



# Zout als oplossing

Studie over de toepassing van hygroscopische zoutoplossingen om kaslucht te ontvochtigen en warmte terug te winnen.

Marcel Raaphorst



### **Referaat**

Met zoutoplossingen kan kaslucht ontvochtigd worden. Een vochtige zoutoplossing moet worden geregenereerd, dat kan door verwarmen. Door de damp die dan ontstaat af te koelen tot kastemperatuur, kan het vocht condenseren. Zo worden verdampingswarmte en water teruggewonnen. Wageningen UR Glastuinbouw heeft in opdracht van Kas als Energiebron met simulaties onderzocht of een dergelijk systeem rendabel kan zijn voor de glastuinbouw. Uit de simulaties is gebleken dat zo'n systeem ongeveer 50% op de warmtevraag bespaart. Vooral voor teelten die tegelijkertijd warmte en ontvochtiging nodig hebben, is het interessant. Een deel van de teruggewonnen warmte zal moeten worden opgeslagen, hiervoor zijn aquifer, bronpompen en een warmtepomp nodig.

### **Abstract**

With salt solutions, greenhouse air can be dehumidified. A moist saline solution must be regenerated, for example by heating. By cooling the damp to greenhouse temperature, it will condense, and heat and water can be recovered. With funding of "Kas als Energiebron", Wageningen UR Greenhouse Horticulture explored the perspectives of such a system for greenhouses. Simulations show that this system will save approximately 50% on heat. Especially for crops that both require heat and dehumidification, it is an interesting concept. Because a part of the recovered heat should be stored, aquifers, pumps and heat pumps are needed.

© 2011 Wageningen, Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek (DLO) onderzoeksinstituut Wageningen UR Glastuinbouw.

## **Wageningen UR Glastuinbouw**

Adres : Violierenweg 1 Bleiswijk  
: Postbus 20, 2265 ZG Bleiswijk  
Tel. : 0317-485606  
E-mail : [glastuinbouw@wur.nl](mailto:glastuinbouw@wur.nl)  
Internet : [www.glastuinbouw.wur.nl](http://www.glastuinbouw.wur.nl)

# Inhoudsopgave

	Samenvatting	5
1	Inleiding	7
2	Vergelijking ontvochtigingsmethoden	9
	2.1 Ontvochtigen met buitenlucht	9
	2.1.1 Voorbeeld	9
	2.1.2 Voor en nadelen	10
	2.2 Ontvochtigen door koelen en herverwarmen.	10
	2.2.1 Voorbeeld ontvochtigen door koelen en herverwarmen	10
	2.2.2 Voor en nadelen	10
	2.3 Ontvochtigen door gebruik van een zoutoplossing.	11
	2.3.1 Regenereren	11
	2.3.2 Voorbeeld ECC bij koeling van de zoutoplossing	13
	2.3.3 Voorbeeld ECC bij opwarming van de kaslucht	14
	2.3.4 Elektriciteitsverbruik	14
	2.3.5 Verliezen	14
	2.3.6 Nevenwerkingen	15
	2.4 Vergelijking van de ontvochtigingsmethoden	15
3	Cases met zoutoplossingen	17
	3.1 Een jaar doorgerekend bij Lans	17
	3.2 Economisch rendement	18
	3.3 Toepassing alleen koelen en herverwarmen	19
	3.4 Gevoeligheid	20
	3.5 Mogelijkheden ECC voor andere teelten	20
4	Conclusies, risico's en aanbevelingen	21
	4.1 Conclusies	21
	4.2 Risico's	21
	4.3 Aanbevelingen	21



# Samenvatting

Zoutoplossingen hebben de eigenschap om vocht te absorberen. Daarmee kunnen ze worden toegepast om de kaslucht te ontvochtigen. Een zoutoplossing die vocht heeft opgenomen moet ook weer worden geregenereerd. Dat kan gebeuren door de zoutoplossing op te warmen, waardoor het vocht uit de oplossing verdampt. Door de vochtige lucht via een warmtewisselaar weer af te koelen tot bijvoorbeeld kastemperatuur kan het verdampte vocht wederom condenseren, waardoor de verdampingswarmte en het water kan worden teruggewonnen. De Eco Climate Converter (ECC) is een apparaat dat in staat is om met een zoutoplossing van Lithium Chloride (LiCl) de kaslucht te ontvochtigen en warmte terug te winnen. Wageningen UR Glastuinbouw heeft in opdracht van Kas als Energiebron met simulaties onderzocht of een dergelijk systeem rendabel kan zijn voor de glastuinbouw.

Uit de simulaties is gebleken dat het ontvochtigen met ECC ongeveer 50% kan besparen op de warmtevraag. Vooral voor teelten die tegelijkertijd warmte en ontvochtiging nodig hebben loopt de besparing hoog op. Een deel van de teruggewonnen warmte zal echter moeten worden opgeslagen in een aquifer, zodat ook bronpompen en een warmtepomp nodig zijn. Of de besparingen hoog genoeg zijn om de investeringskosten te dekken zal vooral afhangen van de energieprijzen en van de hoogte van de investeringskosten.

Overige voordelen van het ontvochtigen met zouten zijn het terugwinnen van water, het binnenhouden van CO<sub>2</sub> en het desinfecteren van de kaslucht die door de zoutoplossing wordt geblazen. Een belangrijk risico dat in de gaten moet worden gehouden is het verlies van zouten aan de kaslucht.



# 1 Inleiding

Ontvochtiging van kassen wordt door veel telers als zeer belangrijk beschouwd. Het gewas verdampt en als dit vocht niet wordt afgevoerd, bereikt de kaslucht een ontoelaatbaar hoge RV, waardoor met name schimmels een bedreiging voor de teelt kunnen vormen. De meest gebruikte manier om vocht af te voeren is het uitwisselen van kaslucht met buitenlucht. Deze lucht moet dan wel weer worden verwarmd om de kaslucht niet te ver te laten afkoelen. Condensatie is een andere vorm van vochtafvoer. Bijvoorbeeld tegen een koud kasdek, maar in semi-gesloten kassen is het ook mogelijk om kaslucht langs een koude spiraal te leiden, waardoor de condensatiewarmte kan worden opgevangen door het koelwater. Ook de lucht die langs een condenserend oppervlak zijn geleid, moet weer worden opgewarmd om de kastemperatuur op peil te houden.

Een andere vorm van ontvochtiging is het gebruik van zoutoplossingen. De ECC (Eco Climate Converter) is een merknaam van een dergelijke ontvochtiger die in Nederland door ArcaZen BV op de markt wordt gebracht. Met deze vorm van ontvochtiging is al ervaring opgedaan o.a. in Israël. Het programma "Kas als Energiebron" heeft aan Wageningen UR opdracht gegeven om een inschatting te maken of het werken met zoutoplossingen geschikt is voor de Nederlandse glastuinbouw. Hierbij is met name bekeken in hoeverre deze vorm van de kasluchtontvochtiging leidt tot besparing op de warmtevraag.



