

Laan van Westenenk 501
Postbus 342
7300 AH Apeldoorn

www.tno.nl

T 055 549 34 93

F 055 549 98 37

TNO-rapport

2006-A-R0070/B

**Ontvochtigen van kassen met
bestaande technieken uit de utiliteitsbouw
Eindrapport**

Datum	Maart 2006
Auteurs	Ir. N.R. Bootsveld Ir. J. Van Wolferen
Projectnummer	35161 PT-projectnummer PT 11931
Trefwoorden	Kassen Ontvochtigen
Bestemd voor	Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit t.a.v. drs. ing. L. Oprel Postbus 342 6710 BL Ede Productschap Tuinbouw t.a.v. mw. ing. A. Jolman Postbus 280 2700 AG Zoetermeer



Productschap  **Tuinbouw**

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst. Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

Samenvatting

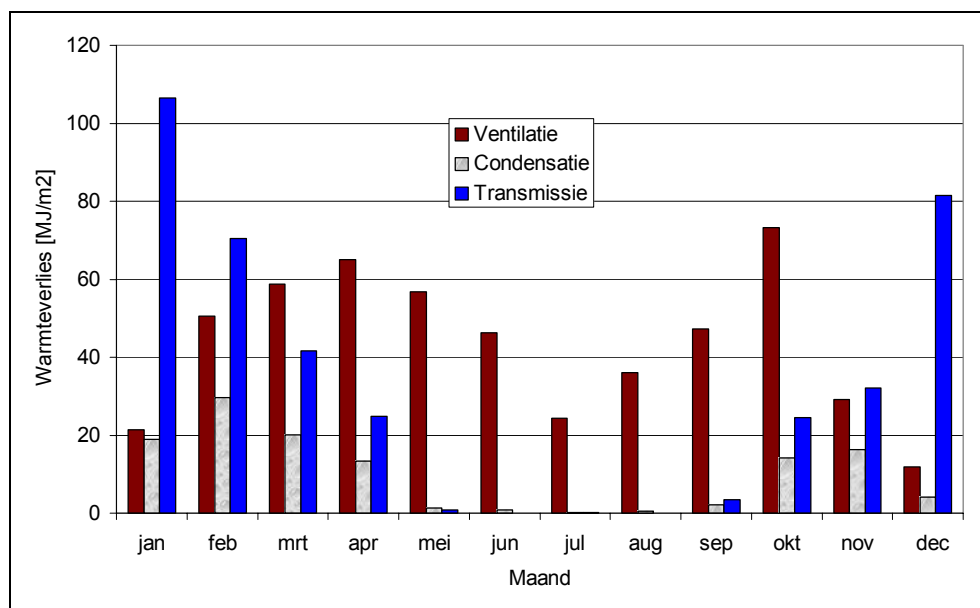
Dit onderzoek gaat in op de mogelijkheden voor ontvochtiging van kassen. TNO heeft met subsidie van het Productschap Tuinbouw en het ministerie van LNV onderzocht of bestaande technieken uit de utiliteitsbouw, nieuwe invalshoeken konden geven, om tot een meer haalbaar concept te komen.

De vochthuishouding is verantwoordelijk voor ongeveer de helft van het energiegebruik voor verwarming in tuinbouwkassen. Een los staande warmtepompontvochtiger, kan dit verbruik tegen relatief lage investeringen verminderen, door het vocht uit te koelen en de warmte direct in de kas te brengen. Het toevoegen van een warmtewisselaar kan het energiegebruik van deze ontvochtiger halveren. Dit leidt ook tot een kleinere installatie. Dit principe is ook toepasbaar in bestaande gesloten kasconcepten met een acquifer. De theoretische energiebesparing van circa 25 tot 45% kan pas worden bereikt door het ontwikkelen van een nieuwe regelstrategie.

Klimatisering in kassen is van oudsher gebaseerd op het vasthouden van warmte met de kasconstructie voor seizoensverlenging. Verwarming maakt het mogelijk om gewassen vier seizoenen rond te telen.

In de kas ontstaat echter vochtige lucht omdat de planten vocht verdampen voor hun assimilatie. Dit vocht condenseert bij koud weer op het kasdek en wordt daarnaast afgevoerd door ventilatie. Voor de verdamping van water is veel warmte nodig: 1 m³ aardgas bevat de energie om 13 liter water te verdampen. Voor de teelt van tomaten is de jaarlijkse verdamping ongeveer 700 kg/jaar.m². Dit zou komt overeen met 54 m³ aardgas per m²/jaar, maar gelukkig zorgt de zon voor een aanzienlijke bijdrage. Berekend is op welke manier warmte, afkomstig van de verwarming verloren gaat. Er zijn drie routes onderscheiden: condensatie op het kasdek, transmissie en ventilatie. 's Winters gaat de meeste warmte verloren door transmissie, rond april en rond oktober zorgt ventilatie vanwege vochtafvoer voor het meeste warmteverlies.

Condensatie heeft de piek in februari, door de combinatie van verdamping, toenevend lucht en koud weer.



Warmteverlies per maand voor zover voorzien door verwarming.

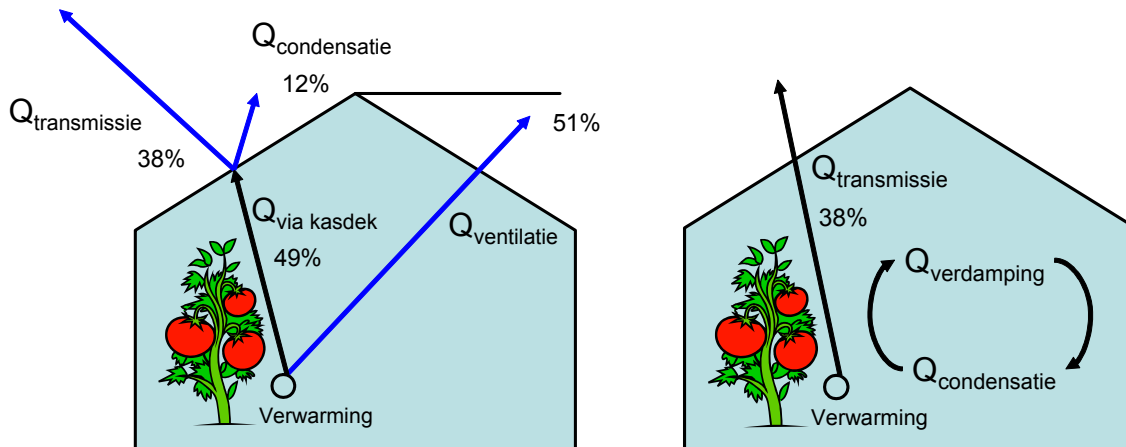
Voor de energiehuishouding maakt het niet zo veel uit of de condensatiewarmte verloren gaat via condensatie op het kasdek of via de ventilatie. In beide situaties is de warmte niet meer beschikbaar voor het verwarmen van de kas, laat staan voor het opnieuw verdampen van water. Als de zon onvoldoende warmte levert, moet de verloren warmte dus worden aangevuld door de verwarming.

Ventilatie heeft als extra nadeel dat de zogenaamde voelbare warmte verloren gaat. Dit is de warmte die vertegenwoordigd wordt door de hogere temperatuur van de kaslucht ten opzichte van de omgeving. Aangezien ventilatie voor het afvoeren van vocht pas nodig is bij hogere buitentemperaturen, is dit effect relatief klein. Dit verklaart ook waarom het terugwinnen van deze ventilatiewarmte, door lucht-warmtewisselaars slechts circa maximaal 10% energie bespaart. [1],[2]. Rekening houdend met bevriezing van condensaat, tijdens vriezende weer, valt deze besparing nog lager uit.

Een andere mogelijkheid om de condensatiewarmte terug te winnen is mechanische ontvochtiging. Hierbij wordt het vocht gecondenseerd tegen een koude oppervlak van een luchtbehandelingskast, waarna de lucht weer wordt opgewarmd tot de gewenste temperatuur. Deze werkwijze bespaart ongeveer 25% op het primair energiegebruik¹. De economie hangt aan de besparingskant sterk af van de tarieven, het beschikbaar hebben van warmtekracht etc. [3], [4], [5]. Aan de zijde van de investeringen is de aquifer dominant. De verwachte voordelen vanwege het hogere CO₂

¹ Als we rekenen met een COP van 4 voor de warmtepomp en het landelijk opwekkingsrendement van elektriciteit (39%), inclusief energiekosten voor ventilatie en pompen.

gehalte zijn aannemelijk. De voordelen van een lagere ziektedruk, zijn aanwezig maar nog niet voldoende bewezen.



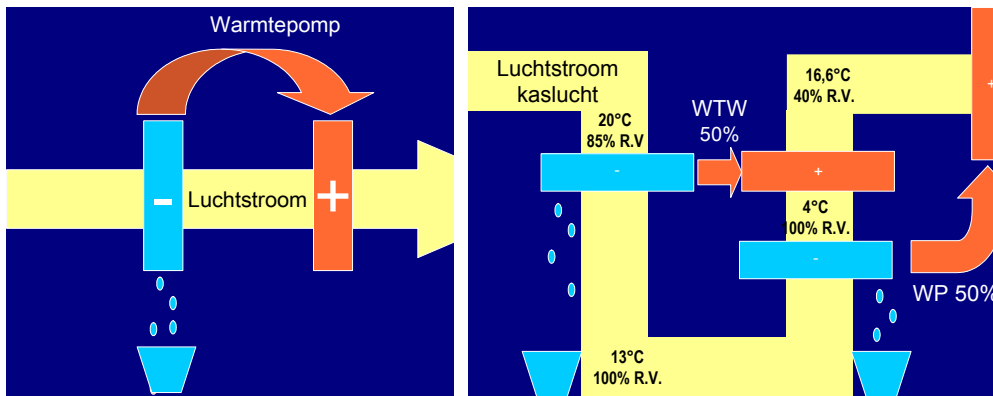
Jaargemiddelde warmteafvoer door condensatie en ventilatie, voor zover die warmte door de verwarming wordt ingebracht, tomat, enkel glas, simulatie KasPro.

Kringloop verdampingswarmte in stookseizoen.

Bestaande technieken utiliteitsbouw

TNO heeft met subsidie van het Productschap Tuinbouw en het ministerie van LNV onderzocht of bestaande technieken uit de utiliteitsbouw, nieuwe invalshoeken konden geven, om tot een meer haalbaar concept te komen.

Een belangrijkste conclusie van het onderzoek is dat een tussenwarmtewisselaar goede mogelijkheden biedt. Dit is een wezenlijk verschil met de nu gangbare luchtbehandelingskast van gesloten kassen, want daarin moet de hele afgekoelde luchtstroom weer worden opgewarmd door de warmtepomp. De toegevoegde tussenwarmtewisselaar hergebruikt koude uit al afgekoelde lucht om aangevoerde warme lucht af te koelen. De installatietechniek, bestaande uit warmtepomp, eventuele aquifer en leidingwerk kunnen tot de helft kleiner worden gekozen en de luchtbehandelingsinstallatie gebruikt nog slechts de helft van de oorspronkelijke aandrijfenergie. Het wordt dan ook interessant om de aquifer weg te laten en een pure ontvochtiger toe te passen. Bijvoorbeeld in maart, als de buitenluchttemperatuur laag is maar het gewas wel actief door het licht, is de warmte die vrijkomt bij het ontvochtigen direct weer inzetbaar. Het idee is meerdere kleine zelfstandig werkende ontvochtigers onder het gewas te plaatsen. Deze moeten dan de ventilatie in het stookseizoen vanwege vocht zien te voorkomen. Deze optie kan goed betaalbaar zijn door massaproductie van de ontvochtiger en het vrijwel vervallen van kosten voor de aanleg van de installatie.



Omzetting latente in voelbare warmte door ontvochtiging met warmtepomp; tussen wtw bespaart 50% elektriciteit.

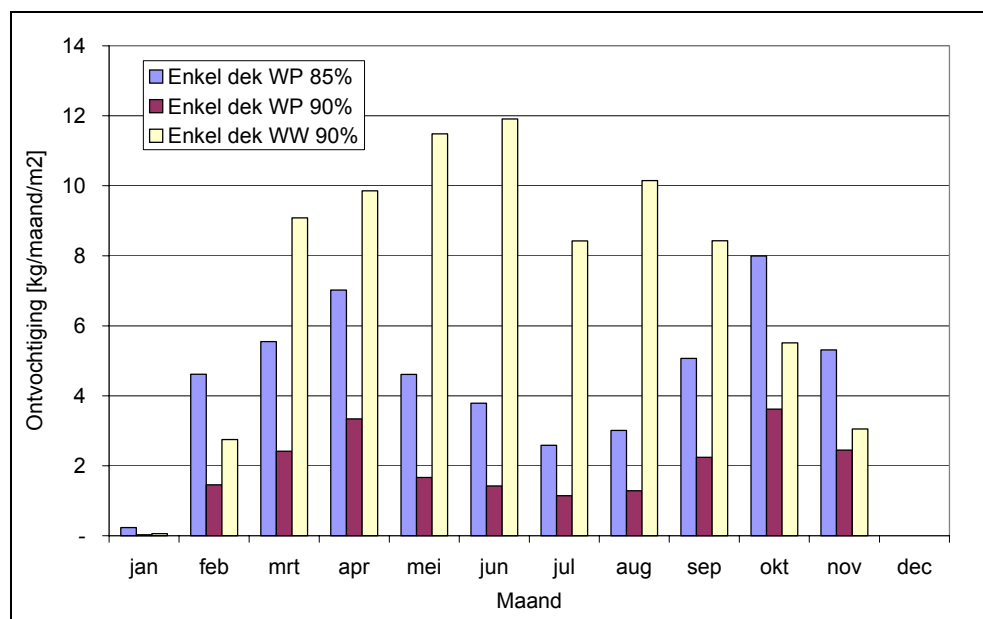
Simulaties

Gezien de wisselwerking tussen klimaat en gewas en de beïnvloeding van het binnenklimaat door de nieuwe installaties, is gekozen voor simulaties met het KasPro model door PRI (voorheen A&F). Dit model is voorzien van modellen van de ontvochtiger om een aantal concepten door te rekenen

Resultaten

Een tweede belangrijke conclusie van het onderzoek is dat de regelstrategie erg belangrijk is. De rekenresultaten laten zien dat circa 10% energie wordt bespaard terwijl het potentieel veel groter is. Zo bevat het model nog de minimumbuisregeling wat leidt tot het openen van de ramen op te hoge temperatuur (en vocht). De relatieve luchtvochtigheden zijn goed vergelijkbaar met de referentie, een normaal bedreven, open tomatenkas. De hoogste RV's, boven 85 en 90 % worden waargenomen in hoogzomer en die worden niet beïnvloed door de voorgestelde wijze van ontvochtigen. De warmtepompontvochtiger is vooral van nut in het voor- en naseizoen.

Economisch is de zelfstandige warmtepompontvochtiger nog niet rendabel, maar het gat is een stuk kleiner dan bij de gesloten kas: tegen een nu geschat investeringsniveau van 7 tot 12 €/m² staat een mogelijk besparing op energie van minstens 10%, met nog aanzienlijke rek daarin. Het is een relatieve low-tech oplossing. De gesloten kas vergt tientallen Euro's per m² aan extra investeringen tegen een naar verhouding kleine energiebesparing, maar wel weer met een productieverhoging.



Ontvochtiging door warmtepomp per maand

Inpasbaarheid

Er zijn nog geen fabrikanten die de warmtepompontvochtiger met tussenwarmtewisselaar op de markt brengen voor de glastuinbouw. Producten voor gebouwen zijn niet direct geschikt, vanwege de maatvoering die nodig is om apparaten onder de teeltgoot of onder de tafels te plaatsen. Plaatsing aan de kop van de kas is mogelijk, maar leidt verlies aan m^2 en grotere investeringen in de luchtverdeling.

Andere opties.

In een kwalitatieve analyse zijn verschillende andere mogelijkheden voor ontvochtiging uitgewerkt [6].

- Geforceerde ventilatie via kanalen, met warmteterugwinning van uitblaasluicht naar inblaasluicht, heeft als belangrijkste nadelen dat CO_2 en verdampingswarmte nog steeds verloren gaan. Inpassing is nodig aan de kop van de kas, met een luchtslang voor verspreiding van ventilatieluicht in de kas.
- Varianten met afkoeling en opwarming van luicht met een centraal opgewekte koude en warmte, hebben als extra voordeel dat ze de kas ook kunnen koelen. Een tussenwarmtewisselaar kan hier eveneens aanmerkelijk energie besparen en leiden tot een kleinere aquifer.
- Onder koele buitenomstandigheden is het mogelijk om extra condensatie te bereiken tegen de buitenluicht, met een warmtewisselaar. Uit de simulaties blijkt echter dat dit leidt tot een hóger energiegebruik, zelfs bij gebruik van een tussenwarmtewisselaar. Dit is verklaarbaar door het verlies aan warmte aan de buitenluicht. Het gebruik van adiabatische bevochtiging van de langstromende buitenluicht leidt tot meer ontvochtiging, maar eveneens tot een toegenomen energiegebruik. Een dergelijke warmtewisselaar met de buitenluicht is dus alleen interessant als methode om te koelen.

Aanbevelingen

Verder technisch onderzoek is nodig om de voorgestelde systemen geschikt te maken voor demonstratie. De decentrale ontvochtiger met warmtepomp is het meest perspectiefrijk. Hierin kan de optimalisatie van de investeringskosten van de ontvochtiger worden meegenomen door gebruik te maken van schaalvoordelen in aantallen en in de grootte van de units.

Een grotere energiebesparing kan worden aangetoond met aanvullende simulaties met KasPro naar de optimale bedrijfswijze van de ontvochtiger in combinatie met de ventilatie en verwarming. Dit zal de investeringsruimte verbeteren. In plaats van een vast setpoint voor de RV kan gedacht worden aan een dynamisch setpoint, afhankelijk van de temperatuur (hogere kasttemperatuur staat hogere RV toe) en de behoefte aan verwarming (bij behoefte aan verwarming is het zinvol om de WP-ontvochtiger te bedienen, zodat de condensatie op het kasdek kleiner wordt. Toepassing bij andere teelten (potplanten) biedt mogelijk een groter economisch voordeel door de hogere RV's en het grotere gebruik van een isolerend kasdek.

