

Van Mourik Broekmanweg 6  
Postbus 49  
2600 AA Delft

[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

T +31 88 866 30 00  
F +31 88 866 30 10  
[infodesk@tno.nl](mailto:infodesk@tno.nl)

## **TNO-rapport**

**060-DTM-2011-0xxxx**

# Vergelijking van luchtbehandelingssystemen voor de tuinbouw

Datum	30 december 2011
Auteur(s)	Bas Knoll, Leo Hendriksen
Met medewerking van	Roël Chin-Kon-Sung
Opdrachtgever	Productschap Tuinbouw en Ministerie LNV
Projectnummer	034.22945

### Rubricering rapport

Titel  
Samenvatting  
Rapporttekst  
Bijlagen

Aantal pagina's	57 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	3

Alle rechten voorbehouden. Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2012 TNO

## Samenvatting

Een belangrijk onderdeel van ‘Het Nieuwe Telen’ is het efficiënt ventileren met behulp van luchtbehandeling om vocht af te voeren. Deze luchtbehandelingsinstallaties zijn nog sterk in ontwikkeling. Desondanks is al duidelijk dat ze extra voordelen kunnen bieden. Het ontbreekt tuinders echter aan inzicht in en overzicht van de mogelijkheden. Mogelijkheden waarmee de tuinders ook nog moeten leren omgaan. Het onderzoek dat in dit rapport wordt beschreven, beoogt meer duidelijkheid te verschaffen in de mogelijkheden die deze installaties in zijn algemeenheid bieden en de thans op de markt zijnde systemen in het bijzonder.

Luchtbehandeling blijkt vooral goed te scoren bij het gericht, efficiënter, beter gecontroleerd en gelijkmatiger ventileren. Dat is met het creëren van luchtbeweging vooral van belang voor een betere vochtbeheersing. De huidige LB-systemen zijn daarin geen jaar-rond oplossing. Ze behoeven in vochtige, minder koude perioden nog steeds aanvulling van de traditionele raamluchting.

De tweede nuttige functie is het creëren van luchtbeweging. Dit blijkt vooral van belang voor het activeren van het gewas, zodat de overdracht van vocht en CO<sub>2</sub> effectiever plaatsvindt. Tuinders die deze functie onder de knie krijgen, blijken productiever te kunnen telen. Voor het nivelleren van klimaatverschillen moet men echter geen hoge verwachtingen hebben. Daarvoor blijkt de opgewekte luchtbeweging onvoldoende dominant te zijn.

Ten behoeve van de energiezuinigheid kan luchtbehandeling in potentie meer scoren dan het aandeel dat nu door de efficiëntere ventilatie wordt bereikt. Een enkele aanbieder gaat al verder door warmteterugwinning uit ventilatielucht toe te voegen. Verdere kansen liggen er ten aanzien van efficiënter (laag-thermisch) verwarmen, vermindering van het elektriciteitsverbruik en gecombineerd actief ontvochtigen en ventileren. Er lijken zelfs mogelijkheden te zijn om het probleem van toegenomen klimaatongelijkheid in moderne kassen met luchtbehandeling weg te werken.

Om alle functies en nieuwe mogelijkheden van luchtbehandeling optimaal te kunnen benutten, dient intelligentie te worden ontwikkeld waarmee de systemen beter automatisch worden aangestuurd. Daarin schieten de regelsystemen thans nog tekort. De instellingen worden nu nog teveel op gevoel bepaald door de tuinder.

# Inhoudsopgave

	<b>Samenvatting</b> .....	<b>2</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Uitgangspunten voor klimatisering</b> .....	<b>5</b>
2.1	Plant en klimaat .....	5
2.2	Kas en klimatisering .....	8
<b>3</b>	<b>De rol van luchtbehandeling</b> .....	<b>12</b>
3.1	Historie .....	12
3.2	Luchtbehandeling in de kas .....	13
<b>4</b>	<b>Beschrijving luchtbehandelingsinstallaties</b> .....	<b>21</b>
4.1	CoVent.....	21
4.2	van Dijk AVS .....	22
4.3	ClimecoVent .....	24
4.4	LT van LekHabo.....	25
4.5	ClimateOptimizer.....	27
4.6	Overige systemen.....	28
4.7	Vergelijking kenmerken .....	30
<b>5</b>	<b>Bespreking</b> .....	<b>32</b>
5.1	Nadere analyse.....	32
5.2	Aanzet voor keuzecriteria .....	40
<b>6</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b> .....	<b>41</b>
<b>7</b>	<b>Referenties</b> .....	<b>42</b>
<b>8</b>	<b>Ondertekening</b> .....	<b>44</b>
	<b>Bijlage(n)</b>	
	A Beschouwing luchtbeweging	
	B Worpcndities bij 2 slanguitvoeringen	
	C Overzicht systeemaspecten luchtbehandeling	

# 1 Inleiding

‘Het Nieuwe Telen’ in gesloten of semigesloten kassen is een belangrijk onderzoeksprogramma voor de glastuinbouw. Een doelstelling van dit programma is om een forse besparing op het fossiele energiegebruik te realiseren, waardoor de sector hiervan minder afhankelijk wordt.

Om energie te kunnen besparen en gebruik te kunnen maken van duurzame, laag thermische energie, maar ook om de teeltresultaten verder te verbeteren, zijn de klimaatinstallaties voor kassen duidelijk onderhevig aan veranderingen. Van deze moderne installaties zijn uiteenlopende varianten op de markt. In gesloten en semigesloten kassen is luchtbehandeling hiervan een onderdeel geworden.

De luchtbehandelingsinstallaties (hierna te noemen LB-installaties of kortweg LBI) zijn nog sterk in ontwikkeling voor de specifieke toepassing in de tuinbouw. Ze evolueren naar verschillende technische uitvoeringen met de specifieke functionaliteit die nodig is voor de tuinbouw en een prijsstelling die past bij de schaal en investeringsruimte van de tuinbouw. Ondanks het feit dat de LBI nog lang niet zijn uitontwikkeld voor kassen, is al duidelijk dat ze extra voordelen kunnen bieden. De verwachting is dus dat deze systemen in de nabije toekomst een grote vlucht gaan nemen.

LB-installaties werken in vergelijking met de traditionele kasinstallaties op een afwijkende manier. Dit biedt aan de ene kant nieuwe mogelijkheden, maar vergt anderzijds dat de tuinder met deze nieuwe mogelijkheden leert om te gaan. Die mogelijkheden zijn voor de verschillende varianten van LB-installaties ook nog afwijkend.

Het ontbreekt tuinders aan inzicht in en overzicht van de mogelijkheden van de diverse LBI. Dit maakt het moeilijk om een juiste keuze te maken uit de variëteit aan installaties voor hun specifieke teelt en kasuitvoering. Om hieraan tegemoet te komen is het onderzoek uitgevoerd dat in dit rapport wordt beschreven. Het onderzoek beoogt meer duidelijkheid te verschaffen in de mogelijkheden die LBI in zijn algemeenheid bieden en de thans op de markt zijnde systemen in het bijzonder.

## 2 Uitgangspunten voor klimatisering

### 2.1 Plant en klimaat

De hoofdfunctie van een kas is de aanwezige planten te beschermen tegen ongewenste variaties van het lokale buitenklimaat. Het doel is tweeledig:

1. Uitheemse gewassen telen op plaatsen die daarvoor normaliter niet geschikt zijn;
2. Inheemse gewassen optimaler telen.

Kassen zorgen voor een hogere teeltopbrengst, een grotere verscheidenheid en minder seizoensafhankelijkheid van het productaanbod. Het loont dus om de klimaatomstandigheden bij planten zo goed mogelijk in de hand te houden.

De (groei)processen die in een plant plaatsvinden, zijn bepalend voor zijn klimaatbehoefte. Het lichtaanbod is leidend. Licht brengt de fotosynthese op gang. De plant kan daarbij onder invloed van het licht suikers vormen met CO<sub>2</sub> uit de lucht en water dat via de wortels wordt opgezogen. Door het aanpassen van de bladporiën (direct) en bladgrootte (geleidelijk) kan de plant de CO<sub>2</sub>-opname uit de lucht sturen en afstemmen op het wateraanbod. De gevormde suikers gebruikt de plant voor zijn groei, vruchtvorming en onderhoudsademhaling.

Warmte bevordert de fotosynthese. De plant anticipeert namelijk op warmte door de bladporiën te openen en daardoor meer vocht te verdampen. Om dit vocht aan te voeren, neemt de sapstroom door de plant toe. De verhoogde wateraanvoer en de verbeterde CO<sub>2</sub>-opname door de open bladporiën resulteren in de aanmaak van meer suikers (meer groei). Op die momenten is het dus belangrijk CO<sub>2</sub> aan te bieden en te zorgen voor voldoende watergift aan de plant en voor voldoende afvoer van het verdampte vocht uit de kas.

De vochtafvoer uit de kas mag niet te groot worden. In (te) droge kaslucht sluit de plant de bladporiën namelijk weer (gedeeltelijk) om niet uit te drogen. Door de dichtere bladporiën kan de plant minder CO<sub>2</sub> uit de lucht opnemen. De groei wordt dan dus weer beperkt.

Ook bij (te) hoge temperaturen loopt de groei terug, omdat de ademhaling van de plant dan intenser wordt en een hoger suikergebruik vergt. Elk type plant heeft daarom zijn eigen optimale klimaatcondities, afhankelijk van het lichtaanbod.

De fotosyntheseprocessen kunnen tevens een etmaalcyclus hebben, die bovendien per planttype en afhankelijk van het ontwikkelstadium kan afwijken. Daarom kan ook het gewenste etmaal- of seizoensverloop van de temperatuur en (relatieve) vochtigheid verschillen.

Door verdamping uit het gewas kan de plant zelf de kastemperatuur gedeeltelijk reguleren. De verdamping onttrekt namelijk zoveel warmte dat bij veel zon wel tot de helft van de zonnwarmte door de plant kan worden 'geabsorbeerd'. De plant vormt dus zelf als het ware een soort autonome 'klimaatinstallatie', die een belangrijke rol speelt in de klimatisering.

De eigen verdamping onttrekt warmte aan de planten. De bladeren koelen daardoor af tot onder de ruimtetemperatuur, als ze niet door de straling van de zon of een warme buis worden opgewarmd. Vooral bij de lager gelegen bladlagen treedt dit op. De bladtemperatuur kan dan regelmatig dichtbij of (tijdelijk) onder het dauwpunt van de lucht komen. In dergelijke condities gedijen schimmels optimaal. Vooral tijdens regenachtige voor- en najaarscondities of zwoele zomernachten blijkt de relatieve luchtvochtigheid in een kas langdurig zo hoog te zijn dat schimmels de kans krijgen om de planten aan te tasten. Dergelijke schade kan worden voorkomen door vooral onder in het gewas goed te ventileren, zo nodig met enige bijstook, zelfs al is de temperatuur niet te laag. Zo kan voldoende vocht uit de kas worden afgevoerd.

Bij 'Het Nieuwe Telen' wordt meer 'met de natuur mee' geteeld. In vochtige perioden wordt daarom op kritischer vochniveaus geregeld. Daarom is het des te belangrijker koele, vochtige plekken in het gewas te voorkomen. Een homogene menging van de kaslucht en goede doorluchting van het gewas is daarvoor van belang.

Samenvattend kunnen planten in kassen het beste gedijen bij een zo ruim mogelijk aanbod van licht en CO<sub>2</sub>, voldoende (giet)water en klimaatcondities die een optimale warmte- en vochtuitwisseling van de plant mogelijk maken. De functie van luchtbehandeling heeft betrekking op het laatste punt, het optimaliseren van de condities rond en overdracht van de plant.

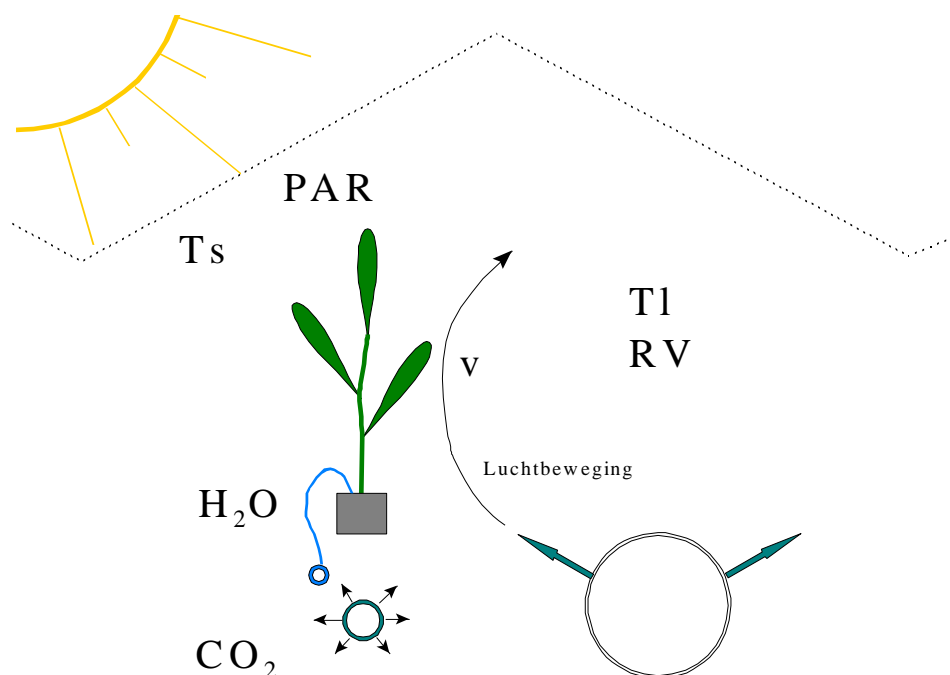
De warmte-uitwisseling van de plant met de omgeving is te onderscheiden in warmtestraling, convectieve overdracht aan de kaslucht en verdampingswarmte.

Warmtestraling van de zon valt merendeels op de bovenste bladlagen en wordt daar omgezet in warmte. Zo ontstaat een temperatuurverloop over de hoogte, maar ook een daarmee samenhangend, tegengesteld verloop van de relatieve vochtigheid. In de nacht keert de gradiënt om door stralingsuitwisseling met het door de koude hemelkoepel afgekoelde dek (nachtelijke uitstraling). Het zijn natuurlijke effecten, waarop de plant tot op zekere hoogte is ingesteld. Dat betekent niet dat het klimaat dan ideaal is voor een optimaal producerend gewas. Bovendien kan de temperatuurdynamiek ook sterker zijn dan wenselijk door de invloed van de kas (broeikas effect) en het voor uitheemse gewassen 'vreemde' buitenklimaat. De verticale temperatuurgradiënten kunnen dan door luchtbeving worden beperkt. Luchtbeving vergroot de uitwisseling tussen luchtlagen van verschillende temperatuur en verschuift de verhouding tussen warmteoverdracht door straling en convectie (vermindert dus het effect van de warmte- of koudestraling).

Door convectie vindt overdracht plaats van warmte en vocht van het gewas aan de omringende lucht. Hierbij spelen niet alleen de temperatuur en relatieve vochtigheid van de kaslucht een rol, maar ook de luchtbeving rond de plant. Luchtbeving bevordert de overdracht van vocht en warmte, zodat bij eenzelfde klimaatconditie in de kas meer uitwisseling van warmte en vocht kan plaatsvinden. De luchtbeving is verder van belang voor de gelijkmatige doorluchting van een lokaal (te) vochtig gewas.

In tegenstelling tot de traditioneler klimaatsystemen hebben luchtbehandelingssystemen dus niet alleen invloed op de temperatuur en vochtigheid, maar hebben ze ook een instelbaar effect op de luchtbeving (Figuur 1). Daarmee beschikken ze over een extra stuurbaarheid.

Het juist hanteren van luchtbeving als stuurbaarheid is niet eenvoudig. Een verhoogde luchtbeving kan weliswaar de vochtafvoer vanaf de plant verbeteren, maar de plant kan hierop reageren door de bladporiën minder ver te openen. Het gevolg is dan dat de plant minder CO<sub>2</sub> kan opnemen. Het gunstige effect van de verbeterde vochtoverdracht op de groei wordt hierdoor genivelleerd [1]. Het is daarom zaak de luchtbeving goed te doseren en op de groei- en vochtcondities af te stemmen.



Figuur 1 Luchtbehandlingssystemen voegen luchtbeweging als extra stuurgrootte aan het kasklimaat toe. Daarnaast beïnvloeden ze de vochtigheid en temperatuur van de kaslucht, alsmede de verdeling van CO<sub>2</sub>

Om een gewas optimaal te laten ontwikkelen en op de juiste momenten maximaal te laten produceren, wordt een voor dat gewas ideale klimaatcyclus nagestreefd. De klimaatcyclus kan zowel een nabootsing van een (verkorte) seizoenvariëatie als een etmaalvariëatie bevatten. Het uiteindelijke kasklimaat is een resultante van:

- het (toevallige) buitenklimaat,
- de afscherming of doorlating daarvan door de kasomhulling,
- de aanvulling of compensatie door de klimaatinstallatie(s) van de kas,
- de eigen reactie van de planten op het klimaat (vochtverdamping).

Het blijkt dat de ideale klimaatregimes niet strikt te hoeven worden aangehouden. Bij ‘Het Nieuwe Telen’ wordt getracht zoveel mogelijk ‘met de natuur mee te telen’ (optimaal te anticiperen op het toevallige buitenklimaat). Planten blijken vrij grote schommelingen in het klimaat zelf (tijdelijk) op te kunnen vangen. De grootte en duur van de klimaatafwijkingen ten opzichte van het ideaal en de wijze waarop dit wordt gecompenseerd (temperatuurintegratie), zijn bepalend voor de invloed op de gewasontwikkeling en teeltopbrengst. Uiteindelijk gaat het om een optimalisatie tussen:

- een maximale benutting van het (gratis) buitenaanbod,
- een minimale inzet van (kostbare hulpenergie voor) de klimaatinstallaties,
- een maximale teeltopbrengst, waarop minimaal wordt ingeleverd door optredende klimaatafwijkingen.

De tuinder oefent daarop nog invloed uit door via de gewasverzorging (blad plukken) de ontwikkeling van het gewas aan te passen.

## 2.2 Kas en klimatisering

Door de seizoenen heen is de variatie van het buitenklimaat groot. Bij veel teelten tracht men echter juist de seizoensinvloeden te beperken of geheel uit te schakelen. De verschillende seizoenen vergen daarom verschillende wijzen van klimatisering. De belangrijke kenmerken kunnen per seizoen worden onderscheiden.

### 2.2.1 *Winter*

In de winter is het aanbod van daglicht beperkt, zowel qua niveau als duur (daglengte). Als er daglicht is, wil men dat meestal zoveel mogelijk doorlaten door de schermen te openen. Om het beperkte lichtaanbod van buiten te ondervangen, wordt bij steeds meer gewassen kunstmatige belichting toegepast. Men wekt daarvoor bij voorkeur zelf elektriciteit op via warmte/kracht installaties (WK- of TE-installaties of HRe-ketels). De warmte die daarbij als bijproduct ontstaat, maar ook de warmteafgifte van de lampen, gebruikt men voor (bijdrage aan) de kasverwarming.

Bij teelten die niet kunstmatig worden belicht, gebruikt men de winter vaak voor de teeltwisseling en opkweek en/of accepteert men een meer seizoensgebonden productie. Omdat men daarbij geen of minder restwarmte van elektriciteitsopwekking heeft, is het belangrijker duurzame verwarmingssystemen in te zetten, zoals warmtepompen (WP) en warmte/koudeopslag (WKO).

De onderscheiden kenmerken van deze verwarmingssystemen zijn van belang voor de inzetbaarheid en benutting van luchtbehandeling.

In de winter is verwarming de dominante functie van de klimatisering. Bij de lage buitentemperaturen en beperkte zonnewarmte is het voldoende hoog houden van de kastemperatuur het belangrijkste.

Gerichte ventilatie vindt in de winter niet of nauwelijks plaats. Er is geen overtollige warmte die door ventilatie moet worden afgevoerd. Ook actieve afvoer van vocht is (vrijwel) niet nodig, omdat daaraan eerder gebrek is dan teveel (lage vochtgehalten beperken de fotosynthese). Vocht gaat reeds op oncontroleerbare wijze verloren door condensatie aan het koude dek of scherm en door infiltratie van (absoluut gezien) droge buitenlucht via kieren in het dek.

In de winter verwarmt men dus vooral voor het dekken van transmissieverliezen. Deze verliezen kunnen door condensatie aan het (koude) glas circa 15% oplopen, terwijl condens de lichttoetreding ook met enkele procenten kan beperken.

De transmissieverliezen worden beperkt door het gebruik van energieschermen. Dat is relatief langdurig mogelijk, omdat de dagperiode met aanbod van daglicht van buiten beperkt is. Bijzondere aandacht vergt de plotselinge klimaatomslag, die optreedt als de schermen worden geopend. Men tracht zoveel mogelijk te voorkomen dat lokaal koude lucht van boven het scherm in het gewas zakt, waardoor dit afkoelt en nat kan slaan.

De benodigde warmte wordt opgewekt door efficiënt te stoken (ketel met rookgascondensator), of bij voorkeur met een warmtepomp onttrokken aan een bron van duurzaam gewonnen warmte (seizoensgebonden WKO). Om dit met een hoog rendement te kunnen doen, worden de kassen steeds meer verwarmd met lage temperatuur verwarmingssystemen (LTV). Er zijn zelfs al kassen die door efficiënte warmteopslag op jaarbasis een warmteoverschot hebben. Daarvoor worden eerste initiatieven ontwikkeld om het warmteoverschot te leveren aan omringende bebouwing (woningen of bedrijven).



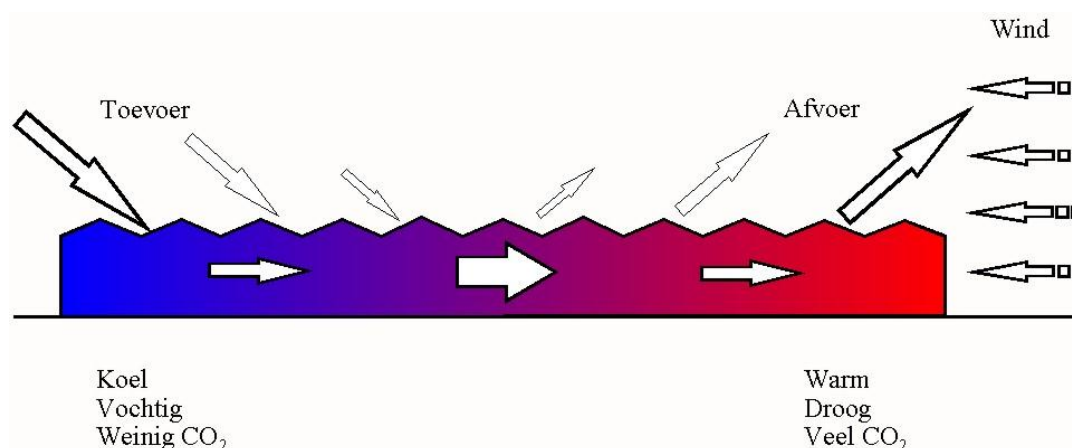
### 2.2.2 Voor- en najaar

In het voor- en najaar ligt de buitentemperatuur niet meer zo laag en de zon wordt sterker, schijnt langer en zorgt voor meer gratis warmte. Toch neemt de stookbehoefte nog niet drastisch af. De belangrijke redenen zijn:

1. Er wordt minder geschermd, om het toegenomen daglicht ten volle te benutten voor de groei van het gewas en de vruchten. Transmissieverlies wordt minder dominant, maar speelt dus nog steeds een rol van betekenis. Dat komt mede omdat de kastemperatuur hoger wordt ter bevordering van de fotosynthese;
2. Ten behoeve van vochtregulatie neemt de verversing van kaslucht sterk toe en de afgevoerde kaslucht is bovendien van hogere temperatuur.