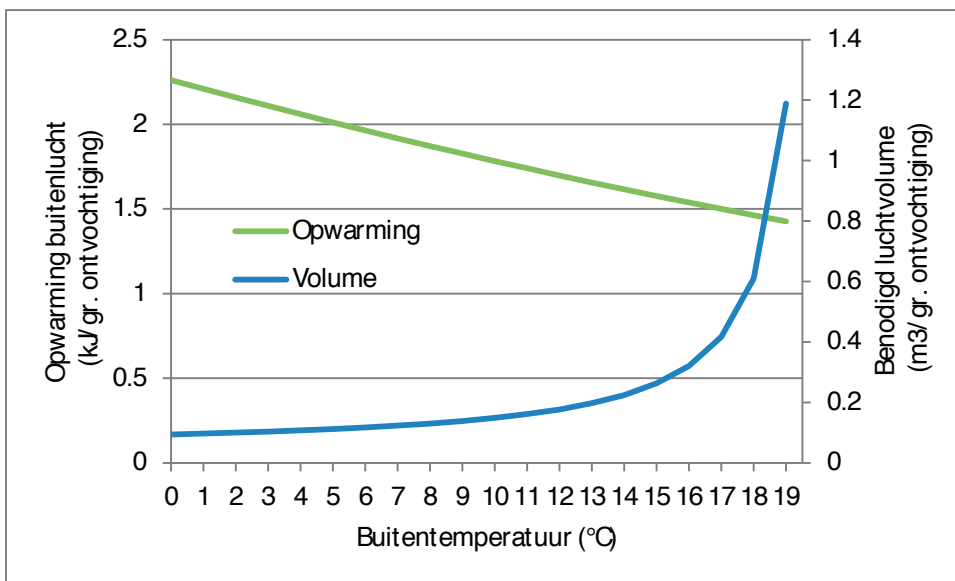


## 2 Vergelijking ontvochtigingsmethoden

In dit hoofdstuk worden drie vormen van kasluchtontvochtiging beschouwd en geanalyseerd: ontvochtigen met buitenlucht, koelen en herverwarmen of toepassing van hygroskopische zoutoplossingen.

### 2.1 Ontvochtigen met buitenlucht

Buitenlucht bevat (vrijwel) altijd minder vocht dan kaslucht. Door kaslucht uit te wisselen met buitenlucht wordt dus vocht afgevoerd, maar ook warmte. Hoe kouder de buitenlucht is, hoe meer energie het herverwarmen van de buitenlucht kost. Hoe warmer de buitenlucht is, hoe meer lucht er moet worden uitgewisseld om een bepaalde ontvochtiging te bereiken (zie Figuur 1.). Naast het afvoeren van warmte wordt ook CO<sub>2</sub> afgevoerd.



Figuur 1. Benodigd luchtvolume en benodigde warmte om met buitenlucht 1 gram vocht uit de kaslucht te onttrekken (kaslucht 20 °C, 85% RV, buitenlucht 85% RV).

#### 2.1.1 Voorbeeld

10 m<sup>3</sup> kaslucht van 20 °C en 85% RV en 1000 ppm CO<sub>2</sub> wordt ieder uur uitgewisseld met buitenlucht van 10 °C, een RV van 85% en 400 ppm CO<sub>2</sub>. Hierbij wordt 67 gram vocht en 10 gram CO<sub>2</sub> afgevoerd. Om tot kastemperatuur te komen is 33 Watt aan (laagwaardige) warmte nodig.

## 2.1.2 Voor en nadelen

Voordeel: Het uitwisselen van kaslucht met buitenlucht is eenvoudig uit te voeren door de luchtramen te openen en de kas te verwarmen.

Nadelen: Bij lage buitentemperaturen dient de buitenlucht nauwkeuriger te worden gedoseerd om niet te veel energie te verliezen, waar vaak een investering (ventilatoren, luchtslangen e.d.) voor nodig is. Het uitwisselen met buitenlucht heeft als belangrijkste nadeel dat er warmte en CO<sub>2</sub> verloren gaan. Ook kan de ontvochtigingscapaciteit tekortschieten bij warm en vochtig weer.

## 2.2 Ontvochtigen door koelen en herverwarmen.

Door kaslucht te koelen tot onder het dauwpunt (dit is de temperatuur waarbij de RV 100% is), wordt water onttrokken uit de kaslucht. Hoe verder de kaslucht wordt teruggekoeld, hoe meer vocht er wordt onttrokken uit de kaslucht. Het inblazen van koude lucht in de buurt van het gewas kan ongewenste gevolgen brengen voor de gewasgroei, zodat met een naverwarmer de kaslucht moet worden opgewarmd.

### 2.2.1 Voorbeeld ontvochtigen door koelen en herverwarmen

Kaslucht van 20 °C en 85% RV heeft een dauwpunt van 17,4 °C. Om 2,6 g/m<sup>3</sup> vocht uit de kaslucht te onttrekken moet de lucht worden teruggekoeld naar 14 °C en weer herverwarmd naar 20 °C. Dit proces kost voor het drogen van 10 m<sup>3</sup>/uur kaslucht ongeveer 38 W aan koelvermogen en 20 W aan verwarming, waarbij 26 gram vocht per uur wordt afgevoerd. De benodigde temperaturen voor koelwater en verwarmingswater zijn afhankelijk van het rendement van de warmtewisselaars, maar in ieder geval lager dan 14 °C, respectievelijk hoger dan 20 °C.

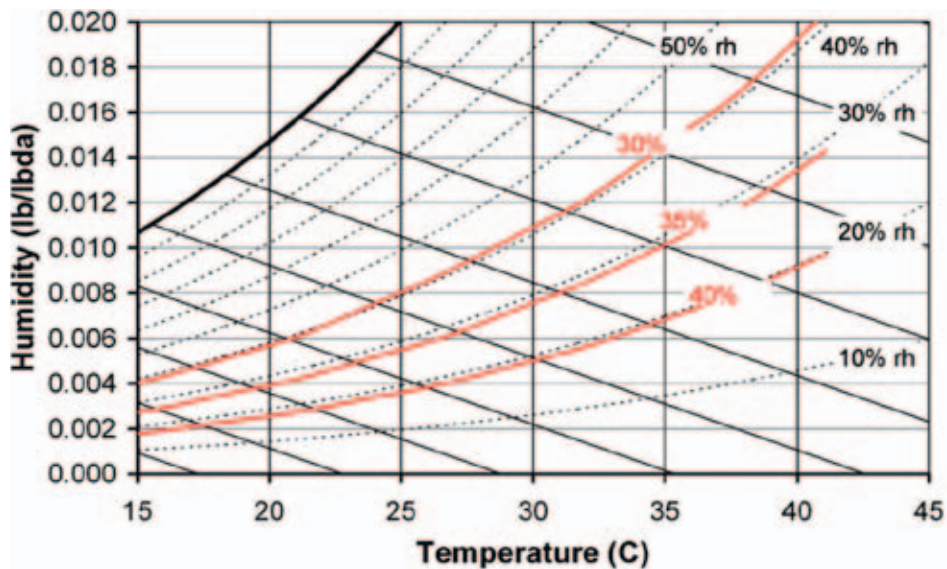
### 2.2.2 Voor en nadelen

Voordeel: Koelen en herverwarmen maakt het ontvochtigen onafhankelijk van de buitenomstandigheden. Hierdoor kan deze vorm van ontvochtiging altijd worden toegepast.