Inhoudsopgave

Samenvatting	3
1. Inleiding	13
1.1 Probleemstelling	13
1.2 Doelstelling	14
1.3 Werkzaamheden en werkwijze	14
2. Randvoorwaarden en criteria voor beoordelen technieken voor ontvochtigen	17
2.1 Uitgangspunten	17
2.2 Randvoorwaarden en criteria	18
3. Systemen voor ontvochtiging	23
3.1 Verbeterde ontvochtiging via ventilatie met warmteterugwinning	23
3.1.1 Gebalanceerd ventileren met warmteterugwinning en vorstbeveiliging	23
3.1.2 Gebalanceerd ventileren met warmteterugwinning en koeling	25
3.2 Verbeterde ontvochtiging zonder ventilatie	26
3.2.1 Uitkoelen van vocht met zelfstandige warmtepomp	26
3.3 Uitkoelen van vocht met warmtewisselaar met buitenlucht	27
3.3.1 Uitkoelen van vocht met warmtewisselaar met buitenlucht en adiabatische koeler	29
3.3.2 Uitkoelen van vocht met koelmachine (en warmtewisselaar met buitenlucht)	30
3.3.3 Uitwisselen van vocht en warmte met buitenlucht via sorptiewiel	31
3.3.4 Uitkoelen van vocht - volledige luchtbehandeling	32
3.3.5 Uitkoelen van vocht - volledige luchtbehandeling met voorkoeling/naverwarming	33
3.3.6 Uitkoelen van vocht met warmtewisselaar met buitenlucht & volledige luchtbehandeling met voorkoeling/naverwarming	34

4.	Kwalitatieve beoordeling bestaande technieken voor ontvochtigen uit de utiliteitsbouw.....	37
4.1	Beoordeling	37
4.2	Conclusies.....	39
4.3	Overzicht geselecteerde ontvochtigingssystemen	41
5.	Prestaties systemen voor ontvochtiging.....	43
5.1	Inleiding.....	43
5.2	Referentiekas, installaties en teelt.....	43
5.3	Prestaties ontvochtigingssystemen	45
5.4	Inzet over de seizoenen.....	51
5.5	Conclusies prestaties systemen.....	53
6.	Inpassing systemen voor ontvochtiging.....	55
6.1	Inleiding.....	55
6.2	Inpassingseisen	55
6.3	Inpassingsmogelijkheden ontvochtiger met warmtepomp.....	56
6.4	Inpassingsmogelijkheden ontvochtiger met warmtewisselaar met buitenlucht	58
7.	Economische haalbaarheid.....	61
7.1	Inleiding.....	61
7.2	Investeringskosten	61
7.3	Tarieven en overige economische parameters	62
7.4	Subsidies, belasting faciliteiten	62
7.5	Productie.....	62
7.6	Economische vergelijking	62
7.7	Investeringsruimte	64
8.	Conclusies en aanbevelingen	65
8.1	Conclusies.....	65
8.2	Aanbevelingen	67
9.	Referenties	69
10.	Verantwoording	71

Bijlagen

Bijlage 1	Grafische weergave meetresultaten Agpo Econcompact
Bijlage 2	Grafische weergave meetresultaten AWB Thermomaster 3HR28T
Bijlage 3	Grafische weergave meetresultaten Intergas HR28/24
Bijlage 4	Grafische weergave meetresultaten Nefit Smartline HRC24/CW4
Bijlage 5	Grafische weergave meetresultaten Remeha Avanta
Bijlage 6	Grafische weergave meetresultaten Vaillant HRV NL 30C
Bijlage 7	Grafische weergave 24-uurs tappatronen

1. Inleiding

(Naar de rapportage over fase 1 [6])

1.1 Probleemstelling

De Nederlandse glastuinbouwsector heeft samen met de overheid afspraken gemaakt in het convenant Glastuinbouw en Milieu (GLAMI) en hierin een verbetering van de energie-efficiency afgesproken van 65% in 2010 t.o.v. 1980. Eén van de onderzoeksthema's in het GLAMI onderzoeksprogramma is actieve ontvochtiging als alternatief voor condensatie tegen het kasdek en als alternatief voor ontvochtigen door ventilatie. Dit thema is van toenemend belang omdat nieuwe kasdekmaterialen, door hun betere isolatie, afvoer van vocht via condensatie uitsluiten en omdat voelbare en latente warmte bij ventilatie verloren gaan. Daarnaast gaat met ventilatie ook CO₂ verloren die bedoeld was voor de groei van het gewas. Het verminderen van deze verliezen bij ventilatie kan een belangrijke bijdrage leveren aan de realisatie van de genoemde doelstellingen. Bovendien zal in nieuw te ontwikkelen kasconcepten zoals de "gesloten kas", minder worden geventileerd en zal de behoefte aan andere manieren van ontvochtiging toenemen.

Eerder uitgevoerd onderzoek binnen GLAMI (Campen e.a. 2003, 2001) naar het afvoeren van vocht uit tuinbouwkassen met warmteterugwinning, liep vast op te lange terugverdientijden bij toepassing van kleine, commercieel beschikbare warmtewisselaars voor woningen. Deze warmtewisselaars worden gekenmerkt door relatief hoge specifieke kosten. De door de auteurs ontwikkelde oplossingen bleken bovendien technisch suboptimaal, in vergelijking met bestaande technieken in de utiliteitsbouw.

Een ander onderzoek (de Ruijter, 2002) over de koeling/ontvochtiging met gebruik van aquifers beperkte zich hoofdzakelijk tot ontvochtiging door uitkoeling en de koppeling aan een aquifer als energieopslagsysteem. Dit concept is vooral geschikt voor seizoensopslag.

Technieken uit de utiliteitsbouw als oplossing

In de utiliteitsbouw zijn ventilatie, warmteterugwinning, bevochtiging en ontvochtiging bekende onderwerpen, waarvoor verschillende industriële partijen oplossingen aanbieden die technisch en economisch effectief zijn. In moderne kantoorgebouwen is ventilatie door het openen van de ramen al lang geen item meer. Warmtewielen en platenwarmtewisselaars zorgen voor warmteterugwinning op de ventilatie, waardoor de warmteverliezen door ventilatie met 70 tot 90% zijn verminderd.

Ontvochtiging is in de utiliteitsbouw met name in de zomer gewenst, vanwege het nadelige effect van een hoge luchtvochtigheid op het comfort van de mens. Airconditioning in Nederland is dan ook in de eerste plaats ontvochtiging. Commerci-

eel verkrijgbare systemen voor ontvochtiging zijn centrale koelmachines met koudwaterdistributie, systemen met koudetransport via het koelmiddel, droogwiel met een vast droogmiddel en systemen met vloeibare droogmiddelen.

1.2 Doelstelling

Technische doelstellingen

Het onderzoek heeft als doel om de technieken die bekend zijn uit de utiliteitsbouw op het gebied van ontvochtiging te evalueren op hun toepassingsmogelijkheden in de glastuinbouw, zonedig geschikt te maken voor toepassing en deze aangepaste technieken bekend te maken binnen de glastuinbouw en tot slot fabrikanten te interesseren in het opzetten van demonstraties. De functie “ontvochtiging” wordt daarbij benaderd via ventilatie met warmteterugwinning en via ontvochtiging zonder ventilatie. Op systeemniveau maken we onderscheid in “open” en “gesloten” kassen en “bijna gesloten” kassen. Vanwege het grotere besparingspotentieel is aangepaste ontvochtiging in bestaande kassen het primaire onderwerp van onderzoek. De technieken zullen echter ook in nieuwe kasconcepten van belang zijn.

Energiedoelstellingen

De vooraf bepaalde potentiële energiebesparing is afgeleid van informatie over warmteterugwinning bij ventilatie ten behoeve van ontvochtiging en bedraagt circa 10% (Campen e.a. 2003) of circa 4 m³ aardgas per m² per jaar (circa 1300 GJ/ha). De potentiële energiebesparing door ontvochtiging zonder ventilatie kan groter zijn om twee redenen:

- er gaat minder CO₂ verloren door ventilatie, waardoor minder aardgas hoeft te worden verstoekt voor de productie van CO₂. Dit is van belang op momenten dat er geen warmtevraag is;
- de verdampingswarmte (=latente warmte) kan worden teruggewonnen door condensatie van waterdamp. Hierdoor is minder externe warmtetoevoer voor verwarming nodig.

Er is echter wel een hoeveelheid aandrijfenergie nodig, afhankelijk van de uitvoering. Als voorzichtige schatting wordt daarom uitgegaan van een besparing van 10% op fossiele energie.

1.3 Werkzaamheden en werkwijze

De werkzaamheden zijn in twee fasen uitgevoerd:

- Fase 1. Systematische kwalitatieve beoordeling
In deze fase zijn uiteenlopende systemen voor ontvochtiging beschreven. De resultaten hiervan zijn afzonderlijk gerapporteerd [1]. Een drietal ontvochtigers is geselecteerd voor toetsing in fase 2.

- Fase 2. Toetsing haalbaarheid van een selectie van ontvochtigers.
 - 1 Hiervoor is eerst de prestatie van de geselecteerde systemen bepaald. Hierbij is gebruik gemaakt van het model KasPro van PRI. De modellering is door PRI uitgevoerd volgens specificaties van TNO. De berekeningen zijn uitgevoerd door PRI en verwerkt door TNO.
 - 2 Inpassing
Hiervoor zijn de inpassingseisen bepaald en zijn enige inpassingsmogelijkheden geschetst.
 - 3 Economische haalbaarheid
De economische haalbaarheid is bepaald op basis van een schatting van de kosten van de ontvochtigers, de eventuele besparing op energiekosten e.d.

De hoofdstukken twee en drie komen voor een groot deel overeen met delen van de rapportage van fase 1.

2. Randvoorwaarden en criteria voor beoordelen technieken voor ontvochtigen

(Naar de rapportage over fase 1 [6])

2.1 Uitgangspunten

Ontvochtigen kan niet los worden gezien van andere klimaatfuncties. De hier behandelde uitgangspunten voor ontvochtiging hebben daarom betrekking op systemen die naast ontvochtiging ook zorgdragen voor koeling, verwarming, ventilatie en CO₂ dosering.

Voor het vaststellen van de uitgangspunten en randvoorwaarden voor ontvochtiging is eerst de huidige situatie te worden geanalyseerd (zie overzicht in rapport eerste fase [1]). Hieruit blijkt onder andere dat:

- de financiële marges voor innoverende systemen klein zijn (kleine inverdieneffecten tegenover snel oplopende meerinvesteringen);
- de prestatie-eisen aan systemen voor een (bijna) gesloten kas hoog zijn (o.a. een circulatievoud van 6 à 12 bij afkoeling van de lucht tot minimaal circa 12°C);
- de vochtregeling in een (bijna) gesloten kas in de winter beter kan zijn dan in een traditionele kas;
- in een (bijna) gesloten kas in de zomer de kastemperatuur lager en de CO₂-concentratie hoger zijn dan bij een traditionele kas.

Dit leidde tot de vraag of een (bijna)gesloten kas het enige uitgangspunt dient te zijn. Voor de vruchtgroenten (tomaat, komkommer, paprika e.d.) is productieverhoging in de zomer wellicht niet de eerste prioriteit wegens de relatief lage productprijs in dat seizoen, zodat een verbetering van het kasklimaat die vooral in de zomer wordt bereikt nauwelijks loont. Alleen voor gewassen die zeer gevoelig zijn voor te hoge temperaturen, sterk reageren op de CO₂ concentratie en 's zomers een goede prijs opleveren kan een (bijna)gesloten kas met bijbehorende klimaatinstallatie momenteel economisch zinvol zijn.

Een gesloten kas biedt naast klimaatvoordelen ook voordelen zoals het weren van ongewenste insecten en organismen en het binnenhouden van bestrijdingsmiddelen en insecten die de teelt beschermen. Afhankelijk van de teelt kunnen deze effecten in de economische afweging een rol spelen.

Voor de vruchtgroenten lijkt een andere benadering gewenst die zich vooral richt op (de randen van) het stookseizoen. In het stookseizoen kan een goede ontvochtiging de warmteverliezen beperken die nu ontstaan door condensatie op het kasdek en ventileren. Tevens kan de luchtvochtigheid in het gehele seizoen beter worden

beheerst. De CO₂ verliezen in de winter zijn van minder belang omdat de CO₂ productie met WKK en/of ketel voldoende groot is voor compensatie.

Aan de randen van het stookseizoen is beperking van het warmteverlies van minder belang. Hier kan beperking van het CO₂ verlies interessant zijn omdat de CO₂ productie, als bijproduct van de verwarming, op dat moment beperkt is en de concentratie in de kas onder de gewenste waarde kan dalen.

Ontvochtiging wint aan belang als een beter isolerend (dubbel) kasdek wordt toegepast. De huidige praktijk van condensatie op het koude kasdek wordt dan onmogelijk (het goed geïsoleerde kasdek is daarvoor te warm) zodat ventilatie overblijft – waarmee de energiebesparing door het dubbele kasdek deels teniet wordt gedaan.

Een dubbel kasdek vereist dus een goed functionerende ontvochtiging. Zo bezien is de ontvochtiging als zelfstandig functie naast de bestaande verwarmingsinstallatie een zinvolle optie.

Dit leidt tot twee verschillende uitgangspunten voor het type kas en de bijbehorende de klimaatinstallatie:

- De (bijna) gesloten kas.
Hierbij is de kas gedurende het gehele seizoen gesloten en worden de kascondities volledig door de klimaatinstallatie beheerst, inclusief koeling in de zomer.
- De in het stookseizoen gesloten kas.
Hierbij is de kas gedurende het (gehele) stookseizoen gesloten, waardoor geen verlies van warmte en CO₂ door ventilatie optreedt.

Beide uitgangspunten bieden mogelijkheden voor betere productie en energiebesparing.

Een derde mogelijk uitgangspunt is de kas met beperkte warmteverliezen door ventilatie. Hierop richt zich bijvoorbeeld de studie “Vocht afvoeren uit tuinbouwkassen met warmteterugwinning” [1]. Hierbij wordt de kas in de winter geventileerd ten behoeve van ontvochtiging, maar wordt het ventilatieverlies beperkt door warmteterugwinning uit de afvoerlucht. Gezien de optredende CO₂ verliezen is dit een minder aantrekkelijk uitgangspunt.

2.2 Randvoorwaarden en criteria

Uit voorgaande studies [1], [2] blijkt dat voor de teelt van tomaat een maximale ontvochtiging van 300 gr/h per m² kasoppervlak vereist is. De gewenste klimaatcondities in de kas zijn:

Gewenste kastemperatuur	min. 18°C (winter)
RV	max. 85%
CO ₂	800 ppm

In de KEMA-studie [3] is uitgegaan van de volgende systeemspeccs.

Tabel 1 *Ontwerpgegevens KEMA-studie.*

Aspect	Ontwerpeis
piekvraag koude (voelbaar en latent)	585 W/m ²
Verhouding sensibele / latente koelbehoefte	0.75
piekvraag verwarming	200 W/m ²
ontwerp koelbedrijf (luchtkoeling)	van 25°C, 85% RV naar 12°C, 100% RV van 17.1 g/kg naar 8.8 g/kg vocht
ontwerp verwarmingsbedrijf (luchtverwarming)	van 18°C naar 40°C
ontwerp luchthoeveelheid tbv koelen piekvraag	50 m ³ /h/m ² – circulatievoud van 12.5
ontwerp luchthoeveelheid tbv koelen op 300 W/m ²	26 m ³ /h/m ² – circulatievoud van 6.4
ontwerp luchthoeveelheid verwarmen	26 m ³ /h/m ²

Omdat ontvochtiging bij uiteenlopende temperaturen kan gebeuren, afhankelijk van de gekozen methode, kunnen de vereiste circulatiehoeveelheden sterk uiteenlopen. In onderstaande tabel zijn voor uiteenlopende kascondities en condensatietemperaturen de volgende aspecten uitgewerkt: ontvochtiging, enthalpie (verlaging), circulatie, circulatievoud en condensatiewarmte.

Tabel 2 *Circulatiehoeveelheid en verdampingswarmte als functie van kascondities en condensatietemperatuur bij een gewenste ontvochtiging van 300 gr/h/m² kasoppervlak.*

Ontvochtiging			Condensatietemperatuur (RV=100%)				
Kasconditie			3	6	12	15	20
T	RV	x [gr/kg]					
25	85	17,1	12,4	11,1	8,3	6,6	2,6
20	85	12,5	7,8	6,5	3,7	2	-2
18	85	11	6,3	5	2,2	0,5	-3,5
Enthalpieverlaging			Condensatietemperatuur (RV=100%)				
Kasconditie			3	6	12	15	20
T	RV	h [kJ/kg]					
25	85	63	48	43	28	21	6
20	85	53	38	33	18	11	-4
18	85	46	31	26	11	4	-11
Circulatie [m³/h/m²]			Condensatietemperatuur (RV=100%)				
Kasconditie			3	6	12	15	20
T	RV						
25	85		20,2	22,5	30,1	37,9	96,2
20	85		32,1	38,5	67,6	125,0	-125,0
18	85		39,7	50,0	113,6	500,0	-71,4
Circulatievoud [-]			Condensatietemperatuur (RV=100%)				
Kasconditie			3	6	12	15	20
T	RV						
25	85		5,0	5,6	7,5	9,5	24,0
20	85		8,0	9,6	16,9	31,3	-31,3
18	85		9,9	12,5	28,4	125,0	-17,9
(kashoogte is 4 m)							
Verdampingswarmte [W/m²]			Condensatietemperatuur (RV=100%)				
Kasconditie			3	6	12	15	20
T	RV						
25	85		323	323	281	265	192
20	85		406	423	405	458	167
18	85		410	433	417	667	262

De circulatiehoeveelheid bij een kastemperatuur van 25°C en een condensatietemperatuur 12 °C, komt redelijk overeen met die van de KEMA studie bij een koelvermogen van 300 W/m². De hoogste waarden uit de KEMA studie liggen op de dubbele waarden omdat dan naast ontvochtiging tevens koeling in een geheel gesloten kas wordt verzorgd.

Zoals uit de tabel blijkt heeft verlaging van de condensatietemperatuur van 12 naar 6 °C een reductie van het circulatievoud met 25-35% tot gevolg. Hiermee kan een aanzienlijke besparing op de ventilatorenergie bereikt worden.

Opvallend is de invloed van de kasttemperatuur op de vereiste circulatie: een verhoging van 18 naar 20°C heeft een reductie met 20% van het circulatievoud tot gevolg. Een hogere kasttemperatuur in de winter maakt dus kleinere installaties en een lager energiegebruik voor ventilatie mogelijk bij gelijke condensatietemperatuur.

De algemene eisen waaraan alle systemen dienen te voldoen zijn:

- Geen beperking van lichtdoorlatendheid.
Praktisch gezien komt dit neer op plaatsing van aanvullende apparatuur onder of naast de teelt.
- Vochtregeling instelbaar tussen 70 en 90%.
- Temperatuurregeling voor verwarming instelbaar tussen 18 en 25°C.
- Temperatuurregeling voor koeling (indien toegepast) van 15°C (sommige potplanten) tot 30°C.
- Geen grote verschillen tussen vochtigheid of temperatuur op verschillende plaatsen in de kas.
- Geen beperkingen in bedrijfsvoering.
Dit is afhankelijk van de teelt.
- Geen risico op ziekte voor personeel en gewas door ontstaan of verspreiden van micro-organismen.

3. Systemen voor ontvochtiging

Hieronder wordt een aantal kas-klimatiseringssystemen besproken, waarbij de ontvochtiging voorop staat. Omdat in dit hoofdstuk de kwalitatieve benadering voorop staat is een aantal kwantitatieve aspecten vooralsnog onuitgewerkt gebleven. Voor geselecteerde systemen worden deze aspecten verder uitgewerkt in volgende hoofdstukken.

