

Meerlagenteelt 2.0

Een nieuw basisontwerp

Jeroen Wildschut¹, Bas Speetjens², Jouke Campen² en Henk Gude¹

¹: PPO-Bloembollen, ²: WUR-Glastuinbouw

© 2014 Wageningen, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V.

Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V. is niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen die kunnen ontstaan bij gebruik van gegevens uit deze uitgave.

Dit project is uitgevoerd in opdracht van en gefinancierd door de partijen in de Stuurgroep Schone en Zuinige Bloembollen / Meerjarenafspraak energie Bloembollen (KAVB, PT, min.EZ, RVO.nl (voorheen Agentschap NL) en telers).



Projectnummer: 32 361 681 13

Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V.

Bloembollen, Boomkwekerij & Fruit

Adres : Prof. Van Slogterenweg 2
: Postbus 85, 2160 AB Lisse
Tel. : 0252 - 462121
Fax : 0252 - 462100
E-mail : info.ppo@wur.nl
Internet : www.ppo.wur.nl

Inhoudsopgave

pagina

SAMENVATTING.....	5
1 INLEIDING	7
2 WERKWIJZE.....	7
3 RESULTATEN	9
3.1 Rookproeven	9
3.2 Systeembeschrijving	13
3.3 Klimaatbeheerssystemen.....	14
3.4 Energieverbruik	16
3.5 Capaciteit.....	19
4 BASISONTWERP	23
5 INVESTERINGSRUIMTE	25
6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	27
BIJLAGE 1: MODELOPZET	29
BIJLAGE 2: BIJEENKOMST MEERLAGENBROEIERS	31

Samenvatting

In de praktijk wordt meerlagenteelt op zeer uiteenlopende manieren uitgevoerd: er wordt gebroeid op stilstaand water of op eb/vloed systemen, de bedekkingsgraad varieert van 1,25 tot 3 lagen, belichtingsregimes verschillen, etc.. Er wordt ook verschillend ontvochtigd: van traditioneel stoken met het raam open tot ontvochtigen met gedoseerd aangezogen buitenlucht die met slurven de kas ingebracht wordt. Het kasklimaat blijkt soms (m.n. op de bovenlaag) lastig te beheersen.

Doel van het project Meerlagenteelt 2.0 is om een verbeterd basisontwerp te ontwikkelen met als resultaat een beter benutte teeltruimte en een nog lager energieverbruik. Hiermee wordt de kostprijs verlaagd. Door een betere beheersing van het teeltklimaat wordt uitval door o.a. kiepers voorkomen.

Op vier meerlagenteeltbedrijven met ontvochtigingssystemen met slurven zijn met debietmetingen en kunstmatige rook de luchtstromen in de kas onderzocht. Dit liet zien dat over de gehele lengte van de slurven per gaatje evenveel lucht naar buiten komt. Deze lucht komt direct tot *in* het gewas. Daarna volgt een beweging omhoog, tussen de containerbanen door. De luchtbeweging boven de bovenste laag is horizontaal en wordt bepaald door de klepstand van de luchtbehandelingskast (LBK) en de ventilatorstand.

Na oriënterende brainstromsessies met onderzoekers van PPO Bloembollen en WUR-Glastuinbouw en met meerlagenbroeiers is op basis van simulatiemodellen het kasklimaat onder verschillende omstandigheden en bij verschillende basisontwerpen doorgerekend. Uitgangspunt hierbij was dat de RV onder de 80% blijft. Deze ontwerpen zijn qua energiebesparing en mate van klimaatbeheersing onderling vergeleken.

De berekeningen laten zien dat bij een verdamping tot 0,5 l/m²/dag en ventilatie met buitenlucht het broeien in 6 lagen in een cel met LED's het energieverbruik terugbrengt tot onder de 150 MJ/1000 stks. Wordt er meer verdampt, nl. 1,5 l /m²/dag, dan is broeien in 6 lagen met buitenluchtventilatie nauwelijks energiezuiniger dan de huidige MLT-systemen van 2 tot 3 lagen in een schuurkas: ± 300 MJ/1000 stks.

Wordt in het geval van een verdamping van 1,5 l /m²/dag balansventilatie toegepast, zodat 80% van de warmte van de uitgaande lucht teruggewonnen kan worden, dan wordt het energieverbruik verder teruggebracht naar 200 MJ/1000 stks. Toepassing van een warmtepomp om daarmee te ontvochtigen brengt het energieverbruik nog iets verder terug tot 180 MJ/1000 stks.

Hoe sterker ontvochtigd moet worden (b.v tot een RV van 70% i.p.v. 80%), hoe gunstiger het wordt i.p.v. ventilatie met buitenlucht balansventilatie of een warmtepomp toe te passen. Anderzijds, hoe hoger de toelaatbare RV hoe kleiner het verschil in energiekosten met buitenluchtventilatie. Voor een gewas als snijhyacint is balansventilatie dus niet nodig.

Bij buitenlucht- en balansventilatie is een luchtdebiet van 50 tot 110 m³/m²grond per uur bijna altijd voldoende, bij het systeem met de warmtepomp 30 tot 70 m³/m²grond per uur. Gedurende ongeveer 250 uur per seizoen is bij beide systemen echter een hoger debiet gewenst, nl. respectievelijk maximaal 170 en 120 m³/m²grond.

Als maximaal verwarmingsvermogen is waarschijnlijk 650 W/m² grond bij buitenluchtventilatie voldoende, bij balansventilatie is dat 350 W/m² grond.

Wanneer de slurven alternerend zijn opgesteld, zodat het eindpunt van een slurf naast het beginpunt van de volgende slurf is gepositioneerd, wordt warmte gelijkmatig over het teeltoppervlak verdeeld.

In een cel is het voor de verschillende tulpecultivars onbekend wat de minimale verdamping moet zijn om kiepers e.d. te voorkomen. Aanbeveling is daarom dit voor de verschillende cultivars goed in kaart te brengen.

1 Inleiding

In het kader van de onderzoeksprogramma's Systeem-innovaties en van het convenant Meerjarenaafpraak-energie (MJA-e) is in 2004 een haalbaarheidsstudie Meerlagenteelt (MLT) tulp op water (eb/vloed) positief afgerond. In de context van MLT is daarna in de kas onderzoek gedaan aan de verdeling van diffuus zonlicht over op uiteenlopende wijze in teeltlagen gepositioneerde containers, aan de lichtbehoefte van tulp in de verschillende groeifasen en aan de mogelijkheden van LED belichting.

In het seizoen 2009/2010 is het project "Meerlagenteelt in de praktijk" gestart, waaraan dit 1^{ste} jaar 3 bedrijven deelnamen, elk met MLT systemen die verschillen in bedekkingsgraad, transportsysteem en belichtingsregime. In het volgende seizoen 2010/2011 is het project uitgebreid tot 7 bedrijven en in het 3^{de} seizoen tot 10 MLT-bedrijven. De variatie in MLT-systemen is hierbij alleen maar groter geworden: er wordt gebroeid op stilstaand water of op eb/vloed systemen, de bedekkingsgraad varieert van 1,25 lagen tot 3 lagen, en er wordt belicht met kwiklampen, TL-lampen (witte en/of blauwe) of met LED's, en met verschillen in lichtintensiteit en belichtingsduur. De kashoogtes verschillen en containers worden getransporteerd met doorduwsystemen met een vaste lift tot transport met een mobiele lift. En er wordt ook op uiteenlopende wijze ontvochtigd: van traditioneel stoken met het raam open (op de bovenste laag) tot ontvochtigen met gedoseerd aangezogen buitenlucht die met slurven de kas ingebracht wordt, tot luchtbehandelingskasten (LBK's) die buitenlucht verwarmen, die mengen met kaslucht en dit dan via slurven de kas in brengen. De kas wordt verwarmd met buisverwarming, soms gecombineerd met LBK's, soms uitsluitend met LBK's. Het kasklimaat is op de verschillende bedrijven uitgebreid onderzocht en blijkt zeer variabel, en soms (m.n. op de bovenlaag) lastig te beheersen.

Meer informatie over bovengenoemde onderzoeksprojecten is te vinden op de website van WUR: <http://www.wageningenur.nl/nl/Onderzoek-Resultaten/Projecten/Meerlagenteelt-in-de-praktijk.htm> en op de website van RVO.nl.

Doelstelling van het project Meerlagenteelt 2.0 is om een verbeterd basisontwerp voor meerlagenteelt te ontwikkelen. De teeltlagen zijn hierbij dichter op elkaar, LED-technologie wordt efficiënt toegepast en het kasklimaat is op alle teeltlagen goed onder controle. Het resultaat is dat de (kas- of cel)ruimte beter benut wordt (niet maximaal 3, maar 6 of meer teeltlagen), en dat het energieverbruik per steel nog verder verlaagd wordt. Hiermee wordt de kostprijs verlaagd en wordt uitval door o.a. kiepers voorkomen. De kwaliteit van het product wordt daarmee verbeterd en de concurrentiepositie van de bloembollensector wordt versterkt.

2 Werkwijze

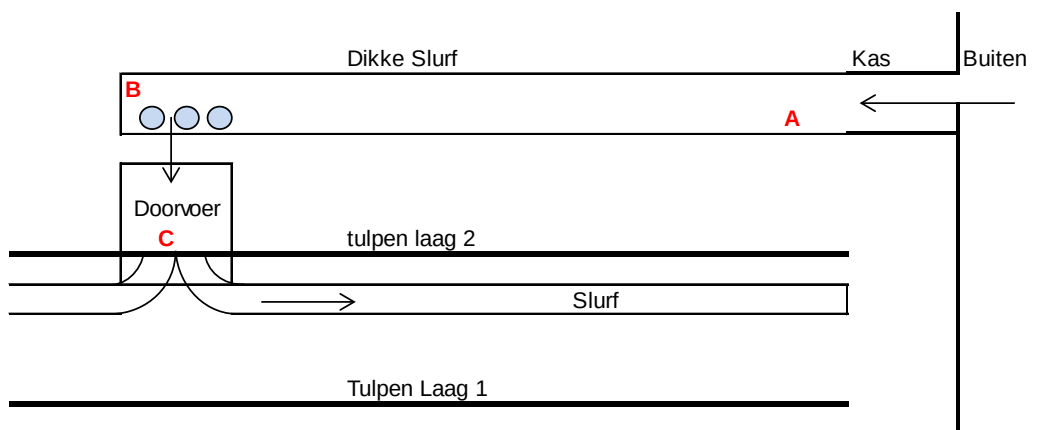
Boven de bovenste teeltlaag verzamelt zich de warmere en vochtigere lucht, die *of* via de ramen wordt afgevoerd, *of* via de LBK's wordt afgevoerd of deels gerecirculeerd. Een stabiel en regelbaar kasklimaat in termen van temperatuur en luchtvochtigheid boven alle teeltlagen is van groot belang voor een goede productkwaliteit en productieplanning. Daarom is op een 4- tal bedrijven met behulp van kunstmatige rook (op basis van glycerine) een onderzoek gestart naar de verticale en horizontale luchtstromen in de kas. De resultaten hiervan zijn besproken met (meerlagenteelt)tulpenbroeiers en na oriënterende brainstromsessies met onderzoekers van PPO Bloembollen en WUR-Glastuinbouw is op basis van simulatiemodellen het kasklimaat onder verschillende omstandigheden en bij verschillende basisontwerpen doorgerekend. Uitgangspunt hierbij is dat de RV onder de 80% blijft (beter: het vochtdeficit > 2-3 ml/m³ kaslucht), zodat het kasklimaat actief blijft en uitval door kiepers voorkomen wordt. De resultaten zijn voorgelegd aan de groep meerlagenbroeiers die deelnam aan het project Meerlagenteelt in de praktijk, zie Bijlage 2, waarna opmerkingen en praktische aanwijzingen meegenomen zijn in de definitieve ontwerpen. Deze ontwerpen zijn qua energiebesparing en mate van klimaatbeheersing onderling vergeleken.

3 Resultaten

3.1 Rookproeven

Op 4 bedrijven, elk met verschillende meerlagenteelt- en luchtontvochtigingssytemen, zijn met behulp van rookproeven de luchtstromen in de kas onderzocht. Een aantal van deze sessies is op video gezet en op de eerder genoemde website te bekijken.

Op **Bedrijf 1** wordt op het betreffende kasdeel in 2 lagen gebroeid. Buitenlucht wordt met een forse slurf aangevoerd en tot in het midden van de bovenste laag gebracht, schematisch weergegeven in figuur 1. Onderweg wordt deze lucht door warmtewisseling met de kaslucht opgewarmd. Rook op punt A in de dikke slurf ingeblazen, wordt met een flinke snelheid (maximaal ± 7 m/s) naar het eind van de slurf (B) getransporteerd, waar het door een aantal openingen naar beneden de doorvoer ingeblazen wordt. Bij de hoogste ventilatorstanden (ventilator bij A en bij C) lijkt slechts een klein deel *niet* doorgevoerd te worden.



