^6 = 9.2$ m³/(ha uur). Als van de 40 m³/(ha uur) retourwater van 31 °C 9.2 m³/(ha uur) wordt afgekoeld naar 15 °C dan is de gemiddelde retourwatertemperatuur $(9.2 \cdot 15 + (40 - 9.2) \cdot 31) / 40 = 27$ °C.

Wanneer echter het water dat door de buitenlucht voorverwarming stroomt ongemengd naar bijvoorbeeld een condensor wordt gestuurd kan deze condensor maximaal rendement maken met dit zeer koude retourwater.

3 Effect van LT-verwarming

Een standaard tuinbouwbedrijf produceert warmte via een ketel met condensor of met behulp van een WKK en een condensor. Voor de warmte uit de ketel en uit de WKK maakt de verwarmingswatertemperatuur geen verschil, maar voor de warmte die de condensor uit de rookgassen kan halen maakt de retourtemperatuur in het verwarmingssysteem wél veel verschil. In paragraaf **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** wordt het effect van laag-temperatuur verwarming op het condensorendement ingeschat, zodat daarmee de waarde van een LT-systeem duidelijk wordt.

Bij gebruik van een warmtepomp voor de verwarming van kassen is niet zozeer een lage retourtemperatuur, maar vooral de aanvoertemperatuur van belang voor een efficiënte werking van de machine. Dit wordt uitgewerkt in paragraaf 3.1.2. Een nieuwe ontwikkeling in de tuinbouw is de toepassing van geothermie. Bij deze wijze van kasverwarming hebben zowel de benodigde aanvoertemperatuur als de resulterende retourtemperatuur van het verwarmingssysteem invloed op de dekkingsgraad van de geothermische bron in de warmtebehoefte van de kas.

3.3.1 Effect van LT-systemen op het condensorendement

Als verbrandingswaarde van aardgas wordt doorgaans 31.65 MJ/m^3 gehanteerd. Dit is de zogenaamde onderste verbrandingswaarde, de warmte die vrijkomt in de vorm van een heet gasmengsel van CO_2 , waterdamp en stikstof na de chemische reactie van de verbranding van aardgas met lucht.

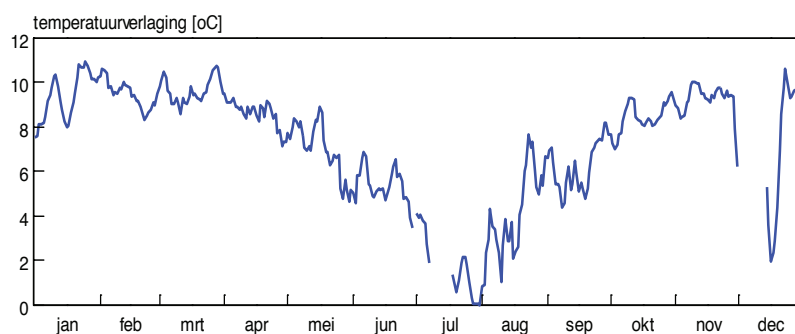
De gevormde waterdamp vertegenwoordigt echter ook nog latente warmte; warmte die vrijkomt wanneer die waterdamp condenseert. Aangezien de verbranding van 1 m^3 aardgas 1.35 kg waterdamp vrijkomt ligt er in die waterdamp $1.35 \cdot 2.4 = 3.2 \text{ MJ}$ besloten. Als de rookgassen zouden worden afgekoeld naar 20°C en ook nog eens de 1.35 kg vocht zou worden gecondenseerd levert de verbranding van aardgas geen 31.65 , maar 35.85 MJ op, 10% meer. Deze 35.85 MJ/m^3 is de bovenste verbrandingswaarde.

Van hoogrendement ketels worden vaak getallen genoemd van 104 tot 106% rendement. Dit zijn rendementen ten opzichte van de onderste verbrandingswaarde zodat door de condensatie van vocht rendementen worden gehaald die boven de 100% liggen.

Een standaard tuinbouwketel met condensor behaalt een rendement van ongeveer 104% en een WKK met condensor haalt ongeveer 102% ten opzichte van de onderste verbrandingswaarde. De WKK heeft een wat lager rendement omdat de WKK rookgassen een lager dauwpunt hebben dan ketelrookgassen. Daardoor is de latente warmte moeilijker terug te winnen.

Als richtgetal kan worden gesteld dat elke 10 graden verlaging van de watertemperatuur naar de rookgascondensor er 2.5% extra warmte uit een m^3 aardgas kan worden verkregen.

Onderstaande grafiek toont de verlaging van de retourtemperatuur ten gevolge van de verdubbeling van het aantal verwarmingsbuizen in een standaard-kas, dus de overgang van 10 51-ers per 8 meter tralie naar 20 51-ers per 8 meter tralie.