3.1 Verbeterde ontvochtiging via ventilatie met warmteterugwinning

3.1.1 Gebalanceerd ventileren met warmteterugwinning en vorstbeveiliging

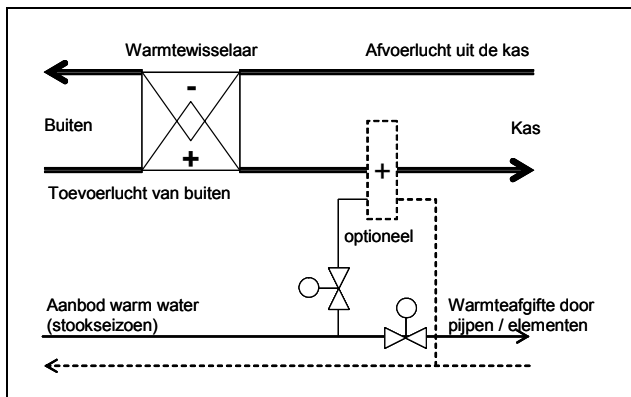
Een structureel kenmerk van ventilatie is het verlies van CO₂. Ventileren, al dan niet met warmteterugwinning, staat haaks op het principe van de gesloten kas.

Gebalanceerd ventileren met warmteterugwinning kan vooral goed worden toegepast in de in het stookseizoen gesloten kas. Voorwaarde is een goede beheersing van de condensatie/bevriezingsproblemen, waardoor het rendement van de warmteterugwinning bij lage buitentemperaturen zal afnemen.

De vereiste ventilatiehoeveelheid is afhankelijk van de buitentemperatuur en -RV en de mate waarin verdringing dan wel menging met de lucht in de kas plaatsvindt.

De eenvoudigste wijze van inpassen is geschetst in Figuur 1. De installatiefuncties zijn:

- de verwarming wordt op traditionele wijze verzorgd; aanvullend kan naverwarming van de ventilatielucht worden toegepast;
- de ventilatie wordt uitsluitend bedreven ten behoeve van de vochtbeheersing;
- het CO₂ verlies wordt aangevuld door de verbrandingsgassen van de ketels;
- in de zomer wordt op traditionele wijze geventileerd ten behoeve van de vocht- en temperatuurbeheersing.



Figuur 1 Zelfstandige gebalanceerde ventilatie met warmteterugwinning.

Dit systeem dient centraal te worden uitgevoerd aan de kop van de kas. De afvoer van lucht kan wellicht gebeuren zonder afvoersysteem; de toevoer van lucht vereist naar verwachting een distributiesysteem.

Energiegebruik:

- Het warmteverlies door ventilatie wordt met 70% of meer verlaagd.
- Voor zowel toe- als afvoer is ventilatie-energie vereist, afhankelijk van de luchthoeveelheden, de weerstand in de warmtewisselaar en het distributiesysteem.

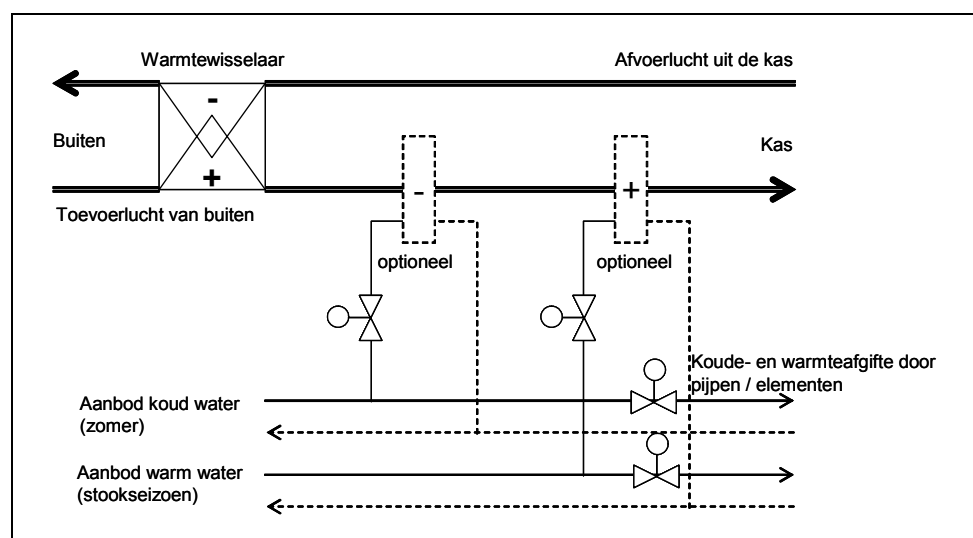
Kosten/baten:

- Investeringskosten van de warmtewisselaar en het distributiesysteem
- Besparing op stookkosten
- Verhoging van elektriciteitskosten voor ventilatoren
- Hogere onderhoudskosten systeem.

De hier voorgestelde vorstbeveiliging is een belangrijke toevoeging ten opzichte van de studie “Vocht afvoeren uit tuinbouwkassen met warmteterugwinning” [1]. Bovendien is de terugverdientijd in die studie gebaseerd op de prijsstelling van hoogrendement tegenstroom warmtewisselaars voor de woningbouw van circa 250 m³/uur, terwijl ze voor de utiliteit beschikbaar zijn tot 8000 m³/uur. Dit geeft een veel gunstiger relatieve investering in de warmtewisselaar maar mogelijk hogere investeringen in luchtdistributie. In overleg met de subsidiegever is dit systeem niet verder uitgewerkt in fase 2.

3.1.2 Gebalanceerd ventileren met warmteterugwinning en koeling

Het is in principe mogelijk om het systeem uit de vorige paragraaf uit te breiden met koeling, zoals geschetst in Figuur 2. Hiermee ontstaat een systeem voor *centrale luchtbehandeling* met verwarming en koeling/aanvullende ontvochtiging. De vereiste luchthoeveelheden zullen minimaal gelijk zijn aan die voor het KEMA systeem [3] (samengevat in de rapportage van fase 1 [1]). Het distributiesysteem voor warm en koud water kan worden samengevoegd omdat koelen en verwarmen niet gelijktijdig zal voorkomen (2-pipe change over).



Figuur 2 Gebalanceerde ventilatie met warmterugwinning als onderdeel van centrale luchtbehandeling.

Dit systeem dient centraal te worden uitgevoerd, maar de meerwaarde lijkt gering, omdat in de zomer wel de temperatuur en de vochtigheid beheerst worden maar niet de CO₂ concentratie (tenzij men zomers wenst te stoken...).

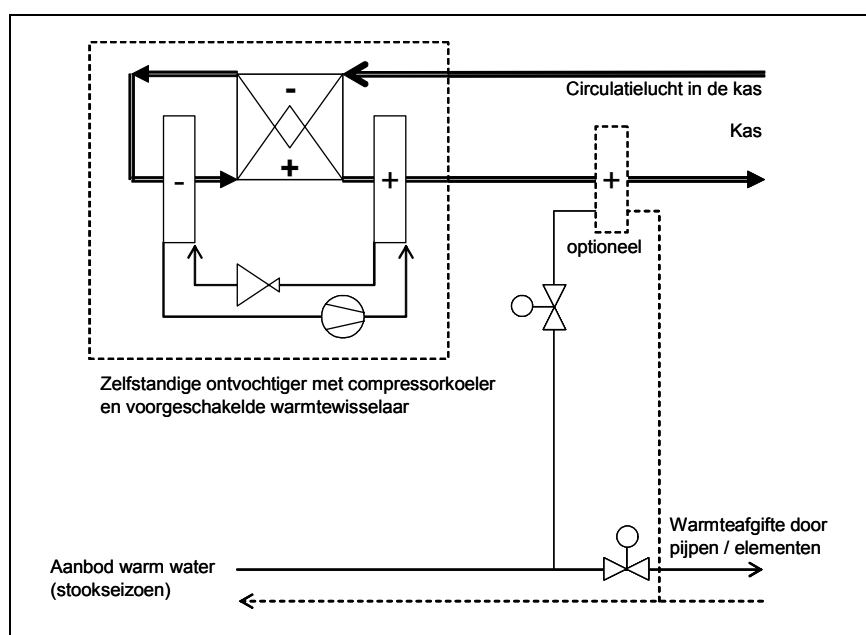
In overleg met de subsidiegever is dit systeem niet verder uitgewerkt in fase 2.

3.2 Verbeterde ontvochtiging zonder ventilatie

3.2.1 Uitkoelen van vocht met zelfstandige warmtepomp

De zelfstandige ontvochtiger met warmtepomp (compressorkoeler) kan goed worden toegepast in de in het stookseizoen gesloten kas. De koeling en verwarming van de luchtstroom gebeurt direct door het koudemiddel van de warmtepomp en niet via water als tussenmedium. De installatiefuncties zijn:

- de verwarming wordt op traditionele wijze verzorgd; aanvullend kan naverwarming van de ventilatielucht worden toegepast;
- de ontvochtiging wordt verzorgd door de warmtepomp; de meeste gangbare modellen gebruiken veel elektriciteit die uiteindelijk vrijkomt als warmte, maar met een voorgeschakelde warmtewisselaar wordt het elektrische verbruik met 50% verminderd;
- de CO₂ behoefte wordt gedekt door de verbrandingsgassen van de ketels of WKK;
- in de zomer wordt op traditionele wijze geventileerd voor de vocht- en temperatuurbeheersing.



Figuur 3 Uitkoelen van vocht met warmtepomp en voorgeschakelde warmtewisselaar.

Dit systeem wordt decentraal uitgevoerd. De toe- en afvoer van lucht vereist naar verwachting geen distributiesysteem. Een centrale uitvoering is mogelijk maar ligt minder voor de hand.

Energiegebruik:

- Het warmteverlies door ventilatie vervalt.
- Voor zowel de circulatie als aandrijving van de koeler is energie vereist, afhankelijk van de luchthoeveelheden en de weerstand in het systeem. Alle verbruikte elektriciteit en de condensatiewarmte van het verwijderde vocht komen uiteindelijk als warmte vrij in de kas.

Kosten/baten:

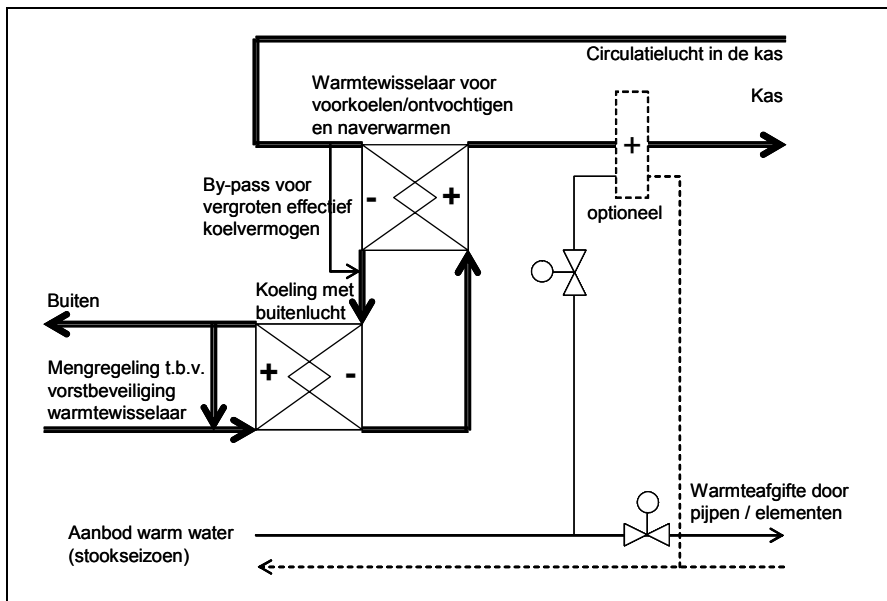
- Investeringskosten van de ontvochtiger plus eventuele decentrale elektriciteitsvoorziening.
- Besparing op stookkosten.
- Verhoging van elektriciteitskosten voor ontvochtiger.
- Hogere onderhoudskosten systeem.

Dit systeem is geselecteerd voor verdere uitwerking in fase 2, in overleg met de subsidiegever.

3.2.2 Uitkoelen van vocht met warmtewisselaar met buitenlucht

De warmtewisselaar met buitenlucht kan goed worden toegepast in de in het stookseizoen gesloten kas. Tot een buitentemperatuur van 10 à 15°C zal het systeem een goede ontvochtiging bieden. De installatiefuncties zijn:

- de verwarming wordt op traditionele wijze verzorgd; aanvullend kan naverwarming van de ventilatielucht worden toegepast;
- de ontvochtiging wordt verzorgd door koeling met de buitenlucht in een warmtewisselaar met hoog rendement; als vorstbeveiliging wordt een mengregeling aan de buitenluchtzijde toegepast waarmee de buitenlucht wordt voorgemengd tot een temperatuur boven 0°C.
- om teveel koeling te voorkomen wordt de circulatielucht in de kas voorgekoeld en ontvochtigd via een warmtewisselaar met de reeds ontvochtigd lucht die zodoende weer wordt opgewarmd; via een by-pass van deze warmtewisselaar kan de effectieve koeling worden vergroot;
- de CO₂ behoefte wordt gedekt door de verbrandingsgassen van de ketels of WKK.
- in de zomer wordt op traditionele wijze geventileerd ten behoeve van de vocht- en temperatuurbeheersing.



Figuur 4 Uitkoelen van vocht met warmtewisselaar met buitenlucht.

Dit systeem dient centraal te worden uitgevoerd aan de kop van de kas. De afvoer van lucht kan wellicht gebeuren zonder afvoersysteem; de toevoer van lucht vereist naar verwachting een distributiesysteem.

Energiegebruik:

- Het warmteverlies door ventilatie vervalt.
- Voor zowel de circulatie van de kaslucht als de buitenlucht is energie vereist, afhankelijk van de luchthoeveelheden, de weerstand in de warmtewisselaar en het distributiesysteem. De verbruikte elektriciteit van de circulatielucht komt uiteindelijk als warmte vrij in de kas.

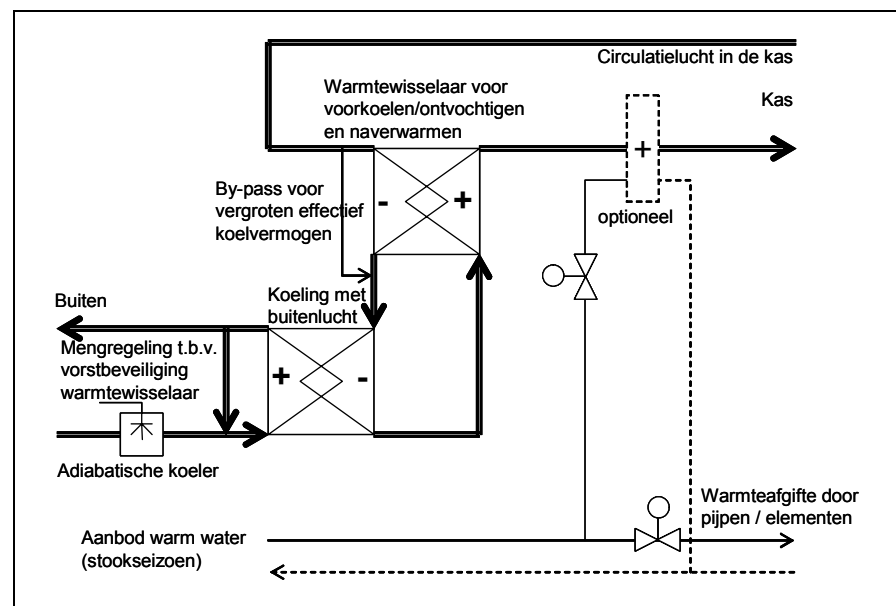
Kosten/baten:

- Investeringskosten van de warmtewisselaars en het distributiesysteem
- Besparing op stookkosten.
- Verhoging van elektriciteitskosten voor ventilatoren.
- Hogere onderhoudskosten systeem.

Dit systeem is geselecteerd voor verdere uitwerking in fase 2, in overleg met de subsidiegever.

3.2.3 Uitkoelen van vocht met warmtewisselaar met buitenlucht en adiabatische koeler

Door uitbreiding van het voorgaande systeem met een adiabatische koeler kan de ontvochtiging en koeling over een aanzienlijk deel van het jaar worden toegepast waarmee het systeem in principe tot een (*bijna*) *gesloten kas* leidt. De mogelijkheden en beperkingen van dit systeem worden vooral bepaald door de eisen die aan het zomerbedrijf gesteld worden. Bij een maximumtemperatuur in de zomer van 25°C (en 85% RV) is een zeer groot circulatievoud in de kas vereist omdat de buitentemperatuur maximaal met 8 à 10°C kan worden verlaagd. Als in de zomer in de kas hogere temperaturen acceptabel zijn (gelijk aan buitentemperatuur) wordt de koel- en ontvochtigingscapaciteit van dit systeem veel groter en het vereiste circulatievoud veel kleiner. Ten opzichte van het voorgaande systeem (paragraaf 3.2.2) is de installatiefunctie toegevoegd dat de buitenlucht kan worden voorgekoeld door adiabatische koeling. Dit gebeurt vooral bij buitentemperaturen boven 10°C; Het aanzienlijke watergebruik van de koeler kan deels worden gedekt door het door ontvochtiging verkregen water.



Figuur 5 Uitkoelen van vocht met warmtewisselaar met buitenlucht en adiabatische koeler.

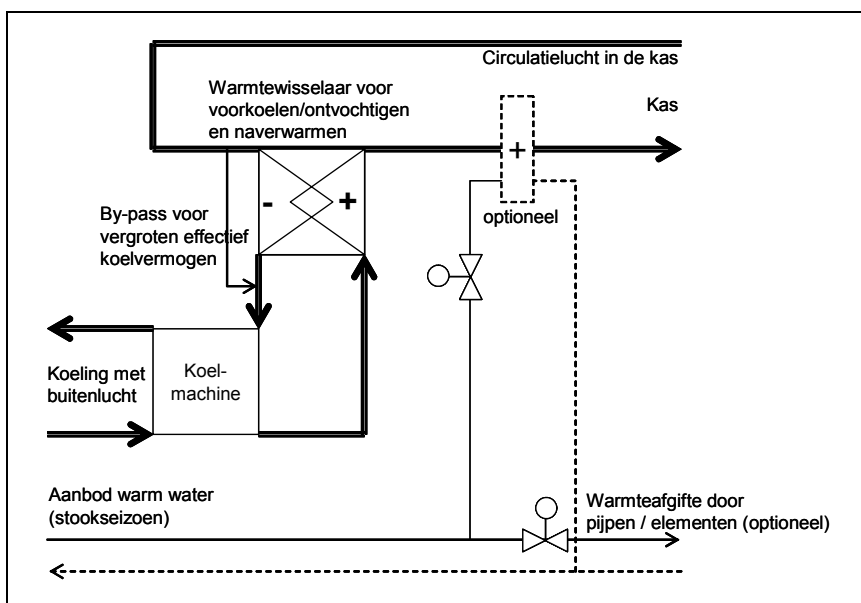
Extra kosten/baten door toevoeging van adiabatische koeler:

- Kosten waterverbruik adiabatische koeler.

