

Van Mourik Broekmanweg 6
Postbus 49
2600 AA Delft

www.tno.nl

T +31 15 276 30 00

F +31 15 276 30 23

TNO-rapport**TNO-060-DTM-2011-00351****Aanvullende klimaatmetingen bij Themato in een
tomatenkas met onderbeluchting**

Datum	14 februari 2011
Auteur(s)	ing. B. Knoll
Opdrachtgever	Themato Advies namens het ministerie LNV en het Productschap Tuinbouw
Projectnummer	034.22900
Rubricering rapport	
Titel	
Samenvatting	
Rapporttekst	
Bijlagen	
Aantal pagina's	71 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	

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.

Samenvatting

Themato B.V. heeft het open gedeelte van een kas uitgerust met luchtslangen onder het gewas. Daarmee kan buitenlucht voorverwarmd worden ingebracht en kaslucht worden gecirculeerd. In combinatie met de bestaande raamluchting en buisverwarming wordt een efficiëntere ventilatie, gelijkmatiger klimaatopbouw en lager energiegebruik nagestreefd.

Om dit systeem te evalueren, is door Themato Advies een raamproject uitgevoerd, in het kader van het 'versnellingsprogramma gesloten kas' van het Productschap Tuinbouw en het Ministerie van LNV. De klimaatmetingen die in dit rapport worden beschreven zijn hiervan een onderdeel. Het betreft metingen van begin januari tot medio april 2010, die een vervolg zijn op het voorgaande seizoen. Onderscheidend ten opzichte van de registraties in 2009 zijn:

- Een diepgaander beschouwing gedurende de winter en het vroege voorjaar;
- De werking in combinatie met een dubbel scherm in de winter;
- Het volledig operationele systeem en beter uitgekristalliseerde regeling.

Ventilatie

Bij koude winterse omstandigheden wordt de kas niet geventileerd en wordt de ventilatiefunctie van de luchtslangen niet gebruikt.

De slangventilatie wordt ingezet zodra de relatieve vochtigheid in de kas oploopt. Bij veel zon kan dat al optreden net boven het vriespunt en bij weinig zon is dat boven de gemiddelde stookseizoencondities (buitentemperaturen > 5 à 10°C). Het slangdebiet loopt behalve met de RV in de kas ook op met de zonintensiteit en buitentemperatuur.

Naast de luchtslangen worden de luchtramen steeds meer ingezet naarmate de buitencondities milder worden. Het is opmerkelijk dat dit meer gelijktijdig dan na elkaar plaatsvindt. De luchtslangen zijn immers bedoeld om de kas beter gedoseerd en gelijkmatiger te luchten dan met de ramen mogelijk is. Een opvolgende ventilatieregeling zou daarom meer voor de hand liggen.

Een gelijkmatiger ventilatieverdeling boven en onder in het gewas kan een reden zijn voor het veelal gelijktijdig gebruiken van slangen en ramen. Door de gelijkmatiger luchting kunnen de luchtslangen functioneren als energiezuinige vervanger van een minimum buis tussen het gewas.

Dat de luchtslangen mede worden ingezet voor het afvoeren van warmte lijkt minder logisch, omdat de capaciteit van de raamluchting veel groter is en bovendien geen ventilatorenergie kost. De slangen kunnen echter een rol spelen bij een beperkte behoefte aan warmteafvoer en ter nivellering van verticale temperatuurverschillen.

Temperatuur

Afgezien van voor de teelt gewenste etmaalvariëaties blijkt de temperatuur in de kas aanzienlijk te variëren met de buitentemperatuur en de zonintensiteit. Daarnaast is sprake van grote temperatuurgradiënten, vooral in horizontale richting.

Er blijkt vooral sprake te zijn van temperatuurverlopen over de kaplengte. Bij de winterse condities daalt de temperatuur vanaf het middenpad naar de gevel. De temperatuurgradiënt per m is in de gevelzone nog iets sterker dan over de rest van de

kaplengte. Dit temperatuurverloop is gedurende 15% van de registratieperiode nog groter geweest dan 5 K en 1% van de tijd zelfs groter dan 9 K.