Nadeel: De geoogste warmte heeft een lage temperatuur. Het koelwater wordt niet warmer dan de afgekoelde kaslucht. In bovenstaand voorbeeld zou dat 14 °C zijn. Deze temperatuur moet dan door menging met warmer water worden opgehoogd om een warme bron in de aquifer voldoende te kunnen voeden.

## 2.3 Ontvochtigen door gebruik van een zoutoplossing.

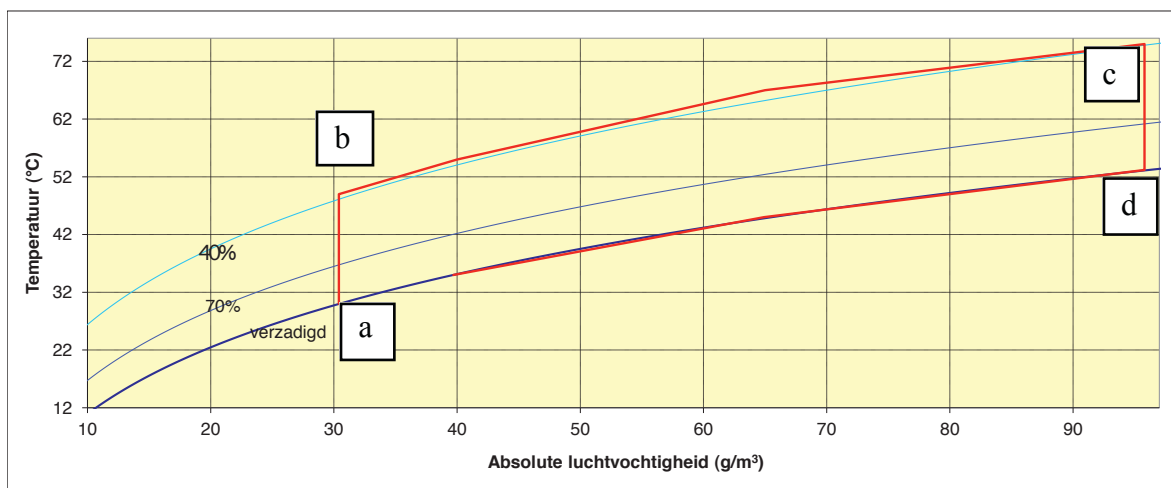
In een zoutoplossing (bijvoorbeeld LiCl of CaCl<sub>2</sub>) kan vocht uit de lucht condenseren bij een hogere temperatuur dan het dauwpunt. Bijvoorbeeld een 30% LiCl zoutoplossing kan lucht drogen tot een RV van ±40%. Een 24% LiCl zoutoplossing droogt maar tot ±55% RV (Zie Figuur 2.). Hierdoor is het niet nodig om de kaslucht diep weg te koelen en hoeft de kaslucht niet noodzakelijk te worden (her)verwarmd.



Figuur 2. Psychrogram voor LiCl oplossing van 30, 35 en 40% (kg LiCl per kg oplossing).

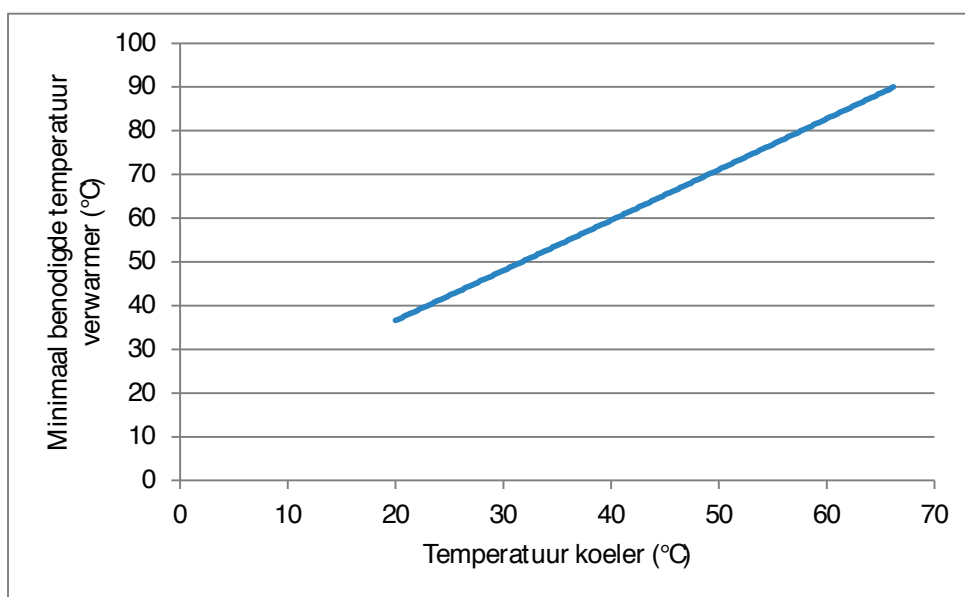
### 2.3.1 Regenereren

Wel moet de gebruikte zoutoplossing worden opgewarmd tot een hoge temperatuur ( $\pm 75$  °C) om het vocht weer uit de zoutoplossing te laten verdampen (regenereren). Om weer een 30% zoutoplossing te verkrijgen moet de lucht die dan langs de zoutoplossing wordt geblazen een RV van minder dan 40% hebben. In Figuur 3. wordt in het Mollier-diagram weergegeven hoe verzadigde lucht van 30 °C (a) wordt opgewarmd door de zoutoplossing. Bij een temperatuur van  $\pm 49$  °C heeft de lucht een RV van 40% (b) en begint vocht op te nemen uit de zoutoplossing. Bij een temperatuur van 75 °C bevat de lucht 96 g/m<sup>3</sup> bij een RV van 40% (c). Door deze lucht af te koelen tot 53 °C wordt het dauwpunt bereikt en begint de condensatie (d). Hoe verder de lucht wordt afgekoeld, hoe meer vocht condenseert per m<sup>3</sup> lucht.



Figuur 3. Cyclus van regeneratie (rode lijn) bij een verwarmingstemperatuur van 75 °C en een koeltemperatuur van 30 °C.