Dit systeem is geselecteerd voor verdere uitwerking in fase 2, in overleg met de subsidiegever.

3.2.4 Uitkoelen van vocht met koelmachine (en warmtewisselaar met buitenlucht)

Door in het voorgaande systeem een koelmachine te plaatsen kan de ontvochtiging en koeling bij lagere temperaturen gebeuren, waardoor met een geringer circulatievoud in de kas kan worden volstaan. Hierdoor worden de mogelijkheden van een (bijna) gesloten kas vergroot; vooral als ook 's zomers lagere maximumtemperaturen (25°C) vereist zijn. Als de buitentemperaturen laag zijn kan de bedrijfswijze van koelmachine worden beperkt tot die van een warmtewisselaar. Specifiek aan dit systeem is dat de ontvochtiging wordt verzorgd door een koelmachine met buitenlucht als bron koeling; 's winters fungeert de koelmachine als een warmtewisselaar met hoog rendement met vorstbeveiliging;



Figuur 6 Uitkoelen van vocht met koelmachine.

Eventueel kan de traditionele verwarming geheel worden vervangen door volledige luchtverwarming, zowel indirect (geschetst) als met direct gestookte luchtverhitters.

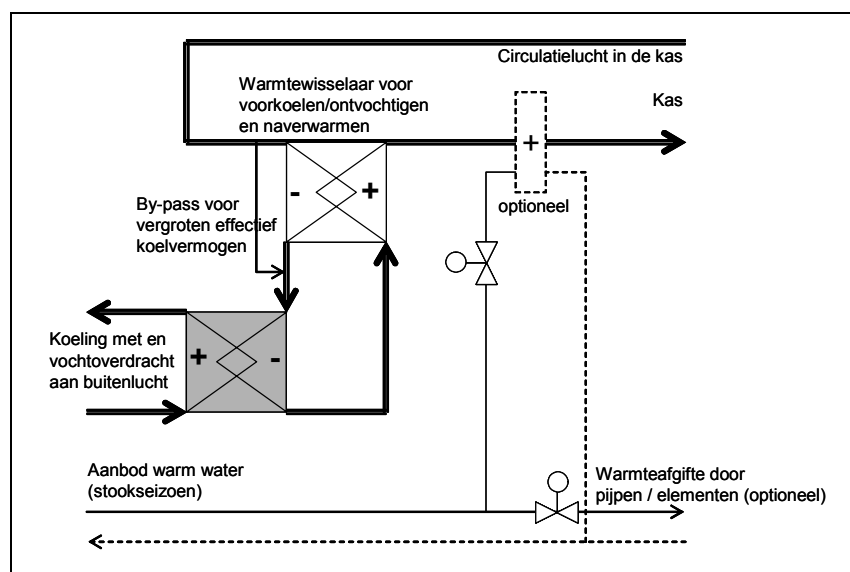
De koeler zorgt voor een extra energiegebruik.

Kosten/baten:

- Investeringskosten van de koelmachine, warmtewisselaar en het distributiesysteem.
- Besparing op stookkosten in de winter.
- Verhoging van elektriciteitskosten voor ventilatoren en koelmachine.
- Hogere onderhoudskosten systeem.

3.2.5 Uitwisselen van vocht en warmte met buitenlucht via sorptiewiel

In plaats van een warmtewisselaar met de buitenlucht kan ook een droogwiel worden toegepast in het hiervoor beschreven systeem. Dit geeft een betere ontvochtiging, vooral bij buitentemperaturen hoger dan 10°C, omdat onder die omstandigheden gebruik gemaakt wordt van de lagere RV van de buitenlucht ten opzichte van de kaslucht.



Figuur 7 Uitwisselen van vocht en warmte via sorptiewiel.

Eventueel kan de traditionele verwarming geheel worden vervangen door volledige luchtverwarming, zowel indirect (geschetst) als met direct gestookte luchtverhitters.

Dit systeem dient centraal te worden uitgevoerd aan de kop van de kas. De afvoer van lucht kan wellicht gebeuren zonder afvoersysteem; de toevoer van lucht vereist naar verwachting een distributiesysteem.

Energiegebruik:

- Het warmteverlies door ventilatie vervalt grotendeels, wel wordt in het sorptiewiel naast latente warmte (vocht) ook voelbare warmte overgedragen op de buitenlucht.
- Voor zowel de circulatie van de kaslucht als de buitenlucht is energie vereist, afhankelijk van de luchthoeveelheden, de weerstand in de warmtewisselaar en het distributiesysteem. De verbruikte elektriciteit van de circulatielucht komt uiteindelijk als warmte vrij in de kas.
- Aandrijfenergie sorptiewiel.

Kosten/baten:

- Investeringskosten van de sorptiewiel, warmtewisselaar en het distributiesysteem.
- Besparing op stookkosten in de winter.
- Verhoging van elektriciteitskosten voor ventilatoren en aandrijfenergie sorptiewiel.
- Hogere onderhoudskosten systeem.

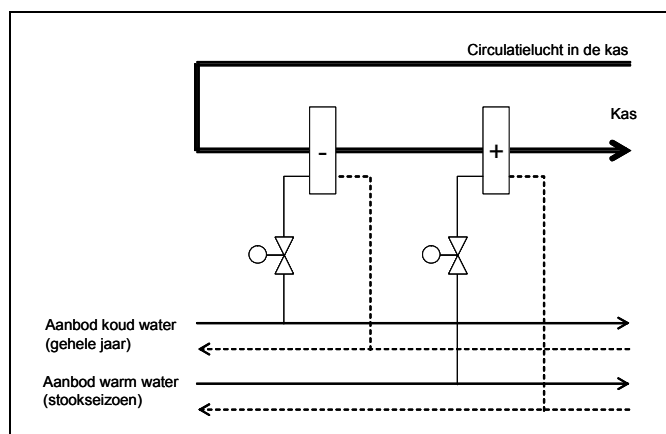
In overleg met de subsidiegever is dit systeem niet verder uitgewerkt in fase 2.

3.2.6 Uitkoelen van vocht - volledige luchtbehandeling

Het systeem met volledige luchtbehandeling (koelen, verwarmen, ontvochtigen) is uitgebreid behandeld in de KEMA-studie [3]. Het vereist gescheiden circuits met koud naar de luchtkoeler / -ontvochtiger en warm water naar de luchtverhitter. De Luchtverhitter kan ook direct gestookt worden, maar dat wordt weinig toegepast.

De installatiefuncties zijn:

- indirecte verwarming van de circulatielucht, gevoed met een warm-watercircuit of direct gestookte luchtverhitters;
- ontvochtiging en indirecte koeling, gevoed met een koud-watercircuit dat door de bodem op een lage temperatuur wordt gehouden (aquifer of bodemwarmtewisselaars); optioneel kan een centrale of lokale koelmachine worden toegepast waardoor de lucht verder kan worden uitgekoeld en de luchtcirculatie omlaag kan;
- de koude en warmteopwekking voor de gescheiden koud- en warmwater circuits kan met een koelmachine / warmtepomp gebeuren die bodemwarmte/koude benut;
- de CO₂ behoefte wordt gedekt door de verbrandingsgassen van de (bijstook)ketels en een eventuele gasmotor voor de aandrijving van de warmtepomp.



Figuur 8 Volledige luchtbehandeling (koelen, verwarmen, ontvochtigen).

Uit de KEMA studie bleek dat zonder voorcooling/naverwarming van de circulatieleucht via een warmtewisselaar naverwarming vereist is.

Tevens bleek dat de investeringskosten van dit systeem erg hoog zijn. Wellicht kunnen energiepalen in plaats van een aquifer de investeringskosten drukken.

Dit systeem kan zowel centraal als decentraal worden uitgevoerd.

Voor een centraal systeem (zie KEMA studie) is aan de kop van de kas een luchtbehandelingskast vereist. De afvoer van lucht kan wellicht gebeuren zonder afvoersysteem; de toevoer van lucht vereist naar verwachting een distributiesysteem.

Voor een decentraal systeem dienen in de kas kleine luchtbehandelingsunits te worden opgesteld die zijn aangesloten op de koud- en warmwaternetten.

Energiegebruik:

- Het warmteverlies door ventilatie vervalt.
- Voor de circulatie van de kaslucht is energie vereist, afhankelijk van de lucht-hoeveelheden, de weerstand in de warmtewisselaars en het distributiesysteem. De verbruikte elektriciteit komt uiteindelijk als warmte vrij in de kas.
- Energiegebruik voor koelen en distribueren water.

Kosten/baten:

- Investeringskosten van de koelmachine plus koudebron, koudwaterdistributienet, warmtewisselaar en het luchtdistributiesysteem.
- Besparing op stookkosten in de winter.
- Verhoging van elektriciteitskosten (evt. brandstofkosten) voor ventilatoren en koelmachine.
- Hogere onderhoudskosten systeem.

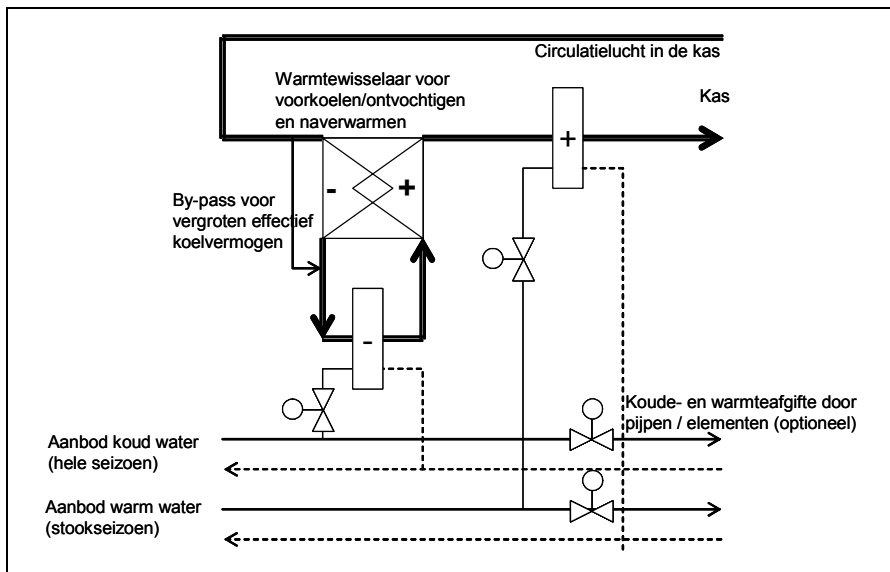
In overleg met de subsidiegever is dit systeem niet verder uitgewerkt in fase 2.

3.2.7 Uitkoelen van vocht - volledige luchtbehandeling met voorcooling/naverwarming

Door uitbreiding van het voorgaande systeem met voorcooling en naverwarming van de circulatieleucht over de koeler wordt naverwarming voorkomen en koelenergie bespaard. Dit principe is beschreven in paragraaf 3.2.1 en Figuur 3.

Voor het overige kan het systeem onveranderd blijven.

Eventueel wordt het systeem aangevuld met warmte- en koudeafgifte via pijpen of elementen, waardoor het circulatievoud en de luchtbehandelingskasten kleiner (en goedkoper) worden.



Figuur 9 Volledige luchtbehandeling (koelen, verwarmen, ontvochtigen) met aanvullingen.

De uitvoeringsmogelijkheden zijn gelijk aan die van het vorige systeem.

Energiegebruik - In vergelijking met het vorige systeem:

- lager energieverbruik voor opwekking (en distributie) van koude.

Kosten/baten - In vergelijking met het vorige systeem:

- Investeringskosten warmtewisselaar circulatielucht.
- Aanzienlijk lagere elektriciteitskosten (eventueel brandstofkosten) voor koelmachine.
- Hogere onderhoudskosten systeem.

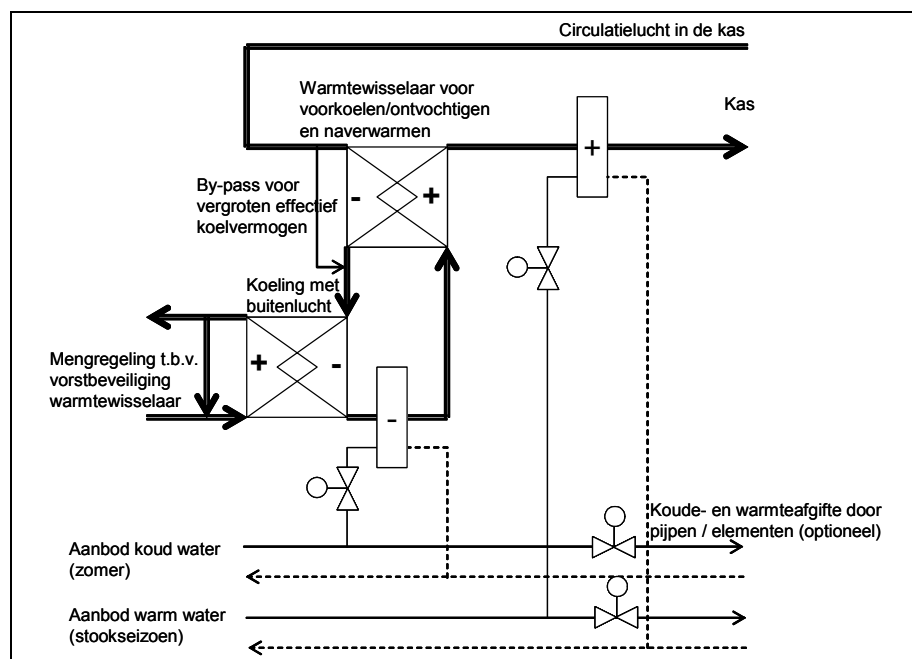
In overleg met de subsidiegever is dit systeem niet verder uitgewerkt in fase 2.

3.2.8 Uitkoelen van vocht met warmtewisselaar met buitenlucht & volledige luchtbehandeling met voorcoeling/naverwarming

Het voorgaande systeem kan worden voorzien van een warmtewisselaar met buitenlucht als koeler bij lage buitentemperaturen. De voordelen hiervan zijn:

- besparen koelenergie (bij toepassing koelmachine);
- vervallen noodzaak koudenet in de winter, waardoor een 2-pipe change-over systeem mogelijk wordt.

Eventueel wordt het systeem aangevuld met warmte- en koudeafgifte via pijpen of elementen, waardoor het circulatievoud en de luchtbehandelingskosten kleiner (en goedkoper) worden.



Figuur 10 Uitkoelen van vocht met buitenlucht en aanvullende koeler, als onderdeel van centrale luchtbehandeling.

Dit systeem kan alleen centraal worden uitgevoerd. Voor het overige zijn de uitvoeringsmogelijkheden gelijk aan die van het vorige systeem.

Energiegebruik - In vergelijking met het vorige systeem:

- lager energieverbruik voor opwekking (en distributie) van koude.

Kosten/baten - In vergelijking met het vorige systeem:

- Investeringskosten warmtewisselaar circulatielucht/buitenlucht.
- Aanzienlijk lagere elektriciteitskosten (evt. brandstofkosten) voor koelmachine.
- Hogere onderhoudskosten systeem.

4. Kwalitatieve beoordeling bestaande technieken voor ontvochtigen uit de utiliteitsbouw

4.1 Beoordeling

Hieronder wordt de toetsing van de systemen aan de algemene eisen weergegeven. Vervolgens wordt een kwalitatieve beoordeling gegeven van ambitieniveau, energiegebruik en kostenniveau.

Aspect	Beoordeling per systeem
Geen beperking van lichtdoorlatendheid.	Afhankelijk van systeemuitvoering. Praktisch gezien komt dit erop neer dat aanvullende apparatuur onder of naast de teelt dient te worden opgesteld.
Vochtregeling instelbaar tussen 70 en 90%.	Met alle systemen in principe mogelijk.
Temperatuurregeling voor verwarming instelbaar tussen 18 en 25°C.	Met alle systemen in principe mogelijk.
Temperatuurregeling voor koeling (indien toegepast) van 15°C (sommige potplanten) tot 30°C.	Alleen mogelijk met systemen die voorzien zijn van koeling. (3.2.6, 3.2.7, 3.2.8)
Geen grote verschillen tussen vochtigheid of temperatuur op verschillende plaatsen in de kas.	Afhankelijk van systeemuitvoering.
Geen beperkingen in bedrijfsvoering. Dit is afhankelijk van de teelt.	Afhankelijk van systeemuitvoering en teelt.
Geen risico op ziekte voor personeel en gewas door ontstaan of verspreiden van micro-organismen.	Afhankelijk van systeemuitvoering.

Zie §	Techniek ontvochtigen en overige functies	Centraal / decentraal	Ambitieniveau	Energie	Kosten	Score
3.1.1	Gebalanceerde ventilatie met WTW Traditionele verwarming	C	3. Kas met verminderde ventilatieverliezen.	+	-	-
3.1.2	Gebalanceerde ventilatie met WTW Traditionele verwarming - aanvullend koeling	C	3. Kas met verminderde ventilatieverliezen. Koeling in de zomer	- ¹	--	-
3.2.1	Uitkoelen van vocht met warmtepomp en voorgeschakelde warmtewisselaar Traditionele verwarming	D (C)	2. In de winter gesloten kas.	++	-	+
0	Uitkoelen van vocht met WTW met buitenlucht. Traditionele verwarming	C	2. In de winter gesloten kas. Ontvochtiging tot een buitentemperatuur van 10 - 12°C.	+	-	+
3.2.3	Uitkoelen van vocht met WTW met buitenlucht en adiabatische koeler Traditionele verwarming	C	1. Bijna (?) gesloten kas. Ontvochtiging tot een buitentemperatuur van 20 - 25°C – of hoger als 's zomers kastemperaturen boven 25°C toelaatbaar zijn.	++	-	+
3.2.4	Uitkoelen van vocht met lucht/lucht koelmachine / WTW met buitenlucht Traditionele verwarming	C	1. Gesloten kas. Meer koeling dus lagere kastemperaturen in de zomer en/of lagere circulatievoud in kas	- ¹	--	+
3.2.5	Uitwisselen van vocht en warmte met buitenlucht via sorptiewiel. Traditionele verwarming	C	1. Bijna gesloten kas. Ontvochtiging tot een buitentemperatuur van 20 - 25°C – of hoger als 's zomers kastemperaturen boven 25°C toelaatbaar zijn.	0	-	-
3.2.6	Uitkoelen van vocht in watergevoede koeler. Volledige luchtbehandeling	C / D	1. Bijna (?) gesloten kas.	-- ¹	--	0
3.2.7	Uitkoelen vocht in watergevoede koeler met voorkoeling / naverwarming. Volledige luchtbehandeling	C / D	1. Bijna (?) gesloten kas. Energetisch geoptimaliseerd.	- ¹	--	+

Zie §	Techniek ontvochtigen en overige functies	Centraal / decentraal	Ambitieniveau	Energie	Kosten	Score
3.2.8	Uitkoelen vocht in watergevoede koeler en buitenlucht/warmtewisselaar met voorkoeling / naverwarming. Volledige luchtbehandeling	C	1. Bijna (?) gesloten kas. Energetisch geoptimaliseerd.	- ¹	--	+

1. De stijging van het energiegebruik ontstaat hier door de toepassing van koeling in de zomer, waardoor een ander (beter) kasklimaat wordt geleverd dan in de huidige situatie. E = Energie, K = Kosten

E	Energiegebruik ++ sterke verbetering + verbetering; energiegebruik omlaag 0 gelijkblijvend - verslechtering; energiegebruik omhoog
K	Kosten + omlaag 0 gelijkblijvend - verslechtering; kosten omhoog -- kosten sterk omhoog
Score	+ verder uitwerken in fase 2.

