



Vochtbeheersing in kassen en terugwinning van latente energie

Een verkenning naar vochtbeheersing in kassen en de mogelijkheden van het terugwinnen van de energie die opgesloten zit in de gewasverdamping

P.A. van Weel¹, H.F. de Zwart¹ en J.O. Voogt²

Rapport GTB-1421

1. Wageningen UR Glastuinbouw, Wageningen, 2. Hoogendoorn Growthmanagement, Vlaardingen

Referaat

Ontvochtigen van een kas door ventilatie kost voor een tomatenteelt al gauw 8-10 m³/m².jaar aardgas om de ontstane warmteverliezen weer te compenseren. Uit deze studie blijkt dat er verschillende methoden voorhanden zijn of nog ontwikkeld kunnen worden om daarop te besparen. De hoeveelheid ventilatie kan met 25% gereduceerd worden met Ventilationjets of met luchtbehandelingskasten met slurven. Uit de luchtstroom die naar buiten verdwijnt kan de voelbare warmte worden teruggewonnen en gebruikt om de binnenstromende buitenlucht op te warmen. De latente warmte, opgesloten in de waterdamp, kan worden teruggewonnen en opgeslagen in een waterbassin of een aquifer door deze te laten condenseren op een koud oppervlak. Daardoor kan deze energie worden ingezet om de kas te verwarmen via de buizen. Een veelbelovende techniek voor condensatie is de dauwpuntskoeling waarbij buitenlucht door bevochtiging extra koud wordt gemaakt en daarna langs de kaslucht wordt geleid. Dat systeem kan eenvoudig in een gevel worden ingebouwd. Een heel andere manier van ontvochtigen waarbij geen ventilatie nodig is, is het gebruik van de Next Generation techniek of door een zoutabsorber. De laatste biedt zelfs perspectieven op het gebruik van wind of zon als energiebron voor het ontvochtigen.

Abstract

Dehumidification of a greenhouse by ventilation increases the energy input with 8-10 m³/m².year of natural gas to compensate the heat losses. This study shows different methods to reduce those energy losses. A 25% reduction in ventilation is obtained by using heat exchangers connected to plastic distribution ducts or by using the Ventilationjet system. The sensible heat from the exhaust air can be used to heat the incoming outside air to greenhouse temperature. Heat exchangers with 100% efficiency to do that are available. The latent heat included in the water vapour leaving the greenhouse can be recovered by means of a condensating wall. A good working principle is the Dewpoint Heat Exchanger in which outside air is wettened to reach the lowest possible temperature and then used to cool down the greenhouse air far below the temperature where condensation begins. The recovered latent heat must be stored in a water tank to use it in the heating pipes. Another approach is to skip ventilation and use a set of a cold and warm heat exchanger connected to a heat pump or to use a salt water absorber. The absorber opens the possibility to use solar or wind energy to dehumidify the greenhouse and collect 100% of the sensible and latent heat.

Rapportgegevens

Rapport GTB-1421

Projectnummer: 3742177500

DOI (doi.library@wur.nl): 10.18174/401229

Disclaimer

© 2016 Wageningen Plant Research (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Wageningen Research), Postbus 20, 2665 MV Bleiswijk, Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk, T 0317 48 56 06, F 010 522 51 93, E glastuinbouw@wur.nl, www.wur.nl/plant-research. Wageningen Plant Research.

Wageningen UR Glastuinbouw aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Adresgegevens

Wageningen University & Research Glastuinbouw

Postbus 20, 2665 ZG Bleiswijk
Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk
T +31 (0)317 48 56 06
F +31 (0)10 522 51 93

Inhoud

1	Inleiding/probleemstelling	5
1.1	Probleemstelling	5
2	Verkenning van de problematiek	7
2.1	Oplossingsrichtingen en randvoorwaarden	7
2.2	Referentiesysteem	7
2.3	Principes ontvochtiging	8
2.3.1	Ventilatie met buitenlucht	8
2.3.2	Condensatie tegen kasdek of gevel	8
2.3.3	Drogen in een mechanische droger	9
2.3.4	Absorptie in zout	9
3	Theorie: Energie- en vochtbalans van de kas	11
3.1	Energiebalans en vochtbalans in verschillende situaties en seizoenen	11
3.1.1	De dagsituatie in de winter	11
3.1.2	De dagsituatie in het voorjaar	12
3.1.3	De nachtsituatie in de winter en het voorjaar	12
3.1.4	De nachtsituatie in het voorjaar en de zomer	12
3.1.5	De nachtsituatie in het najaar	12
3.2	Nadere analyse van energiestromen	13
3.2.1	Energiebalans onder gesloten scherm (nacht)	13
3.2.2	Energiebalans met geopend scherm (overdag)	16
4	Bestaande systemen voor vochtbeheersing	19
4.1	Systemen afhankelijk van buitencondities	19
4.1.1	Zonder terugwinning van warmte	19
4.1.1.1	Vochtafvoer door kieren in het scherm	19
4.1.1.2	Buitenlucht inblazen met voorverwarming	19
4.1.1.3	De Ventilation Jet	19
4.1.2	Met terugwinning van voelbare of latente warmte	22
4.2	Systemen onafhankelijk van buitencondities	22
4.2.1	Next Generation Systeem: mechanische ontvochtiging in een gesloten systeem	22
4.2.2	Zoutabsorber	23
4.2.2.1	Het perspectief van ontvochtiging met zoutoplossing	23
4.2.2.2	Het herconcentreren van de zoutoplossing met een vacuümtank en een warmtepomp	25

5	Nieuwe systemen voor terugwinning van latente warmte	27
5.1	Slurf-in-Slurf systeem	27
5.1.1	Verbeterd systeem voor inblazen via een slurf zonder verwarming	27
5.1.2	Suggestie voor uitvoering in de praktijk	30
5.2	Gevel benutten als warmtewisselaar	31
5.2.1	Condenswand	31
5.2.2	Dauwpuntskoeling	33
5.2.3	Ventilationjet combineren met een warmtewisselaar in de gevel	34
5.3	Condensatie in een van stromingsrichting wisselend condensatie pakket	35
5.3.1	Hortirec systeem	36
5.3.2	Aluminium krullenbed als condensor	38
5.3.3	Gedistribueerde uitvoering	39
5.3.4	Berekeningen aan het altemnerende systeem	39
5.3.5	Een altemnerend systeem zonder naverwarming	40
5.4	Het herconcentreren van een zoutoplossing met damprecompressie	41
6	Inschatting van de prestaties en kosten van de systemen	43
6.1	Resultaten Standaard kas	45
6.2	Resultaten Hoog geïsoleerde kas	47
6.3	Resultaten Dubbelglas kas	49
6.4	Overzicht van de resultaten	51
6.4.1	Energie	51
6.4.2	Investeringsruimte	52
7	Welke rol gaat ontvochtiging spelen in Het Nieuwe Telen?	55
7.1	Onbelichte teelten	55
7.2	Belichte teelten	56
8	Conclusies en aanbevelingen	57
	Literatuur	59
	Bijlage 1 Psychrodiagram	61
	Bijlage 2 Begrippenkader	63
	Bijlage 3 Perspectieven direct drogen van kaslucht met MDR	69

1 Inleiding/probleemstelling

Deze studie richt zich op het effectief ontvochtigen van kaslucht, met als speciaal aandachtspunt de mogelijkheid van warmte terugwinning. Er wordt een overzicht gegeven van beschikbare technieken en vanuit de energie- en vochtbalans van de kas wordt in beeld gebracht wat er te verdienen is met warmteterugwinning.

Een gezond gewas produceert overdag maar ook in de nacht vocht door gewasverdamping. Traditioneel worden kassen ontvochtigd door middel van een combinatie van stoken en ventileren. Bij het gebruik van schermdoeken voor extra isolatie in de donkerperiode moeten vaak kieren in het scherm worden toegepast om een teveel aan vocht af te voeren. Dit kost veel energie en zorgt tegelijk voor verstoring van het kasklimaat door kouval. Daarom zijn de afgelopen jaren diverse technieken uitgetoetst om vocht af te voeren met minder energieverlies. Het ene uiterste is het gebruik van mechanische ontvochtiging: de lucht afkoelen tot onder het dauwpunt om condensatie te laten plaatsvinden en vervolgens weer opwarmen. Deze techniek vergt een hoge investering. Het andere uiterste is het geforceerde inblazen van buitenlucht. Een dergelijke installatie is een stuk goedkoper maar past geen warmteterugwinning toe. De ontvochtiging kan echter wel nauwkeurig worden geregeld en staat daarom toch als energiezuinig te boek. Afhankelijk van de teelt, en vooral het temperatuurregime in de kas is er een groter of kleiner deel van het jaar dat het vochtgehalte van de buitenlucht niet laag genoeg is. Op dat moment moet de kastemperatuur met verwarming extra verhoogd worden om het verschil in absoluut vochtgehalte met de buitenlucht te vergroten. Naast het feit dat dit extra energie kost is deze ingreep ook vaak teeltkundig ongewenst.

Tussenvarianten zijn er ook, bijvoorbeeld ventileren met warmte terugwinning. Deze tussenvormen zijn echter mechanisch behoorlijk complex en vergen daardoor toch nog een hoge investering. Ook het energie rendement is nog vrij laag, o.a. door de benodigde elektrische hulpenergie en het feit dat er per definitie geen latente energie wordt teruggewonnen.

Tegelijk is er een ontwikkeling gaande om de gewasverdamping terug te brengen tot een noodzakelijk minimum. Een praktijkgegeven is dat de verdamping van een volgroeid tomaten gewas in de nacht ca 25 gr/m².uur bedraagt, bij een RV van ca 85%.

Het vermoeden is echter dat de plant voor een voldoende opname van voedingsstoffen mogelijk zou kunnen volstaan met 10 – 15 gr/m².uur. Dit leidt tot een forse verlaging van de benodigde ontvochtigingscapaciteit en zou de vaste en variabele kosten van vochtbeheersing dus aanzienlijk kunnen verlagen. Bij een afnemende ontvochtigingsbehoefte neemt het effect van energie-efficiënte ontvochtigingssystemen ten opzichte van een eenvoudig systeem echter af.

1.1 Probleemstelling

De onderzoeksvraag /probleemstelling is volgt geformuleerd:

Hoe kunnen we komen tot een actief en groeizaam kasklimaat onder een volledig gesloten energie- of verduisteringsscherm met een minimaal energieverbruik en tegen betaalbare investeringen.

Om de omvang van de studie en het zoekgebied in te perken wordt hierbij gekeken naar de teelt van Tomaat in enkele specifieke situaties:

1. Onbelicht met in de donkerperiode een maximale gewasverdamping van 25 gram/m².uur.
2. Belicht met een capaciteit van 215 μmol/m².s ofwel 125 W/m² geïnstalleerd vermogen. Boven een lichtsom van 1500 J/cm² blijven de lampen de volgende nacht uit. Onder een gesloten scherm bedraagt de maximale gewasverdamping 125 gram/m².uur.

De berekeningen worden gemaakt voor 3 kastypen:

- a. Standaard kas met een enkel Luxous 1243D (SLS10 Ultraplus) energiescherm dat open gaat boven 14 °C buitentemperatuur en vast PE folie van 01-01 t/m 19-03.
- b. Kas met hoogisolierende schermen ^(*). Onderscherm: PVDF folie niet dampdoorlatend. Opent boven 14 °C buitentemperatuur en bij een buitenstraling die afhankelijk is van de buitentemperatuur: 500 W/m² bij -10 °C, 250 W/m² bij 14 °C. Bovenscherm Nacht: 2 lagen gealuminiseerd energiedoek, Tempa 6360 FR (XLS 16 Revolux) op één installatie. Bovenscherm Dag: beweegbaar PE folie jaarrond. Opent boven 14 °C buitentemperatuur en bij een buitenstraling die afhankelijk is van de buitentemperatuur: 500 W/m² bij -10 °C, 200 W/m² bij -5 °C, 50 W/m² bij 5 °C en 5 W/m² bij 10 °C.
- c. Dubbelglas kas bestaande uit een kasdek van dubbelglas en daaronder een Luxous 1243D (SLS10 Ultraplus) energiescherm. Opent boven 14 °C.

Verder gelden de volgende uitgangspunten:

- Kas: Venlo type, k-waarde ca 8 W/m².K. 10.000 m², 5m goothoogte en 8m kapbreedte.
- Schermen in de nacht 100% gesloten.
- Er wordt geteeld bij een hoge RV tot 93%. Daarboven wordt een kier getrokken.
- Ontvochtiging volgens diverse methoden, met en zonder langdurige buffering van de gewonnen warmte in een aquifer gekoppeld aan een warmtepomp.
- Buitenklimaat is Nederland, langjarig gemiddelde.

Toelichting scherm pakketten:

*1) In de huidige praktijk is een combinatie van LS10 of equivalent en een vast, geperforeerd folie in de winter gangbaar. In deze studie gaan we uit van ongeperforeerde, dampdichte folie om na te gaan of dit perspectief biedt in combinatie met een ontvochtiging. Wel zijn er om de 0,6m gaatjes aangebracht om plasvorming te voorkomen.

*2) Deze schermconfiguratie is toegepast in een proef met komkommer zonder belichting. Het PVDF folie is hoogtransparant en kan daardoor ook overdag veel uren gesloten worden zonder al te veel lichtverlies. In deze studie wordt dit scherm geopend zodra er geen warmtevraag meer is. Deze folie is om de 0,6m voorzien van gaatjes om plasvorming te voorkomen. Het PE folie is permanent aanwezig en dus beweegbaar. Om dat mogelijk te maken moet deze folie van een coating zijn voorzien om het aan elkaar plakken te voorkomen. Ook dit folie heeft gaatjes om plasvorming op de folie te voorkomen.

2 Verkenning van de problematiek

Het doel van deze verkenning is meerledig. Ten eerste is het nuttig om inzicht te geven in de problematiek van het ontvochtigen van kassen in de praktijk. Dit begint met de noodzaak van gewasverdamping en de mogelijkheden om het overtollige vocht af te voeren door middel van natuurlijke ventilatie. Deze mogelijkheden worden beperkt door de wenselijkheid om de kassen steeds beter te isoleren tegen warmteverliezen. In situaties waarin natuurlijke ventilatie niet toereikend is of in het geheel niet kan worden toegepast moet er geforceerd worden geventileerd, dan wel moet er ontvochtigd worden in een gesloten systeem. Door deze situaties kwalitatief en kwantitatief te beschrijven wordt een kader geschapen voor het opstellen van de specificaties en de beoordeling van de verschillende oplossingen van ventileren, ontvochtigen en warmteterugwinning.

Op dit moment worden er al enkele systemen in de praktijk op redelijk grote schaal toegepast. Daaronder vallen de systemen met buitenlucht inblazen, al dan niet met voorverwarming. Daarnaast worden er ook systemen op kleine schaal beproefd. Dat zijn bijvoorbeeld systemen waarbij de kaslucht wordt ontvochtigd met een zoutoplossing of met mechanische ontvochtiging door de kaslucht te koelen tot onder het dauwpunt en vervolgens weer op te warmen. Tot slot is er nog een derde categorie systemen die alleen op de tekentafel bestaan of slechts in een labopstelling zijn getest.

Deze analyse is er vooral op gericht om nieuwe, nog niet bekende methoden en middelen van ventileren en ontvochtigen in combinatie met warmteterugwinning op het spoor te komen en te vergelijken met bestaande systemen. Omdat deze studie plaats heeft in het kader van Het Nieuwe Telen is een belangrijke randvoorwaarde dat dit moet worden uitgevoerd in kassen waarin intensief wordt geschermd en bij een hoge RV wordt geteeld. De oplossingsrichtingen en randvoorwaarden, evenals het referentie systeem voor de beoordeling worden hieronder aangegeven.

2.1 Oplossingsrichtingen en randvoorwaarden

De volgende oplossingsrichtingen voor ontvochtigen van kaslucht worden beschouwd:

- Ventilationjet al of niet gecombineerd met warmtewisselaars.
- Next Generation systeem bestaande uit een warmtepomp en twee warmtewisselaars.
- Condensatie in een van stromingsrichting wisselend condensatie pakket in de kasgevel.
- Zoutabsorber met damprecompressie.

Als belangrijkste randvoorwaarde geldt dat het systeem moet leiden tot een optimaal groeiklimaat voor de plant. Het resultaat moet minimaal hetzelfde presteren, en liefst beter dan dat van een klassiek gestuurd kasklimaat met ventilatie, vochtkieren en inzet van minimum buistemperatuur.

2.2 Referentiesysteem

Als referentiesysteem voor de energie efficiëntie wordt aangehouden:

- Een systeem met buitenlucht inblazen met voorverwarming, waarbij de buitenlucht door middel van LBK's langs de gevel wordt aangezogen en na verwarming tot op kastemperatuur via een luchtkanaal (slurf) onder de teeltgoot in de kas wordt verspreid.
- Nominale inblaascapaciteit $5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{uur}$.
- De ingeblazen lucht wordt op natuurlijke wijze door overdruk uit de kas afgevoerd, al dan niet door geopende luchtramen boven het (gesloten) scherm pakket.

2.3 Principes ontvochtiging

Het ontvochtigen van kaslucht kan in principe op drie manieren [7]. De eerste manier is met ventilatie, al dan niet met warmteterugwinning. Hierbij wordt dus lucht uitgewisseld met buiten. De tweede is door condensatie van waterdamp in een gesloten circuit, zonder luchtuitwisseling met buiten. Hiervan zijn ook meerdere varianten, namelijk condensatie met een mechanische luchtdroger en condensatie tegen een door buitenlucht gekoeld oppervlak. De derde methode bestaat uit het absorberen van vocht in een zout.

In deze paragraaf wordt ingegaan op de vraag welke van deze methoden theoretisch het beste is qua energie efficiëntie.

We doen dit aan de hand van een concrete voorbeeld situatie met een volgroeid tomatengewas. In de onbelichte situatie (nacht, donker) gaan we uit van een gewasverdamping van 25 gram/m².uur.

We nemen aan dat de kastemperatuur 10 °C hoger is dan de buitentemperatuur. Bijvoorbeeld in de kas 15 °C en buiten 5 °C. De vochtigheid van de kas stellen we op 85%.

2.3.1 Ventilatie met buitenlucht

We nemen aan dat de volledige vochtafvoer wordt verzorgd door geforceerde ventilatie met buitenlucht. Het principe van ontvochtigen is dan dat een kg kaslucht wordt vervangen door een kg buitenlucht die minder vocht bevat. Daarvoor is het begrip Absoluut Vocht van belang. Dat is het aantal grammen waterdamp dat 1 kg lucht bevat. Volledig met waterdamp verzadigde lucht (RV=100%) bevat minder g/kg wanneer de temperatuur lager is. Het begrip RV vertelt ons hoeveel % vocht er in de lucht zit ten opzichte van de verzadigde toestand bij een bepaalde temperatuur. Ten eerste de vraag: hoeveel buitenlucht is nodig?

De absolute vocht inhoud van de kaslucht (15 °C, 85%) = 9 gr/kg.

De absolute vochtinhoud van de buitenlucht (5 °C, 80%) = 4,5 gr/kg

Voor het afvoeren van 25 gram vocht per uur is dus $25 / (9 - 4,5) = 5,5$ kg buitenlucht nodig.

Om deze buitenlucht op te warmen naar 15 °C is ruwweg $5,5 \times (15 - 5) = 55$ kJ/m².uur nodig. Dit komt neer op een energie stroom van $55.000 / 3600 = 15$ W/m². Dit energiedeel noemen we de "**voelbare warmte**".

Het verdampen van 25 gram water heeft ook energie gekost en wel: $25 \times 2500 = 62,5$ kJ. Wat overeenkomt met een vermogen van $62,5 \text{ kJ} / 3600 = 17,4$ W/m². Dit energiedeel noemen we de "**latente warmte**".

Het verlies aan voelbare en latente warmte is dus ruwweg gelijk: 15 W/m² tegen 17,4 W/m²

Bij ventilatie met buitenlucht verdwijnen beide energievormen naar buiten, dus samen 32,4 W/m².

Opmerking: De verhouding tussen voelbaar en latent warmteverlies wordt bij dalende buitentemp iets ongunstiger, maar blijft ca 50/50.

2.3.2 Condensatie tegen kasdek of gevel

De tweede methode die we bekijken is dat de kaslucht gedroogd wordt door waterdamp te laten condenseren tegen het kasdek of gevel, of tegen een koud oppervlak dat met buitenlucht wordt afgekoeld. Dit is een natuurlijk proces dat in elke kas plaatsvindt.

Stel dat op die manier de kaslucht wordt afgekoeld tot halverwege het verschil binnen / buiten, dus tot $5 + (15 - 5) / 2 = 10$ °C.

De AV bij (10 °C, 100% RV) = 7,67 g/kg, dus er wordt $(9 - 7,67) = 1,3$ g/kg aan vocht onttrokken.

Voor 25 g/m².uur afvoer moet dus $25 / 1,3 = 19,2$ kg/m².uur kaslucht langs het koude oppervlak passeren. Dat is dus veel meer dan de 5 kg/m².uur die bij ventilatie werd uitgewisseld.

Hierbij wordt ca $19,2 \times (15 - 10) = 96$ kJ/m².uur voelbare warmte onttrokken, die in principe naar buiten wordt afgevoerd, en later op enige manier weer aan de kaslucht moet worden toegevoerd. Dit komt overeen met een vermogen van ca 26,6 W/m².

Tijdens het condensatieproces komt ca $25 \times 2500 = 62,5 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{uur}$ aan latente warmte vrij, gelijk aan het verlies van $17,4 \text{ W/m}^2$, dat hierboven als latente warmteverlies wordt afgevoerd naar buiten. Deze warmte komt vrij op het condensatievlak dat daardoor stijgt in temperatuur. Aan de kaszijde zal dit bijdragen aan de kasverwarming, maar aan de koude zijde nemen de warmteverliezen juist toe. De grootte van dat verlies is afhankelijk van de buitentemperatuur en de wind. Met andere woorden, de latente warmte komt deels weer ten goede aan de kas, maar zeker niet helemaal.

Welk deel als warmte terugwinning geldt, bepaalt dus in feite welke methode efficiënter is:

- Verlies bij Ventilatie: $15 \text{ (voelbaar)} + 17,4 \text{ (latent)} \text{ W/m}^2$
- Verlies bij Condensatie: $26,6 \text{ (voelbaar)} + 17,4 \text{ (latent)} \text{ W/m}^2$

De verklaring is dat bij condensatie een groter volume kaslucht moet worden "behandeld" dan bij ventilatie. Zelfs als de kaslucht kan worden afgekoeld tot op de buitentemperatuur, dan nog zal deze lucht ($RV = 100\%$) minder droog zijn dan de buitenlucht zelf ($RV < 100\%$).

2.3.3 Drogen in een mechanische droger

Als we vocht afvoeren door middel van condensatie in een mechanische droger moet eerst de kaslucht worden afgekoeld tot onder het dauwpunt en vervolgens weer worden opgewarmd. De effectiviteit van de ontvochtiging is hoger naarmate de lucht verder wordt afgekoeld. Aan de andere kant is het produceren van koud water "duurder" naarmate de temperatuur lager wordt. Nadat het vocht bij die lage luchttemperatuur door condensatie aan de lucht is onttrokken moet er in het verwarmingsblok warmte worden toegevoerd om de gedroogde kaslucht weer op temperatuur te brengen.

Theoretisch kan dit hele proces behoorlijk energiezuinig worden uitgevoerd. Met het warmtepomp principe gaat de benodigde hulpenergie niet verloren en kan in de kas gebruikt worden om de overige energieverliezen (bijv. isolatie verlies) te compenseren.

Onderzoek en praktijk hebben laten zien dat mechanische ontvochtiging een werkend energiezuinig concept vormt maar pas bij hogere energieprijzen economisch rendabel kan zijn.

2.3.4 Absorptie in zout

Zout is hygroscopisch. Wanneer daar vochtige lucht doorheen wordt geleid zal deze lucht gedroogd worden. In de ontvochtigingsinstallaties wordt vaak gebruik gemaakt van zout water dat over een mat wordt gesprendeld. Door die mat ("pad") wordt lucht geblazen. Ondanks het feit dat het zout al in water is opgelost kan het nog steeds extra vocht uit de lucht opnemen zolang de zoutconcentratie hoog genoeg is. De hoeveelheid water die kan worden geoogst hangt van een aantal factoren af zoals temperatuur, concentratie en hoeveelheid van het zout en uiteraard de hoeveelheid en condities van de kaslucht. In de praktijk worden per m^2 kas prestaties van 15-60 g/uur gehaald.

Tijdens de absorptie komt condensatie warmte vrij. Daarmee kan op twee manieren worden omgegaan. Die warmte kan direct aan de kaslucht worden afgegeven, of het zoute water kan vooraf zodanig zijn gekoeld dat de droge lucht er met dezelfde temperatuur uitkomt als de kaslucht. Bij de laatste methode kan de condensatiewarmte op een andere plek, bij de afkoelmachine, worden geoogst en eventueel opgeslagen. Het voordeel van de laatste methode is dat het zout bij lagere temperaturen meer vocht kan opnemen.

Tijdens het proces daalt de zoutconcentratie zodat het weer gedroogd moet worden. Theoretisch is daarvoor net zoveel energie nodig als er vrij kwam bij het condenseren. Deze energie wordt geleverd met fossiele energie door middel van een soort kookproces. Op zich is er dan dus geen energie gewonnen, maar, net als bij het drogen met een mechanische droger zoals hiervoor besproken wordt de energie niet naar buiten afgevoerd en is het droogproces onafhankelijk van de buitencondities. Door gebruik te maken van zonne-energie of windenergie kan het drogen met minder fossiele energie gebeuren.

3 Theorie: Energie- en vochtbalans van de kas

3.1 Energiebalans en vochtbalans in verschillende situaties en seizoenen

De energiebalans speelt een centrale rol in het kasklimaat [9], en inzicht in de energiebalans geeft dus een handvat om het klimaatverloop te begrijpen en te beïnvloeden met de verschillende regelinstrumenten. Daarbij is niet alleen de energiebalans en de vochtbalans van de kas maatgevend, maar ook die van het gewas dat zich immers moet aanpassen aan de omstandigheden.

Globaal kunnen we per etmaal de volgende 6 kenmerkende situaties in de kas onderscheiden:

- Nacht, zonder PAR straling.
- Nacht, maar met kunstmatige belichting.
- Overgang nacht -> dag.
- Dag met weinig instraling.
- Dag met veel instraling.
- Overgang dag -> nacht.

Omdat de energiebalans en de vochtbalans weer samenhangen met de buitenomstandigheden is het zinvol om verder onderscheid te maken tussen verschillende seizoenen of weertypen:

winter; weinig straling, lage buitentemperatuur, lage luchtvochtigheid

voorjaar; toenemende straling, lage buitentemperatuur, lage luchtvochtigheid

zomer; veel straling, hoge buitentemperatuur, lage luchtvochtigheid

najaar, afnemende straling, hoge buitentemperatuur en hoge luchtvochtigheid

Voor de volledigheid zouden we dus een matrix moeten maken van alle voorkomende combinaties. In het kader van dit rapport worden enkele situaties behandeld, zodat de lezer vervolgens zelf de overige situaties naar behoefte kan uitwerken. We zullen beginnen met de "gemakkelijke" situaties en geleidelijk opbouwen naar de "moeilijke" gevallen.

3.1.1 De dagsituatie in de winter

Voor de groei van het gewas is PAR licht onmisbaar, dus moet elk straaltje van de schaarse zon worden benut. Daarbij moeten we ons wel realiseren dat door de lage buitentemperatuur veel energie nodig is om de kas op temperatuur te houden. En als de zon schijnt hebben we ook nog extra energieverlies door uitstraling naar de heldere hemel. Het zal dan ook regelmatig voorkomen dat het open trekken van het energiescherm om de zon zijn werk te laten doen beduidend meer stook energie kost, dan dat er aan stralingsenergie binnen komt. Een eenvoudig rekenvoorbeeld laat dit zien. Stel de kastemperatuur is 18 °C, en buiten is het 5 °C. Bij een K-waarde van 7 W/m².K is het warmteverlies dus $(18 - 5) \times 7 = 91 \text{ W/m}^2$.