Hoe meer de lucht wordt opgewarmd, hoe lager de RV van de lucht wordt en hoe meer geconcentreerd de zoutoplossing kan worden. Het uit de zoutoplossing verdampende water wordt wederom gecondenseerd door de vochtige hete lucht te blazen langs een in tegengestelde richting vallende stroom koelwater. Hoe kouder dit koelwater is, hoe meer vocht er uit de lucht wordt onttrokken. Hoe dieper dit koelwater kan worden teruggekoeld, hoe droger de lucht wordt die langs het te ontvochtigen zout wordt geleid, en hoe meer vocht uit de zoutoplossing kan worden onttrokken. In Figuur 4. is aangegeven welke verwarmingstemperatuur in de regenerator minimaal nodig is om bij een bepaalde koeltemperatuur een 30% LiCl oplossing te verkrijgen. Hieruit blijkt, dat als de gekoelde lucht in de regenerator kan worden afgekoeld tot 20 °C, deze maar tot ±40 °C hoeft te worden opgewarmd om vocht uit de 30% zoutoplossing op te nemen. Hierbij is uitgegaan van 100% efficiëntie van het regeneratieproces, waar relatief veel tijd en/of vocht verdragend oppervlak voor nodig is. Om het proces te versnellen en het vocht verdragend oppervlak beperkt te houden worden in de praktijk veelal grotere verschillen tussen de verwarmingstemperatuur en de koeltemperatuur aangehouden. In dit verslag wordt uitgegaan van koelwater van 40 °C en verwarmingswater van 75 °C.



Figuur 4. Schatting van de benodigde temperatuur voor de verwarmder van de regenerator bij een bepaalde koeltemperatuur om een 30% oplossing LiCl te kunnen verkrijgen.

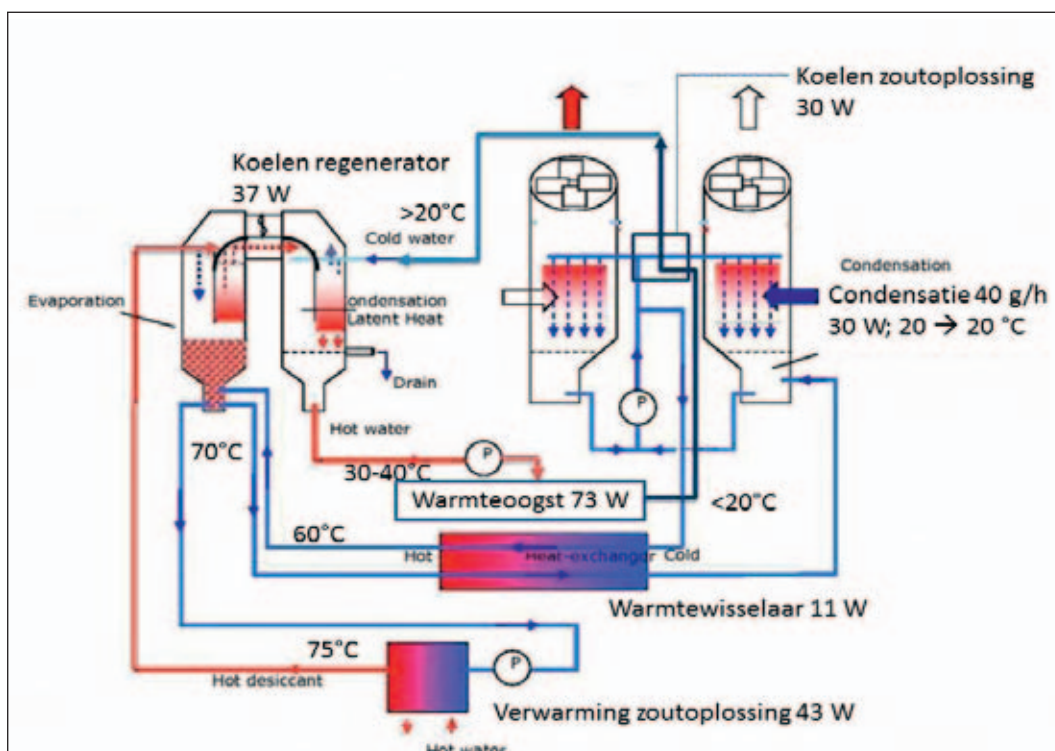
De teruggewonnen warmte uit dit opgewarmde koel- en condensatiewater wordt in de ECC gebruikt om de uitgeblazen lucht verder op te warmen voordat het de kas wordt ingeblazen (zie Figuur 6.). De teruggewonnen warmte kan ook worden gebruikt om de aquifer of (bij een voldoende hoge temperatuur) zelfs een dagbuffer te voeden (zie Figuur 5.).

Ook de zoutoplossing wordt na de regeneratie weer gekoeld, zodat het weer voor ontvochtiging kan worden ingezet. Er kan voor worden gekozen om de zoutoplossing te koelen met ingeblazen kas- of buitenlucht, maar als het wordt gekoeld met koelwater kan het nog meer vocht opnemen. Vocht uit de lucht zal namelijk eerder condenseren tegen een koude zoutoplossing.

## 2.3.2 Voorbeeld ECC bij koeling van de zoutoplossing

Aan dezelfde  $10 \text{ m}^3/\text{uur}$  kaslucht als bij paragraaf 2.1.1 wordt meer vocht ( $4,0 \text{ g}/\text{m}^3=40 \text{ g}/\text{uur}$ ) onttrokken dan als wordt ontvochtigd met alleen een koude spiraal. In dit voorbeeld wordt de vrijkomende condensatiewarmte (30 W) volledig weggekoeld. Het opwarmen van de koude zoutoplossing naar de regenerator ( $\pm 75 \text{ }^\circ\text{C}$ ) gebeurt grotendeels via een warmtewisselaar waarbij warmte wordt onttrokken aan de terugstromende geregenereerde zoutoplossing.

Het uitdampen (regenereren) zelf kost in totaal 43 W aan warmte van minstens  $75 \text{ }^\circ\text{C}$ . Dit is 30 W voor de condensatie/verdampingswarmte en 13 W voor de opwarming van de zoutoplossing. Deze 43 W en de condensatiewarmte (30 W) worden geheel teruggewonnen. Er komt in totaal  $43+30=73 \text{ W}$  aan laagwaardige warmte vrij terwijl er 43 W aan hoogwaardige warmte nodig is. Het systeem heeft daarmee een COP van  $73/43=1,7$  op de warmte-input.