Figuur 1: Schematische weergave slurfstelsel Bedrijf 1.

Wanneer de rook direct bij het doorvoerpunt ingeblazen wordt (punt C) is goed te zien dat de rook meteen uit de kleine gaatjes van de kleine slurf boven laag 1 stroomt. Een rookfront verplaatst zich vervolgens naar het einde van de slurf. De gehele containerbaan staat nu onder een nevel van rook die vervolgens langzaam opzij en omhoog tussen de containerbanen van de bovenste laag naar boven trekt.

Ook is rook onder de containers van de onderste laag geblazen terwijl de ventilator van de dikke slurf op 20% (een debiet van 2100 m³/uur) en die van de dunne slurven op 90% (een totaal debiet van 10.000 m³/uur). De rook trekt dan tussen de containerbanen omhoog en verplaatst zich richting het doorvoerpunt.

De luchtsnelheidsmetingen gaven aan dat bij 100% ventilatorinstellingen het debiet van de dikke slurf ruim 10.500 m³/uur is, en het totale debiet van de 20 kleine slurven die op het doorvoerpunt aangesloten zijn, samen ongeveer 11.700 m³/uur is. Dit betekent een maximum verversingscapaciteit van 12 – 13 m³/uur per m² kas, of 6 – 6,5 m³/uur per m² teelt.

Ook op **Bedrijf 2** wordt buitenlucht direct met een dikke slurf van buiten aangezogen en boven de bovenste teeltlaag gebracht. Deze slurf loopt tot halverwege de kas en loopt met een U-bocht weer terug naar het beginpunt, schematisch weergegeven in figuur 2. Over de gehele lengte van de slurf zijn op regelmatige afstand gaten aangebracht die qua positie corresponderen met de plaatsing van de ventilatoren die de kleinere slurven boven de onderste teeltlaag aanblazen. Onderweg wordt de lucht door warmtewisseling door de kaslucht opgewarmd. Uit elk gat komt evenveel lucht. De lucht die uit het eerste gat geblazen

wordt heeft de temperatuur van de buitenlucht, de lucht die uit het laatste gat geblazen wordt heeft de temperatuur van de kaslucht. De lucht uit de twee door de U-bocht tegenover elkaar liggende de gaten mengt zich en dit mengsel heeft zodoende overal dezelfde temperatuur. Dit mengsel van meer of minder door de kas opgewarmde buitenlucht wordt gemengd met kaslucht van boven laag 2 en door de ventilatoren de kleine slurven ingezogen. De mengverhouding buitenlucht – kaslucht wordt bepaald door het ventilatordebieten.

In de dikke U-slurf is op punt A, figuur 2, de rook ingeblazen en enkele uitblaasopeningen verder gevolgd (telkens boven een aanzuigpunt voor de ventilator die de lucht door de kleine slurf boven laag 1 blaast). De rook stroomt snel uit, even later ook uit het corresponderende gat na de U-bocht. Veel gaat ook naast de ventilator die de lucht de kleine slurven in trekt.

Ook is rook direct de kleine slurf ingeblazen, punt B, waarmee werd waargenomen dat de rook wervelend naar buiten komt alvorens het een egale nevel vormt. In vergelijking met de andere bedrijven lijken de gaatjes in de slurf hier groter en verder van elkaar. Ook hier wordt de rook tot in de tulpen geblazen.

Een los onder een lamp boven laag 1 ingeblazen rookwolk liet zien dat de lucht bij een lamp omhoog wegtrekt, maar in de buurt van de slurven naar beneden wordt geblazen. De rook trekt snel weg, gaat opzij richting looppaden en trekt omhoog tussen de containerbanen naar laag 2.

Een los boven laag 2 ingeblazen rookwolk trok omhoog lang het glas. Een deel werd door de ventilator opgepikt en in de slurf boven laag 1 gebracht.

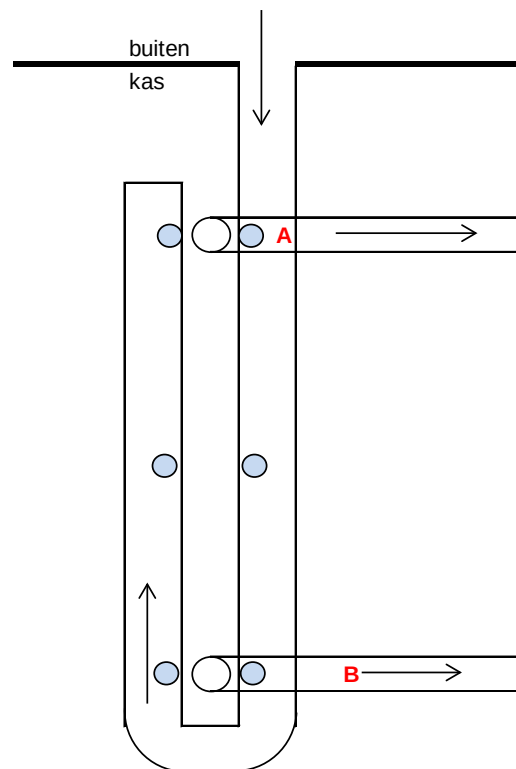
Luchtsnelheidsmetingen omgerekend naar debiet (m^3/uur) gaven aan dat het debiet in de kleine slurf bij een ventilatorstand van 65% ongeveer $276 \text{ m}^3/\text{uur}$ is en bij 100% is dat $425 \text{ m}^3/\text{uur}$.

Metingen in de dikke slurf gaven aan dat het debiet bij ventilatorstand 1 ongeveer $3824 \text{ m}^3/\text{uur}$ is. Het maximale debiet is $6697 \text{ m}^3/\text{uur}$.

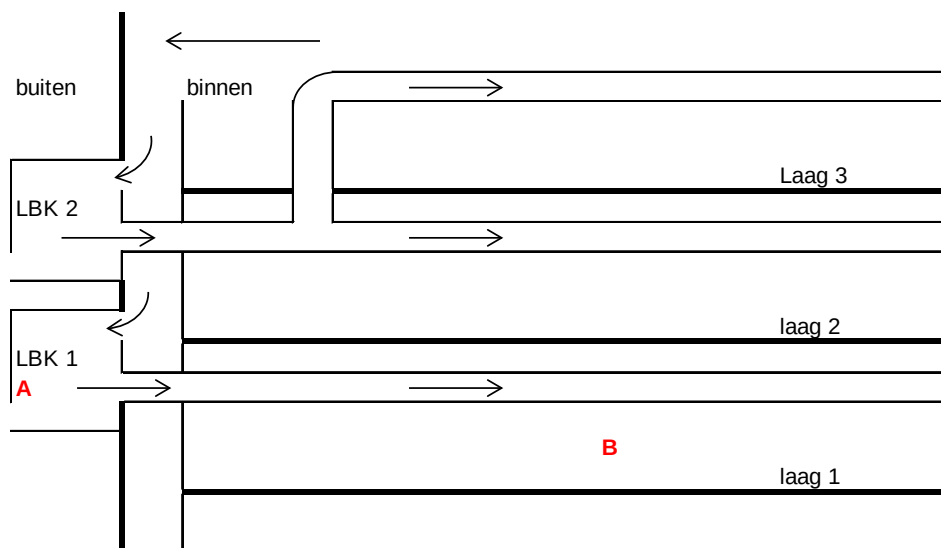
Met twee dikke slurven, en per dikke slurf 7 kleine slurven, op het noordelijke kasdeel van 1750 m^2 , geeft dit voor de kleine slurven samen een totaal debiet van 0 tot $5945 \text{ m}^3/\text{uur}$ en voor de twee dikke slurven samen minimaal $7648 \text{ m}^3/\text{uur}$ (stand 1) tot maximaal $13393 \text{ m}^3/\text{uur}$ (stand 5). Omgerekend naar kasoppervlak wordt maximaal met $7,7 \text{ m}^3/\text{uur}$ ontvochtigd.

Op **Bedrijf 3** wordt via de Luchtbehandelingskast (LBK) lucht de slurven ingeblazen, schematisch weergegeven in figuur 3. De LBK zuigt buitenlucht en kaslucht aan van boven de bovenste teeltlaag in de gewenste verhouding, zodat het mengsel dat de slurven ingeblazen wordt na opwarming het juiste vochtdeficit en de juiste temperatuur heeft. Op het bedrijf wordt gebroeid in 3 lagen. De rook die op punt A in de LBK ingeblazen was verspreidt zich snel en zeer gelijkmatig boven laag 1. Net als bij de vorige bedrijven is duidelijk te zien dat de lucht uit de slurven direct de tulpen bereikt. Anders dan bij Bedrijf 1 stijgt de rook hier vooral in het middenpad, ruim 2 meter breed, omhoog en wat minder tussen de containerbanen.

Een rookwolk boven laag 1 op punt B losgelaten bleef lang ter plekke hangen wat aangaf dat er weinig horizontale luchtstroming was.

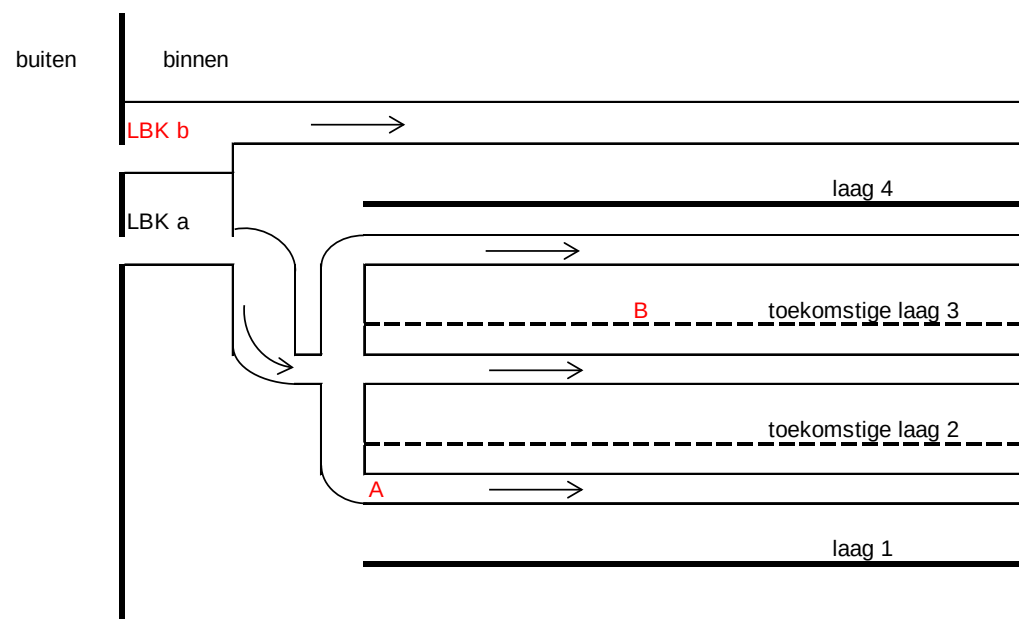


Figuur 2: Bovenaanzicht Slurvensysteem Bedrijf 2.



Figuur 3: Schematische weergave LBK- en slurvensysteem Bedrijf 3.

Op **Bedrijf 4**, zie figuur 4, wordt gebroeid in 2 lagen, maar de constructie is zo dat een uitbreiding naar 4 lagen (stippellijnen) in de toekomst mogelijk is. De rook die in de LBK waar de wat dikkere slurven boven de bovenste laag op zijn aangesloten (LBK b) is ingeblazen, verdeelt zich snel en gelijkmatig boven de teeltlaag. Ook als de rook op punt A in de onderste slurf wordt ingeblazen verdeelt het zich snel en gelijkmatig boven laag 1. De slurven lopen tot halverwege de kas. De andere helft van de kas wordt aangeblazen met LBK's die aan de noordkant van de kas zijn geplaatst. De rook bleef precies hangen tot het einde van de slurf, wat aangaf dat ook hier nauwelijks horizontale luchtstroming is. Een los onder laag 2 ingeblazen rookwolk bleef lang hangen, maar na verloop van tijd trok alles tussen de containerbanen door naar boven. Rook boven laag 4 trok langzaam richting de LBK's en werd zo weer verdeeld boven laag 1.

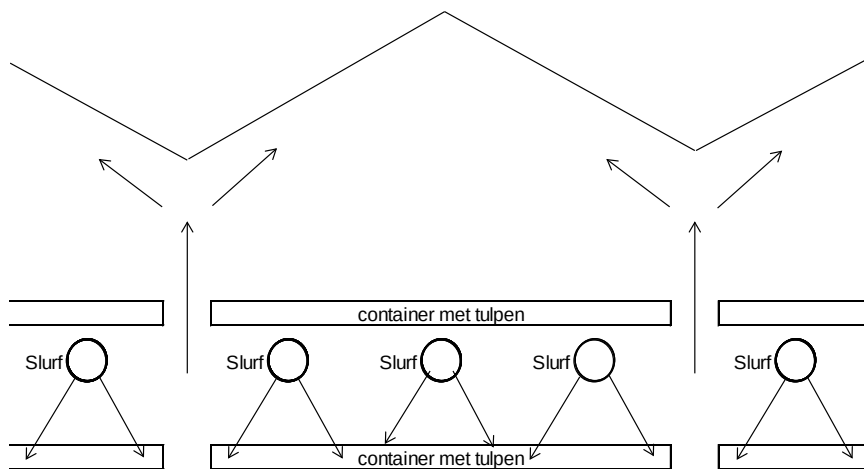


Figuur 4: Schematische weergave LBK- en slurvensysteem Bedrijf 4.