De globale straling is 100 W/m², en daarvan komt minder dan 70% in de kas. Bij een heldere hemel kan de uitstraling gemakkelijk 50 W/m² zijn.

De energiebalans levert dan op (windstil weer):

- Een netto verlies van: $91 + 50 - 70 = 71 \text{ W/m}^2$. Met een beetje wind kan dit gemakkelijk nog 50% meer zijn.
- Even voor het gemak: 100 W/m² warmteverlies betekent dat er $100 \text{ [W/m}^2 \text{]} \times 10.000 \text{ [m}^2 \text{ / ha]} \times 3600 \text{ [sec/uur]} / 31,65 \text{ [MJ/m}^3 \text{]} =$ bijna 115 m³ aardgas per hectare per uur verstookt moet worden om de kas op temperatuur te houden.

Het is dus zeker de moeite waard om een lichtdoorlatend scherm, of vaste folie te overwegen.

Vochtproblemen zullen nauwelijks aan de orde zijn omdat de condensatie op het kasdek zorgt voor voldoende afvoer en bovendien de verdamping beperkt is.

3.1.2 De dagsituatie in het voorjaar

Door de toenemende straling zit de groei er goed in en blijft de kastemperatuur goed op peil met weinig of geen stookkosten. In het vroege voorjaar is de gewasverdamping nog beperkt (minder straling en kleiner gewas) en door de lage buitentemperatuur kan veel vocht afgevoerd worden door condensatie aan het kasdek. Als dit onvoldoende is kan overtollige energie en vocht door het grote verschil in temperatuur en vochtigheid binnen-buiten afgevoerd worden. Bij lage buitentemperaturen is de hoeveelheid latente warmte in de ventilatielucht groot in verhouding tot de voelbare warmte. Dus systemen die alleen voelbare warmte terugwinnen leveren dan relatief minder op.

Later in het voorjaar treedt er een verschuiving op doordat de straling verder toeneemt, en meestal ook de gewasgrootte en daarmee de verdamping. Er moet steeds meer geventileerd worden voor vochtafvoer en dat kan bij lage buitentemperaturen wel eens lastig zijn doordat er "teveel kou in de kas gelucht wordt". Bij moeilijk verdampende gewassen kan het omgekeerd ook voorkomen dat de kaslucht te droog wordt als er voor de temperatuur handhaving ook maar een "snippertje" gelucht moet worden.

3.1.3 De nachtsituatie in de winter en het voorjaar

Vanwege de lage buitentemperatuur is het verstandig om zo veel mogelijk te schermen met liefst een dubbel energie doek om de stookkosten laag te houden. Hierdoor wordt de K-waarde van de kas verlaagd.

Er hoeft dan weinig gestookt te worden om de energiebalans in evenwicht te houden.

Maar hoe staat het met de vochtbalans?

De gewasverdamping in de nacht zonder belichting hangt voornamelijk af van de luchtvochtigheid uitgedrukt in RV of VD. Als de buitentemperatuur laag is zal ook de kasdektemperatuur laag zijn en door condensatie zal dan de vochtigheid boven het gesloten schermdoek ook laag zijn.

Het overtollig vocht uit de kas zal door het poreuze schermdoek naar boven trekken (diffusie) en er zal een evenwicht optreden tussen verdamping en vochtafvoer bij een RV van bijvoorbeeld 75 – 85%. Bij traag verdampende gewassen kan dit aanzienlijk lager zijn, bijvoorbeeld 50%.

3.1.4 De nachtsituatie in het voorjaar en de zomer

Naarmate het voorjaar vordert zullen de nachttemperaturen steeds hoger worden. Er hoeft dan minder gestookt te worden om de kas op temperatuur te houden, maar de vochtafvoer wordt moeilijker en vraagt juist meer energie. Dit bemoeilijkt de vochtafvoer. Er zal immers minder condensatie optreden op het kasdek en het verschil in vochtigheid onder en boven het schermdoek wordt dus kleiner. Het afvoeren van vocht door een gesloten energiescherm wordt moeilijker en dat zal er toe leiden dat de RV in de kas hogere waarden gaat bereiken.

We komen steeds meer in de gevarenzone zoals vermeld onder het hoofdstuk "actief groeiklimaat voor de plant". Dit moet voorkomen worden.

De vraag is nu; hoe kunnen we dit het beste aanpakken? De gangbare manier is vaak het inzetten van een minimum buis, vervolgens een vochtkier in het schermdoek, en als laatste de luchtramen op een kiertje. Voor een energiezuinige teeltwijze is dit echter de verkeerde manier en is juist de omgekeerde volgorde de beste. Zie verder onder "vochtbeheersing onder gesloten schermdoek".

3.1.5 De nachtsituatie in het najaar

Deze situatie wordt gekenmerkt door het moeizaam afvoeren van vocht uit de kas. Komend vanuit een zonrijke periode is het gewas vaak sterk ontwikkeld (vegetatief) met een hoge LAI en zal dus bij een gegeven vochtigheid in de kas relatief veel vocht produceren.

Dit terwijl het verschil in vochtigheid binnen-buiten juist gering is. En bovendien wordt er door het afnemende zonlicht juist gestreefd naar een lage etmaaltemperatuur. In de praktijk betekent dit: de (energie) schermen en de ramen wijd open zetten en er verder het beste van hopen.

Maar is dit dan per definitie ook de beste (of de minst slechte) aanpak?

Allereerst moeten we de situatie dan toetsen aan de voorwaarden voor een “actief groeiklimaat voor de plant”
Zie het betreffende hoofdstuk.

In deze situatie zal dat betekenen dat er gezorgd moet worden voor luchtbeweging.

Maar er is nog meer nodig, en dat is voldoende verschil tussen de absolute vochtigheid binnen en buiten.

Immers als er geen verschil is, zal er geen vocht afgevoerd kunnen worden. De enige mogelijkheid in deze omstandigheden is om door te stoken de kastemperatuur te verhogen ten opzichte van de buitentemperatuur. Stoken bevordert echter ook de gewasverdamping zodat de maatregel het probleem deels vergroot. Het inzetten van een minimum buis in de geschetste situatie is dus niet handig. Doordat alles open staat wordt de kastemperatuur er nauwelijks door verhoogd, terwijl de vochtproductie wordt gestimuleerd.

De beste aanpak is daarom: het energiedoek sluiten, de kastemperatuur enige graden verhogen ten opzichte van de buitentemperatuur om een kunstmatig verschil te creëren en de (geforceerde) ventilatie te regelen op RV, door het sluiten van het scherm neemt de benodigde warmte-input per graad temperatuurverschil tussen binnen en buiten af, en dus de stimulans van de verdamping.

Een goede manier is om de verwarmingsregeling te sturen op een bepaald minimaal verschil in enthalpie binnen-buiten.

3.2 Nadere analyse van energiestromen

Onderstaande analyse geeft in verschillende situaties meer inzicht in de fysische aspecten en de orde grootte van de energiestromen en welke perspectieven er zijn voor besparing en terugwinning van energie.

3.2.1 Energiebalans onder gesloten scherm (nacht)

We gaan uit van een volgroeid tomaten/rozen gewas in de donkerperiode onder gesloten scherm met een gewasverdamping van 25 gram/m².uur.

We nemen aan dat de kastemperatuur 10 °C hoger is dan de buitentemperatuur. Bijvoorbeeld in de kas 15 °C en buiten 5 °C. De vochtigheid van de kas stellen we op 85%.

De kas wordt geforceerd ontvochtigd door het inblazen van (naverwarmde) buitenlucht.

We kunnen dan de volgende energie- en vochtstromen onderscheiden:

1 - het energieverlies door geleiding

Dit is het verlies van de kas als gevolg van temperatuur verschil binnen / buiten. Hierbij is de effectieve K-waarde bepalend. Van een normale Venlo kas is bekend dat de K-waarde ca 7 – 8 W/m².K is. Met een goed energiescherm kan die ongeveer gehalveerd worden, dus tot ca 3,5. Met een 2^e scherm kan een reductie bereikt worden tot 2,5 W/m². K De energie die nodig is om de kas op temperatuur te houden bedraagt dan 25 W/m².

Opmerking: In de toekomst zal het wellicht mogelijk zijn om deze verliesstroom terug te brengen tot bijvoorbeeld 10 W/m² met betere schermen.

2- Energieverlies door langgolvlige uitstraling.

De langgolvlige uitstraling wordt bepaald door het temperatuurverschil tussen het gewas en het onderste scherm, en de eigenschappen van dit scherm.

Met behulp van de formule van Stefan Boltzmann kunnen we de orde van grootte van deze uitstraling berekenen: $E = C_g \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot T_g^4$ W/m².

Hierin is C_g de emissiefactor van het gewas die ergens tussen 0,95 en 1 zal liggen. Voor de eenvoud nemen we de waarde 1 aan. T_g is de gewastemperatuur in Kelvin. De gewastemperatuur van 15 °C komt dan overeen met $15 + 273 = 288$ K.

Hieruit volgt dat het gewas $E_g = 1 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 288^4 = 390$ W/m² uitstraalt.

Als er geen scherm zou zijn “ziet” het gewas het glasdek. Dat zal qua temperatuur dicht tegen de buitentemperatuur aan liggen. Stel dat dit 7 °C is, dan zal het kasdek terugstralen:

$E_k = 1 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (273+7)^4 = 348$ W/m².

Netto straalt het gewas dan uit: $390-348 = 42$ W/m².

Is er een schermdoek gesloten, dan straalt deze ook energie naar het gewas terug afhankelijk van de eigen temperatuur. Stel de schermtemperatuur is $10\text{ }^{\circ}\text{C} = 283\text{ K}$, dan is:

$$E_s = 1 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 283^4 = 363\text{ W/m}^2.$$

Netto straalt het gewas dan uit: $390 - 363 = 27\text{ W/m}^2$.

Naarmate we meer lagen scherm toepassen en er meer aluminium in is verwerkt zal de temperatuur van het onderste schermdoek verder toenemen. Bij 3 volledig gesloten schermen waarvan er minimaal één 100% gealuminiseerd is kan de uitstraling verder dalen tot 5 W/m^2 .

Folie is een geval apart. PE folie laat bijvoorbeeld in droge toestand 80% van de warmtestraling door, maar als er een egaal laagje condens op zit nog maar 10%. In droge toestand zal het stralingsverlies al gauw 80% zijn van de waarde van het kasdek dat er boven zit, dus in dit voorbeeld $0,8 \cdot 42 = 34\text{ W/m}^2$.

Opmerking: bovenstaande berekeningen geven wel aan hoe belangrijk langgolvlige uitstraling is ten opzichte van de andere energiestromen.

3- Energieverlies als gevolg van verdamping

Voor de gewasverdamping moet er energie worden opgenomen uit de omgeving, deels door convectieve overdracht, deels door langgolvlige straling.

Bij een verdamping van $25\text{ gram/m}^2\cdot\text{uur}$ absorbeert het gewas een energiestroom ter grootte van:
 $25\text{ [gr/m}^2\cdot\text{uur]} \times 2500\text{ [kJ/kg]} / 60 \times 60\text{ [sec]} = 17,5\text{ W/m}^2$.

4- Energieverlies als gevolg van geforceerde ventilatie

We nemen aan dat alle vochtafvoer wordt verzorgd door geforceerde ventilatie met buitenlucht. Condensatie wordt dus nu even buiten beschouwing gehouden. Ten eerste rijst dan de vraag: hoeveel buitenlucht is nodig?

De absolute vocht inhoud van de kaslucht ($15\text{ }^{\circ}\text{C}$, 85%) = 9 gr/kg .

De absolute vochtinhoud van de buitenlucht ($5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 80%) = $4,5\text{ gr/kg}$.

Voor het afvoeren van 25 gram vocht per uur is dan $25 / (9 - 4,5) = 5,5\text{ kg}$ buitenlucht nodig.

Om deze buitenlucht op te warmen naar $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ is ruwweg $5,5 \times (15 - 5) = 55\text{ kJ/m}^2\cdot\text{uur}$ nodig. Dit komt neer op een energie stroom van $55.000 / 3600 = 15\text{ W/m}^2$.

5- Energieverlies door condensatie tegen kasdek en gevels

Een deel van het verdampende vocht zal condenseren tegen alle oppervlakken in de kas die onder het dauwpunt liggen. Vocht dat door een scherm omhoog gaat condenseert tegen het kasdek en gevels die onvoldoende geïsoleerd zijn condenseren ook. Hoeveel vocht daarmee wordt afgevoerd is lastig te bepalen omdat het afhankelijk is van veel factoren. Zo heeft het type en het aantal schermdoeken een grote invloed op de hoeveelheid condensatie tegen het kasdek. Enerzijds daalt de kasdektemperatuur bij een hogere isolatiewaarde van het scherm, waardoor er potentieel meer condensatie kan plaatsvinden. Anderzijds vormt het scherm een barrière voor damptransport, variërend van gering bij heel open doeken tot heel groot bij dichte folies. En bij twee schermen neemt de weerstand nog verder toe. Voor een enkel energiescherm wordt het vochttransport geschat op $35\text{ gram/m}^2\cdot\text{uur}$. Als een deel van het gecondenseerde vocht niet netjes wordt afgevoerd, maar omlaag druipt, moet dat vocht opnieuw verdampt worden. Dat beperkt de hoeveelheid verdamping vanuit het gewas tenzij er extra energie wordt toegevoerd. In dat opzicht werken condenserende gevels beter omdat daar het water eenvoudig kan worden afgevoerd.

Vanuit investeringskosten in apparatuur voor ontvochtiging kan de vraag worden gesteld of condensatie tegen het kasdek niet bevorderd moet worden omdat er dan geen of in ieder geval minder aanvullende ventilatie hoeft plaats te vinden. De meest gunstige situatie is dan wanneer er wel vocht door een scherm gaat, maar geen lucht. Alle voelbare warmte blijft dan onder het scherm en er is alleen verlies aan latente warmte door de condensatie tegen het kasdek. In dat opzicht is een permeabel folie dat wel vocht door laat maar geen lucht een interessante optie. Overigens laten de meeste schermmaterialen ook relatief weinig lucht door en juist meer vocht. Alleen bij lichtafscherming geldt dat niet want die doeken zijn er nu juist op gericht om veel warmte door te laten. Zolang er bij een standaard scherm geen kier wordt getrokken verdwijnt er weinig voelbare warmte. Zelfs als de ramen geopend worden zal het verlies aan voelbare warmte klein zijn zolang er maar geen kier in het scherm wordt getrokken, omdat bij een goed isolerend scherm de temperatuur boven het scherm relatief dicht bij de buitentemperatuur ligt.

Tellen we de bovengenoemde energiestromen 1 t/m 5 bij elkaar op dan vinden we voor de situatie met ventilatie:

$$25 \text{ (geleiding)} + 27 \text{ (uitstraling)} + 17,5 \text{ (verdamping)} + 15 \text{ (ventilatie)} = 84,5 \text{ W/m}^2.$$

Door maximaal gebruik te maken van condensatie en bijvoorbeeld 50% betere isolatie tegen convector en uitstraling kan dit worden teruggedrongen tot:

$$12,5 \text{ (geleiding)} + 13,5 \text{ (uitstraling)} + 17,5 \text{ (verdamping)} + 0 \text{ (ventilatie)} = 43,5 \text{ W/m}^2.$$

De verdamping kan in de nacht waarschijnlijk zonder problemen tot 10 g/m².uur worden teruggedrongen waardoor de post verdamping daalt tot 7 W/m².

Als we kijken naar de mogelijkheden van warmte terugwinning, dan komen daar alleen de laatste twee termen voor in aanmerking.

Door bij de geforceerde ventilatie gebruik te maken van warmtewisselaars die de voelbare warmte terugwinnen uit de afgevoerde kaslucht (Regain-units) kan maximaal 15 W/m² aan energie worden teruggewonnen. Hierbij is niet de hoeveelheid energie die beschikbaar is in de uitgaande kaslucht beperkend, maar de hoeveelheid energie die de ingaande buitenlucht kan opnemen. Doordat een regainunit in de praktijk een rendement lager dan 100% heeft, en er bovendien hulp energie nodig is om de kaslucht door de unit te brengen is de economische haalbaarheid discutabel.

Bij voldoende isolerende schermen kan het een gedeelte van het jaar boven het scherm koud genoeg worden om in de nacht voldoende vocht af te voeren door condensatie met gesloten ramen.

Door gebruik te maken van droog-processen waarbij het systeem kan worden gesloten en waarbij ook de latente warmte met een bepaald rendement kan worden teruggewonnen ontstaat de volgende situatie van energiestromen:

$$25 \text{ (isolatie)} + 27 \text{ (uitstraling)} + 17,5 * (\text{rendement} / 100) \text{ (verdamping)} + 0 \text{ (geen ventilatie)} \\ + \text{hulpenergie} = \dots \text{ W/m}^2$$

Hieruit komt naar voren dat het verbeteren van de isolatie en het tegengaan van uitstraling relatief meer opleveren dan het volledig sluiten van de kas en het terugwinnen van de latente warmte. Dit geldt nog sterker in de situatie dat de gewasverdamping zou worden teruggebracht van 25 naar bijvoorbeeld 10 gram/m².uur. Anderzijds is het wel zo dat een verbetering van de isolatiewaarde van de schermen vrijwel automatisch leidt tot minder vochtafvoer omdat meerdere lagen schermen voorzien van een metaalcoating minder goed vocht doorlaten. Een kier trekken in het scherm is geen optie omdat dit tot extra koude zal leiden door de lagere temperatuur boven de schermen. Daarom zal in een dergelijke situatie gekeken moeten worden hoe het vocht op een andere wijze kan worden afgevoerd. Een aantal van die methoden worden bestudeerd in dit rapport.

3.2.2 Energiebalans met geopend scherm (overdag)

Beschouwen we nu de situatie overdag, eveneens met een volgroeid tomaten gewas.

Kenmerkend is dat de straling van de zon in de kas moet komen voor de groei, en dat dus de schermen open moeten of op zijn minst veel zonlicht door moeten laten. De kastemperatuur zal over het algemeen hoger zijn dan in de nacht, laten we zeggen 20 °C en de RV iets lager, bijvoorbeeld 75%. Maar dit zal ook sterk afhangen van de hoeveelheid instraling.

De buitentemperatuur laten we voor het gemak hetzelfde op 5 °C, maar de RV kan iets lager zijn, bijvoorbeeld 50%.

Verder gaan we uit van de huidige "de facto" referentie situatie in Het Nieuwe Telen, dat wil zeggen dat de kas geforceerd ontvochtigd wordt door het inblazen van (verwarmde) buitenlucht met een maximale capaciteit van 5 m³/m².uur, nl afgestemd op de benodigde capaciteit in de nacht.

We kunnen dan de volgende energie- en vochtstromen onderscheiden:

1 - Energieverlies door geleiding

Dit is het verlies van de kas als gevolg van temperatuur verschil binnen / buiten. Hierbij is de effectieve K-waarde bepalend. Van een normale Venlo kas is bekend dat de K-waarde ca 7 – 8 W/m².K is met geopende schermen. De energie die nodig is om de kas op temperatuur te houden bedraagt dan:

$$8 \times (20 - 5) = 120 \text{ W/m}^2.$$

Eén of meer transparante schermen sluiten kan de K-waarde verbeteren, bijvoorbeeld naar 4,2 W/m².K voor één scherm en naar 3,2 W/m².K voor twee schermen.

2- Energieverlies door langgolvlige uitstraling.

De langgolvlige uitstraling wordt bepaald door het temperatuur verschil tussen het gewas en het kasdek.

De gewas temperatuur T_g is nu $20 + 273 = 293 \text{ K}$.

Hieruit volgt dat het gewas $E_g = 1 \times 5,67 \times 10^{-8} \times 293^4 = 418 \text{ W/m}^2$ uitstraalt.

De "retour" langgolvlige straling is in dit geval lastiger te bepalen. De kasdektemperatuur zal tussen de kasluchttemperatuur en de gewas temperatuur liggen. Meestal wordt aangehouden op 2/3 van het verschil, dus op $5 + 2/3 \times (20 - 5) = 15 \text{ °C}$.

Maar boven het kasdek "ziet" het gewas de hemel, die veel kouder kan zijn, bijvoorbeeld -50 °C als er geen bewolking is. Laten we even aannemen dat er wel bewolking is, immers bij een heldere hemel is er ook meer zon, die de uitstraling compenseert.

Met een kasdektemperatuur van 15 °C = 288 K krijgen we: (emissie factor glas ca 0,85)

$$E_k = 0,85 \times 5,67 \times 10^{-8} \times 288^4 = 331,5 \text{ W/m}^2.$$

Netto straalt het gewas dan uit: $418 - 331,5 = 86,5 \text{ W/m}^2$.

Opmerking: bovenstaande berekening is een ruwe (maximum) indicatie, en meestal wordt aangenomen dat de werkelijke uitstraling lager is, o.a. door condensatie op het glas. Maar het geeft wederom aan hoe belangrijk langgolvlige uitstraling is ten opzichte van de andere energiestromen.

3- Instraling van de zon

Overdag wordt het energieverlies van de kas normaal gesproken deels goed gemaakt door de zon. We gaan ervan uit dat er ca 70% van de buiten gemeten globale straling effectief door de kas wordt ingevangen.

Om de bovengenoemde verliezen van 120 (geleiding) en 85 (uitstraling) te compenseren moet de stralingsintensiteit dus zijn $205 / 0,7 = 293 \text{ W/m}^2$.

Dit is een niveau dat ook in de winter in NL nog gehaald wordt, maar slechts een zeer beperkt deel van de dag, rond het middaguur.

Verder wordt een deel van de zonne-energie nog omgezet in gewasverdamping.

Zodra de werkelijke straling hoger is, zal er netto energie overblijven om de kas op te warmen, is er een tekort, dan moet bij gestookt worden.

Opmerking: de berekening laat wel zien dat extra isolatie van de kas in de winter, bijvoorbeeld in de vorm van een transparant folie, uiterst nuttig is. Hierdoor wordt tegelijk de isolatie waarde verhoogd en de uitstraling verminderd.

4- Energie absorptie door verdamping

Omdat de verdamping overdag vooral veroorzaakt wordt door de zonnestraling spreken we niet over energieverlies. Het beste kan gezegd worden dat het gewas de stralingsenergie van de zon omzet in latente warmte.

Voor het beoogde doel volstaan we met een ruwe aanname dat 70% van de instraling (buiten gemeten) wordt omgezet in verdamping. Dit is dan tevens inclusief het convectieve deel.

Het mag duidelijk zijn dat de straling sterk kan variëren al naar gelang het jaargetijde en het weertype. Laten we voor onze beschouwing kiezen voor de zelfde waarde als hierboven, zijnde 33% van de maximale straling in de zomer; 330 W/m².

Dit levert op een "latente energie stroom" van $330 \times 70\% = 231 \text{ W/m}^2$.

En een hoeveelheid waterdamp van $330 \times 70\% \times 3600 / 2500 = 333 \text{ gram / m}^2\text{.uur}$.

5- Energieverlies als gevolg van geforceerde ventilatie

Over de vraag of de geforceerde ventilatie ook overdag moet worden gebruikt is discussie mogelijk. De gangbare capaciteit van ca 5 m³/m².uur kan slechts een klein deel van de vochtproductie verwerken. Dus moeten in ieder geval de luchtramen open om het overtollige vocht af te voeren. Vervolgens is dan de vraag of de kosten van het elektrisch verbruik van de installatie opwegen tegen het nut van de geringe bijdrage aan de luchtbeweging in de kas. Ter wille van de eenvoud maken we geen gebruik van de geforceerde ventilatie.

6- Energieverlies door condensatie op het kasdek

Condensatie op het kasdek is een belangrijke afvoer van overtollig vocht. Uit WUR onderzoek (simulatie programma KASPRO) is bekend dat dit geschat kan worden op 100 liter/m² per jaar.

Onder de genoemde kascondities (20 °C, 75% RV) is het dauwpunt ongeveer 15 °C, en bij de aangenomen kasdek temperatuur van rond 15 °C of lager vindt er dus condensatie plaats. Hoeveel dit precies zal zijn is heel moeilijk te zeggen, en is mede afhankelijk van de luchtbeweging langs het kasdek, etc. In elk geval zal de condensatie energie die vrijkomt deels bijdragen aan de opwarming van de kas, c.q. aan de beperking van het warmte verlies (Voor een nadere analyse zie verderop). Dit is niet het geval bij de vochtige kaslucht die door de ramen naar buiten gaat.

7- Energie inbreng door een minimum buis

Een gangbare praktijk is nog steeds om ook overdag energie in de kas te brengen met een zgn. minimumbuis temperatuur. De argumenten kunnen divers zijn; zoals gewasactivering, het creëren van luchtbeweging, het voorkomen van een ongunstig verticaal temperatuurprofiel in de kas, etc.

Een gangbare minimum buistemperatuur is bijvoorbeeld 40 – 45 °C. De hieraan gekoppelde energiestroom is in de orde van 40 W/m².

8- Energieverlies door de natuurlijke ventilatie (luchtramen)

De natuurlijke ventilatie is feitelijk de sluitpost op de energie- en/of vochtbalans van de kas. Als de bovenstaande energie en vochtstromen niet in balans zijn moeten de ramen open om ofwel vocht af te voeren, waarmee dan warmte verloren gaat, ofwel warmte af te voeren waarmee dan soms ongewild ook vocht wordt afgevoerd.

Volgens de inzichten van Het Nieuwe Telen wordt bijvoorbeeld vaker een hogere kastemperatuur geaccepteerd om te voorkomen dat het kasklimaat te droog ("schraal") wordt door overmatig vochtverlies. Door de kastemperatuur te laten stijgen ten opzichte van buiten worden zowel de geleidingsverliezen als de condensatie op het kasdek verhoogd en kan de energie- en vocht balans worden hersteld zonder ventilatie.

Zetten we de bovengenoemde energiestromen op een rij dan vinden we:

1. Geleiding:	120.
2. Uitstraling	85.
3. Instraling	330.
4. Verdamping	230 (latent).
5. Geforceerde vent	00.
6. Condensatie	??
7. Minimum buis	40.
8. Ventilatie	??

Opmerking: bij het opmaken van de balans voor de kas moeten we opletten dat de verdamping niet meetelt als "afvoer". Het is immers een omzetting van voelbare energie naar latente energie.

Als we nu kijken naar de mogelijkheden van warmteterugwinning, dan komt daar alleen voor in aanmerking het voorkomen van ventilatie, dus 5 of 8.

Condensatie op een transparante plastic folie heeft als positief neveneffect dat de langgolvlige straling nagenoeg in zijn geheel geblokkeerd wordt, net als bij glas. Dat geldt overigens alleen voor een gelijkmatige waterfilm. Druppels maken dat er ook droge plekken ontstaan waar de straling vrijwel ongehinderd door kan en verminderen ook nog eens het doorlaten van PAR.

Als dit evenwicht niet tot stand komt bij een aanvaardbare temperatuur en RV, dan is er de mogelijkheid om de kaslucht te koelen en te drogen en daarmee de ventilatie te voorkomen. In feite wordt dan de latente warmtestroom "geoogst". Dit is dan een deel van de maximaal 230 W/m². Maar deze warmte heeft alleen waarde als hij betaalbaar kan worden opgeslagen voor later gebruik.