Figuur 3.1. Verlaging van de retourtemperatuur bij verdubbeling van het aantal verwarmingsbuizen.

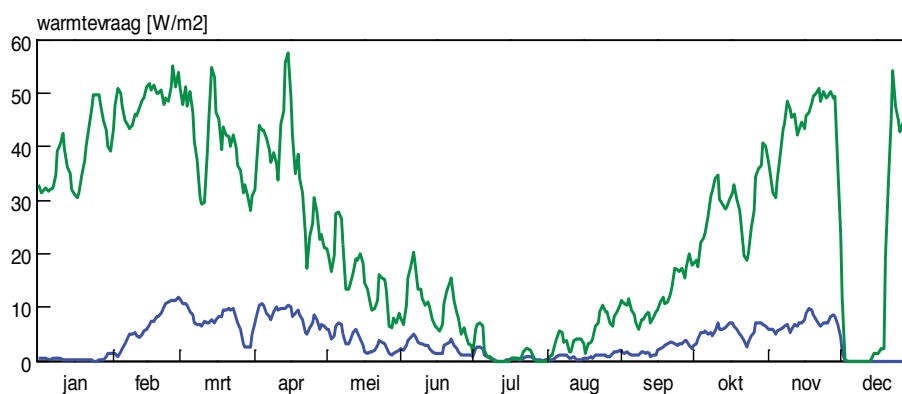
Figuur 3.1. laat zien dat het effect van de vergroting van het verwarmingsnet in de winter groter is dan in de zomer. Omdat het gasverbruik in de winter echter ook aanzienlijk hoger is dan in de zomer valt de periode met het grootste effect mooi samen met de periode met het hoogste gasverbruik.

Wanneer het dagelijkse gasverbruik wordt vermenigvuldigd met de dagelijkse besparing van 0.25% per graad verlaging van de retourtemperatuur komt de jaarlijkse besparing die een laagtemperatuur buisverwarming kan opleveren op 2.3% per jaar, ofwel ongeveer $0.75 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ jaar})$.

Als de kas voornamelijk door een WKK zou worden verwarmd in plaats van de verwarming door een ketel dan betekent de 0.75 m^3 aardgas-equivalenten die de condensor extra geeft door de lagere buiswatertemperatuur dat de WKK minder gas nodig heeft voor dezelfde warmte-levering. Uitgaande van een overall warmte-rendement van 55% (dat is dus motorkoeling + condensorkoeling) daalt het gasverbruik van de WKK in geval die zuiver op warmtevraag zou worden gebruikt met $0.75/0.55 = 1.4 \text{ m}^3$ gas per m^2 per jaar. Bij gebruik van een WKK is de potentiële gasbesparing dus groter dan bij gebruik van een ketel, maar met de verlaging van het gasverbruik daalt ook de stroomproductie (in dit voorbeeld met ongeveer $5 \text{ kWh}/\text{m}^2$ per jaar. Deze derving van inkomsten is zodanig dat in de praktijk de WKK lang niet altijd uitsluitend op warmtebehoefte wordt ingezet, waardoor het effect van een groter condensorrendement bij een WKK-bedrijf onder die $1.4 \text{ m}^3/\text{m}^2$ per jaar zal uitkomen.

Wanneer gebruik wordt gemaakt van een buitenluchtvoorverwarming met een groot warmtewisselend oppervlak kan de retourtemperatuur van het water dat naar de condensor wordt gevoerd terug worden gebracht naar 15°C , waardoor het overall rendement van een ketel+condensorcombinatie op momenten dat de buitenluchtvoorverwarming in werking is naar 109% kan oplopen.

Onderstaande grafiek laat zien welk deel van het totale verwarmingsvermogen voor de opwarming van de buitenlucht naar kasluchttemperatuur tijdens de ontvochtiging nodig is.



Figuur 3.2. Warmtevraag voor de voorverwarming van buitenlucht voor ontvochtiging naar de kaslucht. De grafiek geldt voor een tomatenteelt die volgens Het Nieuwe Telen wordt geteeld en gaat uit van een luchtdebiet van maximaal $7 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ uur})$.

De Figuur illustreert dat in de tomatenteelt gedurende de eerste twee maanden van het jaar de buitenluchtaanzuiging in een kas die in een gemiddeld jaar volgens HNT wordt geklimatiseerd nog niet in werking is omdat de verdamping van het gewas dan nog zodanig klein is dat condensatie en lek voldoende vocht afvoeren. Pas in februari loopt de ontvochtigingsbehoefte op en vanaf dat moment vormt de warmtevraag van de buitenlucht voorverwarming 15 tot 25% van de totale warmtevraag.