Samenvattend luchtbewegingen in kassen met meerlagenteelt

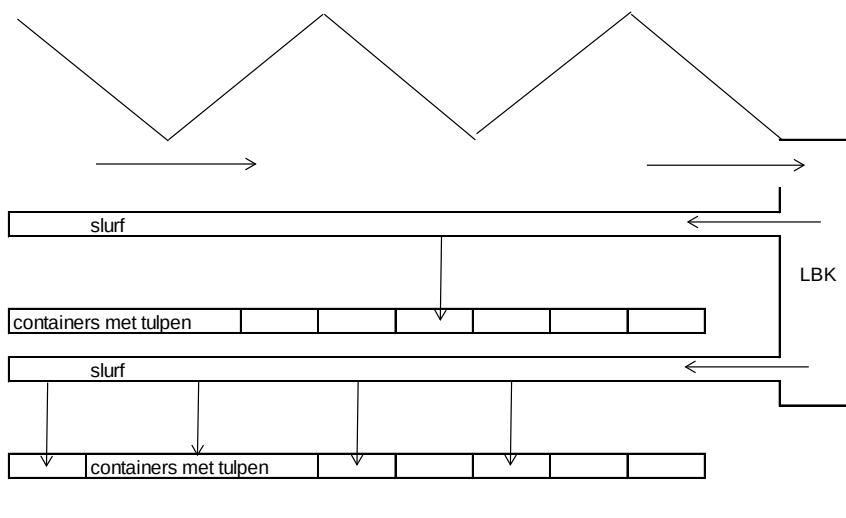
Er zijn twee luchtbewegingen te onderscheiden:

- 1) Door de slurven boven de onderste laag stroomt lucht met een maximum snelheid van 7-8 m/s. De lucht treedt naar buiten door kleine gaatjes. Over de gehele lengte komt per gaatje evenveel lucht naar buiten. Deze lucht komt direct tot *in* het gewas. Daarna volgt een beweging omhoog, tussen de containerbanen door, waarna de lucht zich verspreidt boven de bovenste laag, zie figuur 5. Deze verticale beweging wordt veroorzaakt door drukverhoging boven de eerste laag door luchtaanvoer, *en* doordat warmere lucht en vochtigere lucht lichter is dan koele lucht en dan drogere lucht. Uiteindelijk: wat er van buiten is ingezogen zoekt zich weer een weg naar buiten door ramen en kieren.



Figuur 5: Schematische weergave van de verticale luchtstroom in een kas met meerlagenteelt

- 2) Door de LBK zoals bij Bedrijf 3 en 4 (A), of door de doorvoer ventilatoren zoals bij Bedrijf 1 en 2 (B), wordt kaslucht aangezogen. Deze beweging (trek) boven de bovenste laag is horizontaal, en gaat wat richting betreft tegengesteld aan de richting van de kleine slurven. Deze stroom gaat veel langzamer dan de verticale stroom omhoog, zie figuur 6.



Figuur 6: Schematische weergave van de horizontale luchtstroom in een kas met meerlagenteelt

Bij A) wordt deze aanzuigbeweging bepaald door de klepstand van de LBK. Bij 100% buitenlucht is er geen horizontale beweging, bij 100% kaslucht en de ventilator op 100% is veel horizontale beweging.

Bij B) wordt de richting van aanzuigbeweging bepaald door de positie van de doorvoerventilatoren. De debietverhouding tussen de dikke slurf die direct buitenlucht aanzuigt en de ventilatoren die de slurven boven de onderste laag aanblazen bepaalt de mengverhouding “kaslucht boven de bovenste laag” + buitenlucht. Hoe minder buitenlucht, hoe meer horizontale trek boven de bovenste laag richting de doorvoerventilatoren.

Opvallend bij vooral de LBK systemen is dat boven de onderste laag vrijwel geen horizontale luchtbeweging was waar te nemen, zie foto 1: De rook blijft precies op zijn plaats.

Punt van aandacht bij verwarmen via de slurven met de LBK: Droge lucht wordt perfect gelijkmatig verdeeld tot in het gewas, maar warmte wordt meer aan het begin van de slurf afgeven dan aan het eind. Dit zou boven de onderste laag tot horizontale temperatuurverschillen kunnen leiden. Vooral als er geen horizontale luchtbeweging is. Bij de ontwikkeling van een nieuw basis ontwerp moet er dus rekening mee gehouden worden dat warmte en droge lucht beide gelijkmatig verdeeld moeten worden.



Foto1: Rookproef.

3.2 Systeembeschrijving

Doordat o.a. de warmtebehoefte voor groei, de lichtbehoefte en de (gewenste) verdamping (en daarmee samenhangend het optimale vochtdeficit) per groeifase verschilt, is gekozen voor compartimentering, zoals samengevat in tabel 1:

Tabel 1: Compartimentering.

	eenheid	Compartiment			
		1*	2	3	4
Temperatuur	°C	7 - 9	14 - 18	14 - 18	14 - 18
RV	%	<100%	<80%	<80%	<80%
Vd	ml/m ³	> 0	> 2,4 - 3,1	> 2,4 - 3,1	> 2,4 - 3,1
Licht	μmol/s/m ²	0	0	15	30
	uur/dg	0	0	16	20
Verdamping	ml/uur/m ²	0 - 10	10 - 40	30 - 90	40 - 120
Duur	weken	3	1	1	1
Grondoppervlak	m ²	720	400	600	1000
Aantal lagen	n	25	15	10	6
Totale teeltoppervlak	m ²	18.000	6.000	6.000	6.000

* compartiment 1 is de bewortelingsruimte

Hierbij heeft het teeltsysteem in het 1^{ste} compartiment, waar de beworteling plaatsvindt, een teeltoppervlak van 720 m² x 25 teeltlagen = 18.000 m². De som van de teeltoppervlakten van de overige compartimenten is hieraan gelijk en het netto grondoppervlak daarvan is 2000 m². Het totale teeltoppervlak

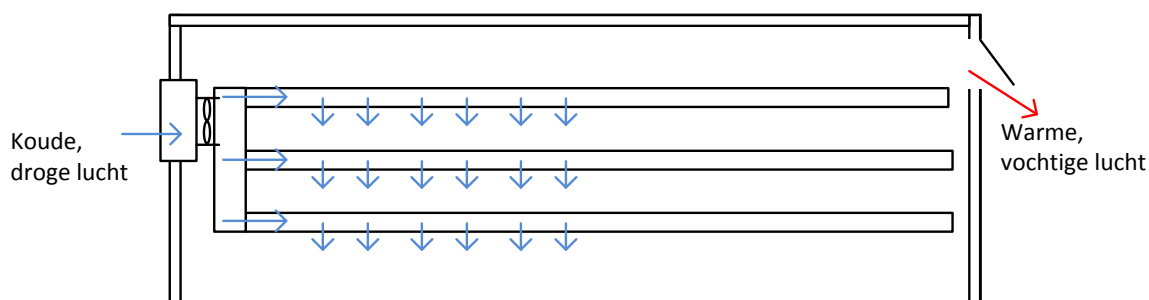
is voor elk van de compartimenten 2, 3 en 4 gelijk, omdat de corresponderende groeifasen even lang duren. Het teeltoppervlak van het 2^{de} compartiment is hierbij gelijk aan 20% van de 2000 m² grondoppervlak x 15 lagen = 6000 m², het teeltoppervak van het 3^{de} compartiment is 30% van het grondoppervlak x 10 lagen is 6000 m² en het 4^{de} compartiment is 50% van het grondoppervlak x 6 lagen = 6000 m². Daarnaast is er nog een 5^{de} compartiment, de oogsthal, waar de containers 2 – 3 dagen geoogst en “bewaard” kunnen worden. Belichting vindt plaats met LED-lampen.

3.3 Klimaatbeheerssystemen

Het vereiste binnenklimaat (licht, warmte, ontvochtiging) kan met verschillende klimaatbeheerssystemen worden gehandhaafd. Hiervoor komen 4 systemen in aanmerking:

Systeem 1: Directe afvoer van vocht met buitenlucht, zonder warmte terugwinning.

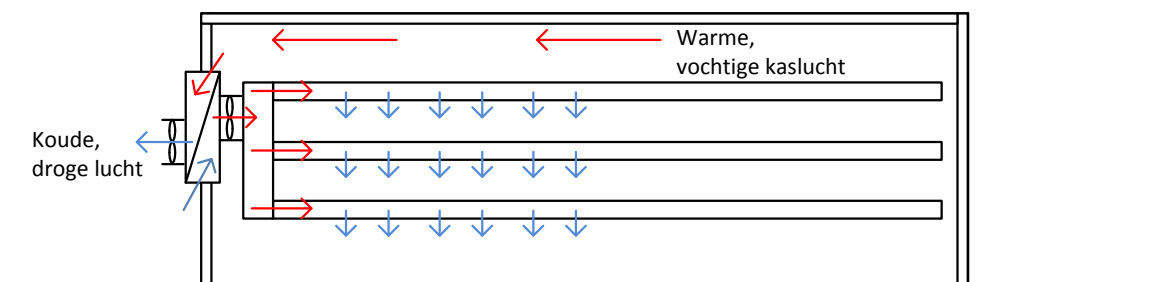
Het vocht wordt afgevoerd met buitenlucht, die middels een verdeelsysteem met slangen tussen teeltlagen wordt gebracht, schematisch weergegeven in figuur 7. Warme, vochtige binnenlucht wordt dan rechtstreeks naar buiten gestuurd, zonder terugwinning van warmte of vocht. Dit systeem komt overeen met de luchtontvochtigingssystemen in de huidige meerlagenteelt, waarbij in het midden gelaten wordt of de buitenlucht door een LBK direct bij de invoer in de cel of schuurkas wordt opgewarmd, of dat de buitenlucht via de slurf door de warmtebronnen in de cel of schuurkas wordt opgewarmd.



Figuur 7: Directe afvoer van vocht met buitenlucht, zonder warmteterugwinning.

Systeem 2: Afvoer van vocht met balansventilatie, waarmee de voelbare warmte voor 80% wordt teruggewonnen.

Een balansventilatiesysteem zorgt voor terugwinning van de voelbare warmte in de ventilatielucht. Dit gebeurt met een warmtewisselaar in de gevel, waarin inkomende buitenlucht wordt verwarmd met de af te voeren binnenlucht, schematisch weergegeven in figuur 8. Op deze manier is in de praktijk een (thermisch) rendement haalbaar van rond de 80%. Dit betekent dat als de buitenlucht b.v. 10°C is (en de RV 90%) en de binnenlucht 20°C, de temperatuur van de inblaasluft op 18°C komt. De absolute vochtigheid van de ingeblazen lucht is gelijk aan die van de buitenlucht, nl. 8,5 ml/m³. Door het opwarmen naar 18 °C wordt de RV dan 55%.

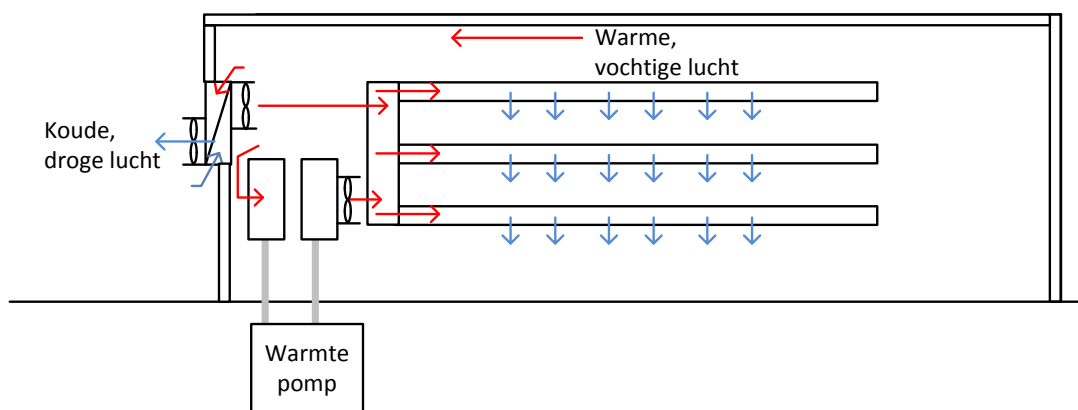


Figuur 8: Balansventilatie, waarmee de voelbare warmte voor 80% wordt teruggewonnen.

Systeem 3: Ontvochtiging met warmtepomp.