4 Bestaande systemen voor vochtbeheersing

4.1 Systemen afhankelijk van buitencondities

4.1.1 Zonder terugwinning van warmte

4.1.1.1 Vochtafvoer door kieren in het scherm

Dit is in feite het referentie systeem in dit verslag. In veel gevallen nog de gebruikelijke methode van vochtbeheersing, bij gebrek aan beter. De methode wordt hier uitsluitend genoemd voor de volledigheid maar zal niet nader worden geanalyseerd omdat de nadelen overduidelijk zijn; ongewenste temperatuurverschillen en ongecontroleerde energieverliezen. Een verbeterde methode is om het scherm gesloten te laten en de vochtafvoer indien nodig te verhogen door boven het scherm te ventileren met de luchtramen. In dit geval zal niet alle voelbare en latente warmte verdwijnen via de afgevoerde lucht, maar deels in het scherm omgezet worden in een warmer scherm enerzijds doordat er warme lucht doorheen stroomt. Als er condensatie optreedt deels ook doordat een deel van de latente warmte wordt omgezet in voelbare warmte. Veel schermmaterialen zijn zodanig van structuur of bevatten materialen die ervoor zorgen dat het gecondenseerde vocht naar de bovenkant van het scherm wordt getransporteerd en daar verdampt. Dat is een vorm van vochtafvoer zonder luchtuitwisseling die ervoor zorgt dat de voelbare warmte onder het scherm blijft. Maar omdat de temperatuur boven het scherm laag zal zijn en er latente warmte wordt afgevoerd verdwijnt uiteindelijk nog steeds een groot deel van de warmte naar boven. Dat kan worden beperkt door meer schermen boven elkaar te leggen, maar dan neemt de hoeveelheid afgevoerd vocht al snel af en kan de situatie ontstaan dat de RV te hoog oploopt. Vaak kan dat nog verbeterd worden door meer boven het scherm te luchten, ook windzijdig. Helpt ook dat niet, zal een andere vorm van ventilatie gekozen moeten worden. Kieren zijn dan nog meer uit den boze omdat het boven het scherm zo koud zal worden dat elke kier tot grote kouval zou leiden. Voor die situatie worden in de praktijk de hierna volgende systemen gebruikt.

4.1.1.2 Buitenlucht inblazen met voorverwarming

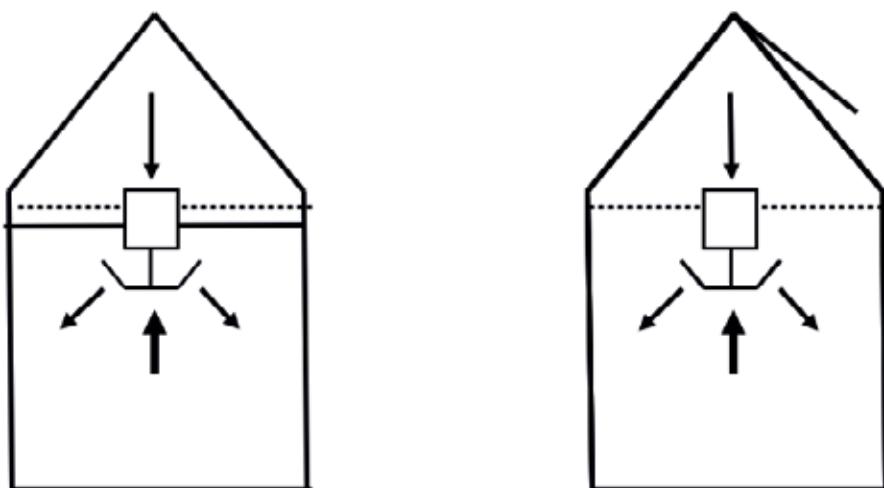
Een systeem met buitenlucht inblazen met voorverwarming, waarbij de buitenlucht door middel van LBK's in de gevel wordt aangezogen en na verwarming tot kastemperatuur via een luchtkanaal (slurf) onder de teeltgoot in de kas wordt verspreid [11].

- Voor onbelichte teelten een nominale inblaas capaciteit $5 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{uur}$. Voor belichte teelten tot $20 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{uur}$.
- De ingeblazen lucht wordt op natuurlijke wijze door overdruk uit de kas afgevoerd, al dan niet door geopende luchtramen boven het (gesloten) scherpakket.

Opmerking: we hoeven geen aparte analyse uit te voeren voor systemen zonder verwarming, dus waarbij de buitenlucht "koud" in de kas wordt gebracht, of eventueel met bijmengen van kaslucht om de temperatuurverschillen te verkleinen. De warmte verliezen zijn daarbij immers identiek. Het enige verschil is dat de energie voor het opwarmen van de koude buitenlucht naar kasluchttemperatuur niet door een LBK, maar door de gewone verwarmingsbuizen wordt geleverd. Het voordeel van deze techniek boven luchtramen is het feit dat er geen kieren in het scherm nodig zijn. Daardoor kan er nauwkeuriger geventileerd worden en zijn de temperatuurverschillen binnen de kas kleiner, vooral bij 2 volledig schermen. Daardoor kan een hogere RV worden getolereerd zonder dat de kans op condens op het gewas toeneemt. Deze zaken blijken in de praktijk ongeveer 25% besparing op de warmtevraag op te leveren. Van groot belang is gebleken om de stroom die de ventilatoren verbruiken dan wel te minimaliseren door met zo groot mogelijke kanaal diameters en warmtewisselaars te werken.

4.1.1.3 De Ventilation Jet

Een bestuurbare vorm van vochtafvoer door een gesloten scherm, en met gebruikmaking van condensatie tegen het kasdek is de VentilationJet [10].



Figuur 1 Principe Ventilationjet.

Bovenstaande Figuur toont een schematische kas met VentilationJet. Links met dubbelgesloten scherm en gesloten luchtramen in de nacht. Rechts met een gesloten transparant scherm en geopende luchtramen overdag.

De VJ vervult twee functies, namelijk het verticaal mengen van kaslucht onder het scherm, en het inbrengen van lucht van boven het scherm. Omdat de lucht van boven het scherm droger is zorgt dit voor ontvochtiging. Omdat de lucht van boven het scherm koeler is, zorgt dit voor koeling onder het scherm.

Door de luchtstroom van boven te moduleren kan de mate van ontvochtiging en koeling worden aangepast aan de behoefte.

Uitgangspunt is verder dat de lucht die onder het scherm wordt gebracht zorgt voor overdruk waardoor evenveel kaslucht door het (poreuze) scherm weer naar boven wordt verdreven.

In de nacht is er weinig verdamping, kan het scherm (dubbel) gesloten blijven, evenals de ramen (linkse plaatje) en hoeft de VJ alleen maar voor luchtbeweging onder het scherm te zorgen. Dit geeft een actief klimaat met minimale stookkosten. Doordat boven het scherm vocht condenseert tegen het kasdek is de dampdruk lager dan in de kas en zal er dus ook vocht door het (poreuze) scherm getransporteerd worden. Is er een dampdicht scherm aanwezig, dan kan ook een kleine kier worden getrokken. In dit geval wordt er ongeveer 50% minder voelbare en latente warmte de kas uit gevoerd.

In situaties waar de verdamping hoger is dan door deze passieve vorm van transport kan worden afgevoerd, kan naar behoefte door de VJ lucht van boven het scherm worden bijgemengd voor vochtafvoer.

Modulatie in de vorm van een puls/pauze regeling waarbij de droge lucht een gedeelte van de tijd wordt ingeblazen met een niet regelbare capaciteit is goedkoop aan te leggen omdat er alleen een aan/uit schakelaar nodig is. Bijvoorbeeld 1 minuut aan en 3 minuten uit levert 25% capaciteit. Uiteraard is ook de "klassieke" vorm van modulatie mogelijk, namelijk een toerenregeling op de inblaasventilator. In de nacht met een dubbel scherm kan weinig tot matige verdamping zo effectief en afgestemd worden afgevoerd.

Bij de Ventilationjet wordt geen voelbare of latente warmte gewonnen, maar bestaat de besparing uit het niet meer ventileren dan strikt noodzakelijk omdat dit systeem nauwkeuriger regelbaar is dan schermkieren en ramen. Bovendien kunnen de schermen 100% gesloten blijven waardoor de temperatuur in de nok dicht bij de buitentemperatuur komt. In de praktijk is gebleken dat met een Ventilationjet systeem 25% minder energieverlies optreedt ten opzichte van de standaard methode van ontvochtigen met schermkier.

Overdag zal het 2^e dichte scherm worden geopend maar kan het transparante scherm gesloten blijven. Zie het rechtse plaatje. De VJ wordt ingezet om vocht en energie af te voeren naar het kasdek op een gecontroleerde manier. Als de instraling en de verdamping nog verder toenemen zodat de condensatie op het kasdek onvoldoende is om de vochtbalans te handhaven, dan moeten uiteindelijk de ramen geopend worden om meer vocht af te voeren. Door inzet van de VJ wordt nu drogere lucht onder het scherm gebracht waardoor de vochtbalans weer op een lager luchtvochtigheidsniveau tot stand komt.

Doordat de VJ erg weinig luchtweerstand heeft door het ontbreken van slurven en doordat de lucht niet verwarmd hoeft te worden is het eenvoudig en goedkoop om de capaciteit van de VJ ruim te kiezen. Daardoor kan overdag met een enkel transparant scherm het scherm langer gesloten blijven.

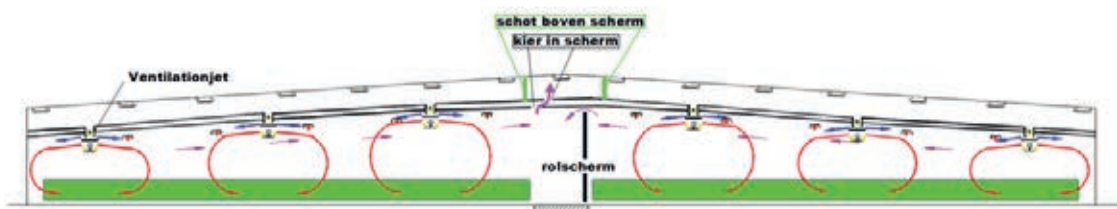
Doordat de VJ en de luchtramen gescheiden geregeld kunnen worden is het mogelijk om boven het scherm zodanige condities te creëren dat de verhouding tussen energie- en vochtafvoer in de kas gunstiger zijn dan met directe buitenlucht. De ruimte boven het scherm kan immers functioneren als een extra buffer tussen binnen en buiten.

Belichte teelten

Bij belichte teelten onder een gesloten scherm heeft de Ventilation Jet naast de genoemde voordelen bovendien als eigenschap dat de warmte van de lampen naar beneden wordt gestuwd, zodat er minder gestookt hoeft te worden met een minimum buis om het verticale temperatuur profiel te handhaven (onder moet iets warmer zijn dan boven). Doordat koude lucht van boven het scherm wordt ingebracht zal de energie balans veel vaker in evenwicht gehouden kunnen worden zonder kieren te hoeven trekken in het scherm. Het handhaven van een groeizaam klimaat onder het gesloten scherm is dankzij de luchtbeweging op gewashoogte veel eenvoudiger te realiseren zonder (hoge) minimum buis en zonder kieren. Dit voorkomt dat de minimum buis de verdamping tot onnodige hoogte verhoogt, met extra warmteverlies als gevolg.

Gecontroleerde luchtafvoer

In de situatie dat er gebruik wordt gemaakt van een zoveel mogelijk luchtdicht (dubbel)scherf ontstaat er overdruk onder het scherm door de aangevoerde lucht van de Ventilationjets, die hun lucht via lek en ramen op een kleine kierstand aanzuigen. De overdruk onder het scherm kan het debiet van de ventilatoren beperken, waardoor de vochtafvoer wordt beperkt. Overall kieren in het scherm trekken levert grote temperatuurverschillen op in de kas. Inmiddels zijn er positieve ervaringen met een systeem om de afgewerkte kaslucht centraal af te voeren via één kier in het scherm boven het middenpad. Dat systeem ziet er als volgt uit:



Figuur 2 Vochtafvoer bij Ventilationjets door schermkier boven het middenpad.

De kaslucht volgt nu een natuurlijke weg naar het hoogste punt van de kas en kan boven het middenpad via een instelbare kier ontsnappen. Twee nokschotten aan weerszijden van het middenpad zorgen ervoor dat de warme vocht lucht naar buiten verdwijnt en niet terug boven het doek stroomt. Het volledig gesloten scherm zorgt voor minimale convectieve verliezen. De centrale afvoer van de lucht opent de weg om in de toekomst de energie in de uitgaande luchtstroom boven het middenpad terug te winnen door daar een warmtewisselaar aan te brengen. Door het apart regelbaar maken van de kier boven het middenpad kan er ook voor worden gekozen om bij lage kasdektemperaturen zo lang mogelijk gebruik te maken van vochtafvoer door condensatie tegen het kasdek omdat dan een deel van de warmte binnen de kas blijft. Zijn de schermen daarvoor te luchtdicht, dan zou bij een goede installatie ook gewerkt kunnen worden met hele kleine kieren in elk vak van niet meer dan 1cm. Dan blijft de luchtuitwisseling beperkt waardoor de temperatuur boven het doek niet teveel oploopt, maar wordt er wel vocht uitgewisseld. Te hoog oplopende temperaturen verminderen immers het verschil in Absoluut Vocht onder en boven het doek, dus dat moet vermeden worden omdat de ventilatoren dan meer lucht moeten aanvoeren om dezelfde verdamping te realiseren en dat kost extra energie. In de praktijk blijkt wel dat een dergelijke secuur bestuurbare kier technisch moeilijk te realiseren is. De kier boven het middenpad is al gauw 3cm breed en dus makkelijker te realiseren. Ook moet ervoor gewaakt worden dat deze kier niet zo groot wordt dat de overdruk wegvalt omdat er dan kouval boven het pad gaat plaatsvinden.

Ook bij dit systeem is er in de praktijk een energiebesparing van 25% waargenomen omdat er minder gekierd hoeft te kieren, wat resulteert in een gelijkmatiger klimaat en hogere RV set-points.

4.1.2 Met terugwinning van voelbare of latente warmte

Door aan de LBK in de gevel een warmtewisselaar toe te voegen waarmee de koude buitenlucht wordt opgewarmd door de uitstromende kaslucht kan het warmteblok in systeem 4.1.1.2 vervallen. Zo'n warmtewisselaar wordt "Regainunit" genoemd. Het uitwisselen van warmte gaat in zo'n blok redelijk efficiënt. Vaak wordt gesproken over een rendement boven 90%, waardoor naverwarming niet meer nodig is. Maar bij dat rendementscijfer moet wel een kanttekening worden geplaatst. Het betreft namelijk alleen het rendement op het voelbare deel van de energie-uitwisseling en dat is, zoals we weten ongeveer de helft van de totale energie-uitwisseling.

Dat kan het beste aan de hand van twee rekenvoorbeelden.

Stel dat de kaslucht 18 °C is bij 90% RV. De enthalpie bedraagt dan: 56.7 kJ/m³. Het dauwpunt ligt op 16.3 °C. Stel dat de buitenlucht 10 °C is bij 90% RV. De enthalpie daarvan bedraagt dan: 31.4 kJ/m³. Als deze lucht volledig wordt opgewarmd tot 18 °C, dus 100% rendement, dan daalt de RV daarvan naar 49% en bedraagt de nieuwe enthalpie: 40,8 kJ/m³. Er was dus 40.8-31.4 = 9.4 kJ/m³ nodig geweest om de buitenlucht op te warmen. De kaslucht verlaat de kas met een enthalpie die 9.4 kJ/m³ lager is en is dus 56.7 - 9.4 = 47.3 kJ/m³. Daardoor verdwijnt er nog steeds 47.3 - 31.4 = 15.9 kJ/m³ energie naar buiten.

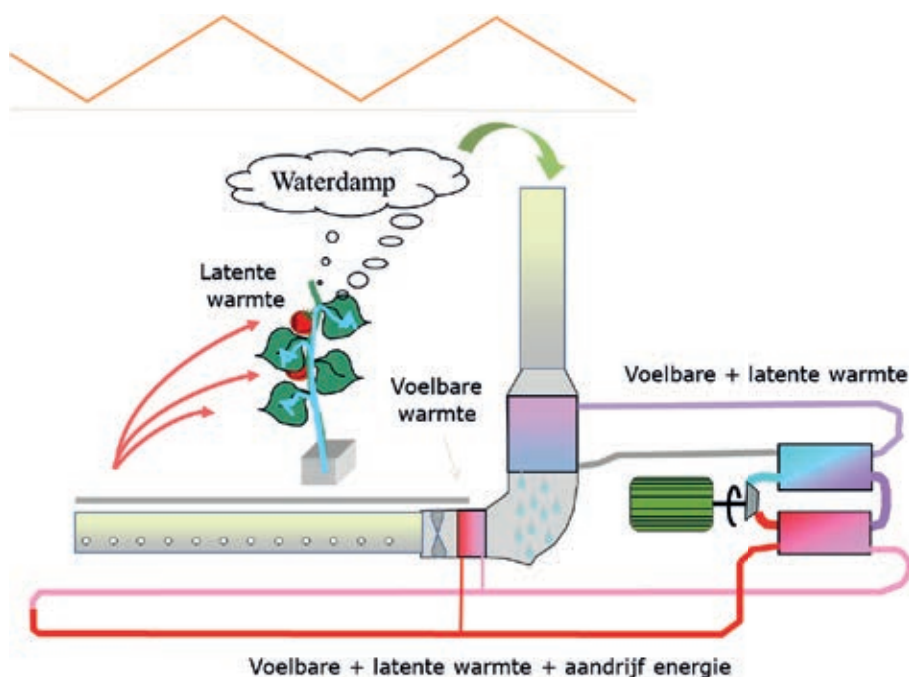
Bij een buitentemperatuur van 0 °C en een RV van 90% is de enthalpie 10.9 kJ/m³. Als de regainunit nog steeds 100% rendement levert wordt deze lucht weer opgewarmd tot 18 °C. De RV zal daarna 29% bedragen en de enthalpie is opgelopen tot 33.1 kJ/m³. Nu moest de kaslucht dus 33.1 - 10.9 = 22.2 kJ/m³ leveren en zal dus de kas verlaten met een enthalpie van 56.7 - 22.2 = 34.5 kJ/m³ en resteert er nog steeds een energieverlies van 34.5 - 10.9 = 23.6 kJ/m³.

Met andere woorden een dergelijke regainunit waarbij 1 m³ kaslucht wordt uitgewisseld met 1 m³ buitenlucht heeft bij een buitentemperatuur van 10 °C een rendement van $9.4/(9.4+15.9)*100\% = 37\%$ en bij 0 °C een rendement van $22.2/(22.2+23.6)*100\% = 48\%$. De rest van de energie gaat vooral naar buiten in de vorm van latente warmte door grote verschillen in vochtigheidsgraad van de beide luchtsoorten. Is er dan geen condensatie in de regainunit? Jawel en het komt door de extra warmte-overdracht die die condensatie oplevert dat de gebruikte lucht/lucht wisselaars zo'n hoge voelbare warmteterugwinning kunnen halen binnen beperkte inbouwmaten. Het warmteterugwin-rendement neemt dan ook duidelijk af naarmate de uitgebazen kaslucht droger is.

4.2 Systemen onafhankelijk van buitencondities

4.2.1 Next Generation Systeem: mechanische ontvochtiging in een gesloten systeem

Dit systeem [2] bestaat uit een tweetal warmtewisselaars waarlangs kaslucht wordt geleid.



Figuur 3 Ontvochtiging met behulp van twee warmtewisselaars en een warmtepomp.

In de eerste wisselaar wordt de lucht onder het dauwpunt gebracht waardoor er vocht condenseert en wordt afgevoerd. Voor het produceren van de daarvoor benodigde koude wordt een warmtepomp ingezet die is aangesloten op een wateropslag. De afgekoelde lucht wordt in een tweede wisselaar weer opgewarmd tot kasluchttemperatuur. Voor dat laatste is minder energie nodig dan voor het eerste omdat er in het verwarmingsblok alleen voelbare warmte moet worden toegevoerd waar in het koelblok zowel voelbare als latente warmte moest worden afgevoerd.

Tijdens de ontvochtiging levert de warmtepomp een overschot aan energie, bestaand uit de gewonnen latente warmte en de energie die voor de aandrijving van de compressor nodig was. Dit energieoverschot kan middels een etmaalbuffer worden opgeslagen en door niet de warme, maar juist de koude component te bufferen (en de warmtepomp klein te kiezen) hoeft de etmaalbuffer niet geïsoleerd te zijn. Hiermee kan een groot deel van het overschot worden ingezet voor de kasverwarming, maar dat voordeel wordt kleiner naarmate de kas beter geïsoleerd is. En bij toepassing van belichting moet warmte zelfs extra worden afgelucht. Daarom wordt dit systeem in de simulatie doorgerekend bij verschillende uitgangssituaties.

4.2.2 Zoutabsorber

4.2.2.1 Het perspectief van ontvochtiging met zoutoplossing

Zout is hygroscopisch en onttrekt daarom vocht aan de lucht [2], [8]. Zelfs in een met water verdunde oplossing blijft het die eigenschap behouden zolang de concentratie zout boven een bepaalde grens blijft. Is het zoute water teveel verdund, dan moet de concentratie zout weer worden verhoogd door een deel van het water te verwijderen, bijvoorbeeld door verhitting. Op die manier kan zout water worden gebruikt om kassen te ontvochtigen.

Het ontvochtigen met zoutoplossing biedt een aantal interessante perspectieven:

Bij lage kasluchttemperaturen kunnen met zouten toch hoge capaciteiten worden gerealiseerd.

Net als de hiervoor genoemde mechanische ontvochtiging functioneert de hygroscopische onafhankelijk van de buitencondities, dus ook in de herfst.

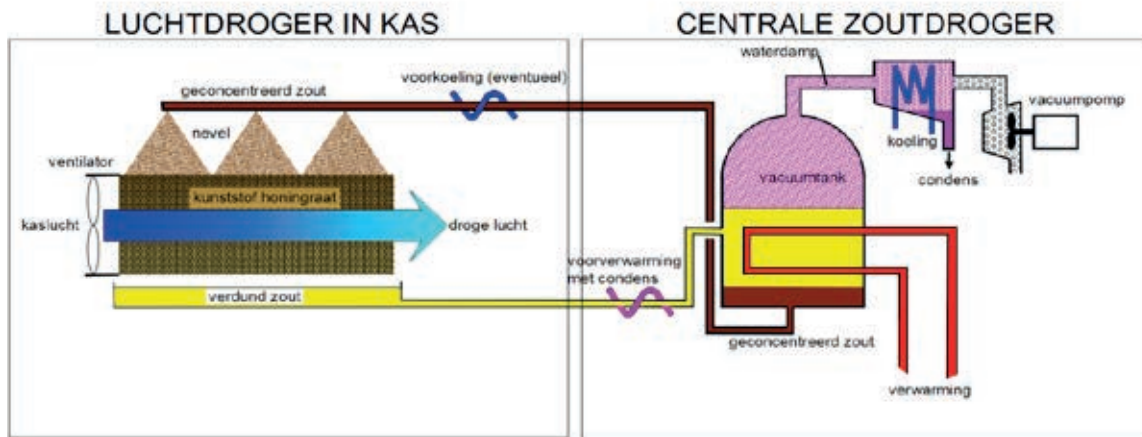
De aanleg is niet bijzonder kostbaar; o.a. door gebruik van PVC buizen en lage drukken.

Het regeneratieproces kan in ruimte en tijd worden gescheiden van het ontvochtigingsproces, net zoals bij de mechanische ontvochtiging met een koud-water buffer plaats kan vinden. De zoutwaterbuffer is echter qua volume veel kleiner dan een koudwaterbuffer van vergelijkbare capaciteit.

Door regeneratie te realiseren in combinatie met een vacuüm verdamper en een koel-installatie kan het werkgebied in temperatuur worden verschoven.

De zoutoplossing heeft in potentie een reinigende werking op de kaslucht door o.a. het afdoden van sporen en ziektekiemen.

Een voorbeeld van een dergelijk systeem is getekend in Figuur 4.



Figuur 4 Principe ontvochtigen met luchtdroger in de kas gecombineerd met centrale zoutdroging in een vacuümtank.

In de kas bevindt zich een ontvochtiger bestaande uit een kunststof honingraat waarover een zoutoplossing van CaCl_2 (wegenzout) wordt gesproeid. Als alternatief wordt ook wel het duurdere Lithium Chloride gebruikt. Door de hogere prijs is dit minder geschikt voor een systeem gebaseerd op centrale regeneratie met grote buffervoorraad.

De ontvochtiger kan verschillende vormen hebben:

- Een installatie onder de teeltgoot waarmee droge lucht over de hele lengte van de goot de kas in wordt geblazen.
- Een installatie langs de gehele gevel van waaruit met slurven de gedroogde lucht in de kas wordt gedistribueerd (figuur 5).
- Een vrijstaande unit die rondom lucht aanzuigt en gedroogd weer de kas in blaast. Er is momenteel een praktische uitvoering van zo'n installatie op de markt waarbij de droger en de regenerator in één behuizing zijn opgenomen.



Figuur 5 Honingraat in de kasgevel.

Met behulp van een ventilator wordt kaslucht door de honingraat geblazen. Het zout onttrekt vocht aan de lucht. Omdat bij condensatie warmte vrijkomt, stijgt de zouttemperatuur, maar de langsstromende lucht neemt die warmte weer op. Uiteindelijk komt de kaslucht dus niet alleen droger maar ook warmer uit de ontvochtiger. Bij de systemen 2 en 3 is het bijzonder moeilijk om dan een egale kastemperatuur te bereiken omdat dicht bij de slurf of de unit de temperatuur altijd hoger zal zijn dan verderop. Als het uitblazen van warme lucht ongewenst is kan er ook voor gekozen worden om de zoutoplossing zodanig te koelen dat het zout niet warmer wordt dan de kastemperatuur. Dat heeft als extra voordeel dat de hoeveelheid vocht die kan worden opgenomen door het zout toeneemt.

4.2.2.2 Het herconcentreren van de zoutoplossing met een vacuümtank en een warmtepomp

De verdunde zoutoplossing wordt weer geconcentreerd door het vocht er uit te verdampen. Dat kan simpelweg door middel van een warmtewisselaar, maar daarvoor is dan net zoveel warmte nodig als dat er vrij is gekomen in de kas. Eventueel kan gebruik worden gemaakt van zon of wind energie, maar dan duurt het droogproces langer en moet een grote hoeveelheid zout water worden opgeslagen omdat het drogen van de kas niet altijd synchroon loopt met de beschikbaarheid van zon of wind. Voor de toekomst lijkt dit wel de meest energie neutrale optie, maar in dit verslag wordt uitgegaan van momentane droging. Er wordt gekozen voor een centrale opstelling van de droogapparatuur omdat de kasruimte schaars is en het volume zout erg goedkoop in aanschaf is. Bovendien kan dan gewerkt worden met een opslag van geconcentreerde oplossing zodat de schommelingen in benodigde capaciteit van de ontvochtiging gemakkelijk opgevangen kunnen worden.

Voor het drogen van het zout zijn verschillende technieken beschikbaar waarvan tot nu toe het gebruik van een vacuümtank de meest gebruikelijke was. Deze techniek is in afbeelding 7 weergegeven. Door de druk boven de zoutoplossing te verlagen daalt het kookpunt naar ongeveer 40-60 °C, zodat er minder heet water nodig is om te verdampen. En dat kan dan weer betekenen dat het warme water geleverd kan worden met een warmtepomp, in dit geval gunstig omdat er ook koud water nodig is om de waterdamp te condenseren of het geconcentreerde zout te koelen. In de praktijk bleek het rendement van een dergelijk systeem niet erg hoog te liggen. Het elektrisch COP van de warmtepomp lag op 2,9. Uitgaande van een rendement bij stroomopwekking van 45% ontstaat dan een thermisch COP van 1,3. Maar door betere uitgangspunten te kiezen voor de werktemperaturen kan deze COP worden verdubbeld. Gezien de benodigde extra investeringen in een warmtepomp en warmte-opslag ligt gewoon verhitten met heet water en terug te koelen aan de buitenlucht meer voor de hand. Dit betekent evenwel dat de latente en voelbare warmte niet worden teruggewonnen en het uiteindelijk energieverbruik niet verschilt ten opzichte van ventileren met buitenlucht. Het betekent echter wel dat er bij elke buitenconditie ontvochtigd kan worden. In hoofdstuk 5 wordt een alternatief systeem voor herconcentreren gepresenteerd dat een beduidend hoger theoretisch rendement heeft.