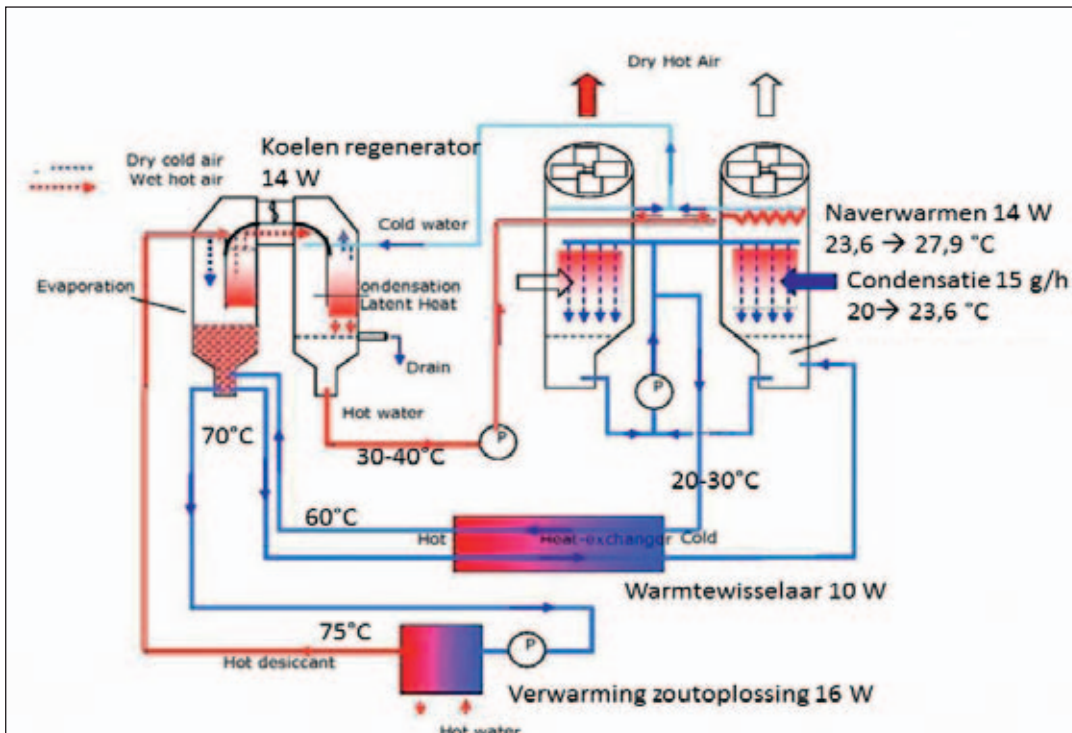


Figuur 5. Schematische voorstelling van het ECC systeem met koeling bij voorbeeldtemperaturen.

### 2.3.3 Voorbeeld ECC bij opwarming van de kaslucht

Aan dezelfde 10 m<sup>3</sup>/uur kaslucht als hierboven wordt nu minder vocht (1,5 g/m<sup>3</sup>=15 g/uur) onttrokken. Warme lucht heeft immers een hoger dauwpunt, dus condenseert er minder vocht in de zoutoplossing. De condensatiewarmte (13 W) wordt niet weggekoeld, maar afgestaan aan de kaslucht waardoor de luchttemperatuur stijgt naar 23,6 °C.

Het opwarmen van de zoutoplossing en het regenereren kost samen ongeveer 18 W aan hoogwaardige warmte. Deze warmte plus de condensatiewarmte (13+18=31 W) komen vrij bij de koeling van het condenswater en bij de opwarming van de kaslucht. De COP blijft  $31/18 = 1,7$  op de warmte-input.



Figuur 6. Schematische voorstelling van het ECC systeem zonder koeling bij voorbeeldtemperaturen.

### 2.3.4 Elektriciteitsverbruik

Zowel bij de ECC, het koelen en herverwarmen als de buitenluchtaanzuiging is een ventilator nodig die lucht door de luchtbehandelingskast blaast. Daarnaast zijn er pompen nodig voor het transport van koud en warm water. Bij de ECC komt daarbovenop nog het transport van de zoutoplossing tussen condensator en regenerator en het blazen van lucht in de regenerator. Hiermee mag worden verwacht dat het elektriciteitsverbruik van de ECC hoger is dan het inblazen van buitenlucht. Bij ECC is ongeveer 1,7 kW nodig om ± 25 kW condensatiewarmte uit de kaslucht te halen. Als de onderdelen van ECC uit elkaar worden gehaald om de regeneratie centraal te laten plaatsvinden, zal waarschijnlijk meer pompvermogen nodig zijn om de zoutoplossing van een naar een centraal punt te verpompen. Mogelijk is er minder ventilatorvermogen voor de regenerator nodig als deze centraal plaatsvindt. Voor de ventilator die kaslucht door de LBK moet blazen zal het weinig uitmaken of deze door een stroom zoutoplossing wordt geleid of door een warme en/of koude spiraal.

### 2.3.5 Verliezen

In principe blijft bij ECC alle energie binnen de kas in de vorm van warmte. De conversieverliezen die bij de verschillende processlagen optreden, bepalen de COP en de benodigde temperatuur voor de regeneratie.

## 2.3.6 Nevenwerkingen

LiCl heeft een ontsmettende werking op de langsstromende kaslucht. Hiermee kan de ziektedruk van schimmelsporen (met name Botrytis en Meeldauw) worden verlaagd. Het is niet bekend in hoeverre de zoutoplossing wordt vervuild door ziektekiemen en stofdeeltjes, zodanig dat de zoutoplossing vaak moet worden gereinigd.

Indien LiCl ontsnapt uit de zoutoplossing, bijvoorbeeld in de vorm van aerosolen, kan het een corrosieve uitwerking hebben op metaal en beton. De leverancier van ECC geeft aan dat geen LiCl uit hun apparaten ontsnapt.

Het ontvochtigen zonder buitenlucht, zorgt ervoor dat minder CO<sub>2</sub> uit de kas ontsnapt, waardoor minder CO<sub>2</sub> hoeft te worden gedoseerd. Daar tegenover staat het risico dat schadelijke gassen, zoals NO<sub>x</sub> of ethyleen, in de kas kunnen accumuleren.

## 2.4 Vergelijking van de ontvochtigingsmethoden

De voorbeelden in de voorgaande paragrafen worden in Tabel 1. naast elkaar gelegd. Buitenlucht blijkt bij voldoende lage buitentemperaturen de grootste ontvochtiging te geven bij de kleinste warmtebehoefte, maar hierbij wordt de condensatiewarmte niet geoogst. ECC met koeling geeft ook een forse ontvochtiging. Er wordt ook veel (laagwaardige) warmte geoogst.

ECC zonder koeling lijkt het meest geschikt op de momenten dat ontvochtiging samenvalt met warmtevraag. De warmte kan dan direct worden ingezet. Koelen en herverwarmen geeft relatief veel warmte-oogst per ingezette hoeveelheid warmte, maar de geoogste warmte heeft een zeer lage temperatuur en behoeft extra verwarming voordat het in een aquifer kan worden opgeslagen.

Tabel 1. Vergelijking van de ontvochtigingsmethoden bij een luchtdebiet van 10 m<sup>3</sup>/h bij ontvochtiging van kaslucht van 20 °C en 85% RV (exclusief elektriciteit).