4.2 Conclusies

Hiervoor is een kwalitatieve beoordeling van de mogelijkheden van verschillende ontvochtigingssystemen gepresenteerd, tegen de achtergrond van reeds uitgevoerd onderzoek. De resultaten hiervan zijn hieronder samengevat.

Het blijkt dat de mogelijkheden voor ontvochting en koeling, dat er nauw mee samenhangt, al uitvoerig zijn onderzocht, maar dat daarbij niet uitputtend gebruik is gemaakt van bestaande kennis en technieken uit de utiliteitsbouw. Het gebruik van een voorgeschakelde warmtewisselaar om te besparen op de inzet van de warmtepomp, is nergens aangetroffen.

Voor al deze ontvochtigers wordt een voorgeschakelde warmtewisselaar toegepast waardoor het vereiste koelvermogen tot de helft wordt gereduceerd. Deze systemen worden voor zover momenteel bekend niet toegepast in kassen.

De conclusies zijn:

- de financiële marges voor innoverende systemen zijn klein (kleine inverdieneffecten tegenover snel oplopende meerinvesteringen);
- de prestatie-eisen aan systemen voor een (bijna) gesloten kas zijn hoog (o.a. een circulatievoud van 6 à 12 bij afkoeling van de lucht tot circa 12°C);

- het kasklimaat in een (bijna) gesloten kas en een traditionele kas zijn vrijwel gelijk, met uitzondering van de kastemperatuur en CO₂ die bij een (bijna) gesloten kas 's zomers lager resp. hoger zijn dan in een traditionele kas.
- Alleen voor gewassen die zeer gevoelig zijn voor te hoge temperaturen en 's zomers een goede prijs opleveren kan een (bijna)gesloten kas met bijbehorende klimaatinstallatie momenteel economisch zinvol zijn.
- Voor de vruchtgroenten lijkt een andere benadering gewenst die zich vooral richt op het beperken van de ventilatieverliezen en eventueel de CO₂ verliezen in het stookseizoen.
- Een gesloten kas biedt naast klimaatvoordelen ook voordelen zoals het weren van ongewenste insecten en organismen en het binnenhouden van bestrijdingsmiddelen en insecten die de teelt beschermen. Afhankelijk van de teelt kunnen deze effecten in de economische afweging een rol spelen.
- Uit de literatuur blijkt dat de maximale nominale ontvochtiging 300 gr/h/m² kasoppervlak bedraagt.
- De hiervoor over de ontvochtiger vereiste circulatiehoeveelheden zijn sterk afhankelijk van de kastemperatuur en de condensatietemperatuur. Verlaging van de condensatietemperatuur van 12°C naar 6 of 3 °C heeft een reductie met 25-35% van het circulatievoud tot gevolg. Hiermee kan een aanzienlijke besparing op de ventilatorenergie bereikt worden. Opvallend is de invloed van de kastemperatuur op de vereiste circulatie: een verhoging van 18 naar 20°C heeft een reductie met 20% van het circulatievoud tot gevolg. Een hogere kastemperatuur in de winter maakt dus kleinere ontvochtigingsinstallaties en een lager energiegebruik voor ventilatie mogelijk bij gelijke condensatietemperatuur.

De aanbevelingen zijn:

- Er zijn drie verschillende uitgangspunten voor het type kas en de bijbehorende klimaatinstallatie:
 1. De (bijna) gesloten kas.

Hierbij is de kas gedurende het gehele seizoen gesloten en worden de kascondities volledig door de klimaatinstallatie beheerst, inclusief koeling in de zomer. Een beter beheersbare temperatuur en ontvochtiging zorgt voor betere condities voor de teelt en daarmee voor productieverhoging.
 2. De in het stookseizoen gesloten kas.

Hierbij is de kas gedurende het (gehele) stookseizoen gesloten, waardoor geen verlies van warmte en CO₂ door ventilatie optreedt. Een beter beheersbare ontvochtiging zorgt voor betere condities voor de teelt.
 3. De kas met beperkte ventilatieverliezen.

Hierbij wordt de kas in de winter geventileerd ten behoeve van ontvochtiging, maar wordt het ventilatieverlies beperkt door warmteterugwinning uit de afvoerlucht. Dit systeem heeft alleen invloed op het energiegebruik terwijl permanent CO₂ verlies optreedt.

Ontvochtiging wint aan belang als een beter isolerend (dubbel) kasdek wordt toegepast. De huidige praktijk van condensatie op het koude kasdek wordt dan onmogelijk (het goed geïsoleerde kasdek is daarvoor te warm) zodat ventilatie overblijft – waarmee de energiebesparing door het dubbele kasdek teniet wordt gedaan.

Een dubbel kasdek vereist dus een goed functionerende ontvochtiging.

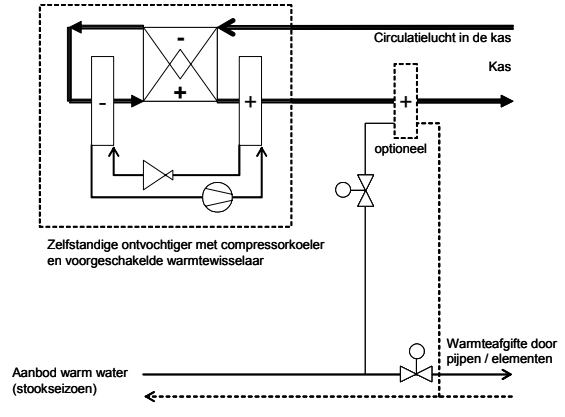
4.3 Overzicht geselecteerde ontvochtigingssystemen

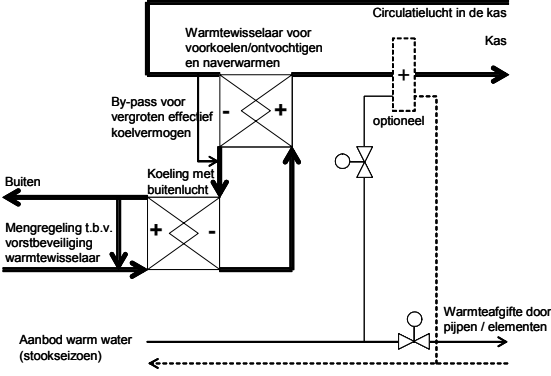
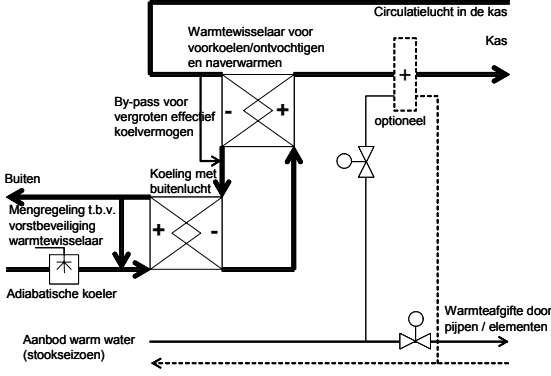
In essentie zijn drie hoofdtypen systemen geselecteerd voor uitwerking in fase 2:

- Decentrale (eventueel centrale) ontvochtigers op basis van compressiekoeling. De warmte uit de warmtepomp komt direct in de kas.
- Centrale ontvochtigers op basis van een warmtewisselaar met buitenlucht, eventueel aangevuld met een adiabatische koeler of een lucht/lucht koelmachine.
- Centrale (eventueel decentrale) volledige luchtbehandeling met water/lucht koelers.

Er wordt geen onderzoek gedaan naar volledige luchtbehandeling met water/lucht koelers omdat deze al uitgebreid behandeld zijn in de KEMA-studie [3].

Deze systemen zijn hieronder schetsmatig weergegeven.

Nr	Systeem	Motivatie
1	 <p><i>Figuur 11 Uitkoelen van vocht met warmtepomp en voor-geschakelde warmtewisselaar</i></p>	<p>Nieuw concept met beschikbare componenten, betaalbaar, goed toe te voegen aan bestaande kas.</p>

Nr	Systeem	Motivatie
2	 <p data-bbox="228 860 826 925"><i>Figuur 12</i> <i>Uitkoelen van vocht met warmtewisselaar met buitenlucht.</i></p>	<p data-bbox="855 421 1129 595">Nieuw concept voor (bijna), gesloten kas, met lagere investering door geen aquifer en koelmachine te gebruiken.</p>
3	 <p data-bbox="228 1415 826 1518"><i>Figuur 13</i> <i>Uitkoelen van vocht met warmtewisselaar met buitenlucht en aanvullend adiabatische koeling.</i></p>	<p data-bbox="855 976 1129 1151">Nieuw concept voor (bijna), gesloten kas, met lagere investering door geen aquifer te gebruiken.</p> <p data-bbox="855 1160 1129 1263">Tot hogere buitentemperaturen inzetbare ontvochtiging / koeling.</p>

De verdere uitwerking en modellering van deze systemen is Bijlage 2 gegeven.

5. Prestaties systemen voor ontvochtiging

5.1 Inleiding

Voor de bepaling van de prestaties van de ontvochtigingssystemen op jaarbasis is het simulatieprogramma KasPro van PRI gebruikt. Hiermee kan de klimatisering (warmte, vocht, CO₂) van een kas met teelt worden gesimuleerd.

De resultaten van KasPro zijn op de volgende manier beschikbaar:

- Uurwaarden van een aantal variabelen (zie overzicht in Bijlage 3) voor het gehele jaar. Op basis van deze uurwaarden zijn jaartotalen (Bijlage 4 en andere jaarkarakteristieken bepaald. Tevens zijn voor een drietal perioden van twee karakteristieke dagen - winter, voor/najaar en zomer - de resultaten grafisch weergegeven (Bijlage 5).
- Waarden van deze variabelen voor iedere rekenstap van 2 minuten gedurende twee dagen (detailgegevens). Deze detailgegevens zijn gebruikt om het regelend gedrag van de installatie te beoordelen. Ook deze gegevens zijn grafisch weergegeven.

Hieronder wordt eerst een overzicht gegeven van de kas, installaties en teelt die gebruikt zijn in de simulaties.

5.2 Referentiekas, installaties en teelt

Voor de teelt is uitgegaan van onbelichte tomaten met actief gebruik van een energiescherm.

De resultaten zullen in grote lijnen vergelijkbaar zijn met komkommer en paprika. Hoe groter de verdamping en hoe warmer de teelt, hoe groter de bijdrage kan zijn van alternatieve manieren van ontvochtiging.

Voor de referentiekas is uitgegaan van een Venlo-kas met de volgende specificaties:

- Hoogte van 5 meter en een kapmaat van 4 meter.
- Enkel glasdek met glas van 4 mm dikte. De lichtdoorlatendheid van de gehele kap bedraagt 76% voor diffuse straling en maximaal 85% voor directe straling.
- De variant met dubbel glasdek heeft een dubbel PPMA dek met een K-waarde van 6.6 voor het materiaal, exclusief de overdrachtscoëfficiënten naar de lucht. De lichtdoorlatendheid van de gehele kap bedraagt 76% voor diffuse straling en maximaal 82% voor directe straling.
- De inlek van buitenlucht bedraagt 10^{-4} m³/s per m² bij 1 m/s windsnelheid.

Deze kas is voorzien van de volgende standaard installatiefuncties:

- Verwarming via onderste en bovenste verwarmingsbuis. Nominaal vermogen van 175 W/m^2 bij een ontwerpaanvoertemperatuur van $90 \text{ }^\circ\text{C}$.
- De verwarming wordt ingeschakeld als de kasttemperatuur onder de gewenste waarde komt. De gewenste temperatuur is overdag 20°C en 's nachts 18°C .
- Daarnaast wordt een minimumbuis temperatuur gevoerd, ook bij toepassing van ontvochtigers. Als dit achterwege wordt gelaten zal het gasverbruik lager liggen maar zal buiten het stookseizoen tevens de CO_2 concentratie dalen.
- Warmteopwekking gebeurt met een ketel met condensor.
- De CO_2 regeling is afgesteld op 800 ppm. Hierin kan alleen worden voorzien in het stookseizoen of als de warmtebuffer voor de minimumbuisregeling daarvoor ruimte biedt.
- Scherm tussen de teelt en de top van de kas.
Als de buitentemperatuur 's nachts onder 10°C komt wordt dit scherm gesloten. Als de vochtigheid oploopt wordt een kier getrokken, zodat vocht kan condenseren op het kasdek. Pas daarna worden zonodig de luchtramen geopend.
- De luchtramen worden proportioneel geregeld op de kasttemperatuur en de RV.

De algemene gegevens van de ontvochtigingssystemen zijn:

- Het thermisch rendement van de voorgeschakelde warmtewisselaar is op 80 % gesteld. Deze waarde is lager dan het rendement van meer dan 90% dat momenteel door tegenstroom warmtewisselaars wordt gehaald.
- Het maximaal luchtdebiet over de ontvochtiger is $0.001 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$, ofwel $3.6 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$. Dit is veel kleiner dan het berekende debiet in paragraaf Tabel 2, pagina 20. De reden is dat de ontvochtiger bedoeld is als aanvulling in het voor- en naseizoen en niet voor volledige klimatisering.
- Het ventilatorvermogen bedraagt nominaal 1 W/m^2 voor de luchtstroom van kaslucht door de ontvochtiger. Voor het verbruik van de ventilator met buitenlucht wordt eenzelfde verbruik voorondersteld.
- Het debiet over de ontvochtiger wordt in stapjes van 10% van het nominaal debiet per twee minuten omhooggeschakeld zolang de RV boven de ingestelde waarde is. Als de RV onder de ingestelde waarde komt wordt op vergelijkbare wijze in stapjes van 10% omlaaggeschakeld. Hiermee wordt een rustig regelgedrag verkregen.
- De regeling van het scherm tussen teelt en de top van de kas is aangepast. Bij een te hoge vochtigheid 's nachts wordt nu geen kier getrokken maar wordt eerst de ontvochtiger ingezet.

De gegevens van het ontvochtigingssysteem met warmtepomp zijn:

- De warmtepomp heeft een elektrisch aandrijfvermogen van 8 W/m^2 .
- De warmtepomp heeft een constant Carnotrendement van 50%. Dit leidt tot een COP die varieert afhankelijk van de gegeven condities, tussen 3,9 en 4,4. De beste warmtepompen kunnen een Carnotrendement van 60% halen.
- Zodra de luchtramen worden geopend wegens een te hoge kasttemperatuur wordt het ontvochtigingssysteem uitgeschakeld.

- De warmtepomp wordt zodanig aan/uit geschakeld dat de uitgaande verdampertemperatuur op 4°C wordt gehouden.

De gegevens van het ontvochtigingssysteem met een warmtewisselaar met buitenlucht zijn:

- Het thermisch rendement van de voorgeschakelde warmtewisselaar is 80 %.
- Het thermisch rendement van de warmtewisselaar met de buitenlucht is 80 %.
- De ventilatoren van het ontvochtigingssysteem worden ingeschakeld als de RV in de kas boven de ingestelde waarde komt en de buitentemperatuur lager is dan de kastemperatuur.

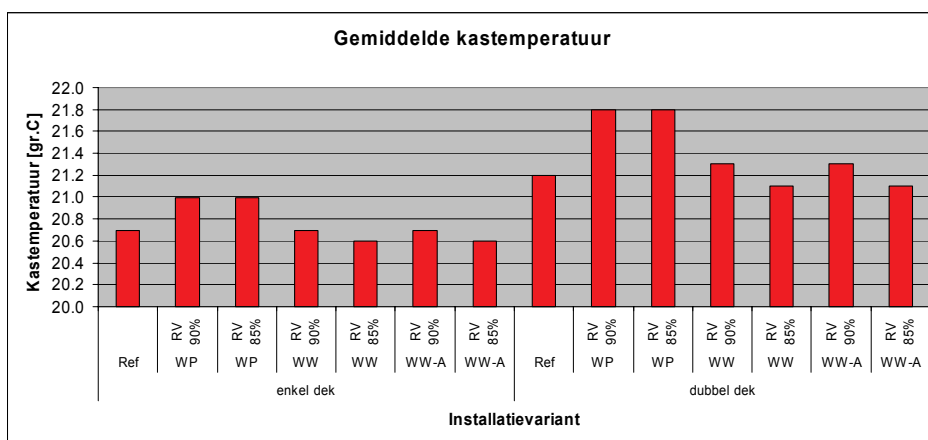
De gegevens van het ontvochtigingssysteem met een warmtewisselaar met adiabatisch voorgekoelde buitenlucht zijn gelijk aan die zonder voorkoeling.

De volgende systeemvarianten zijn doorgerekend.

RV instelling	Enkel kasdek		Dubbel kasdek	
	90%	85%	90%	85%
Referentie – traditioneel systeem		x		x
Ontvochtiger met warmtepomp	x	x	x	x
Ontvochtiger met warmtewisselaar met buitenlucht	x	x	x	x
Ontvochtiger met warmtewisselaar met adiabatisch voorgekoelde buitenlucht	x	x	x	x

5.3 Prestaties ontvochtigingsystemen

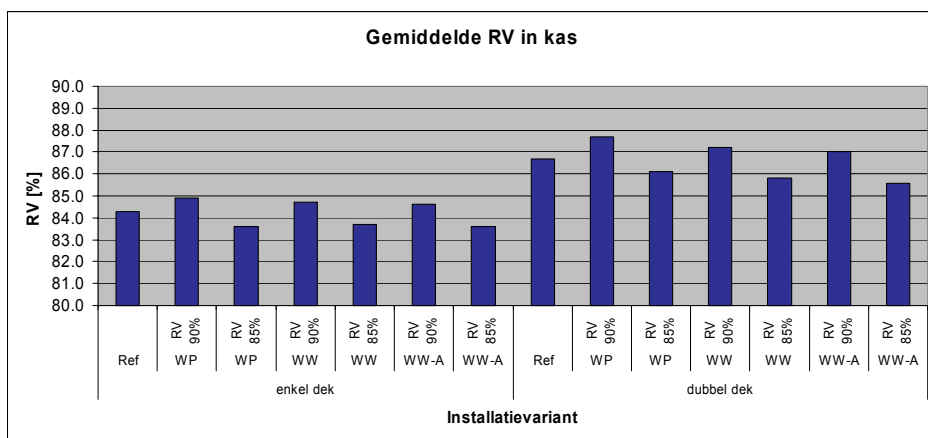
Hieronder worden de prestaties van de verschillende systemen vergeleken op basis van jaarprestaties. In Figuur 14 wordt een overzicht van de gemiddelde kastemperaturen gegeven. Hieruit blijkt dat in de kas met dubbel dek de temperatuur gemiddeld 0.6 – 0.8 °C hoger ligt.