5 Nieuwe systemen voor terugwinning van latente warmte

In dit hoofdstuk worden nieuwe systemen voor het terugwinnen van latente warmte verkend. Dit zijn systemen die nog niet in de praktijk worden toegepast, maar theoretisch wel mogelijkheden bieden.

Het doel is vooral om een beeld te krijgen of deze oplossingsrichtingen enig perspectief bieden ten opzichte van de al bestaande systemen.

5.1 Slurf-in-Slurf systeem

5.1.1 Verbeterd systeem voor inblazen via een slurf zonder verwarming

Er zijn in de praktijk systemen in gebruik waarbij buitenlucht via een slurf boven het gewas de kas in wordt geblazen zonder gebruik te maken van een warmteblok. Hierbij wordt meestal wel kaslucht in de stroom koude buitenlucht bijgemengd om te voorkomen dat er te koude lucht op de planten terecht komt. Ook bij dit systeem wordt evenveel kaslucht naar buiten gedrukt als dat er buitenlucht naar binnen komt. Hieronder wordt een mogelijkheid beschreven om deze methode een stuk te verbeteren. Deze verbetering houdt onder andere in dat latente warmte wordt teruggewonnen.

Inleiding

Bij ontvochtiging door inblazen van buitenlucht via een slurf zijn een aantal technische en economische knelpunten:

Zonder voorverwarming inblazen van koude buitenlucht levert een koude zone en condenswater aan de slurf op. Voorverwarming lost dit op, maar vergt een LBK met warmwater aansluiting.

Bijmengen van kaslucht in de stroom beperkt het temperatuurverschil, maar kost wel een deel van het ontvochtigend vermogen omdat minder droge buitenlucht wordt aangezogen bij een gelijke nominale capaciteit in $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{uur}$ van het systeem.

De onderstaande opzet geeft een combinatie van voordelen:



Figuur 6 Basis principe van gecombineerde voorverwarming met ontvochtiging van de kaslucht.

Koude droge buitenlucht wordt aangezogen door de gevel. Uit de kas wordt warme vochtige kaslucht aangezogen. Het voorverwarmingscompartiment bestaat uit 2 concentrische slurven (PVC of folie). Hier wordt warmte overgedragen aan de koude buitenlucht, en vindt condensatie plaats op de buitenkant van de binnenste slurf. De warme kaslucht koelt af en wordt droger. In de mengkamer worden beide stromen gemengd en in de kas geblazen.

Voordelen:

Geen water circuit nodig.

- De energie die nodig is om de buitenlucht op te warmen wordt geleverd door de latente warmte van de kaslucht -> dus effectieve bijdrage aan de ontvochtiging van de kas.

Onderbouwing van het principe

A. De referentie situatie

Als referentie kijken we naar bijmenging van warme kaslucht in de ventilator kast aan de gevel, bedoeld om de aangezogen buitenlucht voor te verwarmen.

Rekenvoorbeeld:

Stel dat de capaciteit van de unit is bepaald op $5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{uur}$ en dat de unit 1 tralie van 100 m lang moet verzorgen.

Dat vereist een luchtverplaatsing van $5 \times 8 \times 100 \times 1,2 = 4800 \text{ kg}$ lucht per uur.

Stel de buitencondities zijn 5°C , 80% RV $\rightarrow$ AV = 4,5 gr/kg, Enthalpie = 16 kJ/kg

Stel kascondities zijn 18°C , 85% RV $\rightarrow$ AV = 11 gr/kg, Enthalpie = 46 kJ/kg

Stel dat de mengverhouding = 50 / 50 % buitenlucht / kaslucht.

Bij adiabatische menging (dus geen warmte afvoer of toevoer van buiten) geldt dan voor het mengsel in eerste instantie:

$$AV = (4,5 + 11) / 2 = 7,75 \text{ gr/kg}$$

$$\text{Enthalpie} = (16 + 46) / 2 = 31 \text{ kJ/kg (behoud van energie)}$$

Hieruit volgt als mengtemperatuur: ca 11°C en de RV is lager dan 100%, dus zal er geen water neerslaan aan de binnenkant van de ventilatorkast.

Omdat 11°C wel beneden het dauwpunt van de kaslucht is zal er dus condensatie op de buitenkant van de slurf optreden. Dit heeft dus (plaatselijk) een extra drogend effect, maar zorgt wel voor natte plekken in de kas. Tenzij we hiervoor weer voorzieningen treffen.

Kijken we alleen naar het drogend effect van de lucht, dan geldt dat er totaal aan vocht afgevoerd wordt: $4800 \times 50\% \times (11 - 4,5) = 15,6 \text{ kg/uur}$.

Dit is dus $15,6 / 800 = 19,5 \text{ gr/m}^2 \cdot \text{uur}$ en hiermee zou de gewasverdamping dus gecompenseerd moeten worden om het vocht te beheersen.

B. Het voorgestelde systeem

Bekijken we nu de werking van het voorgestelde systeem:

We gaan uit van dezelfde buiten- en kascondities als hierboven en in eerste instantie weer een 50/50% verhouding.

Nu zal de kaslucht echter in de slurf in aanraking komen met de koude binnen slurf, die een temperatuur heeft van ca het midden van 5 en 18°C .

Dit is beneden het dauwpunt van de kaslucht, dus zal er condensatie optreden:

Als we uitgaan van een temperatuur evenwicht op de buitenkant van het binnenste kanaal (door de 50/50 aanzuigverhouding), dan zal de warme kaslucht afkoelen tot $18 - 0,5 * (18 - 5) = 11,5^\circ\text{C}$. Het vochtgehalte zal nu door condensatie verminderen tot ca 8,5 gr/kg.

Dat betekent dat de vochtige kaslucht dus effectief gedroogd wordt met 2,5 gr/kg.

De energie overdracht van de warme kaslucht naar de koude buitenlucht kan ook berekend worden:

De enthalpie van de gekoelde, verzadigde kaslucht ($11,5^\circ\text{C}$, 8,5 gr/kg) is ca 32 kJ/kg, dus dat is $46 - 32 = 14 \text{ kJ/kg}$ minder dan eerst.

De enthalpie van de opgewarmde buitenlucht: $11,5^\circ\text{C}$, 4,5 $^\circ\text{C/kg}$ is ca 24 kJ/kg, dus $24 - 16 = 8 \text{ kJ/kg}$ hoger dan eerst.

Uit deze berekening blijkt al dat de verhouding 50/50 dus geen sluitende energie balans oplevert: de warme vochtige kaslucht bevat meer "overtollige" energie dan de buitenlucht kan opnemen. Dit zal dus leiden tot een hogere temperatuur van de buiswand dan aangenomen (11,5 °C) en de kaslucht zal per saldo ook minder ontvochtigd worden.

Een betere situatie wordt bereikt door een mengverhouding kaslucht/buitenlucht van bijvoorbeeld 33/66 te kiezen.

Nu is de energiebalans in evenwicht, nl 1 deel kaslucht staat 14 kJ/kg af, en 2 delen buitenlucht nemen $2 \times 8 = 16$ kJ/kg op.

Als we nu weer uitgaan van een nominale lucht inblaas capaciteit van 4800 kg/uur dan kunnen we de ontvochtigingscapaciteit dus schatten op:

- $4800 \times 0,66 \times (11 - 4,5) = 20,6$ kg voor de buitenlucht.
- $4800 \times 0,33 \times (11 - 8,5) = 3,9$ kg voor de bijgemengde gedroogde kaslucht.

Dit levert bij elkaar dus een ontvochtiging van $(20,6 + 3,9) / 800 = 30,6$ gr/m².uur. En, dat is dus ruim 50% meer dan de referentie installatie.

Om dezelfde ontvochtiging te krijgen als in de referentie (19,5 gr/m².uur) hoeft er dus geen 5 m³/m².uur aan buitenlucht binnen gebracht te worden, maar $(19.5/30.6) \times 5 = 3.2$ m³/m².uur.

Het voelbaar warmteverlies ten gevolge van de ontvochtiging is met $1.8/5 = 36\%$ gedaald, wat bereikt is door een deel van het overschot aan latente warmte in de vochtige kaslucht te benutten.

Ter controle:

We kunnen de zelfde mengverhouding van kaslucht / buitenlucht toevoeren in de referentie situatie.

We mengen dus 1 deel kaslucht 18 °C, 11 gr/kg enthalpie = 46 kJ/kg met 2 delen buitenlucht van 5 °C, 80% RV -> AV = 4,5 gr/kg, Enthalpie = 16 kJ/kg

Het vochtgehalte van het mengsel wordt dan: $(11 + 2 \times 4,5) / 3 = 6,7$ °C/kg

De enthalpie van het mengsel wordt: $(46 + 2 \times 16) / 3 = 26$ kJ/kg.

De temperatuur van het mengsel wordt: ca 9 °C bij een RV < 100%. Er vindt dus weer geen condensatie plaats op de binnenkant van de ventilatorkast. Bovendien is de totale ontvochtiging minder en de inblaastemp lager dan van het voorgestelde systeem. Beide zijn dus ongunstig.

Samenvatting

Technisch gezien de beste aanpak is om de aangezogen buitenlucht voor te verwarmen met een warmtespiraal. Dit vergt echter een extra investering. Door helemaal geen voorverwarming toe te passen is er een groot risico van een koude zone en natte plekken bij lagere buitentemperaturen. Het in de praktijk toegepaste systeem van bijmengen van kaslucht om de (koude) buitenlucht op een hogere temperatuur te brengen is energetisch ongunstig en verlaagt in feite de ontvochtigingscapaciteit van het systeem.

Buitensituatie (80% RV)		Ontvochtiging met buitenlucht voor vochtafvoer van 20 g/m ² .uur			Kaslucht (T 18 °C, RV 85, dauwpunt 15,4 gr)		
T (graden)	AV (g/m ³)	delta AV (g/m ³)	luchtdebiet (m ³ /m ² .uur)	te leveren enthalpie (kJ/m ² .uur)	evenwicht debiet (m ³ /m ² .uur)	gemiddelde T slurf (graden)	condens (g/m ² .uur)
0	3.9	9.1	2.2	48	1.1	8.8	4.9
5	5.4	7.6	2.6	41	1.3	11.6	3.4
10	7.5	5.5	3.6	34	1.8	13.9	1.9
15	10.2	2.8	7.1	23	5.6	15.7	0.0

Figuur 7 Overzicht benodigde mengverhouding kaslucht/buitenlucht bij verschillende buitencondities, 18 °C bij 85% RV in de kas en een gewenste vochtafvoer van minimaal 20 g/m².uur.

Het voorgestelde systeem van gecombineerde voorverwarming en ontvochtiging is een goed alternatief omdat het een bijdrage levert aan de ontvochtiging en een efficiëntere overdracht van warmte aan de buitenlucht heeft. Om dat te bereiken is wel een nauwkeurige sturing van het toerental van beide ventilatoren nodig op basis van de enthalpie van beide luchtstromen. Dit systeem is ook toepasbaar onder een teeltgoot of tafel. Om bij verschillende buitencondities een bepaalde ontvochtiging te halen blijkt een mengverhouding van 2 delen buitenlucht op 1 deel kaslucht de meest optimale. Dat valt af te lezen uit de volgende tabel waarin voor een gewenste vochttafvoer van 20 gram/m²/uur is uitgerekend welke luchtdebieten noodzakelijk zijn om de buitenlucht voldoende op te warmen. Naarmate het buiten kouder wordt zal er in de slurf extra condensatie optreden die extra bijdraagt aan de ontvochtiging. Op die momenten kan er ook voor gekozen worden om de toevoer van buitenlucht wat te verminderen, maar de mengverhouding zal wel gelijk moeten blijven om geen enthalpieverlies te hebben.

5.1.2 Suggestie voor uitvoering in de praktijk

Het beoogde systeem werkt beter dan het gangbare systeem met directe kaslucht bijmenging, maar heeft als gevolg dat de ontvochtiging niet egaal over de kas verdeeld is.

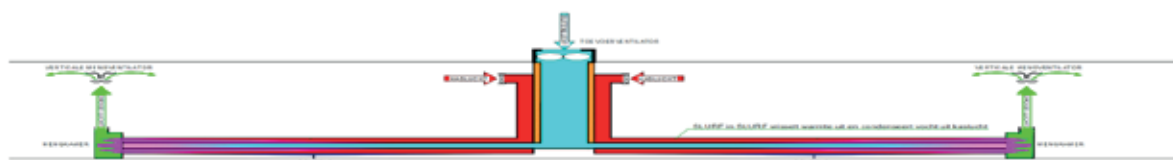
Ten eerste omdat de koude slurf lokaal (nog steeds) voor ontvochtiging zorgt door condensatie. Ten tweede omdat bij het aanzuigen van warme kaslucht voor het bijmengen onvermijdelijk een extra drogend effect in de nabijgelegen kaszone zal optreden.

Verder vraagt het systeem meer ruimte langs de gevel in de kas of buiten de kas.

Deze problemen kunnen ondervangen worden door het systeem te decentraliseren.

Door per 500 m² kas een kleine unit (wisseltoren) te bouwen die op één punt koude droge lucht door het scherm haalt en mengt met kaslucht kan deze via een dubbele slurf naar een mengkamer worden geblazen. Daar zorgt een verticaal werkende ventilator voor een egale verdeling.

Tevens kan hiermee een reductie op ventilatorvermogen worden bereikt omdat in lange slurven van 100 mtr veel meer druk moet worden opgebouwd dan bij een korter bereik.

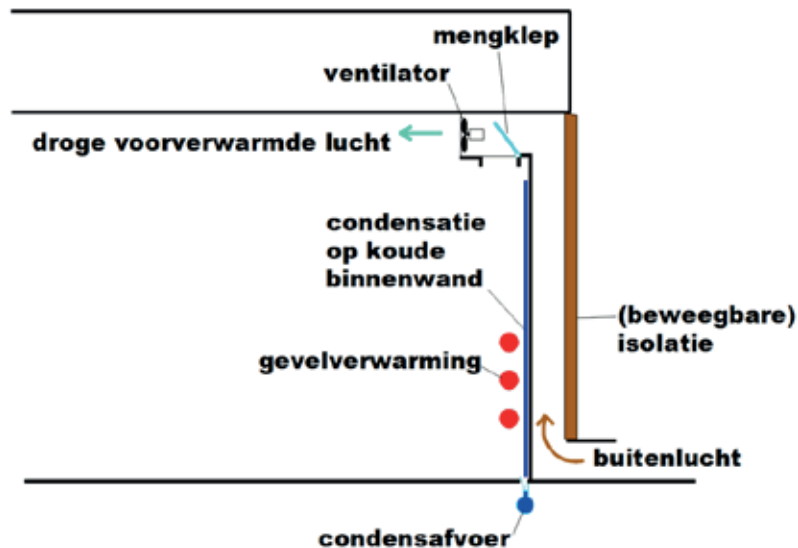


Figuur 8 Decentraal systeem van dubbele slurven en een wisseltoren.

5.2 Gevel benutten als warmtewisselaar

5.2.1 Condenswand

Omdat een dunne wand een goede warmtegeleider is zou de gevel benut kunnen worden als goedkope warmtewisselaar die werkt volgens de hierboven omschreven uitgangspunten. Globaal ziet de opzet er als volgt uit:



Figuur 9 Principe gebruik buitengevel als condensatiewand.

Met de mengklep kan de verhouding kaslucht/buitenlucht gevarieerd worden. Door de ventilator in toeren te regelen kan ook de hoeveelheid droging worden geregeld. De binnenwand kan uit een goedkope folie bestaan en de isolatie reflecteert vooral stralingswarmte of lamplicht. Een bestaand rolscherm is daarvoor afdoende. Op een bedrijf van 50.000 m² van 200*250 m en een gevelhoogte van 4 m is 3600 m² geveloppervlak.

Bij 20 g/m²/uur bedraagt de vochtproductie in de nacht 50.000*20/1000= 1000 kg/uur. Per m² gevel moet dan 280 g/uur worden afgevoerd. Als de kaslucht 20 °C is bij 90% RV bevat deze 15.5 g/m³ en het dauwpunt ligt op 18.3 °C. De langsstromende buitenlucht aan de andere kant van de gevel koelt de kaslucht af. Hoe lager de kaslucht temperatuur wordt, hoeveel minder vocht die lucht kan bevatten en vanaf het dauwpunt begint er condensatie op te treden. Hoe meer deze lucht afkoelt, hoe meer vocht er zal condenseren. Voor dit voorbeeld nemen we aan dat de binnenwand een gemiddelde temperatuur heeft die precies tussen het dauwpunt van de kaslucht en de buitenlucht in ligt. Is de buitenlucht bijvoorbeeld 5 °C, dan is de gemiddelde wandtemperatuur (18.3+5)/2= 11.65 °C. Bij die temperatuur kan de kaslucht nog maar 10.4 g/m³ bevatten, waardoor er per m³ kaslucht die langs de binnenwand stroomt 15.5-10.4= 5.1 gram vocht condenseert en wordt afgevoerd. Om dat proces gaande te houden moet er steeds nieuwe koude buitenlucht en warme kaslucht worden aangevoerd. Omdat de buitenlucht de condensatiewarmte volledig opneemt en ook wordt opgewarmd door het temperatuurverschil met de kaslucht zal deze buitenlucht als droge voorverwarmde lucht de kas in kunnen stromen. Stel nu dat de toegevoerde droge buitenlucht zorgt voor 50% van de vochtafvoer, dus zo'n 500 kg/uur.

Bij een buitentemperatuur van 5 °C en een RV van 90% bevat de buitenlucht 6.1 g/m³ vocht. Om 500 kg/uur af te voeren moet er dan 500*1000/(15.5-6.1)= 53192 m³/uur via de gevel worden aangevoerd ofwel 53192/3600= 14.8 m³/uur voor iedere m² gevel. Als deze lucht wordt opgewarmd tot 18 °C zal de RV dalen tot 40% en de enthalpie toenemen van 21.7 kJ/m³ naar 37.3 kJ/m³. De toegevoerde buitenlucht zal dan 14.8*(37.3-21.7)= 230 kJ kunnen opnemen per m² kaswand.

Bij het laten zakken van de temperatuur van de kaslucht van 20 °C bij 90% RV naar 11.65 °C bij 100% RV komt 22.7 kJ/m³ vrij. Er kan dus aan $230/22.7 = 10.1$ m³ kaslucht 5.1 gram vocht worden onttrokken, dus voor de hele kasgevel $10.1 * 5.1 * 3600/1000 = 185$ kg/uur.

Resteert dus nog $1000 - (500 + 185) = 315$ kg/uur die extra ontvochtigd moet worden. Dat kan alleen door het debiet aan buitenlucht verder te verhogen naar ongeveer 22 m³/m²/uur. Daarmee zal de buitenlucht $22 * 3600 * (15.5 - 6.1)/1000 = 744$ kg/uur ontvochtigen en zal de condensatie op de gevel $22 * (37.3 - 21.7) * 5.1 * 3600/22.7/1000 = 277$ kg/uur bedragen. Globaal levert de gevel in deze situatie dus een besparing op in toegevoerde buitenlucht van 25%.

Een luchtstroom van 22 m³/uur per m² gevel betekent bij een gevelhoogte van 4 m een luchtstroom van 88 m³/uur op een meter breedte. Dat levert bij een spouwdikte van 5 cm een lichtsnelheid op van 0.5 m/sec en een verwaarloosbaar weerstandverlies van 0.1 Pascal. In praktische zin volstaat een lagedruk ventilator die ongeveer 20 Pascal kan leveren bij een debiet van 3000 m³/uur per 4 kappen van 8m. Het stroomverbruik van een dergelijke ventilator bedraagt 180 W. Op totaal 900 m gevel zijn er 28 ventilatoren die samen 5040 W verbruiken ofwel 0.1 W/m² kas.

De situatie verandert wanneer de buitentemperatuur 15 °C wordt. Bij 15 °C en 90% RV bedraagt het AV 11.5 g/m³ en de enthalpie 47.5 kJ/m³. Om nu 750 kg/uur vocht af te voeren is een luchtdebiet nodig van $750 * 1000 / (15.5 - 11.5) / 3600 = 52$ m³/uur per m² gevel moeten bedragen. De wand kan dat nog steeds transporteren want bij 5 cm spouw bedraagt de lichtsnelheid 1.2 m/sec en het drukverlies 0.5 Pascal. Alleen zal de ventilator dan per 32 m een debiet moeten leveren van $32 * 4 * 52 = 6665$ m³/uur. Daardoor neemt het stroomverbruik toe tot 300 Watt per ventilator.

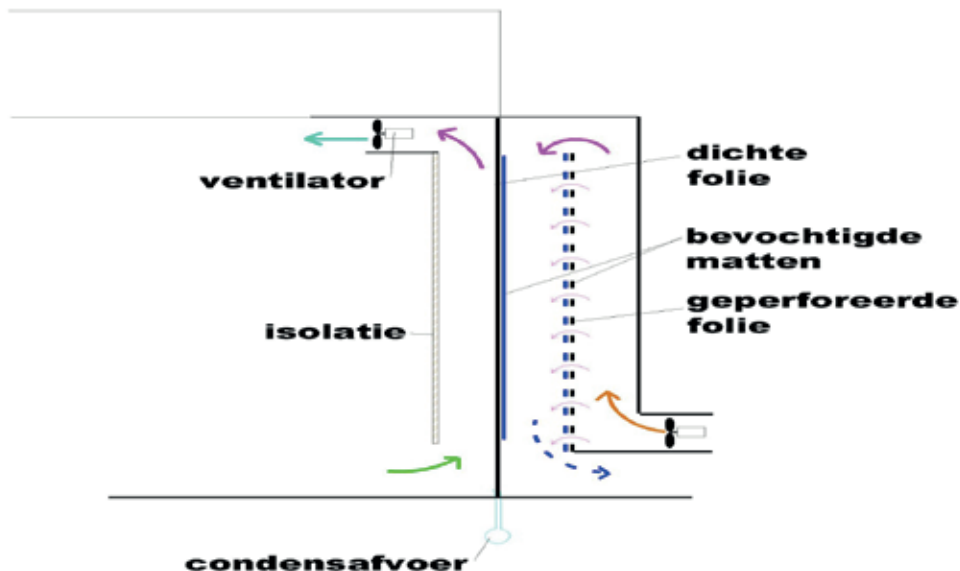
Aan de kaszijde zal de gemiddelde wandtemperatuur $(18.4 + 15)/2 = 16.7$ °C bedragen. Bij die temperatuur bevat de kaslucht nog 14.2 g/m³ vocht, dus wordt er per m³ langstromende lucht $(15.5 - 14.2) = 1.3$ gram vocht gecondenseerd. Als de buitenlucht via de gevel wordt opgewarmd naar 20 °C zal de RV 67% worden bij een enthalpie van 53.3 kJ/m³. De toename van de enthalpie van de buitenlucht bedraagt dan per m² gevel: $52 * (53.3 - 47.5) = 302$ kJ. Om dat te leveren is er kaslucht nodig. De enthalpie daarvan daalt van 63.4 kJ/m³ naar 56.2 kJ/m³. Dus is er $302 / (63.4 - 56.2) = 42$ m³/uur kaslucht nodig per m² gevel om dat te leveren. Het AV van de naar 16.7 °C afgekoelde kaslucht bedraagt 14.2 g/m³. Dat betekent dat er $42 * (15.5 - 14.2) = 54.6$ g/uur per m² gevel wordt afgevoerd ofwel $54.6 * 3600/1000 = 197$ kg/uur voor het hele bedrijf. Het debiet aan buitenlucht zal dus nog iets verder omhoog moeten, terwijl de condensatie van kaslucht op de gevel nu nog ongeveer 20% buitenlucht toevoer uitspaart.

Feitelijk is het werkingsprincipe van de condenserende gevelwand gelijk aan het werkingsprincipe van de hiervoor genoemde slurf-in-slurf warmtewisselaar. De te behalen besparingspercentages (20 tot 25% minder ventilatie) komen dus iets lager uit dan de besparingen die het slurf-in-slurf principe zouden kunnen opleveren. Dat is dan gemeten ten opzichte van andere beheerste ventilatiemethoden.

5.2.2 Dauwpuntskoeling

Om de hoeveelheid condensatie nog wat verder op te voeren kan gebruik worden gemaakt van de zogenaamde dauwpunt koeling [3].

dauwpuntskoeling



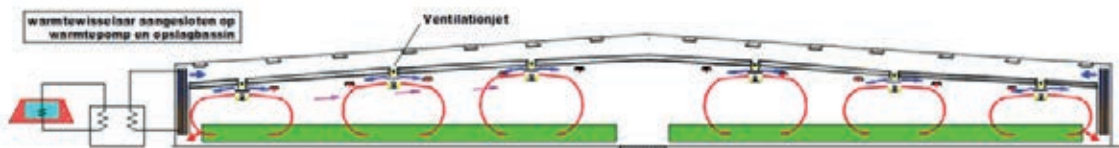
Figuur 10 Principe dauwpuntkoeling in gevel.

Hierbij wordt buitenlucht door een dubbele spouw geblazen die is ontstaan door twee foliewanden voor de gevel te zetten. Deze lucht wordt bevochtigd met behulp van natte matten zodat de temperatuur daalt tot het dauwpunt van de buitenlucht. Door aan de andere kant van de gevel kaslucht te laten stromen zal deze afkoelen en condenseren. Vervolgens wordt deze lucht weer gemengd met kaslucht om hem op de juiste temperatuur te brengen. Dit systeem zal alleen goed functioneren bij bepaalde buitencondities. Bij een kaslucht van 18 °C en 90% RV ligt de dauwpunttemperatuur bijvoorbeeld op 16,3 °C. Buitenlucht van 18 °C of lager met lagere AV als de kaslucht kan dan theoretisch gebruikt worden.

De hoeveelheid vocht die condenseert is recht evenredig afhankelijk van het verschil in dauwpunt tussen de buitenlucht en de kaslucht. Bij dit systeem wordt de voelbare warmte grotendeels afgevoerd en blijft een deel van de latente warmte in de kas. Het is dus vooral een manier van ontvochtigen zonder luchtuitwisseling en dus met vermindering van het ventilatieverlies.

5.2.3 Ventilationjets combineren met een warmtewisselaar in de gevel

Door in de gevel een warmtewisselaar op te nemen kan met een warmtepomp warmte worden teruggewonnen uit de naar buiten afgevoerde lucht. Daarvoor is het wel nodig dat het scherm pakket nauwelijks lucht door laat en een hoge isolatiewaarde heeft zodat er weinig vocht in het scherm condenseert. Omdat de door de Ventilationjets aangevoerde lucht meestal kouder is dan de kaslucht kan de op die manier gewonnen warmte direct in de verwarmingsbuizen worden gebracht om die afkoeling te compenseren. Maar omdat er minder energie nodig is om droge buitenlucht op dezelfde temperatuur te brengen dan vochtige kaslucht blijft er bij dit proces warmte over. Die warmte kan het beste tijdelijk worden opgeslagen in een geïsoleerd bassin. Dankzij de aanwezigheid van de warmtepomp zal het water een lage temperatuur hebben van 20-25 °C. Daardoor is het eenvoudig en goedkoop op te slaan in een standaard regenwater bassin met een dunne isolatielaag. En door de hoge isolatiewaarde van het scherm pakket is er nooit erg warm water nodig in de verwarmingsbuizen, zeker niet wanneer er voldoende buizen uit een oude slecht geïsoleerde situatie zijn blijven liggen. In een proef met komkommer waarbij in de nacht 3 schermen en overdag 2 transparante schermen zijn ingezet is de watertemperatuur bijvoorbeeld nooit boven de 35 °C geweest. Dat betekent dat de COP van de warmtepomp erg hoog kan zijn. Als de RV in de kas hoog wordt gehouden helpt dat om het dauwpunt in de warmtewisselaar relatief hoog te houden. Bij 18 °C en 90% RV, bijvoorbeeld 16,3 °C. Ook dat helpt om het COP van de warmtepomp hoog te houden. Een $COP_{\text{thermisch}}$ van 4 lijkt haalbaar.