	Eenheid	ECC met koeling	ECC zonder koeling	Koelen en herverwarmen	Buitenlucht (10 °C)
Uitgaande kasluchttemperatuur	°C	20	23,6	20	20
Onttrokken hoeveelheid vocht	g/m <sup>3</sup> .h	4,0	1,5	2,6	6,7
Benodigde warmte	W	43	18	20	33
Warmtevraag per gram ontvochtiging	W/g/h	1,1	1,2	0,8	0,5
Warmteproductie ± 25 °C	W	73	15		
Warmteproductie ± 14 °C	W			38	
Directe opwarming kaslucht	W		13		
COP		1.7	1.7	1.9	0





### 3 Cases met zoutoplossingen

Om enig inzicht te geven op welke momenten de ECC het best tot zijn recht komt, zijn in Tabel 2. een aantal eenvoudige cases doorgerekend voor belichte tomaat. Voor iedere case is ervan uitgegaan dat de ECC 24 g/m<sup>2</sup>.uur ontvochtigt, waarbij 27 W/m<sup>2</sup> aan warmte vrijkomt. Hiervan is 16 W/m<sup>2</sup> afkomstig van de condensatiewarmte en 11 W/m<sup>2</sup> afkomstig van hoogwaardige warmte (COP =1,7). Uit de tabel blijkt dat tijdens onbelichte nachten te veel wordt ontvochtigd en te weinig wordt verwarmd. Als de ECC dan minder draait zal een alternatieve warmtebron moeten worden gezocht. Bij belichte nachten inclusief isolerend scherm, zal de ECC te veel warmte produceren en te weinig ontvochtigen. In die gevallen kan buitenlucht worden toegevoerd om de extra geproduceerde warmte op te nemen en extra droge lucht aan te voeren.

Tabel 2. Cases van vochtbalans en warmtebalans bij ontvochtiging met ECC (24 g/m<sup>2</sup>.uur ontvochtiging en 32 W/m<sup>2</sup> warmte-aanbod.

Case	Buitentemp (°C)	PAR (μmol/m <sup>2</sup> .s)	k-waarde (W/m <sup>2</sup> .°C)	Verdamping (g/m <sup>2</sup> .uur)	Warmtevraag (W/m <sup>2</sup> )	Warmte-overschot (W/m <sup>2</sup> )	Vochtoverschot (g/m <sup>2</sup> .uur)	Actie
Belicht zonder scherm	-10	160	7	73	151	-124	49	Hoger debiet ECC
Belicht met scherm	-10	160	4	73	61	-34	49	Hoger debiet ECC
Onbelicht zonder scherm	-10	0	7	20	223	-196	-4	Isolatie/Verwarming
Onbelicht met scherm	-10	0	4	20	133	-106	-4	Verwarming
Belicht zonder scherm	0	160	7	73	81	-54	49	Hoger debiet ECC
Belicht met scherm	0	160	4	73	21	6	49	Extra buitenlucht
Onbelicht zonder scherm	0	0	7	20	153	-126	-4	Isolatie/Verwarming
Onbelicht met scherm	0	0	4	20	93	-66	-4	Verwarming
Belicht zonder scherm	10	160	7	73	11	16	49	Extra buitenlucht
Belicht met scherm	10	160	4	73	0	27	49	Extra buitenlucht
Onbelicht zonder scherm	10	0	7	20	83	-56	-4	Isolatie/Verwarming
Onbelicht met scherm	10	0	4	20	53	-26	-4	Verwarming
Belicht zonder scherm	20	160	7	73	0	27	49	Extra buitenlucht
Belicht met scherm	20	160	4	73	0	27	49	Extra buitenlucht
Onbelicht zonder scherm	20	0	7	20	13	14	-4	Lager debiet ECC
Onbelicht met scherm	20	0	4	20	13	14	-4	Lager debiet ECC

#### 3.1 Een jaar doorgerekend bij Lans

Van een geheel kalenderjaar (2009) is ieder uur bij de gesloten kas van Lans bekeken hoe hoog de ontvochtigingsvraag en de verwarmingsvraag is geweest. Hierbij is aangenomen dat er ontvochtigingsvraag is op de momenten dat de RV hoger is dan 85%. Er is verwarmingsvraag verondersteld als de temperatuur van de ingeblazen lucht hoger is dan de temperatuur van de aangezogen lucht in de LBK's.

Door ieder uur op basis van de kascondities, de stand van de buitenluchtklep en de temperatuur van de ingeblazen buitenlucht, uit te rekenen hoe hoog de ontvochtigingsvraag en de warmtevraag zijn, is een schatting gemaakt van het benodigde debiet van de ECC, de benodigde warmte voor de regenerator en de hoeveelheid warmte die direct uit de ECC nuttig in de kas kan worden gebruikt. Daarbij is een debiet voor de ECC gehanteerd, zodanig dat de ECC op jaarbasis in vrijwel de gehele warmtevraag kan voorzien.

Voor een jaar bij Lans zoals in 2009 zijn de volgende uitgangspunten gebruikt:

Luchtdebiet ECC:	6 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .uur
Temperatuur uitgeblazen lucht:	Gelijk aan kastemperatuur
RV uitgeblazen lucht ECC:	62% <sup>1</sup>

Hieruit zijn de volgende kengetallen berekend:

Uren met ontvochtiging:	5967 uur/jaar
waarvan met 100% warmtebenutting:	2590 uur/jaar
Uren vollast ontvochtiging:	3412 uur/jaar
Uren deellast ontvochtiging:	2354 uur/jaar
Verdamping:	837 kg/m <sup>2</sup> .jaar
Ontvochtiging met ECC:	142 kg/m <sup>2</sup> .jaar
Warmtevraag normale kas:	1071 MJ/m <sup>2</sup> .jaar
Vermeden warmtevraag kas <sup>2</sup> :	242 MJ/m <sup>2</sup> .jaar
Warmtevraag ECC:	468 MJ/m <sup>2</sup> .jaar
Direct inzetbare warmte ECC:	571 MJ/m <sup>2</sup> .jaar
Niet direct inzetbare warmte:	252 MJ/m <sup>2</sup> .jaar
Elektriciteit voor WP:	63 MJ/m <sup>2</sup> .jaar
Elektriciteit voor ECC:	24 MJ/m <sup>2</sup> .jaar

Uit deze kengetallen blijkt dat met deze configuratie van de ECC, op jaarbasis bijna twee keer zo veel warmte (822 MJ) in de kas kan worden geleverd als dat aan hoogwaardige warmte is gebruikt (468 MJ). Veel van de warmte (252 MJ) kan echter niet direct worden ingezet. Gedurende 2590 uren kan alle geproduceerde warmte direct worden gebruikt in de kas. Om de niet direct inzetbare warmte (252 MJ) nuttig te gebruiken is een aquifer voor de opslag en een warmtepomp voor de opwaardering nodig. Een warmtepomp met een COP van 5 zal voor het opwaarderen van 252 MJ warmte  $252/(5-1)=63$  MJ aan elektriciteit nodig hebben en daarmee  $252+63=315$  MJ aan warmte produceren. Per saldo kan dus met 468 MJ aan hoogwaardige warmte en 63 MJ (=18 kWh) elektriciteit,  $571+252+63=886$  MJ aan kasverwarming worden geproduceerd. Dit is iets meer dan de warmtevraag minus de vermeden warmtevraag ( $1071 - 242 = 829$  MJ). Doordat er minder vocht hoeft te worden afgevoerd met buitenlucht blijft er overdag 10 kg/m<sup>2</sup> meer CO<sub>2</sub> in de kas. Tegenover het verminderde CO<sub>2</sub>-verlies staat dat ook minder CO<sub>2</sub> kan worden geproduceerd met warmtebronnen.