Aangezien de condensor maximaal 10% van de (onderste) verbrandingswaarde produceert kan uit de grafiek worden afgeleid dat het reëel is ervan uit te gaan dat buitenluchtvoorverwarming het verbrandingsrendement van half februari tot eind november met 5% verhoogt ten opzichte van de referentiesituatie. In de periode van half februari tot eind november beloopt het gemiddelde gasverbruik van een bedrijf dat volgens Het Nieuwe Telen werkt $20 \text{ m}^3/\text{m}^2$ per jaar en als de directe aansluiting van de buitenluchtvoorverwarming op de condensor systeem over die periode 5% extra omzettingrendement kan opleveren betekent dit de besparing van 1 m^3 aardgas per m^2 per jaar.

Als er WKK wordt gebruikt zal in dezelfde periode aanzienlijk meer gas worden gebruikt omdat een deel van de energie van het aardgas in de vorm van elektriciteit het bedrijf verlaat. De betere werking van de condensor bij aansluiting op een buitenluchtvoorverwarmingsinstallatie brengt het warmterendement van een WKK van 0.55 naar 0.62 en als de

dekkingsgraad van de WKK in deze periode 80% bedraagt dan zal het gasverbruik door de betere condensorwerking afnemen met $80\% \cdot 20 \text{ m}^3 \cdot (1/0.62 - 1/0.55) = 3.3 \text{ m}^3$. Ook hier zal deze besparing echter alleen gerealiseerd worden als de WKK zuiver op warmtebehoefte wordt bestuurd en dus bij gebruik van buitenluchtvoorverwarming via de condensor minder draaiuren gaat maken.

Conclusie

Het effect van laagtemperatuur verwarming-systeem in de kas op de vermindering van het energieverbruik door de efficiëntieverbetering van de condensor varieert tussen de 0.75 m^3 gas voor een ketelgestookte kas tot 1.5 m^3 aardgas per m^2 per jaar voor een kas die voornamelijk met een WKK wordt verwarmd. Een voorwaarde voor de gegeven verlaging van het gasverbruik van de WKK is dat deze geheel op warmtebehoefte wordt ingezet en dus bij een verminderde warmtevraag door de hogere thermische efficiëntie ook minder stroom gaat produceren.

Als de condensor-efficiëntie wordt vergroot door gebruik te maken van veel lagere retourwatertemperatuur die verkregen kan worden met een ruim bemeten warmtewisselaar in de voorverwarming van de buitenluchtaanzuiging loopt de mogelijke energiebesparing in een energiezuinig tomatenteelt op naar 1 tot 3.3 m^3 per m^2 per jaar. Met 'ruim bemeten warmtewisselaar' wordt in dit verband bedoeld op een warmtewisselaar met een plaatoppervlak in de ordegrootte van 0.25 m^2 per m^2 kas.

Het laagst genoemde getal ($1 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ jr})$) geldt ook hier weer voor een ketelgestookt bedrijf en het hoge getal voor een bedrijf dat voornamelijk door WKK wordt verwarmd. Ook geldt hier weer dat de hoge potentiële besparing bij gebruik van WKK alleen wordt gerealiseerd wanneer deze uitsluitend op warmtebehoefte wordt ingezet. In dat geval zal de WKK dus parallel aan de verlaging van de gas-input ook minder stroom gaan produceren. Het maakt daarbij nauwelijks uit of het LT-systeem wordt uitgevoerd in de vorm van een ruim bemeten buisrailsysteem (er is gerekend met een dubbel aantal 51-ers) of dat in plaats daarvan de lage retourtemperatuur wordt verkregen door de voorverwarming van aangezogen buitenlucht in een ontvochtigingsinstallatie. Die voorverwarming moet dan plaatsvinden via een ruim bemeten warmtewisselaar (ordegrootte 0.25 m^2 plaatoppervlak per m^2 kas).

Uiteraard zullen de perspectieven voor laag temperatuur buitenluchtvoorverwarming toenemen bij teelten die een jaarrond ontvochtigingsbehoefte hebben.

3.3.2 Effect van LT-systemen op kassen met warmtepompsystemen

Een warmtepomp kan per eenheid aandrijf-energie meer warmte produceren naarmate het temperatuurverschil tussen de warme en de koude zijde kleiner is. Aangezien een laag-temperatuurnet door het grotere pompdebiet behalve een lagere retourtemperatuur ook een lagere aanvoertemperatuur kent draagt zo'n verwarmingsnet bij aan de besparing op aandrijf-energie. Als de benodigde aanvoerwatertemperatuur voor de verwarming bijvoorbeeld daalt van 45°C naar 35°C dan kan er met 1 kWh aandrijfenergie 16.8 MJ in plaats van 13.0 MJ warmte worden geproduceerd. De extra warmte die de warmtepomp levert wordt verkregen door extra warmte-onttrekking aan de koude kant van de warmtepomp. Indien dit duurzame energie is, bijvoorbeeld verkregen met de oogst van warmte uit zomerse warmte-overschotten, draagt de verlaging van de benodigde verwarmingstemperatuur bij aan de vermindering van het verbruik van primaire energie.