De ventilatie (punt 2) is de belangrijkste reden voor de relatief hoge stookbehoefte in voor- en najaar. De vochtproductie in de kas wordt namelijk fors hoger, doordat het grotere daglichtaanbod de gewasverdamping activeert. Het rechtvaardigt bovendien een hogere kastemperatuur, omdat warmte de fotosynthese bevordert. Dit gebeurt terwijl de buitenlucht een hogere absolute vochtigheid heeft en dus minder vocht kan opnemen dan in de koudere periode. De ventilatiebehoefte voor de vochtregulatie loopt daardoor meer dan evenredig op. In combinatie met de hogere kastemperatuur vormt de ventilatie dus een steeds belangrijker warmteverliespost. Ook op minder zonnige dagen is dit het geval, ondanks dat het gewas dan minder actief is. Dat komt omdat het absolute vochtverschil tussen de kas en buiten dan kleiner wordt en de lagere vochtproductie dus nauwelijks minder ventilatie vergt.

Omdat ventilatie in voor- en najaar belangrijk is, moet kritisch worden gekeken naar de wijze waarop dit gebeurt. Traditioneel worden kassen op natuurlijke wijze geventileerd via ramen in het dek. De drijvende krachten wind en thermiek wisselen daarbij voortdurend. Daarom worden de standen van de luchtramen aangepast op grond van meteorologische informatie. Toch is niet duidelijk welke kasramen vooral lucht toevoeren en welke vooral lucht afvoeren en hoe groot en verschillend die luchtstromen op de verschillende plaatsen in de kas zijn (Figuur 2). Hierdoor ontstaan (voortdurend veranderende) klimaatverschillen tussen kasdelen.



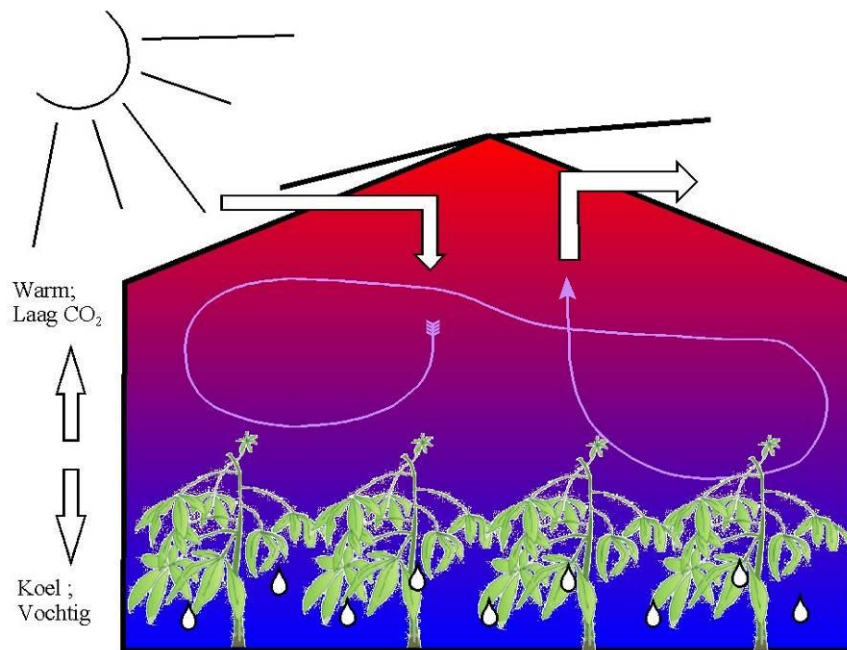
Figuur 2 De wind zorgt voor een verlopend drukverschil over het kasdek dat leidt tot een hoofdstroomrichting van ventilatielucht door de kas. Deze stromingsrichting verandert met het draaien van de wind.

Een ander nadeel van de luchting met kasramen is dat daarbij altijd de schermen (deels) moeten worden geopend, om de luchtstroom uit te wisselen met de teeltzone. Ventilatie gaat zo dus altijd gepaard met een verhoogd transmissieverlies.

Om ook bij gesloten schermen en beter gedoseerd te kunnen ventileren, met een gelijkmatiger lucht- en klimaatverdeling, worden luchtbehandelingssystemen toegepast. Ze zorgen dat in elk kasdeel de gewenste ventilatiestroom met de juiste inblaascondities komt. Deze mechanische luchtstromen zijn veelal beperkt in verhouding tot de luchtstromen die met raamluchting kunnen worden bereikt. In semigesloten kassen wordt het luchtbehandelingssysteem daarom voor de fijndosering gebruikt en de luchtramen komen bij als meer ventilatie wordt gewenst, scherming niet meer nodig is en een grovere instelling van de ventilatie wel toelaatbaar is.

Figuur 3 toont een ander aspect van de traditionele raamluchting. De luchtramen in het dek zorgen dat de luchtuitwisseling vooral in de luchtlagen bovenin de kas hoog is. Naarmate het gewas dichter is, vindt minder indringing van ventilatielucht plaats in de lager gelegen luchtlagen. Hierdoor worden gewassen vaak meer bij de voet aangetast door schimmels. Dit wordt nog bevorderd doordat de zonstraling de onderste bladlagen niet bereikt, zodat deze (zonder lokale bijstook) kouder en vochtiger blijven.

De hogere relatieve vochtigheid onderin het gewas is een belangrijke reden om met luchtbehandeling ventilatielucht onderin de kas te brengen. De relatief droge ventilatielucht komt dan op de plekken waar de meeste droging nodig is. Dit maakt het mogelijk de vochtigheid op de kritieke gewasplaatsen met minder ventilatielucht te beheersen (de ventilatie-efficiëntie neemt toe).



Figuur 3 Traditionele ventilatie: Dicht gewas en hoog geplaatste luchtramen zorgen voor een sterk verloop van de verdunning met als gevolg een ongelijkmatig klimaat over de hoogte.

Luchtbehandeling maakt in combinatie met centrale mechanische luchtafvoer ook warmteterugwinning mogelijk. De relatief koude toevoerlucht wordt dan voorverwarmd met warmte die is onttrokken aan de afvoerlucht, alvorens deze naar buiten gaat. Dit zorgt voor een verdere energiebesparing.

Omdat een groot deel van de (ventilatie)warmte is gebruikt om het vocht in de kas te verdampen, is het belangrijk dat de warmteterugwinning ook deze verdampingswarmte terugwint. In hoeverre de huidige systemen daarin slagen, wordt later in dit rapport toegelicht.

Tenslotte wordt opgemerkt dat overtollig vocht in de kas ook actief kan worden onttrokken via condensatie in plaats van het met ventilatie af te voeren. Hiervoor is een koudebron en voldoende condensatieoppervlak nodig. Luchtbehandelingssystemen kunnen hiermee worden uitgerust. In gesloten kassen wordt van deze mogelijkheid al gebruik gemaakt. Daarbij moet men er voor waken relatief kleine luchtstromen (te) sterk te ontvochtigen, omdat aldus behandelde (inblaas)lucht lokaal te sterke uitdroging van het gewas kan veroorzaken.

### 2.2.3 Zomer

In de zomer wijkt de buitentemperatuur nog maar weinig af van de gewenste kastemperatuur. De omhulling van de kas is overdag vaak nog nauwelijks nodig en kan zelfs tot oververhitting leiden, doordat de vele zonnearmte wordt vastgehouden (broeikas-effect).

Teveel zonbelasting wordt bij schaduwminnende teelten vanouds getemperd door krijten van het kasdek. De lichttoetreding is dan bij somber en koeler weer echter niet weer op te voeren. Daarom gebruikt men hiervoor steeds vaker (zonne)schermen.

Traditioneel wordt oververhitting vooral voorkomen door de kas sterk te luchten. Met de luchting kan men de kastemperatuur niet optimaal beheersen. Als het buiten echt warm is, wordt het in de kas vaak nog wat warmer (hoewel het in de schaduw van hoge gewassen koeler kan aanvoelen). Intensieve luchting zorgt er bovendien voor dat CO<sub>2</sub>, die in de kas wordt geïnjecteerd, sterk wordt verdund. Het hoge lichtaanbod wordt zo dus maar beperkt benut voor fotosynthese.

Gesloten kassen vormen een oplossing voor deze problemen. Het luchtbehandelingssysteem kan actief koelen en zo de kastemperatuur beter in de hand houden. Door de dichte kas kan geïnjecteerde CO<sub>2</sub> maximaal worden benut voor fotosynthese. Tevens wordt ziektedruk van buiten beperkt.

De door de koeling onttrokken warmte wordt opgeslagen in een buffer (WKO) om de komende winter te worden gebruikt. Het warmteoverschot is veelal zo groot dat ook omringende niet-gesloten kassen of andere objecten ermee kunnen worden verwarmd.

Semigesloten kassen zijn ontstaan omdat de kosten van gesloten kassen (nog) relatief hoog zijn en er niet altijd voor een optimale afzet van overtollige warmte kan worden gezorgd. In deze kassen wordt wel van luchtramen gebruik gemaakt, maar tracht men dit zoveel mogelijk te beperken door:

- Verhoogde menging van de kaslucht, zodat de warmte gelijkmatiger wordt verdeeld en de (koeling door) gewasverdamping ten gevolge van de luchtbeweging wordt vergroot;
- Aanvullende adiabatische koeling via verneveling van vocht;
- Uitgekiende (zon)scherming toe te passen;
- Afdekking van de bodem met witte folie, om teveel zonlicht maximaal te reflecteren;
- Telen met grotere etmaalschommelingen van de temperatuur (temperatuurintegratie).

Afhankelijk van het soort gewas kan dit met meer of minder succes en gebruikt men wisselende pakketten maatregelen. Bij schaduwminnende gewassen kan men bijvoorbeeld meer schermen. Bij koelere teelten (potplanten, fresia's, e.d.) gebruikt men bijvoorbeeld grotere luchtramen en meer verneveling.

## 3 De rol van luchtbehandeling

### 3.1 Historie

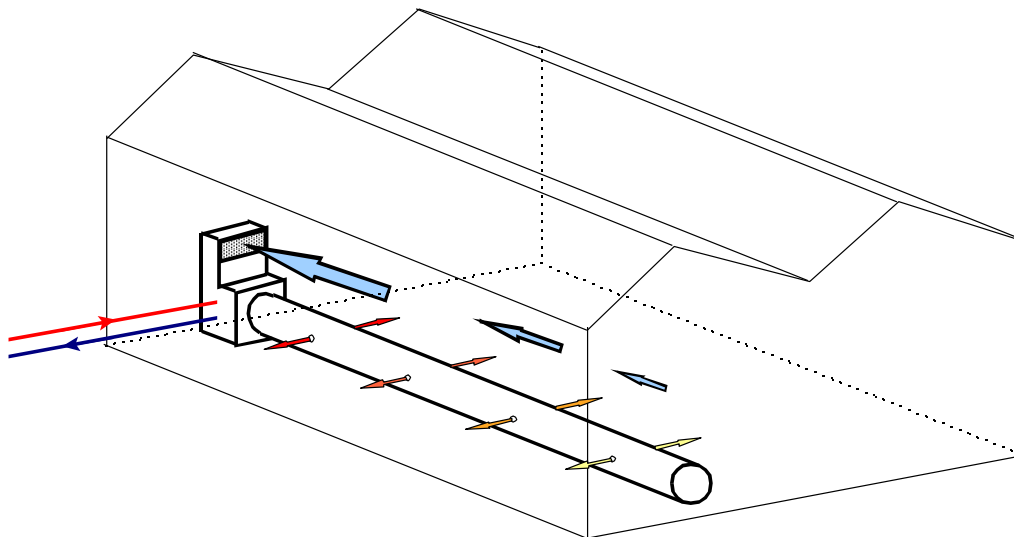
Met de term ‘*luchtbehandeling*’ (in het Engels ‘air conditioning’) zijn oorspronkelijk systemen aangeduid waarmee de lucht kon worden gekoeld. Hiervoor werd de ruimtelucht naar een koelbatterij geleid om vervolgens weer te worden teruggevoerd naar de ruimte. Daarom wordt de term nog steeds geassocieerd met *systemen die lucht verplaatsen* om de (klimaat)condities aan te passen (vergelijk Figuur 4 met Figuur 5).

In de loop van de tijd werd ook de klimatiseringsfunctie van de luchtbehandeling ruimer. Door onder het dauwpunt te koelen, kan automatisch ontvochtiging van de lucht plaatsvinden. Dit was soms wenselijk, maar soms juist niet. Door de gekoelde lucht te bevochtigen kon dit worden gecompenseerd (wel extra koelte, geen droging). Het *regelen van de luchtvochtigheid* werd daarmee een nevenfunctie.

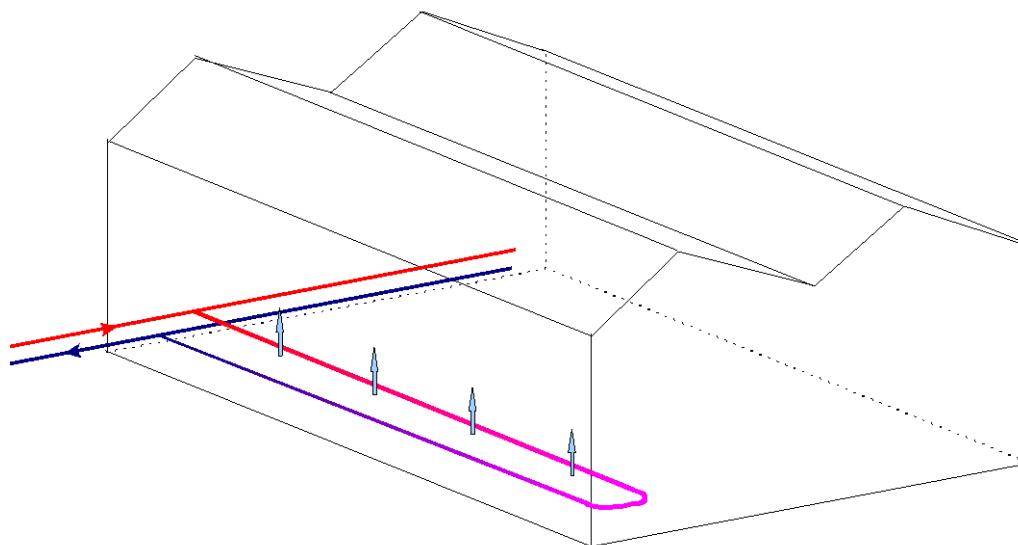
Om ook te kunnen ontvochtigen zonder een ongewenste temperatuurdaling werd naverwarming ingezet (geen koelte, wel droging). Die verwarming kon ook apart worden benut. Zo kon men uiteindelijk de *lucht koelen en verwarmen*.

De ventilator die de lucht verplaatst naar de koelbatterij, kan behalve ruimtelucht ook (deels) buitenlucht aanzuigen. Zo ontstond *naast circulatie ook ventilatie*. Als men vervolgens de afvoerlucht niet via openingen laat overstromen naar buiten, maar centraal afvoert met een eigen ventilator, is tevens *warmteterugwinning* uit ventilatielucht mogelijk.

Tenslotte bleek het nodig de systeemcomponenten te beschermen tegen vuil in de langsstromende lucht. Die filtratie groeide uit tot diverse vormen van *luchtzuivering* die voor aanwezige mensen, dieren, planten, processen of producten wenselijk waren.



Figuur 4 Bij luchtbehandeling wordt de kaslucht naar een toestel verslept om de klimaatcondities van de lucht aan te passen, waarna de behandelde lucht weer wordt teruggevoerd. De stroom retourlucht door de kas (blauwe pijlen) zwelt aan naarmate die dichter bij de aanzuigopening komt.



Figuur 5 Bij traditionele klimatisering blijft de kaslucht op zijn plek en vindt de klimatisering verdeeld over de hele kas plaats. De installatie veroorzaakt zelf geen stromingsverschillen in de kas.

## 3.2 Luchtbehandeling in de kas

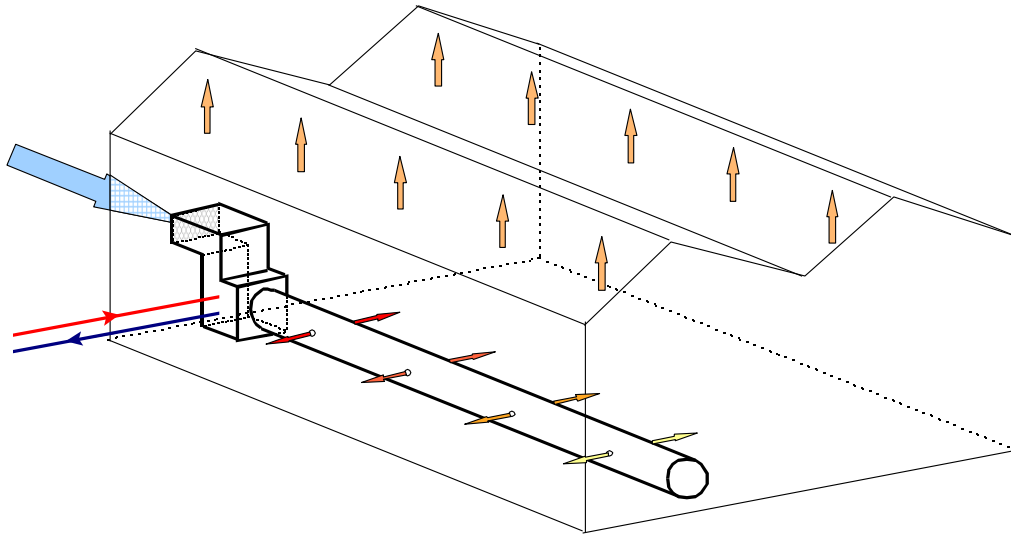
Uit het voorgaande blijkt dat met ‘luchtbehandeling’ een verscheidenheid aan functies kan worden aangeduid. De inzetbaarheid van deze functies in kassen wordt hierna toegelicht.

### 3.2.1 Verplaatsen van kaslucht

Dit primaire kenmerk van luchtbehandeling is van toepassing op de systemen die men in kassen toepast. De kaslucht wordt over bijvoorbeeld een (halve) kaplengte getransporteerd naar de aanzuig van de luchtbehandeling (Figuur 4). Na het behandelen wordt de lucht via verdeelslangen weer teruggevoerd naar de kas.

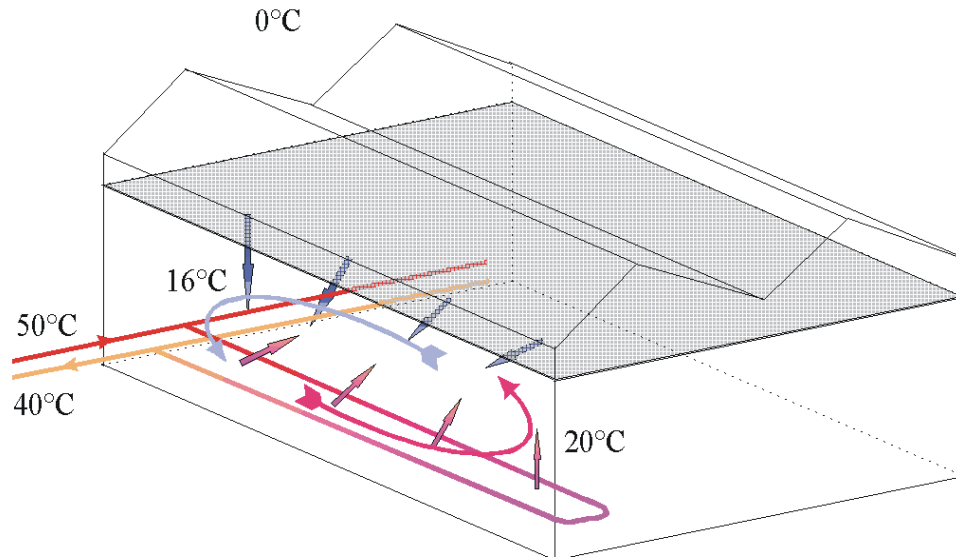
Met het verslepen van de kaslucht naar een plek waar zich de klimatisering bevindt, onderscheidt luchtbehandeling zich duidelijk van de gebruikelijke klimatiseringssystemen in de kas. Die systemen brengen hun warmte (51-ers) of vocht (vernevelaars) op de plek waar zich de kaslucht bevindt (Figuur 5).

Het verslepen van de kaslucht is van invloed op de luchtbeweging in de kas en op de (in)homogeniteit van het kasklimaat. Inhomogeniteit ontstaat (mede) door het aanwellen van de aanzuigstroom naar de LBI toe (zie de lichtblauwe pijlen in Figuur 4). Het wordt vermeden als volledig met buitenaanzuig wordt gewerkt (ventilatiemodus) in combinatie met overstroom via (gelijkmatig verdeelde openingen in) het dek (Figuur 6). Het voortdurend werken in ventilatiemodus is echter uit het oogpunt van goede klimaatcondities niet altijd gewenst en ook energetisch ongunstig.



Figuur 6 Bij volledige buitenluchtaanzuiging en overstroom van afvoerlucht via het dek veroorzaakt de luchtbehandeling geen ongelijke stroming

Een inhomogeen klimaat is overigens maar zeer ten dele toe te schrijven aan de luchtbehandeling. Het hangt veel meer samen met het gebruik van grote, ruime kassen met goede scherming en stoken op lage temperatuur, kortom, met de moderne energiezuinige kas. Daardoor kan over de kaplengte een natuurlijke thermische wervel ontstaan, die wordt aangedreven door koude die vanuit de luchtlaag boven het scherm in de kas dringt (Figuur 7). Die wervel wordt door de verwarming op lage temperatuur onvoldoende onderdrukt en zorgt in zijn evenwichtstoestand voor een ongewenst temperatuurverschil over de kaplengte.



Figuur 7 In moderne kassen kan een thermische wervel ontstaan die voor een ongewenst klimaatverschil zorgt

Klimaatverschillen in de kas zijn verder mede afhankelijk van het type klimatisering dat men toepast (zie hierna bij 'beheersing van de temperatuur').

In het besef dat de oorzaken van klimaatverschillen maar ten dele zijn weg te nemen, zoekt men naar alternatieve oplossingen. Om de bijdrage van de luchtbehandeling aan het probleem weg te nemen, is men aan het experimenteren met diffuser geplaatste aanzuigpunten. Men doet dit bijvoorbeeld door om en om van voor naar achter en van achter naar voor in de kap in te blazen. Een andere optie is radiaal inblazen zonder luchtslangen, vanuit een groot aantal autonoom aan te sturen toevoerpunten, gelijkmatig verdeeld over de kas. Daarbij is het van belang de (luchtdoorvoer voor) aanzuiging van buitenlucht slim te combineren met de kasconstructie, bijvoorbeeld door integratie in de draagkolommen. Het voordeel van een autonome stuurmogelijkheid is dat het systeem in potentie de anderszins ontstane klimaatverschillen moet kunnen weggeregelen.