De gradiënt blijkt een functie te zijn van de buitentemperatuur. Het ontstaan ervan wordt toegeschreven aan een natuurlijke luchtbeweging ten gevolge van plaatselijke temperatuurverschillen in de kas (thermische wervel). Moderne energiezuinige kassen worden hiervoor extra gevoelig geacht vanwege:

- hun grote kaplengte (afschot),
- de toepassing van schermen (extra koude luchtlaag), in het bijzonder met veel gaatjes (luchtlek),
- vrije ruimte voor luchtstromingen boven en onder het gewas (geringe stromingsweerstand),
- stoken op lage temperatuur (nauwelijks concurrerende luchtstromingen boven hete buizen).

Het gebruik van de luchtslangen in circulatiestand (concentreren van luchtaanzuiging in de gevelzone) kan de horizontale gradiënt in principe bevorderen, maar dat effect blijkt niet aantoonbaar groot te zijn.

Wel is aangetoond dat de horizontale gradiënt positief kan worden beïnvloed door het creëren van een scheve luchtverdeling over de slang, met relatief meer luchtinblaas in het deel dicht bij de gevel. De luchtslangen worden ook geacht een positieve invloed uit te kunnen oefenen door het inblazen van beperkte debieten met hoge temperatuur of door meer op ventilatiestand te draaien, zodat overdruk over de schermopeningen ontstaat. Dit laatste zal echter ten koste gaan van de energiezuinigheid en de RV verlagen als dit niet is gewenst.

Verticale temperatuurgradiënten blijven in de winter beperkt. Ze vertonen vooral een relatie met de zonintensiteit (gelaagdheid). Onderin blijft het overdag kouder, maar in de nacht is dit juist andersom. Het gaat om betrekkelijk kleine verschillen.

Vocht

De relatieve vochtigheid van de kaslucht blijkt regelmatig hoog op te lopen tot zelfs waarden ruim boven 95%. De RV's zijn hoger als in de nacht de temperaturen dalen, of onderin het gewas, waar overdag de temperaturen lager blijven. Daarom is opmerkelijk dat in de winter hoge RV's meer naar het middenpad optreden, waar de temperaturen hoger zijn. Dit hangt vermoedelijk samen met het opbouwen van de vochtconcentratie in de eerder genoemde natuurlijke wervel over de kaplengte.

Luchtbeweging blijkt voornamelijk plaatselijke verschillen in RV over de kaplengte te kunnen verminderen. Verschillen in RV over de hoogte blijken vooral op te lopen bij meer zon.

Luchtbeweging stimuleert anderzijds de vochtafgifte. Verschillen in absolute vochtigheid tussen binnen en buiten blijken daardoor toe te nemen. Dit kon overigens alleen bij weinig ventilatie worden aangetoond.

De absolute vochtigheid in de kas is in de winter het laagst van het jaar. Ventilatie is dan niet wenselijk en de slangluchting kan alleen een rol spelen in de vorm van voornoemde luchtbeweging.

Maart en oktober blijken de absoluut vochtigste maanden van het jaar te zijn. Het ontstaan van vochtverschillen is bij die mildere buitenomstandigheden sterk afhankelijk van de zonstraling en de daarmee samenhangende verdamping. Ventilatie blijkt vooral in die periode een belangrijke stuurgrootte om de verschillen in absoluut vocht te beheersen.

Luchtbeweging

De luchtbeweging kon niet op zoveel plaatsen worden gemeten als de temperaturen en RV's. Bovendien bleek een deel van de sensoren te zijn aangetast. Daarom moesten correcties worden toegepast op een deel van de meetgegevens en konden de metingen slechts worden gebruikt om trends vast te stellen.