Figuur 11 Ventilationjets gecombineerd met warmteterugwinning in de gevel.

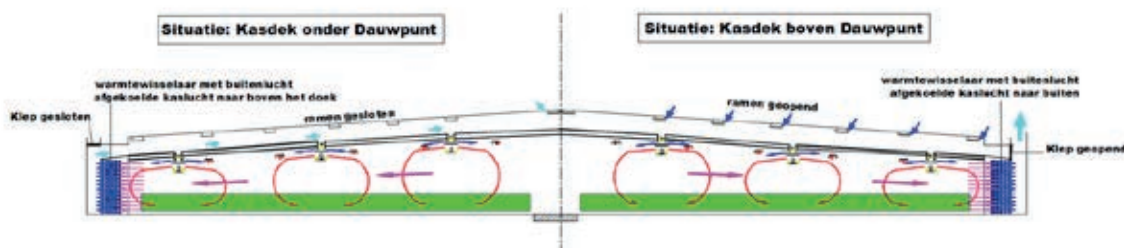
De warmtewisselaar in de gevel kan bestaan uit een efficiënte kunststof platenwisselaar met groot oppervlak. Door het grote warmtewisselend oppervlak van de platen kan bij relatief hoge watertemperaturen ontvochtigd worden. Ook dat komt ten goede aan een hoog rendement van de warmtepomp. De luchtweerstand van deze wisselaar is relatief laag door de grote afstand tussen de platen. Deze bedraagt ongeveer 40 Pascal.



Figuur 12 Kunststof warmtewisselaar met groot oppervlak in de gevel.

De nieuwste systemen met Ventilationjets voeren de afgewerkte lucht af via een opening in het schermdoek boven het middenpad. Het ligt dus voor de hand om de warmteterugwinning ook daar te laten plaatsvinden. Ook hierbij kan de hiervoor genoemde configuratie met warmtepomp en water/lucht warmtewisselaar gebruikt worden.

Een alternatief voor de warmteuitwisseling in de gevel met een warmtepomp is een goedkopere lucht/lucht wisselaar waarbij buitenlucht en kaslucht met elkaar warmte uitwisselen. Dat levert twee producten: afgekoelde kaslucht en opgewarmde buitenlucht.



Figuur 13 Ventilationjets met lucht/lucht wisselaars in de gevel. Links met gesloten ramen, rechts met geopende ramen.

De hoeveelheid vocht die in de afgekoelde kaslucht zit hangt sterk af van de buitentemperatuur en wisselt daarmee. Met een klep wordt de stroom kaslucht naar buiten of naar boven het doek geleid. Als de afgekoelde kaslucht vochtiger is dan de buitenlucht is het verstandig om de lucht direct naar buiten af te voeren door het omzetten van de klep (rechterzijde tekening). De ramen gaan dan open om buitenlucht toe te voeren aan de Ventilationjets. De aanvoer van verse lucht voorkomt dat te hoge concentraties aan schadelijke gassen ontstaan binnen de kas. Als het kasdek zo koud wordt dat er veel vocht op condenseert kan het juist verstandig zijn om de afgewerkte kaslucht boven het doek te laten stromen en de ramen te sluiten (linkerzijde tekening). In dat geval zal er een groter deel van de latente warmte teruggewonnen worden.

De warmtewisselaar kan bestaan uit een pakket transparante kunststof folieslurven.

5.3 Condensatie in een van stromingsrichting wisselend condensatie pakket

Het ontvochtigen van kaslucht zonder verlies van voelbare warmte kan op diverse manieren. Een kenmerk van veel systemen is het continue karakter; er is een stroom van kaslucht die gekoeld / verwarmd wordt en daarbij door condensatie latente warmte afgeeft. Tegelijk kan er een stroom van buitenlucht zijn, die warmte uit de kaslucht opneemt.

Het gevolg is dat er altijd energie moet worden overgedragen via een wand, of een warmtewisselaar. Dit geeft verliezen en staat een maximaal rendement in de weg.

In dit hoofdstuk wordt een ander principe bekeken, namelijk dat van de alternerende systemen, waarbij de energie via een meer directe weg wordt overgedragen.

Het basis idee laat zich als volgt beschrijven:

In fase 1 wordt er kaslucht geleid over een koud lichaam. Hierdoor gaat waterdamp condenseren. Het condensaat wordt opgevangen en afgevoerd, de convectie + condensatie energie zorgt voor opwarming van het koude lichaam.

Zodra de temperatuur van het koude lichaam zodanig is opgewarmd dat er nauwelijks nog vocht condenseert, wordt overgeschakeld naar fase 2.

In fase 2 wordt er buitenlucht over het opgewarmde lichaam geleid. De buitenlucht wordt hierdoor opgewarmd. Fase 2 is onderverdeeld in 2 sub fasen:

Fase 2a; de temperatuur van de buitenlucht is hoog genoeg om deze lucht direct in de kas te brengen en te mengen met kaslucht.

Fase 2b: de temperatuur van de buitenlucht is te laag om rechtstreeks in de kas te brengen. Nu is er een keuze om deze lucht alsnog verder op te warmen met een "gewone" warmtewisselaar, en de lucht in de kas te brengen, ofwel deze lucht terug te voeren naar buiten.

Als na verloop van tijd het lichaam weer ver genoeg is afgekoeld tot vrijwel buitentemperatuur wordt weer teruggeschakeld naar fase 1.

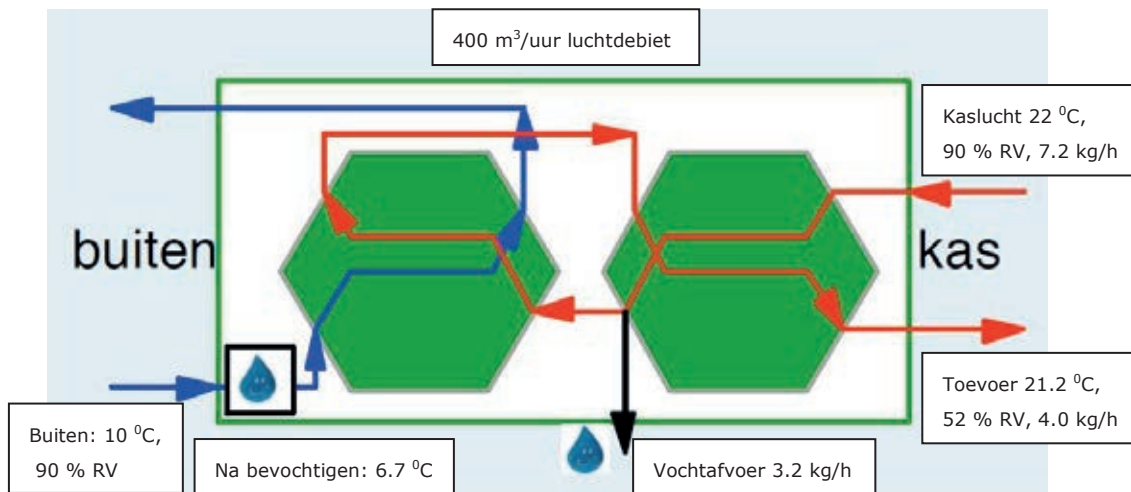
5.3.1 Hortirec systeem

De firma Recair heeft een systeem ontwikkeld en getest met de naam "Hortirec" of "HortiAir" [3]. Daarbij wordt gebruik gemaakt van een "Enthalpy Exchanger" opgebouwd uit twee achter elkaar geplaatste warmtewisselaars, bestaande uit een pakket van op elkaar gestapelde dunne geprofileerde kunststof platen. Met behulp van buitenlucht wordt kaslucht afgekoeld tot onder het dauwpunt en ontvochtigd. De warmtewisselaar bestaat uit vele kleine kanaaltjes waar lucht doorheen kan stromen en energie kan uitwisselen aan de luchtstroom aan de andere kant van de wand.



Figuur 14 Enthalpie wisselaar van "Recair".

De luchtstromen van kaslucht en buitenlucht kunnen door middel van schuifkleppen worden omgekeerd. Dat laatste kan worden benut om de warmtewisselaar ijsvrij te houden. In het volgende schema is het ontvochtigingsproces weergegeven.



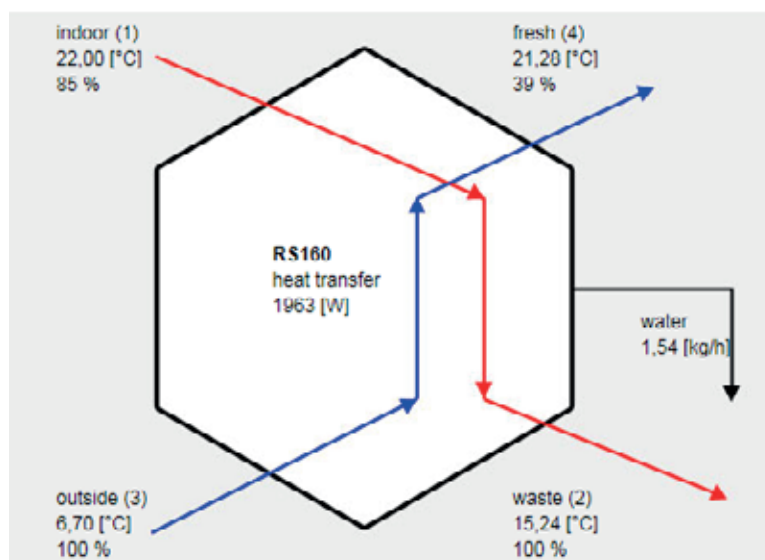
Figuur 15 Schematische weergave "Recair Enthalpie" wisselaar.

In de linker wisselaar wordt de kaslucht afgekoeld tot het dauwpunt. Daarvoor wordt buitenlucht gebruikt die eerst wordt bevochtigd om deze tot het dauwpunt te laten zakken. Vervolgens gaat de ontvochtigde kaslucht naar de rechter wisselaar waar de warme kaslucht deze lucht weer opwarmt. Op deze wijze wordt per uur bij deze condities voor een luchtdebiet van 400 m³/uur van kaslucht en buitenlucht 3.2 kg vocht uit de kas afgevoerd. Als er een verdamping van 20 g/m².uur gewenst is, dan zal bij deze buitencondities $3200/20 = 160 \text{ m}^2$ kas bediend kunnen worden en daarvoor moet per uur per m² $400/160 = 2.5 \text{ m}^3$ lucht aangevoerd worden. De energiebalans ziet er als volgt uit: voor 1 m³ kaslucht van 22 °C bij 85% RV met een enthalpie van 68,1 kJ/m³, wordt lucht terug geleverd van 21,2 °C bij 52% RV met een enthalpie van 49,8 kJ/m³. Het verschil van 18,3 kJ/m³ (27%) is naar buiten afgevoerd. Per ha en per uur is dat een verlies van $2,5 \cdot 18,3 \cdot 10.000 = 457500 \text{ kJ} = 123 \text{ kWh}$.

Aan de geleverde lucht hoeft geen warmte te worden toegevoegd omdat deze bijna 22 °C is.

Het is daarmee een ontvochtigingssysteem dat kan ontvochtigen zonder voelbaar warmteverlies. In de termen van dit rapport wint het systeem dus vrijwel 100% van het voelbare warmteverlies terug.

Als er maar één Recair wisselaar was gebruikt zou de volgende situatie ontstaan:



Figuur 16 schematische procesweergave bij één wisselaar.

Het water dat condenseert komt uit de kasluchtstroom en bedraagt 1,54 kg/h. De "fresh" stroom, wordt de kas ingevoerd en de "waste" stroom naar buiten.

Als de "fresh" luchtstroom de kas in wordt gevoerd, wordt er een andere hoeveelheid water afgevoerd. Daarvoor moet gekeken worden naar het AV. Dat bedraagt in dit geval voor de kaslucht 16.4 g/m^3 en voor "fresh" 7.2 g/m^3 . Bij een debiet van $400 \text{ m}^3/\text{uur}$ wordt dan $400 \cdot (16.4 - 7.2) = 3680 \text{ g}$ afgevoerd. Dat is dus meer dan de 1.54 kg/h die uit de kaslucht wordt afgevoerd. Om $20 \text{ g/m}^2/\text{uur}$ verdamping af te voeren moet $20 / (16.4 - 7.2) = 2.18 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{uur}$ lucht worden afgevoerd. Om die hoeveelheid buitenlucht weer op te warmen is geen energie nodig omdat de "fresh" luchtstroom nagenoeg al kastemperatuur heeft. Er is echter wel latente warmte verloren gegaan omdat de kaslucht 68.1 kJ/m^3 bevat en de "fresh" luchtstroom 43.9 kJ/m^3 . Per ha levert dat per uur een verlies op van $2.18 \cdot (68.1 - 43.9) \cdot 10.000 = 527560 \text{ kJ} = 146 \text{ kWh/ha/uur}$. Er is één unit per 183 m^2 nodig. Het systeem dat nu beschreven is wordt in de praktijk een regainunit genoemd.

Zou de "waste" stroom weer de kas in zijn gevoerd, dan was energetisch een veel ongunstiger resultaat zijn behaald. Als er weer één unit van $400 \text{ m}^3/\text{uur}$ op 160 m^2 staat wordt er te weinig water afgevoerd. Bij een gewenste verdamping van $20 \text{ g/m}^2/\text{uur}$ is er namelijk op 160 m^2 een afvoer nodig van 3.2 kg/uur . Er zal dus meer lucht uitgewisseld moeten worden dan bij gebruik van de "fresh" stroom, namelijk $832 \text{ m}^3/\text{uur} = 6.5 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{uur}$. Om deze luchtstroom op te warmen naar kastemperatuur is er energie nodig. De "waste" stroom heeft een enthalpie van 51.5 kJ/m^3 . De kaslucht bevatte 68.1 kJ/m^3 , dus per m^3 een verschil van 16.6 kJ/m^3 . Dat betekent dat er $6.5 \cdot 16.6 \cdot 10.000 = 1079000 \text{ kJ/ha/uur} = 300 \text{ kWh/ha/uur}$ geleverd moet worden.

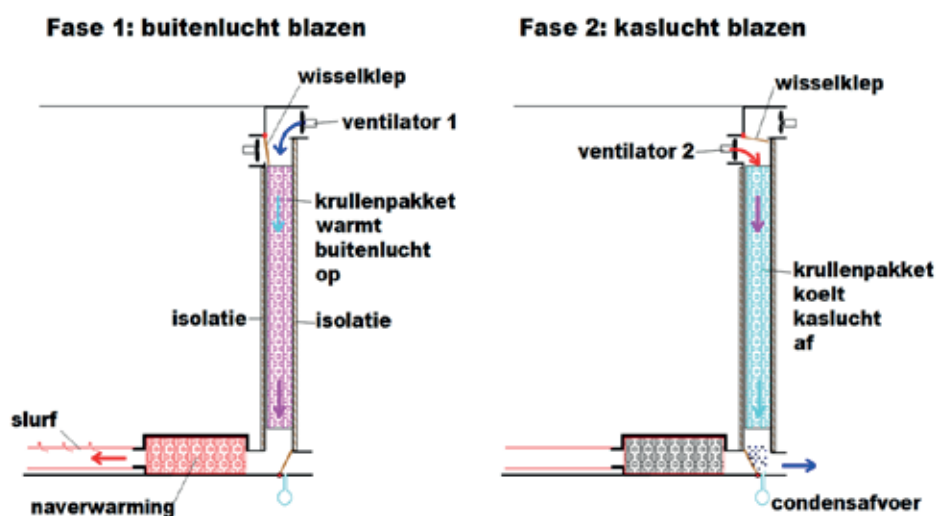
Resumerend is er voor een vochtafvoer van $20 \text{ g/m}^2/\text{uur}$ bij een dubbele unit 123 kWh/ha/uur nodig, bij een enkele "regainunit" bij invoer van de buitenlucht 146 kWh/ha/uur en bij circulatie van de kaslucht 300 kWh/ha/uur . Bij de dubbele unit blijft alle lucht in de kas en dus ook de CO_2 .

Bij het interpreteren van deze getallen moet wel bedacht worden dat zowel de buitenomstandigheden als de kasomstandigheden een grote invloed hebben gehad op de uitkomsten. Door de kleine afstand tussen de platen heeft deze wisselaar een hogere luchtweerstand dan de gevelwisselaar uit 5.2.3. Deze bedraagt ongeveer 100 Pascal. Daardoor is het stroomverbruik hoger ingeschat.

5.3.2 Aluminium krullenbed als condensor

Een alternatief voor de Hortirec wisselaar is het gebruik van metaalkrullen als medium waarop vocht condenseert en na omdraaiing van de luchtstroom weer verdampt.

Te denken valt bijvoorbeeld aan een corridor langs de noordkant van de kas, waar een grote massa aan aluminium krullen is aangebracht.



Figuur 17 Principe alternerende warmtewisselaar met metaalkrullen en naverwarmer.

In fase 1 wordt koude, droge buitenlucht in de corridor gezogen en door metalen krullen geleid. In feite fungeren de metaalkrullen nu als warmtewisselaar die de buitenlucht opwarmen. Eventueel wordt deze lucht verder opgewarmd met een naverwarming en daarna via een slurf onder het gewas gebracht. Door toepassing van een LBK met een groot warmtewisselend oppervlak wordt de naverwarming van de lucht tot op kasttemperatuur automatisch efficiënt geregeld. De watertemperatuur in de warmtewisselaar is dan slechts enkele graden hoger dan de kasttemperatuur, zodat bij een wisselende temperatuur van de instromende lucht de uitgaande temperatuur voldoende stabiel is.

Als de metaal krullen teveel afgekoeld zijn, wordt overgeschakeld naar fase 2.

Dan worden de kleppen omgezet en wordt kaslucht aangezogen, door de metaalkrullen geleid en afgekoeld naar buiten afgevoerd.

In het ideale geval zou de buitenlucht die door het krullenbed wordt aangezogen steeds tot kasluchttemperatuur zijn opgewarmd wanneer het aan de onderkant uitstroomt. In dat geval zou het een installatie zijn met 100% terugwinning van het voelbare warmteverlies.

5.3.3 Gedistribueerde uitvoering

Een andere, gedistribueerde uitvoering zou kunnen zijn dat op elke ca 250 m² van de kas een container met metaalkrullen staat opgesteld. Buitenlucht wordt van boven het scherm aangezogen. Als de luchtramen open staan is dit vrijwel het zelfde als buitenlucht. Met gesloten luchtramen kunnen temperatuur en vochtigheid afwijken van de buitenlucht.

De werking is in grote lijnen hetzelfde als boven omschreven, maar met een belangrijk verschil namelijk dat geen naverwarming wordt toegepast. De lucht van boven het scherm wordt met een zo grote hoeveelheid kaslucht gemengd dat er voor het gewas geen merkbare temperatuurdaling optreedt. Dit maakt het systeem dus aanzienlijk goedkoper.

Verdere uitwerking: de container met metaal krullen kan bestaan uit een rechtopstaande buis met dubbele wand. In fase 1 wordt kaslucht van onderaf in de buis gebracht en na het uitstromen aan de bovenkant weer in de kas verdeeld.

In fase 2 wordt koude lucht van boven het scherm in de buis geblazen en aan de onderkant via een keerklep in de buitenste rand gebracht. Hierdoor komt de lucht dus ook aan de bovenkant uit de buis en kan vandaar weer in de kas worden verdeeld.

5.3.4 Berekeningen aan het altemnerende systeem

Nu is het zaak om de haalbaarheid van een dergelijk systeem te onderzoeken door een aantal vereenvoudigde berekeningen. We gaan uit van het gedistribueerde systeem. Als daarvan de dimensionering bekend is kan het centrale gevel systeem hiervan worden afgeleid.

Voor ontvochtiging onder een gesloten schermdoek is een capaciteit in de orde van 25 gram /m²/uur nodig. Op een oppervlak van 250 m² praten we dan over ca 6 liter/uur.

Opmerking: 25 gr/m².uur geldt voor tomaat bij de huidige teeltmethode met een RV van ca 85%. In de toekomst kan dit naar verwachting met ca 50% worden gereduceerd.

Stel we gaan uit van een kasluchttemperatuur van 15 °C, en een RV van 90%. Als buitentemperatuur kiezen we 5 °C en een RV van 100%. (worst case)

Het verschil in $AV_{kas - buiten}$ is dan ca 4 gr/kg = 5 gr/m³ lucht. Als we in aanvang uitgaan van een gelijke tijdsduur van fase 1 en 2 en gelijke mate van ontvochtiging dan moet de luchtstroom een debiet hebben in de orde van $6000/5 = 1200 \text{ m}^3 / \text{uur}$. Stel dat we de faseduur dimensioneren op 10 minuten, dan moet er tijdens fase 2 ca 200 m³ koude/droge lucht worden opgewarmd van 5 °C naar 15 °C. Maar omdat het krullenbed lineair afkoelt naar 5 °C is dit effectief de helft. De benodigde energie is hiervoor: $200 * 1,2 * (15 - 5) / 2 * 1 \text{ kJ} = 1200 \text{ kJ}$. Dat komt neer op $1200 * (10.000/250) = 48.000 \text{ kJ/ha/uur} = 13,3 \text{ kWh/ha/uur}$.

Het krullenbed koelt daarbij 10 °C af. Dat betekent dat de warmte inhoud gelijk moet zijn aan $1200 / 10 = \text{ca } 120 \text{ kJ/ K}$. Als we uitgaan van een krullenbed van aluminium met een soortelijke warmte (s.w.) van 0,88 kJ/kg K met een vulling van 50%, dan heeft dit een effectieve s.w. van 0,44 kJ/kg K.

Voor een warmtecapaciteit van 120 kJ/K hebben we dus $120 / 0,44 = 275 \text{ kg}$ aluminium krullen nodig. Het soortelijk gewicht van aluminium is 2,7 kg/liter. Met een vullingsgraad van 50% heeft de genoemde 275 kg aluminium een volume van ca 200 liter.

Dit gewicht en volume aan krullenbed kunnen we verkleinen door met kortere cycli te werken. We kunnen bijvoorbeeld volstaan met 100 liter krullenbed door de cyclus te verkorten naar 5 minuten. Verder moet er gelet worden op de hoogte / lengte / breedte verhoudingen vanwege de luchtsnelheid en de verblijftijd van de lucht in het krullenbed.

Stel dat we uitgaan van een ronde buis met een inhoud van 100 liter en zodanig dat deze rechtop in de kas kan staan. 1 liter = 1000 cm³. Als de hoogte 5 meter is, moet de doorsnede dus $100.000 / 500 = 200 \text{ cm}^2$ zijn. Dit levert een buis op met een diameter van 15 cm. Bij een doorstroming van 1200 m³ /uur = $1200 / 3600 = 0,33 \text{ m}^3/\text{seconde}$ komt dat uit op een luchtsnelheid van ruim 15 m/s en een verblijftijd van 0,33 seconde in het krullenbed. Dit klinkt niet realistisch, alleen al vanwege de benodigde drukval over de buis en het elektriciteitsverbruik van de ventilator. De diameter van het krullenbed zal aanzienlijk groter moeten zijn, de luchtsnelheid lager en de verblijftijd langer.

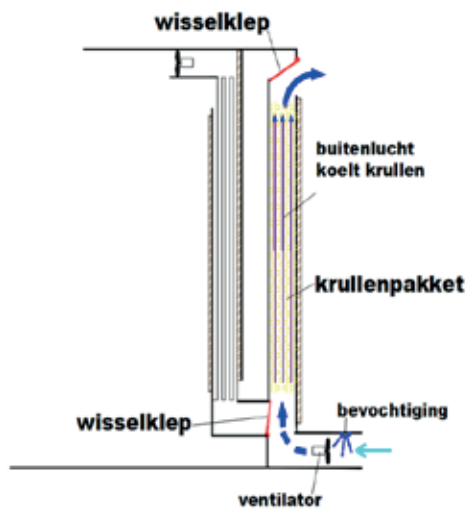
Bijvoorbeeld een buis met een diameter van 70 cm (vergelijk slurf onder de teeltgoot) heeft een oppervlakte van 0,38 m². De lengte van de buis bij een volume van 100 liter is dan slechts 0,26 m. Het wordt dan een platte schijf. De luchtsnelheid moet dan zijn $\text{ca } 0,33 / 0,38 = 0,86 \text{ m/s}$. De verblijftijd blijft in principe kort, nl ca 1/3 seconde. Deze laatste factor kan worden vergroot door de krullen een lagere dichtheid te geven en dus meer te verdelen over een langere buis. Dit komt ook de luchtweerstand van de buis ten goede en is dus gunstig voor het elektriciteitsverbruik.

5.3.5 Een alternierend systeem zonder naverwarming

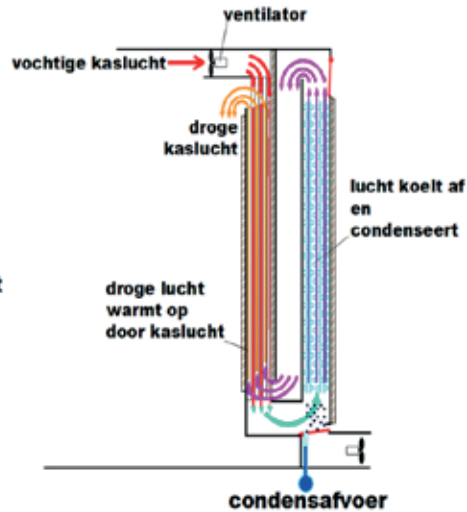
Om de dure warmtewisselaar uit te sparen moet de efficiëntie van de krullenwisselaar omhoog. Dat kan door het systeem uit te voeren in een dubbele laag. Onderstaande schets geeft een beeld van een in de kaswand geïntegreerd systeem.

In fase 1 wordt koude, droge buitenlucht door het krullenpakket getrokken. Om die lucht extra koud te maken wordt hij bevochtigd. Daardoor koelt het pakket krullen zoveel af als mogelijk is bij de heersende buitencondities. Als het krullenpakket is afgekoeld tot buitentemperatuur wordt de klep omgeschakeld naar fase 2 en wordt kaslucht door het krullenpakket getrokken. In de rechterkolom wordt de kaslucht afgekoeld tot onder het dauwpunt en zal dus vocht afgeven. Vervolgens gaat die afgekoelde lucht door de linker kolom en wordt dan weer opgewarmd door de vochtige kaslucht. Als er geen condensatie meer optreedt wordt weer omgeschakeld naar fase 1.

Fase 1: buitenlucht blazen



Fase 2: kaslucht blazen



Figuur 18 Principe alternerende warmtewisselaar zonder naverwarmer.

Bovenstaande uitvoering werkt met vrije uitblaas in de kas, waarna de droge lucht wordt verspreid, eventueel gemengd met kaslucht. Omdat de inblaaslucht voldoende opgemengd wordt met kaslucht voor deze het gewas bereikt is er geen naverwarming nodig. Wel zijn er dus twee warmtewisselaars nodig en kan de uitblaastemperatuur variëren.