Om de impact van de toepassing van een laag-temperatuur verwarmingssysteem op een kas die met een warmtepomp wordt verwarmd is gerekend aan een energiezuinige groentekas (dubbel scherm + permanent foliescherm in de eerste maanden, geen minimumbuis, buitenluchtaanzuiging) die verwarmd wordt met een warmtepomp als basis-verwarmingssysteem. Op momenten dat het warmtepomp vermogen ontoereikend is wordt het verwarmingsvermogen aangevuld met een ketel. De berekeningen zijn gemaakt voor twee warmtepompvermogens (100 en 150 kW elektrisch vermogen per hectare) en voor een kas met een standaard verwarmingssysteem en voor een kas met een dubbel zo groot buisverwarmingssysteem. Onderstaande tabel toont het effect van de twee vormen van laagtemperatuur verwarming op het resterende gasverbruik en het elektriciteitsverbruik.

Tabel 3.1. Effect van een Laag-temperatuur verwarmingssysteem op het gas- en elektriciteitsverbruik van een energiezuinige tomatenteelt die met een warmtepomp wordt verwarmd bij twee verschillende warmtepompvermogens.

Warmtepomp vermogen		Referentie (10 51-ers per 8 meter tralie)	Laag temperatuur buisrailsysteem	Effect LT-systeem
100 kWel/ha	gas [m ³ /(m ² jr)]	13.0	10.3	2.7 m ³ besparing
	elektra [kWh/(m ² jr)]	39.0	36.7	2.3 kWh besparing
	laagw warmte [MJ/(m ² jr)]	477	575	98 MJ
150 kWel/ha	gas [m ³ /(m ² jr)]	9.1	7.4	1.7 m ³ besparing
	elektra [kWh/(m ² jr)]	48.6	43.6	5.0 kWh besparing
	laagw warmte [MJ/(m ² jr)]	566	643	77 MJ

Bij de wat kleinere warmtepomp ligt de besparing door de vergroting van het verwarmingssysteem vooral in de vermindering van het resterende gasverbruik, terwijl bij de grotere warmtepomp een ruimer verwarmingsnet vooral een verlaging van de stroomkosten oplevert.

In beide gevallen is te zien dat de verlaging van de inzet van primaire energie ertoe leidt dat de hoeveelheid laagwaardige warmte die door de warmtepomp wordt uitgeoeld toeneemt (uiteraard met (vrijwel) dezelfde hoeveelheid als de energie-inhoud van de uitgespaarde primaire energie).

Als de gas- en stroombesparing onder één noemer wordt gebracht door voor het gas €0.30 te rekenen en voor de stroom €0.10 dan heeft de vergroting van het verwarmend oppervlak in de kas met de kleine warmtepomp een waarde van $2.7 \times 0.3 + 2.3 \times 0.1 = €1.04$ per m² per jaar. In de situatie met de grote warmtepomp is de revalue $1.7 \times 0.3 + 5 \times 0.1 = €1.01$. Hierbij is er van uitgegaan dat de extra laagwaardige warmte zonder extra kosten wordt verkregen. In sommige situaties is deze aanname reëel, maar vaak zal de verzameling en seizoensopslag van die extra laagwaardige met een overall COP die rond de 20 ligt plaatsvinden zodat de afname van het stroomverbruik met ongeveer een kWh moet worden verkleind. De waarde van de overgang van een standaard verwarmingssysteem naar een buisverwarmingssysteem met een dubbel zo groot VO zakt dan bij de genoemde prijzen naar 90 cent.

Een kas die voor het grootste deel door een warmtepomp wordt verwarmd heeft geen noemenswaardig voordeel van het gebruik van een buitenluchtvoorverwarmingssysteem met een groot VO. Voor de warmtepompprestatie maakt een lage retourtemperatuur vrijwel geen verschil (het gaat om de benodigde aanvoertemperatuur) en de ketel verbrandt weinig gas en heeft dus navenant weinig voordeel van een hoger condensorrendement. Daar komt bij dat de ketel vooral in werking is wanneer het erg koud is en juist in die periode is de ontvochtigingsbehoefte klein.

