WAGENINGEN UR
For quality of life

Praktijkexperiment ontvochtigen met zouten

Gebruik en regeneratie van hygroscopisch zout in een kasproef bij Lans Zeeland

Marcel Raaphorst

Productschap Tuinbouw
Kas als Energiebron
Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie

Rapport GTB-1228

Abstract NL

Een proefopstelling waarbij kaslucht wordt ontvochtigd door middel van een zoutoplossing is getest in een praktijkkas. Uit de test bleek dat het systeem in principe voldoende ontvochtigt, waardoor ook warmte kan worden geoogst. Een hogere technische robuustheid en een betere beheersing van de temperatuur en de concentratie van de zoutoplossing zouden de prestaties nog verder kunnen verbeteren.

Abstract UK

A trial set in that can dehumidify greenhouse air by means of a salt solution has been tested in a commercial greenhouse. The test showed that the system dehumidifies sufficiently, whereby also heat can be harvested. A higher technical robustness and increased control of the temperature and the concentration of the salt solution, can improve the performance even further.

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

Wageningen UR Glastuinbouw

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

Inhoudsopgave

	Samenvatting			5
1	Ontvochtigen met een oplossing van Calciumchloride			7
	1.1	Proefopstelling		7
	1.2	Doelstellingen		9
2	Eigenschappen van het systeem			11
	2.1	Ontvochtiging bij de pads		11
		2.1.1	Ontvochtiging	11
		2.1.2	Opwarming lucht en warmte-oogst	11
		2.1.3	Extra weerstand luchtbehandelingskast	11
	2.2	Werking van de regenerator		11
		2.2.1	Oplosbaarheid en ontvochtigingscapaciteit	11
		2.2.2	Vacuümpomp	12
		2.2.3	Condensatie en verdamping	12
		2.2.4	Energieverbruik	13
	2.3	Verlies van calciumchloride		13
		2.3.1	Aerosolen	13
		2.3.2	Condensaat	14
	2.4	Storingen		14
	2.5	Doding van schimmelsporen		15
3	Vergelijking hygroscopische ontvochtiging met Next Generation semi-gesloten kas			17
	3.1	Energiebesparing door terugwinning van verdampingswarmte		18
	3.2	Voorbeeldberekeningen energiebesparing bij Lans		19
	3.3	Investeringskosten		19
4	Conclusies en aanbevelingen			21
	4.1	Conclusies		21
	4.2	Aanbevelingen		21
5	Referenties			23
Bijlage I	Ontvochtiging en regeneratie			25
Bijlage II	Oplosbaarheid van Calciumchloride			28

Samenvatting

Door kaslucht langs een geconcentreerde zoutoplossing te blazen wordt vocht uit de kaslucht onttrokken. Bij dit proces komt warmte vrij dat direct aan de (gedroogde) kaslucht kan worden afgegeven. Met dit principe kan in theorie 50% energie worden bespaard omdat de latente warmte (verdampingswarmte van water) die normaliter wordt afgelucht, nu kan worden gebruikt om de kaslucht te verwarmen. Deze energiebesparing past bij de doelen van het programma Kas als Energiebron, die daarom onderzoek hierover financieel ondersteunt. Bij de gesloten kas van Lans Zeeland is een proefinstallatie van een tralie breed, gedurende een jaar getest door de lucht in de kas te blazen via een padwall met een continu stromende zoutoplossing. Bij dit systeem is de zoutoplossing geregenereerd (gedroogd) door middel van een vacuümverdamper en een warmtepomp, waarbij het uitgedampte water en de daarbij vrijkomende energie weer wordt teruggewonnen.
Hoewel de proefopstelling wegens enkele technische moeilijkheden niet het hele jaar heeft kunnen draaien, zijn er wel conclusies uit het onderzoek te trekken.
Naar aanleiding van de proefresultaten kunnen de volgende conclusies worden getrokken.

- Uit de lucht kon 1 à 1,5 g/m^3 aan vocht worden onttrokken. Met een luchtdebiet van 28 m^3/m^2.uur moet het systeem dan minstens 2600 uren draaien om 12 m^3/m^2 ae. per jaar te besparen.
- Een vacuümverdamper is geschikt om in te zetten als regeneratiemethode. Wel moet het materiaal bestand zijn tegen corrosieve vloeistoffen.
- Via de padwalls komt geen meetbare hoeveelheid $CaCl_2$ in de ingeblazen lucht terecht. Ook is op de ventilatoren geen $CaCl_2$ aangetroffen.
- Het benutten van de gewonnen warmte is in het beproefde systeem nog niet regelbaar gemaakt. Bij de padwall komt daardoor vrijwel alle condensatiewarmte direct in de kaslucht terecht en de warmte die vrijkomt bij de regenerator wordt afgevoerd om de aquifer op te warmen.
- De padwall geeft een lichte reductie van de sporendruk van Botrytis. 30 tot 50% van de sporen worden gedood.
- Aangezien de beproefde afdeling niet gescheiden was van de rest van de kas, is geen invloed op het kasklimaat gevonden. Wel mag worden aangenomen dat de ingeblazen lucht bij de padwalls warmer en droger is geweest dan bij de overige luchtslurven. Ook is het langer sluiten van het scherm niet beproefd.
- Het elektriciteitsverbruik van de regenerator is nog aan de hoge kant. Dit kan worden verklaard door de kleinschaligheid en de leeftijd van het systeem.
- Het verlies van zouten aan de lucht in de vorm van aerosolen is zeer gering. Het verlies van zouten aan het condensaat uit de regenerator is ongeveer 0,05 kg/dag. Dit kan worden verminderd door het hoog opspatten van vloeistof in het vacuümvat te voorkomen.
- De vraag of een ontvochtigingssysteem met zoutoplossingen te prefereren is boven een semi-gesloten kassysteem met koeling en herverwarming, hangt vooral af van de prijs en beschikbaarheid van elektriciteit en/of hoogwaardige warmte. Beide systemen hebben de potentie om de kaslucht te ontvochtigen met terugwinning van even veel condensatiewarmte, waarbij het zoutoplossingssysteem zou kunnen volstaan met alleen warmte als energievoorziening.

Door de ontvochtigingscapaciteit te verhogen van 1 à 1,5 g/m^3 tot bijvoorbeeld 4 g/m^3 kan met een veel kleiner (10 m^3/m^2.uur) luchtdebiet worden volstaan om op jaarbasis voldoende warmte te oogsten. Voor een hogere ontvochtigingscapaciteit zal het nodig zijn om de temperatuur en de zoutconcentratie van de zoutoplossing beter te beheersen.

1 Ontvochtigen met een oplossing van Calciumchloride

Uit een studie over een ontvochtigingssysteem met Lithiumchloride [Raaphorst, 2011], is gebleken dat het ontvochtigen van kaslucht met een zoutoplossing perspectieven kan bieden voor de glastuinbouw. In theorie zou zelfs een energiebesparing kunnen worden behaald van 50% indien alle verdampingswarmte kan worden teruggewonnen. Daarom is het glastuinbouwbedrijf Lans in 2012 gestart met een proef, gefinancierd door het programma Kas als Energiebron, waarin dit systeem is getest.