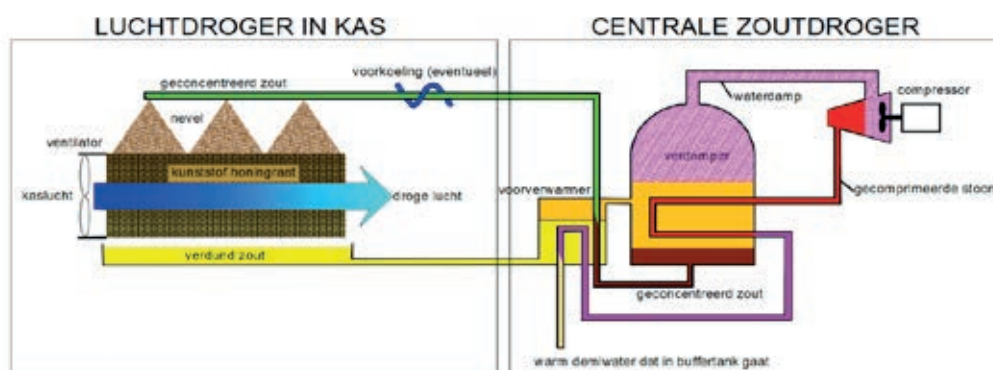
Het is duidelijk dat alternerende systemen van nature geen stabiele uitgangstemperatuur hebben omdat de lucht afwisselend wordt opgewarmd en afgekoeld. Dit zelfde geldt voor de vochtigheid. In gebrachte buitenlucht is steeds even droog, maar de kaslucht wordt in fase 2 steeds minder diep ontvochtigd naarmate het krullenpakket opwarmt. Dit probleem kan deels worden opgelost door het systeem op te splitsen in deelsystemen A en B en deze in tegenfase te laten werken. Systeem A warmt dan op, systeem B koelt af of omgekeerd. Door de uitgangsströmen van A en B bij elkaar te brengen ontstaat een stabielere temperatuur en ook minder schommeling in vochtigheid.

De energie-prestatie van dit alternerend systeem zal hoger zijn dan van de enkele krullenbed wisselaar omdat het dubbele systeem een tegenstroom wisselaar is waar het enkele systeem een mee-stroom wisselaar is. Ook hier is het theoretisch maximale terugwin rendement 100% van het voelbaar warmteverlies. Ook hier kan de lucht namelijk niet warmer uit de wisselaar stromen dan de temperatuur van de lucht die de wisselaar in stroomt.

5.4 Het herconcentreren van een zoutoplossing met damprecompressie

In hoofdstuk 5 komen nieuwe, nog niet bestaande technieken aan bod. Bij de in hoofdstuk 4.2.2 genoemde zoutdroger werd gebruik gemaakt van een warmtepomp om de zoutoplossing opnieuw te concentreren. Er is ook een nieuwe methode voor herconcentratie in ontwikkeling [5].

Door gebruik te maken van damprecompressie kan de hoeveelheid energie die nodig is om het condens uit het zoute water te verwijderen sterk worden gereduceerd. In een verdampervat wordt gestart met het opwarmen van de zoutoplossing zodat er damp vrijkomt. Deze waterdamp wordt in druk verhoogd met een elektrisch aangedreven compressor. Daardoor zal de temperatuur van de damp zodanig stijgen dat er stoom ontstaat. Deze stoom wordt vervolgens opnieuw in het verdampervat gebracht om de zoutoplossing verder te verhitten. Feitelijk ontstaat hierdoor een warmtepomp met een te verwachten elektrisch COP van 8. Uitgaande van een rendement bij stroomopwekking van 45% ontstaat dan een $COP_{\text{thermisch}}$ van 3,6. Als de stoom gecondenseerd is heeft deze een temperatuur van 60-70 °C en wordt deze gebruikt om de ingaande stroom verdund zout voor te verwarmen. Daarna verlaat het condensaat het systeem als warm demiwater. Ook de stroom geconcentreerd zout wordt gebruikt om de stroom verdund zout voor te verwarmen. Op die manier gaat er maar heel weinig warmte verloren. De hoeveelheid vrijkomend demiwater is gelijk aan de gerealiseerde gewasverdamping wanneer de kasomhulling dampdicht is.



Figuur 19 Principeschema drooginstallatie op basis van zout water en centrale zoutdroging door damprecompressie.

6 Inschatting van de prestaties en kosten van de systemen

Met behulp van het Kaspro simulatiemodel is voor een 3 tal kastypen uitgerekend wat het jaarlijkse gasverbruik is voor zowel een onbelichte als een belichte teelt van tomaat.

De 3 kastypen met hun uitrusting en instellingen van de klimaatregeling zijn:

Standaard kas:

Voorzien van 3 schermen:

Tot 19-3 een vaste PE folie

Onderin een beweegbaar transparant SLS10 ultraplus scherm

Bovenin een beweegbaar XLS18 energiescherm

Het scherm sluit onder de 14 °C buitentemperatuur. Het transparante SLS10 scherm opent boven een bepaalde buitenstraling in afhankelijkheid van de buitentemperatuur.

Het opent bij -5 °C boven 200 W/m², bij 5 °C boven 50 W/m², bij 12 °C boven 5 W/m².

RV setpoint van 85% tot 05-02, daarna 93%.

Kas met hoogisolerende schermen [6]

Voorzien van 4 schermen:

Twee gealuminiseerde doeken

Plus een dampdichte folie in de nacht

Overdag twee transparante folies

De schermen sluiten onder de 14 °C buitentemperatuur. De gealuminiseerde schermen openen bij daglicht. Het transparante PE folie opent boven een bepaalde buitenstraling in afhankelijkheid van de buitentemperatuur.

Bij -10 °C boven 500 W/m², bij 0 °C boven 250 W/m², bij 15 °C boven 50 W/m² en bij 20 °C boven 5 W/m². Het tweede transparante folie opent later: (-10 500);(-5 200);(5 50);(10 5).

Het RV setpoint is 86%. Na 15-08: 90%

Dubbel glas kas met 1 scherm

SLS10Ultraplus scherm.

Het transparante doek opent boven een bepaalde buitenstraling in afhankelijkheid van de buitentemperatuur. Bij -5 °C boven 200 W/m², bij 5 °C boven 50 W/m², bij 12 °C boven 5 W/m².

Het RV setpoint is 85% (dag) en 90% (nacht). Na 10-11 95%.

In de standaardkas en in de kas met hoogisolerende schermen kan worden belicht met SON-T lampen met een intensiteit van 215 µmol/(m² s). Donkerperiode van 4 uur en bij meer dan 1500 J/cm² blijven de lampen de volgende nacht uit.

In de tabellen zijn per kastype weergegeven wat de belangrijkste kenmerken zijn van de beoordeelde systemen. Daarbij is er gesorteerd op aflopend gasverbruik. Deze berekening is gemaakt voor de belangrijkste categorieën van de systemen voor ontvochtiging. Daarbij is er een selectie gemaakt van de belangrijkste categorieën uit de hoofdstukken 4 en 5.

De coderingen van de systemen zijn:

Code systeem	Beschrijving
Ventileren met buitenlucht	Geen systeem voor ontvochtiging, dus luchtraam
Ventilationjet	Ventilationjet met afvoer via middenpad (hfdst 4.1.1.3)
VJ met WW	Ventilationjet met een warmtewisselaar in de gevel en een warmtepomp. COP thermisch= 4 (hfdst 5.2.3)
Dubbele gevel condensatiewand	Warmtewisselaar met metaalkrullen in de gevel met een slurf onder of boven het gewas (hfdst 5.3.3)
LBK regain voelbaar (buitenlucht)	Regain systeem met uitblaas via slurf (hfdst 4.1.2)
LBK regain totaal (buitenlucht)	Hortirec: combi van twee typen warmtewisselaars (voelbaar en latent) in de gevel (hfdst 5.3.2) met uitblaas via slurf
LBK Next Generation (kaslucht)	Next Generation systeem, warmte en koude blok plus warmtepomp, COP thermisch= 2.2 (hfdst 4.2.1) met uitblaas via slurf
LBK zout vacuüm (kaslucht)	Ontvochtiging in de gevel met een pad, regeneratie met een warmtepomp, COP thermisch= 2,5 (hfdst 4.2.2) met uitblaas via slurf
LBK zout damprecompressie (kaslucht)	Ontvochtiging in de gevel met een pad, regeneratie met een damp recompressiesysteem, COP thermisch=3.6 (hfdst 5.4) met uitblaas via een slurf

De betekenis van de kolommen is als volgt:

Eenheid	Beschrijving
Besparing op ventilatie	Door betere sturing van de ventilatie ontstane reductie in ventilatiedebiet op de ventilatie via ramen en schermkieren
Voelbare warmte terugwinning	Het percentage voelbare warmte dat uit de ventilatielucht wordt gehaald
Latente warmte terugwinning	Het percentage latente warmte dat uit de ventilatielucht wordt gehaald
Belichting	Er wordt belicht met 215 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ [0=nee, 1=ja]
Warmte buffer	De gewonnen warmte kan alleen direct worden ingezet [0] of opgeslagen voor later gebruik [1]
Regeneratie factor	De energie (meestal stroom) die in het apparaat gestoken moet worden om te ontvochtigen uitgedrukt als % van de latente warmte
Warmtevraag	De hoeveelheid warmte die geleverd moet worden om de kas op temperatuur te houden in $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{jaar}$
Ontvochtiging	De hoeveelheid onttrokken vocht door het systeem in $\text{l}/\text{m}^2/\text{jaar}$
Warmte-oogst	De hoeveelheid voelbare en latente warmte die door het ontvochtiging systeem gewonnen wordt in $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{jaar}$ en die niet direct in de kas wordt gebruikt, maar beschikbaar is voor opslag
Stroom	De hoeveelheid stroom die verbruikt wordt door de ventilatoren, pompen en warmtepompen in $\text{kWh}/\text{m}^2/\text{jaar}$
Gas	De hoeveelheid aardgasequivalenten die nodig zijn om de netto energievraag voor de warmtelevering te dekken. De warmte geleverd door het stroomverbruik van de hulpapparatuur zit daar bij in.

systeem	ontvochtigingsmethode	Besparing op ventilatie	Terugwinning warmte		regeneratie factor
			voelbaar	latent	
ventileren met buitenlucht	geen	--	0%	0%	--
Ventilationjet	geen	25%	0%	0%	--
Ventilationjet met ww	met condensatiewand en warmtepomp	25%	100%	80%	25%
Dubbele gevel condensatiewand	met condensatiewand	50%	50%	25%	5%
LBK regain voelbaar (buitenlucht)	met regain zonder condensatie	25%	80%	0%	--
LBK regain totaal (buitenlucht)	met condenserende regain	100%	100%	50%	7%
LBK Next Generation (kaslucht)	met dubbele warmtewisselaar	100%	100%	100%	45%
LBK zout vacuum (kaslucht)	zoutabsorptie, vacuum regeneratie	100%	100%	100%	40%
LBK zout damprecompr (kaslucht)	zoutabsorptie, damprecompressie	100%	100%	100%	27%

6.1 Resultaten Standaard kas

	Standaard kas onbelicht				
	warmtevraag	ontvochtiging	warmte-oogst	stroom	gas
	MJ/m ² /jr	l/m ² /jr	kWh/m ² /jr	kWh/m ² /jr	m ³ /m ² /jr
Zonder warmtebuffer					
ventileren met buitenlucht	819	117	0	2	26.5
Ventilationjet	747	116	0	3	24.5
Ventilationjet met ww	619	106	0	20	21.9
Dubbele gevel condensatiewand	596	111	0	7	20.7
LBK regain voelbaar (buitenlucht)	676	115	0	5	22.6
LBK regain totaal (buitenlucht)	595	108	0	8	20.9
LBK Next Generation (kaslucht)	479	100	0	35	24.3
LBK zout vacuum (kaslucht)	484	102	0	32	23.7
LBK zout damprecompr (kaslucht)	498	103	0	24	21.7
Met warmtebuffer					
ventileren met buitenlucht	819	117	0	2	26.5
Ventilationjet	747	116	0	3	24.5

	Standaard kas onbelicht				
	warmtevraag	ontvochtiging	warmte-oogst	stroom	gas
	MJ/m ² /jr	l/m ² /jr	kWh/m ² /jr	kWh/m ² /jr	m ³ /m ² /jr
Ventilationjet met ww	676	115	258	20	18.5
Dubbele gevel condensatiewand	676	115	145	7	18.7
LBK regain voelbaar (buitenlucht)	676	115	0	5	22.6
LBK regain totaal (buitenlucht)	676	115	147	8	18.8
LBK Next Generation (kaslucht)	676	115	337	34	19.6
LBK zout vacuum (kaslucht)	676	115	330	31	19.0
LBK zout damprecompr (kaslucht)	676	115	310	23	17.5

	Standaard kas belicht				
	warmtevraag	ontvochtiging	warmte-oogst	stroom	gas
	MJ/m ² /jr	l/m ² /jr	kWh/m ² /jr	kWh/m ² /jr	m ³ /m ² /jr
Zonder warmtebuffer					
ventileren met buitenlucht	409	196	0	4	13.9
Ventilationjet	335	189	0	6	12.1
Ventilationjet met ww	214	141	0	27	11.3
Dubbele gevel condensatiewand	195	162	0	10	8.8
LBK regain voelbaar (buitenlucht)	261	182	0	7	10.2
LBK regain totaal (buitenlucht)	194	160	0	12	9.2
LBK Next Generation (kaslucht)	109	129	0	45	15.4
LBK zout vacuum (kaslucht)	112	131	0	41	14.4
LBK zout damprecompr (kaslucht)	120	134	0	31	11.6
Met warmtebuffer					
ventileren met buitenlucht	409	196	0	4	13.9
Ventilationjet	335	189	0	6	12.1
Ventilationjet met ww	261	182	209	17	6.0
Dubbele gevel condensatiewand	261	182	162	8	5.3
LBK regain voelbaar (buitenlucht)	261	182	0	7	10.2

	Standaard kas belicht				
	warmtevraag	ontvochtiging	warmte-oogst	stroom	gas
	MJ/m ² /jr	l/m ² /jr	kWh/m ² /jr	kWh/m ² /jr	m ³ /m ² /jr
LBK regain totaal (buitenlucht)	261	182	163	9	5.5
LBK Next Generation (kaslucht)	261	182	236	24	7.2
LBK zout vacuüm (kaslucht)	261	182	232	22	6.8
LBK zout damprecompr (kaslucht)	261	182	227	17	5.5

6.2 Resultaten Hoog geïsoleerde kas

	Hoog geïsoleerde kas onbelicht				
	warmtevraag	ontvochtiging	warmte-oogst	stroom	gas
	MJ/m ² /jr	l/m ² /jr	kWh/m ² /jr	kWh/m ² /jr	m ³ /m ² /jr
Zonder warmtebuffer					
ventileren met buitenlucht	676	136	0	3	22.1
Ventilationjet	584	135	0	4	19.5
Ventilationjet met ww	417	131	0	25	15.8
Dubbele gevel condensatiewand	387	133	0	8	14.4
LBK regain voelbaar (buitenlucht)	491	135	0	5	16.9
LBK regain totaal (buitenlucht)	385	132	0	10	14.7
LBK Next Generation (kaslucht)	255	123	0	43	19.4
LBK zout vacuüm (kaslucht)	260	124	0	39	18.5
LBK zout damprecompr (kaslucht)	271	127	0	29	15.9
Met warmtebuffer					
ventileren met buitenlucht	676	136	0	3	22.1
Ventilationjet	584	135	0	4	19.5
Ventilationjet met ww	491	135	271	21	12.5
Dubbele gevel condensatiewand	491	135	165	8	12.4
LBK regain voelbaar (buitenlucht)	491	135	0	5	16.9
LBK regain totaal (buitenlucht)	491	135	168	9	12.7

	Hoog geïsoleerde kas onbelicht				
	warmtevraag	ontvochtiging	warmte-oogst	stroom	gas
	MJ/m ² /jr	l/m ² /jr	kWh/m ² /jr	kWh/m ² /jr	m ³ /m ² /jr
LBK Next Generation (kaslucht)	491	135	328	33	13.8
LBK zout vacuum (kaslucht)	491	135	324	30	13.3
LBK zout damprecompr (kaslucht)	491	135	311	23	11.6

	Hoog geïsoleerde kas belicht				
	warmtevraag	ontvochtiging	warmte-oogst	stroom	gas
	MJ/m ² /jr	l/m ² /jr	kWh/m ² /jr	kWh/m ² /jr	m ³ /m ² /jr
Zonder warmtebuffer					
ventileren met buitenlucht	351	212	0	4	12.2
Ventilationjet	266	206	0	6	10.1
Ventilationjet met ww	133	153	0	29	9.3
Dubbele gevel condensatiewand	114	176	0	11	6.5
LBK regain voelbaar (buitenlucht)	113	199	0	8	7.9
LBK regain totaal (buitenlucht)	113	175	0	13	6.9
LBK Next Generation (kaslucht)	38	140	0	48	14.0
LBK zout vacuum (kaslucht)	39	141	0	44	12.9
LBK zout damprecompr (kaslucht)	44	145	0	33	9.8
Met warmtebuffer					
ventileren met buitenlucht	351	212	0	4	12.2
Ventilationjet	266	206	0	6	10.1
Ventilationjet met ww	182	199	166	14	4.1
Dubbele gevel condensatiewand	182	199	134	7	3.3
LBK regain voelbaar (buitenlucht)	182	199	0	8	7.9
LBK regain totaal (buitenlucht)	182	199	135	8	3.5
LBK Next Generation (kaslucht)	182	199	178	19	5.1
LBK zout vacuum (kaslucht)	182	199	176	17	4.8
LBK zout damprecompr (kaslucht)	182	199	174	14	3.7

6.3 Resultaten Dubbelglas kas

	Dubbelglas kas onbelicht				
	warmtevraag	ontvochtiging	warmte-oogst	stroom	gas
	MJ/m ² /jr	l/m ² /jr	kWh/m ² /jr	kWh/m ² /jr	m ³ /m ² /jr
Zonder warmtebuffer					
Ventileren met buitenlucht	661	142	0	3	21.6
Ventilationjet	567	142	0	4	19.0
Ventilationjet met ww	407	135	0	25	16.1
Dubbele gevel condensatiewand	380	139	0	9	14.3
LBK regain voelbaar (buitenlucht)	473	142	0	6	16.5
LBK regain totaal (buitenlucht)	379	138	0	10	14.6
LBK Next Generation (kaslucht)	259	126	0	44	19.8
LBK zout vacuüm (kaslucht)	263	127	0	40	18.8
LBK zout damprecompr (kaslucht)	275	130	0	30	16.2
Met warmtebuffer					
ventileren met buitenlucht	661	142	0	3	21.6
Ventilationjet	567	142	0	4	19.0
Ventilationjet met ww	473	142	249	20	12.5
Dubbele gevel condensatiewand	473	142	159	8	12.1
LBK regain voelbaar (buitenlucht)	473	142	0	6	16.5
LBK regain totaal (buitenlucht)	473	142	162	9	12.3
LBK Next Generation (kaslucht)	473	142	295	31	13.9
LBK zout vacuüm (kaslucht)	473	142	291	29	13.4
LBK zout damprecompr (kaslucht)	473	142	280	22	11.7

	Dubbelglas kas belicht				
	warmtevraag	ontvochtiging	warmte-oogst	stroom	gas
	MJ/m ² /jr	l/m ² /jr	kWh/m ² /jr	kWh/m ² /jr	m ³ /m ² /jr
Zonder warmtebuffer					
ventileren met buitenlucht	311	210	0	4	10.9
Ventilationjet	233	211	0	6	9.0

	Dubbelglas kas belicht				
	warmtevraag	ontvochtiging	warmte-oogst	stroom	gas
	MJ/m ² /jr	l/m ² /jr	kWh/m ² /jr	kWh/m ² /jr	m ³ /m ² /jr
Ventilationjet met ww	116	159	0	30	9.6
Dubbele gevel condensatiewand	101	185	0	12	6.2
LBK regain voelbaar (buitenlucht)	154	211	0	8	7.1
LBK regain totaal (buitenlucht)	100	183	0	13	6.6
LBK Next Generation (kaslucht)	36	146	0	50	14.5
LBK zout vacuüm (kaslucht)	38	147	0	46	13.4
LBK zout damprecompr (kaslucht)	43	151	0	35	10.1
Met warmtebuffer					
ventileren met buitenlucht	311	210	0	4	10.9
Ventilationjet	233	211	0	6	9.0
Ventilationjet met ww	154	211	144	13	3.7
Dubbele gevel condensatiewand	154	211	120	6	2.8
LBK regain voelbaar (buitenlucht)	154	211	0	8	7.1
LBK regain totaal (buitenlucht)	154	211	121	7	3.0
LBK Next Generation (kaslucht)	154	211	154	18	4.9
LBK zout vacuüm (kaslucht)	154	211	149	17	4.5
LBK zout damprecompr (kaslucht)	154	211	148	13	3.5

6.4 Overzicht van de resultaten

6.4.1 Energie

In het volgende overzicht staan de uitersten in gasverbruik per m².jaar weergegeven.

Tabel 1

Equivalent gasverbruik voor warmte en extra elektriciteit in m³/m².jaar voor tomatenteelt voor 3 kassystemen met aflopende k-waarde met en zonder belichting en vochtafvoer op basis van luchtramen en schermkieren of met de beste optie voor terugwinning van voelbare en latente warmte.

ontvochtiging	onbelicht			belicht		
	nee	ja		nee	Ja	
Warmtebuffer		nee	Ja		nee	ja
Standaard kas	26.5	20.7	18.7	13.9	8.8	5.3
Hoog geïsoleerde kas	22.1	14.4	12.4	12.2	6.5	3.3
Dubbel glas kas	21.6	14.3	12.1	10.9	6.2	2.8

Dat levert de volgende besparingen op:

Tabel 2

Verskil in verbruik aan aardgas equivalenten (extra stroomverbruik meegerekend) in m³/m².jaar tussen het best presterende systeem voor ontvochtiging ten opzichte van de referenties met uiteenlopende isolatiewaarden en met en zonder belichting en warmtebuffer.

ontvochtiging	onbelicht			belicht		
	nee	ja		nee	Ja	
Warmtebuffer		nee	Ja		nee	ja
Standaard kas	Ref1	5.8	7.8	Ref4	5.1	8.6
Hoog geïsoleerde kas	Ref2	7.7	9.7	Ref5	5.7	8.9
Dubbel glas kas	Ref3	7.3	9.5	Ref6	4.7	8.1

Voor een onbelichte teelt in een standaard kas kan het verbruik van 26.5 m³/m².jaar dus met 7.8 m³/m².jaar ofwel met 29% worden teruggedrongen door een goed systeem voor terugwinning van latente en voelbare warmte. Door een ander kastype (meer isolatie) te kiezen wordt de besparing zelfs nog groter. Dat komt omdat daar de onbeheersbare verliezen via schermen en luchtramen kleiner worden. Een warmtebuffer van een week levert 2.0-3.5 m³/m².jaar op.

Voor een belichte teelt in een standaard kas daalt het huidige verbruik van 13.9 m³/m².jaar met 8.6 m³/m².jaar door het beste systeem voor terugwinning van latente en voelbare warmte. Een besparing van 62%. Door een ander kastype te kiezen gaat daar nog maar heel weinig extra vanaf.

In alle situaties leveren de systemen met warmtewisselaars met condensatie mogelijkheid en het ontvochtigen met zout het laagste energieverbruik voor warmte op. Alleen de warmtewisselaars met warmtepomp en de zoutsystemen zijn onafhankelijk van de buitenomstandigheden te gebruiken. Dat levert op zich niet extra veel besparing op, maar kan wel een kwalitatief voordeel opleveren bij het bestrijden van schimmels of het extra verlagen van de RV in verband met houdbaarheid. Dat speelt bijvoorbeeld bij rozenteelt.

De systemen die gebruik maken van de mogelijkheid om met behulp van koude buitenlucht de latente warmte te oogsten zoals de dubbele gevel of de LBK regain scoren relatief goed. Omdat dit allemaal systemen zijn die nog niet bestaan is het moeilijk om een inschatting te maken van de benodigde investeringen en kosten.

Deze systemen zijn qua inzetbaarheid niet vergelijkbaar met de systemen met zout of een warmtepomp omdat de haalbare ontvochtiging sterk afhankelijk zijn van de buitencondities. Door het regelbaar maken van het ventilatiedebiet op basis van het verschil in absoluut vocht tussen binnen en buiten zijn ze heel het jaar inzetbaar, maar komen ze toch soms capaciteit te kort. In de simulatie is er van uit gegaan dat in dat geval er alsnog een kleine temperatuurverhoging van de kas wordt ingezet om het verschil in AV met buiten groter te maken, eventueel gecombineerd met een kier in het luchtraam en het scherm. Daarmee is rekening gehouden in de berekeningen. Die werkwijze maakt dat het uiteindelijk niet de grote verschillen in oogstbare warmte zijn die de totale warmtevraag bepalen, maar de extra inzet van de buisverwarming en het openen van de ramen en het trekken van kieren in het scherm tijdens perioden dat er niet voldoende ontvochtigd kan worden plus de hulpstroom voor de installaties.

En juist de lage behoefte aan hulpstroom maakt dat de systemen die afhankelijk zijn van de buitenlucht toch interessant zijn, ook al halen ze niet dezelfde terugwin capaciteiten voor latente warmte als de andere systemen. Ondanks het feit dat er soms extra energie ingezet moet worden om voldoende te ontvochtigen besparen ze toch al gauw $6 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{jaar}$ in zowel een onbelichte als een belichte teelt en opvallend genoeg onafhankelijk van de isolatiewaarde van de kas. Dat laatste komt omdat er in alle gevallen van uit is gegaan dat de schermen vrijwel altijd 100% sluiten. Wanneer je in die situatie zo zuinig mogelijk ventileert en de schermen veel meer uren 100% gesloten laat haal je dus een behoorlijke besparing.

Buffering van geoogste warmte levert voor alle systemen hogere besparingen op, dus daar moet aandacht aan worden gegeven. De meeste systemen leveren echter slechts relatief koud water op, dus met een lage energie-inhoud per m^3 . Een aquifer met warmtepomp lijkt voor de opslag daarvan het aangewezen middel, maar omdat de energiewinst van buffering vaak maar $2.0\text{-}3.5 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{jaar}$ bedraagt, is de investeringsruimte daarvoor niet groot. Een goedkoop alternatief voor de aquifer is een geïsoleerd regenwater bassin. Daarmee kan een periode van een week overbrugd worden en dus een deel van het voordeel behaald worden. Bovendien kent deze optie geen beperking van een maximaal toelaatbare watertemperatuur.

Wanneer niet de warme, maar de koude output van de warmtepomp wordt gebufferd kan de isolatie van de buffer zelfs geheel achterwege blijven.

Bij systemen waarbij hulpstroom wordt ingezet voor de aandrijving van een regenerator, een extra ventilator of een warmtepomp komt deze stroom uiteindelijk als warmte in de kas en drukt dat de warmtevraag extra omlaag. Uiteraard levert dat een hoger stroomverbruik op tot maximaal $50 \text{ kWh}/\text{m}^2/\text{jaar}$. Dat komt overeen met $13 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{jaar}$ aardgas equivalent. Het hangt van de stroomprijs af hoe zwaar dit telt bij de totale kosten.

De hoeveelheden water die worden onttrokken verschillen niet veel tussen de systemen. Dat is ook logisch, want de plant blijft dezelfde hoeveelheid water verdampen omdat dit wordt bepaald door de toegevoerde energie en niet door RV of VD. De grootste verschillen bestaan bij de belichte teelt omdat er dan relatief veel verdamping is die soms moet worden afgelucht via de ramen omdat het ontvochtigingssysteem een te beperkte capaciteit heeft.

6.4.2 Investeringsruimte

Bij de huidige gasprijzen levert $1 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{jaar}$ aardgasequivalent ongeveer $\text{€}0,15/\text{m}^2.\text{jaar}$ besparing op. Potentieel kan dat de komende jaren oplopen naar $\text{€}0,25/\text{m}^2.\text{jaar}$. Als een terugverdientijd van 5 jaar wordt aangenomen levert dat de volgende besparingen op energiekosten op voor het overzicht in tabel 2 ten opzichte van de standaard kas:

Tabel 3

Besparingen over een periode van 5 jaar bij de beste optie voor terugwinning van voelbare en latente warmte t.o.v. de referenties zonder ontvochtiging bij een gasprijs van €0,15/m³.