Conclusie

Het effect van laagtemperatuur verwarming in het verwarmingsnet van bedrijven die door een warmtepomp worden verwarmd heeft een waarde van ongeveer 90 cent per m² per jaar (uitgaande van een gasprijs van 30 cent per m³ en een stroomprijs van 10 cent per m³). Buitenlucht voorverwarming met een laag temperatuur warmtewisselaar heeft op deze bedrijven weinig effect (minder dan 0.5 m³ gasbesparing) omdat de warmtepomp geen extra voordeel heeft van lage retourtemperaturen en er bij de condensor op een bedrijf dat vooral met een warmtepomp wordt verwarmd weinig extra warmte gehaald kan worden.

3.3.3 Effect van LT-systemen op kassen met geothermie

Een geothermische bron levert warm water van een bepaalde temperatuur en met een bepaald debiet. Het thermisch vermogen van zo'n bron hangt dan lineair af van de temperatuur waarop het water naar de bron kan worden teruggevoerd. Een bron die op een bepaalde dag 240 m³ water van 65 aan een hectare tuinbouwbedrijf levert (24 uur lang 10 m³/(ha uur)), wat afgekoeld wordt naar gemiddeld 40 °C levert 25 GJ, ofwel 2.5 MJ/m² per dag. Als de kas op die dag 4 MJ/m² nodig dekt de geothermische bron op die dag 62% van de warmtevraag. Indien de verdubbeling van het VO in het ondernet tot een 10 °C verlaging van de retourtemperatuur leidt kan diezelfde bron op die dag 3.5 MJ/m² per dag leveren en stijgt de dekkingsgraad in dit voorbeeld naar 87%.

Verlagen van de retourtemperatuur heeft dus een groot effect op de hoeveelheid warmte die uit een geothermische bron kan worden betrokken. Het zal echter duidelijk zijn dat op de dagen dat de kas in het vorige voorbeeld niet meer dan 2.5 MJ/m² per dag nodig had, dus dat zijn dagen in de periode van het jaar dat de warmtevraag van de kas minder dan 0.55 m³ aardgas per week betreft, het voor de dekkingsgraad van de geothermische bron geen verschil maakt of *et al.* dan niet een laag-temperatuur verwarmingsnet gebruikt wordt. De dekkingsgraad van de geothermische bron zal op die dagen in beide gevallen 100% zijn. Wel zal de verlaging van de retourtemperatuur in die periode de hoeveelheid liters water die over de geothermische bron moeten worden gepompt verlagen waardoor eenzelfde hoeveelheid geothermische warmte kan worden geleverd met een lager stroomverbruik voor het verpompen van water. Dit stroomverbruik is vaak behoorlijk hoog, van 0.5 kWh/m³ met uitschieters naar 1 kWh per m³ in bronnen met een lage hydrologische doorlatendheid. Omdat het totaal aantal m³ water dat bij geothermiegebruik over de bronnen uitgewisseld wordt niet zo groot is (meer dan 8 m³/m² jaar) is uitzonderlijk kan het effect van het LT-systeem op het stroomverbruik voor het gebruik van geothermische warmte nooit erg groot zijn. De vermindering van het stroomverbruik zal op z'n hoogst 2 kWh/(m² jaar) bedragen, maar in de regel niet meer dan 1 kWh/m² per jaar kunnen zijn.

Doordat de dekkingsgraad van een standaardsysteem van dag tot dag varieert kan de betekenis van een laag-temperatuur verwarmingssysteem bij toepassing van geothermie alleen worden berekend door het effect van dit systeem op de warmte-afzet van dag tot dag te bekijken. Dit kan prima worden uitgevoerd met het KASPRO simulatiemodel dat hiertoe is uitgebreid met een regelaar die de buffer zoveel mogelijk met geothermische warmte op temperatuur houdt. Zo'n buffer is absoluut noodzakelijk bij gebruik van geothermie omdat de geothermische waterdebieten gemiddeld genomen in de buurt liggen van de hoeveelheid warm water waarmee het verwarmingssysteem gevoed moet worden, maar op momentele basis gemakkelijk een factor 4 kunnen verschillen. Een buffer kan deze verschillende debieten opvangen. In de berekeningen is uitgegaan van een buffer van 150 m³ per ha.

Onderstaande tabel laat het effect zien van de verdubbeling van het aantal buizen in het ondernet bij een aantal combinaties van temperatuur en debiet van het geothermische water. Zoals te zien zijn de verschillende combinaties voor een standaardbedrijf gelijkwaardig (leidend tot een dekkingsgraad van 70% uit de geothermische bron), maar neemt het effect van een LT-systeem af naarmate de watertemperatuur uit de geothermische bron oploopt.

Tabel 3.2. Effect van de verdubbeling van het aantal buizen in het ondernet bij een aantal combinaties van temperatuur en debiet van het geothermische water. De gekozen combinaties leveren in een standaard kas eenzelfde dekkingsgraad van 70%.