## 3.2 Economisch rendement

Het verwarmen van een kas met een ketel kost bij een gasprijs van 0,25 €/m<sup>3</sup> ongeveer 8 €/GJ. Met een WKK kan dit veel lager zijn. Als voor de verwarming alleen hoogwaardige warmte kan worden gebruikt, zal het rendement van de ketel lager worden. Dit geldt nog sterker voor een WKK. Daarom is voor de rendementsberekening met een hogere waarde gerekend bij hoogwaardige warmte (8 €/GJ) dan bij laagwaardige warmte (7 €/GJ).

1 Een zoutoplossing van 30% zou in principe kunnen drogen tot 40% RV. Doordat de zoutoplossing vocht opneemt daalt de zoutconcentratie tot ±25%, waardoor slechts tot ±50% RV kan worden gedroogd. Bij proeven met de ECC door Lans is gebleken dat er veel minder vocht condenseert dan berekend is. Hierdoor is bij de simulaties uitgegaan van een hogere (62%) RV van de uitgaande lucht.

2 Doordat minder buitenlucht hoeft te worden aangevoerd voor ontvochtiging, hoeft deze ook niet te worden opgewarmd. De vermeden warmtevraag komt hierbij neer op  $142 \text{ kg/m}^2 \cdot 1.7 \text{ MJ/kg}$  (zie Figuur 1) = 242 MJ/m<sup>2</sup>.

Tabel 3. Economisch resultaat per jaar van het gebruik van ECC ( $6 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{uur}$ ) ten opzichte van ontvochtiging met buitenlucht.

	Eenheid	Besparing (aantal eenh)	Waarde (€/eenheid)	Opbrengsten (€/m <sup>2</sup> .jaar)
Inzet hoogwaardige warmte	GJ/m <sup>2</sup> .jaar	-0.468	8.00	-3.74
Inzet elektriciteit	GJ/m <sup>2</sup> .jaar	-0.087	19.00	-1.66
Warmteproductie	GJ/m <sup>2</sup> .jaar	0.886	7.00	6.20
Vermeden warmtevraag	GJ/m <sup>2</sup> .jaar	0.242	7.00	1.69
Behouden CO <sub>2</sub>	ton/m <sup>2</sup> .jaar	0.010	0.00	0.00
Herbruikbaar water	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .jaar	0.142	2.00	0.28
Resultaat	€/m <sup>2</sup> .jaar			3.24

Met dit positieve resultaat van 3,24 €/m<sup>2</sup>.jaar moet de ontvochtiger, een kleine warmtepomp en een aquifer worden bekostigd. Voor een afschrijvingstermijn van 10 jaar mag een dergelijk systeem samen 25 €/m<sup>2</sup> kosten. Bij een investering van 4 €/m<sup>2</sup> voor de warmtepomp en 8 €/m<sup>2</sup> voor de aquifer betekent dit dat het ontvochtigingssysteem € 13,- per m<sup>2</sup> mag kosten. Dit is overigens zeer afhankelijk van de prijs voor aardgas. Bij deze eenvoudige berekening is geen rekening gehouden met eventuele minderinvesteringen in WKK of verwarmingsketel.

### 3.3 Toepassing alleen koelen en herverwarmen

Het koelen en herverwarmen is vooral geschikt voor bedrijven die veel (hoogwaardige) koude tot hun beschikking hebben, waarbij veel warmte moet worden geogst om de aquifers thermisch in balans te houden. Bovendien kan het systeem verwarmen met behulp van laagwaardige warmte. De teelt moet er een voordeel bij hebben dat de uitgeblazen luchttemperatuur in een brede range is te regelen (tussen 14 en 25 °C). Een groot nadeel bij het koelen en herverwarmen is de lage temperatuur van de geogste warmte. Als de geogste warmte niet direct kan worden gebruikt voor het voeden van de warmtepomp dan moet het worden bijgemengd met warm water voordat het in een aquifer kan worden opgeslagen. In Tabel 4. zijn de gegevens van Tabel 3. berekend voor het geval dat alleen een warmtepomp zonder ECC is aangelegd. Er is gerekend dat tijdens ontvochtiging de kaslucht wordt teruggekoeld tot 13 °C en vervolgens weer wordt herverwarmd tot de kastemperatuur. Bij een gelijk luchtdebiet van  $6 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{uur}$  kan minder worden ontvochtigd dan met ECC (104 i.p.v. 142 mm/jaar) omdat het dauwpunt bij lage kastemperaturen soms maar weinig onder de 13 °C ligt. De warmteproductie en de vermeden warmtevraag liggen daarmee ook lager dan bij de ECC, zodat niet in de gehele warmtevraag kan worden voorzien door de ontvochtigingsinstallatie. Daar staat tegenover dat de installatie ook kan worden gebruikt voor alleen koeling, waardoor meer warmte kan worden geogst. Daar is in Tabel 4. geen rekening mee gehouden.

De warmtepomp en de bronpompen zullen ongeveer 2 keer zo zwaar moeten worden uitgevoerd dan in het geval van ECC omdat alle geproduceerde warmte via de warmtepomp moet worden geleverd. Het resultaat ten opzichte van het ontvochtigen met buitenlucht is 1,77 €/m<sup>2</sup>.jaar. Voor een afschrijvingstermijn van 10 jaar geeft dit een investeringsruimte van 13.7 €/m<sup>2</sup>. Dat is veel minder dan de verwachte investering voor een systeem met LBK's, warmtepomp en bronpompen. Overigens kunnen de elektriciteitskosten een stuk lager worden als de warmtepomp voor ontvochtiging alleen hoeft te draaien tijdens daluren.

Tabel 4. Economisch resultaat per jaar van het gebruik van koelen en herverwarmen ( $6 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{uur}$ ) ten opzichte van ontvochtiging met buitenlucht.