Hoewel bijvoorbeeld een invloed van de luchtbeweging op vochtverschillen kon worden aangetoond, is de rol van de luchtslangen daarin niet duidelijk dominant. Raamluchting, zoninstraling, verwarming en scherming zijn ook van invloed op de uiteindelijke luchtbeweging. De waarneembare trends zijn dat bij kouder weer de luchtsnelheden groter worden en dat meer zon de luchtsnelheden enigszins onderdrukt, doordat een stabiele thermische gelaagdheid ontstaat.

Er lijkt wel sprake van voorkeursplekken voor hogere luchtsnelheden in het gewas, die zijn toe te wijzen aan de worp van de luchtslangen. Om dit soort verschillen te beperken is een fijnere verdeling van de luchtslangen aan te bevelen.

Energie

De stookbehoefte blijkt maar zeer beperkt op te lopen met het temperatuurverschil tussen binnen en buiten. Dit is toe te schrijven aan toenemend schermen en verlaging van de kasttemperatuur als het buiten kouder is. De warmteverliezen door transmissie en condensatie blijken hierdoor ook maar beperkt te variëren.

De ventilatieverliezen variëren wel sterk met de buitencondities, maar zijn juist bij koude beperkt. De bijdrage van ventilatie in de stookbehoefte wordt vooral belangrijk in voor- en najaar en wordt dan zelfs dominant.

De stookbehoefte blijkt wel lager te worden bij meer zon, maar loopt niet sterk terug, omdat zon de verdamping stimuleert. Voor de vochtregulatie neemt dan tegelijk het ventilatieverlies toe.

Ook het transmissieverlies neemt bij zon enigszins toe, omdat minder wordt geschermd en er een groter temperatuurverschil tussen binnen en buiten wordt aangehouden.

In de beschouwde winter- en voorjaarsperiode heeft zon ruim de helft van het warmteverlies gedekt. Het overige is het stookaandeel, waarvan 80% door de buisrail is geleverd.

De geringe warmtebijdrage van de luchtslangen is nadelig voor het energiezuinig verwarmen met zo laag mogelijke temperatuur (streven naar hoge COP), maar wellicht gewenst om geen ongelijkmatige warmteverdeling door de luchtslangen te krijgen. Er is dus behoefte aan luchtslangen die een gelijkmatige lucht- en warmtedistributie kunnen combineren.

De warmte die in het verdampen van vocht gaat zitten, maakt gemiddeld 30% uit van het totale warmteverlies. De post, die vooral met ventilatie wordt gereguleerd, wordt belangrijker in het mildere deel van het stookseizoen.

Transmissie blijkt in de registratieperiode de belangrijkste verliespost te zijn geweest. Het ventilatieverlies was ongeveer 70% daarvan, maar wordt met inbegrip van het overige deel van het stookseizoen belangrijker. De rol van condensatie in het warmteverlies was beperkt. Voor verdere besparingen zal het accent dus vooral op dek en schermen moeten liggen, alsmede op zuiniger ventilatie, c.q. methoden van vochtbeheersing.

CO₂-concentraties

In het voorjaar van 2010 blijken de CO₂-concentraties ruim hoger te hebben gelegen dan in de vergelijkbare periode het jaar er voor. Dit wordt toegeschreven aan de toepassing van een dubbel scherm, waardoor een conservatiever ventilatieregime mogelijk was. Dat het in 2010 kouder was en er daarom dus minder zal zijn geventileerd blijkt hierop nauwelijks van invloed te zijn geweest.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
1	Inleiding.....	7
2	Werkzaamheden.....	8
3	Meetresultaten	9
4	Analyse	15
4.1	Ventilatie	15
4.2	Temperatuur	21
4.3	Vocht	30
4.4	Luchtbeweging	37
4.5	Energie	43
4.6	CO ₂	58
5	Bespreking.....	63
5.1	Ventilatie	63
5.2	Temperatuur	63
5.3	Vocht	65
5.4	Luchtbeweging	66
5.5	Energie	66
5.6	CO ₂	68
6	Conclusies en aanbevelingen	69
7	Referenties.....	71