### 3.2.2 *Circulatie*

Ook als er geen behoefte is aan behandeling van de lucht, kan de circulatie worden ingezet. Dit heeft twee functies:

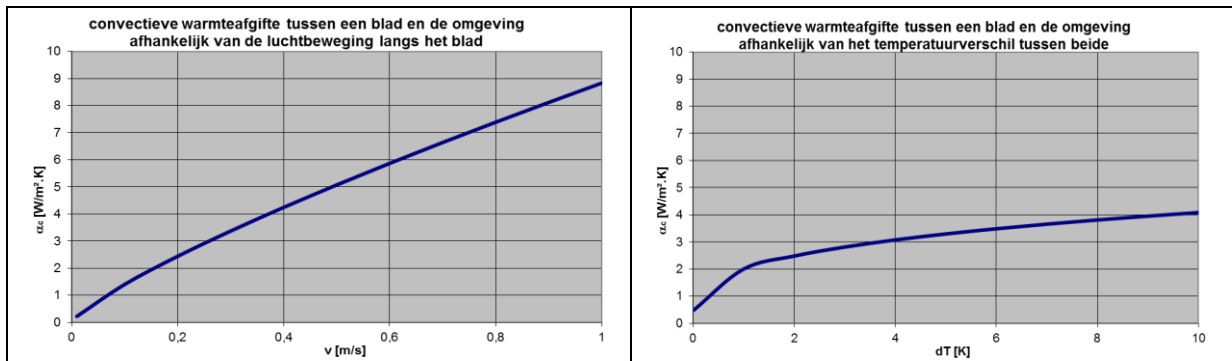
1. De doormenging tussen het gewas te vergroten, zodat de homogeniteit van het kasklimaat verbetert (klimaatverschillen nivelleren);
2. Het gewas activeren, dat wil zeggen vocht beter afstaan, warmte beter uitwisselen en CO<sub>2</sub> beter opnemen.

Hoe goed de luchtbehandeling hierin slaagt, is afhankelijk van de capaciteit, de toevoerposities ten opzichte van het gewas en de inblaascondities van de circulatielucht. Ook de omgevingsinvloeden spelen hierin een belangrijke rol.

Voor de eerste functie, de doormenging, dient de circulatiestroom andere effecten te overheersen die de stroming en stromingsopbouw (mede) beïnvloeden. Bij een zonnige situatie ontstaat bijvoorbeeld een warme luchtlaag bovenin de kas. De warme lucht is lichter dan koelere lucht onderin het gewas en wil daarom bovenin blijven. We noemen dit een stabiele opbouw van de atmosfeer. Er is dan veel bewegingsenergie nodig om deze lucht toch te doormengen. Er moet harder (en gericht) worden geblazen om een goede doormenging te bereiken dan bijvoorbeeld op een bewolkte dag.

Bijlage A gaat op deze aspecten nader in. In de bijlage wordt een indicatieve, dus globale inschatting gemaakt van de competitieve krachten die het stromingsbeeld bepalen. De beschouwing maakt duidelijk dat de luchtstroom uit de luchtslangen niet dominant is. De beschouwing verklaart en bevestigt het beeld van de praktijk. In de praktijk is de capaciteit van luchtslangen, zeker in stabiele situaties, ontoereikend om een goede doormenging te verzorgen. Daarvoor zijn beduidend grotere luchtstromen met hogere uitblaassnelheden nodig en bij voorkeur ook aangepaste inblaasposities en -richtingen.

De tweede functie, het activeren van het gewas, is in het algemeen eenvoudiger te realiseren. Figuur 8 laat in het linker plaatje zien dat het opvoeren van de luchtbeweging een vrij sterk effect heeft op de warmte- of vochtoverdracht, terwijl de niveaus van de luchtsnelheden nog beperkt zijn. Het rechter plaatje laat zien dat dit minder goed lukt door het opvoeren van het temperatuurverschil tussen het blad en de omgevingslucht. Het effect van het verhogen van het temperatuurverschil vlakt sterker af. Dit verklaart waarom de circulatiefunctie een energie-efficiënt alternatief kan vormen voor de minimum buis, in gevallen waar deze wordt ingezet om de circulatie en droging te bevorderen (nog los van het feit dat de temperatuurverhoging door de minimum buis ook de verdamping nog doet toenemen). Waar de minimum buis echter wordt ingezet voor de thermische activering van het gewas (knopzetting), blijft deze voorziening overigens gewenst.



Figuur 8 Het verhogen van de luchtsnelheid langs het blad (links) heeft een sterker effect op de overdracht van warmte en vocht dan het vergroten van het temperatuurverschil met de omgeving (rechts)

### 3.2.3 Ventilatie

Ventilatie via luchtbehandeling heeft vijf belangrijke voordelen ten opzichte van ventileren met luchtramen:

1. De schermisolatie blijft intact.

Bij traditionele kasluchting moeten de schermen (deels) worden geopend om een luchtweg via de luchtramen naar het teeltcompartiment te creëren. De extra isolatiewaarde van de schermen gaat hierdoor voor een belangrijk deel verloren. Zo ventileren gaat dus altijd gepaard met een verhoogd transmissieverlies.

Bij een luchtbehandelingssysteem is de luchtweg naar het teeltcompartiment autonoom en blijft de schermisolatie grotendeels intact. Alleen overstroom door de schermen naar het dek zorgt nog voor enige aantasting van de isolatie. Bij luchtbehandeling met eigen toe- en afvoer wordt ook dit vermeden.

2. De ventilatiestroom kan beter worden gedoseerd.

Ondanks betere luchtmechanieken en regeling op windcondities is de ventilatiestroom door ramen toch slechter te doseren dan de mechanische ventilatiestroom van de luchtbehandeling;

3. De ventilatie wordt gelijkmatiger.

Met een goed ontworpen luchtbehandelingssysteem kan op elke plek in de kas eenzelfde buitenluchtstroom worden gerealiseerd. Het probleem van ongelijkmatige luchtverdeling ten gevolge van wisselende natuurlijke drijvende krachten, zoals in Figuur 2 wordt geschetst, kan daarmee worden opgeheven;

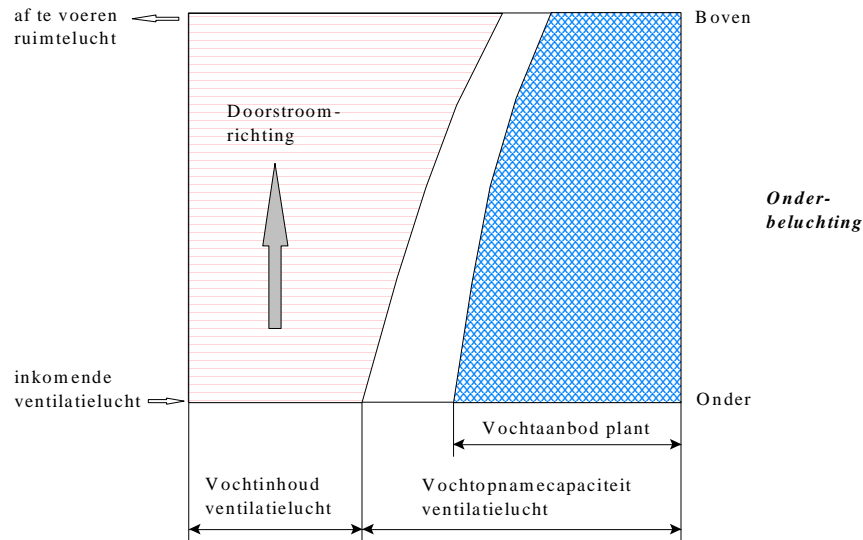
4. De ventilatie-efficiëntie gaat omhoog.

Het verbeteren van de ventilatie-efficiëntie gebeurt door dichterbij de kritieke plaatsen in het gewas te ventileren (het in Figuur 3 geschetste probleem te verhelpen). De droogste lucht (grootste opnamecapaciteit) wordt op de vochtigste plaatsen (hoogste RV) ingebracht, dus onderin het gewas (Figuur 9). De ventilatielucht neemt daar vocht op, wordt dus vochtiger en stroomt daarna over naar de minder vochtige (en vaak warmere) plekken hoger in het gewas. De opnamecapaciteit van de ventilatielucht is daar weliswaar verminderd, maar op die plekken hoeft ook minder te worden gedroogd (lagere RV).

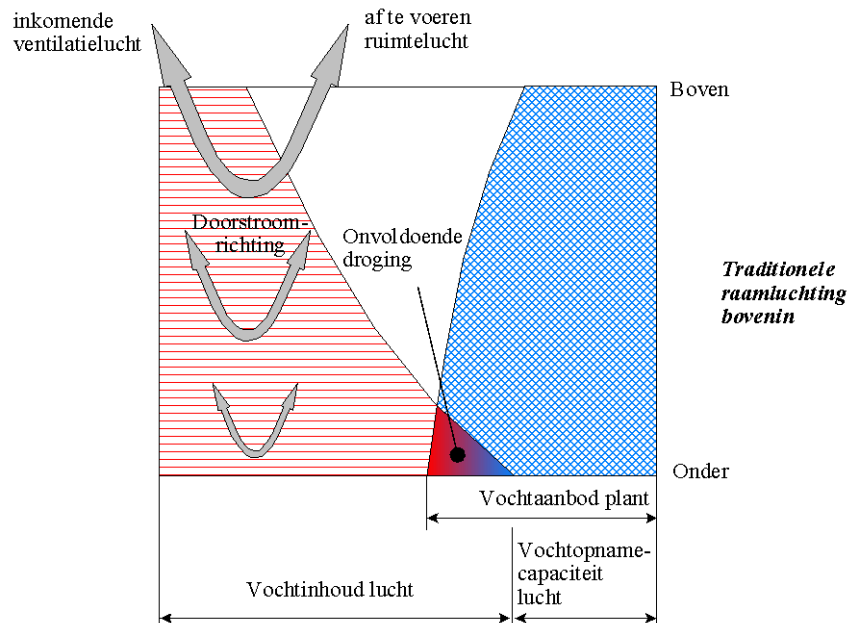
Figuur 9 geeft deze verlopen in de doorstroomrichting van het gewas aan.

Figuur 10 is ter vergelijking toegevoegd. Het toont voor traditionele raamluchting eveneens de verlopen over de hoogte van het vocht in de lucht en het vocht aanbod door de plant. De figuur illustreert dat het inbrengen van de droogste lucht op de droogste plaatsen minder effectief is, temeer omdat er geen gerichte doorstroming van het gewas plaatsvindt. Vochtafvoer moet indirect plaatsvinden door uitwisseling met de hogere luchtlagen. Die uitwisseling wordt minder naarmate de lucht dieper in het gewas moet dringen.





Figuur 9 Met onderbeluchting wordt de ventilatielucht met de hoogste vochtopnamecapaciteit gebracht op de plek waar het vochtsaanbod van de planten het grootst is. Door het meegenomen vocht neemt de opnamecapaciteit boven bij de plant af, maar het aanbod is daar ook lager.



Figuur 10 Met traditionele raamluchting is de vochtafvoer onderin het gewas niet effectief. Boven bij het gewas is een sterke luchtuitwisseling en kan de lucht veel meer vocht bevatten dan wordt aangeboden door de planten. Onderin het gewas is de vochtopnamecapaciteit van de lucht echter kleiner dan het aanbod door de plant en vindt onvoldoende droging plaats.

Doordat ventilatielucht beter wordt benut, kan luchtbehandeling met minder lucht al hetzelfde bereiken als luchtramen. Hierdoor wordt het systeem energiezuiniger. Hoe goed men hierin slaagt, is afhankelijk van het aantal en de verdeling van de luchtslangen, de posities ten opzichte van het gewas, de inblaasrichtingen ten opzichte van het gewas en de inblaascondities. Onderzoek ter optimalisatie van deze grootheden moet aantonen hoeveel

de ventilatie-efficiëntie en daarmee de energiezuinigheid van ventilatie nog kan worden verbeterd. De ontwikkeling van injectiebeluchting is hier op gericht;

#### 5. Er is warmteterugwinning mogelijk.

Het laatste voordeel van luchtbehandeling is de mogelijkheid om ventilatiewarmte terug te winnen. De luchtafvoer moet dan wel eveneens mechanisch (dus met een ventilator) via een centraal punt nabij de buitenluchtinname plaatsvinden. De elkaar passerende in- en uitgaande luchtstromen kunnen dan hun warmte uitwisselen, zodat een aanzienlijk deel van de ventilatiewarmte kan blijven behouden. Dit is energetisch gunstig, omdat de ventilatiewarmte tot wel de helft van het stookverlies kan vertegenwoordigen.

Er bestaan tegenwoordig warmteterugwonelementen met een hoog rendement. Deze werken volgens het tegenstroomprincipe. Fabrikanten geven temperatuurrendementen op boven 90%. Dat klinkt mooier dan het is, want het bijbehorende enthalpierendement is circa 60%. Dat rendement is bepalend voor de energiebesparing. Het verdisconteert niet alleen de voelbare warmte (effect op de luchttemperatuur) maar ook de warmte die in verdamping van vocht is gaan zitten. Dat laatste is juist bij kassen een belangrijk aandeel. In de praktijk blijkt in kassen circa 50% van de ventilatiewarmte met deze systemen te worden teruggewonnen [2].

Een beperking van luchtbehandeling is dat de ventilatiecapaciteit beperkt is. De omvang van de installaties vormt hiervoor een praktische begrenzing (investeringskosten, ruimtebeslag, elektriciteitsgebruik). Luchtbehandeling wordt daarom vooral ingezet voor fijndosering van de ventilatie en zo nodig aangevuld met raamluchting. De ventilatiefunctie wordt gelimiteerd tot vochtbeheersing in het stookseizoen. Vanwege de hogere benodigde capaciteiten wordt het systeem voor temperatuurbeheersing (zomerkoeling met ventilatielucht) nauwelijks ingezet.

#### 3.2.4 *Beheersen van de luchtvochtigheid*

In eerste instantie gebruikt men vooral de ventilatiefunctie van de luchtbehandeling om de luchtvochtigheid te beheersen, zo nodig aangevuld met verwarming. Zoals hiervoor aangegeven (Figuur 9 en Figuur 10), draagt de plaats van de luchttoevoer onder het gewas er aan bij dat dit met een verhoogde efficiëntie gebeurt.

De luchtbehandeling blijkt nog niet volledig in de vochtbeheersing te voorzien. Bij mildere en/of vochtiger buitenomstandigheden zorgen de kasramen nog steeds voor een aanzienlijk deel van de vochttafvoer. In deze situaties kan nog steeds (beperkt) worden gestookt. Uit analyses blijkt dat voor vochtbeheersing ventilatievouden tot circa 6 per uur nodig zijn [3]. De toegepaste luchtbehandelingssystemen hebben meestal een capaciteit tussen 1 en 2 luchtwisselingen per uur.

De circulatiefunctie van de luchtbehandeling wordt gebruikt om lokale vochtverschillen te verkleinen. Dit is vooral mogelijk als maar beperkte ventilatie nodig is, zodat het resterende deel van de capaciteit voor circulatie kan worden ingezet.

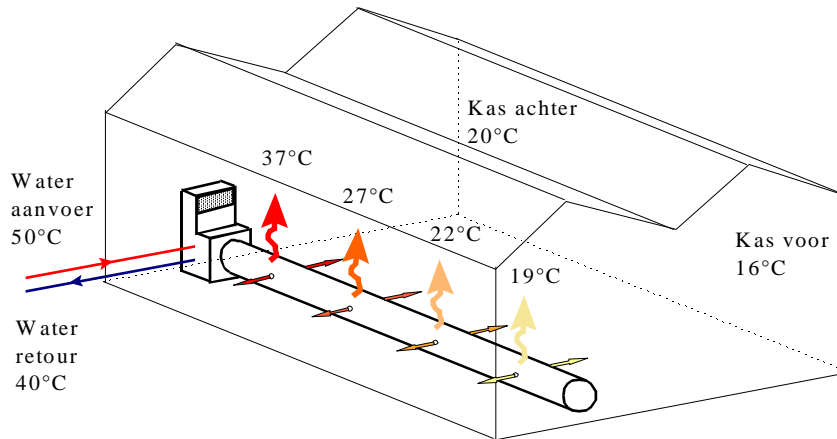
Ontvochtigen van kaslucht kan door condensatie op een koel warmtewisselend element van de luchtbehandeling. Deze toepassing is tot nu toe beperkt tot gesloten kassen. Hetzelfde geldt voor bevochtiging via het luchtbehandelingssysteem. Als dit nodig wordt geacht, gebruikt men hiervoor meestal een apart vernevelingssysteem.

#### 3.2.5 *Beheersen van de temperatuur*

De verwarmingssectie van de luchtbehandeling wordt voornamelijk ingezet voor het op (kas)temperatuur brengen van de ventilatielucht, die door de luchtbehandeling in de kas wordt gebracht. Soms gebruikt men hierbij teruggewonnen warmte uit de afgevoerde lucht.

De bijdrage van de luchtbehandeling aan de totale kasverwarming houdt men veelal beperkt. Verwarmen doet men hoofdzakelijk met de buisverwarming. De terughoudende inzet van

luchtbehandeling voor verwarming hangt samen met ongelijkmatigheid van de warmteafgifte bij veel van deze systemen (Figuur 11).



Figuur 11 Door afkoeling van de luchtslang aan de omringende kaslucht vermindert de warmteafgifte stroomafwaarts. Het gevolg is een ongelijkmatige temperatuurverdeling in de kas.

Om een gelijkmatiger warmteafgifte te krijgen, kan men de lagere uitblaastemperatuur stroomafwaarts compenseren door een grotere luchtstroom (stroomafwaarts de uitblaasgaatjes in de slang laten toenemen in aantal of grootte). In dat geval wordt echter de luchtbeweging door de slanguitblaas weer ongelijkmatig, hetgeen ook niet wenselijk is. Daarom worden momenteel verschillende verbeteropties onderzocht. Behalve met om en om versprongen geplaatste luchtbehandelingskasten experimenteert men met geïsoleerde en dubbelwandige slangen. Een gepatenteerde optie met naverwarming in de luchtslang lijkt veelbelovend, vooral ook omdat bij deze optie de warmteverdeling instelbaar is. Dit systeem kan dus ook worden benut om (anderszins ontstane) temperatuurverschillen over de kaplengte te neutraliseren, die in moderne goed geïsoleerde kassen thans een probleem vormen (zoals geschetst in Figuur 7). Overigens is de ongelijkmatige warmteverdeling over de luchtslangen juist in het perspectief van deze klimaatongelijkheid niet ongunstig. De slangen brengen (bij de gebruikelijke opstelling aan de gevel) namelijk meer warmte op de plekken die het koudst blijven. Om dit zo goed mogelijk te doen, zou bij lage buitentemperaturen de luchtstroom beperkt moeten blijven en de luchttemperatuur hoog worden opgestookt (groot temperatuurverval). In hoeverre dit een eenvoudige remedie vormt, moet worden onderzocht. Energetisch is dit niet gunstig (zie volgende alinea), zodat de voornoemde verbeteropties aantrekkelijker zijn.

Behalve voor de gelijkmatigheid van het kasklimaat heeft een betere benutting van de luchtslangen voor verwarming voordelen voor de energie-efficiëntie. Met de luchtslangen verdubbelt globaal het verwarmend oppervlak (VO) in een kas. Als men dit beschikbare verwarmend oppervlak volledig benut, kan de verwarming met beduidend lagere (retour)temperaturen werken. Dit komt het rendement van de warmtepomp of rookgascondensator ten goede en vergroot de (kansen op) benutting van eventuele rest- of omgevingswarmte.

De inzet van luchtbehandeling voor koeling van de kaslucht beperkt zich tot gesloten kassen. In semigesloten kassen is dit (nog) niet gebruikelijk. Daar wordt vooral (spuien via) raamluchting gebruikt om te hoge temperaturen te voorkomen.

### 3.2.6 *Beheersen van de luchtzuiverheid*

De luchtbehandeling is veelal voorzien van filters om grove deeltjes tegen te houden. Dit helpt ziektekiemen en schadelijke insecten in de ventilatielucht te weren.

### 3.2.7 *Inzet als CO<sub>2</sub>-doseersysteem*

Soms wordt het verdelen van de toevoerlucht van het luchtbehandelingssysteem gecombineerd met het distribueren van CO<sub>2</sub> in de kas. Het vereist dat beide functies samenvallen. Dit is slechts ten dele het geval.

CO<sub>2</sub> is in toenemende mate nodig bij een groter wordend lichtaanbod. Om suikers te vormen, moet de plant dan tegelijk water opnemen. De waterovermaat moet de plant aan de omringende lucht kunnen afgeven. Bij koudere buitenomstandigheden gaat dit al met weinig of geen ventilatie. Omdat de ventilatie beperkt is, gaat dan niet veel CO<sub>2</sub> verloren en hoeft de dosering dus niet hoog te zijn.

Bij voor- en najaarscondities moet de ventilatie fors toenemen om het overtollig vocht afdoende af te voeren. De luchtslangen spelen hierin een belangrijke rol. Met de ventilatie neemt ook het CO<sub>2</sub>-verlies toe en moet er meer worden gedoseerd om de concentratie voldoende hoog te houden. De ventilatie met de luchtslangen en de CO<sub>2</sub>-behoefte gaan dus in zekere mate gelijk op, hoewel niet geheel. Als het buiten vochtiger is, moet meer worden geventileerd om hetzelfde vocht af te voeren. In zo'n situatie is het wisselend bewolkt en is het lichtaanbod minder hoog. De CO<sub>2</sub>-dosering zal dus niet gelijk op gaan met de ventilatie.

De luchtramen worden geopend naarmate meer overtollige warmte moet worden afgevoerd. De ventilatie neemt dan sterk toe. Er is veel meer CO<sub>2</sub> nodig. Tegelijk wordt de ventilatiefunctie van de luchtslangen ondergeschikt. Hier gaat het gebruik van de luchtslangen en de CO<sub>2</sub>-vraag dus niet meer gelijk op. Toch zetten tuinders de luchtslangen nog wel in om het gewas onderin extra te activeren. Ze benutten dan vooral de mengfunctie. Combinatie daarvan met de CO<sub>2</sub>-dosering is mogelijk.

Voor alleen CO<sub>2</sub>-dosering is het luchtbehandelingssysteem minder geschikt, vanwege de veel lagere capaciteiten die hiervoor nodig zijn. De ventilatoren kunnen daarvoor niet langzaam genoeg draaien en de luchtslangen zorgen dan niet meer voor een gelijkmatige verdeling. Men zal dus altijd een zekere circulatiestroom mee moeten laten draaien. Het bezwaar is niet alleen dat men daardoor meer elektriciteit gebruikt dan strikt nodig is. Ook het CO<sub>2</sub>-verlies kan toenemen bij dosering met ramen open. De circulatie zorgt namelijk dat CO<sub>2</sub> beter wordt uitgewisseld met luchtlagen boven het gewas.

De combinatie van slangluchting en CO<sub>2</sub>-dosering lijkt dus niet in alle omstandigheden te prefereren.