	Eenheid	Besparing (aantal eenh)	Waarde (€/eenheid)	Opbrengsten (€/m <sup>2</sup> .jaar)
Inzet hoogwaardige warmte	GJ/m <sup>2</sup> .jaar	0.000	8.00	0.00
Inzet elektriciteit	GJ/m <sup>2</sup> .jaar	-0.118	19.00	-2.23
Warmteproductie	GJ/m <sup>2</sup> .jaar	0.366	7.00	2.56
Vermeden warmtevraag	GJ/m <sup>2</sup> .jaar	0.176	7.00	1.23
Behouden CO <sub>2</sub>	ton/m <sup>2</sup> .jaar	0.007	0.00	0.00
Herbruikbaar water	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .jaar	0.104	2.00	0.21
Resultaat	€/m <sup>2</sup> .jaar			1.77

### 3.4 Gevoeligheid

De economische haalbaarheid, zoals berekend in paragraaf 3.2 is gevoelig voor verschillende factoren:

De waarde van de benodigde warmte en elektriciteit en de waarde van de geproduceerde warmte. Indien de warmte in de standaard situatie goedkoop kan worden geleverd door de WKK zullen alle investeringen om warmte te besparen minder interessant worden. Indien elektriciteit goedkoop kan worden ingekocht (bijvoorbeeld tijdens daluren) zal het gebruik van de ventilatoren en (warmte)pompen voordeliger worden.

De inkoop van CO<sub>2</sub>. In zowel in paragraaf 3.2 als in paragraaf 3.3 is ervan uitgegaan dat CO<sub>2</sub> geen waarde heeft omdat beide systeem zowel CO<sub>2</sub>-emissie beperken als minder CO<sub>2</sub> beschikbaar hebben. Indien toch extra CO<sub>2</sub> moet worden ingekocht zal dit het rendement van beide systemen doen verlagen.

Elektriciteitsverbruik. In de berekening het elektriciteitsverbruik van de ECC gelijk verondersteld met het inblazen van buitenlucht. Er hoeft immers minder kaslucht te worden rond geblazen, maar wel een zoutoplossing worden rondgepompt en geregenereerd. Indien het elektriciteitsverbruik wel substantieel hoger wordt, zal de investeringsruimte van ECC lager worden.

Het aantal uren waarbij ontvochtiging nodig is. In paragraaf 3.2 is ervan uitgegaan dat ontvochtiging nodig is bij een RV groter dan 85%. Als een hogere RV wordt getolereerd zullen er minder draaiuren nodig zijn en kan minder warmte worden geogst. Als pas boven 87% RV wordt ontvochtigd zal het jaarresultaat dalen van 3,24 naar 2,54 €/m<sup>2</sup>.jaar. De warmte-oogst kan dan nog iets worden verhoogd door een groter luchtdebiet aan te houden. Door dit luchtdebiet te laten stijgen van 6 naar 8 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.uur dan zal het resultaat weer stijgen van 2,54 naar 2,86 €/m<sup>2</sup>.jaar.

De efficiency van de vochtonttrekking van de kaslucht. In de berekeningen is ervan uitgegaan dat de kaslucht na het passeren van de zoutoplossing een RV heeft van 62%. Indien een lagere RV kan worden gerealiseerd zal minder elektriciteit nodig zijn voor het rondblazen van de kaslucht omdat minder volume kaslucht nodig is voor dezelfde ontvochtiging.

De efficiency van de regeneratie. Indien de regeneratie efficiënter wordt, zal minder hoogwaardige warmte nodig zijn of met laagwaardiger en goedkopere warmte worden gewerkt.

De hoeveelheid warmte die nodig is. Hoe minder warmte nodig is in de referentiesituatie, hoe minder energie kan worden bespaard.

### 3.5 Mogelijkheden ECC voor andere teelten

Uit het bovenstaande is gebleken dat ECC het best tot zijn recht komt bij teelten met zowel warmtevraag als ontvochtigingsvraag. Naast de vruchtgroenten wordt verwacht dat een teelt als Phalaenopsis (met zowel afdelingen met een hoge ontvochtigingsbehoefte, als afdelingen met een hoge warmtebehoefte) een geschikte teelt voor ECC zou zijn. Hierbij moet wel een scheiding worden aangebracht tussen de ontvochtiging en de warmteafgifte.

Bij een koud gewas als Freesia zou ECC een toegevoegde waarde kunnen hebben op de momenten dat ontvochtiging kritisch is en niet met buitenlucht of verwarming kan worden uitgevoerd. De absolute energiebesparing zal echter beperkt zijn.

## 4 Conclusies, risico's en aanbevelingen

### 4.1 Conclusies

ECC lijkt een flinke energiebesparing te kunnen leveren ten opzichte van het ontvochtigen met buitenlucht (zowel gangbaar met luchtramen, als via LBK's en luchtslurven). De besparing wordt voor een groot deel veroorzaakt door het terugwinnen van de verdampingswarmte uit de kas. Daarnaast geeft de ontvochtiging zonder buitenlucht een verlaging van de behoefte aan warmte en CO<sub>2</sub>.

Indien alle vrijkomende warmte nuttig kan worden gebruikt loopt de besparing op tot ±50%.

Het economisch rendement van de ECC is sterk afhankelijk enerzijds van de kostprijs van de ingekochte hoogwaardige warmte en elektriciteit en anderzijds van de waarde van de vermeden kosten om de kas te verwarmen. Ook het rendement van de installatie en de veranderingen in de CO<sub>2</sub>-huishouding hebben invloed op het economisch rendement.

De investering in een ontvochtigingssysteem met zoutoplossing levert meer kostenbesparing dan een investering in koeling en herverwarming. Daar staat tegenover dat de laatste installatie ook kan worden ingezet voor kaskoeling. Door beide systemen te combineren met het inblazen van buitenlucht, kan het kasklimaat het hele jaar door energiezuinig worden beheerst.

### 4.2 Risico's

Er is nog weinig bekend over het risico dat LiCl kan ontsnappen uit de luchtbehandelingskast in de vorm van aerosolen. LiCl kan de kas aantasten door corrosie van metalen en het scheuren van beton). Hoewel LiCl niet sterk giftig is dient er wel voor te worden gezorgd dat de medewerkers en het product niet in aanraking hoeven te komen met LiCl.

De leverancier van ECC geeft aan dat het zout niet kan ontsnappen, maar indien er andere uitvoeringen worden uitgetoet zal ervoor moeten worden gezorgd dat dit hier ook niet gebeurt.

### 4.3 Aanbevelingen

Op de momenten dat alleen ontvochtiging en geen verwarming nodig is, moet de geogste warmte worden opgeslagen voor later gebruik. Aangezien de opslag van warmte ten koste gaat van de efficiëntie, komt ECC het best tot zijn recht bij teelten die vaak tegelijkertijd ontvochtiging en warmte nodig hebben.

In dit onderzoek is uitgegaan van een 30% LiCl zoutoplossing. Andere (concentraties) aan zoutoplossingen hebben andere werkgebieden, waardoor bijvoorbeeld met laagwaardiger warmte en kouder koelwater kan worden gegenereerd. Door hier mee te variëren kan het jaarrendement mogelijk verder worden opgeschroefd.

De leverancier geeft aan dat de berekende besparingen nog hoger uit kunnen vallen door verbetering van het proces. Er is dan ook een groot verschil tussen wat in theorie haalbaar is en wat in de praktijk gemeten is. Hiervoor zouden alternatieve ontvochtigingssystemen met centrale regeneratie moeten worden ontwikkeld en in de praktijk getest.