Waar een balansventilatiesysteem alleen de voelbare warmte kan terugwinnen, is met een warmtepomp aangedreven systeem ook de latente warmte (dat is de warmte die voor verdamping van water nodig was en die bij condensatie van de waterdamp weer vrijkomt) terug te winnen. Dit systeem werkt met twee lucht-water warmtewisselaars, die zijn verbonden met een warmtepomp. Eerst wordt de lucht gekoeld tot onder het dauwpunt, waardoor condensatie plaatsvindt (en de lucht dus wordt gedroogd). Hierna wordt de lucht weer opgewarmd, schematisch weergegeven in figuur 9.

In een goed geïsoleerde cel zal bij hoge ontvochtigingsvraag en belichting de warmte die bij de warmtepomp vrijkomt meer zijn dan nodig is voor verwarming van de cel. Daarom wordt het systeem gecombineerd met een luchtaanzuiging van buiten. Door steeds de juiste verhouding tussen buitenlucht en warmtepomp vermogen te kiezen, is het energieverbruik te minimaliseren bij een goed klimaat.



Figuur 9: Ontvochtiging met warmtepomp.

Systeem 4: Hygroscopische ontvochtiging

Een alternatieve manier van ontvochtigen is het vocht uit de lucht in te vangen in een hygroscopische stof, bijvoorbeeld een zeer zoute oplossing. Bij het absorberen van het vocht in de zoutoplossing, komt de verdampingswarmte van het vocht vrij, zodat de lucht opwarmt. Ook hier komt de lucht dus droger en warmer terug de teeltruimte in, net als in een warmtepomp droger. De zoutoplossing wordt door het invangen van het water verdund, en zal dus na enige tijd ingedikt moeten worden. Het energieverbruik van het proces, de regeneratie, bepaalt het overgrote deel van het energieverbruik van hygroscopische ontvochtiging.

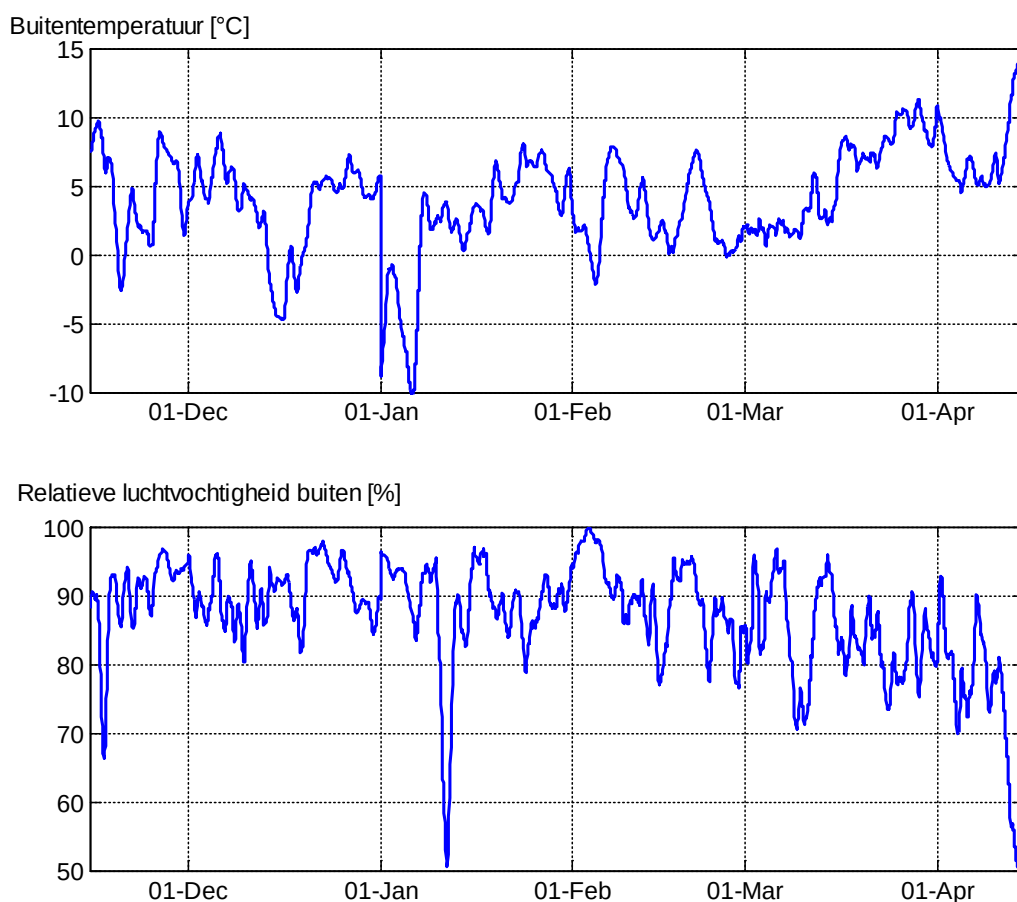
Een veel voorkomende manier van indikken is het gebruik van een vacuümverdamer. Deze bestaat uit een groot vat, waarin de zoute vloeistof bij lage druk en lage temperatuur (bijv. 40°C) verwarmd wordt en gaat koken. Hierdoor verdampt water, zodat de vloeistof wordt ingedikt. Het verdampte water condenseert op een koude spiraal, waardoor de condensatiewarmte wordt teruggewonnen. Door een warmtepomp te gebruiken die de warmte transporteert van de koude spiraal naar de verwarmende spiraal is een COP mogelijk van 5 tot 7. De COP van het totale systeem (indamper en kas-zijdige installatie) zal tussen 4 en 6 uitkomen, wat vergelijkbaar is met een goede warmtepompdroger.

De energiebesparing die een hygroscopisch ontvochtigingssysteem oplevert, zal dus in dezelfde range liggen als een warmtepompsysteem. Het economisch perspectief van een hygroscopische ontvochtigingsinstallatie in de tulpenteelt is voornamelijk afhankelijk van de kostprijs van het regeneratie systeem. Een aparte ontwerpstudie kan hier meer duidelijkheid in verschaffen.

Meer en gedetailleerdere informatie over de perspectieven van hygroscopisch ontvochtigen in de tuinbouw zijn te vinden in: De Next Generation Semigesloten Kas : Perspectief van een ontvochtigingssysteem op basis van een koeloppervlak en op basis van hygroscopisch zout. Zwart, H.F. de, Speetjens, S.L. (2013) Wageningen UR Glastuinbouw, 2013 (Rapporten Wageningen UR Glastuinbouw 1292) - 52 p

3.4 Energieverbruik

Voor de berekeningen van het energieverbruik voor het handhaven van het vereiste binnenklimaat (licht, warmte, ontvochtiging) is een rekenmodel opgezet, waarvan de rekenregels zijn samengevat in Bijlage 1. Hierbij zijn onder meer de weersgegevens uit een standaard klimaatbestand (SELjaar) gebruikt. Dit bestand is zodanig samengesteld dat het weersgegevens bevat die representatief zijn voor het klimaat in de afgelopen 20 jaar. De temperatuur, figuur 10, en relatieve luchtvochtigheid, figuur 11, zijn hieronder weergegeven:



Figuur 10: Daggemiddelde waarden voor temperatuur en absoluut vochtgehalte van de buitenlucht de.

Bij de broei van 1000 tulpen wordt in éénlaagssystemen de laatste 5 jaar gemiddeld in Nederland in de kas rond de 600 MJ verbruikt (primaire energie). Bij de huidige meerlagensystemen (rond de 2 lagen) is dat tussen de 300 – 400 MJ. Zie: Meerlagenteelt in de praktijk: Energie-efficiënter tulpen broeien 2012, J. Wildschut en E. Promes, 2013, WUR/PPO. In beide gevallen wordt ook een deel van de inkomende straling van gemiddeld 750 MJ/m² per seizoen benut. Omgerekend naar 1000 tulpen wordt naar schatting in het éénlaagssysteem 100 tot 200 MJ aan energie uit daglicht benut.

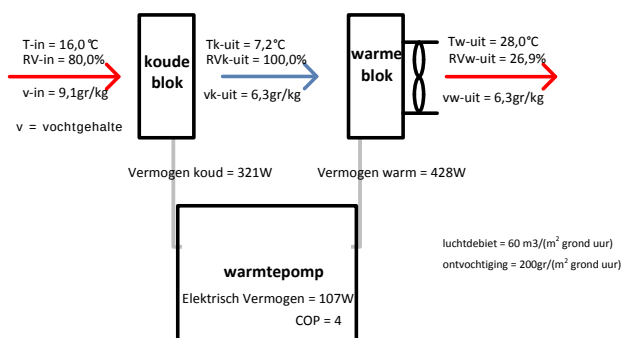
Het energieverbruik van de productie van 1000 tulpen in het 6 laags systeem is berekend voor compartimenten die wanden en een dak hebben zoals een bewaarcel (met een isolatiewaarde van 0,5 W/m²/°K).

Het grootste deel van het energieverbruik zit in de verdamping. Voldoende verdamping op het juiste moment is voor tulpenproductie cruciaal om zg. kiepers te voorkomen. Hoeveel die voldoende verdamping per groeifase moet zijn is verschillend per cultivar en afhankelijk van veel factoren (o.a. Ca in het proceswater, temperatuur en groeisnelheid). Daarom is het energieverbruik doorgerekend bij 4 verschillende verdampingsscenario's, samengevat in tabel 2.

Omdat er geen zonlicht wordt toegelaten, moet alle verdampingsenergie van buiten toegevoerd worden. Het vocht dat op deze manier in de lucht is gebracht, wordt door ventilatie afgevoerd. Hierbij gaat veel energie verloren. Bij balansventilatie wordt het grootste deel (80%) van de warmte in de ventilatielucht teruggewonnen, waardoor het energieverlies dus wordt beperkt.

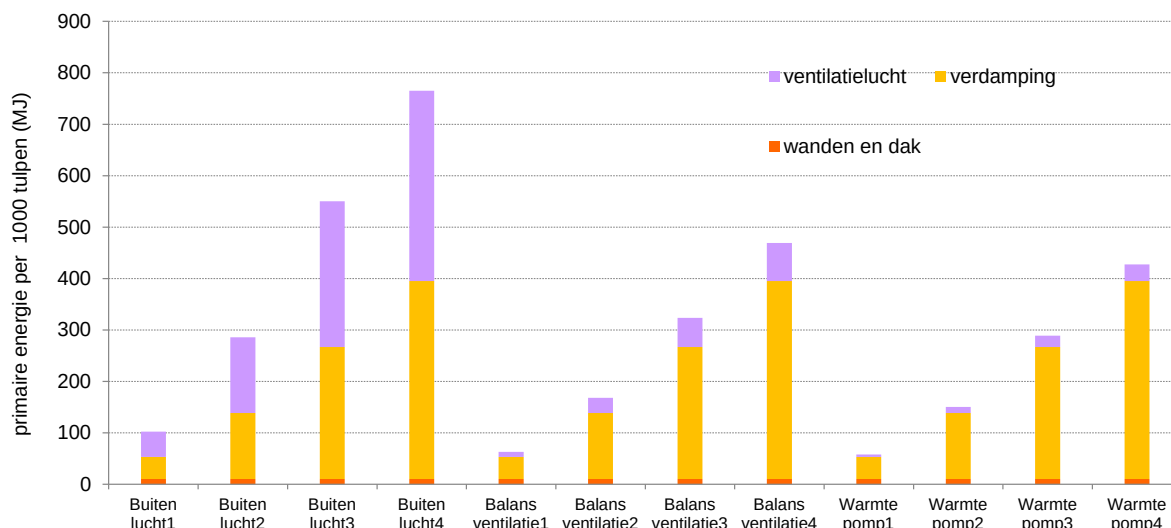
Scenario	teeltfase		
	1	2	3
1	0,17	0,33	0,50
2	0,50	0,99	1,50
3	0,99	1,98	3,00
4	1,45	2,97	4,50

Bij ontvochtiging met de warmtepomp koelt deze de lucht tot onder het dauwpunt, waardoor vocht condenseert. De warmte die hierbij aan de lucht onttrokken wordt komt aan de warme kant van de warmtepomp weer vrij, *plus* het opgenomen elektrisch vermogen van de warmtepomp, zie werkingsschema hieronder. De verdampingswarmte wordt dus ook hergebruikt. Hierdoor is het energieverbruik lager dan bij de balansventilatie. Overigens is de warmtepomp zodanig ingezet dat er geen warmteoverschot ontstond; bij een potentieel overschot aan warmte, is aanvullend geventileerd met buitenlucht via een balansventilatiesysteem.