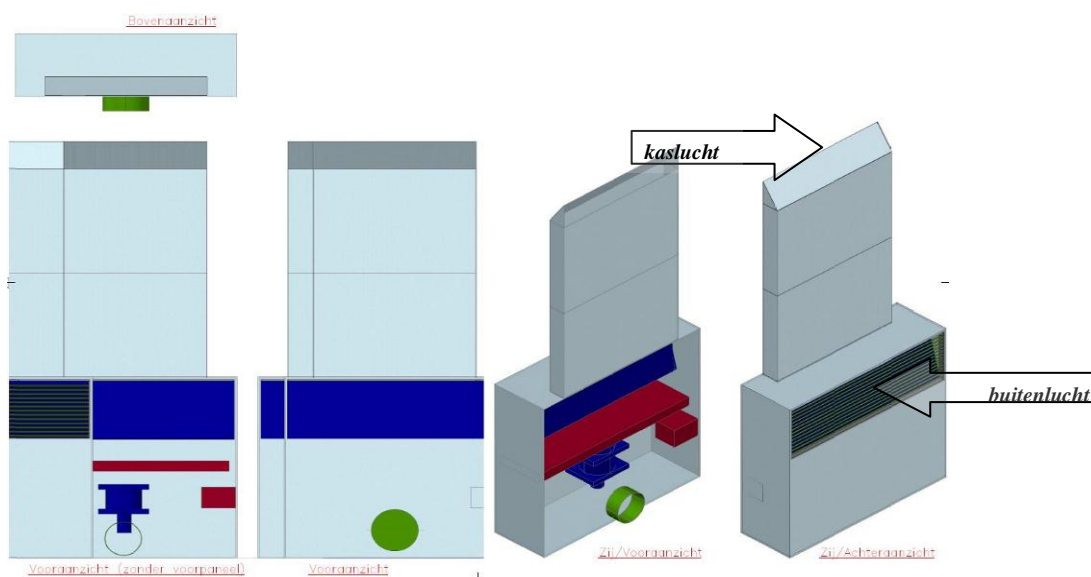
## 4 Beschrijving luchtbehandelingsinstallaties

Om een beeld te krijgen van de functies die momenteel aan luchtbehandelingsystemen voor kassen worden toegekend, zijn in dit hoofdstuk vijf LB-installaties beschreven, die in kassen worden toegepast. Ook specifieke kenmerken van de uitvoering komen daarbij aan bod. De informatie is verkregen uit documentatie, bezoek aan kassen en vragenlijsten aan leveranciers. Helaas zijn de vragenlijsten niet door alle betrokken leveranciers ingevuld. Daarom ontbreekt de informatie van enkele systeemvarianten. In hoofdstuk 4.6 wordt hierop nog teruggekomen.

### 4.1 CoVent

De CoVent-G(evel) luchtbehandelingsinstallatie van Cogas bevat een LBK die is gecombineerd met het luchtverdeelstelsel (inblaassurven) en het besturingsgedeelte (Optimakas software) van het Priva ClimateOptimizer concept.

De LBK is voorzien van een aanvoer van buitenlucht en van kaslucht (Figuur 12). De LBK wordt in de gevel geplaatst op de randfundatie tussen de roedes en de gording (Figuur 13). De LBK is voor onderhoud vanaf de buitenzijde te bereiken.



Figuur 12 Schematische weergave van de CoVent-G luchtbehandelingskast



Figuur 13 De CoVent-G luchtbehandelingskast is in de gevel geïntegreerd

De afvoer van gebruikte lucht naar buiten vindt op natuurlijke wijze plaats door overstort via kaslekken en gevelramen, die bij toenemende capaciteit worden geopend.

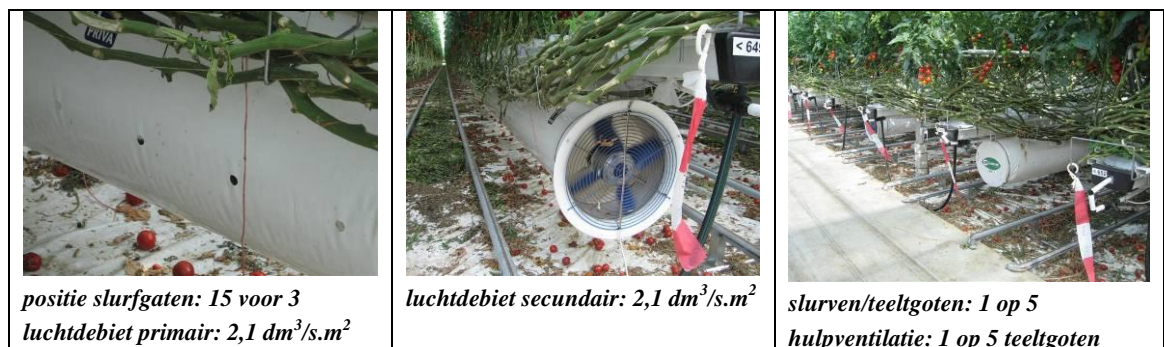
Contraroterende luchtkleppen bepalen de mengverhouding tussen buitenlucht en retourlucht. In de LBK is een LT (Lage Temperatuur)-verwarmingsblok van 40 kW geplaatst, dat kan worden aangesloten op een verwarmingsnet. Aan de hand van de binnen- en buitenluchtcondities worden de luchtkleppen, de modulerende ventilator en de pomp voor verwarming geregeld.

De regeling is van Hoogendoorn. Die probeert de relatieve vochtigheid (RV) van de kaslucht tussen een minimale en maximale ingestelde waarde te houden, meestal tussen 82 en 86%. Per periode van de dag kunnen aangepaste niveaus worden ingesteld. Aan de hand van verschillen in absolute vochtigheid tussen binnen en buiten (afgeleid uit T en RV) wordt meer of minder buitenlucht bijgemengd.

De luchtverwarming wordt zo gestuurd dat de temperatuur van de inblaaslucht gelijk wordt aan de kastemperatuur. Het systeem meet daartoe de temperatuur voor het verwarmingselement, voor de luchtslurf en op 3 plaatsen in de luchtslurf. Op grond hiervan wordt de warmwaterklep op de LBK ingesteld.

De bezochte kas van 5 ha is in 6 afdelingen gesplitst met ieder een meetbox. De 62 LBK's worden op gezamenlijke waarden voor RV en temperatuur (T) gelijk aangestuurd.

Zodra de luchtramen 5% of meer zijn geopend, stopt (de ontvochtiging via) het luchtbehandelingssysteem.



Figuur 14 Luchtslurven voor primaire en secundaire lucht

De luchtslurven onder de teeltgoten, die de geconditioneerde lucht tussen het gewas verdelen, zijn door Priva gedimensioneerd op basis van lucht volumestroom, temperatuur, worp en verdeling. De helft van de slurven is aangesloten op de LBK's, de andere helft is voor extra circulatie van lucht, die wordt aangezogen vanaf het middenpad (Figuur 14).

De luchtbeveging en verwarming zijn met één apparaat te regelen. Verwarmen kan dus met of zonder minimumbuis.

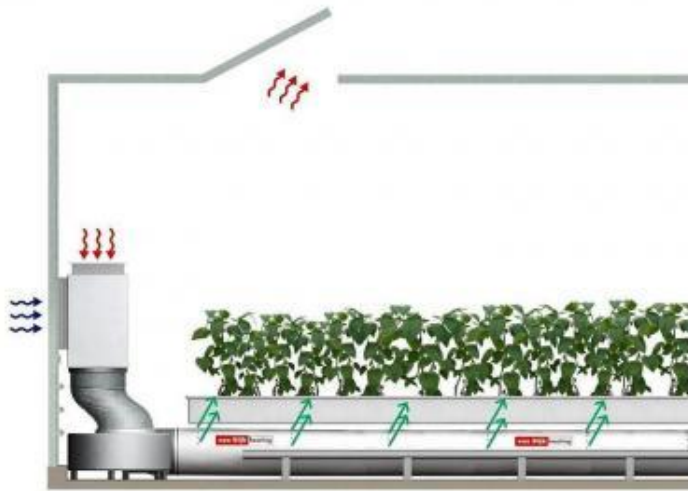
## 4.2 van Dijk AVS

Figuur 15 geeft het AVS van Van Dijk Heating schematisch weer. De LBK kan zowel binnen als buiten de kas worden opgesteld en heeft als belangrijkste onderdelen een kleppenkast, een ventilator en een luchtverdeelsysteem.

In de bezochte kas is de LBK buiten de kas geplaatst (Figuur 16). De kleppenkast heeft twee aluminium jaloeziekleppen, één voor de buitenlucht en één voor de retourlucht (circulatielucht uit de kas). De mengverhouding wordt door de kleppen geregeld op basis van de gemeten luchtcondities.

De ventilator zuigt het luchtmengsel aan en blaast dit in het luchtverdeelsysteem, dat uit één of meer luchtslurven per ventilator (LBK) bestaat. Het debiet is instelbaar met een frequentieregelaar.





Figuur 15 Schematische weergave AVS



Figuur 16 De LBK van AVS is buiten de kas opgesteld

De besturing van de ventilator en kleppen vindt plaats in een schakelkast.

De kleppenkast en de ventilator zijn verbonden met een kanaaldeel, waardoor deze onderdelen in verschillende posities zijn te monteren.

De buitenlucht kan worden verwarmd door menging met kaslucht of door een warmtewisselaar, aangesloten op een CV-systeem met laagwaardige warmte.

Onder elke teeltgoot is een luchtslurf aanwezig (Figuur 17).

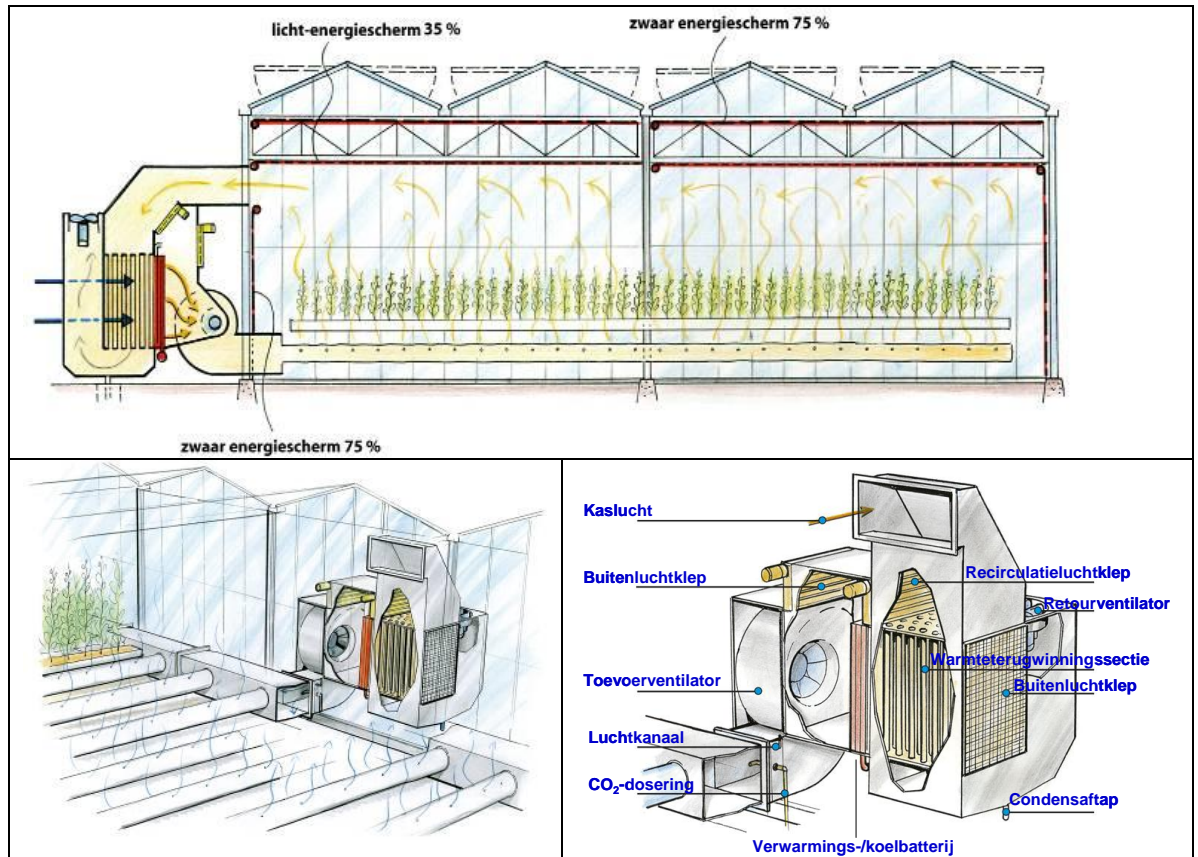
Bovenin de kas bevinden zich vrijhangende hulpventilatoren voor extra menging. Volgens de gebruiker zijn deze niet perse nodig.



Figuur 17 Luchtslurven onder de teeltgoten en hulpventilatoren bovenin de kas

### 4.3 ClimecoVent

Figuur 18 geeft het ClimecoVent-concept van Climeco schematisch weer.



Figuur 18 Schematische weergave ClimecoVent

De LBK met warmteterugwinning (WTW, ook wel aangeduid als Regain-unit) is buiten de kas opgesteld (Figuur 19). Met het toestel wordt naar behoefte verse buitenlucht aangezogen en in de kas gebracht, terwijl af te voeren kaslucht naar de buitenomgeving wordt getransporteerd. Hiervoor zijn binnen het toestel één toevoerventilator en één of twee afvoerventilator(en) geplaatst. De toe te voeren lucht wordt met behulp van een (lucht-lucht) warmtewisselaar voorverwarmd met warmte uit de af te voeren lucht. Om deze lucht verder op de gewenste temperatuur te brengen zijn in het toestel één of twee verwarmingsbatterijen geplaatst, die op de verwarmingsinstallatie zijn aan te sluiten. De temperatuur van de inblaaslucht is gelijk aan de kaslucht.

Door het aansturen van een kleppenregister kan de buitenlucht worden gemengd met te recirculeren kaslucht. De afvoerventilator(en) wordt/worden in dat geval met behulp van een frequentieregelaar terug geregeld om te voorkomen dat de kas op onderdruk wordt gebracht. De mate van ventileren (aandeel buitenlucht) wordt geregeld op basis van de gewenste relatieve vochtigheid. Als warmteterugwinning (WTW) uit de afvoerlucht niet is gewenst, wordt de lucht afgevoerd door de luchtramen (overstroom).

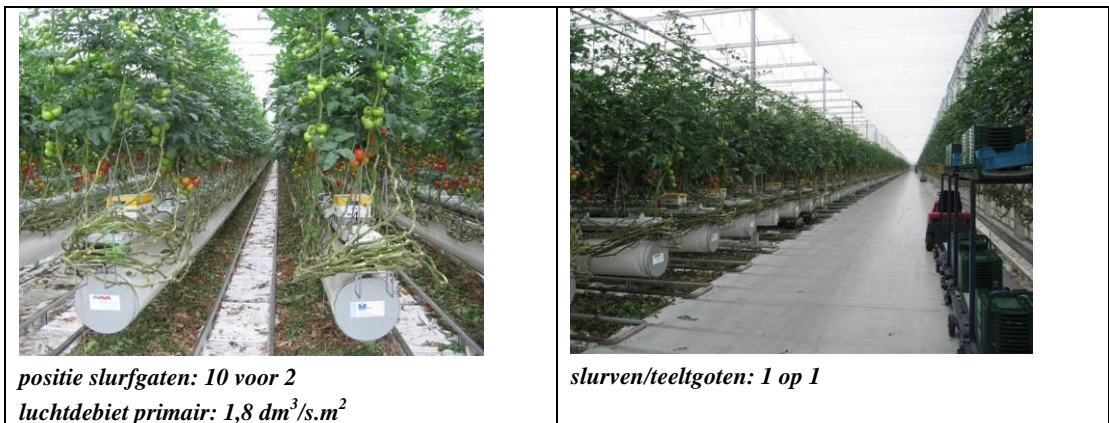
De LBK is voorzien van een aansluiting waardoor CO<sub>2</sub> het toestel kan worden ingevoerd. Die wordt vermengd met de inblaaslucht en gelijkmatig in de kas verdeeld.



Het luchtdistributiesysteem bestaat uit een binnen of buiten de kas op te stellen kanalsysteem waar enerzijds het toestel op wordt aangesloten, anderzijds de luchtslurven voor luchtverdeling. De luchtslurven met gaatjes worden onder de teeltgoten aangebracht (Figuur 20).



Figuur 19 De LBK van ClimecoVent is buiten opgesteld



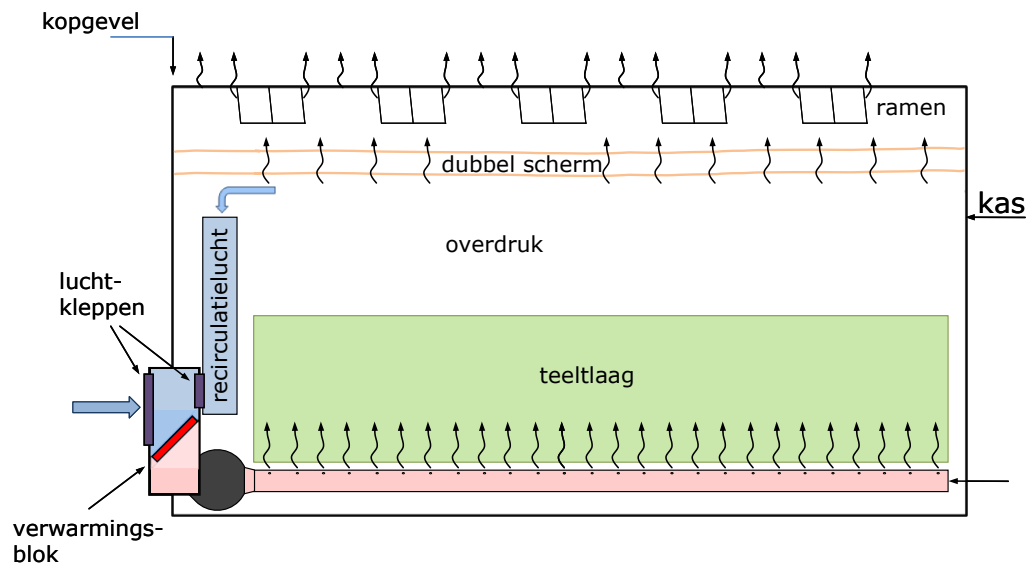
Figuur 20 Luchtslurven onder de teeltgoten

#### 4.4 LT van LekHabo

Figuur 21 geeft het LT overdruk vochtreguleringsysteem van LekHabo schematisch weer. De LBK is in de gevel geïntegreerd. Per tralie is één LBK aangebracht (Figuur 22).

De condities van de inblaaslucht worden geregeld met een klimaatcomputer. Deze stuurt de verhouding buitenlucht/recirculatielucht en de naverwarming. Met de luchtkleppen worden de volumestromen buitenlucht en recirculatielucht geregeld. Met het LT-verwarmingsblok kan de inblaaslucht worden verwarmd.

De ventilator blaast de lucht in de geperforeerde luchtslurven, die onder de teeltgoten zijn aangebracht (Figuur 23).



Figuur 21 Schematische weergave LT-systeem van LekHabo



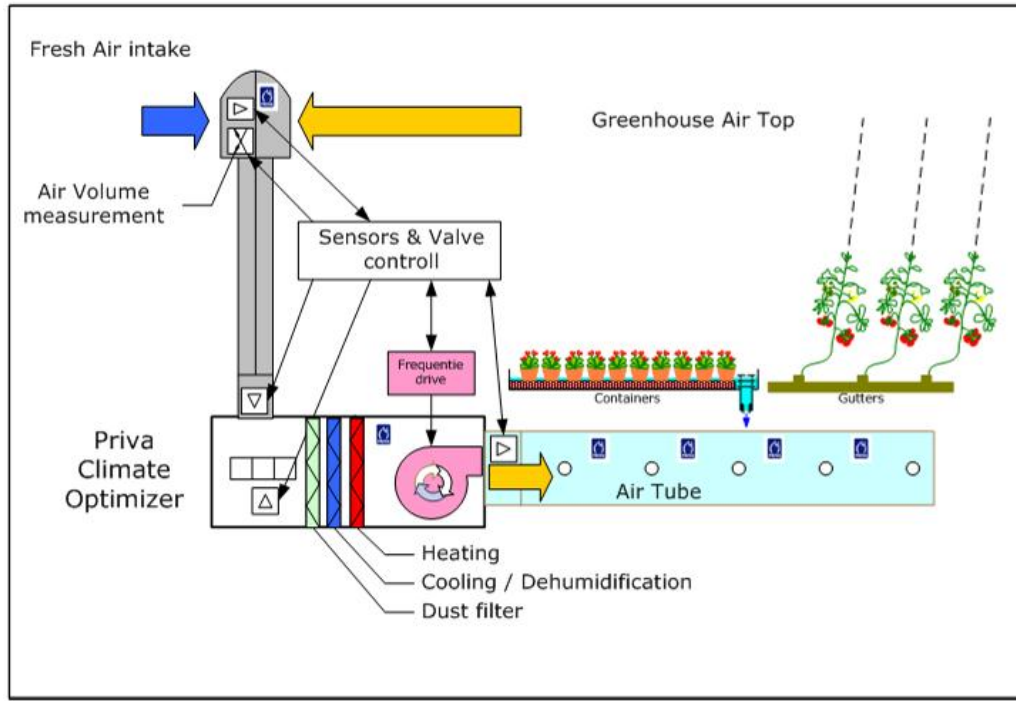
Figuur 22 De LBK is in de gevel geïntegreerd



Figuur 23 Luchtsturven onder de teeltgoten

#### 4.5 ClimateOptimizer

Figuur 24 geeft de ClimateOptimizer van Priva schematisch weer.



Figuur 24 Schematische weergave ClimateOptimizer

De ClimateOptimizers zijn in de kas nabij de gevel opgesteld (Figuur 25).



Figuur 25 De ClimateOptimizer is in de kas opgesteld

Het rooster voor aanzuig van buitenlucht is hoog in de gevel aangebracht. De aanzuig van de kaslucht bevindt zich op dezelfde hoogte, uiteraard in de kas.

Een wisselklep bepaalt de verhouding buitenlucht en recirculatielucht. De lucht gaat door een warmtewisselaar, waarmee kan worden verwarmd. De ventilator blaast de lucht in een toevoerslang. Het gatenpatroon van de verdeelslang is op maat berekend (Figuur 26). Daarbij moet worden gekozen tussen gelijkmatigheid in luchtverdeling of in warmteverdeling. In de



praktijk prevaleert een gelijkmatige luchtverdeling, zodat men de opwarming van de toevoerlucht beperkt, om thermische ongelijkmatigheid te voorkomen.

Elke ClimateOptimizer kan afzonderlijk worden voorzien van een regeling voor debiet en temperatuur. Een systeem met master en slaves is echter gebruikelijk, waarbij één LBK per afdeling leidend is en de overige volgend zijn.

Het toerental van de ventilator is terug te regelen tot 30%.