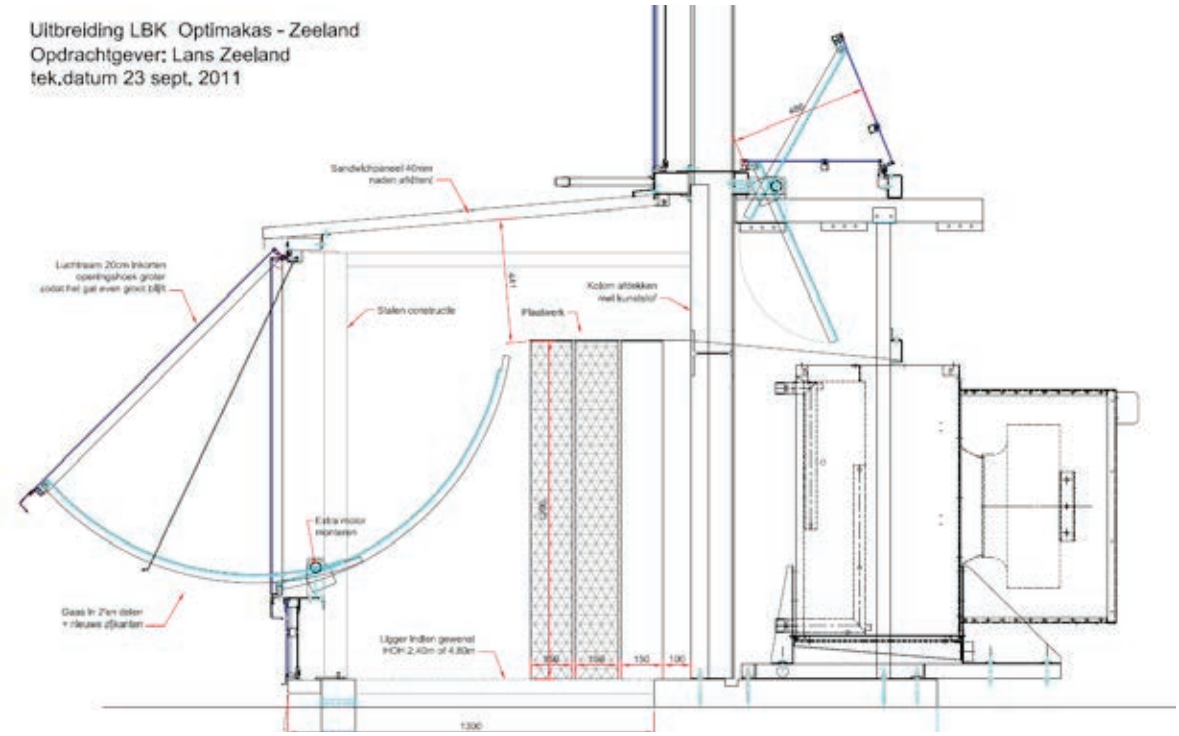
1.1 Proefopstelling

Bij Lans Zeeland in Rilland is 1 tralie (8*130 meter) aangepast om daar de kaslucht te ontvochtigen met een zoutoplossing van Calciumchloride. Hiervoor is de bestaande luchtbehandelingskast uitgebreid met een 'gaasboxx' padwall waarover de zoutoplossing stroomt en de door de padwall stromende lucht wordt ontvochtigd. http://www.gaasboxx.nl/

Figuur 1. Padwall in luchtbehandelingskast met draadloze sensor aan ketting.

In Figuur 2. is een conceptschema van de uitbreiding van de luchtbehandelingskast weergegeven. De uitbreiding betekent niet alleen dat er door de zoutoplossing drogere en warmere lucht in de kas wordt geblazen, maar ook dat er relatief meer buitenlucht dan kaslucht wordt aangezogen. De kaslucht moet immers een langere weg afleggen om in de mengkamer te komen en zal meer weerstand ondervinden dan toen er nog geen uitgebouwde LBK met padwall was. Aangezien juist aan kaslucht meestal meer valt te ontvochtigen dan aan buitenlucht, wordt de kasluchthoeveelheid door de pads vergroot door de klep vanuit de kas altijd wijd open te houden. Dat dit effect heeft op de verhouding tussen kaslucht en buitenlucht, blijkt uit de temperatuurmetingen van draadloze sensoren. Hierbij bleek te luchttemperatuur voor de padwall (zie Figuur 1.) vrijwel altijd dezelfde temperatuur te hebben als de aangezogen lucht uit de kas, ongeacht de klepstand voor de buitenlucht. Blijkbaar wordt door de overdruk in de gesloten kas vrijwel alleen kaslucht aangezogen.

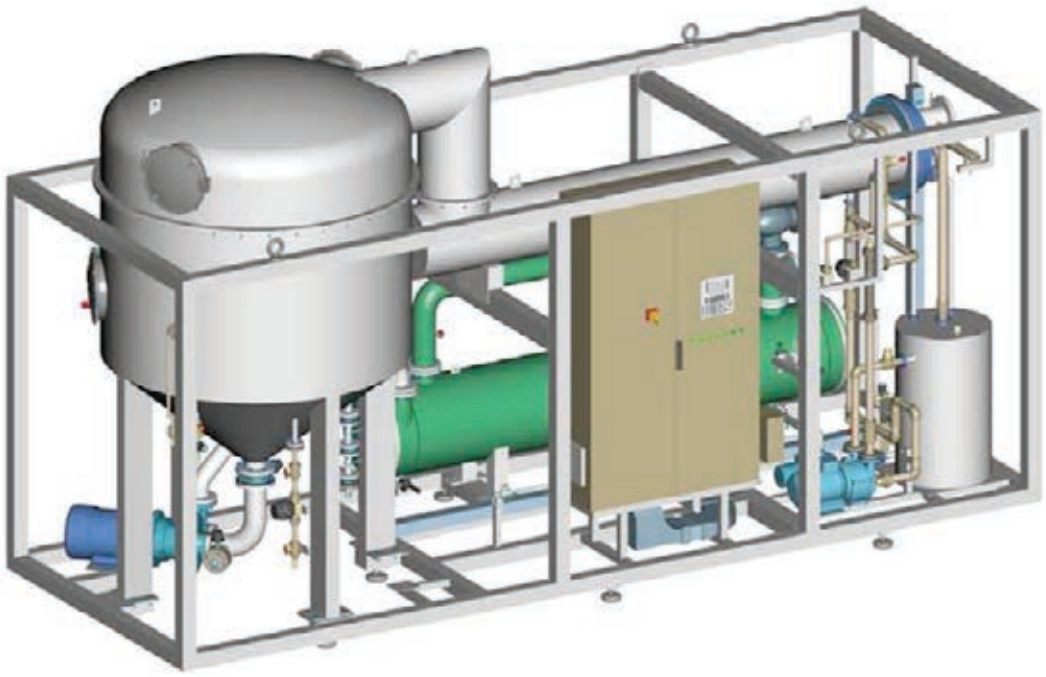
De lucht kan nog worden naverwarmd door het reeds aanwezige verwarmingssysteem in de luchtbehandelingskast. Als het systeem alleen nodig zou zijn voor ontvochtiging, zou deze naverwarming niet nodig zijn en kan de lucht worden opgewarmd door condensatie op de zoutoplossing.



Figuur 2. Bouwschema van de uitgebouwde luchtbehandelingskast met padwall (Bomkas).

Als de zoutoplossing te veel verdund is met het gecondenseerde vocht, wordt het gepompt naar een regenerator. Deze regenerator bestaat onder andere uit een elektrische warmtepomp die zorgt voor opwarming van de zoutoplossing en afkoeling (condensatie) van het uitgedampte vocht. De uitdamping van vocht uit de zoutoplossing kan bij een lage temperatuur gebeuren omdat er gebruik wordt gemaakt van een vat dat met vacuumpomp onder zeer lage druk wordt gehouden (zie Figuur 3.). Om de kosten van het project te drukken is gekozen voor een kleine tweedehands regenerator. Deze is niet zozeer gebouwd om specifiek calciumchloride te drogen, maar kan hiervoor naar verwachting minstens enkele jaren worden ingezet. Daarna zal kan het RVS teveel beschadigd raken door corrosie.

Figuur 3. Kokende zoutoplossing bij 40 °C in het vacuümvat.



Figuur 4. Opstelling van de regenerator.

1.2 Doelstellingen

De projectdoelstelling bestaat uit de beantwoording van de volgende deelvragen:

Algehele doelstelling

- Een goed werkend systeem ontwikkelen leidend tot een praktisch haalbare energiebesparing van ≥ 30% met behoud/verbetering van teelt- en fytosanitair klimaat.

Energetische doelstellingen

- een capaciteit van maximaal 2 liter/m^2.dag water te condenseren;
- minimaal 12 m^3/m^2.jaar gas daadwerkelijk besparen.
- daarmee minimaal 22 kg/m^2.jaar CO_2 reductie behalen

Technische doelstellingen

- Bepaling of vacuümverdamping als regeneratiemethode met voldoende rendement(behoud) en bedrijfszekerheid kan worden ingezet, niet alleen binnen het ontvochtigingssysteem als subsysteem, maar ook optimaal inpasbaar/afstembaar is binnen de totale energie-infrastructuur van een teeltbedrijf. Uitdrukkelijk blijven alternatieve methoden (verdamping met ketelwarmte; elektrochemische depositie) vooralsnog in beeld.
- Bepaling of er geen $CaCl_2$-sporen (aerosolen) in de kaslucht worden geblazen, de zoutoplossing voldoende hygroscopische werking vertoont onder de relevante kascondities en niet neerslaat op het gewas. CaCl2 is vanuit een zoutenonderzoek onder meer statische omstandigheden, uitgevoerd bij Lans, als beter alternatief voor LiCl naar voren gekomen
- Bepaling hoeveel gewonnen warmte optimaal kan worden benut
- Afleiden van de massa-energiebalans ter optimalisatie van plaats/hoeveelheid condens en verdampingsunits in 1.100 m^2 kas.

Teelttechnische doelstellingen

- Bepaling van de fytosanitaire gevolgen (ziektedruk; schimmelreductie; kiembestrijding).
- Bepaling van de gevolgen voor de verticale temperatuurverdeling in de kas.

- Werking bij volledig gesloten scherming t.b.v. uitbannen ‘kieren’.
- Latere transpositie naar mogelijkheid ‘semi-gesloten’ en ‘open’ kassen maximaal openhouden.

Sectorale doelstellingen
- Perspectief voor collega’s en sector bieden.
- Verbetering/versterking imago.