Geothermie temperatuur	Max debietgeothermie m ³ /(ha uur)	Gasverbruik standaard kas	Gasverbruik bij LT-verwarming	Effect LT-systeem m ³ /(m ² jr)
65 °C	10.90	8.4	4.4	4.0
70 °C	8.50	8.4	5.3	3.1
75 °C	7.00	8.4	6.2	2.2
80 °C	6.30	8.4	6.2	2.2
85 °C	5.50	8.4	6.8	1.6
90 °C	5.05	8.4	6.9	1.5

De achtergrond van het feit dat het effect van de verlaging van de retourtemperatuur niet bij alle combinaties van temperatuur en debiet gelijk is komt omdat de besparing van het LT-systeem bepaald wordt door het product van de temperatuurverlaging van het retourwater en het totaal aantal kubieke meters. De temperatuurverlaging door het LT-systeem is in alle situaties gelijk, maar het aantal kuubs die uit de geothermie-bron worden betrokken nemen bij een stijgende temperatuur af zodat de extra hoeveelheid energie die het LT-systeem uit de bron kan betrekken afneemt met de aanvoertemperatuur.

Ook wanneer het debiet constant gehouden wordt, en niet de potentie van de geothermische bron voor een standaardkas zoals in Tabel 3.2, neemt het effect van een laagtemperatuur verwarmingssysteem af met een oplopende temperatuur. De afname is dan wel minder sterk.

Tabel 3.3. Effect van de verdubbeling van het aantal buizen in het ondernet bij verschillende aanvoertemperaturen van het geothermische water en een constant leveringsdebiet.

Geothermie temperatuur	Max debietgeothermie m ³ /(ha uur)	Gasverbruik standaard kas	Gasverbruik bij LT-verwarming	Effect LT-systeem m ³ /(m ² jr)
65 °C	6	13.4	10.5	2.9
70 °C	6	11.9	9.1	2.8
75 °C	6	10.1	7.9	2.2
80 °C	6	8.9	6.8	2.1
85 °C	6	7.8	5.7	2.1
90 °C	6	6.7	4.9	1.8

Indien het laag-temperatuur-karakter wordt gerealiseerd via de buitenluchtvoorverwarming met een groot uitwisselend oppervlak kan die voorverwarming met name op de koude dagen geheel door een cascade-aansluiting van het retourwater uit de kas kan worden gerealiseerd. De voorverwarming wordt dan als het ware door 'restwarmte' ingevuld; water wat na tussenkomst van de buitenluchtvoorverwarming met een temperatuur van 15 tot 20 °C naar de geothermische bron wordt teruggebracht waar het zonder die lage temperatuur buitenluchtvoorverwarming met 25 tot 30 °C zou worden teruggebracht.

Vooraf in perioden waarin de warmtevraag hoog is, en dus de energielevering door de geothermische bron niet volledig dekkend is, is het retourwater uit de kas warm genoeg om de volledige voorverwarming te verzorgen. Op jaarbasis vraagt de voorverwarming van buitenlucht ongeveer 4 m³ aardgas equivalenten voor z'n rekening. De voorverwarming met een laag-temperatuur verwarmingssysteem op de restwarmte uit de kas levert echter niet dezelfde vermindering van het resterend gasverbruik op. Dit omdat er alleen op de dagen waar de geothermie-aansluiting beperkend was de toepassing van zo'n laag-temperatuur voorverwarming ten gunste van een verminderd gasverbruik uitwerkt.

Modelberekeningen geven aan dat de extra hoeveelheid warmte die de geothermische bron met zo'n laag temperatuur buitenluchtvoorverwarming kan realiseren ruim 3 m³ besparing op het resterend gasverbruik oplevert wanneer er over 6 m³/(ha uur) geothermische warmte kan worden beschikt. Dit effect blijkt nauwelijks beïnvloed te worden door de temperatuur van het geothermische water, maar het maximaal beschikbare waterdebiet heeft wel (een kleine) invloed. Bij 10 m³/(ha uur) geothermisch water is het effect van laag temperatuur buitenlucht-voorverwarming gedaald naar een gasbesparing van 2.5 m³/(m² jr).

Conclusie

De vergroting van de warmte-overdracht van het kasverwarmingssysteem door bijvoorbeeld het aantal buizen in het verwarmingssysteem te verdubbelen bespaart bij kassen die gebruik maken van geothermie bespaart 1.5 tot 4 m³ aardgas per m² per jaar. Het grootste effect wordt verkregen in situaties waar het geothermisch vermogen met een relatief lage temperatuur en een relatief groot debiet wordt geleverd. naarmate de aanvoertemperatuur hoger wordt, bijvoorbeeld 80 graden of meer dan komt het effect van een laag temperatuur kasverwarmingssysteem rond de 2 m³ per m² per jaar te liggen.