Figuur 26 Luchtsturven onder de teeltgoot

## 4.6 Overige systemen

Van een aantal leveranciers is geen informatie over hun systemen ontvangen. Deels is dit niet erg omdat het eigen varianten betreft van de voornoemde systemen. Enkele belangrijke systeemvarianten ontbreken echter:

- *Koelende systemen*  
Potplanten waaronder phalaenopsis, maar ook fresia en sla zijn voorbeelden van teelten met (perioden met) een duidelijke koelbehoefte. Door de uitbreiding van belichte teelten neemt ook hierbij de koelbehoefte toe. Aansluitend bij de teeltwijze kunnen verschillende varianten van luchtbehandeling worden toegepast;
- *Aircokas*  
Dit systeem zou onder andere worden geleverd door Wilk van de Sande;
- *ALS-systeem*  
Formflex levert een luchtbehandelingskast onder de naam ALS-systeem (Aircokas Luchtverdeel-systeem). Het zou gaan om een relatief goedkope variant warmtewisselaar die buitenlucht efficiënt zou voorverwarmen en via een luchtslang in de kas brengt. De ventilatiecapaciteit is 1,5 à 2,0  $\text{dm}^3/\text{s.m}^2$ . De verwarmingscapaciteit is circa 50  $\text{W/m}^2$ . Dit volstaat om de ventilatielucht circa 20 K op te warmen. Het systeem zou geen recirculatieoptie hebben, waardoor een mengsectie wordt uitgespaard.

### 4.6.1 Kaskoeling

Kaskoeling komt in verschillende varianten voor.

Verdampingskoeling door verneveling is een relatief eenvoudige uitvoeringsvorm. Het nadeel is dat de capaciteit beperkt is bij warme, vochtige buitencondities en gewassen met een hoge eigen vochtproductie. Ook neemt de kans op vochtschade aan het gewas toe. De voordelen zijn:

- het is een relatief goedkoop systeem;
- de luchtramen kunnen langer dicht blijven, zodat meer  $\text{CO}_2$  in de kas blijft;

- bij zonnig weer kan de relatieve vochtigheid hoog worden gehouden, zodat de plant maximaal CO<sub>2</sub> blijft opnemen (via maximaal geopende bladporiën).

Actieve koeling kan in uiteenlopende uitvoeringsvormen voorkomen. Afhankelijk van de opstelling van het gewas kan het bijvoorbeeld gaan om:

- kleine decentrale toestellen, die bovenin de kas worden opgehangen. Er zijn dan geen verdeelslangen nodig. Bovendien is een hoge plaatsing gunstig om effectief te koelen. Voor de lichtopbrengst kan deze plaatsing echter nadelig zijn;
- centrale toestellen per tralie met verdeelslangen. De verdeelslangen worden onder het gewas gehangen of bij volle grond gewas er tussen. In het laatste geval zijn de distributie en de uitblaascondities kritischer om gewasschade te voorkomen en zijn de slangen eventueel hijsbaar;
- centrale toestellen per teelttafel. De aanvoerlucht wordt van boven de teelttafels aangezogen via openingen tussen de tafels ter plaatse van de tussenliggende paden en onder de goten. De gekoelde lucht wordt verdeeld onder de teelttafels en door perforaties in de teelttafels geblazen. In de praktijk blijkt het niet eenvoudig te zijn om een gelijkmatige verdeling van de koeling te bereiken.

De verschillende opstellingen hebben geleid tot een discussie omtrent koeling bovenin of onderin. Koeling bovenin is efficiënter (koude valt vanzelf naar beneden en warmte ontstaat vooral bovenin door zon en belichting), maar het kan tot enkele procenten lichtopbrengst kosten.

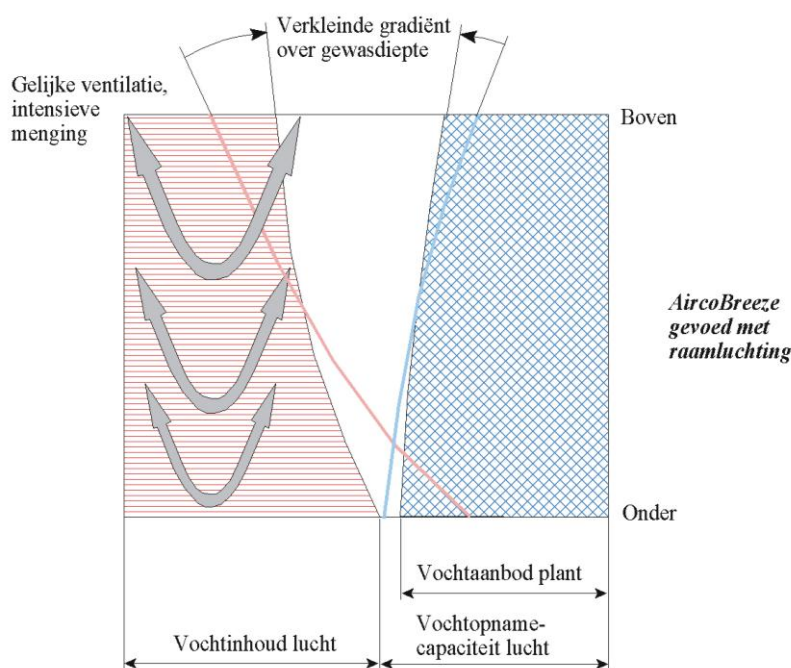
#### 4.6.2 *Aircokas*

Dit systeem is door Hoogendoorn ontwikkeld in samenwerking met WUR/PPO en diverse installateurs. Het betreft eigenlijk een vereenvoudigde uitvoeringsvorm van luchtbehandeling, waarbij maximaal gebruik wordt gemaakt van de reeds aanwezige voorzieningen (luchtramen, schermen en dek). Daarmee lijkt het een goede renovatievariant. Het systeem kenmerkt zich door:

- Vrijhangende verticale ventilatoren ('AircoBreeze').  
De ventilatoren hebben een parapluvormige, brede, radiale worp met een straal van circa 9 m. Ten behoeve van de typische brede worp zijn de schoepen speciaal gevormd. De specifieke capaciteit bedraagt circa 6,7 dm<sup>3</sup>/s.m<sup>2</sup>. Dit komt neer op een circulatievoud van circa 5 luchtwisselingen per uur.  
Onder de ventilator stijgt een luchtpluim op van aanzuiglucht uit de kas. Deze voedt circa  $\frac{3}{4}$  deel van de aanzuiging van de ventilator. De rest wordt van boven de ventilator aangezogen. Afhankelijk van de klimaattoestand gebeurt dit eventueel via kieren of speciale aanzuigopeningen in het scherm. Als de kaslucht te vochtig wordt, betreft de ventilator zo koelere en dus (absoluut gezien) drogere lucht van boven het scherm. In eerste instantie is die lucht droger doordat condensatie tegen het glas of op het scherm plaatsvindt en doordat via kieren al enige, onbewuste ventilatie van de ruimte boven het scherm optreedt. Volstaat dit niet, dan worden de luchtramen er bij geopend. Omdat ook de luchtafvoer via dezelfde luchtramen plaatsvindt, wordt van boven het scherm een mengsel van buitenlucht en afgevoerde (en afgekoelde) kaslucht betrokken. Hierbij wordt nog een deel kaslucht gemengd. De effectieve ventilatie via dit systeem is dus een fractie van  $\frac{1}{4}$  deel van de ventilatorcapaciteit, dus  $< 1,7$  dm<sup>3</sup>/s.m<sup>2</sup>. Als dit niet (meer) volstaat, worden de schermen en de raamluchting geopend. In dat geval gaan de ventilatoren normaliter uit. Uit het oogpunt van ventilatie-efficiëntie blijft het een variant met de karakteristieken en nadelen van Figuur 10. De inefficiëntie van deze ventilatiewijze wordt echter beperkt door de menging te vergroten. Hierdoor verminderen de gradiënten van de vochtinhoud (rode arcering in de figuur) en de relatieve vochtigheid (blauwe arcering). Figuur 27 illustreert dit. Metingen hebben laten zien dat de verticale ventilatoren bij dichte gewassen zoals

gerbera en matricaria ter plaatse van de bloemkoppen voor snelheden van circa 0,2 m/s zorgen, maar tussen het gewas loopt dit terug tot 0,05 m/s;

- Luchtbehandelingskasten voor het verwarmen, koelen en drogen van de kaslucht. De specifieke capaciteit ligt in de orde van grootte van 100 W/m<sup>2</sup>. De luchtbehandelingskasten worden verspreid over de kas geplaatst, in opstellingen zoals voornoemd (H 4.6.1). De koude wordt zo mogelijk via een warmtepomp betrokken uit een aquifer;
- Verneveling (zie ook H 4.6.1). Dit dient als verdampingskoeling in de situaties waarin dit uit het oogpunt van luchtvochtigheid mogelijk is. Hierdoor hoeft het gewas minder te worden beschaduwd, zodat in combinatie met hogere CO<sub>2</sub>-concentraties meer fotosynthese kan plaatsvinden;
- Plantsensoren. De regeling stelt de systemen dusdanig in dat de bladtemperatuur niet onder het dauwpunt van de kaslucht komt.



Figuur 27 Door een hoog circulatievoud beperkt de verticale ventilator 'AircoBreeze' het verloop van vochtigheid en temperatuur over de gewasdiepte, zodat onderin het gewas efficiënter wordt gedroogd dan met alleen raamluchting.

#### 4.7 Vergelijking kenmerken

Tabel 1 toont belangrijke kenmerken van de vijf LB-installaties. Hierbij worden de volgende opmerkingen gemaakt:

1. De gegevens betreffen per LB-installatie één specifieke toepassing. Voor een andere toepassing kunnen de kenmerken anders zijn;
2. Kosten zijn in de tabel niet opgenomen. Die zijn niet eenduidig door het projectspecifieke karakter. Bovendien is niet duidelijk welk deel aan de LB-installatie wordt toegerekend;
3. Opvallende verschillen zijn aangemerkt, die van belang zijn voor de binnencondities / het functioneren van de LB-installatie:
  - De verdeling van luchtslurven onder de teeltgoten (1 op 1 tot 1 op 5);
  - Het gatenpatroon in de luchtslurf (uitblaasrichting, aantal gaten, gatgrootte);
  - Al of niet combineren met hulpventilatie.

Tabel 1 Belangrijke kenmerken van de vijf LB-installaties

	<b>Covent</b>	<b>AVS</b>	<b>ClimecoVent</b>	<b>LekHabo</b>	<b>ClimateOptimizer</b>
Producent	Cogas	Van Dijk	Climeco	Lek	Priva
Teler	Vereijken	Improvement Centre	Steegh	Marjoland	Themato
Recirculeren	0% -100%	0% -100%	0% -100%	0% -100%	0% -100%
Luchtafvoer via LBK	nee	nee	ja	nee	nee
WTW	nee	nee	ja	nee	nee
Koelen/actief ontvochtigen	nee	nee	nee	nee	nee
Motorvermogen ventilator [kW]	0,98 (1,58 m <sup>3</sup> /s; 320 Pa)		7,5 (8,33 m <sup>3</sup> /s; 500 Pa)		2,76 (1,94 m <sup>3</sup> /s)
Regelbereik ventilator [%]	70	50		30	30
Plaatsing LBK	in gevel: 1 per tralie	buiten	buiten	in gevel: 1 per tralie	binnen
Aantal LBK's/ha	12		2,2		15
Ruimtebeslag [m <sup>2</sup> /LBK]	2		20		
Onderhoud LBK	buiten	buiten	buiten	buiten	binnen
Max. luchtstroom [dm <sup>3</sup> /s.m <sup>2</sup> ]	2,1 primair + 2,1 secundair	> 1,4	1,8	< 2,8	< 2,8
Slurven per LBK	1	≥ 1	18	6	1
Slurven/teeltgoten	1 op 5	1 op 1	1 op 1	1 op 1	1 op 5
Positie slurfgaten	15 voor 3	15 voor 3	10 voor 2	10 over half 4	15 voor 3
Lengte luchtslurf [m]	100 tot 150	130	160 tot 200	100	80
Diameter luchtslurf [mm]	460	?	400	?	440
Hulpventilatie	slurven onder teeltgoten (ook 1 op 5)	vrijhangende ventilatoren bovenin	nee	nee	nee
CO <sub>2</sub> -toevoer	nee	nee	ja	ja	nee
Regelparameter	RV kas		Δx		Δx
Meetparameters regeling	RV en T; bi en bu		RV en T; bi en bu		RV en T; bi en bu
Instelmogelijkheden inblaaslucht	RV en T		RV en T		

## 5 Bespreking

### 5.1 Nadere analyse

Belangrijke functies, waarvoor de luchtbehandelingssystemen worden ingezet, zijn:

- Gericht en gedoseerd ventileren ten behoeve van vochtafvoer;
- Beperken van lokale klimaatverschillen door circulatie;
- Activeren van het gewas door luchtbeweging.

#### 5.1.1 Ventilatie

De gespecificeerde maximale ventilatiecapaciteiten liggen tussen 1,4 en 2,8 dm<sup>3</sup>/s.m<sup>2</sup> maar uit de evaluatieprojecten blijkt dat in de praktijk niet boven 2 dm<sup>3</sup>/s.m<sup>2</sup> wordt geschakeld [*Ter indicatie: de overeenkomstige ventilatievouden verkrijgt men door deze getallen met 0,7 à 0,9 te vermenigvuldigen voor respectievelijke kashoogten van 5 en 4 m*]. Globaal worden ventilatievouden tot circa 1,5 luchtwisselingen per uur bereikt met de luchtbehandelingsinstallaties. Hiermee is het LB-systeem een basisvoorziening om ook bij grotere gewassen in het stookseizoen de luchtvochtigheid te beheersen. Het toevoeren van droge lucht nabij kritieke plaatsen onderin het gewas en het nivelleren van lokale pieken door het verbeteren van de circulatie dragen er toe bij dat de luchtbehandeling bij een lagere ventilatiecapaciteit dan met de luchtramen al toereikend is (de ventilatie-efficiëntie is hoger).

Bij milde, vochtige buitencondities zijn enkele malen hogere ventilatiecapaciteiten nodig om de vochtigheid in de kas te beheersen. Daarbij moet nog vaak worden gestookt. Het is zelfs zo dat het aandeel van ventilatie in de warmteverliezen juist in deze periodes in belangrijke mate wordt bepaald. Met de aanvullende raamluchting is de hogere ventilatie echter minder nauwkeurig te doseren. Voorts is de ventilatie-efficiëntie slechter en is warmteterugwinning met de raamluchting niet mogelijk. Vanuit dit oogpunt is het dus gewenst de hogere capaciteiten met de luchtbehandeling te realiseren. Dat vergt dan wel grotere investeringen. De vraag is echter gerechtvaardigd of het optimum bij de thans toegepaste capaciteiten ligt.

#### 5.1.2 Circulatie en luchtbeweging

Over het effect van de circulatie door de luchtbehandelingssystemen lopen de meningen uiteen. Uiteindelijk hebben de verschillende kampen allemaal een beetje gelijk; de snelheden zijn laag, maar de effecten zijn toch niet verwaarloosbaar.

Op basis van de bewegingsenergie die de systemen leveren in relatie tot de gewasweerstand kan al worden herleid dat geen hoge luchtsnelheden tussen het gewas zullen ontstaan, lokale effecten in de directe straal van uitgeblazen lucht daar gelaten. Metingen in proef- en evaluatieprojecten hebben dit ook bevestigd (Tabel 2).

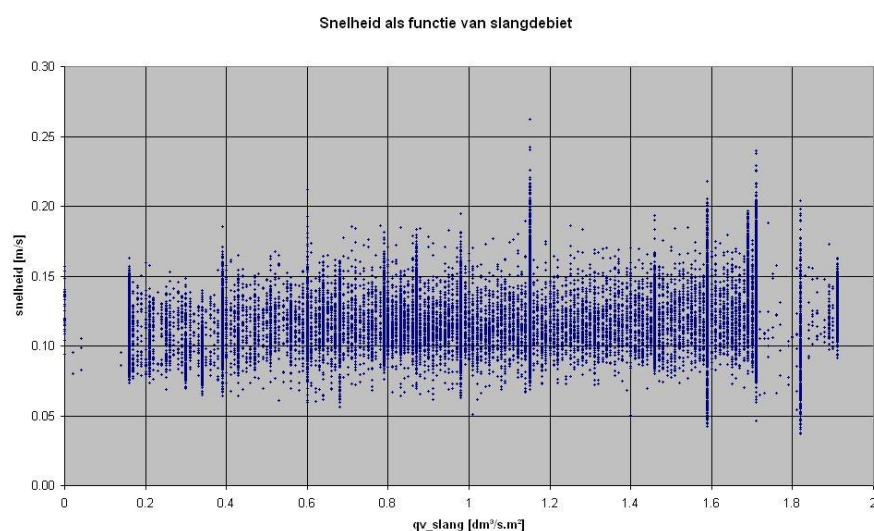
Niet alleen de luchtbehandeling maar ook de raamluchting en temperatuureffecten zorgen voor luchtbeweging (zie bijlage A). Door hun gecombineerde effect blijken de snelheden tussen een vrij open gewas als tomaat te kunnen oplopen tot 0,1 à 0,2 m/s. Er is geen sprake van dominantie van de luchtbehandeling op de luchtbeweging. Figuur 28 geeft hiervan een illustratie [ontleend aan referentie 3]. Uit Tabel 2 is af te leiden dat de debieten van de luchtbehandeling sterk moeten worden verhoogd om merkbaar hogere snelheden te bereiken.



De plaatselijke snelheidsverschillen kunnen groot zijn, vooral bij dichte gewassen. Bij gerbera of matricaria verloopt de snelheid in het gewas bijvoorbeeld van 0,2 m/s bovenin het gewas tot 0,05 m/s onderin.

Tabel 2 Overzicht gemeten luchtsnelheden tussen het gewas

PT project nr.	gewas	beluchting	debiet [dm <sup>3</sup> /s.m <sup>2</sup> ]	snelheid [m/s]	
				minimum	maximum
11699	tomaat	slangen	20	0,02	0,40
12635	paprika	verticale ventilatoren	9	nihil	0,20
13263	gerbera / matricaria	verticale ventilatoren	7	0,05	0,20
13412	tomaat	slangen	2	0,04	0,15



Figuur 28 Vergroten van de inblaas met luchtslangen leidt niet tot merkbaar meer luchtbeweging

Luchtsnelheden tot 0,2 m/s zijn door mensen niet of nauwelijks voelbaar. Toch hebben ze effect op het gewas. Door de snelheid van 0,05 naar 0,15 m/s op te voeren, kan de overdracht van vocht vanaf het gewas aan de lucht al verdubbelen. Dat is vooral belangrijk op de kritieke plekken lager in het gewas, waar weinig warmtestraling komt en dus een hogere relatieve vochtigheid heerst. Het uitblazen van de ventilatielucht onder of laag in het gewas is daarom ook het meest effectief.

Bij warmteproductie bovenin de kas door zon, restwarmte van lampen of hoge verwarming wordt de klimaatopbouw stabiel. Luchtbehandeling met uitblaas onderin de kas is niet in staat om de grotere temperatuurverschillen die dan ontstaan weg te werken. De extra warmte helpt echter wel om meer vocht in de lucht op te kunnen nemen. Verticale uitblaas van bovenaf, zoals met het systeem AircoBreeze, blijkt wel in staat temperatuurgradiënten over de hoogte te verkleinen. Het nadeel van dit systeem is dat het effect op de luchtbeweging onderin het gewas weer minder is. De positionering en uitvoering van de luchtbehandeling hangt dus duidelijk samen met het doel waarvoor men die wil inzetten.

Bij verwarming onderin of tussen het gewas zorgt de opstijgende warmte voor circulatie. Een voorbeeld hiervan is de minimum buis. Circulatie met behulp van luchtbehandeling kan aanvullend of als energetisch aantrekkelijke vervanging worden ingezet.

### 5.1.3 *Gewasactivering*

Voor het activeren van het gewas met luchtbehandeling geldt dat de betrekkelijk kleine snelheidstoename kennelijk een merkbaar effect hebben. Telers die wat langer met LB-systemen werken, durven met lichtere gewassen te gaan telen (minder stengels bij tomaten). Niet alleen de gewasverzorging kan worden beperkt (minder arbeidskosten). Doordat de plant met minder blad al voldoende vocht kwijt kan, wordt het gewas ook productiever (minder blad kweken en meer vruchten). Dit staat los van (komt bovenop) het blad plukken dat vanouds al plaatsvindt om het invangen van licht te verbeteren.

### 5.1.4 *Klimaatverschillen*

Horizontale klimaatverschillen hangen samen met het gebruik van grote, ruime kassen met goede scherming en stoken op lage temperatuur. De klimaatverschillen ontstaan onder invloed van een natuurlijke thermische wervel over de kaplengte. Die wervel wordt aangedreven door koude, die vanuit de luchtlaag boven het scherm in de kas dringt (Figuur 7). Luchtbehandeling kan in circulatiemodus die wervel en dus een inhomogeen klimaat bevorderen, doordat dan kaslucht in dezelfde richting wordt versleept. Uit analyses blijkt echter dat de bijdrage beperkt is. De bijdrage kan worden geëlimineerd door over de kaplengte heen en terug te blazen, zoals bij één van de systemen gebeurt.

Luchtbehandeling wordt ook gebruikt om horizontale klimaatverschillen te beperken. Dat kan door het systeem buitenlucht te laten toevoeren (ventilatiemodus). Omdat toevoer niet kan zonder een even grote afvoer, zal afgewerkte lucht via kieren in het scherm en het dek naar buiten overstromen. Die overstroom beperkt de uittrede van koude lucht van boven het scherm naar de kas en onderdrukt zo dus de thermische wervel die verantwoordelijk was voor de klimaatverschillen.

De 'prijs' voor een overmaat aan ventilatie als remedie is extra energieverlies en ongewenste droging. Daarom is het zaak de horizontale klimaatverschillen anderszins te beperken. In de eerste plaats moet men proberen dit passief te doen, bijvoorbeeld door zo dicht mogelijke schermen te gebruiken en door de kaplengte in secties te delen met gordijnen. Resultaten van eerste proeven hiermee laten zien dat zo de thermische wervel succesvol kan worden onderbroken.

De klimaatverschillen kunnen daarnaast ook actief worden weggewerkt. Dit kan door op koudere plekken naar verhouding meer te verwarmen. Eén van de aanbieders van luchtbehandeling werkt inmiddels aan zo'n regelmogelijkheid met behulp van een (gepatenteerde) vorm van instelbare naverwarming in de slang. Die naverwarming heeft nog als belangrijk energetisch voordeel dat de luchtslangen veel meer aan de verwarming kunnen bijdragen. Het totale VO gaat dan omhoog en het rendement van de rookgascondensor of warmtepomp kan daardoor aanzienlijk verbeteren. Verwarmen met de luchtslangen wordt tot op heden juist vermeden, omdat door een ongelijkmatige warmteverdeling via luchtslangen klimaatverschillen ontstaan. Het illustreert het belang van doorontwikkeling van de luchtbehandelingssystemen.

Naast horizontale klimaatverschillen treden er ook verticale klimaatverschillen op. Ze ontstaan vooral bij een verhoogde warmteafgifte bovenin de kas door zon of restwarmte

van verlichting. Hiervoor is al aangegeven dat de luchtcirculatie door slangluchting niet voldoende sterk is om zo'n stabiele temperatuuropbouw te doorbreken.

Een versterkte opwarming bovenin resulteert in een toenemend verticaal verloop van de relatieve luchtvochtigheid. Dit effect kan wel worden beperkt door de toevoer van droge ventilatielucht onderin het gewas met behulp van luchtslangen. Daarom is de inzet van luchtbehandeling ook in die situatie dus zinvol.