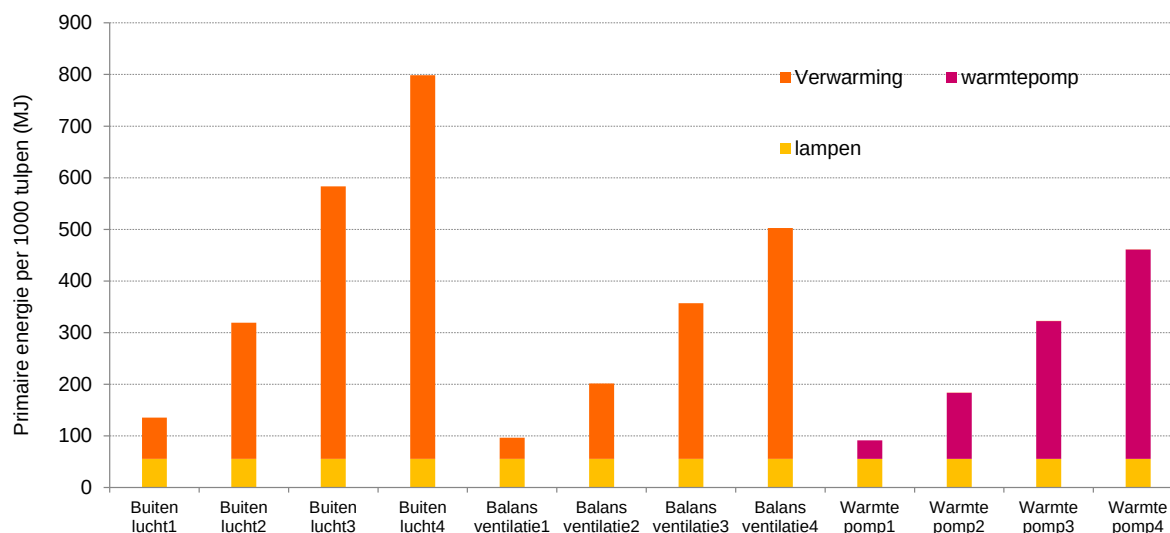
Figuur 11: Processchema van een warmtepompsysteem voor de ontvochtiging van kaslucht.

Het energieverbruik voor 1) warmteverlies door de wanden, het dak en de vloer, 2) warmte voor het opwarmen van buitenlucht (ventilatielucht) waarmee waterdamp wordt afgevoerd zodat de RV onder de 80% blijft, en 3) energie voor het verdampen van water, wordt in figuur 12 geïllustreerd voor elk van de 3 klimaatbeheersingssysteem bij 4 verdampingsscenario's.



Figuur 12: Energieposten bij 4 verdampingsscenario's en 3 systemen.

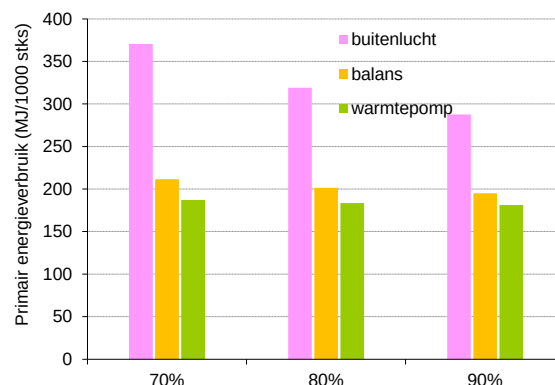
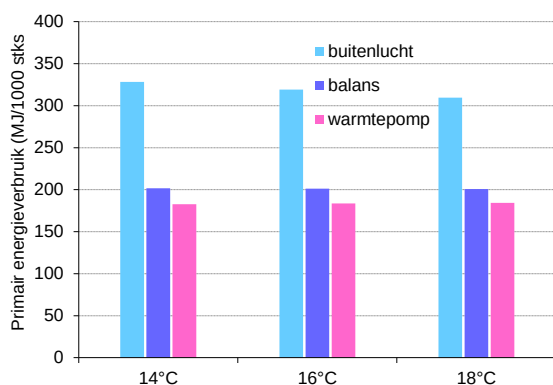
Als energiebronnen fungeren de verwarming (i.d.g. een warmtewisselaar in de LBK) en de LED-lampen. Door het relatief lage belichtingsniveau (0, 10, en 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2_{\text{teelt}}/\text{s}$ voor de drie teeltfasen) is de bijdrage van de LED-lampen zeer beperkt. Het energieverbruik van de huidige LED-lampen is 0.435 watt/ μmol (toekomstige LED-lampen 0.333 watt/ μmol). Het primaire energieverbruik van de systemen is samengevat in figuur 13.



Figuur 13: Primair energieverbruik bij 4 verdampingsscenario's en 3 systemen.

Het verlagen van de temperatuur in de cel geeft geen energiebesparing (figuur 14). Dit kan verklaard worden uit het feit dat bij lagere binnentemperatuur een groter luchtdebiet nodig is om het verdampte vocht af te voeren. Immers, het verschil in vochtgehalte tussen kaslucht van 18°C en RV80% en buitenlucht van bijvoorbeeld 5°C en RV90% is 6,2 ml/m³. Als de binnenlucht 14°C is, loopt dit terug tot 3.6 ml/m³ – zodat om evenveel vocht af te kunnen voeren het luchtdebiet in dit geval 75% hoger zou moeten zijn. Het energieverbruik gaat echter dan met 20% omhoog omdat de buitenlucht 2 graden minder opgewarmd hoeft te worden. Gemiddeld over het broeiseizoen is het verschil met de buitentemperatuur veel minder groot, zodat het energieverbruik bij 14°C slechts enkele procenten hoger is.

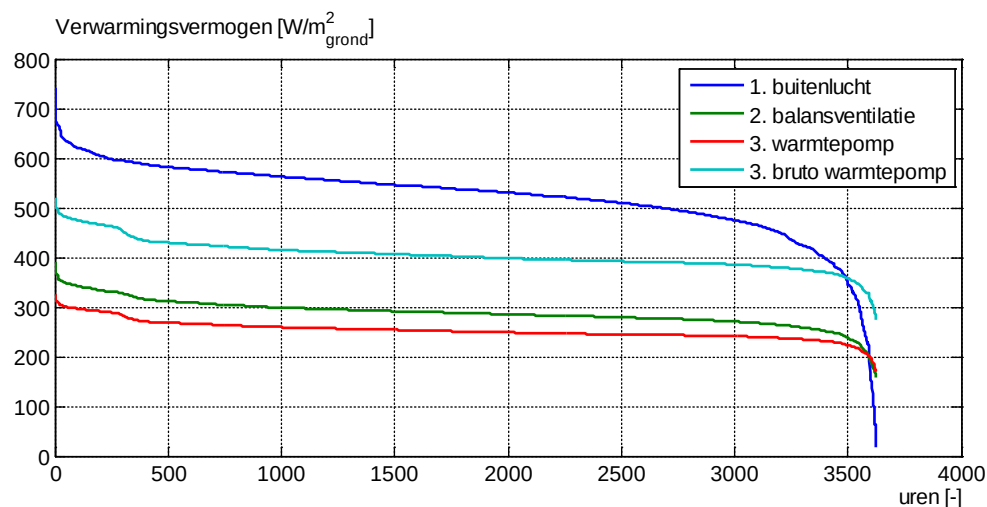
Het toestaan van een hogere luchtvochtigheid in de teeltruimte verlaagt het energiegebruik sterk, voornamelijk bij ventileren met buitenlucht. Dit is eenvoudig te verklaren doordat het ventilatiedebiet bij een hogere luchtvochtigheid fors minder hoeft te zijn omdat er per m³ meer vocht afgevoerd wordt (het verschil in vochtgehalte tussen binnenlucht van 16°C en RV70% en kaslucht van RV90% is 2.7 ml/m³ waardoor bijna 30% minder ventilatielucht nodig is en dus bijna 30% minder energie).



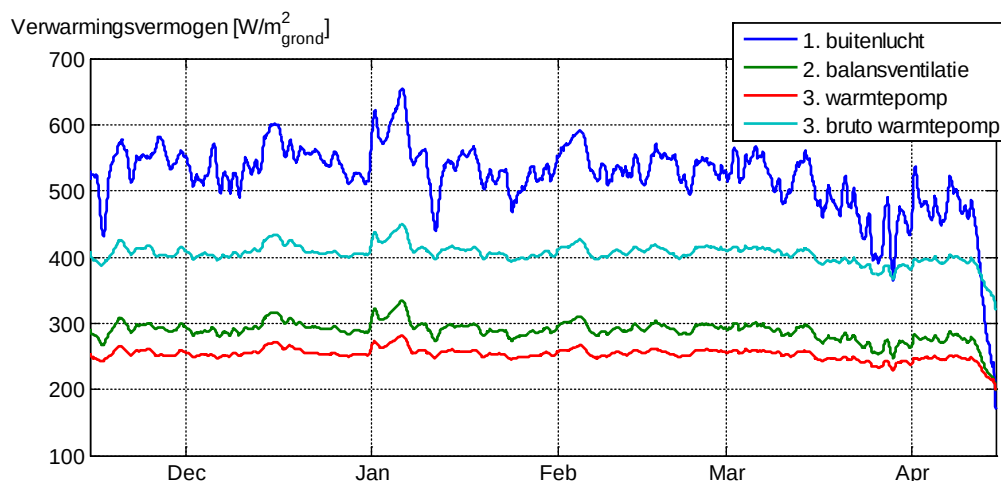
Figuur 14 en 15: Primair energieverbruik (MJ/1000 stks) bij verschillende binnentemperatuur (links) en verschillende relatieve luchtvochtigheden, beide bij verdampingsscenario 2 (1,5 l/m²/dag).

3.5 Capaciteit

De capaciteit van de verwarmingsinstallatie zou zodanig moeten zijn dat op vrijwel elk moment aan de warmtevraag kan worden voldaan. Figuur 16 toont het aantal uur per teeltseizoen dat een bepaald verwarmingsvermogen nodig is. Een verwarmingsvermogen van 650 - 700W/m² grond is voldoende om op alle momenten aan de verwarmingsvraag te voldoen voor het systeem Buitenlucht. In het geval van balansventilatie, is dit slechts 350 - 380W/m² grond. De netto verwarming door de warmtepomp is nog iets lager dan voor de balansventilatie. Echter, de bruto verwarmingscapaciteit (dus de capaciteit die nodig is om de lucht te verwarmen *en* om de afkoeling door het koude blok teniet te doen) ligt veel hoger. Gevolg hiervan is dat de te installeren warmtewisselaars groter (en dus duurder) moeten zijn.



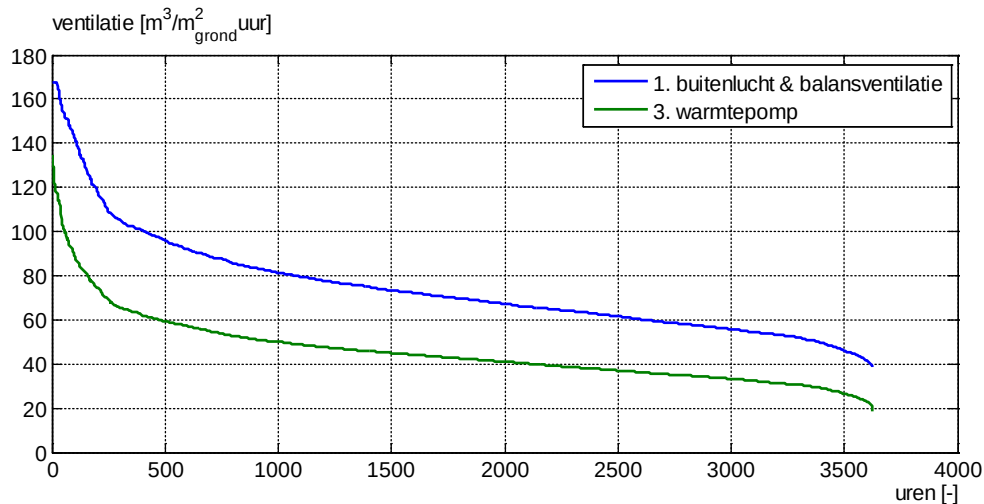
Figuur 16: jaarbelastingduurkromme voor verwarming voor de drie systemen (bij verdamping van 1,5l/m²dag).



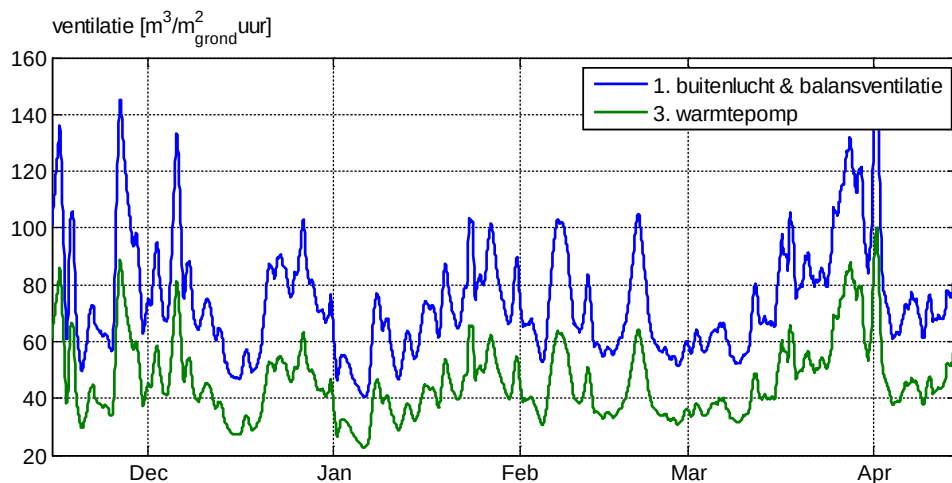
Figuur 17: verwarmingsvermogen in de tijd voor de drie systemen (bij verdamping van 1.5l/m²dag).