1 Inleiding

Themato B.V. heeft het “open” gedeelte van hun kas uitgerust met een nieuw ontwikkelde luchtbehandelingsinstallatie ‘Climate Optimizer’. Dit systeem kan via luchtslangen onder het gewas ventileren of circuleren, waarbij de lucht kan worden verwarmd. De behandelde buitenlucht of kaslucht wordt in een gewenste mengverhouding en volumestroom ingeblazen onder de planten.

In combinatie met de bestaande raamluchting en buisverwarming wordt een efficiëntere ventilatie en gelijkmatiger klimaatopbouw nagestreefd. Tevens kan door de extra warmteafgifte via de luchtslangen meer met laag-thermische warmte worden geklimatiseerd. Met het nieuwe systeem wordt daarom energiebesparing en een betere teeltsturing verwacht.

Tijdens de teelt van 2009 zijn door TNO metingen aan het kasklimaat uitgevoerd [1]. In dit rapport wordt de werking van het systeem tevens nader toegelicht.

Door kinderziekten was het nieuwe type installatie in de winterperiode en het vroege voorjaar nog niet 100% functioneel. Dit had niet alleen te maken met de uitvoering, maar ook met het leren omgaan met het systeem (instelling van de regeling). Door late levering van meetapparatuur kon de periode bovendien slechts beperkt in beeld worden gebracht. Daarom is besloten de metingen nog tijdens de vergelijkbare periode van de volgende teelt door te zetten. Dit rapport beschrijft deze aanvullende metingen.

Onderscheidend ten opzichte van de registraties in 2009 zijn:

- Het optimale gebruik van buitenluchtaanzuiging met het volledig operationele systeem en beter uitgekristalliseerde regeling;
- De diepgaande beschouwing van de teelt gedurende de winter en het vroege voorjaar;
- Het gebruik van een dubbel scherm in plaats van een enkel scherm in de winter als bijpassende besparingsmaatregel.

De klimaatmetingen zijn een onderdeel van een groter raamproject van Themato Advies, in het kader van het ‘versnellingsprogramma gesloten kas’ van het Productschap Tuinbouw en het Ministerie van LNV. Naast de klimaatmetingen zijn een nadere analyse van het energiegebruik en een globale beschouwing van de teeltresultaten opgenomen in dit raamproject.