#### 5.1.5 *Energie*

Luchtbehandeling blijkt vooral nut te hebben voor de vochtbeheersing. De ventilatie kan beter worden gedoseerd dan met luchtramen en vertoont geen verloop over het kasoppervlak, zoals bij raamluchting.

Slangluchting is meer gericht op de kritische zone onderin het gewas en dus efficiënter. Anders gezegd, er kan met een gemiddeld hogere relatieve vochtigheid worden afgevoerd, zodat met minder lucht kan worden volstaan.

De effecten op het energiegebruik zullen positief zijn. Een bijkomend voordeel van minder ventilatie is dat gemiddeld hogere CO<sub>2</sub>-concentraties kunnen worden aangehouden, zodat de productie wordt bevorderd (de energiebehoefte per kg product wordt nog lager).

Door de ventilatielucht (bij koude buitencondities) niet meer via de luchtramen aan te voeren, kan (langer) met gesloten scherm(en) worden geventileerd. Wel vindt de afvoer nog plaats door overstrom van kaslucht via lekken in het scherm en het dek. Bij grotere afvoerstromen zouden de schermen en ramen in het dek hiervoor zelfs bewust op kieren moeten worden geopend (voor de toegepaste luchtstromen tot 2 dm<sup>3</sup>/s.m<sup>2</sup> wordt dit bij de huidige lekniveaus van kasdekken en schermen nog niet nodig geacht). De passerende afvoerstroom tast de isolerende werking van het scherm en dek aan. Bij het systeem van CoGas heeft men dit ondervangen door gevelramen toe te voegen. De schermfunctie kan zo langer en beter intact blijven (ook hier zal een deel als lekstroom door het dek ontwijken).

Door de betere vochtbeheersing met luchtbehandeling kan ook met dubbele schermen, dus intensiever worden geschermd, zonder nadelige gevolgen voor het gewas (zachte of gescheurde vruchten, schimmel).

Kortom, luchtbehandeling heeft tevens een positief effect op het energieverlies door transmissie.

Een enkele aanbieder past ook al warmteterugwinning op de luchtbehandeling toe. Globaal blijkt daarmee ongeveer de helft van de ventilatiewarmte te kunnen worden teruggewonnen. Het energetisch voordeel is duidelijk en zal moeten worden afgewogen tegen de meerkosten van deze optie.

Door de warmte-inhoud van de inblaaslucht en het warme buitenoppervlak van de luchtslangen kan het warmteafgevend oppervlak (VO) in de kas globaal worden verdubbeld. Dat biedt de mogelijkheid om dezelfde hoeveelheid warmte met een veel lagere temperatuur in de kas te brengen. Dit resulteert dan weer in een betere COP-waarde van de warmtepomp, een hoger rendement van de rookgascondensor of een betere benutting van rest- of omgevingswarmte.

Het is dan ook jammer dat de luchtslangen nauwelijks worden ingezet voor verwarming (afgezien van aanwarming van de ventilatielucht tot ruimtetemperatuur). Dit komt omdat men nog niet in staat is met luchtslangen zowel lucht als warmte gelijkmatig in de kas te brengen. De eerder genoemde ontwikkeling van naverwarming in de

luchtlangen gaat hierin hopelijk verandering brengen. De totale energiebesparing door luchtbehandeling kan dan nog verder toenemen.

In proefprojecten met CoGas (PT 13994), Climeco (PT 13562) en Priva (PT 13412) zijn al belangrijke besparingen behaald op de warmtebehoefte. De equivalente aardgasverbruiken per m<sup>2</sup> kas liggen rond of iets boven 30 m<sup>3</sup> a.eq. ofwel de besparing ligt tussen 8 en 12 m<sup>3</sup> a.eq. per m<sup>2</sup>. Gezien de voorgaande opmerkingen is nog een significante verdere besparing mogelijk.

Tegenover de verschillende besparingsposten staat een vergroot elektriciteitsverbruik door de ventilatoren. De proefprojecten geven indicaties:

- Het systeem van Priva bij Themato verbruikt circa 4 kWh/m<sup>2</sup>.a. Dit komt overeen met circa 1,2 m<sup>3</sup> aardgas(equivalenten);
- Het systeem van CoGas bij Vereijken verbruikt 7 kWh/m<sup>2</sup>.a (2,0 m<sup>3</sup> a.eq.). Dit is inclusief het verbruik van de additionele recirculatieventilatoren;
- Het systeem van Climeco bij Steegh verbruikt 10 kWh/m<sup>2</sup>.a (2,9 m<sup>3</sup> a.eq.). Hierbij is sprake van een hogere systeemweerstand door de toepassing van WTW.

Het energiegebruik voor elektra ligt dus in de orde van 10 tot 25% van de bereikte gasbesparing. Dit is een aanzienlijk aandeel. Door verdere optimalisaties (lage druk ontwerp en optimaler regeling) verwacht men de elektraverbruiken nog te kunnen verlagen.

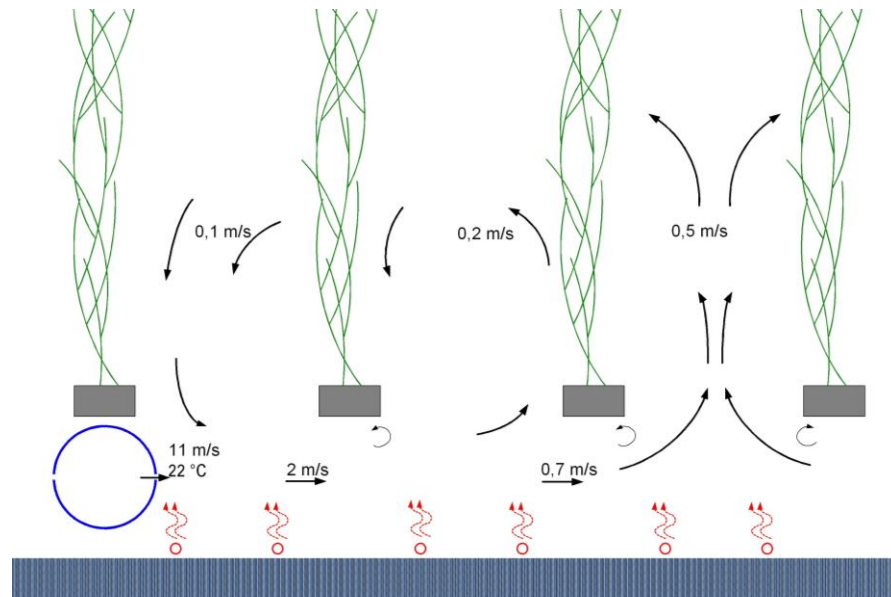
#### 5.1.6 *Slang- en gatverdeling*

Sommige aanbieders leggen een luchtslang om de vijf teeltgoten, anderen bij elke teeltgoot. Om de uitblaaslucht bij grotere afstanden tussen de slangen voldoende ver te laten reiken, zijn niet alleen grotere gaten maar ook hogere uitblaassnelheden nodig. De drukval in de luchtslang neemt daardoor toe. Omdat dit een beperkt deel is van de totale systeemdruk, zal het elektraverbruik beperkt oplopen. Daar staat een wat lagere investering tegenover, omdat met minder slangen kan worden volstaan, die overigens wel weer een grotere diameter moeten hebben.

Uit een vergelijking van de condities van de systemen van Priva en Climeco blijkt dat beide zo zijn ontworpen dat de worp (= straallengte waar de snelheid is afgenomen tot 0,2 m/s) circa 90% is van de afstand tussen de slangen (bijlage B). Zowel het systeem dat bij elke teeltgoot ligt als dat om de 5 teeltgoten ligt, is dus in staat de bijbehorende gewaszone geheel te bestrijken (mits correct ontworpen). Toch is er een verschil. De ingeblazen lucht zet omringende ruimtelucht in beweging. Hierdoor ontstaat een luchtwervel door het gewas (Figuur 29). De plaats en grootte van de wervel en het snelheidsverloop door het gewas variëren met het ingeblazen debiet. Bij inblazen om de vijf teeltgoten zijn de wervels en de daarin optredende variaties groter dan bij inblazen bij elke teeltgoot. Het beperken van verschillen in luchtbeweging tussen het gewas pleit dus voor het beperken van de afstand tussen de luchtslangen.

Alle aanbieders laten de slangen tweezijdig uitblazen. Dit kan horizontaal (kwart voor drie) maar ook iets omhoog (10 voor twee) of omlaag (tien over half vier). Daarachter liggen verschillende filosofieën omtrent de vorm van luchtwervels ten gevolge van de uitblaasstralen. Het gaat daarbij vooral om het zoeken naar de optimale benutting van de directe luchtbeweging van de straal, zeg maar het primaire effect. Figuur 29 illustreert al dat het hier niet om gaat. Veruit het grootste deel van het gewas heeft vooral baat bij de bewegingsenergie die wordt ingebracht en (door inductie) in een veel grotere zone doorwerkt, dus juist het secundaire effect. In de directe uitblaasstraal zijn

de luchtsnelheden zelfs dusdanig hoog dat schade aan het gewas aanneemelijk wordt. Het is dus zaak de lucht over een voldoende grote weglengte ongestoord uit te blazen alvorens deze bij het gewas komt. Om dit te bereiken, kan het afhankelijk van de geometrie, zinvol zijn bepaalde uitblaashoeken toe te passen. Vroegtijdig botsen van de luchtstralen tegen objecten moet worden voorkomen. Als men werkelijk effectief gericht wil beluchten, zal dit veel meer moeten worden benaderd vanuit de optiek van ventilatie-efficiëntie (zie het voorbeeld in H 3.2.3) en een optimaal microklimaat.



Figuur 29 Bij inblazen om de vijf teeltgoten kunnen grote plaatselijke verschillen ontstaan in de luchtbeweging tussen het gewas, die bovendien met het inblaasdebiet veranderen

De grootte en verdeling van uitblaasgaten in de luchtslang is bepalend voor een gelijkmatige luchtverdeling over de slanglengte. Door de weerstand van de slang zal de druk in de slang naar het einde toe afnemen. Hierdoor zal verder naar het einde van de slang minder lucht per gat worden uitgeblazen. Dit effect is sterker bij een kleinere verhouding tussen de slangdoorlaat ( $A_{\text{slang}}$ ) en de gezamenlijke doorlaat van de uitblaasgaten ( $A_{\text{gaten}}$ ). Bij een goed ontwerp compenseert men dit door de steek (= afstand tussen de gaten) of de diameter van de gaten naar het einde van de slang te laten toenemen. Dit is ruwweg nodig indien  $A_{\text{slang}} / A_{\text{gaten}} < 2$ . Des te krappere de slangdiameter des te groter verloop is er nodig. Ook als men dit optimaal uitvoert, zal bij schakelstanden die afwijken van de ontwerpstand de luchtverdeling toch weer gaan afwijken. Bovendien neemt bij krappere slangen het energiegebruik van de ventilator toe. Het is dus zaak de slangen niet te krap te dimensioneren.

Bepalend voor een goed slang- en gatontwerp zijn:

- een afdoende ventilatiecapaciteit zonder onnodig hoog drukverlies;
- een gelijkmatige verdeling van de ventilatielucht over het gewas, ook bij variatie van de ventilatorstand;
- voldoende bewegingsenergie voor een goede indringdiepte in het gewas;
- voorkomen van lokale gewasschade door directe aanblaas.

### 5.1.7 *Systeemitvoering*

Uitvoeringstechnisch zijn er wel kritiepunten. De luchtbehandelingssystemen hebben last gehad van de nodige kinderziekten. Zo zijn er verschillende problemen opgetreden met buitenluchtkleppen die lekten of dichtvroren. De meeste kinderziekten zijn inmiddels wel opgelost, maar een goede kwaliteitsbewaking blijft geboden.

De juiste uitvoering van de luchtslangen blijft een ander aandachtspunt. Om het ruimtebeslag te beperken, blijken alle beschouwde systemen zo krap te zijn ontworpen dat voor een gelijkmatige luchtverdeling een verloop van de gaten over de slanglengte noodzakelijk is. In de praktijk blijken de slangdelen met verschillende gatverdeling soms op de verkeerde plek te zijn gemonteerd.

### 5.1.8 *Werken met luchtbehandeling*

Door luchtbehandeling toe te passen, krijgt de tuinder er een extra stuurmogelijkheid bij. De potentie van een betere teeltbeheersing kan echter snel teniet worden gedaan door de grotere complexiteit die dit met zich meebrengt. Het blijkt dat de pioniers van deze systemen enkele jaren ervaring hebben moeten opbouwen, voordat ze tot duidelijke verbeteringen kwamen. Ook daarna ontwikkelt men nog nieuwe inzichten. De uitdaging is tweeledig:

- Aanzienlijk verkorten van de leercurve voor de volgers, bijvoorbeeld door betere instructies, begeleiding en kennisoverdracht;
- Sterk automatiseren van regelhandelingen door het inprogrammeren van meer intelligentie. Dit is een opdracht voor de regelfirma's. Evaluaties moeten beter worden geanalyseerd en omgezet in regelalgoritmen.

### 5.1.9 *Regeling*

Het is belangrijk de capaciteiten van de luchtbehandeling goed af te stemmen op de wisselende buitenomstandigheden, de gewascondities en de andere installaties. Ventilatie wordt gebruikt voor droging en wordt daarom geregeld op de vochtcondities binnen en buiten. Hiervoor wordt vaak slechts een enkele meetbox per afdeling gebruikt. Hierdoor is er te weinig oog voor zowel verticale als horizontale verschillen. Een beter beeld omtrent met name vochtkritische plaatsen is wenselijk, alsmede een meer daarop afgestemde dus per zone (per LBK) gedifferentieerde regeling. Ook is niet duidelijk of en hoe de afstemming op het gebruik van schermen en luchtramen plaatsvindt. Dat lijkt nu niet eenduidig en consequent. Dat geldt ook voor de behoefte aan luchtcirculatie, die systematisch dient te worden afgestemd op verschillen in vochtigheid en temperatuur door het gewas, alsmede het licht- en CO<sub>2</sub>-aanbod (gewasactivering bij fotosynthese).

De verwarmingsfunctie wordt nu veelal beperkt tot het aanwarmen van de buitenlucht tot de kastemperatuur. Dit kan worden verbeterd door te anticiperen op de warmte- of koudebehoefte in combinatie met de benodigde momentane droogcapaciteit.

Het is voorts aan te bevelen interrupties door de telers te monitoren. De kernvraag daarbij is wat de aanleidingen zijn om instelpunten van het systeem aan te passen. Vervolgens moet worden gekeken welke systematiek daaraan kan worden ontleend om de regeling te optimaliseren.

### 5.1.10 *Potentiële verbeteringen*

Luchtbehandeling heeft een groot aantal functies. Tot nu toe wordt maar een deel van die functies gebruikt en waarschijnlijk niet optimaal. Een aanzienlijk deel van de functies wordt niet of beperkt gebruikt.

Bij alle aanbieders wordt de luchtverdeel functie benaderd vanuit de traditie om per kap uniform te distribueren. Omdat er juist (ook) over de kaplengte klimaatverschillen optreden, is het de vraag of dit logisch is. Overweging van andere verdeelconfiguraties kan nieuwe perspectieven bieden voor bijvoorbeeld lokale naregeling. Ook de luchtdistributie bij grondgebonden teelten vergt nadere uitwerking.

De beschouwde aanbieders benutten het systeem voor zowel toevoer van buitenlucht als circulatie van kaslucht. Er zijn echter ook systemen die zich beperken tot alleen ventilatie. Hoewel met de luchtslangen geen dominante ruimtestromingen worden gegenereerd, is er toch sprake van een aanvullend effect. Hoe dit efficiënt kan worden ingezet zonder onnodig elektraverbruik, lijkt nader onderzoek waard. Dat geldt ook voor het combineren met andere uitvoeringen van luchtcirculatie.

De verbetermogelijkheden met verwarming van de lucht zijn al genoemd. Behalve voor de energie-efficiëntie lijkt dit mogelijkheden te bieden om klimaatongelijkheden te verminderen.

Slechts één van de aanbieders maakt nog maar gebruik van warmteterugwinning om extra energie te besparen. Voor een goede efficiëntie wordt terugwinning en benutting van het aandeel verdampingswarmte belangrijk geacht (het latente aandeel). Uit dit oogpunt is actieve ontvochtiging nader onderzoek waard. Vocht dat zo wordt afgevoerd, hoeft niet met ventilatie te worden afgevoerd. De condensatiewarmte die door ontvochtiging vrijkomt, kan worden teruggewonnen en gebruikt om de resterende ventilatielucht voor te warmen. Het toenemend gebruik van warmtepompen en warmteopslag maakt dit scenario realistisch. Wellicht is van zo'n combinatie van actieve ontvochtiging met verminderde ventilatie een efficiënte praktijkuitvoering te maken.

De koelfunctie van luchtbehandeling wordt wel al toegepast, maar blijkt ten aanzien van de verdeling nog wel voor verbetering vatbaar.

Het benutten van de filtratiemogelijkheden kan wellicht een belangrijke reductie van de plagendruk betekenen.

In hoeverre de dubbelfunctie van luchtbehandeling en CO<sub>2</sub>-dosering een vlucht zal nemen, valt te bezien. Er blijft een discrepantie in de gelijktijdigheid van deze functies.

### 5.1.11 *Resumé*

Luchtbehandeling blijkt vooral goed te scoren bij het gericht, efficiënter, beter gecontroleerd en gelijkmatiger ventileren. Dat is met het creëren van luchtbeweging vooral van belang voor een betere vochtbeheersing. De huidige LB-systemen zijn daarin geen jaar-rond oplossing. Ze behoeven in vochtige, minder koude perioden nog steeds aanvulling van de traditionele raamluchting.

De tweede nuttige functie is het creëren van luchtbeweging. Dit blijkt vooral van belang voor het activeren van het gewas, zodat de overdracht van vocht en CO<sub>2</sub> effectiever plaatsvindt. Tuinders die deze functie onder de knie krijgen, blijken productiever te kunnen telen. Voor het nivelleren van klimaatverschillen moet men echter geen hoge verwachtingen hebben. Daarvoor blijkt de opgewekte luchtbeweging onvoldoende dominant te zijn.

Ten behoeve van de energiezuinigheid kan luchtbehandeling in potentie meer scoren dan het aandeel dat nu door de efficiëntere ventilatie wordt bereikt. Een enkele aanbieder gaat al verder door warmteterugwinning uit ventilatielucht toe te voegen. Verdere kansen liggen er ten aanzien van efficiënter (laag-thermisch) verwarmen, vermindering van het elektriciteitsverbruik en gecombineerd actief ontvochtigen en ventileren. Er lijken zelfs mogelijkheden te zijn om het probleem van toegenomen klimaatongelijkheid in moderne kassen met luchtbehandeling weg te werken.

Om deze functies optimaal te kunnen benutten, dient intelligentie te worden ontwikkeld waarmee de systemen beter automatisch worden aangestuurd. Daarin schieten de regelsystemen thans nog tekort. De instellingen worden nu nog teveel op gevoel bepaald door de tuinder.

## **5.2 Aanzet voor keuzecriteria**

Het onderzoek heeft laten zien dat LBI goede mogelijkheden kunnen verschaffen om het kasklimaat, de energiezuinigheid en de teeltresultaten te verbeteren. Alleen is onvoldoende helder welke systeemspecificaties nu precies aan goede LB-systemen moeten worden gesteld.

Voor welke variant van welke aanbieder moet de tuinder kiezen, gegeven zijn gewas en teeltvoorkeuren?

En wie zal zeggen met welke aanpassingen het systeem nog (veel) beter kan presteren?

Het vervolg van dit onderzoek zal zich daarom moeten richten op wat de tuinder nodig heeft om het juiste systeem te kunnen kiezen. Uiteindelijk zou men hiervoor eenduidige beoordelingscriteria willen hebben en specificaties af willen leiden. Op grond hiervan dienen de prestaties van de te kiezen systemen van tevoren al te zijn vastgesteld middels een prestatiekeuring.

Als een eerste aanzet is bijlage C opgesteld. Tabel 6 in die bijlage geeft een overzicht van de hoofdelementen van een luchtbehandelingsinstallatie voor een kas met een specificatie van de relevante aspecten. Vooral in het ontwerpstadium en bij de ontwikkeling van LBI kan het een rol spelen als controlelijst.



## 6 Conclusies en aanbevelingen

De belangrijkste functies waarvoor luchtbehandelingssystemen in kassen worden ingezet, zijn:

- Gericht en gedoseerd ventileren ten behoeve van vochtafvoer;
- Beperken van lokale klimaatverschillen door circulatie;
- Activeren van het gewas door luchtbeweging.

In het afvoeren van vocht en activeren van het gewas voegen de systemen duidelijk functionaliteit toe. De invloed op het reduceren van klimaatverschillen is echter beperkt.

De ventilatiecapaciteiten van de onderzochte systemen blijken ruwweg een factor 2 te variëren. Bij geen van de systemen is de capaciteit afdoende om een jaar-rond oplossing te bieden. In vochtige, minder koude perioden is daarom nog steeds raamluchting nodig.

De circulatiecapaciteit is bij 3 van de 5 beschouwde systemen gelijk aan de ventilatiecapaciteit van de luchtbehandeling. Eén systeem kan het dubbele circuleren door toevoeging van luchtslangen met hulpventilator. Bij een andere variant zijn vrij hangende ventilatoren toegevoegd, die overigens nauwelijks worden gebruikt.

De verwarming van de luchtbehandelingssystemen wordt vrijwel uitsluitend ingezet voor het op kastemperatuur brengen van de ventilatielucht. De inzet als verwarming wordt beperkt om geen klimaatongelijkheid met de luchtbehandeling te veroorzaken.

De luchtbehandelingssystemen dragen uitsluitend bij aan energiebesparing door de efficiëntere ventilatie. Slechts één van de luchtbehandelingssystemen is daarnaast uitgerust met warmteterugwinning. Hier laat men besparingsmogelijkheden liggen.

Het goed bedienen van de luchtbehandelingssystemen vergt nu nog een (te) lang leertraject. De instellingen worden nu nog teveel op gevoel bepaald door de tuinder. Hier ligt duidelijk een taak voor de regelfirma's om een intelligente, geautomatiseerde regeling te ontwikkelen, die dit kan overnemen.

## 7 Referenties

- [1] Gelder, A. de e.a.  
Luchtcirculatie en productie.  
Wageningen, PPO, publicatie nr. 41616052.2, april 2006 (PT-project 11699).
- [2] Raaphorst, M. en J. Voermans  
Monitoring ClimecoVent-systeem in de praktijk.  
Bleiswijk, WUR, Rapport GTB-1032, september 2010 (PT-project 13562).
- [3] Knoll, B. en P. de Jong  
Klimaatmetingen in een tomatenkas met aanvullende luchting onder het gewas. Climate Optimizers bij Themato.  
Delft, TNO, rapport TNO-060-DTM -2011-0350, februari 2010 (PT-project 13412).
- [4] Kriegel, B.  
Fallströmungen für Abkühlungsflächen in Gebäuden und mögliche Schutzmaßnahmen.  
Berlijn, 1973.