Overige doelstellingen
- minimaliseren lichtuitstoot: bij het kunnen handhaven van een optimaal klimaat bij volledig gesloten scherm komt het uitbannen van het ‘kiertrekken’ binnen handbereik, maar eveneens een uitbreiding van de verplichte lichtschermingsuren.
- Het totale investeringsbedrag voor het gehele systeem(inclusief warmtepomp en aquifers) maximaal uit te laten komen op € 25,- per m^2.
- Een economisch-technisch ontwerp systeem ontwikkelen voor de tuinbouwsector.

2 Eigenschappen van het systeem

2.1 Ontvochtiging bij de pads

2.1.1 Ontvochtiging

In Bijlage 1 is het verloop weergegeven van onder andere de luchtvochtigheid in de slurf. Hieruit bijkt dat de RV in de slurf zelden lager is dan 70%. Uitgaande van de kasRV, die tussen 80 en 85% bedraagt, is de gemiddelde ontvochtiging uitgekomen op 1,28 g/m^3. De ventilator heeft vrijwel altijd op 60% gestaan. Dit is een debiet van 28 m^3/m^2.uur, ofwel 130*8*28=29000 m^3/uur.
Er wordt dus dus 1,28*29=37 liter/uur onttrokken. Gedurende 829 uur is dat 30700 liter. Het logboek meldt 28700 liter condensaat gedurende deze periode. Dit komt vrij goed overeen met de hierboven berekende ontvochtiging.

Bij een zoutconcentratie van 41% condenseert water uit lucht met een temperatuur van 15 °C en een RV van 38%. De lucht bevat dan nog 4,9 g/m^3 aan vocht.
Tijdens de proef werd minimaal 8,6 g/m^3 vocht gerealiseerd bij een temperatuur van 13,6 °C. Dit betekent dat de ontvochtiging in potentie veel hoger zou kunnen worden dan tot op heden is bereikt, bijvoorbeeld door een hogere concentratie aan calciumchloride, een lagere temperatuur van de zoutoplossing of een langere weg die de lucht door de pads moet afleggen.

2.1.2 Opwarming lucht en warmte-oogst

De lucht wordt tijdens de ontvochtiging met gemiddeld 1 °C verwarmd, terwijl bij de condensatie van 1,28 g vocht voldoende energie vrijkomt om een m^3 lucht met ±2,5 °C op te warmen. De overige warmte wordt blijkbaar opgenomen door de (gekoelde) zoutoplossing en kan als warmte-oogst worden aangemerkt.

2.1.3 Extra weerstand luchtbehandelingskast

Door pads te plaatsen in de luchtbehandelingskast, wordt de luchtweerstand verhoogd. Metingen aan de luchtslangen gaven echter geen kleiner luchtdebiet aan ten opzichte van de luchtslangen zonder pads. De luchtweerstand in de pads is blijkbaar verwaarloosbaar klein ten opzichte van de totale luchtweerstand in luchtslang en LBK.

2.2 Werking van de regenerator

2.2.1 Oplosbaarheid en ontvochtigingscapaciteit

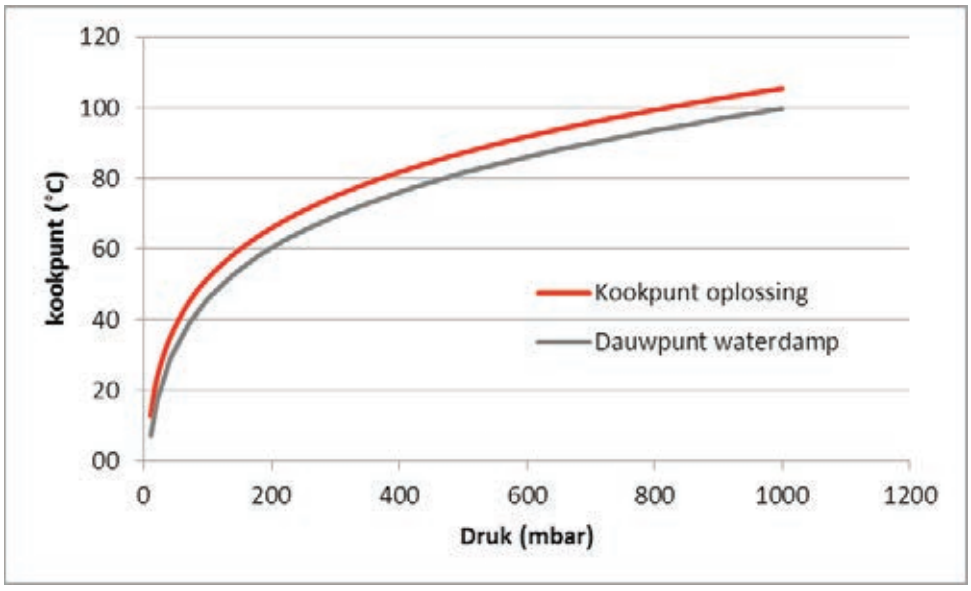
De ontvochtigingscapaciteit is afhankelijk van het dauwpunt van de lucht en van de concentratie aan Calciumchloride in de zoutoplossing. De maximaal haalbare concentratie van calciumchloride is afhankelijk van de temperatuur (zie Bijlage 2). Bij 15 °C kan maximaal 41% calciumchloride opgelost worden in water.

Een hogere concentratie van calciumchloride wordt beperkt door de oplosbaarheid in water (zie Bijlage 2). Zo vindt bij een temperatuur van 20 °C al kristallisatie plaats bij een concentratie van 42% (=74 gram per 100 gram water), terwijl dat bij 42 °C pas bij een concentratie hoger dan 57% (130 gram per 100 gram water) kristallisatie plaatsvindt.

Eventueel kan de ontvochtigingscapaciteit van de zoutoplossing met $CaCl_2$ iets worden verbeterd door dit te mengen met andere zouten. In een onderzoek hierover [Hassan en Hassan, 2008] gaf een concentratie van 50% $CaCl_2$ en 20% $CaNO_3$ de laagste dampdruk van de geteste zoutmengsels.

2.2.2 Vacuümpomp

Door gebruik te maken van een vacuümpomp wordt het temperatuurwerkgebied van de regenerator verlaagd. Dat betekent dat zowel het kookpunt als het condensatiepunt (dauwpunt) wordt verlaagd. Het verschil tussen dit kookpunt en dauwpunt is onafhankelijk van de druk en wordt vrijwel volledig bepaald door de concentratie van de zoutoplossing. Bij een oplossing van 500 g/l is het temperatuurverschil 5,8 °C (zie Figuur 5.).



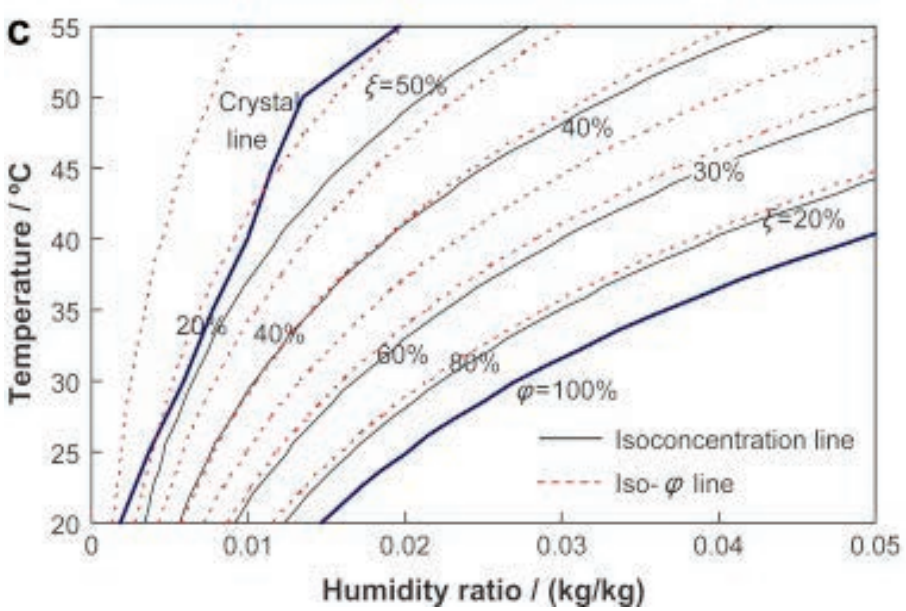
Figuur 5. Kookpunt van de zoutoplossing (500 g/l) en dauwpunt van waterdamp, afhankelijk van de druk in een vacuümvat.