2 Werkzaamheden

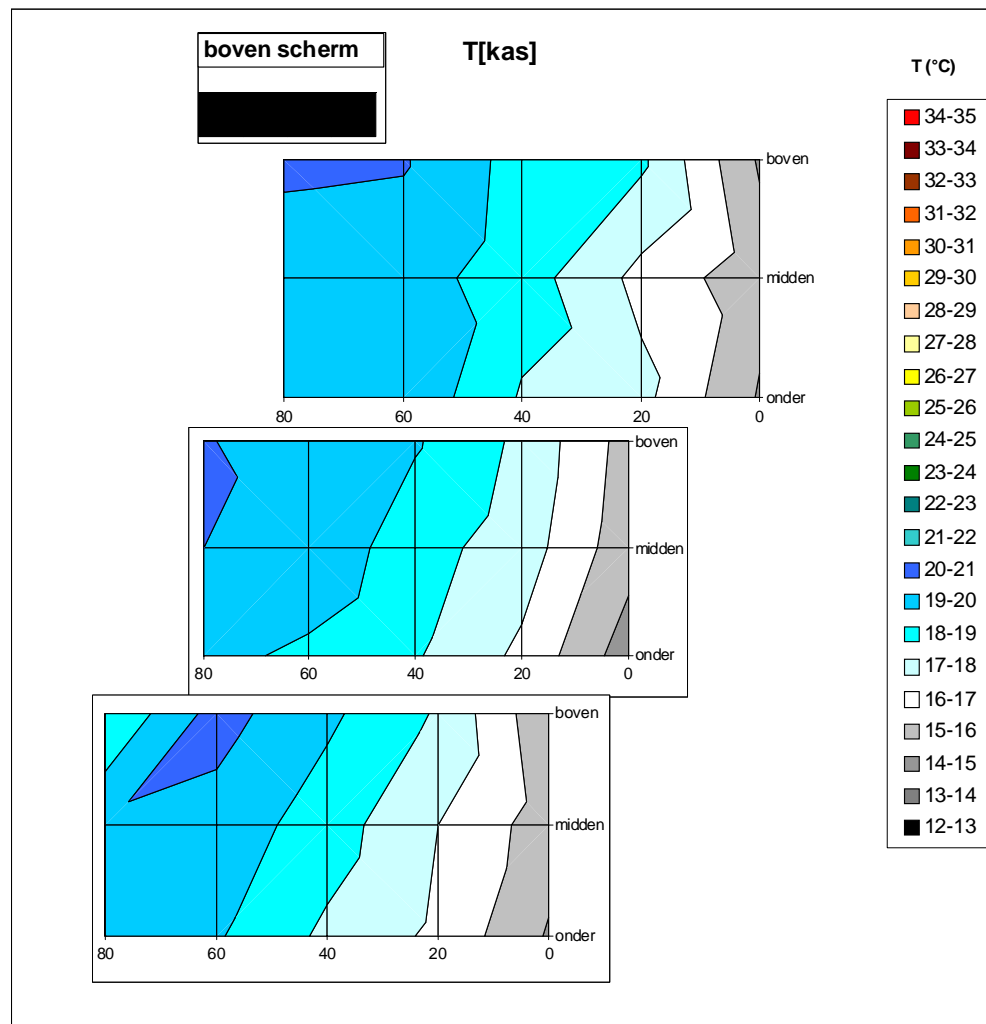
De klimaatregistraties zijn vergelijkbaar met die in het voorafgaande project [1]. Momente klimaatmetingen zijn in dit project achterwege gelaten, omdat in het eerdere project voldoende detailinformatie over de werking was verzameld. Het accent heeft vooral gelegen op de analyse van de metingen ten aanzien van vochtinhouding, luchtbeweging en temperatuurbeheersing. Daarnaast is aandacht geschonken aan het effect op de CO₂-concentraties. Tevens is nader ingegaan op de betekenis voor de energiehouding, ter ondersteuning van het onderdeel energie in het raamwerkproject.

De registraties hebben plaatsgevonden van begin januari tot eind april 2010. De gegevens zijn maandelijks uitgelezen en verzameld. Hierbij bleek dat het laatste deel van april een storing is opgetreden in het overbrengen van de meetgegevens, zodat de bruikbare meetgegevens tot medio april beslaan.

De klimaatregistraties zijn evenals in het voorafgaande project gecombineerd met gegevens van de klimaatcomputer over dezelfde periode.