### Overige geraadpleegde literatuur

- Raaphorst, M. e.a.  
Energiezuinige vochtregeling onder gesloten scherm. Gebruik van AircoBreeze met dubbele schermen.  
WUR rapport 251, april 2009.
- Weel, P. van en J.B. Campen  
Aircokas, een middel om meer CO<sub>2</sub> in de kas te houden en de verdamping te sturen.  
WUR poster.
- Gieling, Th.H. e.a.  
Monitoring technische systemen in semi-gesloten kassen.  
WUR, Rapport GTD-1008, 2010.
- Desmedt, J. e.a.  
State of art geconditioneerd telen.  
Vito 2009/ETE/R/017, IWT contract nr. 070570, september 2009.
- Raaphorst, M.  
Het Nieuwe Telen bij Vereijken.  
WUR rapport GTB-1097, 2011 (PT-project 13994).

### Rapporten van PT projectnummers:

- 11085 - Energiebesparend droogstoken in tuinbouwkassen
- 11699 - Luchtcirculatie, kasklimaat en productie [1]
- 11931 - Ontvochtiging van kassen met bestaande technieken uit de utiliteitsbouw
- 12393 - Microklimatisering door temperatuurstratificatie
- 12417 - Gecontroleerde vochtafvoer bij schermen door kaspoventilatie
- 12635 - Verbeteren van verticaal temperatuurprofiel in een Aircokas

- 12733 - Praktijkproef mechanische vochtafvoer
- 12889 - Analyse Aircokas bij fresia
- 12938 - Condensatie aan het kasdek: voorkomen of bevorderen?
- 13232 - Toepassing van koeling op groei en ontwikkeling van roos
- 13263 - Ventilatievoud, de praktijk (AircoBreeze)
- 13264 - Klimaat bij de 'kas zonder gas'
- 13412 - Het Nieuwe Telen Climatizer bij Themato [3]
- 13487 - Klimaatbeheerssysteem grondgebonden teelt
- 13562 - Het Nieuwe Telen ClimecoVent in de praktijk [2]
- 13564 - Het Nieuwe Telen economische haalbaarheid
- 13565 - Monitoring geconditioneerde rozenteelt
- 13991 - Kasklimaat en efficiëntie OPAC
- 13994 – Het Nieuwe Telen bij Vereijken

Folder HNT Steegh

Folder LekHabo LT-systeem

Presentatie studiedag Artemis okt 2007

Presentatie expertdag PT 2010

Websites van:

- Climeco
- Cogas
- Van Dijk
- Formflex
- Hoogendoorn
- LekHabo
- Priva
- Wilk van der Sande

Diverse artikelen uit:

- Onder Glas
- Groenten en Fruit
- Vakblad voor de Bloemisterij
- Proeftuinnieuws

## 8 Ondertekening

Delft, 30 december 2011

Afdelingshoofd

Auteur

## A Beschouwing luchtbeweging

Een luchtbehandelingssysteem is niet de enige oorzaak van luchtbeweging in de kas. Daarvoor zorgt een groot aantal bronnen. In hun onderlinge competitie is het LB-systeem veelal niet dominant. Hoe groot de rol van luchtbehandeling globaal is, wordt hier aan de hand van een nadere beschouwing geïllustreerd.

De resulterende luchtbeweging volgt uit een balans van de bewegingsenergie of impuls.

De impuls die voor luchtbeweging zorgt in de kas is afkomstig van:

- kinematische impuls van de onderbeluchting (luchtslangen);
- kinematische impuls van de raamluchting;
- thermische impuls van de buisverwarming;
- thermische impuls van de luchtslangen;
- thermische impuls van het koude dek of scherm;
- thermische impuls van de ingestraalde zonnewarmte.

Voor het hierna uitgewerkte rekenvoorbeeld is uitgegaan van gegevens van de semigesloten kas van Themato [3]. In het klimaatonderzoek in deze kas zijn ook metingen van de luchtsnelheid verricht, waaraan kan worden getoetst.

### Kinematisch

#### *Slangen*

Elke slang heeft over zijn lengte van 85 m twee rijen van 133 gaten met een diameter van 26 mm. Het oppervlak van een gat is 5,3 cm<sup>2</sup> en van alle gaten per slang 0,1413 m<sup>2</sup>. Er ligt één slang per tralie, dus om de 8 m kasbreedte. Een slang bestrijkt dus een kasoppervlak van 680 m<sup>2</sup>.

Typische uitblaassnelheden via de gaten zijn  $v_{40} = 2$  m/s,  $v_{60} = 6$  m/s en  $v_{90} = 11$  m/s (bij respectievelijke ventilatorstanden 40, 60 en 90%).

Er geldt:

$$\text{impuls} = \text{massa} \times \text{snelheid} = m \times v$$

Per tijdstap  $d\theta$  is dus:

$$\text{impuls} = q_m \times d\theta \times v = q_v \times \rho \times d\theta \times v$$

Daarin is  $q_m$  de massastroom,  $q_v$  de volumestroom en  $\rho$  de soortelijke massa.

Voor de volumestroom  $q_v$  geldt:

$$q_v = \mu \times A \times v$$

Daarin is  $\mu$  een insnoeringsfactor (voor gaten  $\mu = 0,65$ ) en  $A$  het (gat)oppervlak.

Per slang is de impuls dus evenredig met  $\mu \times A_{\text{gat,tot}} \times v_{\text{uit}}^2$ .

Met  $\mu \times A_{\text{gat,tot}} = 0,65 \times 0,1413 = 0,0918$  geldt per m<sup>2</sup> kas:

- Bij  $v_{40}$  is de impuls evenredig met  $0,0918 \times 2^2 / 680 = 0,000540 \text{ m}^4 \cdot \text{s}^{-2}$
- Bij  $v_{60}$  is de impuls evenredig met  $0,0918 \times 6^2 / 680 = 0,004862 \text{ m}^4 \cdot \text{s}^{-2}$
- Bij  $v_{90}$  is de impuls evenredig met  $0,0918 \times 11^2 / 680 = 0,016343 \text{ m}^4 \cdot \text{s}^{-2}$

Er wordt uitgegaan van behoud van impuls:

$$A_{\text{gat,tot}} \times v_{\text{uit}}^2 = A_{\text{kas}} \times v_{\text{kas}}^2$$

Dit betekent voor de gemiddelde luchtsnelheid op 1 m<sup>2</sup> kasoppervlak:

- Bij  $v_{40}$  is de snelheid 0,02 m/s
- Bij  $v_{60}$  is de snelheid 0,07 m/s
- Bij  $v_{90}$  is de snelheid 0,13 m/s

Deze waarden gelden, uitgaande van geen verlies aan bewegingsenergie. In werkelijkheid zal een fors deel van de bewegingsenergie verloren gaan door wrijving aan gewas, constructie, bodem, scherm, dek, e.d.. De luchtsnelheden ten gevolge van de uitblaas uit de slangen zullen daardoor in werkelijkheid naar schatting in de orde van

grootte van enkele tientallen procenten van de voornoemde waarden bedragen en sterk verlopen afhankelijk van de plaats ten opzichte van de luchtslang en het gewas.

*[Merk op dat het slangdebiet van 1,5 dm<sup>3</sup>/s per m<sup>2</sup> kasoppervlak bij de 90% stand slechts overeenkomt met een gemiddelde uniforme stijgsnelheid van 0,0015 m/s over het kasoppervlak in plaats van de voornoemde (fractie van ) 0,13 m/s. Het berekenen van de gemiddelde luchtsnelheid uit de impuls leidt tot beduidend hogere en meer correcte waarden doordat de energie van de ingeblazen lucht een veelvoud aan kaslucht in beweging zet.]*

#### Luchtramen

In de winter staan de luchtramen veelal dicht. Als er wordt geventileerd, gebeurt dit via de luchtslangen. Daarbij kan “aan lijszijde” een kiertje open staan om de mechanisch toegevoerde lucht te laten overstromen. De tegenoverliggende ramen (“aan loefzijde”) worden pas geopend als er meer sprake is van voorjaarscondities (mildere temperaturen en zon). Pas in dat geval treden er toevoerstromen via de ramen op, die de luchtbeweging in de kas beïnvloeden (van afvoer via de luchtramen is de invloed nihil). Met behulp van een ventilatiemodel waren de luchtstromen bij verschillende raamopeningen globaal berekend. Bij gemiddelde condities (gemiddelde drijvende krachten) is hieruit nu de impuls door de raamluchting berekend en de daaruit volgende luchtbeweging per m<sup>2</sup> kasoppervlak (Tabel 3). Ook hier is de luchtbeweging in de kas nog niet gecorrigeerd voor wrijvingsverliezen in de kas.

Tabel 3 Impuls door geopende kasramen en daaruit afgeleide luchtbeweging in de kas

raamstand	10%	30%	100%
netto raamdoorlaat intrede $A_i$ [m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]	0,0076	0,0228	0,0760
gemiddelde intredesnelheid $v_i$ [m/s]	0,66	0,66	0,66
impuls $A_i \times v_i^2$ [m <sup>4</sup> /s <sup>2</sup> .m <sup>2</sup> ]	0,00329	0,00987	0,03291
gemiddelde kassnelheid $\sqrt{(A_i \div 1 \times v_i^2)}$ [m/s]	0,06	0,10	0,18

De luchtbeweging door de open ramen wordt behalve door kinematische krachten ook door thermische krachten bepaald. Relatief zwaardere, koude lucht zal een bepaalde valsnelheid ontwikkelen. Onder het luchtraam zal een uitwaaiende luchtstraal ontstaan met daarin lokaal verhoogde luchtsnelheden. Door bijmenging met omgevingslucht zal de luchtsnelheid afnemen naarmate de luchtstraal verder in de ruimte komt. Figuur 30 illustreert dit voor een typische voor- of najaars situatie met 10% geopende kasramen en 12 K temperatuurverschil tussen de kas en buiten. De figuur is bepaald met het TNO-programma ‘Straal’.

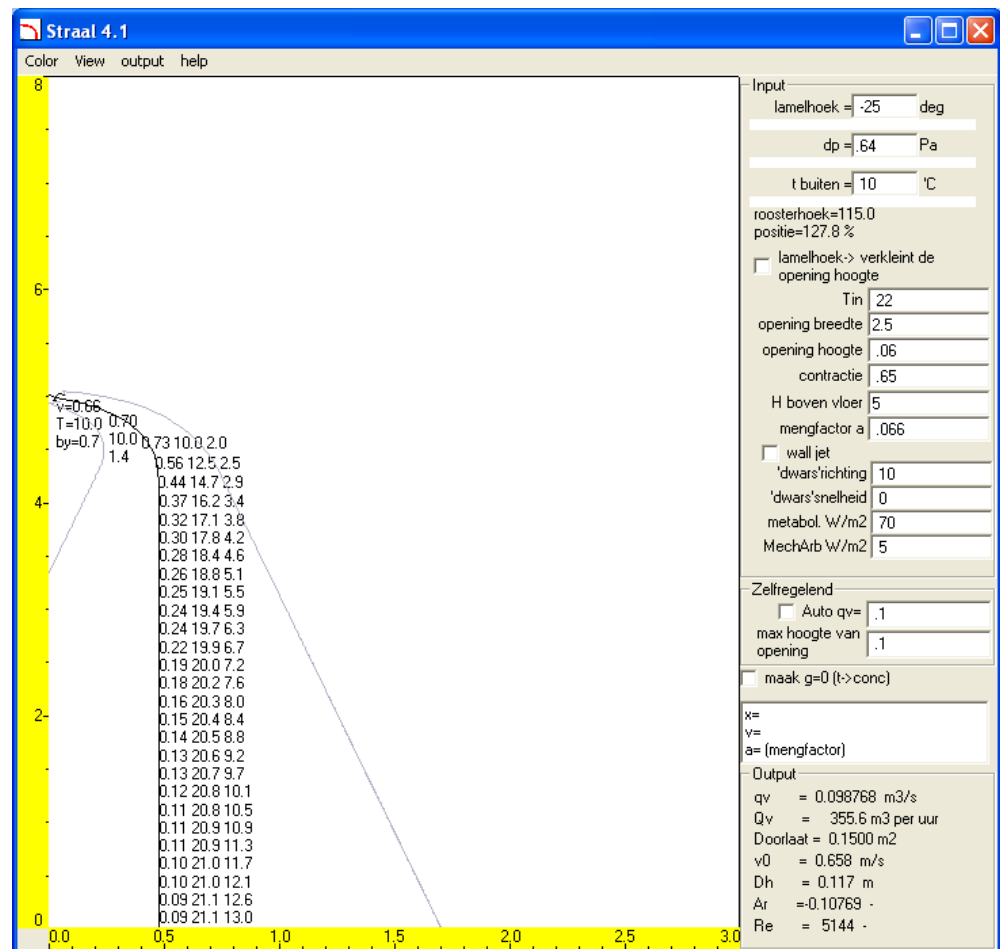
Op vergelijkbare wijze zijn de luchtsnelheden bepaald bij 30% raamopening en  $\Delta t = 7$  K en bij 100% raamopening en 3 K temperatuurverschil. De snelheden die daarbij in de luchtstraal onder het kasraam ontstaan, zijn ter vergelijking opgenomen in Tabel 4.

Figuur 30 laat zien dat per luchtraam in de kas een luchtstroom van ruim 11× de toevoerstream van 0,1 m<sup>3</sup>/s in beweging wordt gezet met een snelheid van circa 0,11 m/s. De totale impuls hiervan is  $11 \times 0,1 \times 0,11 = 0,121$  m<sup>4</sup>/s<sup>2</sup> op een kasoppervlak van 20 m<sup>2</sup>. De specifieke impuls is 0,006 m<sup>4</sup>/s<sup>2</sup>.m<sup>2</sup>, wat ongeveer 2× groter is dan de waarde die uit alleen de kinematische energie volgt. Door de combinatie van intredesnelheid en ondertemperatuur zal de gemiddelde snelheid in de kas dus circa  $\sqrt{2}$  groter worden, ofwel 0,08 m/s in plaats van de genoemde 0,06 m/s. Tabel 4 vermeldt deze waarde, evenals de snelheden in de kas bij twee andere raamstanden.

De snelheid in de kas bij de raamstand van 100% zal overigens nog aan de hoge kant zijn, omdat zo'n raamstand voornamelijk wordt ingezet bij hoge zonbelasting. De zonstraling op de hogere bladlagen zorgt dan voor een stabiele, gelaagde klimaatopbouw, waardoor de luchtbeweging in de kas wordt afgeremd (zie ook de paragraaf hierna over het thermisch effect van de zon).

Tabel 4 Luchtsnelheden in de kas [m/s] door luchtramen bij drie raamstanden

raamstand	10%	30%	100%
gemiddelde uit alleen intredesnelheid	0,06	0,10	0,18
lokale piek onder kasraam	0,24	0,60	0,77
uit intredesnelheid en ondertemperatuur	0,08	0,15	0,28



Figuur 30 Luchtstraal onder het luchtraam bij 10% raamopening.  $T_{kas} = 22^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{bu} = 10^{\circ}\text{C}$ . De drie getallen langs de kern van de luchtstraal geven respectievelijk de luchtsnelheid [m/s], temperatuur [ $^{\circ}\text{C}$ ] en bijmenging van kaslucht op die positie.

Het valt op dat ondanks de veel grotere ventilatiestromen door de kasramen de daardoor ontstane luchtbeweging in de kas slechts circa  $2\times$  groter is dan van de luchtslangen. Dat heeft te maken met de beduidend lagere intredesnelheden die door de natuurlijke drijvende krachten worden veroorzaakt.

### Thermisch

Een typische warmteafgifte van de buizen tijdens de winterperiode is 43 W/m<sup>2</sup>.  
 Een typische warmteafgifte van de slang tijdens de winterperiode is 7,5 W/m<sup>2</sup>.  
 Een typische warmte-instraling door de zon tijdens de winterperiode is 30 W/m<sup>2</sup> als etmaal gemiddelde en gemiddeld 83 W/m<sup>2</sup> als er zon is. Dat kan in het voor- of najaar oplopen naar een etmaal gemiddelde rond 120 W/m<sup>2</sup> tot wel 600 W/m<sup>2</sup> in de zomer.

### *Buizen*

Boven de warme ø51 mm buizen ontstaat een stijgstream. In een typisch voorbeeld is de buistemperatuur 36°C en de kaslucht 15,5°C. Dit temperatuurverschil van 20,5 K zorgt voor een opwarming van de stijgstream van circa  $2/3 \times \Delta t$ , dus ongeveer 13,8 K. In deze voorbeeldsituatie geeft de buis 38,5 W/m af.

Er geldt  $P = q_{v,st} \times \rho \times c_p \times \Delta t$ .

De stijgstream  $q_{v,st}$  is dus  $38,5 / (13,8 \times 1,2 \times 1) = 2,33 \text{ dm}^3/\text{s.m}$  of  $0,00233 \text{ m}^3/\text{s.m}$ .

De stijgstream snoert in boven de buis tot circa  $0,6 \times$  de buisdiameter. De stijgstream gaat dus door een doorsnede van  $0,6 \times d_{buis} \times 1 = 0,0306 \text{ m}^2$  per m buislengte.

De stijgsnelheid direct boven de buis is dus ongeveer  $0,00233 / 0,0306 = 0,076 \text{ m/s}$ .

Uitgaande van behoud van impuls ( $A_{buis} \times v_{buis}^2 = A_{kas} \times v_{kas}^2$ ) betekent dit een gemiddelde luchtsnelheid van 0,015 m/s op 0,8 m<sup>2</sup> kasoppervlak (= het kasoppervlak per m buis).

In een andere benadering wordt uitgegaan van de totale thermiek. Voor de warme lucht die over een hoogte  $d_h$  boven de buis opstijgt, geldt:

$$\Delta p_{th} = d\rho/dT \times g \times (T_{stijg} - T_{kas}) \times \Delta h$$

Hierin is  $d\rho/dT = 0,0043 \text{ kg/m}^3\text{.K}$  en  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ .  $(T_{stijg} - T_{kas}) = 13,8 \text{ K}$  direct boven de warme buis (zie hiervoor). Omdat de warme, opstijgende lucht vrij kan uitwaaien, is na een kleine stijghoogte  $d_h$  de breedte van de stijgstream toegenomen en de opwarming  $d(T_{stijg} - T_{kas})$  afgenomen (er is omringende, koelere lucht bijgemengd).

Uitgaande van bijvoorbeeld een tophoek van 32° van de opstijgende luchtpluim, verbreedt de pluim zich met  $2 \times \text{tg}(32/2) \times d_h$ . Als wordt aangenomen dat de pluimtemperatuur evenredig afneemt met de pluimbreedte, kan per elementje  $d_h$  de pluimtemperatuur  $T_{stijg}$  worden bepaald, tot de pluim zo breed is geworden dat deze de hele doorsnede vult. De hoogte waarop dit gebeurt is de totale stijghoogte  $\Delta h$ . Met het gemiddelde temperatuurverschil  $(T_{stijg} - T_{kas})$  over deze hoogte kan dan het thermische drukverschil  $\Delta p_{th}$  worden berekend. In ons voorbeeld blijkt dit 0,037 Pa te zijn.

Anderzijds geldt  $1/2 \Delta p_{th} = \zeta \times 1/2 \times \rho \times v_{th}^2$

Bij een gewasweerstand  $\zeta$  van 5 is de gemiddelde circulatiesnelheid in de kas  $v_{th}$  dan 0,078 m/s. [Er wordt aangenomen dat de luchtstroom in de helft van de doorsnede stijgt en in de andere helft daalt. De totale bewegingsenergie van stijg- en daalstroom wordt door de thermische impuls geleverd].

De warme buis genereert dus over de hele kasdoorsnede een luchtbeweging in de orde van 0,015 tot 0,078 m/s.

Bij een meer traditionele verwarming wordt vooral in de winter op hogere temperaturen gestookt. Uit een berekening voor dergelijke condities blijkt dat de luchtbeweging in de kas door de warme buis dan kan oplopen tot 0,14 m/s.



*Glasdek*

Uit het transmissieverlies  $P_{tr}$  wordt de temperatuur van het (glas van het) dek afgeleid of de temperatuur van het (onderste) luchtscherm, indien dit is gesloten.

In een kas zal het warmteverlies door het glas of scherm globaal voor de helft door convectie en voor de helft door straling tot stand komen. De convectieve term resulteert in een luchtstroom  $q_{v,c}$  die als volgt verband houdt met het convectieve deel van het transmissieverlies:

$$\frac{1}{2} P_{tr} = q_{v,c} \times \rho \times c_p \times (T_c - T_{kas})$$

Tevens geldt voor de vallende luchtstroom:

$$\Delta p_{th,c} = 0,0043 \times 9,81 \times (T_c - T_{kas}) \times \Delta h$$

Dit drukverschil  $\Delta p_{th,c}$  is met inachtneming van de gewasweerstand om te rekenen in een gemiddelde valsnelheid  $v_{th,c}$  via:

$$\Delta p_{th,c} = \zeta \times \frac{1}{2} \times \rho \times v_{th,c}^2$$

Hier wordt de valsnelheid beschouwd in een doorsnede die overeenkomt met de afmetingen van de beschouwde kasruit.

Met deze formules kan uiteindelijk  $q_{v,c}$  worden geraamd, waarna vervolgens met  $v_{th,c}$  de impuls van de koudeval van het dek kan worden afgeleid.

Een andere benadering is met behulp van benaderingsformules voor de grenslaagdikte en valsnelheid langs koude (glas)vlakken van Kriegel [4]. Hiermee kan direct de impuls van de koude vallende lucht worden bepaald, als functie van de raamafmetingen en glastemperatuur.

Bij een Venlo-dek met een kapbreedte van 4 m is de raamhoogte 1 m. dit is de hoogte  $H_{val}$  waarover de koudeval zich ontwikkelt.

Stel de buitentemperatuur  $T_{bu}$  op  $0^\circ\text{C}$  en de kastemperatuur  $T_{kas}$  op  $20^\circ\text{C}$ .

De glastemperatuur  $T_{glas}$  is dan ongeveer:

$$T_{glas} = T_{bu} + \frac{1}{3} \times (T_{kas} - T_{bu}) = 6,7^\circ\text{C}$$

Per m kaplengte valt over een halve kap een koude luchtstroom [ $\text{g/s.m}$ ] ter grootte van:

$$q_m = 7,6648 \times (T_{kas} - T_{glas})^{0,366} \times H_{val} - 1,119 \times (T_{kas} - T_{glas})^{0,3754}$$

Invulling levert een waarde  $q_m = 16,34 \text{ g/s.m}$ .

Met een soortelijke massa van  $1,23 \text{ g/dm}^3$  komt dit overeen met  $q_v = 13,28 \text{ dm}^3/\text{s.m}$ .

Deze luchtstroom valt over de halve kapbreedte en 1 m kaplengte dus in  $2 \text{ m}^2$  kas. De specifieke vallende luchtstroom is dus  $q_{v,s} = 6,64 \text{ dm}^3/\text{s.m}^2$ .

De laagdikte  $D_{val}$  [cm] van de vallende koude lucht volgt uit:

$$D_{val} = 17,482 \times (T_{kas} - T_{glas})^{-0,1188} \times H_{val}^{0,7053}$$

Invulling levert een waarde  $D_{val} = 12,63 \text{ cm}$  ofwel  $0,1263 \text{ m}$ .