Figuur 17, waarin het 24-uursgemiddelde voor de drie systemen in de broeiperiode is uitgezet, laat zien dat de duur van een aaneengesloten periode dat het maximale verwarmingsvermogen nodig is maar heel kort is (<24 uur). Als maximaal verwarmingsvermogen is waarschijnlijk 650 W/m² grond bij systeem Buitenlucht voldoende, bij Balansventilatie is dat 350 W/m² grond.

Het ventilatiedebiet dat nodig is om de teeltruimte op een RV van 80% te houden is sterk afhankelijk van de luchtvochtigheid van de buitenlucht. Is deze lucht droog, dan is een laag luchtdebiet voldoende. Bij vochtige buitenomstandigheden is het vereiste debiet veel hoger. In het systeem Buitenlucht en in het systeem Balansventilatie is een luchtdebiet van 50 tot 110 m³/m²grond per uur bijna altijd voldoende. Gedurende ongeveer 250 uur is een hoger debiet gewenst, of zal de luchtvochtigheid in de teeltruimte tot boven de 80% stijgen, figuur 18. Bij het systeem met de warmtepomp is een debiet van 30 tot 70 m³/m²grond per uur bijna altijd voldoende.



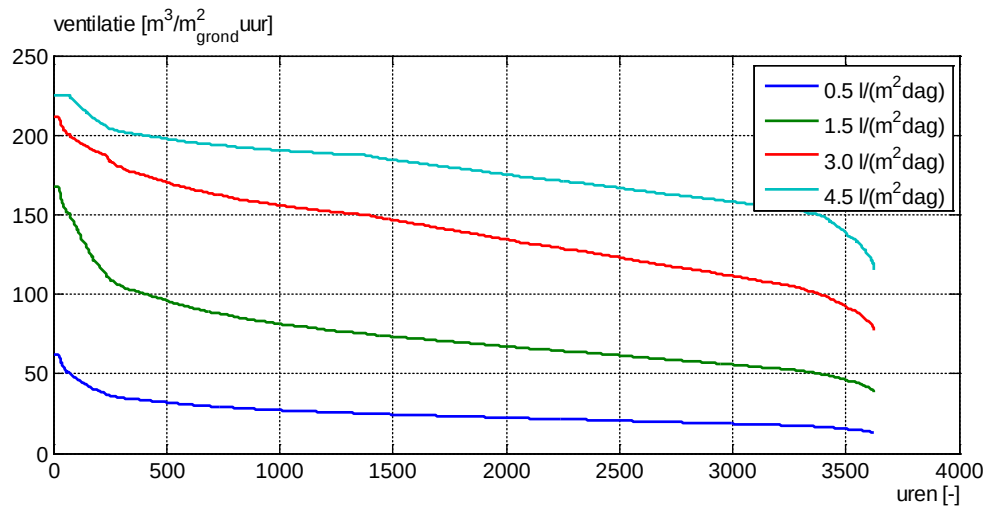
Figuur 18: ventilatiedebiet voor ventilatie met buitenlucht (met of zonder balansventilatie) en voor het warmtepompsysteem, bij een verdamping van 1,5 l/m²/dag.



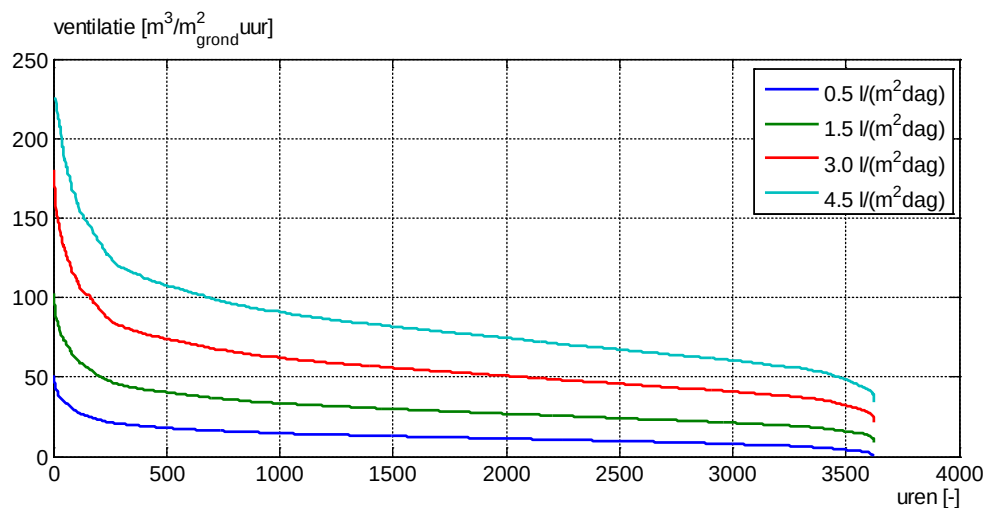
Figuur 19: Benodigd ventilatiedebiet door het teeltseizoen voor de systemen Buitenlucht en Balansventilatie, en voor het systeem met de warmtepomp, bij een verdamping van 1,5 l/m²/dag.

Figuur 19 laat zien dat de genoemde 250 uur dat een ventilatiecapaciteit van 110 m³/m²grond per uur bij de systemen Buitenlucht en Balansventilatie (of 70 m³/m²grond per uur bij het systeem met de warmtepomp) onvoldoende is om de RV onder de 80% te houden niet een aaneengesloten periode is. Van half november tot januari komt dat 3 keer één of enkele dagen voor, zodat toch de maximale ventilatiecapaciteit geïnstalleerd moet worden.

Het sterke effect van de verdamping op de benodigde ventilatiecapaciteit wordt nog eens geïllustreerd door figuur 20. Deze figuur laat zien dat b.v. de maximale capaciteit voor ventilatie met buitenlucht (met of zonder warmteterugwinning) voor de 4 verdampingsscenario's fors verschilt: ongeveer 60 m³/m² grond bij een verdamping van 0,5 l/m²/dag, 165 m³/m² grond bij een verdamping van 1,5 l/m²/dag, 215 m³/m² grond bij 3 l/m²/dag en 230 m³/m² grond bij 4,5 l/m²/dag.



Figuur 20: Ventilatie-debiet voor ventilatie met buitenlucht (met of zonder warmteterugwinning) bij de vier verdampingsscenario's.

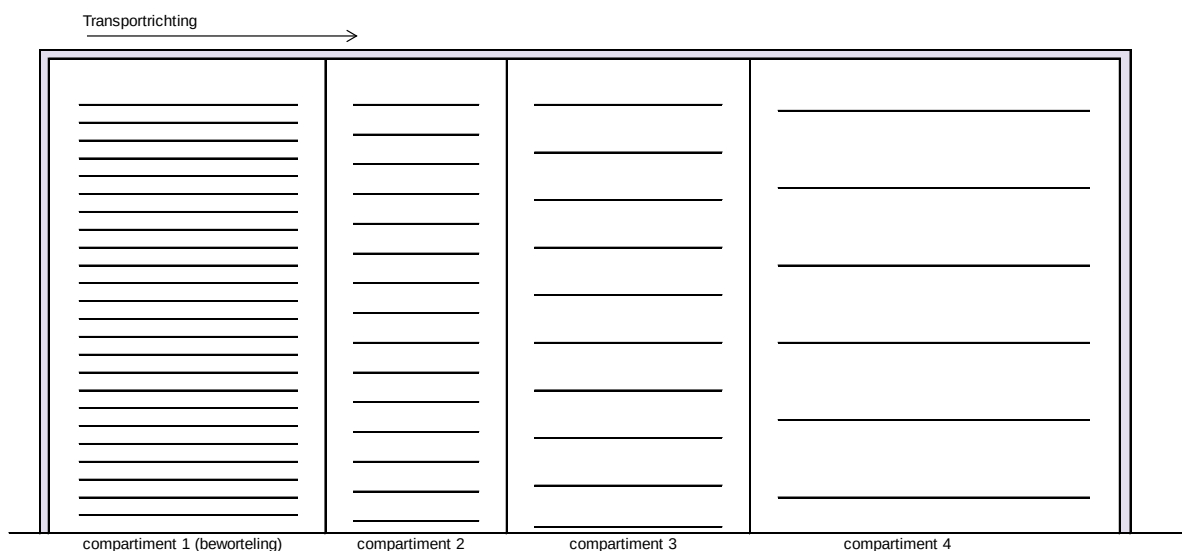


Figuur 21: Ventilatie-debiet voor ventilatie met ontvochtiging door de warmtepomp bij de vier verdampingsscenario's.

Figuur 21 laat dit zien voor het ontvochtigingssysteem met de warmtepomp. Ook hier is het verschil tussen de verdampingsscenario's aanzienlijk. Opvallend verschil met het ontvochtigen met buitenlucht is dat bij de scenario's met hoge verdamping een heel hoge benodigde ventilatiecapaciteit bij het systeem met de warmtepomp heel zelden voorkomt.

4 Basisontwerp

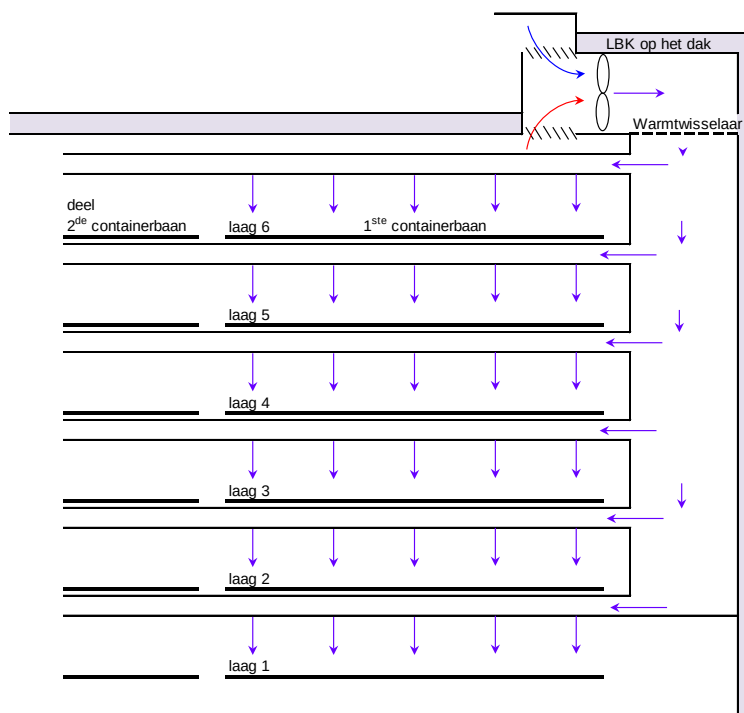
De inrichting van een bedrijf met 4 compartimenten die elk afzonderlijk een regelbaar teeltklimaat hebben zou er uit kunnen zien zoals in figuur 22 schematisch voorgesteld. De totale teeltoppervlakten per compartiment verhouden zich tot elkaar op basis van de duur van de verschillende teeltfasen en het aantal lagen op basis van de gewaslengte. De inrichting van de compartimenten wordt o.m. bepaald door de klimaateisen. Compartiment 1 (de bewortelingsruimte) heeft geen licht en geen ontvochtiging nodig, compartiment 2 geen licht maar wel ontvochtiging, en compartiment 3 en 4 hebben beide wel nodig, maar met verschillen in maximale lichtintensiteit en mogelijk ook verschillen in kleur.



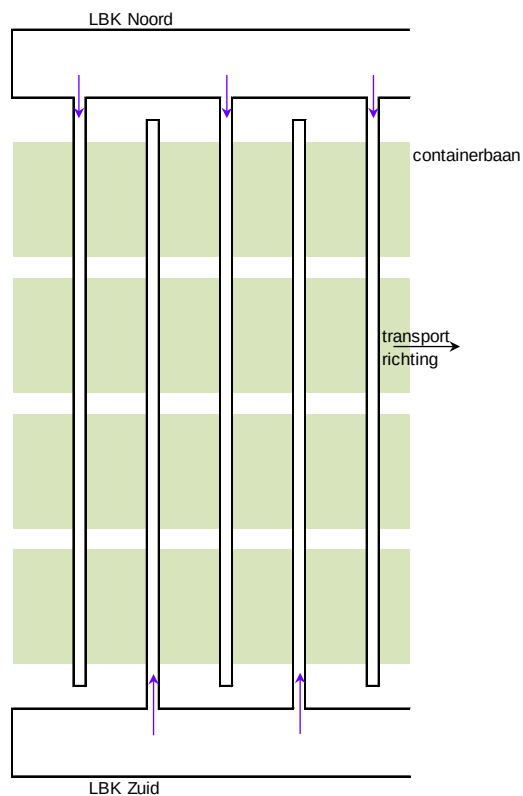
Figuur 22: Schematische voorstelling van een broeierij in 4 compartimenten.