Figuur 14 Gemiddelde kasttemperatuur op jaarbasis.

Hieronder worden de prestaties ten aanzien van relatieve vochtigheid in de kas (RV) vergeleken. In Figuur 15 zijn de jaargemiddelde waarden van de RV gegeven. Hieruit blijkt:

- De gemiddelde RV ligt bij enkel dek 2 tot 3% lager dan voor dubbel dek.
- Bij toepassing van ontvochtigingssystemen met een setpoint van 90% ligt de gemiddelde RV tot 1 % hoger dan de referentie.
- Bij toepassing van ontvochtigingssystemen met een setpoint van 85% ligt de gemiddelde RV tot 1 % lager dan de referentie.

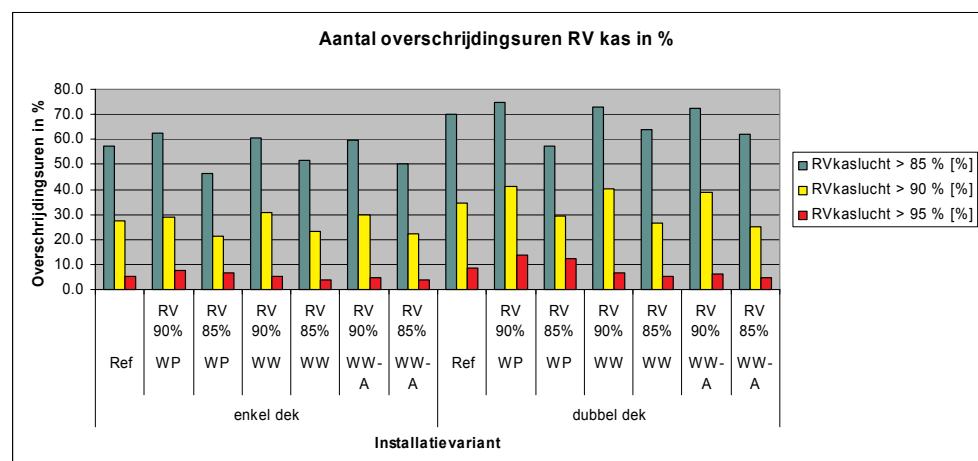


Figuur 15 Jaargemiddeld RV in kas.

De ontvochtigingssystemen leiden dus niet tot grote verschillen in de jaargemiddelde RV.

In Figuur 16 wordt het aantal overschrijdingsuren van een RV waarde gegeven in procenten van het totaal aantal uren in een jaar (8760). Een waarde van bv 50% overschrijdingsuren van een RV van 85% betekent dat gedurende de helft van het jaar de RV boven 85% ligt.

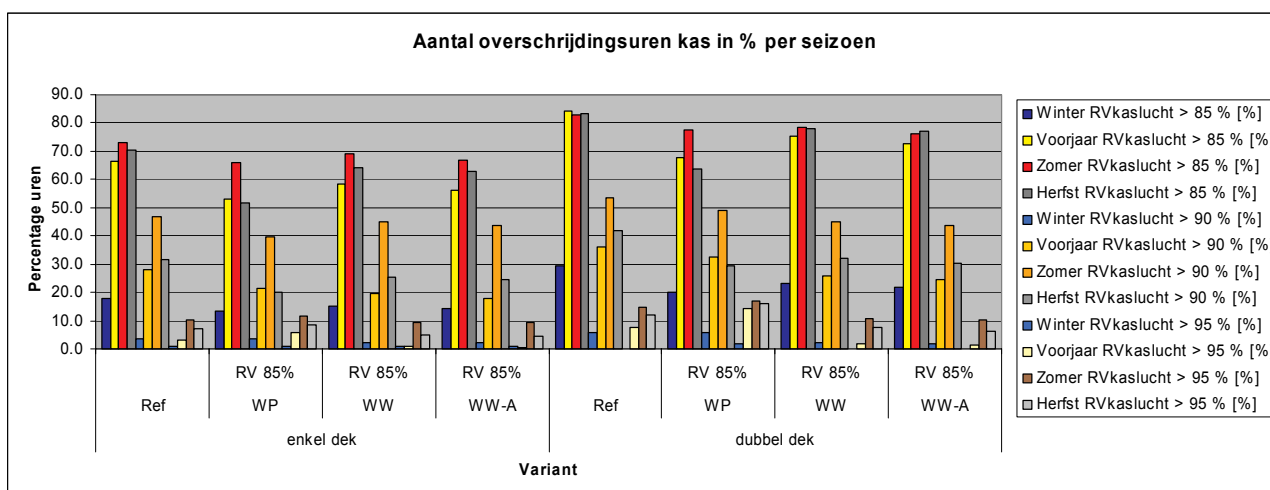
- De overschrijdingen ontstaan niet door het gesloten houden van de ramen maar tijdens het openen van de ramen, waarbij de WP-ontvochtiger uitstaat.
 - Wat opvalt is dat een RV van 85% voor vrijwel alle referenties en systemen voor meer dan de helft van de tijd overschreden wordt. Een RV van 90% wordt door alle systemen 20% van de tijd overschreden en ook een RV van 95% of hoger komt in alle systemen in 3 – 13% van de tijd voor. Dit ontstaat vooral doordat de ramen openen om warmte af te voeren, waarbij in de simulaties de ontvochtiger wordt uitgeschakeld.
 - Het aantal overschrijdingsuren ligt voor dubbel dek over de hele linie hoger dan voor enkel dek: 10-12% bij een RV van 85%, 3-10% bij een RV van 90% en 1-6% bij een RV van 95%.
 - Bij toepassing van ontvochtigingssystemen met een setpoint van 90% stijgt het aantal overschrijdingsuren van een RV van 85% met 5-10% op jaarbasis t.o.v. de referentie.
 - Bij toepassing van ontvochtigingssystemen met een setpoint van 85% daalt het aantal overschrijdingsuren van een RV van 85% met 5-15% op jaarbasis t.o.v. de referentie en met 3-9% bij een RV van 90%.
- Bij ontvochtiging met een warmtepomp stijgt het aantal overschrijdingsuren van een RV van 95% licht; waarschijnlijk door een onhandige interactie tussen ontvochtiger en ventilatie. Bij de andere ontvochtigers daalt het aantal overschrijdingsuren met 1,5 – 4%.
- Het effect van de ontvochtigers is het grootst bij de kas met dubbel dek.



Figuur 16 Overschrijdingsuren RV in kas op jaarbasis.

In Figuur 17 wordt op vergelijkbare wijze als hiervoor het aantal overschrijdingsuren van een RV waarde gegeven in procenten van het totaal aantal uren in een seizoen. De seizoenen komen hier overeen met kwartalen. Ter wille van het overzicht bevat de grafiek alleen gegevens voor de referenties en de ontvochtigers die op een RV van 85% zijn afgesteld.

- De reeds gesignaleerde hogere RV van een kas met dubbel dek t.o.v. enkel dek komt ook hier naar voren.
- De overschrijdingsuren van een RV van 85% liggen in dezelfde grootte-orde voor voorjaar, zomer en herfst.
- De overschrijdingsuren van een RV van 90% zijn het hoogst in de zomer en 10-20% lager voor voorjaar en herfst.
- De overschrijdingsuren van een RV van 95% zijn het hoogst in de zomer en de herfst en meestal aanzienlijk lager in het voorjaar.
- In de winter is het aantal overschrijdingsuren altijd wezenlijk lager dan in de andere seizoenen.

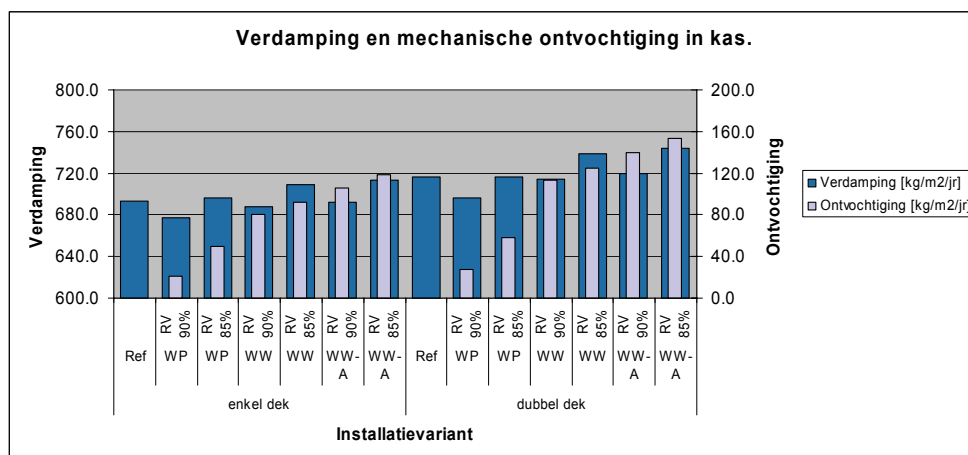


Figuur 17 Overschrijdingsuren RV in kas op seizoenbasis

Vervolgens blijkt voor de verdamping en het functioneren van de ontvochtiger (zie Figuur 18 en Figuur 19):

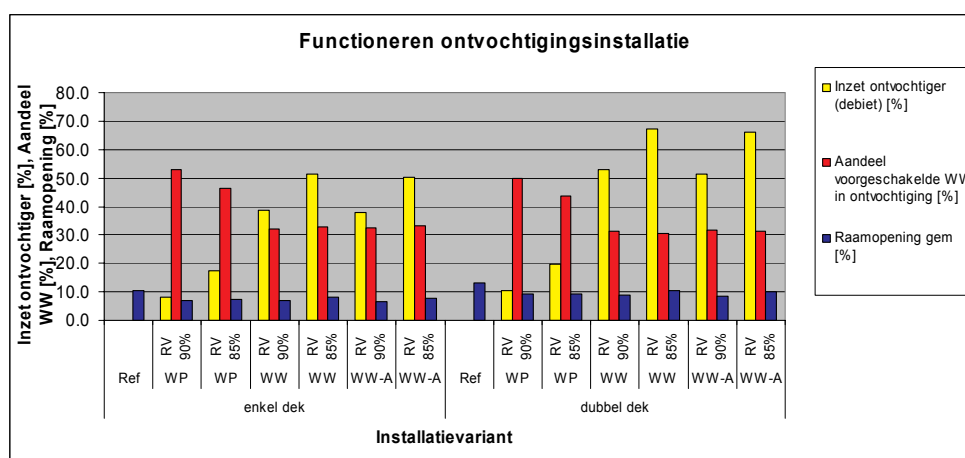
- De verdamping ligt rond de 700 kg/m²/jr.
- De verdamping ligt zo'n 20 kg/m²/jr lager bij installaties die op een hogere RV van 90% zijn afgesteld. De verdamping van de teelt wordt hierbij geremd.
- De verdamping ligt zo'n 25 kg/m²/jr hoger bij de kas met dubbel dek, waarschijnlijk door de gemiddeld 0.6°C hogere kastemperaturen (zie Figuur 14).
- De mechanische ontvochtiging neemt slechts een bescheiden aandeel (3 – 20%) van de verdamping voor zijn rekening. De rest wordt afgevoerd via condensatie op het kasdek (in de winter en in koude nachten) en door ventilatie (bij hogere buitentemperaturen en zinstraling).

- De mechanische ontvochtiging is hoger voor kassen met een dubbel dek (4 – 20% van de verdamping) dan voor kassen met enkel dek (3 – 16%). De ontvochtiger neemt hier kennelijk een deel van de condensatie op het kasdek over.
- De mechanische ontvochtiging is het laagst (3 – 8% van de verdamping) bij de ontvochtigers met warmtepomp. Dit wordt veroorzaakt door het afschakelen van deze ontvochtiger zodra de luchtramen geopend worden wegens te hoge kastemperaturen. De inzet van de ontvochtiger is hier ook het laagste (8 – 20%).
- De mechanische ontvochtiging is hoger (11 – 17%) bij de ontvochtigers met warmtewisselaar met buitenlucht. Deze ontvochtiger worden ingezet zodra de RV boven het setpoint is en de buitentemperatuur lager is dan de kaslucht. De inzet van de ontvochtiger is daardoor hoog (38 – 67%).
- De mechanische ontvochtiging is het hoogst (15 – 20%) bij de ontvochtigers met adiabatisch voorgekoelde warmtewisselaar met buitenlucht. Dit wordt veroorzaakt doordat deze ontvochtigers op dezelfde wijze worden ingezet als de vorige maar door de adiabatische voorcooling de kaslucht in de warmtewisselaars tot een lagere temperatuur afkoelen en dus meer vocht onttrekken. De inzet van de ontvochtiger is even hoog als zonder adiabatische voorcooling (38 – 66%).



Figuur 18 Verdamping en mechanische ontvochtiging kas op jaarbasis.

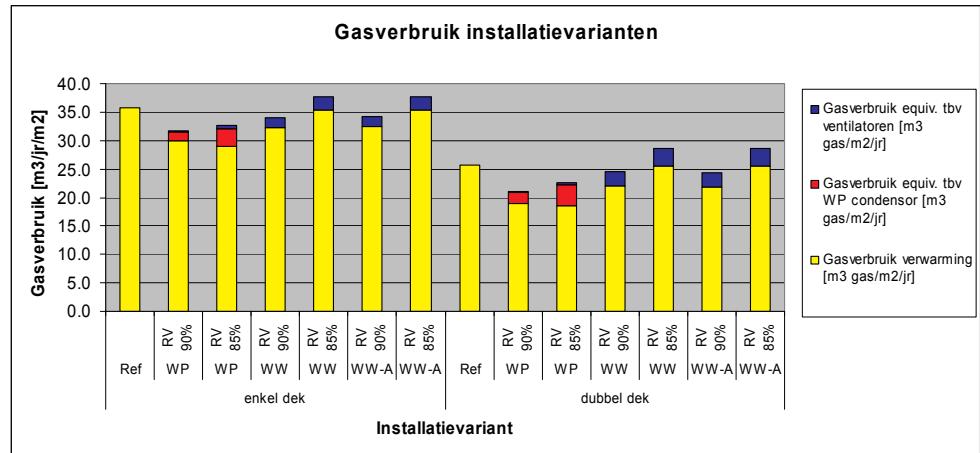
- Het aantal draaiuren ofwel de inzet van de ontvochtiger ligt tussen de 8 en 20 % voor de ontvochtigers met warmtepomp. Voor ontvochtigers met een warmtewisselaar met buitenlucht ligt het aantal draaiuren tussen de 38 en 65% (Figuur 19).
- Uit Figuur 19 blijkt ook het effect van de voorgeschakelde warmtewisselaar. Deze heeft de hoogste bijdrage voor de ontvochtigers met warmtepomp (43 – 53% van de ontvochtiging). Bij de ontvochtigers met warmtewisselaar met (adiabatisch voorgekoelde) buitenlucht is de bijdrage lager (30 – 33% van de ontvochtiging), omdat de buitentemperatuur gemiddeld hoger zal liggen dan de 4°C waarop de ontvochtigers met warmtepomp worden bedreven.



Figuur 19 Functioneren ontvochtigingsinstallatie op jaarbasis.

Het energiegebruik omvat niet alleen het gasverbruik voor verwarming en de CO₂-voorziening maar ook het elektriciteitsverbruik voor de warmtepomp en ventilatoren van de ontvochtigingssystemen. Dit elektrisch verbruik is met een centrale rendement van 39% (bw) omgerekend naar een *equivalent gasverbruik*. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 20. Hieruit blijkt:

- Het gasverbruik van de referentie met enkel kasdek bedraagt ruim 35 m³gas/m²/jr. Dit ligt lager dan de 40-45 m³/m²/jr die in de markt als referentie wordt genoemd. Dit wordt volgens PRI veroorzaakt door het actieve gebruik van een energiescherm in de simulaties. Zo'n energiescherm was nog niet algemeen gangbaar, maar is in opkomst door de recente stijgingen van de energieprijzen.
- Het gasverbruik van de referentie met dubbel kasdek bedraagt ruim 25 m³gas/m²/jr en ligt daarmee bijna 30% lager dan bij enkel kasdek.
- Het equivalent gasverbruik van de ontvochtiger met warmtepomp ligt zo'n 10% lager dan de referentie enkel kasdek.
- Het equivalent gasverbruik van de ontvochtigers met warmtewisselaar met (adiabatisch voorgekoelde) buitenlucht ligt 5% lager als het setpoint van RV op 90% is gesteld. Bij een RV setpoint van 85% ligt het gasverbruik juist 5% hoger. Dit hogere verbruik wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de koeling die optreedt bij deze wijze van ontvochtiging en die groter is bij een lager setpoint van de RV.
- Het gasverbruik van de referentie met dubbel kasdek ligt bijna 30% lager dan bij enkel kasdek.
- Het equivalent gasverbruik van de ontvochtiger met warmtepomp ligt 12 - 18% lager dan de referentie dubbel kasdek.
- Het equivalent gasverbruik van de ontvochtigers met warmtewisselaar met (adiabatisch voorgekoelde) buitenlucht ligt 5% lager dan de referentie dubbel kasdek als het setpoint van RV op 90% is geteld. Bij een RV setpoint van 85% ligt het gasverbruik juist 10% hoger.

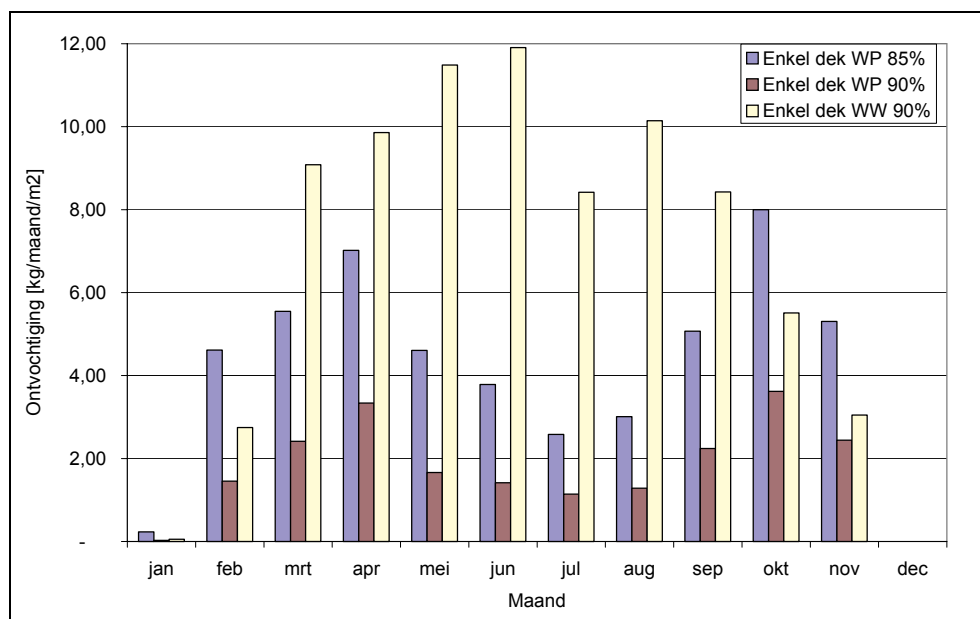


Figuur 20 Gasverbruik op jaarbasis.