De lage druk verlaagt de hoeveelheid energie die nodig is om het water te verdampen uit de zoutoplossing en de energie die vrijkomt bij de condensatie. Bij lage druk is het vat vrijwel volledig gevuld met waterdamp en is er slechts weinig lucht aanwezig. Deze lucht hoeft dus niet te worden opgewarmd tijdens het uitdampen en hoeft niet te worden afgekoeld bij het condenseren. Bij druk van 50 mbar zal de warmte voor het opwarmen en afkoelen van lucht verminderen van ±1800 tot ± 100 Joule per gram ontvochtigde lucht (zie ook paragraaf 3.1).

Ook verlaagt de lage druk de temperatuur die nodig is om de verdamping op gang te brengen. Dit betekent ook dat er een lagere temperatuur nodig is om condensatie te realiseren. In principe zou bijvoorbeeld bij een druk van 0,02 bar, de zoutoplossing kunnen uitdampen bij 24 °C terwijl er condensatie (destillatie) plaatsvindt bij 17 °C. Bij deze kleine temperatuurverschillen zal het regeneratieproces langzaam verlopen. Om de regeneratie te bespoedigen kan met hogere temperaturen worden verwarmd en/of met lagere temperaturen worden gekoeld.

2.2.3 Condensatie en verdamping

Condensatie en verdamping, of eigenlijk binding en ontbinding van waterdamp aan de zoutoplossing, is afhankelijk van de concentratie van de zoutoplossing, de temperatuur en de vochtigheid van de lucht. In Figuur 6. blijkt dat de lijn met een zoutconcentratie van 30%, vrijwel gelijk loopt met een RV van ±65%, terwijl een zoutconcentratie van 40% al bij lucht met een RV vanaf 40% tot condensatie leidt.



Figuur 6. Relatie tussen $CaCl_2$-concentratie en evenwichts-luchtvochtigheid in een psychro-diagram [Liu et al. 2009] 1.

2.2.4 Energieverbruik

De meeste elektriciteit is nodig voor de regeneratie van het zout. Het elektriciteitsverbruik van de regenerator is 25 kW. De regenerator heeft in de bovengenoemde periode 278 uur gedraaid. Dit is dus een elektriciteitsverbruik van 25*278 kWh ofwel bijna 7 MWh, wat neerkomt op 6 kWh/m^2.maand.
7 MWh per 30000 liter betekent dat voor iedere eenheid teruggewonnen verdampingsenergie 0,35 eenheden elektrische energie nodig is. Dat komt neer op een COP van 2,9. Deze lage COP is waarschijnlijk veroorzaakt door de kleinschaligheid en de leeftijd van de regenerator.
In een grootschalige opzet kan overigens voor het uitdampen beter geen gebruik worden gemaakt van een warmtepomp, maar van restwarmte uit bijvoorbeeld een WKK.

2.3 Verlies van calciumchloride

2.3.1 Aerosolen

Om na te gaan in hoeverre calciumchloride vanaf de pads in de vorm van aerosolen wordt afgegeven aan de langsstromende lucht, is gedurende een week lucht van voor de pads en uit de luchtslangen opgevangen in een vloeistof (zie Figuur 7.), waarna deze vloeistof is geanalyseerd op de aanwezigheid van Ca^{2+} en Cl^--ionen. Uit de meting is nauwelijks verschil aangetoond (±1 µg/m^3) tussen de lucht uit de slangen en de buitenlucht. Bij 1 µg/m^3 zou gedurende 3000 draaiuren ongeveer 92 gram calciumchloride via aerosolen zijn ontsnapt.

1 In Figuur 6. is een kristallisatielijn weergegeven die niet overeenkomt met de lijnen in Bijlage 2. Daar blijkt bij een temperatuur van 20 °C nog een concentratie van 50% mogelijk te zijn.

Figuur 7. Meetopstelling calciumchloride in lucht uit de slurf.

Aan het einde van de teelt in september zijn ook de ventilatoren en het verwarmingselement in de LBK gecontroleerd op zoutaanslag. Er is geen zout aangetroffen.

2.3.2 Condensaat

Het condensaat dat uit de regenerator wordt gewonnen kan in theorie doorgaan voor gedestilleerd water, maar blijkt in de praktijk nog wel zout te bevatten. Door het opborrelen in het vacuümvat (zie Figuur 3.) kan er $CaCl_2$ boven in het vacuümvat tussen het condensaat terechtkomen. Hierdoor kan de EC van het condensaat oplopen van 0,1 tot incidenteel 1.
Indien er gedurende 100 dagen van 10 uur 100 liter per uur aan condensaat is gewonnen met een EC van 0,2, dan betekent dat het verlies via het condensaat kan oplopen tot ongeveer 1 mmol/l $CaCl_2$ *100000 l = 100 mol $CaCl_2$. Dit is gelijk aan 100 mol * (40+ 71) g/mol=11 kg $CaCl_2$.
De hoeveelheid zoutverlies zou kunnen worden voorkomen door het opspattende zout in de kokende regeneratortank tegen te houden

2.4 Storingen

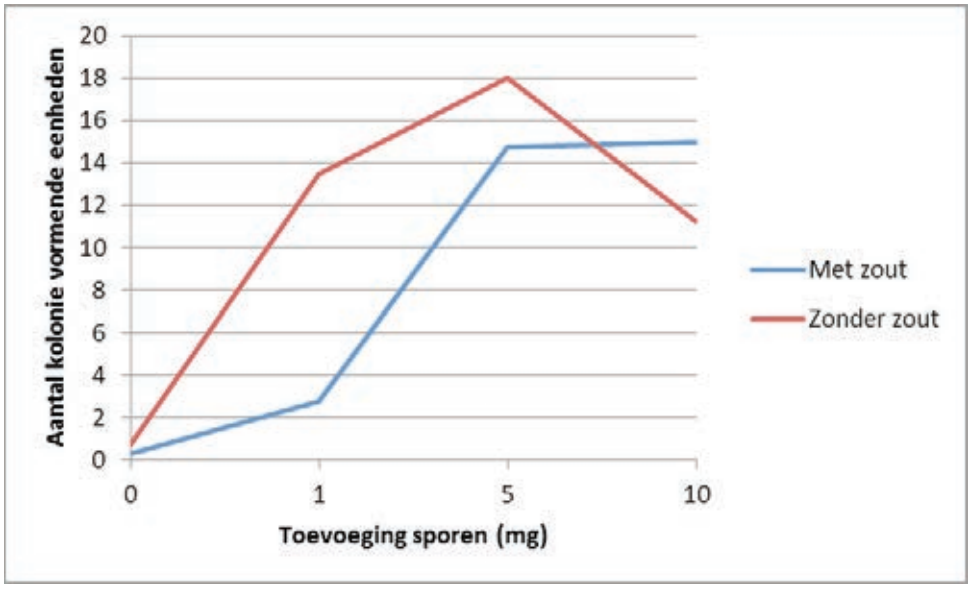
Tijdens het praktijkexperiment zijn verscheidene storingen opgetreden. De belangrijkste worden hieronder genoemd.

- De leidingen raakten tijdens stilstand soms verstopt door kristallisatie. Dit kan zijn veroorzaakt doordat de regenerator een hoge zoutconcentratie in de leiding heeft gepompt. Na afkoeling van deze oplossing vindt dan kristallisatie van de zouten plaats (zie paragraaf 2.2.1).
- De warmtewisselaar in de regenerator raakte beschadigd door putcorrosie. Deze is gerepareerd. Overigens is dit te verklaren door het materiaal (RVS 304 en RVS 316), dat niet geschikt is om op lange termijn in contact te komen met calciumchloride. Super duplex of titanium zou hiervoor geschikter zijn.
- Door lekkage raakt calciumchloride verloren waardoor de voorraad zoutoplossing enkele malen moest worden aangevuld. Een zeer klein deel van de lekkage kan worden verklaard door het condensaat (zie paragraaf 2.3.2). Het restant van de lekkage blijkt te zijn opgetreden door een lekkende recirculatie onder de padwall.
- De sproeipomp die de zoutoplossing over de pads moet verdelen is (mogelijk door kristallisatie) defect geraakt en vervangen.

De storingen zijn hoofdzakelijk veroorzaakt door gebrek aan ervaring en het gebruik van tweedehands materiaal.

2.5 Doding van schimmelsporen

Bij aanvang van het project werd vermoed dat een hoog geconcentreerde zoutoplossing een dodende werking zou kunnen hebben op schimmelsporen zoals Botrytis. Daarom zijn in september (oud gewas, vochtig klimaat) luchtmonsters uit de luchtslang over voedingsbodems (petri-schaaltjes) geleid. De monsters zijn genomen tijdens zowel draaiende als een stilstaande zoutoplossingspomp, en er zijn ook Botrytissporen toegevoegd.
Nadat deze voedingsbodems enkele dagen onder ideale groeiomstandigheden zijn gezet, is geteld hoeveel Botrytis koloniën er zijn gevormd. Uit Figuur 8. blijkt dat de zoutoplossing een dodende werking heeft op de Botrytissporen, al wordt zeker niet 100% gedood. Bij het toevoegen van 10 mg Botrytissporen bleken er bij de situatie zonder zoutoplossing zelfs minder sporen te zijn opgevangen. Omdat dit zelfs minder is dan bij het toevoegen van 5 mg is deze meting mogelijk te wijten aan een tijdelijke foutieve dosering van de sporen. Gemiddeld genomen over alle metingen geeft de zoutoplossing een doding van 31% van de Botrytissporen. Indien de meting met 10 mg sporentoevoeging wordt weggelaten is de gemiddelde doding gelijk aan 52%.