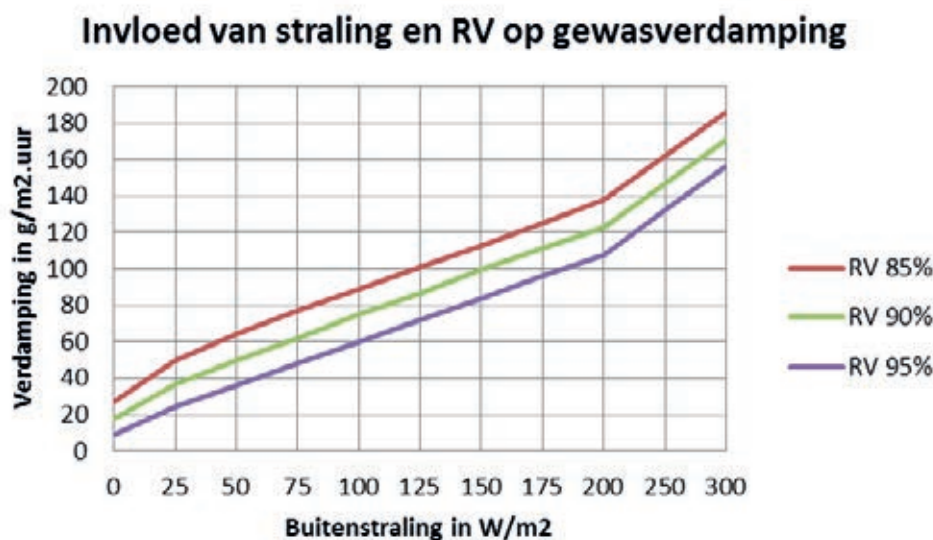
ontvochtiging	onbelicht			belicht		
	nee	ja		nee	Ja	
Warmtebuffer		nee	Ja		nee	ja
Standaard kas	Ref1	4,35	5,85	Ref4	3,82	6,45
Hoog geïsoleerde kas	Ref2	5,78	7,28	Ref5	4,28	6,68
Dubbel glas kas	Ref3	5,48	7,13	Ref6	3,53	6,08

Globaal kan gesteld worden dat voor ontvochtiging bij deze gasprijs ongeveer €4-7/m² investeringsruimte bestaat bij een terugverdientijd van 5 jaar. De extra energie die nodig is om die systemen te laten draaien zit al verwerkt in de besparingen op gas. De investeringsruimte is het grootst bij de twee meer geïsoleerde kastypen. Het zal niet eenvoudig zijn om deze apparatuur te bekostigen van €4-7/m². Energiebesparing door warmteterugwinning uit de ontvochtiging is dus op dit moment dan ook afhankelijk van overheidssubsidies.

7 Welke rol gaat ontvochtiging spelen in Het Nieuwe Telen?

7.1 Onbelichte teelten

Kijkend naar de toekomst van Het Nieuwe Telen mag worden verwacht dat de isolatiewaarde van de kas nog verder toeneemt waardoor het procentuele aandeel van de gewasverdamping in het energieverbruik stijgt. En naarmate er meer schermen worden ingezet zal de vochtafvoer door de schermen heen steeds meer worden beperkt. Door de inzet van de in dit rapport beschreven apparatuur zelfs bij volledig dampdichte schermen een goede vochtafvoer en daarmee voldoende verdamping worden gegarandeerd. Dat opent nieuwe wegen naar nog beter isolerende scherpakketten. Systemen zoals Next Generation en Zoutabsorptie maken het niet alleen mogelijk om de lage verdamping in de nacht in stand te houden met terugwinning van de voelbare en latente warmte, maar zijn bij voldoende grootte ook in staat om bij een buitenstraling tot ongeveer 200 W/m² voldoende vocht af te voeren om één of meer transparante schermen, eventueel zelfs dampdichte folies, volledig gesloten te houden. Daarmee is het mogelijk om op elk moment dat er warmtevraag is maximaal te isoleren en tegelijkertijd energiezuinig te ontvochtigen. Om dat te realiseren in een traditioneel gestuurde kas zou dan wel een hoge ontvochtigingscapaciteit nodig zijn. Bij toenemende instraling stijgt de verdamping erg snel, tot al gauw 140 gram/m²/uur. Dat kan enigszins worden verlaagd door in de kas een hogere RV aan te houden zoals te zien is in de volgende Figuur.



Vaak zal pas bij 200-250 W/m² buitenstraling de warmtevraag zodanig laag zijn dat het scherm open kan. Dus zou er tot die tijd 100-140 g/m²/uur ontvochtiging nodig zijn om dat mogelijk te maken. Alleen als het mogelijk is om met een ontvochtigings installatie (zonne)warmte te oogsten en op te slaan heeft het zin om een dergelijke grote capaciteit te installeren. Een tussenweg is om overdag een vochtdoorlatend scherm te gebruiken en alleen een deel van de verdamping te oogsten. In een kas waaruit tijdelijk minder vocht wordt afgevoerd dan de verdamping groot is, stijgt de temperatuur en zolang het gewas niet de koudste plek wordt, maar het scherm of de gevel, valt het gevaar van condensatie wel mee. Luchtbeweging onder het scherm plus een warmtebron bij de plantonderdelen die het meest afkoelen door uitstraling of langzaam opwarmen door hun massa voorkomen temperatuurverschillen in de kas. In dat opzicht is het ook beter om de nachttemperatuur niet te laag weg te laten zakken, zodat vruchten bijvoorbeeld in de ochtend niet teveel achterblijven in temperatuur. Door het oplopen van het AV wordt het verschil in dampdruk met buiten erg groot waardoor het maken van een kleine opening in het scherm al veel vocht afvoert. En op de koudste plekken in de kas zal er extra veel vocht condenseren. Zolang die plekken geen schadelijke druipt opleveren is er weinig aan de hand.

De kasbodem is een vochtbron waar meestal weinig aandacht voor is. De gedachte leeft dat een loopfolie verdamping uit de bodem zodanig laag maakt dat extra maatregelen overbodig zijn. Maar gewasresten en andere vervuiling kunnen het hydrologische contact met de ondergrond zodanig maken dat er toch onnodige extra verdamping ontstaat. Ook leert de ervaring dat er in de nacht veel condens omlaag druipt dat weer opnieuw verdampt gaat worden. Eigenlijk moet die druipt voorkomen worden om extra energie te besparen. Tot slot levert een overdag opgewarmde bodem in de avond nog heel lang extra energie die de gewasverdamping mogelijk onnodig hoog houdt. Betere isolatie van de vloer kan onnodig energieverlies door overbodige verdamping dus op twee manieren ondersteunen.

Als de warmtevraag van kassen blijft dalen door extra isolatie, ontvochtiging met warmteterugwinning en minimale ventilatie, komt de inzet van duurzame energie steeds dichterbij. Ontvochtiging met zout heeft dan de grootste potenties omdat het regenereren van het zout kan gebeuren met zon of wind. Bovendien opent dat de weg om overdag zonnewarmte te oogsten onder een vochtdichte folie. Denkbaar is een combinatie van ontvochtiging waarmee gedurende instraling ongeveer 150 W/m^2 geoogst kan worden, aangevuld met goed bestuurbare kieren in een hoogtransparant scherm waarmee een deel van het overtollige vocht en warmte bij een instraling tussen 200 en 350 W/m^2 naar buiten wordt afgevoerd. Op jaarbasis kan op deze wijze ongeveer 780 uur langer het scherm gesloten blijven. In die periode kan daarmee $0.15 \cdot 780 \cdot 3.6 = 420 \text{ MJ}$ extra warmte geoogst worden. Genoeg om in de warmtebehoefte van de kas te voorzien.

7.2 Belichte teelten

Voor belichte teelten ligt dat anders want daar vormt het energieverbruik van de belichting de grootste energiepost en er zijn nog weinig concrete aanwijzingen dat daar veel op bespaard kan worden. Wel is lichtafscherming aanstaande en dat heeft grote gevolgen voor de vochtafvoer van de kas. Inmiddels is gebleken dat het volledig sluiten van een lichtafschermingsdoek goed mogelijk is mits de lampwarmte met ventilatoren omlaag wordt gestuurd zodat er geen buiswarmte meer nodig is en wanneer er $10\text{--}20 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{uur}$ geventileerd wordt, afhankelijk van het belichtingsniveau. Bij die ventilatie loopt de temperatuur niet te sterk op bij buitentemperaturen die 5°C lager zijn dan de kastemperatuur. Daarmee wordt ook vocht afgevoerd en wel $80\text{--}160 \text{ gram/m}^2/\text{uur}$. Vervangen van deze ventilatie door ontvochtiging heeft alleen zin als er gelijktijdig gekoeld wordt omdat het oplopen van de temperatuur het grootste probleem is. Zowel Next Generation als een Zoutabsorber kunnen ingezet worden als koelsysteem. Bij de laatste moet daarvoor het zout gekoeld worden. Daarvoor is tussen de 60 en 120 W/m^2 koelvermogen nodig, maar wanneer een warmtepomp wordt gebruikt om de kou te leveren kan die warmte geoogst worden met een COP van $2\text{--}3$.

8 Conclusies en aanbevelingen

Terugwinning van voelbare en latente warmte uit de ventilatielucht is technisch haalbaar en levert in een standaard kas met een onbelichte teelt tot $7.8 \text{ m}^3/\text{m}^2$ per jaar besparing aan aardgasverbruik op. In extra geïsoleerde kassen is het maximale effect van terugwinning van voelbare en latente warmte nog iets groter; $9.7 \text{ m}^3/\text{m}^2$ per jaar. Bij een belichte teelt is de winst wat kleiner, namelijk respectievelijk $8.6 \text{ m}^3/\text{m}^2$ per jaar voor een standaard kas en tot $8.9 \text{ m}^3/\text{m}^2$ per jaar voor beter geïsoleerde kassen. De hoogste besparingen worden gehaald in de hoog geïsoleerde kas met 2 gealuminiseerde energieschermen en een dampdichte folie voor de nacht en één tot twee transparante dampdichte schermen die overdag gesloten zijn zolang er warmtevraag is.

Er is keuze uit meerdere systemen mogelijk.

Opvallend is dat de systemen zonder actief condenserende warmtewisselaars zoals een dubbele gevel met metaalkrullen of een LBK met een regainunit voor voelbare warmte hoge besparingen opleveren. Dat komt niet zozeer doordat ze meer warmte oogsten dan de systemen met warmtepomp of zout, maar doordat ze minder hulpenergie vergen. Die hoge besparingen maakt ze extra interessant omdat de benodigde investeringen voor dit soort systemen lager lijken dan voor warmtepomp of zout. En de investeringsruimte is bij de huidige gasprijzen beperkt tot ongeveer $\text{€}4\text{--}7/\text{m}^2$. Dit soort systemen zijn afhankelijk van de buitencondities en presteren daardoor minder goed bij hogere buitentemperaturen. Dan moet er tijdelijk overgeschakeld worden op een kleine verhoging van de kastemperatuur in combinatie met het trekken van een kier in het scherm. Omdat dit gebeurt in een situatie met relatief hoge buitentemperaturen veroorzaken die schermkieren geen kouval of hoger energieverlies.

Echt duurzaam is in potentie het absorberen van vocht aan een zoutoplossing omdat regeneratie (drogen van het zout) in principe kan gebeuren met zon of wind, zolang er voldoende grote buffers met hygroscopische vloeistof aanwezig zijn. Omdat bij dit systeem goedkoop wegzout wordt toegepast dat bovendien niet verloren gaat, is zo'n buffer geen probleem. Voor het behalen van de doelstelling van de energie-neutrale kas biedt dit systeem zoveel perspectieven dat de bouw en test van een prototype zeer gewenst is. Het gebruik van damprecompressie zou daarbij ook onderzocht moeten worden omdat dit efficiënter lijkt dan de huidige methode van vacuumverdampen in combinatie met een warmtepomp.

Het is bij terugwinning van energie uit ontvochtiging van groot belang dat de geoogste warmte tijdelijk gebufferd kan worden. Door een opslag kan de gewonnen warmte ook gebruikt worden voor de buisverwarming. En als er gewerkt wordt met een warmtepomp kan het zinvoller zijn om juist de geoogste koude op te slaan. Voor beide lijkt een geïsoleerd regenwaterbassin daarvoor de aangewezen optie.

De techniek om buitenlucht te bevochtigen om deze maximaal af te koelen en dan langs een gevel of door een warmtewisselaar te leiden om kaslucht af te koelen tot onder het dauwpunt (dauwpuntskoeling) biedt theoretisch grote kansen voor de Nederlandse omstandigheden. Een dergelijke warmtewisselaar bestaat nog niet, maar is relatief eenvoudig te bouwen en te integreren in een bestaande kas. Een ontwerptraject gevolgd door een praktijkproef in een kleine kas is gewenst, zodat de prestaties kunnen worden beoordeeld.

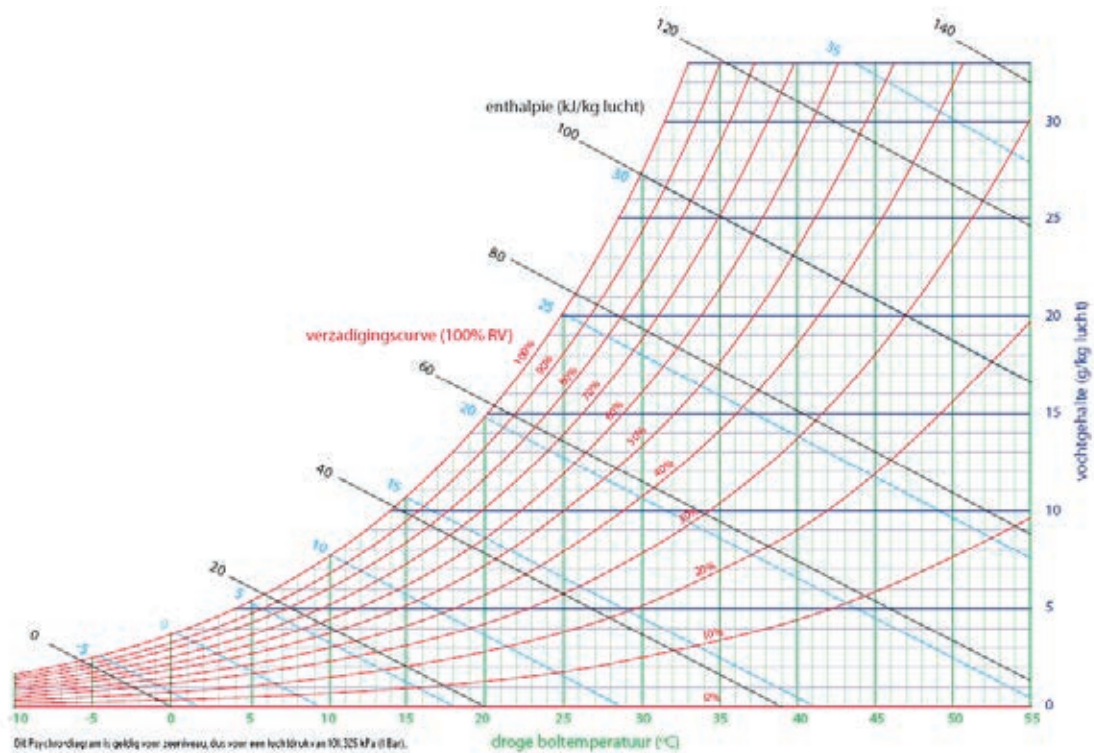
Voor de nachtsituatie zonder belichting is het zo langzamerhand wel duidelijk welke (lage) prestaties van de apparatuur voor ontvochtiging ($10\text{--}20 \text{ g}/\text{m}^2\cdot\text{uur}$) gewenst zijn. Maar bij belichting en overdag zijn de benodigde prestaties allerm minst duidelijk, terwijl ze dan waarschijnlijk meer moeten kunnen ontvochtigen en dus meer energie vergen. En juist het gesloten houden van dagschermen biedt nog extra perspectieven op energiebesparing en vermindering van gewasschade door de overgangen van dag naar nacht veel geleidelijker te maken. Het is heel denkbaar dat het tijdelijk extreem op laten lopen van de RV voor de planten geen nadelige gevolgen heeft zolang er op het gewas geen condensatie optreedt. De verdamping blijft toch grotendeels afhankelijk van de energietoevoer door lampen of de zon en neemt bij een hogere RV in de kas hooguit 20% af. Goed isolerende schermen in combinatie met voldoende luchtbeweging en een goed beheer van de thermische massa in de kas zoals de bodem en het bewust aanbrengen van condenserende wanden of condenserende schermen waarvan het condens kan worden verzameld lijken een goede weg.

Experimenten waarin overdag dampdichte schermen worden gesloten met en zonder de inzet van apparatuur voor ontvochtiging konden wel eens interessante nieuwe inzichten opleveren en bovendien duidelijker eisen aan de capaciteit van de ontvochtiging.

Literatuur

- [1] Stanghellini, C. *et al.* 2010.
Condensatie tegen het kasdek. WUR rapport GTB-1025.
- [2] de Zwart, H.F. & B. Speentjens, 2013.
De Next Generation Semigesloten Kas. WUR rapport GTB-1292
- [3] Bootsveld, N.R. & J. Afink, 2003.
Beoordeling Technologie Dauwpuntskoeling. Koude en Luchtbehandeling 96(1): 16-20.
- [4] Hoogendoorn, P. & B. Veltkamp, 2011.
Werkingsonderzoek HortiAir. Level Energy Technology rapport 2011-11.
- [5] Wittemans, L. & F. Bronchart. 2016.
EXE-kas up and running. Proefnieuws Proefstation voor de Groenteteelt St Katelijne Waver, België 11(10 juni 2016): 43-45.
- [6] Janse, J., P. van Weel & F. de Zwart. 2014.
Gebruik van hoogisolerende schermen in een komkommerteelt. WUR rapport GTB-1361.
- [7] van Gerwen, R.J.F., 2002.
Kansen voor lage-temperatuurwarmte in combinatie met warmtepompen en warmte-opslag in aquifers, deelrapport: opties voor koelen en ontvochtigen. KEMA rapport 50060657-KPS/SEN 02-3020.
- [8] Raaphorst, M., 2011.
Zout als oplossing. WUR rapport GTB-5022.
- [9] Geelen, P., J.O. Voogt & P.A. van Weel, 2015.
De basisprincipes van Het Nieuwe Telen. LTO Glaskracht Nederland.
- [10] van Weel, P.A., 2016.
Optimalisering Ventilationjet systeem. WUR rapport GTB-1376.
- [11] van Weel, P.A. & M. Raaphorst. 2012.
Droge lucht toevoeren via slurven onder het gewas bij Gerbera en Matricaria. WUR rapport GTB-1173.

Bijlage 1 Psychrodiagram



Bijlage 2 Begrippenkader

In de tekst gebruikte begrippen en benamingen worden hieronder kort toegelicht.

Ventilatie

Uitwisseling van kaslucht en buitenlucht. Hiermee wordt normaal gesproken vocht en warmte afgevoerd. De verhouding tussen warmteafvoer en vochttafvoer wordt bepaald door het verschil in luchttemperatuur en absoluut vochtgehalte binnen/buiten.

Ventilatiesnelheid

De hoeveelheid uitgewisselde lucht in $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{uur}$. Vaak wordt gesproken over ventilatievoud, dit geeft aan hoe vaak de kasinhoud per uur wordt ververs, dus feitelijk $\text{m}^3/\text{m}^3\cdot\text{uur}$. Het voordeel van ventilatiesnelheid is dat hierbij in berekeningen en vergelijkingen de kashoogte niet meegenomen hoeft te worden.

Ventilatie of recirculatie capaciteit

De hoeveelheid lucht in m^3/m^2 die per uur door een ventilatie- of recirculatie systeem kan worden ingebracht of rondgepompt.

Natuurlijke ventilatie

De drijvende kracht voor de luchtuitwisseling wordt geleverd door natuurlijke oorzaken: temperatuur verschillen, drukverschillen en wind.

Geforceerde ventilatie

De drijvende kracht voor luchtuitwisseling wordt geleverd door ventilatoren.

Vochtbalans van de kas

Het resultaat van vochtproductie door verdamping van gewas en bodem en vochttafvoer door ventilatie en condensatie.

Psychrodiagram

Ook wel Mollierdiagram genoemd. Een diagram waarin de eigenschappen van lucht bij alle combinaties van luchttemperatuur en vochtgehalte kunnen worden afgelezen. Zie Bijlage 1.

Verzadigingscurve van lucht voor waterdamp

Lucht kan bij een bepaalde temperatuur een maximale hoeveelheid waterdamp in gram/kg lucht bevatten. Deze relatie wordt de verzadigingscurve genoemd.

Absolute vochtigheid (AV)

De absolute vochtigheid van de kaslucht AV is het aantal grammen vocht dat per kilo kaslucht daadwerkelijk aanwezig is. Zie Psychrodiagram. De absolute vochtigheid wordt ook wel uitgedrukt in gram per m^3 lucht. Het nadeel van deze weergave is dat deze afhangt van de luchttemperatuur.

Relatieve vochtigheid (RV)

De relatieve vochtigheid RV is de absolute vochtigheid van de kaslucht gedeeld door het maximale aantal grammen dat de lucht bij die temperatuur kan bevatten. Met vocht verzadigde lucht heeft dus een RV van 100%. Dit is zichtbaar als "mist".

Vochtdeficit (VD)

Het vochtdeficit VD is het verschil tussen de maximale absolute vochtigheid en de werkelijke absolute vochtigheid bij de heersende temperatuur in gram/kg lucht. RV en VD kunnen eenvoudig in elkaar worden omgerekend via het Psychrodiagram.

Dauwpunt

De dauwpunt temperatuur van de kaslucht is die temperatuur waarbij het werkelijke vochtgehalte gelijk wordt aan het maximale vochtgehalte. Bij verdere afkoeling zal er condensatie optreden.

Leaf Area Index LAI

De LAI is het aantal m² bladoppervlak per m² kasoppervlak. De waarde verschilt uiteraard per gewasstype en de groeifase. Bij een volgroeid tomatengewas is de LAI ca 3 – 4. Zie ook: lichtonderschepping.

Gewascondensatie

Dit treedt op als de temperatuur van het gewas onder de dauwpunt temperatuur van de kaslucht komt. Dit is o.a. het geval als de kastemperatuur en de vochtigheid sneller stijgen dan dat grote vruchten zoals tomaten en komkommers kunnen opwarmen vanwege hun massa (na-ijlen). Of wanneer gewasonderdelen door uitstraling naar een koude hemel een lagere temperatuur krijgen dan hun omgeving. Ook op bijvoorbeeld de kasconstructie of bloempotten kan condensatie optreden. Meestal wordt dit als ongewenst beschouwd omdat het (door druppelen) uiteindelijk net als gewascondensatie kan leiden tot vochtschade en ontwikkeling van schimmels en ziekten in het gewas.

Condensatie tegen het kasdek/gevel

Als de buitentemperatuur lager is dan het dauwpunt van de kaslucht, dan zal waterdamp condenseren tegen het kasdek en de gevel. Doordat dit vocht kan worden afgevoerd (condens gootjes) zonder vochtschade aan het gewas is het een welkome bijdrage aan de vochtafvoer uit de kaslucht. Hoe verder de temperatuur afligt van het dauwpunt, hoe groter de hoeveelheid water zal zijn die per tijdseenheid condenseert.

Diffusie van waterdamp

Waterdamp verplaatst zich in stilstaande lucht als gevolg van concentratie (dampdruk) verschillen. Diffusie zorgt ervoor dat vocht door een poreus schermdoek naar boven trekt als de absolute vochtigheid boven het scherm lager is dan onder het scherm. Damptransport door diffusie is bij de gangbare concentratieverschillen in een kas zeer beperkt. Damptransport door luchtbeweging krijgt al bij geringe lichtsnelheden vanaf ca 0,1 cm/sec de overhand.

Enthalpie

Dit is de energie inhoud van lucht bestaande uit 2 delen namelijk de voelbare warmte (temperatuur) en de latente warmte (verdampingsenergie van de aanwezige waterdamp) beide in kilojoule per kilo lucht (kJ/kg), zie het Psychrodiagram.

De enthalpie in de kaslucht kan worden verhoogd door verwarming, belichting en door de zon.

Enthalpieverschil binnen / buiten

Het verschil in enthalpie binnen/buiten is bepalend voor de hoeveelheid energie die per kg uitgewisselde lucht kan worden afgevoerd. Hoe groter het verschil hoe minder ventilatie snelheid nodig is om warmte af te voeren. Als er geen enthalpieverschil is kan de kas dus niet gekoeld worden door ventilatie.

Absoluut vocht verschil binnen/buiten

Het verschil in absoluut vochtgehalte in gram/kg in de kas en buiten. Hoe groter het verschil hoe minder ventilatie nodig is om een bepaalde hoeveelheid vocht af te voeren. Als er geen verschil is in absoluut vochtgehalte kan er geen vocht worden afgevoerd door ventilatie.

Gewasverdamping

De hoeveelheid waterdamp in gram/m².uur die door het gewas wordt verdampt. Gewasverdamping zorgt voor de noodzakelijke afkoeling van de plant en is ook een drijvende kracht voor het transport van voedingselementen van de wortels naar de groeipunten.

Verdamping vindt plaats door energietoevoer op 2 manieren. De eerste is direct als gevolg van straling door de zon, door belichting of door de verwarming. De tweede is indirect door convectie als de planttemperatuur lager is dan de kasluchttemperatuur (natte-bol effect).

Verdampingswarmte van water

Dit is de hoeveelheid energie in kJ die nodig is om 1 kg vloeibaar water te verdampen. Deze waarde hangt af van de temperatuur en bedraagt ca 2500 kJ/kg.

Soortelijke warmte van lucht:

Dit is de hoeveelheid energie in kJ die nodig is om 1 kg lucht 1 graad in temperatuur te verhogen. Deze waarde bedraagt ca 1 kJ/kg.K. Een zeer lage waarde dus in vergelijking tot de verdampingswarmte van water.

De K-waarde van de kas

De K-waarde van een kas bepaalt de hoeveelheid energie die nodig is om, met gesloten luchtramen, een temperatuurverschil met buiten te handhaven en wordt uitgedrukt in $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$. Een gangbare kas heeft een K-waarde van ca $7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Met een energiescherm kan deze waarde verlaagd worden naar bijvoorbeeld $3,5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ en daarmee kan dan dus 50% energie worden bespaard.

Convectie

Warmteoverdracht door luchtstroming langs een object dat warmer of kouder is dan de lucht uitgedrukt in $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$. Convectie vinden we overal in de kas: tussen verwarmingsbuizen en de kaslucht, tussen de kaslucht en het kasdek, maar ook tussen de kaslucht en het gewas, en de kaslucht en het schermdoek.

Straling

Uitwisseling van energie door middel van straling. Hierbij onderscheiden we in hoofdzaak kortgolvlige straling in de vorm van (zichtbaar) licht, en langgolvlige straling in de vorm van (onzichtbaar) infrarood (IR) straling. Uitwisseling door straling vinden we op allerlei plekken in de kas, de allerbelangrijkste en krachtigste bron is de instraling door de zon, maar ook lampen, verwarmingsbuizen, de kasconstructie en de bodem geven energie af en ontvangen energie door straling.

Globale straling

Hieronder wordt verstaan de natuurlijke straling van de zon die bestaat uit UV, PAR en IR straling. Deze straling wordt gemeten met een zgn. Pyranometer, ook wel Solarimeter genoemd. Midden zomer kan de globale straling in Nederland waarden tot ca 1000 W/m^2 bereiken.

PAR straling

PAR, uitgedrukt in $\text{micromol/m}^2\cdot\text{s}$ is dat deel van de straling dat door de plant kan worden benut voor fotosynthese. Van direct zonlicht is dat ca 45%, bij indirect zonlicht met bewolking kan dat oplopen tot ca 59%. De rest is IR infra rood (ca 50%) en UV ultra violet (ca 5%) Beide zijn overigens wel van belang om bepaalde groeiprocessen te sturen.

Uitstraling

Met uitstraling wordt bedoeld de afkoeling van het gewas doordat langgolvlige (IR) straling wordt afgegeven aan een koud kasdek of een koud schermdoek. Dit is een vaak onderschat verschijnsel met een fors risico voor condensatie in de kop van het gewas en de bloemen.