Uit aanvullende informatie van PRI is gebleken dat de verschillende systemen geen grote verschillen in CO₂ concentratie in de kas opleveren.

5.4 Inzet over de seizoenen

De inzet van een ontvochtiger is afhankelijk van de verdamping, de condensatie op het kasdek en het setpoint. Figuur 21 laat zien dat de inzet van de WP-ontvochtiger het grootst is in april en oktober, lager in de zomermaanden en vrijwel wegvalt in december en januari. De inzet bij het setpoint van 90% is lager dan bij 85%, maar het patroon is vergelijkbaar. De WW ontvochtiger tegen de buitenlucht kent de grootste inzet in de zomermaanden, want deze wordt niet uitgeschakeld als de ramen geopend worden. De totale mechanische ontvochtiging in kg per jaar is bescheiden ten opzichte van de verdamping.



Figuur 21 Inzet ontvochtiger per maand, tomaat, enkel dek

Berekend is hoe de warmte die toegevoerd wordt met de verwarming de kas verlaat. Dit kan op drie manieren: door ventilatie, condensatie of door transmissie door het kasdek. Het gaat hier dus alleen om de warmte die actief wordt ingebracht.

In onderstaande tabel en in **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** is aangegeven hoe de warmtebalans per maand is.

Eenheid	MJ/m ²	MJ/m ²	MJ/m ²	MJ/m ²	m ³ /m ²	%	%	%
Maand	Ventilatie	Condensatie	Transmissie	Verwarming	gasverbruik	Ventilatie	Condensatie	Transmissie
jan	21,4	19,0	106,4	146,8	5,10	15%	13%	72%
feb	50,5	29,6	70,5	150,6	5,23	34%	20%	47%
mrt	58,7	20,1	41,6	120,5	4,18	49%	17%	35%
apr	65,0	13,3	24,9	103,2	3,58	63%	13%	24%
mei	56,8	1,3	0,8	58,9	2,04	96%	2%	1%
jun	46,3	0,8	0,0	47,1	1,64	98%	2%	0%
jul	24,3	0,2	0,1	24,6	0,85	99%	1%	0%
aug	36,0	0,5	0,0	36,4	1,27	99%	1%	0%
sep	47,3	2,2	3,5	53,0	1,84	89%	4%	7%
okt	73,3	14,1	24,5	111,8	3,88	66%	13%	22%
nov	29,2	16,3	32,0	77,5	2,69	38%	21%	41%
dec	11,9	4,2	81,5	97,6	3,39	12%	4%	84%
Totaal	520,6	121,3	386,0	1028,0	35,70	51%	12%	38%

5.5 Conclusies prestaties systemen

Uit analyse van de resultaten van de simulaties met KasPro blijkt dat er mogelijkheden zijn voor optimalisatie van de systemen:

- In alle simulaties is naast de ontvochtiging de minimumbuis temperatuur aangehouden. Het is echter de bedoeling om door ontvochtiging de RV te beheersen, zodat de minimumbuis niet meer nodig is. Het energiegebruik kan volgens sommige schattingen met 30% dalen als de minimumbuis temperatuur wordt losgelaten. Gezien de omvang van de warmteverliezen via ventilatie en condensatie (samen ruim 60%) is dit niet onwaarschijnlijk.
Dit heeft wel gevolgen voor de CO₂ dosering en concentratie. De minimumbuisregeling maakt het mogelijk om het gehele jaar CO₂ te produceren en doseren. Als de minimumbuisregeling vervalt zal de CO₂ concentratie buiten het stookseizoen omlaag gaan, tenzij andere CO₂ bronnen worden benut.
- De ontvochtiger met een warmtepomp en voorgeschakelde warmtewisselaar wordt nu uitgeschakeld als de luchtramen geopend worden wegens te hoge kas-temperaturen. Wellicht kan de ontvochtiging worden verbeterd en/of de energiebesparing worden vergroot door de ontvochtiger ook te gebruiken als de luchtramen geopend zijn.
- De ontvochtiger wordt tot nu toe op één gewenste waarde van de RV ingesteld (85 of 90 %). Het valt te overwegen een variabele gewenste waarde toe te passen, waarbij de RV tijdens de nacht lager wordt ingesteld dan overdag. Hierdoor het natslaan van het gewas in de ochtenduren voorkomen.
- De ontvochtigings-capaciteit van de ontvochtigers kan worden vergroot door verhoging van het maximaal luchtdebiet.

6. Inpassing systemen voor ontvochtiging

6.1 Inleiding

Hieronder worden eerst de eisen ten aanzien van de inpassing gegeven. Daarna worden de inpassingsmogelijkheden op hoofdlijnen uitgewerkt.

6.2 Inpassingseisen

De typische maatvoering van teeltsystemen is opgegeven door DLV-BMT:

- Voor glasgroenten liggen er 5 goten per 8,0 m kas. De goten zijn 20x10 cm (bxh) en liggen minimaal 80 cm boven de grond.
- Bij potplanten met containers is er naast de potten van de kas aan beide zijden ongeveer 15 cm ruimte en midden in de kas tussen de containers nog een keer een paadje van 35 cm. Verder ligt de hele kas dus vol, met uitzondering van één of twee transportbanen die vaak langs de gevels liggen. Soms worden ook containers met een gaasbodem toegepast.
- Lang niet alle bloemen staan in de grond. Rozen en gerbera's worden bijvoorbeeld meestal op potten of substraat geteeld op stellages. Die stellages liggen (tot nu toe) echter vaak wat dichterbij de grond. Elke teelt heeft zijn eigen systemen dus een opsomming daarvan voor de hele bloementeelt valt buiten dit onderzoek.

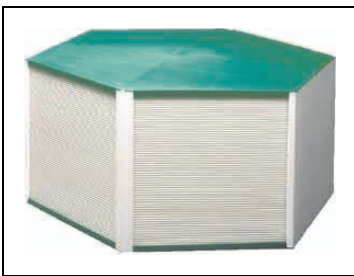
Voor de toepassing en inpassing van ontvochtigers gelden de volgende randvoorwaarden:

- Geen beperking van de lichtinval op de teelt.
Opstelling onder de teeltgoten of teelttafels en/of laag aan de kop van de kas wordt daarom aanbevolen.
- Geen belemmeringen in de looppaden.
Bij opstelling onder teeltgoten (groenten) is een slanke installatie van 20 – 40 cm breedte vereist.
Bij opstelling onder teelttafels (potplanten) is een bredere installatie mogelijk.
- Zo gelijkmatig mogelijk luchtcondities over de teelt (vooral in horizontale richting).
- Realiseren van een goede doorstroming van de lucht ter hoogte van de teelt, bijvoorbeeld door de vochtige lucht boven de teelt af te zuigen en de droge lucht laag in te blazen.
- De installatie dient bestand te zijn tegen water, stof en uiteenlopende chemische en organische stoffen.
- Elektrische aansluiting en condensafvoer.
- Geringe behoefte aan onderhoud.

6.3 Inpassingsmogelijkheden ontvochtiger met warmtepomp

De ontvochtiger met warmtepomp kan zowel in decentrale units (b.v. per 100 m²) als centraal (kop van de kas) worden opgesteld.

Voor opstelling in decentrale units is per 100 m² kasoppervlak een unit voor 360 m³/h en 800 W WP-aandrijfvermogen vereist. Dit vereist een warmtewisselaar die vergelijkbaar is met die voor een woninginstallatie (Figuur 22) en een klein model warmtepomp.



Figuur 22 Voorbeeld lucht-lucht warmtewisselaar.

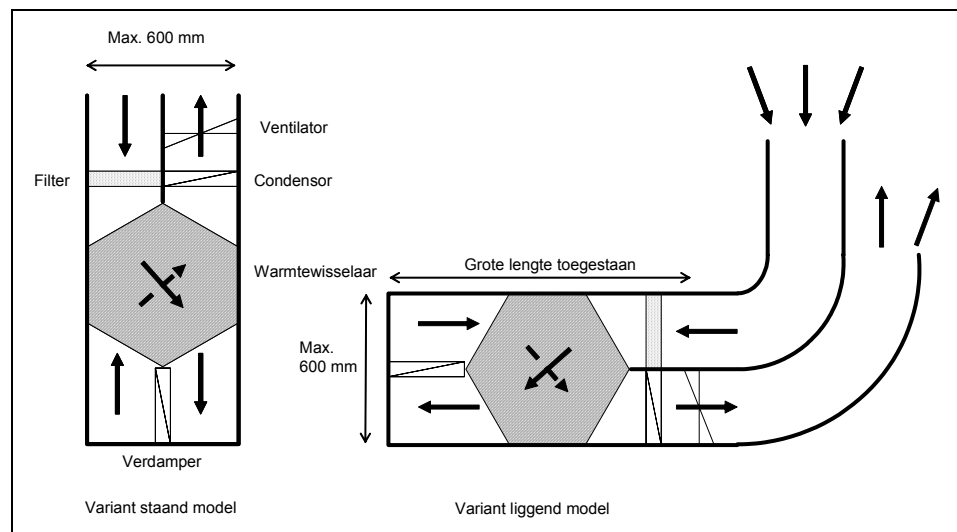
In Figuur 23 zijn twee mogelijke uitvoeringsvormen geschetst.

Als gebruik gemaakt wordt van standaard beschikbare warmtewisselaars worden de breedte en diepte bepaald door de karakteristieke afmetingen van de warmtewisselaar en blijven beperkt tot 600 mm.

Een staand model ligt minder voor de hand omdat daarmee inpassing onder de teelt moeilijk wordt. De hoogte zou meer dan één meter worden.

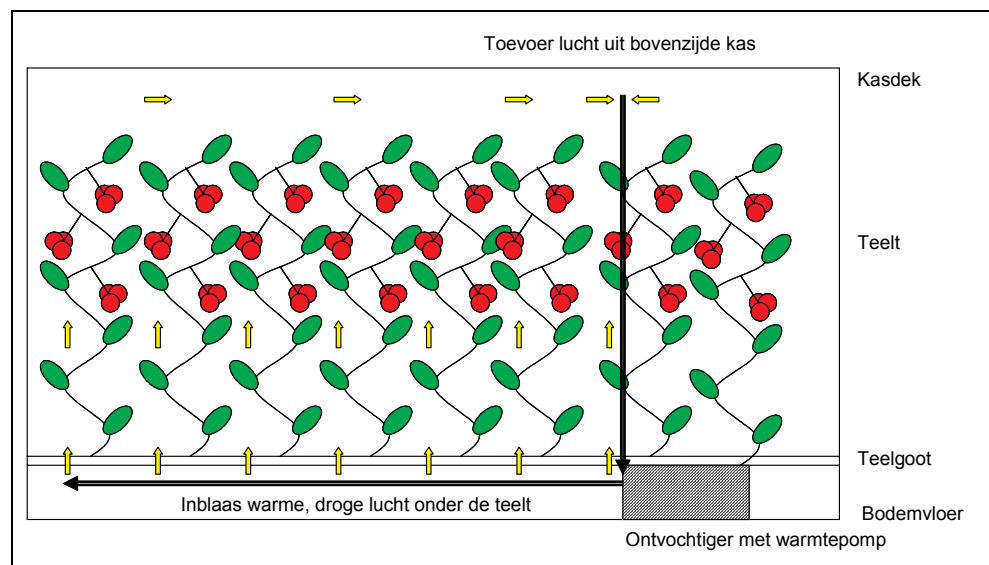
Een liggend model kan onder de teelt worden geplaatst met een hoogte van 600 mm. De standaardbreedte van 500 – 600 mm is te breed voor teeltgoten. Hiervoor is het gewenst dat de warmtewisselaar minder diep wordt waardoor een slankere inbouw mogelijk wordt. Er zijn warmtewisselaars in de markt met een breedte van 23 cm, waardoor een apparaat van ongeveer 31 cm mogelijk wordt, iets breder dan de teeltgoot van 20 cm. Gezien de afstand tussen de teeltgoten (1,6 m) zou dit acceptabel kunnen zijn.

Het geheel kan in een kunststofbehuizing worden opgenomen, met daarbij een apart compartiment met componenten (compressor, expansieventiel, leidingen voor het koelmiddel tussen verdamper en condensor, elektronica). Het water dat vrijkomt bij ontvochtiging kan aan de onderzijde worden afgetapt en kan gebruikt worden als gietwater, na aanvulling van mineralen/



Figuur 23 Schets ontvochtiger met warmtepomp en voorgeschakelde warmtewisselaar. Staande (hoge) en liggende (lage) uitvoering.

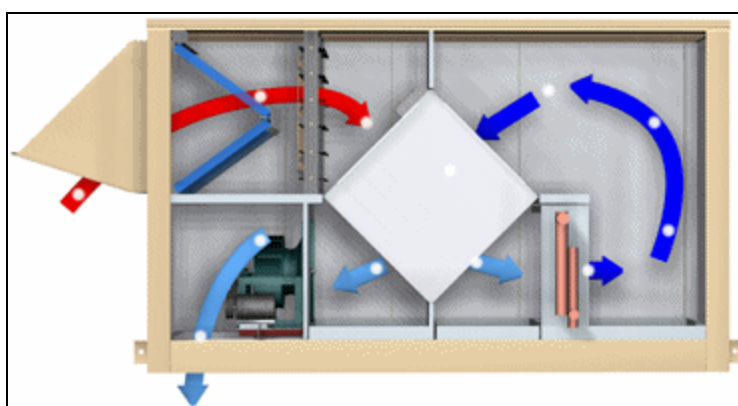
De luchttoevoer naar de ontvochtiger kan zowel ter plaatse als met een opzetstuk hoger in de kas gebeuren. Hierdoor wordt de vochtige lucht uit de bovenste delen van de kas ontvochtigd. De luchtafvoer naar de kas kan voorzien worden van een luchtslang onder de goot, waardoor een gelijkmatige luchtverdeling wordt bereikt. Met een hoog geplaatste toevoer en laag geplaatste afvoer wordt een opwaartse stroming van warme, droge lucht langs de teelt verkregen. Dit is geschetst in Figuur 24.



Figuur 24 Inpassing ontvochtiger met warmtepomp onder de teelgoot en voorbeeld stromingspatroon van de lucht.

Warmtepompontvochtigers worden reeds geproduceerd voor gebouwen, archieven. Figuur 25 geeft een voorbeeld van zo'n ontvochtiger. Als we ter illustratie dit model als uitgangspunt nemen zijn de volgende aanpassingen gewenst voor onze toepassing:

- Toepassen tegenstroom warmtewisselaar ($\eta \geq 90\%$) i.p.v. de nu gebruikte kruisstroomwarmtewisselaar ($\eta = 70\%$).
- Lagere inbouw (minder loze ruimte boven en onder de warmtewisselaar)
- Slanker model (het hier afgebeelde model is minimaal 80 cm breed)
- Aangepaste toevoer en afvoer van de lucht.



Figuur 25 Voorbeeld ontvochtiger met WTW (bron www.aexusa.com)

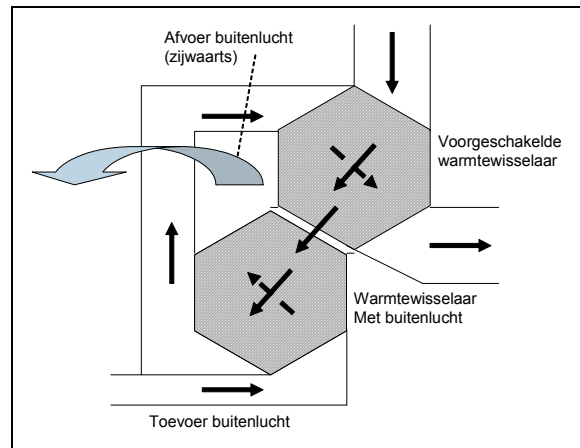
Voor ontvochtigers die aan de kop van de kas worden opgesteld kunnen in principe de staande en liggende configuratie worden gebruikt. Er zijn grotere vermogens, luchtstromen en afmetingen vereist (zie volgende paragraaf) waardoor de toepassing van grotere warmtewisselaars, zoals toegepast in de utiliteitsbouw, mogelijk wordt.

6.4 Inpassingsmogelijkheden ontvochtiger met warmtewisselaar met buitenlucht

De ontvochtiger met warmtewisselaar is niet rendabel voor de functie ontvochtiging, maar als hij toegepast zou worden, dient hij centraal aan de kop van de kas te worden opgesteld. Hiermee kan per kop tot een (halve) kasbreedte van 90 meter voorzien worden. Bij een kapmaat van 4 meter en één unit per kapmaat wordt het verzorgingsgebied 360 m^2 en de vereiste luchthoeveelheid $1300 \text{ m}^3/\text{h}$. Hiervoor zijn grotere warmtewisselaars vereist, zoals toegepast in de utiliteitsbouw.

Een mogelijk uitvoeringsvorm is hieronder geschetst. Bij toepassing van adiabatische voorkoeling van de buitenlucht kan de bevochtiging in het toevoer kanaal van de buitenlucht worden geplaatst.

De toevoer van kaslucht naar de ontvochtiger gebeurt door vrije aanzuiging boven in de kop van de kas. De toevoer van ontvochtigde lucht naar de kas kan gebeuren met slangen, zoals reeds voor andere systemen toegepast wordt.



Figuur 26 Schets ontvochtiger warmtewisselaar met buitenlucht.

7. Economische haalbaarheid

7.1 Inleiding

Voor het beoordelen van de economische haalbaarheid is eerst een schatting gemaakt van de investeringskosten voor de ontvochtigers. Vervolgens zijn de tarieven en economische parameters vastgesteld.

Tenslotte zijn voor de economische vergelijking de *terugverdientijd* en de *netto contante waarde* berekend. Tevens is de investeringsruimte bepaald.

De bedragen zijn voornamelijk betrokken op 1 m² kasoppervlak.

7.2 Investeringskosten

Uitgangspunt bij het bepalen van de investeringskosten zijn de volgende specificaties voor een decentrale unit voor 100 m² kas.

Ontwerpgrootheid	Waarde / m ²	Waarde/ 100 m ²
Nom. debiet ontvochtiger [m ³ /h]	3.6	360
Rendement warmtewisselaar(s) [%]	80	80
Nom. aandrijfvermogen WP [W]	8	800
Carnotrendement WP [%]	50	50
Ventilatorvermogen [W]	1	100

Voor een dergelijke unit kunnen de warmtewisselaars worden toegepast die nu voor woninginstallaties worden gebruikt. Daarnaast is een klein model WP vereist, dat qua vermogen overeenkomt met raam-units of single split systemen voor één kamer. Een aanvankelijk geschatte van 12 €/m² is als uitgangspunt gebruikt in de berekeningen. Er zijn inmiddels prijsniveaus van 7 €/m² gevonden.