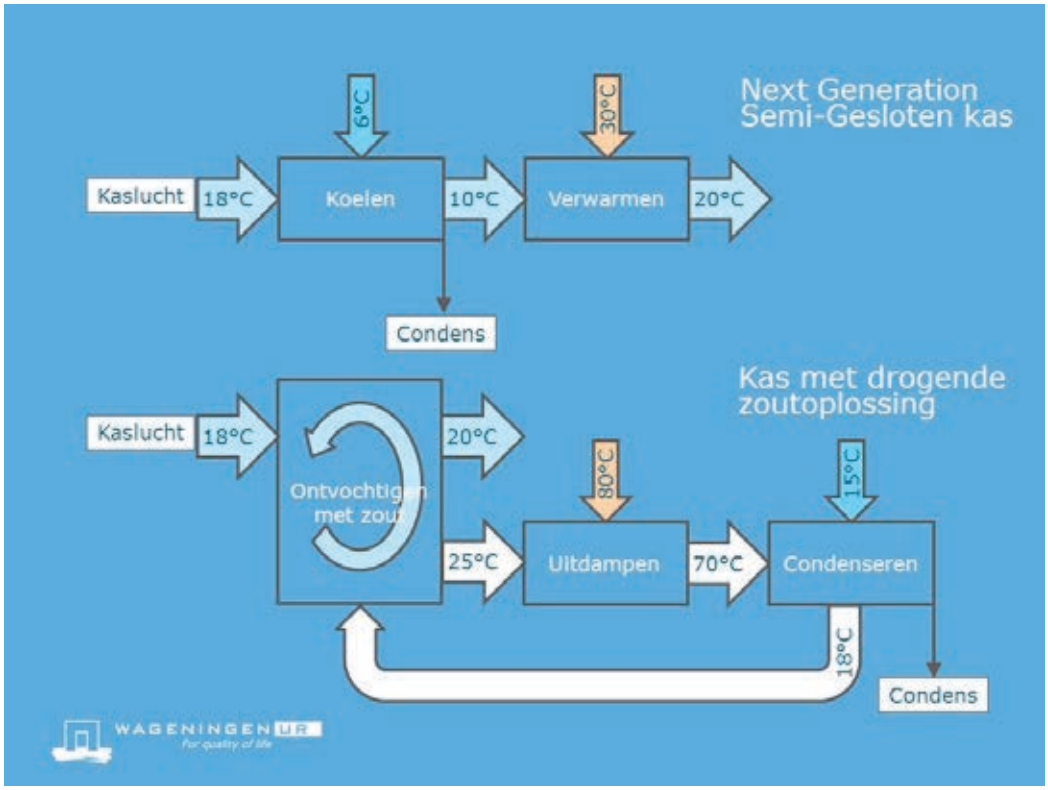
Figuur 8. Aanwezigheid van Botrytis in de luchtslang bij wel of geen zoutoplossing en bij verschillende hoeveelheden aan gedoseerde Botrytissporen.

Discussie
De hierboven genoemde dodingspercentages van 31% respectievelijk 52% moeten worden gezien als grove aanwijzingen dat de zoutoplossing enige dodende werking heeft, maar zeker geen garantie geeft voor Botrytisvrije lucht.

3 Vergelijking hygroscopische ontvochtiging met Next Generation semi-gesloten kas

In principe is het ontvochtigen met zouten te vergelijken met het ontvochtigen door koeling en herverwarming (Next generation semi-gesloten kas) [de Gelder *et al.* 2012]:

- Bij beide systemen wordt alle verdampingswarmte teruggewonnen in de vorm van laagwaardige voelbare warmte.
- In de zomerperiode is het voor beide systemen lastig om de bij condensatie vrijkomende warmte direct te benutten. Deze warmte moet dan in een seizoensbuffer worden opgeslagen.
- Bij beide systemen wordt water teruggewonnen door condensatie op een relatief koude oppervlak. Bij de hygroscopische ontvochtiging ligt de temperatuur waarbij water condenseert (dauwpunt) in de regenerator wel hoger dan bij kaslucht.
- In Figuur 9. worden de belangrijkste verschillen weergegeven. Bij het systeem "gesloten kas" wordt gekoeld en verwarmd bij relatief lage temperaturen (6 respectievelijk 30 °C) en bij het systeem "zoutoplossing" bij relatief hoge temperaturen (15, respectievelijk 80 °C). Overigens kan het verschil tussen verwarmingstemperatuur en koeltemperatuur kleiner zijn dan in dit voorbeeld. In ieder geval moet het verschil tussen de verwarmingstemperatuur en koeltemperatuur bij een gesloten kas groter zijn dan kastemperatuur - dauwpuntstemperatuur (± 3 °C) en bij zoutoplossing groter zijn dan 5,8 °C (zie Figuur 5.). Om het warmteoverdragend oppervlak beperkt te houden wordt in de praktijk echter met (veel) grotere temperatuurverschillen gewerkt.



Figuur 9. Een voorbeeld waarbij kaslucht wordt ontvochtigd en tot 20 °C verwarmd met hetzij koeling en herverwarming (gesloten kas) hetzij met behulp van een zoutoplossing.

- Aangezien buitenlucht vaak koud genoeg is om te zorgen voor condensatie tijdens de regeneratie van de zoutoplossing, kan bij het systeem "zoutoplossing" worden volstaan met thermische energietoevoer voor het uitdampen. Bij het systeem "gesloten kas" moet bij een lagere temperatuur worden gekoeld, dus is elektriciteit nodig voor de energievoorziening. Hierbij ligt een warmtepomp voor de hand omdat deze zowel koude als warmte kan leveren. Overigens is het systeem "zoutoplossing" ook uit te voeren met koeling. Door de zoutoplossing verder te koelen en daardoor warmte te oogsten kan de ontvochtigingscapaciteit worden vergroot.
- De temperaturen die worden gehanteerd om de zoutoplossing te regenereren (verwarmen van de oplossing en koelen van de damp) kunnen worden gevarieerd door gebruik te maken van een vacuümpomp. Deze variatie is niet mogelijk

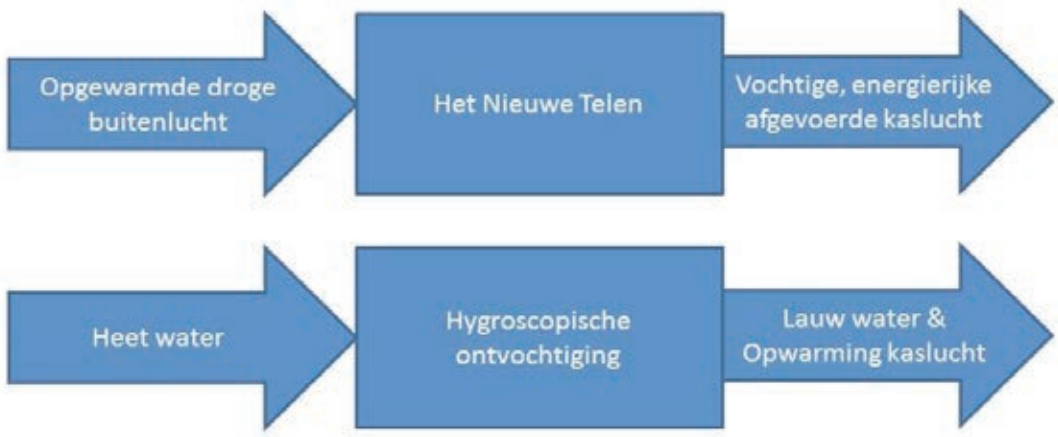
bij het direct koelen en herverwarmen van kaslucht en biedt bredere toepassingsmogelijkheden voor het ontvochtigen met een zoutoplossing.
- Gewassen die bij een lage temperatuur worden geteeld, kunnen nauwelijks worden ontvochtigd met behulp van koelen en herverwarmen, omdat zo diep moet worden gekoeld dat bevriezingsgevaar dreigt. Voor deze gewassen kan ontvochtigen met zoutoplossing meer mogelijkheden bieden.

3.1 Energiebesparing door terugwinning van verdampingswarmte

De energiebesparing die is te bereiken door terugwinning van verdampingswarmte is te danken aan twee principes:
1. Door condensatie komt warmte vrij die kan worden geoogst
2. Doordat geen buitenlucht hoeft te worden opgewarmd voor de ontvochtiging is minder warmte nodig.