Figuur 23 geeft het vooraanzicht op de kopse kant van de containerbanen. De LBK is op het dak geplaatst en lucht wordt over de slurven verdeeld via de dubbele wand. De slurven lopen dus haaks op de containerbanen.

Figuur 24 geeft het bovenaanzicht van de containerbanen en het onvochtigingssysteem weer. Met deze opstelling kan verwarmd worden zonder dat er horizontale temperatuurverschillen optreden. De naar het eind van de slurf afnemende warmteafgifte wordt gecompenseerd door de luchtstroom door de slurven van twee kanten te laten komen.

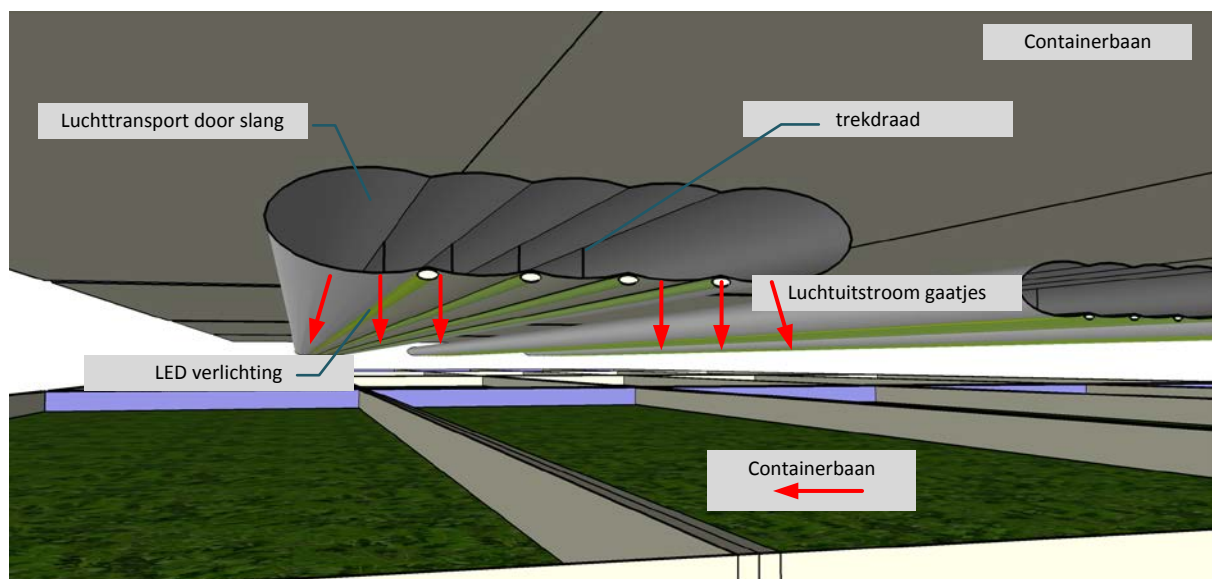


Figuur 23: Vooraanzicht op de kopse kant van de containerbaan in compartiment 4 met luchtbehandelingswand.



Figuur 24: Bovenaanzicht containerbanen en ontvochtigingssysteem.

In de stelling waar de containerbanen over lopen zijn de verschillende functies geïntegreerd: een systeem voor de aan- en afvoer van water (eb/vloedsysteem), platte slurven voor de aanvoer van droge lucht en van warmte, en daaronder de strengen LED's voor de belichting, Figuur 23.



Figuur 23: Integratie van functies.

5 Investeringsruimte

Een gedetailleerde kostprijsanalyse is gezien de relatief grove schets van het basisontwerp niet zinvol. Het is wel mogelijk een schatting te maken van de jaarlijkse investeringsruimte die ontstaat als varianten van het basisontwerp gerealiseerd worden. Deze ruimte ontstaat doordat per 1000 stks minder kosten gemaakt worden omdat sommige productiemiddelen door meerlagenteelt efficiënter worden gebruikt:

- 1) Grond
- 2) De kas/cel/teeltruimte
- 3) Energie

In de schatting van de jaarlijkse investeringsruimte wordt er van uitgegaan dat alle overige kosten evenredig met de productie toenemen. Dit zijn kosten als meststoffen, containers, eb/vloed trays, arbeid, etc. etc. In vergelijking met éénlaagsteelt op 2000 m² in een kas neemt de productie met meerlaagsteelt 2.0 dermate toe, nl. van 6,4 naar 57,2 miljoen stelen, dat dit allerlei investeringen in verdere automatisering en robotisering ook rendabel maakt waardoor met name de arbeidsproductiviteit sterk toeneemt ook sterk en de arbeidskosten per steel verlaagd worden. In de schatting van de jaarlijkse investeringsruimte, tabel 3, is hiermee geen rekening gehouden.

Tabel 3: Schatting van de jaarlijkse investeringsruimte

		Eén laags	Huidig meerlaags	Nieuw ontwerp V2*	Balans ventilatie 2	Warmte pomp 2
netto grondoppervlak	m ²	2000	2000	2000	2000	2000
netto teeltoppervak	m ²	2000	6000	18000	18000	18000
grond	€	12.375	12.375	12.375	12375	12375
teeltruimte	€	27.720	41.580	55.440	55440	55440
overige middelen	€	417.569	1.252.706	3.758.118	3.758.118	3.758.118
arbeid	€	240.116	720.348	2.161.044	2.161.044	2.161.044
energie	€	37.067	56.900	146.315	97.543	87.789
totaal	€	734.846	2.083.909	6.133.292	6.084.520	6.074.766
productie	mln	6,4	19,1	57,2	57,2	57,2
kostprijs per 1000	€	115,7	109,3	107,3	106,4	106,2
jaarlijkse investeringsruimte	€		121.787	483.797	532.568	542.323

*V2 = bij verdampingsscenario 2: 1,5 l/m²/dag.

Een vergelijking met de schatting van de jaarlijkse kosten, tabel 4, laat zien dat deze ruim onder de jaarlijkse investeringskosten blijven. E.e.a. berust op zeer grove schattingen.

Tabel 4: schatting belangrijkste jaarlijkse* investeringskosten

	Eén laags	Huidig meerlaags	Buiten lucht 2	Balans ventilatie 2	Warmte pomp 2
Sluven, ventilatoren, warmtewisselaars	0	32.400	97.200	97.200	97.200
Warmteterugwinning	0			97.200	97.200
Warmtepomp ontvochtiging	0				13.500
Totaal	0	32.400	97.200	194.400	207.900

* bij afschrijving in 8 jaar, onderhoud 2,5%, rente 6%.

6 Conclusies en Aanbevelingen

De rookproeven en debietmetingen laten zien dat over de gehele lengte van de slurven per gaatje evenveel lucht naar buiten komt. Deze lucht komt direct tot *in* het gewas. Daarna volgt een beweging omhoog, tussen de containerbanen door, waarna de lucht zich verspreidt boven de bovenste laag. Deze verticale beweging wordt veroorzaakt door drukverhoging boven de onderste laag door luchtaanvoer via de slurven, *en* doordat warmere lucht lichter is dan koele lucht en doordat vochtigere lucht lichter is dan drogere lucht. De luchtbeweging boven de bovenste laag is horizontaal en wordt bepaald door de klepstand van de LBK en/of de ventilatorstand. Bij 100% buitenlucht is er geen horizontale beweging, bij 100% kaslucht en de ventilator op 100% is veel horizontale beweging.

Opvallend bij vooral de LBK systemen is dat boven de onderste laag vrijwel geen horizontale luchtbeweging was waar te nemen.

Een punt van aandacht bij verwarmen via de slurven met de LBK is dat hoewel droge lucht perfect gelijkmatig verdeeld wordt tot in het gewas, warmte meer aan het begin van de slurf wordt afgegeven dan aan het eind. Dit zou boven de onderste laag tot horizontale temperatuurverschillen kunnen leiden. Vooral als er geen horizontale luchtbeweging is.

De berekeningen laten zien dat bij een verdamping tot $0,5 \text{ l/m}^2/\text{dag}$ en ventilatie met buitenlucht het broeien in 6 lagen met LED's in een totaal gesloten ruimte het energieverbruik terugbrengt tot onder de 150 MJ/1000 stks. Wordt er meer verdampt, nl. $1,5 \text{ l/m}^2/\text{dag}$ dan is broeien in 6 lagen met buitenluchtventilatie nauwelijks energiezuiniger dan de huidige MLT-systemen van 2 tot 3 lagen in een schuurkas: $\pm 300 \text{ MJ/1000 stks}$.

Wordt in het geval van een verdamping van $1,5 \text{ l/m}^2/\text{dag}$ balansventilatie toegepast, zodat 80% van de warmte van de uitgaande lucht teruggewonnen kan worden, dan wordt het energieverbruik teruggebracht naar 200 MJ/1000 stks. Toepassing van een warmtepomp om daarmee te ontvochtigen brengt het energieverbruik iets verder terug tot 180 MJ/1000 stks.

Hoe sterker ontvochtigd moet worden (b.v. tot een RV van 70% i.p.v. 80%), hoe gunstiger het wordt om balansventilatie of een warmtepomp toe te passen. Anderzijds, hoe hoger de toelaatbare RV hoe kleiner het verschil in energiekosten met buitenluchtventilatie. Voor een gewas als snijhyacint is balansventilatie niet nodig.

In het systeem Buitenlucht en in het systeem Balansventilatie is een luchtdebiet van 50 tot $110 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{grond}$ per uur bijna altijd voldoende. Bij het systeem met de warmtepomp is een debiet van 30 tot $70 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{grond}$ per uur bijna altijd voldoende. Gedurende ongeveer 250 uur per seizoen is bij beide systemen een hoger debiet gewenst, nl. respectievelijk maximaal 170 en $120 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{grond}$.

Als maximaal verwarmingsvermogen is waarschijnlijk 650 W/m^2 grond bij systeem Buitenlucht voldoende, bij Balansventilatie is dat 350 W/m^2 grond.

Wanneer de slurven alternerend zijn opgesteld, zodat het eindpunt van een (afgeplatte) slurf naast het beginpunt van de volgende (parallele) slurf is gepositioneerd, wordt warmte gelijkmatig over het teeltoppervlak verdeeld en kan buisverwarming achterwege gelaten worden.

In een totaal gesloten teeltruimte is het voor de verschillende tulpencultivars onbekend wat de minimale verdamping moet zijn om kiepers e.d. te voorkomen en om een kwalitatief fors gewas te krijgen. Aanbeveling is daarom dit voor de verschillende cultivars goed in kaart te brengen, zodat de installaties voor ventilatie, verwarming, slurven etc. niet over gedimensioneerd worden en niet meer ontvochtigd wordt dan nodig is. Het effect van dit laatste op energiebesparing is erg groot.

Bijlage 1: Modelopzet

De warmtebalans van de teeltruimte ziet er als volgt uit:

$$Q_{lamp} + Q_{verwarming} = Q_{omhulling} + Q_{ventilatie} + Q_{verdamping}$$

met:

$$Q_{omhulling} = k_{omhulling} A_{omhulling} (T_{in} - T_{out}) \quad [W/m^2]$$

waarin:

k = k-waarde van de omhulling $[W/m^2K]$

A = oppervlak van de omhulling $[m^2]$

T_{in} = binnentemperatuur $[^{\circ}C]$

T_{out} = buitentemperatuur $[^{\circ}C]$

Bij ventilatie met buitenlucht, wordt de warmte die door ventilatie verloren gaat berekend uit:

$$Q_{ventilatie} = \phi (h_{sens,in} - h_{sens,out}) \quad [W/m^2]$$

waarin:

ϕ = luchtdebiet $[m^3/(m^2s)]$

$h_{sens,in}$ = voelbare energie van de binnenlucht

$h_{sens,out}$ = voelbare energie van de buitenlucht

Bij gebruik van een balansventilatiesysteem, wordt een deel van de voelbare warmte teruggewonnen, afhankelijk van het rendement van de warmtewisselaar (η_{ww}):

$$Q_{ventilatie} = (1 - \eta) \phi (h_{sens,in} - h_{sens,out})$$

Het ventilatiedebiet (ϕ) wordt bepaald uit:

$$\phi = \text{verdamping} / (x_{in} - x_{out}) \quad [m^3/s]$$

waarin:

verdamping = constant $[kg/(m^2s)]$

x_{in} = absolute luchtvochtigheid binnen $[kg_{vocht}/m^3_{lucht}]$

x_{out} = absolute luchtvochtigheid buiten $[kg_{vocht}/m^3_{lucht}]$

$$Q_{verdamping} = \text{constant} \quad [W/m^2]$$

$$Q_{lamp} = \text{constant} \quad [W/m^2]$$

Door de toepassing van een warmtepomp voor het drogen van de lucht, wordt deze set vergelijkingen uitgebreid met:

$$Q_{wp,voelbaar} + Q_{lamp} + Q_{verwarming} = Q_{omhulling} + Q_{ventilatie} + Q_{verdamping}$$

waarin:

$Q_{wp,voelbaar}$ = verwarming van de lucht door de warmtepomp

$Q_{wp,voelbaar}$ wordt berekend door het elektrisch vermogen te vermenigvuldigen met de COP aan de warme zijde:

$$Q_{wp,voelbaar} = Q_{wp,elek} / COP_{warm}$$

Het elektrisch vermogen wordt berekend uit de hoeveelheid vocht die uit de lucht gehaald moet worden. Hierbij wordt uitgegaan van een verhouding tussen voelbare en latente energie van 1:1, wat betekent dat voor iedere kg water die uit de lucht gecondenseerd wordt, 2 keer de verdampingsenergie gebruikt moet worden.