Het gebruik van een laagtemperatuur buitenluchtvoorverwarming is voor kassen die door geothermische warmte worden verwarmd zeer interessant. Hierdoor kan de retourtemperatuur naar de geothermische bron verder teruggebracht worden naar 15 °C tot 20 °C. Voor een energiezuinige tomatenteelt (dubbel scherm + permanent foliescherm in de eerste maanden, geen minimumbuis, buitenluchtaanzuiging) daalt het resterend ketelgasverbruik daardoor met 2.5 tot 3 m³/m² per jaar ten opzichte van een situatie waarbij de buitenluchtvoorverwarming met een klein verwarmingsblok plaatsvindt. Het effect van een laagtemperatuur buitenluchtvoorverwarming kan vrijwel geheel worden opgeteld bij het effect van de verhoogde dekkingsgraad van geothermie bij de verdubbeling van het aantal verwarmingsbuizen zodat de expliciete aandacht van laagtemperatuurverwarming bij kassen die met geothermie worden verwarmd al gauw 5 m³ aardgas per m² per jaar ten opzichte van standaard kassen kan opleveren.

4 Conclusies

De burostudie naar het effect van laag-temperatuur verwarmingssystemen op de verlaging van het primaire energieverbruik voor verschillende kassystemen voor de groenteteelt heeft laten zien dat het grootste effect te verwachten is bij het gebruik van geothermie. Het blijkt dat een vermindering van het resterend gasverbruik van een bedrijf dat middels geothermische warmte wordt verwarmd met $5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ jaar})$ kan dalen door de buitenluchtvoorverwarming met behulp van een warmtewisselaar met groot VO te realiseren en het aantal buizen in het verwarmingsnet te verdubbelen. De twee genoemde aanpassingen zorgen ieder voor ongeveer de helft van het effect.

Alle berekeningen in deze studie zijn gedaan voor een zuinig kassysteem dat gebruik maakt van twee beweegbare schermen, een transparant foliescherm aan het begin van de teelt en buitenluchtaanzuiging voor een gecontroleerde vochtafvoer. Qua klimaatinstellingen wordt een hoge luchtvochtigheid geaccepteerd (85% overdag en 88% s' nachts) en wordt er geen gebruik gemaakt van een minimumbuis.

De verdubbeling van het aantal buizen in het buisrailnet wordt vaak geassocieerd met een traag verwarmingssysteem, maar met de uitleg van de lay-out van zo'n systeem is aannemelijk gemaakt dat dit niet het geval is. Ook wordt een recent experiment aangehaald waar geen enkel nadeel van zo'n ruim bemeten systeem is ondervonden.

De toepassing van een laag-temperatuur verwarmingssysteem in kassen die voornamelijk met een warmtepomp worden verwarmd blijkt het resterend gasverbruik van de ketel met 1.7 tot $2.7 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ jaar})$ te laten dalen en het stroomverbruik met 2.3 tot $5 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ jaar})$. Bij een gasprijs van 30 cent per m^3 en een stroomprijs van 10 cent per kWh betekent dit een verlaging van de energiekosten met ongeveer 1 euro per m^2 per jaar. Het laag-temperatuur verwarmingsnet verbetert de werking van de warmtepomp waardoor het gebruik van laagwaardige warmte van de kas toeneemt met 70 tot 100 MJ per m^2 per jaar. In sommige situaties is dit een welkome verbetering, maar in andere gevallen zal dit betekenen dat er in de zomer meer warmte verzameld moet worden. De onttrekking en opslag van zo'n hoeveelheid warmte vergt ongeveer 1 kWh waardoor de besparing op energiekosten daalt naar 90 cent/ $(\text{m}^2 \text{ jaar})$.

Een laagtemperatuur warmtewisselaar voor de buitenluchtvoorverwarming heeft in een kas die voornamelijk met een warmtepomp wordt verwarmd nauwelijks een verlaging van het energieverbruik. De verwarmingswater deelstroom met zeer lage retourtemperaturen (15 tot 20°C) heeft voor een warmtepomp geen waarde en in de ketelcondensor, waar dit koude water tot een hoger rendement van het ketelgas leidt zit in zo'n bedrijf maar weinig warmte, juist omdat het grootste deel van de warmtevraag door de warmtepomp wordt ingevuld.

Zo'n koude deelstroom heeft om dezelfde reden wél waarde voor een kas die met een ketel en/of WKK wordt verwarmd. Het gasverbruik kan hierdoor in zo'n kas met $1 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ jr})$, geldend voor een kas met een ketel, tot $3.3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ jr})$, voor een kas met WKK afnemen.