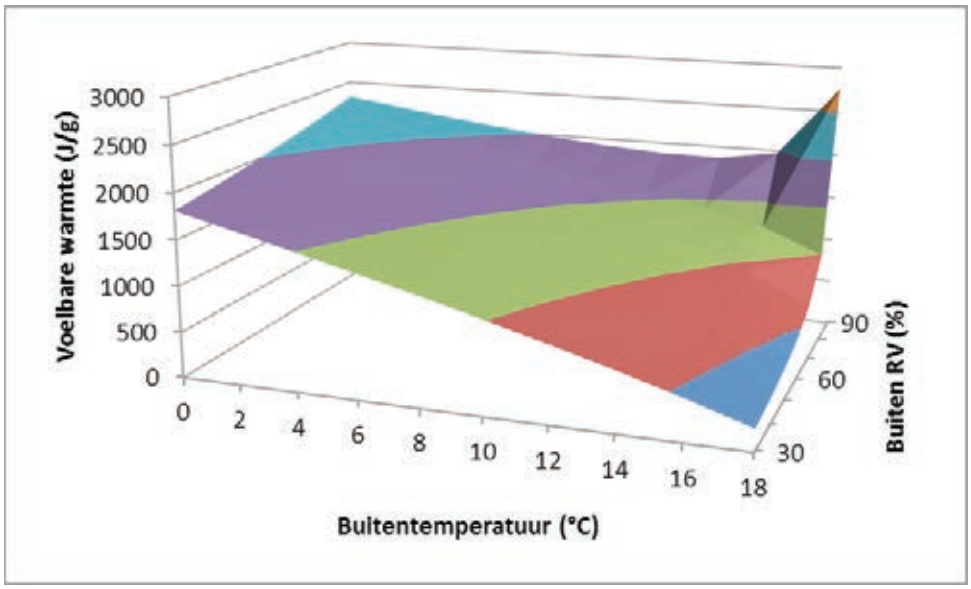
In Figuur 1. is modelmatig aangegeven wat het verschil is tussen het drogen van kaslucht met buitenlucht en het drogen met een zoutoplossing. Bij het drogen met buitenlucht (Het Nieuwe Telen) wordt koude buitenlucht ingebracht, die moet worden opgewarmd om de kastemperatuur op peil te houden. Dit opwarmen van de buitenlucht kost ongeveer 280 tot 2300 Joule voor iedere gram ontvochtiging (zie Figuur 11.). Dit is afhankelijk van de buitenomstandigheden. Gemiddeld wordt in dit rapport uitgegaan van 1800 J benodigde warmte per gram ontvochtiging met buitenlucht. Deze warmte wordt tezamen met de latente warmte uit de kas geblazen.

Hygroscopische ontvochtiging vermindert de hoeveelheid benodigde buitenlucht. De regenerator wordt gevoed met heet water en deze warmte komt vrij in de vorm van lauw water. De hoeveelheid warmte die nodig is om 1 gram vocht uit de zoutoplossing te verdampen is minstens 2650 Joule. Dit is grotendeels verdampingsenergie en voor een klein deel (± 200 J) energie om het vocht uit de zoutoplossing te onttrekken. Daarbovenop komt nog extra warmte die nodig is om de lucht in het verdampingsvat te verwarmen. In het geval van een vacuümdroger bevat de regenerator relatief weinig lucht en blijft deze benodigde extra warmte beperkt tot 100 J/g (zie paragraaf 2.2.2).
Aan de koelzijde van de regenerator komt een deel van de ingebrachte warmte vrij (2450 J/g condensatiewarmte + de 100 J/g warmte voor het afkoelen van de aanwezige lucht) in de vorm van lauw water en bij de padwall komt 2650 J/g energie vrij doordat het vocht uit de kaslucht tegen de zoutoplossing condenseert. Dit kan direct worden gebruikt om de kasluchttemperatuur te verhogen of het kan worden afgevoerd via koelslangen om later te gebruiken.



Figuur 10. Vergelijking hygroscopische ontvochtiging met ontvochtiging door droge buitenlucht (Het nieuwe telen).

De 1800 J/g die nodig is om de aangevoerde buitenlucht op te warmen bij Het Nieuwe Telen, draagt niet bij aan de opwarming van de kas. Hygroscopische ontvochtiging vergt meer (2750 t.o.v. 1800 J/g) energie om te ontvochtigen dan Het Nieuwe Telen, maar levert ruim 2550+2650 = 5200 J/g warmte die (indien nuttig toegepast) kan leiden tot energiebesparing.



Figuur 11. Benodigde hoeveelheid warmte om met buitenlucht 1 gram vocht af te voeren uit een kas van 20 °C en 85% RV, afhankelijk van de buitentemperatuur en de buiten RV.

Per gram ontvochtiging levert het hygroscopische systeem 5200 Joule, vermijdt het 1800 Joule en gebruikt het 2750 Joule. Hiermee komt de maximale besparing neer op 4250 Joule per gram ontvochtiging.

Voorwaarden om deze energiebesparing daadwerkelijk te realiseren zijn:

- Het vocht in de kas moet overtollig zijn. Als onnodig wordt ontvochtigd, dan levert deze extra verdamping en dus energieverlies op.
- Zowel de geoogste warmte uit condensatie als uit de energie die nodig is voor de regenerator of warmtepomp moeten als laagwaardige warmte te benutten zijn. Als de warmte niet direct kan worden benut dan moet deze worden opgeslagen, wat tot meer verliezen leidt.

De optimale besparing valt dus te bereiken tijdens lage buitentemperaturen en een hoge kas-RV.

3.2 Voorbeeldberekeningen energiebesparing bij Lans

Met 100 liter per dag per 1100 m^2 ontvochtiging wordt bij Lans komt de maximale energiebesparing neer op dagelijks 100/1100 *4250 = 0,38 MJ/m^2. Bij dagelijkse realisatie van deze ontvochtiging komt de warmteoogst neer op 141 MJ/m^2, ofwel 4,5 m^3/m^2.jaar aardgasequivalenten.

De ontvochtigingscapaciteit van het systeem is ongeveer 34 g/m^2.uur. Om tot de doelstelling van 12 m^3/m^2.jaar ofwel 372 MJ/m^2.jaar aan energiebesparing te komen, zal minimaal 372/(34*4,25)*1000 =2600 uren per jaar met deze maximale capaciteit moeten worden ontvochtigd. De gerealiseerde energiebesparing is veel lager geweest doordat er gedurende minder uren op maximale capaciteit is ontvochtigd en doordat de vrijgekomen warmte uit de regenerator is gebruikt om de aquifer via koelslangen in plaats van de kas direct op te warmen.

3.3 Investeringskosten

In een vorige onderzoek [Raaphorst, 2011], is berekend dat het totale systeem € 25,- mag kosten om binnen 10 jaar terug te verdienen. Bij een investering van 4 €/m^2 voor de warmtepomp en 8 €/m^2 voor de aquifer betekent dit dat het ontvochtigingssysteem € 13,- per m^2 mag kosten. Hierbij is uitgegaan van een gasprijs van 0,25 €/m^3 en een ontvochtigingscapaciteit tot 62% RV. Inmiddels is de gasprijs gestegen naar ± 0,30 €/m^3 (inclusief energiebelasting en transportkosten), maar blijkt de installatie zelden dieper dan 70% te kunnen ontvochtigen. Verder blijkt het mogelijk

om door middel van vacuümdroging gebruik te maken van laagwaardiger warmte dan 80 °C. Deze factoren lijken elkaar enigszins op te heffen, zodat de investeringsruimte voor de installatie ±13 €/m^2 blijft voor een padwall en een regenerator. Deze investeringsprijs lijkt niet onoverkomelijk te zijn voor bedrijven die al over LBU's beschikken of willen aanschaffen. Bijkomend voordeel is, dat een padwall de naverwarmer bij een LBU overbodig kan maken omdat de warmte ook direct via de zoutoplossing aan de lucht kan worden overgedragen. Een centrale regenerator zal daarbij per m^2 voordeliger uitpakken bij grote bedrijven.

4 Conclusies en aanbevelingen

4.1 Conclusies

Gerelateerd aan de in paragraaf 1.2 genoemde doelstellingen kunnen naar aanleiding van de proefresultaten de volgende conclusies worden getrokken.