Ontvochtigers met een warmtewisselaar met buitenlucht bevatten twee warmtewisselaars. Deze zullen qua kosten vergelijkbaar zijn met ontvochtigers met warmtepomp

De meerkosten van een dubbel kasdek bedragen 10 – 15 €/m². In de berekeningen is voornamelijk uitgegaan van 15 €/m².

De apparatuur dient jaarlijks te worden onderhouden. Hiervoor wordt een stelpost van € 50 per jaar per unit aangehouden, wat neerkomt op een jaarlijks bedrag van € 0,50/m².

7.3 Tarieven en overige economische parameters

De energietarieven zijn het afgelopen jaar sterk gestegen; ook voor de glastuinbouw. Hoe de toekomstige prijsontwikkeling verloopt, is niet goed te voorspellen.

Voor deze vergelijking is uitgegaan van de volgende tarieven:

Gas	€ 0,20 m ³
Elektriciteit	€ 0,07 kWh

De overige economische parameters zijn:

prijsstijging nominaal	3 %
rente nominaal	5 %
stijging energieprijns nominaal	5 % (dus een effectieve stijging van 2%)
BTW	19 %
Afschrijvingstermijn	15 jaar

7.4 Subsidies, belasting faciliteiten

Vooralsnog is geen enkele vorm van subsidie of belastingfaciliteit vooronderstelt.

7.5 Productie

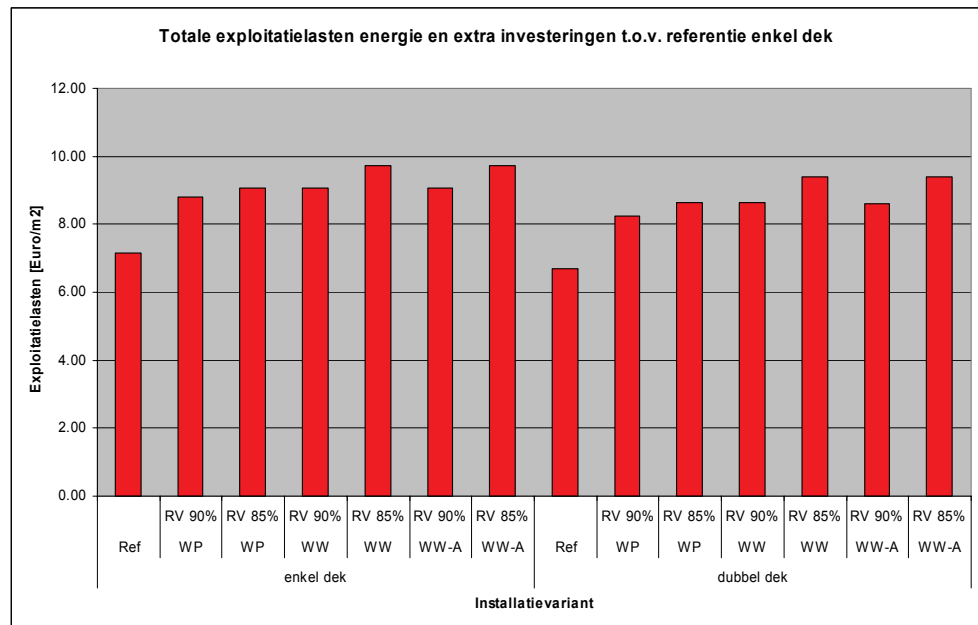
De invloed van de verschillende ontvochtigingssystemen en de resulterende kascondities op de teelt is bescheiden. Uit overleg met PRI is gebleken dat er geen grote verschillen te verwachten zijn.

Toepassing van een dubbel dek kan een verlaging van de lichtopbrengst tot gevolg hebben, waarbij productieverlies optreedt.

7.6 Economische vergelijking

Zoals uit Figuur 27 blijkt liggen de exploitatielasten voor deze systemen bij de hier gehanteerde economische uitgangspunten hoger dan de referentie. Alleen de toepassing van een dubbel dek geeft lagere exploitatielasten maar daar staat door de iets lagere lichtdoorlatendheid een lagere teeltopbrengst tegenover die niet in de figuur is verwerkt.

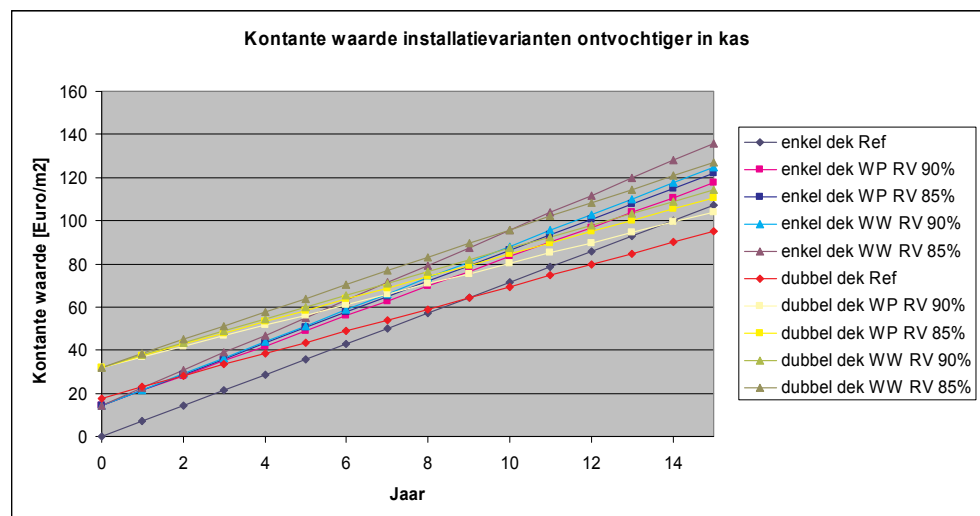
De exploitatielasten stijgen ruim € 1,00 per m² voor ontvochtigers met en warmtepomp en € 1,50 per m² en hoger voor ontvochtigers met warmtewisselaar met buitenlucht.



Figuur 27 Exploitatielasten

De resultaten van de contante waarde methode bevestigen dit beeld, zoals te zien in Figuur 28. Twee trends zijn hier goed te zien:

- De lijnen voor de kassen met dubbel dek beginnen bij een hogere waarde maar komen lager uit door een flauwer verloop (lagere energiekosten) dan voor enkel dek.
- De lijnen voor varianten met ontvochtiger lopen teveel gelijk op (bescheiden effect energiekosten) om de investeringen in de ontvochtigers terug te verdienen.



Figuur 28 Netto kontante waarde

Het is bekend dat een gesloten kas investeringen vraagt van circa 80 tot 100 €/m² bij een productieverhoging van circa 14% en een energiebesparing per m² van circa 25%. Hiermee vergeleken is een losse WP-ontvochtiger voor circa €7,- per m² met energiebesparingen van 10%, mogelijk meer, de moeite waard om verder uit te werken

7.7 Investeringsruimte

Uit de berekeningen blijkt dat er slechts een bescheiden investeringsruimte van enige euro's per m² is voor de ontvochtigers met warmtepomp. Deze investeringsruimte kan wellicht vergroot worden door:

- Optimalisatie van de inzet van de ontvochtiger, waardoor een grotere energiebesparing en investeringsruimte wordt verkregen.
- Toepassing bij andere teelten waar een groter economisch voordeel kan worden bereikt.
- Optimalisatie van de kosten van de ontvochtiger. Voor grote aantallen (100 units per hectare kas) kan een serieus kostenvoordeel behaald worden.
- Optimalisatie van de kosten van de ontvochtiger door grotere units te bouwen voor bv 150 – 200 m².
- Optimalisatie van de ontvochtiger door het achterwege laten van de voorgeschakelde warmtewisselaar. Hierdoor stijgt het elektrisch verbruik en de netto-warmteafgifte. Het is de vraag of de lagere investeringskosten opwegen tegen de hogere energiekosten.

8. Conclusies en aanbevelingen

8.1 Conclusies

De hoofdconclusie is dat de ontvochtiger met warmtepomp vooralsnog het meest perspectief biedt, zowel energetisch, inpassing (losse units in kas) en economisch. Overige conclusies zijn:

- Volgens de simulaties met KasPro bedraagt het gasverbruik van de referentie met enkel kasdek ruim $35 \text{ m}^3 \text{ gas/m}^2 \text{ /jr}$. Dit ligt lager dan de $40\text{-}45 \text{ m}^3 \text{ /m}^2 \text{ /jr}$ die in de markt als referentie wordt genoemd.
Het gasverbruik van de referentie met dubbel kasdek bedraagt ruim $25 \text{ m}^3 \text{ gas/m}^2 \text{ /jr}$ en ligt daarmee bijna 30% lager dan bij enkel kasdek.
- Toepassing van de hier onderzochte ontvochtigers levert volgens simulaties met KasPro een betere RV op in de kas bij instelling op een RV van 85%. De gemiddelde RV daalt tot 1 % onder de referentiekas.
Het aantal overschrijdingsuren van een RV van 85% daalt met 5-15% op jaarbasis t.o.v. de referentie en met 3-9% bij een RV van 90%.
Bij ontvochtiging met een warmtepomp stijgt het aantal overschrijdingsuren van een RV van 95% licht; waarschijnlijk door een onhandige interactie tussen ontvochtiger en ventilatie. Bij de andere ontvochtigers daalt het aantal overschrijdingsuren met 1,5 – 4%.
Het effect van de ontvochtigers is het grootst bij de kas met dubbel dek.
- De mechanische ontvochtiging neemt slechts een bescheiden aandeel (3 – 20%) van de verdamping voor zijn rekening. De rest wordt afgevoerd via condensatie op het kasdek (in de winter en in koude nachten) en door ventilatie (bij hogere buitentemperaturen en zoninstraling).
De mechanische ontvochtiging is hoger voor kassen met een dubbel dek (4 – 20% van de verdamping) dan voor kassen met enkel dek (3 – 16%). De ontvochtiger neemt hier kennelijk een deel van de condensatie op het kasdek over.
- Ontvochtigers met een warmtepomp en voorgeschakelde warmtewisselaar blijken energetische voordelen te bieden in een kas met tomatenteelt.
Met een bescheiden ontvochtiging (3 – 8% van de totale verdamping) en een lage inzet (8 – 20%) ligt het gasverbruik (incl. aandrijving koeler en hulpenergie) zo'n 10% lager dan bij de referentie enkel kasdek en 12 - 18% lager dan bij de referentie dubbel kasdek.
- Voor ontvochtigers met een warmtepomp en voorgeschakelde warmtewisselaar levert de energiebesparing echter nauwelijks investeringsruimte op. De kosten van de ontvochtigers worden geschat op €7 tot €12 per m^2 , wat voor een unit voor 100 m^2 neerkomt op € 700 tot €1200. Hiermee stijgen de exploitatielasten ruim € 1,00 per m^2 per jaar.
De inpassing lijkt geen bijzondere problemen op te leveren. Op basis van bestaande componenten kunnen compacte decentrale ontvochtigers worden gebouwd die verspreid in de kas onder de teelt worden opgesteld.
Centrale units aan de kop van de kas zijn een alternatief.

- Ontvochtigers met een warmtewisselaar met buitenlucht en voorgeschakelde warmtewisselaar blijken bij de nu toegepaste bedrijfswijze geen energetische voordelen te bieden in een kas met tomatenteelt.
Met een redelijke ontvochtiging (11 – 17% van de totale verdamping) en een hoge inzet (38 – 67%) ligt het gasverbruik (incl. hulpenergie) zo'n 5% hoger dan bij de referentie enkel kasdek en 10% hoger dan bij de referentie dubbel kasdek.
- Voor ontvochtigers met een warmtewisselaar met buitenlucht en voorgeschakelde warmtewisselaar is bij gebrek aan energiebesparing geen investeringsruimte beschikbaar.
De inpassing aan de kop van de kas lijkt geen bijzondere problemen op te leveren. Op basis van bestaande componenten kunnen ontvochtigers worden gebouwd. De luchttoevoer en -afvoer is vergelijkbaar met die voor andere, bestaande systemen.
- Ontvochtigers met een warmtewisselaar met adiabatisch voorgekoelde buitenlucht en voorgeschakelde warmtewisselaar vertonen hetzelfde beeld
De ontvochtiging ligt nog hoger (15 – 20% van de totale verdamping).
- In alle drie systemen heeft de voorgeschakelde warmtewisselaar een groot aandeel in de ontvochtiging. De hoogste bijdrage wordt geleverd door de ontvochtigers met warmtepomp (43 – 53%). Bij de ontvochtigers met warmtewisselaar met (adiabatisch voorgekoelde) buitenlucht is de bijdrage lager (30 – 33%).

Hieronder wordt de betekenis voor andere teelten geschetst:

- De mogelijkheden zullen in grote lijnen vergelijkbaar zijn voor andere groentegewassen als komkommer en paprika. De iets hogere temperatuurinstellingen bij komkommer en paprika bieden wat meer ruimte aan de warmtepompontvochtiger omdat de ramen minder worden geopend vanwege te hoge temperaturen.
- Voor een deel van de potplanten geldt dat zij groeien bij hogere temperaturen en luchtvochtigheden. De verdamping is geringer dan bij groentegewassen zodat actieve ontvochtiging waarschijnlijk minder interessant is.
- Er zijn goede kansen bij de Gerberateelt. Botrytis is het belangrijkste kwaliteitsprobleem in de Gerberaketen. De schimmel ontstaat bij hoge luchtvochtigheden en om Botrytis te voorkomen stoken Gerberatelers bij tijd en wijle flink om de lucht te ontvochtigen. Er zijn schattingen dat 25 tot 40% van het gasverbruik in de Gerberateelt bestemd is om deze schimmel uit het gewas te houden [7]. Ter vergelijking: volgens de modelberekeningen is circa 25-45% van het energiegebruik voor de tomatenteelt gerelateerd aan ontvochtiging als is dit niet exact terug te rekenen.

8.2 Aanbevelingen

De aanbevelingen zijn:

- Verder onderzoek naar de decentrale ontvochtiger met warmtepomp en tussenwarmtewisselaar lijkt het meest perspectiefrijk.
Maar ook de ontvochtigers door warmtewisseling met buitenlucht kunnen (energetisch) beter presteren als blijkt dat uitschakeling van de minimumbuisregeling mogelijk is en tot grote energiebesparing leidt.
- Uit analyse van de resultaten van de simulaties met KasPro blijkt dat er mogelijkheden zijn voor optimalisatie van de systemen:
 - In alle simulaties is naast de ontvochtiging de minimumbuis temperatuur aangehouden. Het is echter de bedoeling om door ontvochtiging de RV te beheersen, zodat de minimumbuis niet meer nodig is. Het energiegebruik kan volgens sommige schattingen met 30% dalen als de minimumbuis temperatuur wordt losgelaten.
Dit heeft wel gevolgen voor de CO₂ dosering en concentratie. De minimumbuisregeling maakt het mogelijk om het gehele jaar CO₂ te produceren en doseren. Als de minimumbuisregeling vervalt zal de CO₂ concentratie buiten het stookseizoen omlaag gaan, tenzij andere CO₂ bronnen worden benut.
 - De ontvochtiger met een warmtepomp en voorgeschakelde warmtewisselaar wordt nu uitgeschakeld als de luchtramen geopend worden wegens te hoge kasttemperaturen. Wellicht kan de ontvochtiging worden verbeterd en/of de energiebesparing worden vergroot door de ontvochtiger ook te gebruiken als de luchtramen geopend zijn.
 - De ontvochtiger wordt tot nu toe op één gewenste waarde van de RV ingesteld (85 of 90 %). Het valt te overwegen een variabele gewenste waarde toe te passen, waarbij de RV tijdens de nacht lager wordt ingesteld dan overdag. Tijdens de nacht zijn de kasttemperaturen het laagst en kan een lagere RV gewenst zijn om de verdamping te bevorderen.
Tevens wordt hierdoor het natslaan van het gewas in de ochtenduren voorkomen.
 - De ontvochtigings-capaciteit van de ontvochtigers kan worden vergroot door verhoging van het maximaal luchtdebiet. Dit is vooral van belang voor de ontvochtigers met een warmtewisselaar met buitenlucht omdat hierbij minder lage temperaturen optreden waardoor minder ontvochtigd wordt dan bij de ontvochtiger met warmtepomp die de lucht naar 4°C afkoelt.
- Optimalisatie van de kosten van de ontvochtiger. Voor grote aantallen (100 units per hectare kas) kan een serieus kostenvoordeel behaald worden.
- Optimalisatie van de kosten van de ontvochtiger door grotere units te bouwen voor bv 150 – 200 m².
- Overweeg het toepassen van een tussenwarmtewisselaar in gesloten kas systemen met centrale luchtbehandeling en bij systemen met lokale koeler- en verwarmingsblokken onder het gewas.

9. Referenties

- [1] Vocht afvoeren uit tuinbouwkassen met warmteterugwinning (IMAG Rapport P2003-35)
J.B. Campen e.a.
IMAG, Wageningen, april 2003
- [2] Terugwinning van water en energie uit ventilatielucht in de glastuinbouw met een membraan-absorptieproces (R99/375)
J.H. Hanemaaijer, L.H.J.M. Schneiders
TNO, Apeldoorn, september 1999
- [3] Kas als energiebron
W.J.A. Ruijgrok, K.J. Braber
KEMA, Arnhem, september 2002
- [4] Kansen voor lage-temperatuurwarmte in combinatie met warmtepompen en ondergrondse energieopslag bij (bijna) gesloten kassen (deel 1 en 2) (KEMA-rapport 50060657-KPS/SEN 02-3035)
KEMA, Arnhem, november 2002
- [5] Kansen voor lage-temperatuurwarmte in combinatie met warmtepompen en warmteopslag in aquifers – deelrapport: opties voor koelen en ontvochtigen
R.J.F. van Gerwen
KEMA, Arnhem, november 2002
- [6] Ontvochtiging van kassen met bestaande technieken uit de utiliteitsbouw
Fase 1. kwalitatieve beoordeling
Bootsveld, Van Wolferen
TNO, Apeldoorn, december 2004
- [7] Florentine Jagers op Akkerhuis
Vakblad voor de Bloemisterij 45, 2005

10. Verantwoording

Naam en adres van de opdrachtgever:

Ministerie van Landbouw,
Natuur en Voedselkwaliteit
t.a.v. Drs. Ing. L. Oprel
Postbus 482
6710 BL Ede

Productschap Tuinbouw
t.a.v. Mw. Ing. A. Jolman
Postbus 280
2700 AG Zoetermeer

Namen en functies van de projectmedewerkers:

Collin Bootsveld
Hans van Wolferen


Namen van instellingen waaraan een deel van het onderzoek is uitbesteed:

Plant Research International (PRI) Wageningen
DLV Bouw, Milieu en Techniek BV

Datum waarop, of tijdsbestek waarin, het onderzoek heeft plaatsgehad:

juli 2004 – januari 2006

Ondertekening:



Ir. N.R. Bootsveld
projectleider

Goedgekeurd door:



Ing. A.A.L. Traversari MBA
Afdelingshoofd Koude-, Warmte- en
Installatietechniek