Het gebruik van laag-temperatuur buitenlucht voorverwarming heeft hiermee voor deze categorie kassen een groter effect dan het gebruik van een laag temperatuur verwarmingsnet in de kas. Voor zo'n verwarmingsnet, vormgegeven door de verdubbeling van het aantal buizen in het buisrailnet, levert 0.75 tot 1.4 m^3 gasbesparing per m^2 per jaar. Ook hier geldt het lage getal voor het bedrijf met een ketel en het hogere getal voor een bedrijf met WKK. Deze besparing kan niet worden opgeteld bij de eerder genoemde 1 tot $3.3 \text{ m}^3/\text{m}^2$ per jaar die een laag-temperatuur buitenlucht voorverwarming oplevert, waarmee kan worden geconcludeerd dat voor een ketel of WKK verwarmde kas een laag-temperatuur buitenlucht voorverwarming in een buitenlucht-aanzuiginstallatie de meest interessante vorm van LT-verwarming is. Die 1 m^3 besparing voor een ketelgestookte kas betekent 3% besparing en de 3.3 m^3 voor de WKK kas betekent 8% besparing op het gasverbruik.

Bijlage I Kas- en klimaat-instellingen

Alle berekeningen worden gemaakt voor een moderne kas met een enkel glas bedekking. Er liggen twee kappen van 4 meter op een tralie. In de gevel is een gevelscherm gemonteerd. Er wordt gebruik gemaakt van zo dun mogelijke profielen om de lichtonderschepping te minimaliseren. De diffuse doorlatendheid van de kas, inclusief de constructie komt daarmee op 70% op gewashoogte.

Gewas:

In de onbelichte tomatenteelt wordt eind december geplant, waarbij gestart wordt met een plant waarvan het eerste trosje op het punt van bloei staat. Hierdoor kan de eerste oogst begin maart worden verwacht.

Het gewas blijft ruim 11 maanden staan en wordt eind november geruimd.

Verwarmingssysteem:

In de referentiesituatie ligt er een buisrail systeem met 10 buizen met een diameter van 51mm in een tralie van 8 meter.

In de berekeningen is er geen bovennet/groeibuis gebruikt.

Kasklimaatsetpoints:

De eerste drie weken na planten wordt een vlak stookpatroon gehanteerd op 19 °C. Half januari wordt de nachttemperatuur verlaagd naar 17 °C en de dagtemperatuur naar 19 °C. Vanaf april wordt de dagtemperatuur verhoogd onder invloed van licht. Over het stralingstraject van 100 tot 300 W/m² wordt er 2 °C bij de stooklijn opgeteld. Tijdens de teeltwisseling wordt de kas op 5 °C gehouden.

Minimumbuis:

Er wordt geen gebruik gemaakt van een minimumbuis.

Ventilatie:

In de tomatenteelt wordt in de warmere periode van het jaar snel gelucht. Vanaf 1 februari staat de ventilatielijn 3 graden boven de stooklijn en vanaf 1 april slechts 1 °C boven de stooklijn. Dit om de etmaaltemperatuur in de hand te houden. In het najaar en in de winter (vanaf 20 oktober) staat de ventilatielijn 5 graden boven de stooklijn. De ramen worden geopend met 20% per graad overschrijding.

Luchtvochtigheid:

De kas regelt de luchtvochtigheid door een buitenluchtaanzuigstelsel in te schakelen wanneer de luchtvochtigheid 's nachts boven de 88% komt. Overdag wordt de kas ontvochtigd wanneer de luchtvochtigheid boven de 85% komt. De luchtverversingscapaciteit is maximaal 5 m³/(m² uur).

Schermbuis:

De kas is uitgerust met twee schermen. Het onderste is een beweegbaar transparant scherm (LS10-ultra-plus). Dit wordt gesloten als het buiten kouder is dan 10 °C.

Zolang het warmer is dan 5 °C wordt het scherm geopend bij een buitenstraling van meer dan 50 W/m². Wanneer het kouder is dan -10 °C wordt het scherm pas geopend als er meer dan 250 W/m² globale straling is. Bij tussenliggende temperaturen wordt het stralingscriterium waarboven het scherm wordt geopend lineair aangepast.

Het tweede scherm is een XLS18 scherm. Dit laat bijna geen licht door en wordt daarom alleen 's nachts gesloten, als het kouder is dan 12 °C.

Tenslotte wordt er in de periode van december tot en met februari gewerkt met een permanent transparant foliescherm.

In de schermen worden geen vochtkieren getrokken omdat de buitluchtaanzuiginstallatie voor voldoende luchtverversing zorgt via de onvermijdelijke kieren in de schermafdichtingen.