- Met de huidige installatie is een redelijk goede ontvochtiging te realiseren. Bij Lans Zeeland, waar met een hoog luchtdebiet (± 28 m^3/m^2.uur) wordt gewerkt, is een ontvochtiging van ruim 1 gram/m^3 vaak voldoende. Hiermee wordt namelijk 37 liter per uur, ofwel 34 gram/m^2 per uur ontvochtigd, wat meer is dan de verdamping tijdens de nacht. De als doel gestelde 2 l/m^2.dag wordt hiermee lang niet gehaald. Overigens zal een ontvochtiging van 2 l/m^2.dag gedurende een jaar veel meer warmte opleveren dan het bedrijf nodig heeft.
- Een systeem dat 34 g/m^2.uur ontvochtigt, zal minstens 2600 uren moeten draaien om op jaarbasis 12 m^3/m^2 te besparen.
- De doelstellingen om 12 m^3/m^2 energie en 22 kg/m^2 aan CO_2 te besparen, zijn niet behaald doordat het systeem minder uren heeft gedraaid.
- Een vacuümverdamper is geschikt om in te zetten als regeneratiemethode. Wel moet het materiaal bestand zijn tegen corrosieve vloeistoffen.
- Via de padwalls komt geen meetbare hoeveelheid $CaCl_2$ in de ingeblazen lucht terecht. Ook is op de ventilatoren geen $CaCl_2$ aangetroffen.
- Het benutten van de gewonnen warmte is in het beproefde systeem nog niet regelbaar gemaakt. Bij de padwall komt daardoor vrijwel alle condensatiewarmte direct in de kaslucht terecht en de warmte die vrijkomt bij de regenerator wordt afgevoerd om de aquifer op te warmen.
- De padwall geeft een lichte reductie van de sporendruk van Botrytis. 30 tot 50% van de sporen worden gedood.
- Tijdens het toepassen van de zoutoplossing is de ingeblazen lucht droger en warmer dan bij de andere luchtslurven. Aangezien de beproefde kleine afdeling niet gescheiden was van de rest van de kas, is geen invloed op het kasklimaat gevonden.
- De schermafdeling is groter dan de proefafdeling, waardoor het langer sluiten van het scherm (om licht en warmte binnen te houden) niet beproefd.
- Het elektriciteitsverbruik van de regenerator is nog aan de hoge kant. Dit kan worden verklaard door de kleinschaligheid en de leeftijd van het systeem.
- Het verlies van zouten aan de lucht in de vorm van aerosolen is zeer gering. Het verlies van zouten aan het condensaat uit de regenerator is ongeveer 0,05 kg/dag. Dit kan worden verminderd door het hoog opspatten van vloeistof in het vacuümvat te voorkomen.
- De vraag of een ontvochtigingssysteem met zoutoplossingen te prefereren is boven een semi-gesloten kassysteem met koeling en herverwarming, hangt vooral af van de prijs en beschikbaarheid van elektriciteit en/of hoogwaardige warmte. Beide systemen hebben de potentie om de kaslucht te ontvochtigen met terugwinning van even veel condensatiewarmte, waarbij het zoutoplossingssysteem zou kunnen volstaan met alleen warmte als energievoorziening.
- De investeringskosten voor een padwall, regenerator, een kleine warmtepomp en seizoensopslag voor laagwaardige warmte, mag niet meer bedragen dan 25 €/m^2. Voor grote bedrijven die al beschikken over luchtbehandelingskasten of daarin nog willen investeren, lijkt dit haalbaar te zijn.

4.2 Aanbevelingen

De volgende aanbevelingen worden gegeven als het beproefde systeem wordt uitgebreid naar een volledige afdeling:

- De temperatuur en de concentratie van de zoutoplossing, en de mengverhouding tussen kaslucht en buitenlucht moeten beter regelbaar worden om de luchtvochtigheid in de kas nauwkeuriger te beheersen.
- De regenerator dient robuuster en minder storingsgevoelig te zijn. Ook zou deze direct gebruik moeten maken van (hoogwaardige) warmte in plaats van een elektrische warmtepomp.

Voor bedrijven die interesse hebben in het toepassen van zoutoplossingen in combinatie met het inblazen van buitenlucht door luchtslangen, zijn de volgende aanbevelingen te geven:

- De uitvoering van de padwall is betrekkelijk eenvoudig uit te voeren voor bedrijven die toch al overwegen om in ventilatoren en slurven te investeren. Bij systemen die alleen nodig zijn voor ontvochtiging van de kaslucht, maakt de padwall een naverwarmer minder noodzakelijk.
- Bij toepassing van het systeem voor bedrijven met minder (bijv. 5 m^3/m^2.uur) luchtdebiet, zal meer ontvochtiging per m^3 worden gevergd. Dit kan worden verbeterd door de weg die door de pads wordt afgelegd langer te maken, met andere materialen te werken en vooral door de temperatuur van de zoutoplossing beter te beheersen (dus koel te houden).
- Het systeem zal het grootste energetische rendement bieden bij teelten met een hoge warmtevraag omdat er zeer veel laagwaardige warmte vrijkomt.
- Het systeem kan zorgen voor een effectieve ontvochtiging bij koude teelten. Aangezien koude teelten een lage warmtevraag hebben en daardoor de vrijkomende warmte minder kunnen benutten, zal daar minder energiebesparing zijn te verwachten.

5 Referenties

Anonymous (1966): *Calcium Chloride Handbook*. Dow Chemical Company.

de Gelder, A., Poot, E.H., Dieleman, J.A., en de Zwart, H.F. (2012): *A concept for reduced energy demand of greenhouses: The next generation greenhouse cultivation in the Netherlands*, pp. 539-544: *Acta Horticulturae*. pp. 539-544.

Hassan, A.A.M., en Hassan, M.S. (2008): *Dehumidification of air with a newly suggested liquid desiccant*. Renewable Energy 33, 9, p. 1989-1997.

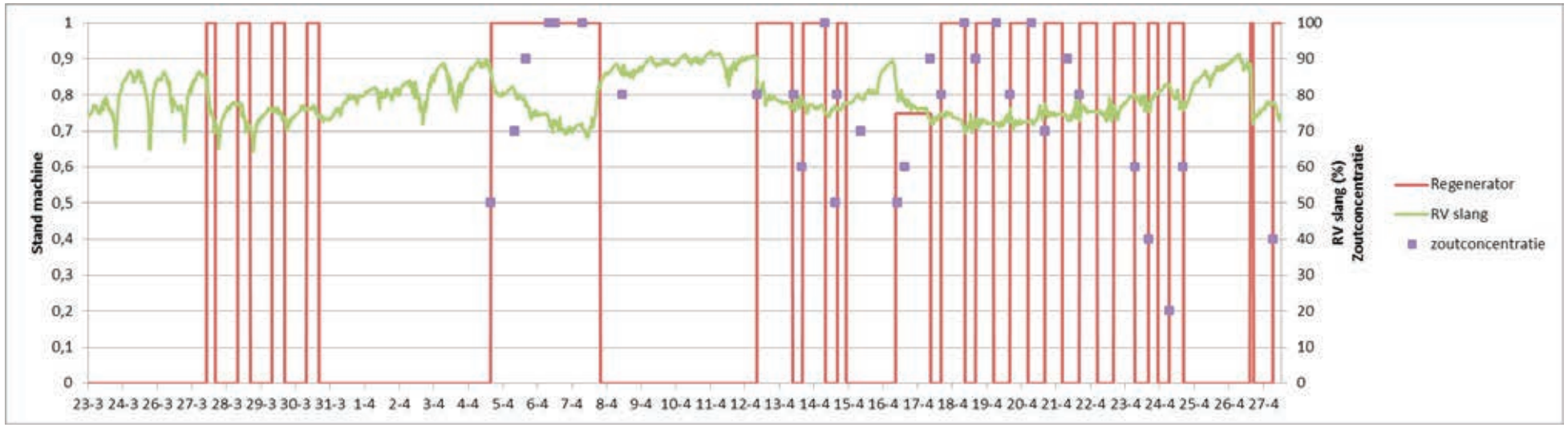
Liu, X.-H., Li, Z., en Jiang, Y. (2009): *Similarity of coupled heat and mass transfer between air-water and air-liquid desiccant direct-contact systems*. Building and Environment 44, 12, p. 2501-2509.

Raaphorst, M. (2011): *Zout als oplossing : studie over de toepassing van hygroscopische zoutoplossingen om kaslucht te ontvochtigen en warmte terug te winnen*. Wageningen UR Glastuinbouw. Bleiswijk.

Bijlage I Ontvochtiging en regeneratie

In Figuur 12. staan twee lijnen en een puntenreeks tussen 23 maart en 27 april.