Per m kaplengte treedt dus een luchtstroom van  $13,28 \text{ dm}^3/\text{s}$  uit een doorsnede van  $0,1263 \times 1 \text{ m}^2$ . De gemiddelde snelheid waarmee de koude lucht valt na de ruit is dus:

$$v_{val} = 13,28 / 1000 / 0,1263 = 0,105 \text{ m/s}$$

De impuls van de koudeval is per  $\text{m}^2$  kasoppervlak evenredig met  $q_{v,s} \times v_{val}$ . Uit het behoud van impuls geldt dat dit gelijk moet zijn aan  $A_{kas} \times v_{kas}^2$ . Er geldt dus:

$$v_{kas} = \sqrt{(q_{v,s} \times v_{val} / 1)}$$

Invulling levert een gemiddelde luchtbeweging van  $0,026 \text{ m/s}$  in de kas ten gevolge van koudeval.

### Zon

Intredende zonnearmte valt op de bovenste bladlagen en wordt daar deels omgezet in een verhoging van de luchttemperatuur en deels benut voor vochtverdamping door de planten. Een eerste indicatie is dat circa de helft van de zonnearmte als voelbare warmte vrijkomt.

De bladlagen waarop de zon valt, vullen vrijwel het gehele kasoppervlak. Als eerste benadering wordt daarom de zonnearmte als egaal verdeeld beschouwd. Tevens wordt aangenomen dat de warmte in de bovenste halve meter gewas vrijkomt. Dit laatste betekent dat (bij hoog opgaand gewas) de stijghoogte van de zonnearmte beperkt is. Bij hoge zonlast is de kans groot dat er een relatief warme luchtlaag bovenin ontstaat. De temperatuur in de bovenlaag  $T_{\text{boven}}$  is een equilibrium van de voelbare fractie van de binnenkomende warmtestroom door de zon  $I_{\text{zon}} \times ZTA$ , de warmteafvoer door ventilatie  $q_{\text{vent}} \times \rho \times c_p \times (T_{\text{boven}} - T_{\text{bu}})$ , het transmissieverlies door het dek  $U_{\text{dek}} \times (T_{\text{boven}} - T_{\text{bu}})$  en de warmte-uitwisseling aan de onderkant van de laag met koelere lucht die er langs strijkt door convectie  $\alpha_{\text{lucht}} \times (T_{\text{boven}} - T_{\text{kas}})$  en door luchtuitwisseling  $q_{\text{uitw}} \times \rho \times c_p \times (T_{\text{boven}} - T_{\text{kas}})$ . Hierin is  $q_{\text{uitw}}$  de uitwisselende volumestroom per  $\text{m}^2$  kasoppervlak (eigenlijk een uitwisselingssnelheid). Uit een korte, nadere analyse blijkt dat de convectieterm vrijwel verwaarloosbaar is.

Oplossing van het equilibrium levert dan voor de temperatuur in de bovenlaag, mits deze hoger is dan de temperatuur in de rest van de kas:

$$T_{\text{boven}} = (1/2 \times I_{\text{zon}} \times ZTA / \{ (q_{\text{vent}} + q_{\text{uitw}}/2) \times \rho \times c_p + U_{\text{dek}} \}) + T_{\text{bu}}$$

Daarbij is aangenomen dat de temperatuur tussen het gewas ongeveer het midden houdt tussen de buitentemperatuur en de temperatuur in de bovenlaag.

Een stabiele warme luchtlaag wisselt slecht uit met lucht eronder en remt de uitwisseling. Door turbulenties zal echter altijd een minimale uitwisseling optreden. In de ‘open ramen formule’ die TNO voor inpanidige luchtuitwisseling hanteert, wordt hiervoor gerekend met  $v_{\text{uitw}} = 0,025$  m/s. Hiervan kan in eerste instantie worden uitgegaan (dus  $q_{\text{uitw}} = 0,025$   $\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ ). In de kas wordt de uiteindelijke uitwisseling mede bepaald door de luchtbeweging ten gevolge van de luchtslangen en buisverwarming. Het zal dus in werkelijkheid een bepaalde fractie zijn van de hiervoor afgeleide luchtsnelheden.

Bij een stabiele warme luchtlaag is er sprake van ‘omgekeerde thermiek’, die wordt bepaald door de temperatuurverhoging en de zakhoogte:

$$\Delta p_{\text{th}} = 0,0043 \times 9,81 \times (T_{\text{boven}} - T_{\text{kas}}) \times \Delta h_z$$

Dit drukverschil  $\Delta p_{\text{th}}$  is met inachtneming van de gewasweerstand om te rekenen in een gemiddelde potentiële stijgsnelheid  $v_{\text{th}}$  via:

$$1/2 \Delta p_{\text{th}} = \zeta \times 1/2 \times \rho \times v_{\text{th}}^2$$

De stabiele luchtopbouw blijft intact, zolang deze snelheid hoger is dan de valsnelheid van koudere intredende lucht door de kasramen of ten gevolge van koudeval.

Uitgevoerde berekeningen met deze formules laten zien dat bij zomerse condities (buitentemperaturen rond de gewenste kastemperatuur) ondanks 100% geopende kasramen vanaf circa 400  $\text{W}/\text{m}^2$  zonlast een stabiele temperatuuropbouw kan worden verwacht.

Eerder bleek dat met slangluchting ongeveer de helft van de luchtbeweging kan worden verwacht van open kasramen. De luchtslangen zullen daarom alleen bij lage zonbelastingen (tot rond 100  $\text{W}/\text{m}^2$ ) de competitie kunnen aangaan met de stabiele opbouw door de zon. Anders gezegd, de luchtslangen kunnen dus maar tot een matige zonlast bijdragen aan nivellering van de warmte.

Bij voor- en najaarscondities zijn de buitentemperaturen lager. De zonnewarmte zal dan al voor een belangrijk deel door ventilatie en transmissie verloren gaan en dus beter kunnen worden beheerst. Tegelijk zullen ook de kasramen minder ver worden geopend (de ventilatie worden beperkt). Een stabiele thermische gelaagdheid zal dan dus minder voorkomen, maar ook minder worden aangetast door de intredende lucht.

Als de temperatuur in de bovenlaag minder wordt dan de kastemperatuur dan zal een thermisch gedreven stroming op gang komen, waardoor de temperaturen worden genivelleerd. De temperatuur in de bovenlaag kan voor die omstandigheden worden berekend met:

$$T_{\text{boven}} = \{ \frac{1}{2} \times I_{\text{zon}} \times ZTA + qv_{\text{uitw}} \times \rho \times c_p \times T_{\text{kas}} + (qv_{\text{vent}} \times \rho \times c_p + U_{\text{dek}}) \times T_{\text{bu}} \} / \{ (qv_{\text{uitw}} + qv_{\text{vent}}) \times \rho \times c_p + U_{\text{dek}} \}$$

De luchtuitwisseling tussen de bovenlaag en het kasdeel daaronder  $qv_{\text{uitw}}$  hangt samen met het temperatuurverschil daar tussen. Er stelt zich een evenwicht in, dat wordt bepaald door de sterkte van de thermisch gedreven circulatiestroom. Er geldt:

$$qv_{\text{uitw}} = \sqrt{ \{ 0,0043 \times 9,81 \times (T_{\text{boven}} - T_{\text{kas}}) \times \Delta h_z / (\zeta \times \rho) \}}$$

Iteratief volgt hieruit de resulterende waarde van  $T_{\text{boven}}$  c.q. de specifieke luchtstroom die tussen de lagen wordt uitgewisseld  $qv_{\text{uitw}}$ . Omdat dit een luchtstroom is per  $m^2$  kasoppervlak is de waarde gelijk aan de gemiddelde lichtsnelheid in de kas  $v_{\text{uitw}}$ . De warmtestroom door de uitwisseling tussen de lagen  $qv_{\text{uitw}}$  bepaalt tevens de benodigde verwarming om de temperatuur in de kas  $T_{\text{kas}}$  te handhaven.

In een typische voor- of najaarssituatie met  $10^\circ\text{C}$  buiten,  $100 \text{ W/m}^2$  zon,  $70 \text{ W/m}^2$  verwarming en  $5 \text{ dm}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$  ventilatie is de luchtbeweging bijvoorbeeld  $0,12 \text{ m/s}$ .

In een typische wintersituatie met  $0^\circ\text{C}$  buiten,  $30 \text{ W/m}^2$  zon,  $110 \text{ W/m}^2$  verwarming en geen bewuste ventilatie is de luchtbeweging bijvoorbeeld  $0,14 \text{ m/s}$ .

### Overzicht

Van de voornoemde bijdragen aan de luchtbeweging wordt in onderstaande tabel een overzicht gegeven. Uit dit overzicht blijkt dat de luchtslangen bij geen van de drie seizoenssituaties een dominante rol spelen.

Tabel 5 Overzicht bijdragen aan de luchtbeweging in de kas bij 3 typische buitencondities. De waarden geven globale lichtsnelheden in de kas in  $\text{m/s}$ .

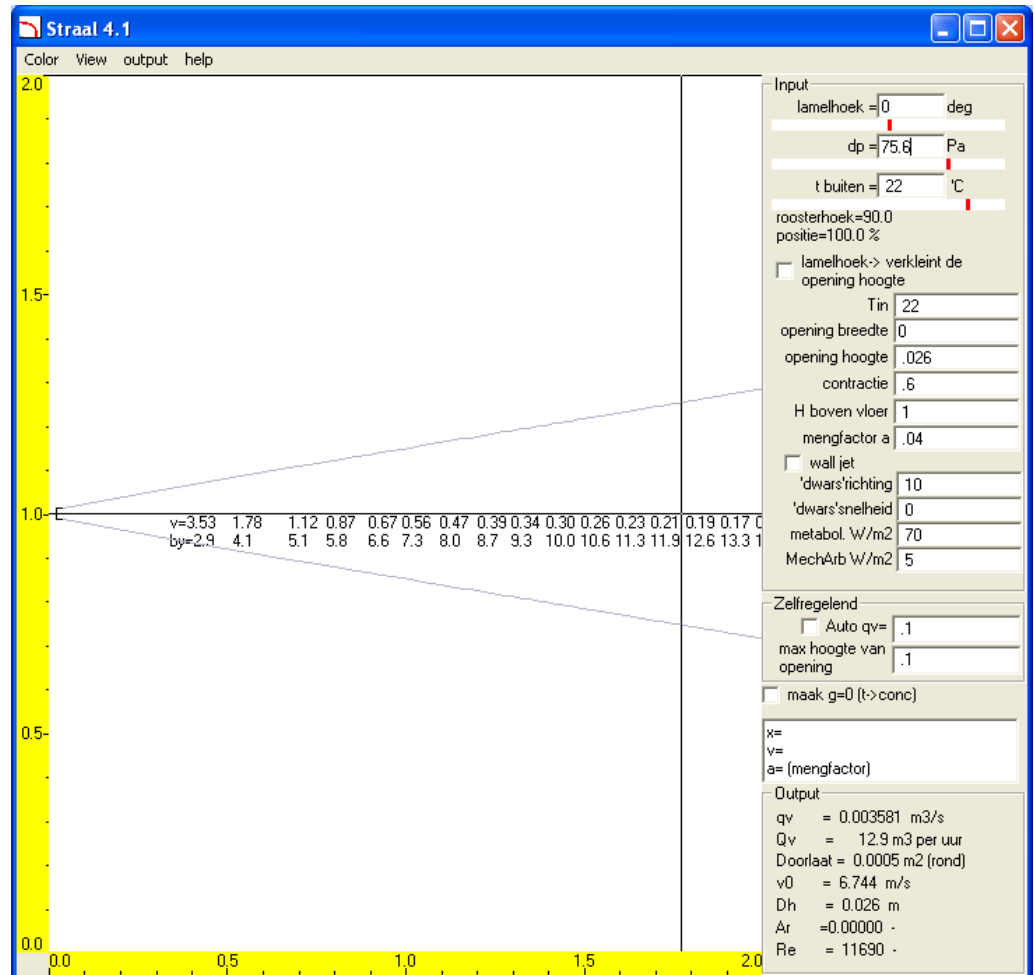
	winter	voor-/najaar	zomer
uitblaas luchtslang	0,07 – 0,13	0,07 – 0,13	0,13
warmte luchtslang	n.v.t. <sup>1</sup>	n.v.t.	nihil
raamluchting	nihil	0,08 – 0,15	0,28
buisverwarming	0,14	0,02 – 0,08	nihil
dek/scherm	0,03	0,02	nihil
dek + zon	0,14	0,12	-0,18 <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Met luchtslangen wordt niet of nauwelijks verwarmd

<sup>2</sup> De negatieve snelheid representeert de remmende werking van de warme luchtlaag bovenin

## B Worpcndities bij 2 slanguitvoeringen

Worp Priva Climate Optimizer bij Themato = 90% van steek luchtslangen



Priva

Dgat 26 mm

Nrijen 2

Dslang 500 mm

Aslang 0.196 m<sup>2</sup>

Lslang 85 m

Steek\_slang 4 m slanguitblaas

L [m]	n	steek [mm]	Dspleet [mm]	Aspec [mm/m <sup>2</sup> ]	qvspec [dm <sup>3</sup> /s.m <sup>2</sup> ]	qv gat [dm <sup>3</sup> /s]
85	133	639	0.83	0.415	2.8	3.58

L\_overnloei 2.14 m

L\_overnvl/worp 1.07 >1 dus vrije ronde stralen

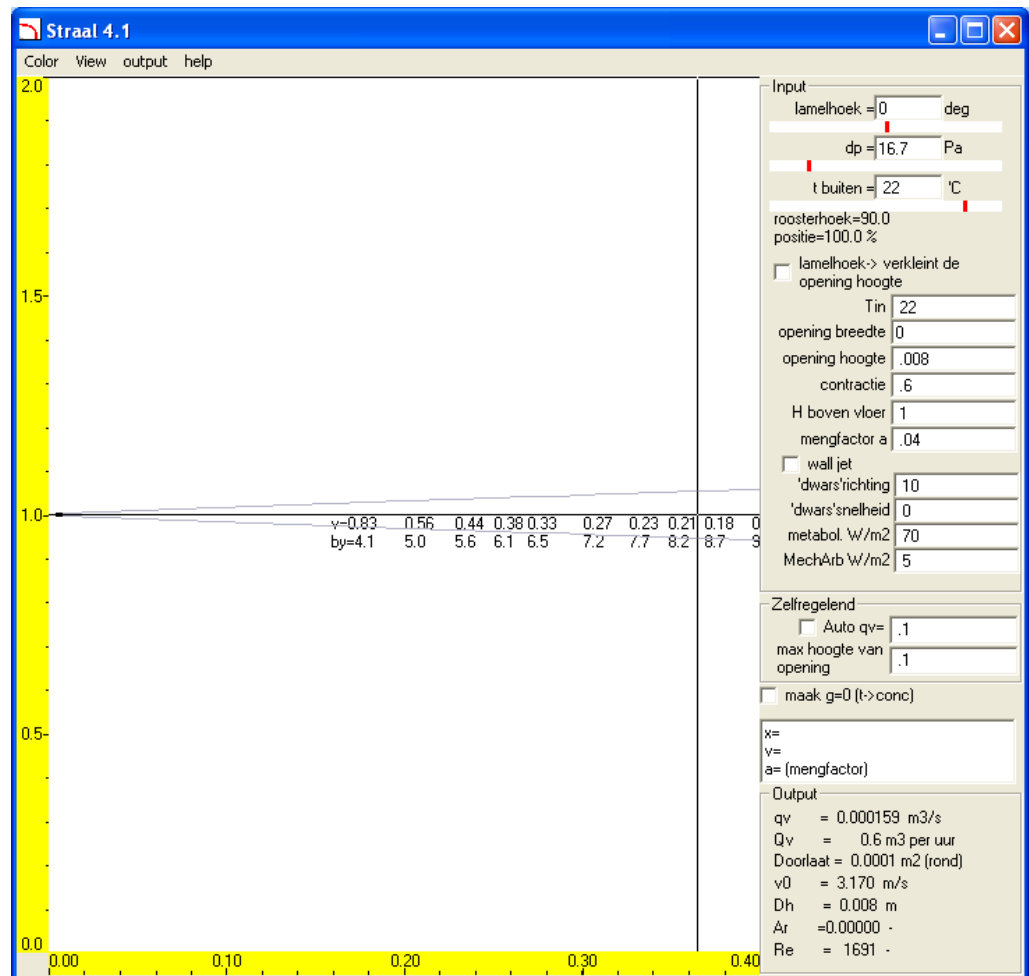
Agaten 0.141 m<sup>2</sup>

Aslang/Agaten 1.39

v\_gat [m/s]

6.7

Worp Climeco bij Steegh = 90% van steek luchtslangen



Climeco

Dgat 8 mm

Nrijen 2

Dslang 400 mm

Aslang 0.126 m<sup>2</sup>

Lslang 160 m

Steek\_slang 0.8 m

L [m]	n	steek [mm]
-------	---	------------

24	188	255
----	-----	-----

17.6	146	241
------	-----	-----

24	214	224	slanguitblaas
----	-----	-----	---------------

94.4	900	210	Dspleet [mm]	Aspec [mm/m <sup>2</sup> ]	qvspec [dm <sup>3</sup> /s.m <sup>2</sup> ]	qvgat [dm <sup>3</sup> /s]
------	-----	-----	--------------	----------------------------	---	----------------------------

160	1448	221	0.23	0.569	1.8	0.159
-----	------	-----	------	-------	-----	-------

L\_overnloei 0.74 m

L\_overnvl/worp 1.85 >1 dus vrije ronde stralen

Agaten 0.073 m<sup>2</sup>

Aslang/Agaten 1.73

v\_gat [m/s]

3.2

## C Overzicht systeemaspecten luchtbehandeling

Tabel 6 geeft een overzicht van de hoofdelementen van een luchtbehandelingsinstallatie voor een kas met een specificatie van de relevante aspecten. Daaraan voorafgaand worden eerst randvoorwaarden van kas en gewas opgesomd. Daarna volgen de specificaties van de toestelconfiguratie en vervolgens zijn hoofdelementen. Die zijn min of meer geordend in de doorstroomrichting van de lucht (alleen de afvoerventilator is gerubriceerd bij de nadere ventilatoren).

Tabel 6 Overzicht van hoofdelementen van een luchtbehandelingsinstallatie met zijn relevante aspecten

hoofdelement	aspect 1	aspect 2	aspect 3	aspect 4	aspect 5
<b>kas-eigenschappen</b>	vrije stromingshoogte	onder			
		boven			
	schermtype	enkel- of meervoudig			
		vast of beweegbaar			
		luchtdoorlaat (anticondens)			
	verwarming	boven			
		tussen gewas			
		onder			
	raamluchting	één luchtmechaniek			
		loef en lij onafhankelijk			
	vrij hangende mengventilatoren	horizontaal blazend			
		verticaal blazend			
bevochtiging	hoge druk verneveling				
bodembedekking	folie				
<b>gewas-eigenschappen</b>	grootte gewas	hoog gewas			
		laag gewas			
	gewasweerstand	dicht gewas			
		open gewas			
	emissie / uitwisseling gewas	LAI			
	bladtype				
<b>toestel-configuratie</b>	toestelplaats	binnen de kas			
		buiten de kas			
	verdeling over de kas	repeterend (bijv. alle aan de gevel)			
		versprongen (bijv. om en om voor/achter)			
	diffuus (gelijkmatig door hele kas)				
<b>buitenaanzuig</b>	afdichting				
	isolatie				
	afsluitbaarheid				
	regendichtheid				
<b>leiding buitenaanzuig</b>	doorlaat / luchtweerstand				
	isolatie				
	condensopvang				

<b>aanzuig retour kaslucht</b>	positie	centraal				
		verdeeld				
	aanzuighoogte					
	doorlaat / luchtweerstand					
<b>kleppensectie</b>	aanwezig	bereik mengverhoudingen				
		lektheid				
	afwezig	ventilator toevoer en circulatie onafhankelijk	overstort met trekonderbreking			
		ventilator toevoer en circulatie gekoppeld	gesloten overstort			
<b>filter</b>	vangefficiëntie					
	weerstand					
	standtijd					
<b>WTW-blok</b>	rendement / aandeel herwonnen	warmte / koude				
		vocht				
	bypass- mogelijkheid	warmte	volledig			
				deels (parallel)		
			weerstandverandering			
	luchtweerstand	condensgevoeligheid (afvoerszijde)				
<b>toevoer-ventilator</b>	capaciteit	ontwerpdebiet				
		regelbereik debiet				
		schakeling	hoog / laag / uit			
			meer standen			
			traploos			
	opvoerhoogte					
<b>circulatie-ventilator</b>	afwezig / via toevoerventilator					
	aparte ventilator aanwezig	capaciteit	ontwerpdebiet			
			regelbereik debiet			
			schakeling	hoog / laag / uit		
				meer standen		
				traploos		
	opvoerhoogte					
<b>afvoer-ventilator</b>	afwezig	natuurlijke overstort	luchtramen en lekken dek	hand geregeld		
				overdrukregeling		
	aanwezig	capaciteit	ontwerpdebiet			
			regelbereik debiet			
			schakeling	gekoppeld aan toevoer		
				onafhankelijk van toevoer	hoog / laag / uit	
					meer standen	
					traploos	
	opvoerhoogte					

		stroomverbruik	per schakelstand		
<b>warmte-wisselaar</b>	plaats	voor slang (voorverwarming)			
		in slang (naverwarming)	getrapt		
			continu		
	ontwerp-temperaturen waterzijdig	traditioneel (60-50°C)			
		lage temperatuur			
	verwarmings-capaciteit	isotherm (tot kasttemperatuur)			
		bijverwarming			
		hoofdverwarming			
	koelcapaciteit	isotherm (tot kasttemperatuur)			
		topkoeling			
		hoofdkoeling			
	ontvochtigings-capaciteit				
	pompcapaciteit				
	luchtweerstand				
	regelbaarheid	aan/uit			
		getrapt			
		traploos			
<b>luchtverdeler</b>	roosterornament	uitblaas	alzijdig radiaal		
			vlak	éénzijdig	
				meerzijdig	
		dimensies			
		drukval			
		uitblaascondities			
	slang	aantal slangen per kap			
		dimensies	lengte		
			diameter		
			gatdiameter		
			steek		
		positie t.o.v. gewas	er onder		
			er tussen		
			er boven		
		drukval	verloop luchtverdeling		
			totale luchtweerstand		
		uitblaascondities	richting / hoek		
			snelheid		
			worplengte		
	verdeling	lucht	ongelijkmatig		
			gelijkmatig		
		warmte / koude	ongelijkmatig		
			gelijkmatig		
			compenserend		
<b>regeling</b>	regelgrootheden	ventilatordebiet	toevoer van buiten	droging	
			afstemming op luchting	temperatuur-beheersing	
			afvoer naar buiten	overdruk, WTW-modus	
			circulatie kaslucht	gewasactivering, klimaatnivellering	



		doorlaat overstort	afstemming op toevoer van buiten	overdruk	
		stand mengkleppensectie	verhouding toevoer/circulatie		
		WTW en bypass	warmtebehoefte		
		temperatuur inblaaslucht	warmte- en droogbehoefte		
		vochtigheid inblaaslucht	droog-, vocht- of koelbehoefte		
	sensoren	meetboxen in kas	beheersing gradiënten		
		toestelvoelers	naregeling per toestel		