Lichtonderschepping van het gewas

Dit wordt uitgedrukt in het percentage van de inkomende straling dat daadwerkelijk door het gewas wordt opgevangen. Bij een lichtonderschepping van bijvoorbeeld 60% valt dus 40% van het inkomende licht "naast" of "door" de plant. Enerzijds is dat nadelig omdat het inkomende PAR licht niet volledig wordt benut. Anderzijds krijgt de plant ook minder te verduren bij hoge instraling. LAI en lichtonderschepping zijn aan elkaar gerelateerd. Recent is gebleken dat een plant door het bewegen van zijn blad de lichtonderschepping bij een gegeven LAI actief kan verlagen, en dat een groot deel van de opvallende NIR straling door het bladoppervlak wordt gereflecteerd.

LBK Lucht Behandelings Kast

Een algemene aanduiding voor een apparaat bestaande uit een kast waarin luchtbeweging wordt opgewekt door een ventilator en waarin minimaal ofwel een verwarmingselement, ofwel een koelement of een combinatie aanwezig is.

Luchtinblaas systeem / Overdruk systeem

Een installatie waarmee buitenlucht op een gecontroleerde manier de kas ingeblazen wordt met als doel vochtbeheersing. Buitenlucht is namelijk vrijwel altijd droger dan kaslucht. Door de overdruk wordt er kaslucht en dus ook vocht door de kieren en spleetjes naar buiten gedrukt. Soms wordt gesteld dat overdruk op zichzelf ook zorgt voor een betere temperatuurverdeling omdat het verhindert dat er door de genoemde kieren plaatselijk "koude lucht naar binnen komt". Dit is niet helemaal onjuist, maar we moeten wel bedenken dat het ten eerste om heel weinig ingeblazen lucht gaat (ordegrootte $5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{uur}$) en ten tweede dat de natuurlijke drukfluctuaties rond de kas als gevolg van wind aanzienlijk groter kunnen zijn dan de overdruk die met lucht inblaas systemen kan worden opgebouwd. En juist de windeffecten zorgen voor grote temperatuurverschillen.

Energie en vermogen

De moderne eenheid van energie is de Joule. Deze kan in het SI stelsel op verschillende manieren worden weergegeven, namelijk thermisch, mechanisch en elektrisch:

Om 1 gram water 1 graad Celsius in temperatuur te verhogen is 4,2 Joule aan energie nodig. Hieruit volgt dus dat de oude eenheid van thermische energie, de calorie, gelijk is aan 4,2 Joule.

Om een kracht van 1 Newton 1 meter te verplaatsen is 1 Joule energie nodig.

Als een batterij met een spanning van 1 Volt gedurende 1 seconde een stroom van 1 ampère levert staat dat gelijk aan 1 Joule energie.

De laatste weergave brengt ons op het begrip vermogen; dit is energie per tijdseenheid. De moderne eenheid is Watt. Waarbij 1 Watt vermogen gelijk is aan 1 Joule per seconde.

In de tuinbouw omgeving worden meestal de voorvoegsels kilo ($\times 1000$) en Mega ($\times 1000.000$) en Giga ($\times 1000.000.000$) gebruikt.

Als vergelijking kunnen we kijken naar de hoeveelheid energie die het verbranden van 1 m^3 aardgas oplevert. De verbrandingswaarde van gas verschilt per samenstelling, daarom wordt gesproken over de calorische waarde in MJ/m^3 . Voor standaard Gronings aardgas is dat 31,65 MJ als die verbrand wordt in een ketel zonder rookgascondensor (onderwaarde). Deze hoeveelheid energie is dan voldoende om 1 m^3 water ca $7,5^\circ\text{C}$ in temperatuur te verhogen.

Hoewel het feitelijk onnodig is, en soms zelfs verwarrend worden in de praktijk ook andere afgeleide eenheden gebruikt om de hoeveelheid energie uit te drukken. Bekend is de MWh = Mega Watt uur voor elektrische energie. Dit is de energie die bijvoorbeeld een WKK van 1 MW elektrisch in 1 uur tijd aan het net levert. Dus $1 \text{ MWh} = 1000.000 [\text{J}/\text{sec}] \times 3600 [\text{sec}/\text{uur}] = 3600.000.000 \text{ Joule} = 3600 \text{ MJ} = 3,6 \text{ GJ}$.

Een ander voorbeeld is de Aardgas Equivalent (a.e.) voor energie, die gelijkgesteld is aan de bovengenoemde calorische waarde van Gronings aardgas, n.l. 31,65 MJ. Dit kan verwarring opleveren als men deze eenheid a.e. zou opvatten als een fysieke m^3 aardgas, waarbij geen rekening gehouden wordt met ketel- of WKK rendement, en sprake is van verschillende soorten gas met afwijkende calorische waarde.

Open, Gesloten en Semi gesloten kas

Van deze begrippen is de gesloten kas natuurlijk het meest duidelijk: een kas zonder luchtramen, dus zonder luchtuitwisseling met buiten. Dat betekent dat de complete luchtbehandeling; verwarmen, koelen, bevochtigen en ontvochtigen volledig door de installatie moet worden verzorgd. Dit heeft o.a. als gevolg dat er een enorm grote en dure koelinstallatie nodig is, en dat er in de zomer veel meer warmte ($3 - 4 \times$ zoveel) wordt "geoogst" dan er in de winter nodig is om de kas te verwarmen. Het grootste voordeel is een hogere CO_2 concentratie dus meer groei.

De Open kas is de "klassieke" kas waarbij koelen en ontvochtigen uitsluitend met de luchtramen wordt gedaan en waarbij het activeren van het gewas vooral wordt gedaan met extra stoken (minimum buis). Dit betekent dat de kas veel energie vraagt en dat er ook veel van de gedoseerde CO_2 door de ramen naar buiten verdwijnt.

Het idee achter de Semi gesloten kas is om de voordelen van de gesloten kas zoals minder energieverbruik, minder CO₂ emissie en hogere productie te realiseren met beperkte investeringen. Onder andere door inzetten van hoge druk verneveling in combinatie met minder ventileren om de CO₂ beter te benutten, beter isolerende schermstoffen, vochtbeheersing door het inblazen van buitenlucht, en activeren van het gewas door kunstmatige luchtbeweging in plaats van stoken met de minimum buis.

Het Nieuwe Telen

Telen in een Semi gesloten kas, dus met nieuwe instrumenten, levert een ander groeiklimaat op voor de planten, die dus ook een andere reactie vertonen dan men gewend was. Dat betekent dat tuinders "opnieuw moeten leren telen" en ook "opnieuw moeten leren klimaatregelen". Zie ook de inleiding / probleemstelling Dit veelomvattend leer- en ontwikkelingsproces voor alle betrokkenen wordt momenteel aangeduid met het verzamelbegrip "Het Nieuwe Telen".

Bijlage 3 Perspectieven direct drogen van kaslucht met MDR

Mechanische Damp Recompressie, of kortweg MDR is een techniek waarmee het rendement van industriële fase-overgangsprozessen kan worden verhoogd. MDR maakt gebruik van het feit dat de condensatie temperatuur (dauwpunt) van een gas / damp mengsel kan worden veranderd door middel van compressie. Hierdoor is het bijvoorbeeld mogelijk om droogprocessen te versnellen en tevens kan er warmteoverdracht van het ene procesdeel naar een ander procesdeel plaatsvinden. Een voorbeeld is het indikken van waterige oplossingen. De (hulp) energie toevoer die nodig is om het gas / damp mengsel te comprimeren moet dan uiteraard lager zijn dan de energiewinst. Dit is zeer wel mogelijk. Er zijn op deze manier processen gerealiseerd met een COP van 15 en hoger.

Een interessante (rechtstreekse) toepassing van het principe van MDR lijkt te zijn het ontvochtigen van kaslucht vanwege de volgende overwegingen:

- De kaslucht heeft de juiste temperatuur, maar een te hoog vochtgehalte. Om vocht te laten condenseren moet er een koud oppervlak zijn met een temperatuur (ver) beneden het dauwpunt. Dit vergt doorgaans een koelmachine. Bovendien koelt ook de lucht tijdens het condensatieproces af en die moet weer opgewarmd worden. Deze klassieke methode is daarom niet rendabel.
- Het alternatief is om als eerste stap de druk van de kaslucht te verhogen door compressie. Hierdoor zal de vochtconcentratie stijgen en het dauwpunt verschuift naar een hogere temperatuur zodat voor het condenseren geen koelinstallatie meer nodig is.
- De vrijkomende latente energie uit de kaslucht kan gebruikt worden om de kaslucht te verwarmen of via een waterstroom af te voeren en eventueel op te slaan.

Een rekenvoorbeeld:

Stel de kaslucht is 25 °C en de RV is 80%. De druk is 100 kPa, ca 1 Bar.

Door middel van een compressie installatie wordt de druk verhoogd naar 200 kPa en het volume gehalveerd. Volgens de algemene gaswet verandert er dan in eerste instantie niets aan de temperatuur:

- Situatie kas: $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$; $100 \text{ kPa} \cdot 1 = n \cdot R \cdot (273 + 25)$.
- Situatie na compressie $200 \text{ kPa} \cdot 0,5 = n \cdot R \cdot (273 + 25)$.

Onze ervaring is echter dat de temperatuur van lucht tijdens het samenpersen wel hoger wordt. Dit constateren we bijvoorbeeld bij het oppompen van een fietsband.

De oorzaak is heel kort door de bocht als volgt te omschrijven. Door de lucht samen te persen wordt het volume kleiner en dat leidt tot een hoger aantal botsingen van de gasmoleculen met de wanden per tijdseenheid. Via de wet van behoud van impuls leidt dit tot een hogere snelheid van de gasmoleculen en dus tot een hogere temperatuur. Hoeveel hoger is sterk afhankelijk van de dimensionering van de compressor.

Een praktijkgegeven is dat een "huis-tuin-en-keuken compressor" bijvoorbeeld perslucht levert van 8,5 bar met een temperatuur van 75 °C. De lucht koelt dan af in de leidingen en de slangen en er komt vaak ook condenswater mee.

De betere compressoren zijn voorzien van een aparte droog en koeltrap die ervoor zorgt dat er geen condens kan ontstaan in het persluchtsysteem.

Typen compressoren

Er zijn diverse typen compressoren. De meest klassieke is de zuigercompressor, met een krukas, zuigers en kleppen, te vergelijken met een verbrandingsmotor. Verder zijn er de schroefcompressor en de "turbo" compressor, die ook in een vliegtuigmotor wordt toegepast.

De modernste vorm is de "scroll compressor" die gebruik maakt van twee in elkaar draaien spiralen. Deze hebben de minste bewegende delen en maken het minste geluid.

Een globaal idee van compressor rendement.

Om een idee te krijgen van compressor rendement zullen we berekenen hoeveel energie nodig is voor de compressie. We gaan even uit van een gangbare compressor die perslucht levert van 8,5 bar. We veronderstellen hiervoor een volume van 8,5 m³ door op elkaar gestapelde kubussen van volumes van 1 m³. Door een zuiger met een oppervlak van 1 m² over 7,5 mtr te verplaatsen wordt het volume dan teruggebracht tot 1 m³. Het volume wordt een factor 8,5 verkleind, zodat de druk met een factor 8,5 wordt verhoogd. De hoeveelheid lucht + waterdamp in [mol] en [kg] blijft hetzelfde.

De benodigde arbeid is gelijk aan kracht * weg. Hiervoor moeten we de integraal nemen over de afgelegde weg van de zuiger waarbij de kracht steeds toeneemt. 1 bar = 101 kPa.

Omdat die toename lineair is mogen we schrijven $E = 7,5 \text{ [m]} * (850 - 100) / 2 \text{ [kPa]} * 1 \text{ [m}^2\text{]} = 2812 \text{ k [m] [N/m}^2\text{]} = 2812 \text{ kJ}$.

Dus 1 m³ perslucht van 8,5 bar kost aan energie 2812 kJ.

Vergelijken we dit met een commerciële scroll compressor van Hitachi. Zij geven op voor een compressor met een capaciteit van 600 liter/minuut bij 8,5 bar een motor vermogen van 5,5 kW.

Omgerekend naar de productie van 1 m³ perslucht zou deze compressor verbruiken:

$1000 / 600 \text{ [minuten]} * 5,5 \text{ [kJ/s]} * 60 \text{ [s]} = 550 \text{ kJ}$.

Let op: met de capaciteit wordt in commerciële beschrijvingen bedoeld: 600 liter/minuut bij 1 bar. Men spreekt dus niet over de output, maar over de input. Daarom moet het getal van 550 kJ nog vermenigvuldigd worden met 8,5 tot 4675 kJ.

Het rendement van de compressor zou dan zijn: $2812/4675 * 100\% = 60\%$. Dat klinkt redelijk.

Het ontvochtigingsproces

Zoals gezegd zal de temperatuur tijdens het samenpersen flink stijgen. Hoeveel is moeilijk te zeggen. De ervaring is dat de lucht een temperatuur krijgt van ca 75 °C.

De essentie is echter dat de waterdamp concentratie toeneemt en daarmee het dauwpunt stijgt.

Dit dauwpunt kunnen we wel uitrekenen. De kaslucht had een temperatuur van 25 °C en een RV van 80%, dat wil zeggen een AV gehalte van 16 gram/kg, wat overeenkomt met bijna 19 gram/m³. Het dauwpunt van de lucht is hierbij 21,3 °C.

Nadat de druk verhoogd is naar 850 kPa en het volume met de zelfde factor is verkleind is de toestand als volgt: $AV = 8,5 * 19 = 161 \text{ gram/m}^3$, Het dauwpunt dat hierbij hoort ligt rond 60 °C.

(Hieruit volgt dus dat de condensvorming achter een gangbare compressor nogal meevalt omdat de lucht bij 75 °C nog steeds niet volledig verzadigd is. De condensatie treedt pas op in de leidingen als de lucht afkoelt tot onder de 60 °C).

Doordat het dauwpunt is gestegen naar 60 °C is het nu mogelijk om door condensatie een flink deel van het water aan de lucht te onttrekken bij de normale omgevingstemperatuur. Dus zonder koelinstallatie.

Stel dat we er in slagen om de lucht bij de uitgang van de condensor af te koelen tot 25 °C. Dan zou er ca 140 gram water condenseren. Hoeveel energie komt daarbij dan vrij?

Latente energie (2500 kJ/kg): $140 * 2,500 \text{ kJ} = 350 \text{ kJ}$.

Er komt ook nog wat voelbare energie vrij als de opgewarmde lucht afkoelt. We laten dit nu even buiten beschouwing.

De laatste stap in het proces is nu om de gecomprimeerde lucht weer in de kas te brengen. De kunst is om dit op een slimme manier te doen zodat het drukverschil wordt gebruikt om een mechanische beweging op te wekken. Een optie is om met de samengeperste lucht een turbine aan te drijven. Een ander is om de "elasticiteit" van de lucht te benutten.

Hierdoor kan de benodigde hulp energie voor de compressie stap te beperken en hiermee de "COP" van het proces hoog te houden.

Hoge druk uitvoering

Laten we nu kijken naar het geheel in een gangbare hoge druk uitvoering.

De productie van 1 m³ perslucht van 8,5 bar kost 4675 kJ (rendement compressor 60%).

De potentiële energie inhoud is slechts 2812 kJ namelijk de theoretische benodigde energie. Stel dat we die eveneens voor 60% zouden kunnen terugwinnen in een turbine. Dan is er een positieve bijdrage van $2812 \times 60\% = 1687$ kJ.

Per 8,5 m³ kaslucht wordt er 140 gram water gewonnen, dat is dus ruim 15 gram /m³. De uitgaande lucht is dus zeer droog.

De teruggewonnen latente warmte uit de waterdamp is 350 kJ.

Het condensaat heeft een lage temperatuur van ca 25 °C.

Als we denken aan 1 unit per ca 250 m², en we veronderstellen de verdamping van het gewas op 25 gram/m².uur, dan zou de capaciteit van de compressor $250 \times 25 / 15 = 415$ m³/uur moeten zijn. De bovenbeschreven Hitachi unit van 0,6 m³/min zou slechts 360 m³/uur produceren. Dit betekent dat er per 250 m² dus meer dan 1 unit nodig is.

Als we de installatie uitvoeren met luchtkoeling komt uiteindelijk alle warmte beschikbaar in de kas om te verwarmen.

Het opgegeven motorvermogen van 5,5 kW levert alleen al een warmte productie van $5500 / 250 = 22$ W/m² op. Hier mogen we in een gunstig geval nog ca 40% aftrekken als we perslucht kunnen gebruiken om elektriciteit op te wekken.

De conclusie is helaas dat dit geen reëel alternatief gaat opleveren voor ventileren met buitenlucht in de nacht.

Waar zitten nog winstmogelijkheden?

Er zijn diverse punten waar het bovenbeschreven proces verbeterd kan worden:

1. Het compressor rendement geschat op 60% kan omhoog.
2. Het terugwinnen van de compressor energie uit de perslucht kan beter.
3. Het terugwinnen van de latente warmte zodanig maken dat de warmte wordt opgeslagen.
4. Het geheel zo uitvoeren dat het condenswater hergebruikt kan worden.

Ad1) Er zit ruimte van verbetering in het proces omdat de dauwpunt van gecomprimeerde lucht slechts langzaam stijgt bij hogere druk.

Zoals boven geschetst is het dauwpunt bij 8,5 bar ca 60 °C. Bij 4 bar is het dauwpunt echter al 48 °C. (Uitgaande van kaslucht van 25 °C, 80% RV) Bij 2 bar is het dauwpunt al ca 35 °C. Het ligt voor de hand om dus uit te gaan van een compressor met een lagere druk en een hoger volume die per saldo veel minder energie nodig heeft en hoogst waarschijnlijk een beter rendement heeft dan 60%.

Ad3) het terugwinnen van de condensatie warmte gaat des te beter naarmate de temperatuur van het condensatie oppervlak hoger is. Dit is echter tegenstrijdig met het ontvochtigen van de lucht en punt 1). Dus de beste manier is toch om de condensatiewarmte direct in de kas te brengen.

Ad4) dit betekent dat het condensaat niet verontreinigd mag zijn met olie en metaaldeeltjes en dergelijke zoals dat in een gangbare compressor vaak gebeurt.

Een lage druk uitvoering

Het rendement moet omhoog en de werkdruk omlaag. Het idee is het volgende:

Een unit vergelijkbaar met de VentilationJet Jet bestaat uit 2 ventilatoren. Ventilator A zorgt voor verticale circulatie op een oppervlak van 250 m² en verplaatst ca 5000 m³/uur.

Ventilator B (type scroll?) zorgt ervoor dat ca 1250 m³/uur kaslucht op een druk van bijvoorbeeld 2,5 bar gebracht in een kleine kamer van orde grootte 5 – 10 liter. De lucht treedt uit de kamer door een klein gat / ventiel en brengt via een turbine ventilator A in beweging. De luchtcirculatie mengt de droge lucht in de kas en moet er tevens voor zorgen dat de temperatuur van de luchtkamer niet te ver boven de kastemperatuur stijgt.

Het samenpersen van 1250 m³ kaslucht tot 2,5 bar kost aan energie:

$$1250 / 2,5 \times (2,5-1) \times (250 - 100) / 2 \text{ kJ} = 56250 \text{ kJ}.$$

Dit komt neer op een motorvermogen van ca 20 kW bij een rendement van 80%.

Per m² komt dat neer op 80 W/m². Het mag duidelijk zijn dat dit geen realistische optie is.

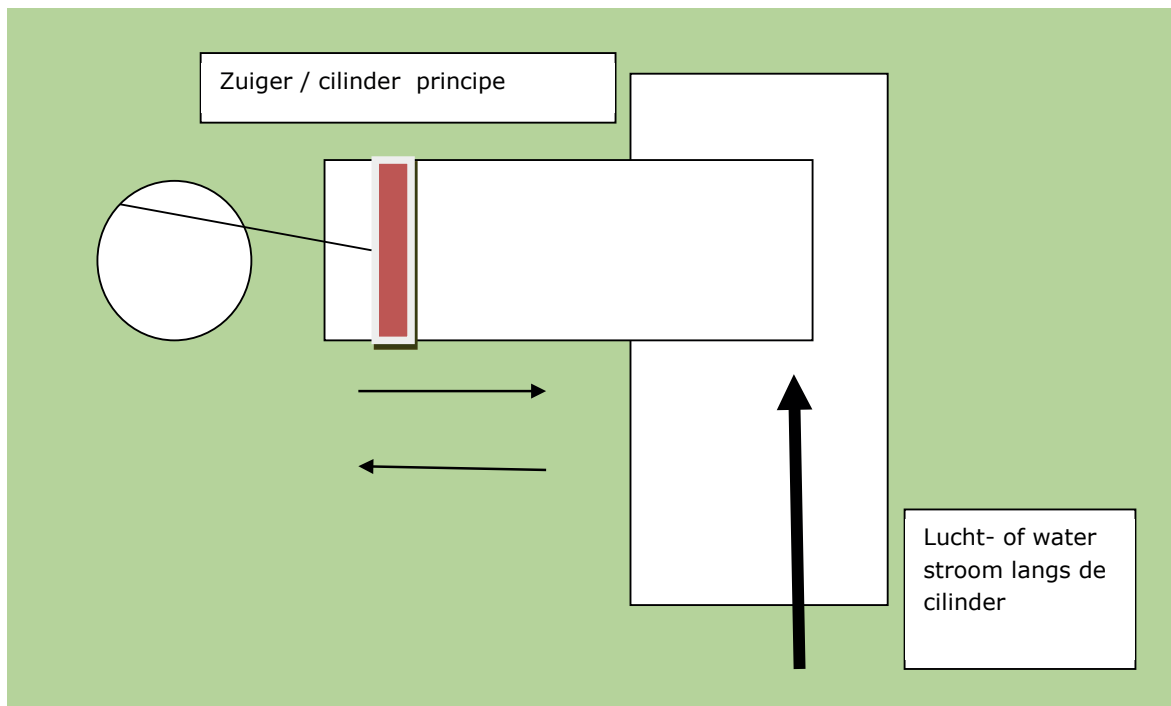
Conclusie: om het rendabel te maken zou er een ontvochtiger moeten zijn die vrijwel zonder energieverlies werkt en waarbij de latente warmte vrijkomt om de kas te verwarmen.

Dit gaat in de richting van een balans-principe bestaande uit 2 zuigers die elkaar aandrijven zodat er geen of weinig energie in het proces verloren gaat.

De MDR ontvochtigingsmachine voor in de kas

Het is denkbaar om een ontvochtigingsmachine te ontwerpen volgens bovenstaand principe die werkt als een soort "lucht uitknijper".

Hieronder is dat zeer simplistisch aangegeven.



Figuur 23 De kaslucht uitknijper in basisvorm.

Bij de heengaande slag van de zuiger wordt de kaslucht in de cilinder samengeperst tot een fractie van het volume. Hierdoor neemt de vochtconcentratie toe en stijgt dus het dauwpunt. Tevens wordt de lucht (iets) warmer. Door de luchtstroom of waterstroom langs de cilinder wordt de wand temperatuur op kasniveau gehouden. In de cilinder vindt daardoor condensatie plaats. Hierdoor wordt vooral latente warmte aan de samengedrukte lucht onttrokken.

Bij de teruggaande slag van de zuiger zorgt het drukverschil voor een aandrijving van de zuigerstang zodat de mechanische energie kan worden gebruikt om bijvoorbeeld een vliegwiel aan te drijven. De effectief toegevoerde energie zou in de orde van ca 5 W/m^2 kasoppervlak moeten zijn, dus hooguit 1 kW.

Bij voorkeur wordt de uitknijper uitgevoerd met meerdere cilinders, zodat in de teruggaande slag de energie van de samengeperste lucht weer volledig wordt overgedragen aan de andere cilinders waar lucht wordt samengeperst.

Dit betekent tegelijk dat er een "loze" slag moet zijn om de cilinder opnieuw te vullen met vochtige lucht. Door een kleppen constructie (vgl 4 takt motor) dient de lucht in de cilinder ververs, en het gecondenseerde vocht afgevoerd te worden.

Dimensionering van de luchtknijper.

We gaan uit van een decentrale opzet; 1 unit per 250 m^2 . In de nacht is een ontvochtigingscapaciteit nodig van ca $25 \text{ gr/m}^2 \cdot \text{uur}$. In totaal moet er dus $25 \times 250 = 6,25$ liter water per uur uit de lucht worden gehaald. Stel dat we erin slagen om effectief 5 gram /m^3 te halen (vrij lage werkdruk 2-4 bar? en een niet te lage condensatie temperatuur, 25°C max), dan moet er per uur rond 1250 m^3 lucht door de unit worden verwerkt. Dit is dus 1x het kasvolume / uur. Vergelijkbaar met ventilatie door buitenlucht.

Het condensatie proces heeft waarschijnlijk enige traagheid zodat de verblijftijd in de cilinder niet te kort mag zijn. In de orde van 1 seconde minimaal. Dit betekent dat de uitknijper niet meer dan ca 3600 of wellicht maar 1800 of 900 slagen per uur mag maken. Dat betekent dus dat het cilinder volume in de orde van $0,5 \dots 1 \text{ m}^3$ moet zijn. Het moet dus een behoorlijk grofstoffelijke machine worden. Vergelijkbaar met een "ALS" warmtewisselaar.

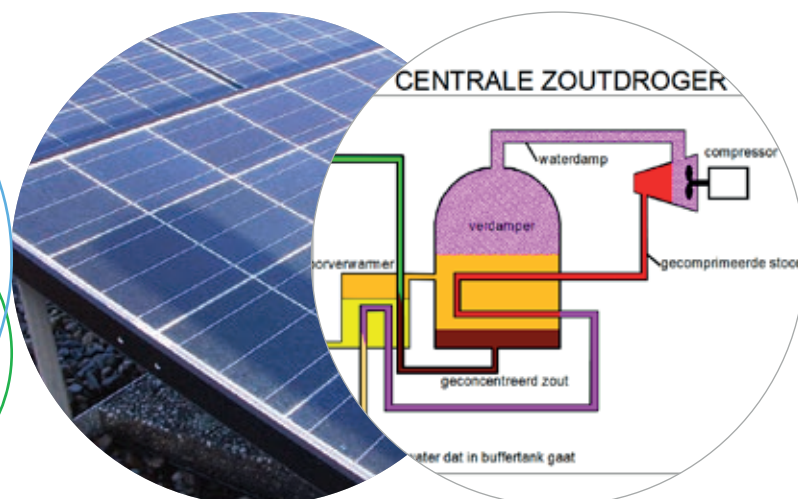
Discussie en voorlopige conclusie

Uit de bovenbeschreven gedachten en berekeningen lijkt de conclusie te moeten zijn dat rechtstreekse toepassing van MDR voor ontvochtiging van kaslucht geen realistische optie is.

Ofwel het benodigde compressor vermogen leidt tot veel te grote energie inbreng, ofwel er zijn volumineuze apparaten/kasten nodig.

Als onderdeel van een ontvochtigingsinstallatie via zoutoplossing is MDR wellicht wel interessant om het regenereren van de zoutoplossing effectiever te maken.

To explore
the potential
of nature to
improve the
quality of life



Wageningen University & Research Glastuinbouw
Postbus 20
2665 ZG Bleiswijk
Violierenweg 1
2665 MV Bleiswijk
T +31 (0)317 48 56 06
F +31 (0) 10 522 51 93
www.wageningenur.nl/glastuinbouw

Glastuinbouw Rapport GTB-1421

Wageningen University & Research Glastuinbouw initieert en stimuleert de ontwikkeling van innovaties gericht op een duurzame glastuinbouw en de kwaliteit van leven. Dat doen wij door toepassingsgericht onderzoek, samen met partners uit de glastuinbouw, toeleverende industrie, veredeling, wetenschap en de overheid.

De missie van Wageningen UR (University & Research centre) is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen UR bundelen 9 gespecialiseerde onderzoeksinstituten van stichting DLO en Wageningen University hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 6.000 medewerkers en 9.000 studenten behoort Wageningen UR wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.