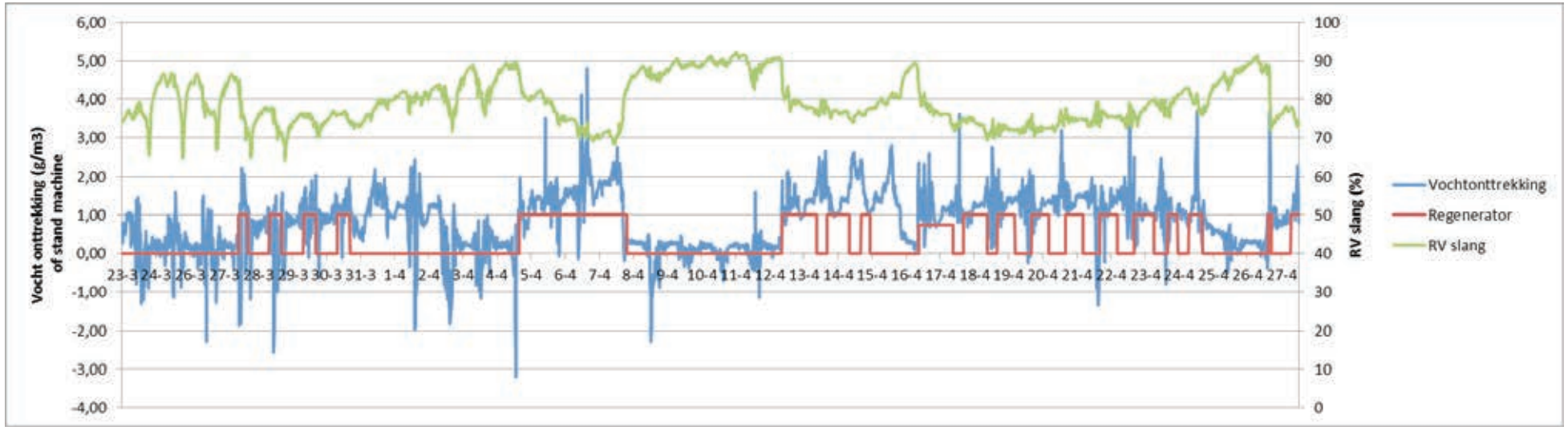
- De rode lijn geeft aan wanneer de regenerator heeft gedraaid (Bron: logboek). Soms heeft de regenerator dag en nacht gedraaid, soms alleen 's nachts en soms alleen overdag. Tussen 31-3 en 4-4, tussen 7-4 en 12-4 en tussen 25-4 en 27-4 heeft het systeem wegens storingen stilgelegen. Over de hele periode heeft de regenerator 33% van de tijd gedraaid. De pads hebben vrijwel continu gedraaid, behoudens enkele storingsmomenten.
- De blauwe punten betreffen de meting van het zoutgehalte van de zoutoplossing (eenheid in mm). Gestreefd wordt naar het getal 100, maar als de regenerator een tijdje niet heeft gedraaid dan kan de zoutoplossing langzaam verdunnen. Als bijvoorbeeld het systeem 5 m^3 zoutoplossing bevat en er condenseert 40 liter per uur in de oplossing, dan is de zoutconcentratie in 5000/40=125 uur gehalveerd. Met een lagere zoutconcentratie kan minder vocht uit de lucht worden onttrokken.
- De groene lijn geeft de RV aan in de slurf (luchtslang). Hoe hoger de zoutconcentratie en hoe kouder de zoutoplossing zijn ten opzichte van de luchttemperatuur, hoe lager de RV in de luchtslang kan worden. Dit is goed te zien tussen 5 en 8 april. Na 8 april is gedurende een aantal dagen geen zoutoplossing over de pads gestroomd en bleef de RV in de luchtslang daardoor hoog. Ook op 16 april heeft de ontvochtiging blijkbaar een tijdje niet gewerkt. Op 26 april is het vat bijgevuld met geconcentreerde Calciumchloride, waardoor de RV in de luchtslang plotseling veel lager kon worden.



Figuur 12. Draaiuren van de regenerator (aan/uit), zoutconcentratie (mm) en verloop van de RV in de luchtslang (%).

In Figuur 13:

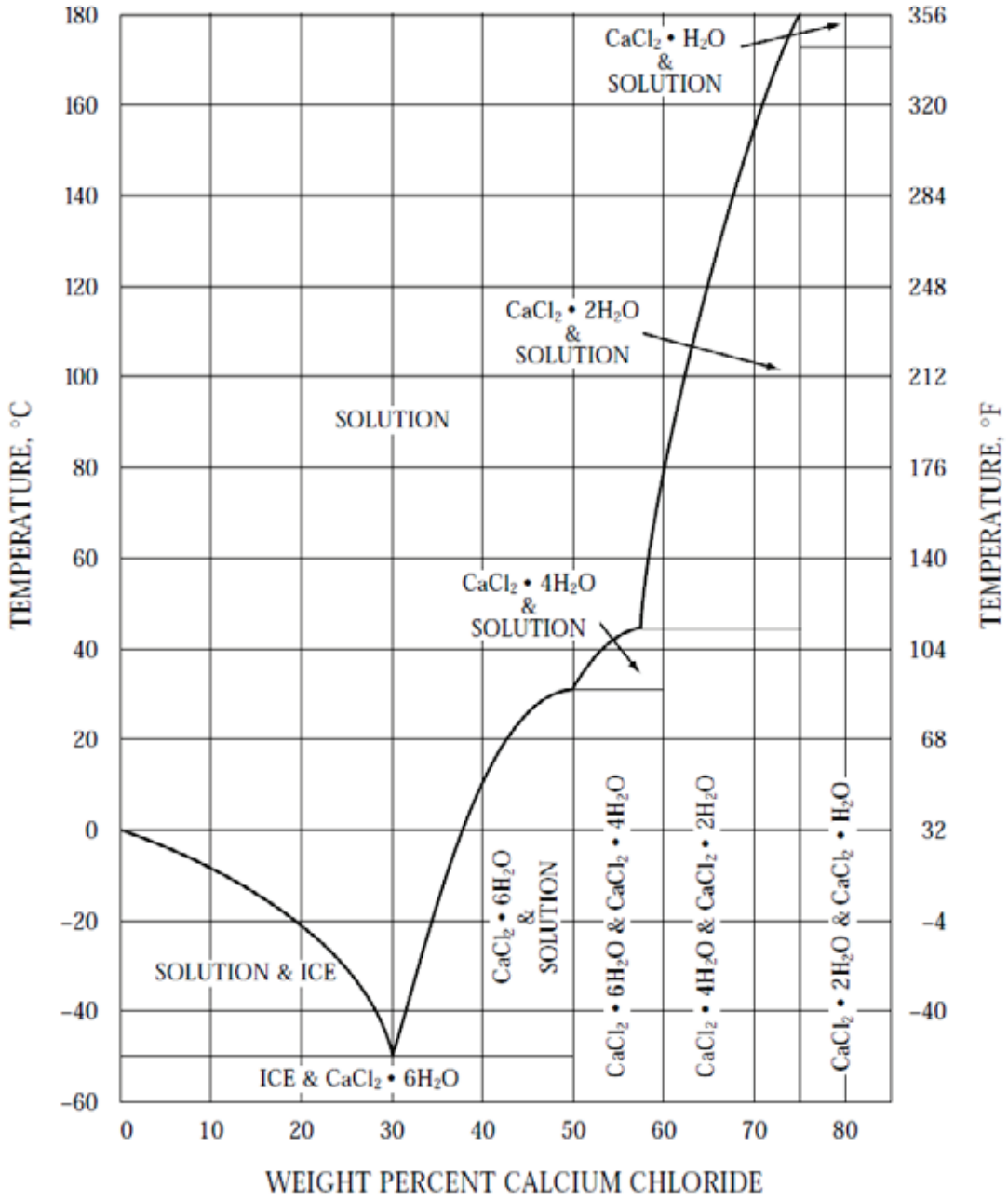
- De rode lijn geeft aan op welke momenten de regenerator heeft gedraaid
- De groene lijn geeft aan wat de RV was in de luchtslang voorbij de pad.
- De blauwe lijn geeft het verschil in vochtgehalte aan tussen de lucht voor de pads en achter de pads. Hiermee kan de vochtonttrekking worden bepaald. Als de regenerator niet draait, kan nog steeds worden ontvochtigd. Na verloop van tijd zal de zoutoplossing wel verdunnen en minder vocht kunnen opnemen. Tussen 31-3 en 5-4 heeft de regenerator niet gedraaid en loopt de ontvochtiging (pas) na enkele dagen sterk achteruit. Tussen 5-4 en 12-4 is duidelijk het verschil te zien tussen continu draaien (5 tot 8 april) en continu stilstand (8 tot 12 april). Na de storingen op 15 en 25 april neemt de ontvochtigingscapaciteit sterk af totdat de regenerator weer draait.



Figuur 13. Draaiuren van de regenerator (aan/uit), vochtonttrekking (g/m3) en verloop van de RV in de luchtslang (%).

Bijlage II Oplosbaarheid van Calciumchloride

Figure 1 — Phase Diagram for $CaCl_2$ and Water Solutions



Figuur 14. Oplosbaarheid van Calciumchloride in water bij verschillende temperaturen [Anonymous, 1966].

Productschap Tuinbouw

Kas als Energiebron

Ministerie van Economische Zaken,
Landbouw en Innovatie

Projectnummer: 3242122113