Om te voorkomen dat een warmteoverschot in de teeltruimte ontstaat, wordt een deel geventileerd met buitenlucht (ϕ). De hoeveelheid buitenlucht wordt iteratief bepaald, zodanig dan de additionele verwarmingsvraag ($Q_{verwarming}$) minimaal is. Het elektrisch vermogen wordt berekend als volgt:

$$Q_{wp,elek} = 2 * r (verdamping - \phi (x_{in} - x_{out}))$$

waarin:

r = verdampingswarmte van water ($2,45 * 10^6$) [J/kg]

Uitgegaan is van 25925 tulpen per m^2_{grond} per seizoen; (400 tulpen/ m^2_{teelt} , 8 trekken/seizoen, 18000 $m^2_{teeltoppervlak}$, 2222 $m^2_{grondoppervlak}$).

Bijlage 2: Bijeenkomst Meerlagenbroeiers

Meerlagenteelt tulp

Bas Speetjens
Jeroen Wildschut
Jouke Campen



Inhoud

- Achtergrond
- Uitgangspunten
- Resultaten van model simulaties
- Systeem ontwerp
- discussie



Achtergrond

- Telen in meerdere lagen spaart energie
→ 60% besparing (Wildschut, 2013)
- Telen in een kas geeft inhomogeen klimaat (bovenste laag heeft dag/nacht variatie)
- Luchtinblaas systemen zijn nodig voor ontvochtiging. Echter, deze kunnen ook zorgen voor inhomogeen klimaat.



Uitgangspunten

Doel:

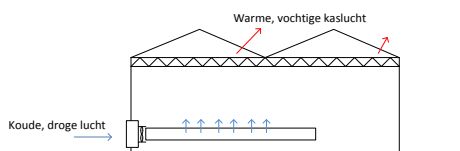
Ontwerp een "meerlagenteeltsysteem van de toekomst"

- Laag energie gebruik
 - Energie-efficient ontvochtigen
 - Gelijkmatige lichtverdeling mbv LED lampen
- Goede teeltomstandigheden
 - Minder uitval van bloemen
 - Goede regeling van temperatuur en vochtigheid



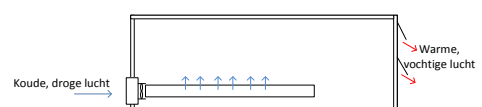
Variant 1: 6 lagen in kas

- Glazen kas
- Ontvochtiging door inblaas van buitenlucht
- LED belichting op onderste lagen, bovenste laag heeft zonlicht



Variant 2: 6 lagen in geïsoleerd gebouw

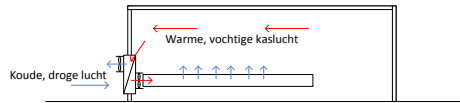
- Geïsoleerd gebouw
- Ontvochtiging door inblaas van buitenlucht
- LED belichting op alle lagen



Variant 3: 6 lagen in geïsoleerd gebouw

Balansventilatie

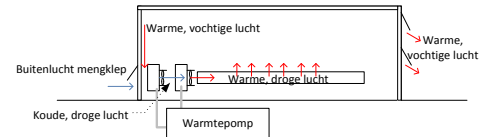
- Koude buitenlucht wordt opgewarmd door afgevoerde warme binnenlucht
- 80% van voelbare warmte wordt teruggewonnen



Variant 4: 6 lagen in geïsoleerd gebouw

Actieve ontvochtiging

- Lucht wordt gekoeld, en vocht condenseert. Daarna weer opgewarmd en teruggeblazen in gebouw
- Geen verversing met buitenlucht
- Latente warmte uit de lucht wordt teruggewonnen



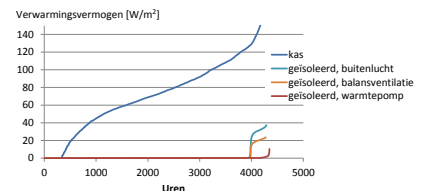
Aannames voor model

- 6 teeltlagen
- 3 compartimenten:
 - 1: geen licht
 - 2: 10mmol/m²/s (=4.3W/m²), 16uur *per laag*
 - 3: 30mmol/m²/s (=13 W/m²), 22 uur *per laag*
- Klimaat: 16°C, 80% RV
- Teeltseizoen van 1 dec – 1 april
- Ruimte verdeling tussen de compartimenten:

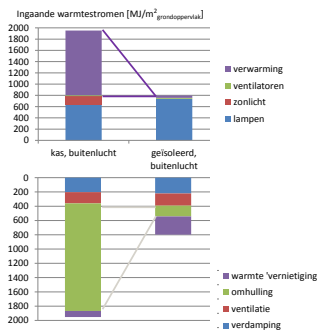
	[m ² compartiment/m ² kas]
compartiment 1	0.2
compartiment 2	0.3
compartiment 3	0.5

Voordeel van geïsoleerd gebouw

- Een kas verlies erg veel warmte door het glas
- Warmte verlies door een geïsoleerd gebouw is een factor 10 lager
kas zonder scherm: 1500MJ (47m³/m²gas)
gebouw: 150MJ

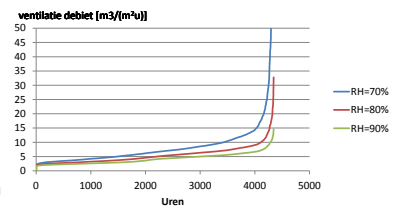


Warmte balans



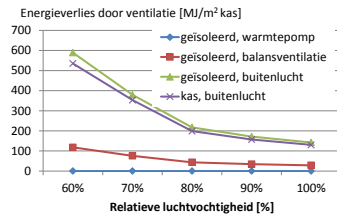
Invloed van luchtvochtigheid (1)

- Hoe lager de RV moet zijn, hoe meer ventilatie nodig is om de lucht te drogen



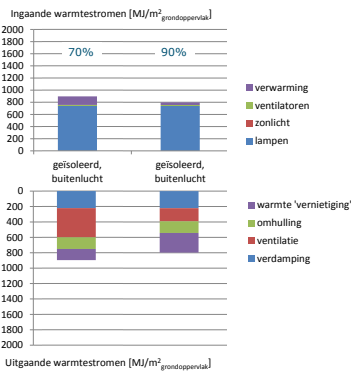
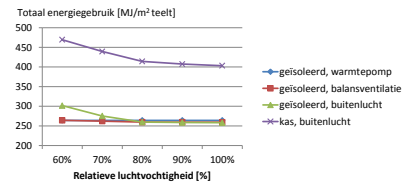
Invloed van luchtvochtigheid (2)

- Meer ventilatie = hoger energieverbruik
- Bij lagere RV, is een energiezuinig ontvochtigingssysteem interessanter



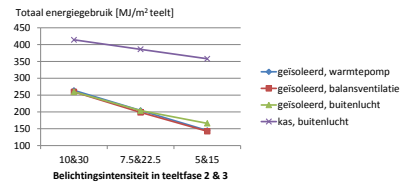
Invloed van luchtvochtigheid (3)

- Echter, het totale energieverbruik daalt weinig, doordat de lampen veel warmte afgeven



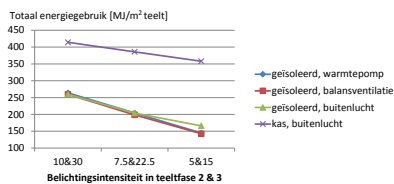
Invloed van belichtingsintensiteit

- Lagere belichting geeft een reductie van energieverbruik
- Bij lagere belichting worden energie-efficiënte ontvochtigingssystemen interessant



Invloed van belichtingsintensiteit

- Lagere belichting geeft een reductie van energieverbruik
- Bij écht lagere belichting worden energie-efficiënte ontvochtigingssystemen interessant



Voorlopige conclusies (1)

- Een geïsoleerd gebouw is veel energiezuiniger dan een kas
- De lampen verwarmen de lucht voldoende om het gebouw op temperatuur te houden
- Bij $T=16^{\circ}\text{C}$, $RV=80\%$ is een energiezuinige ontvochtigingsinstallatie niet besparend (doordat lampen veel warmte afgeven)

Energie input voor de verschillende systemen

	huidige meerlagenteelt	6 lagen, kas	6 lagen, geïsoleerd gebouw
primaire energie [$\text{MJ}/\text{m}^2 \text{ teelt}$]	875	407	259
gas [$\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ teelt}$]	21	6.1	0.22
elektriciteit [$\text{kWh}/\text{m}^2 \text{ teelt}$]	23	30	35.0

Voorlopige conclusies (2)

- Een energiebesparende ontvochtigingsinstallatie wordt interessant bij:
 - Lage belichtingsintensiteit
 - Lage RV in teeltruimte



Ontwerp

- 2 uitdagingen:
 - Lucht
 - Licht



Licht

- Gebruik van lampen

- Led
- TL
- Organische led



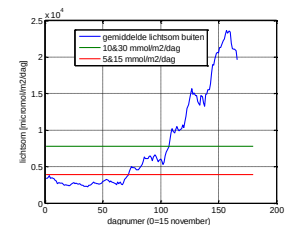
- Gebruik van zonlicht

- Geïsoleerde kas
- Licht geleiden naar onderliggende lagen
- Kas met open zijanten

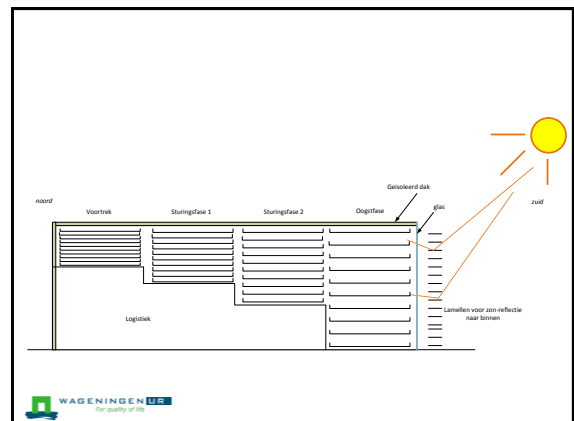
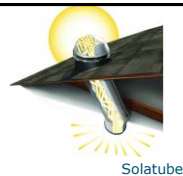


Daglicht gebruiken

- De lichtsom buiten is 50% van de tijd voldoende om de 6 lagen te belichten
teelfase 1=donker; 2= $10 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$; 3= $30 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$;
- Elektra is te besparen als zonlicht goed en gelijkmatig in de teeltruimte is te verdelen



Daglicht verdeelsystemen



Luchtverdeelsysteem

Eisen:

- Gelijkmatische verdeling van droge lucht
- Homogene verwarming / koeling
- Kleine inbouwhoogte, zodat 6 laags teeltsysteem mogelijk is



Luchtverdeelsysteem

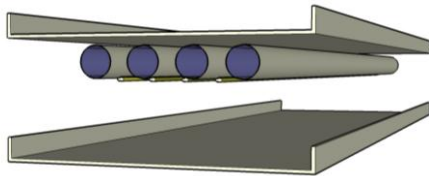
Mogelijke uitvoeringsvormen:

- Meerdere kleine slangen
- Kanaal, gevormd door 'slang met trekdraden'
- Alleen een geperforeerd plafond



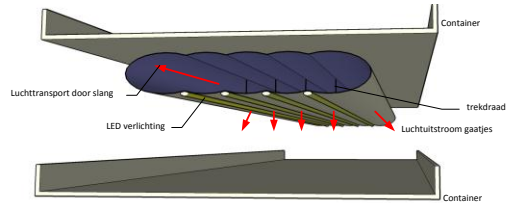
Luchtverdeelsysteem

- **Meerdere kleine slangen**
- Kanaal, gevormd door 'slang met trekdraden'
- Alleen een geperforeerd plafond



Luchtverdeelsysteem

- Meerdere kleine slangen
- **Kanaal, gevormd door 'slang met trekdraden'**
- Alleen een geperforeerd plafond



Luchtverdeelsysteem

- Meerdere kleine slangen
- Kanaal, gevormd door 'slang met trekdraden'
- **Alleen een geperforeerd plafond**