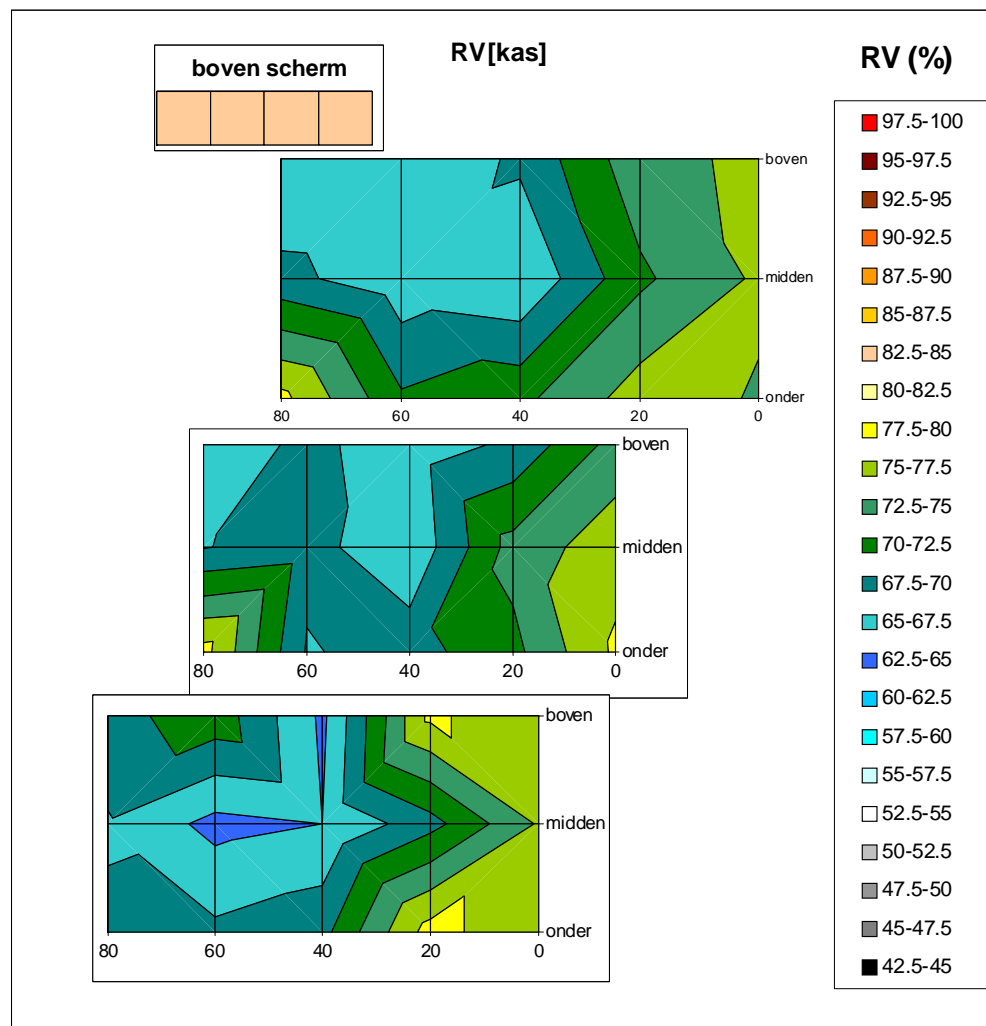
3 Meetresultaten

De veelheid aan meetgegevens is verwerkt in rekenbladen om de resultaten in samenhang te kunnen presenteren. Figuur 1 geeft het temperatuurbeeld op het middaguur van een typische winterdag in de drie naast elkaar liggende meetdoorsneden (evenwijdig aan de paden). Figuur 2 geeft de bijbehorende relatieve vochtigheden.



Figuur 1 Luchttemperaturen in drie meetdoorsneden op 8 januari 2010 om 12:00 h

In het temperatuurbeeld is duidelijk te zien dat er in de winterse omstandigheden grote temperatuurverschillen over de kaplengte kunnen ontstaan.



Figuur 2 Relatieve luchtvochtigheden in drie meetdoorsneden op 8 januari 2010 om 12:00 h

Het beeld van de relatieve vochtigheden vertoont overeenkomsten met het hiervoor getoonde, bijbehorende temperatuurbeeld. Het verloop over de kaplengte is echter minder geprononceerd. De vochtigheden vertonen tevens een zeker verloop met de hoogte.

Figuren 1 en 2 tonen de situatie op het middaguur van 8 januari.

Figuur 3 geeft voor die dag de etmaalverlopen van de temperaturen per meetpunt.

Figuur 4 toont de overeenkomstige etmaalverlopen van de relatieve vochtigheden.

Van boven naar beneden zijn de meetpunten vanaf de gevel naar het middenpad.

Van links naar rechts betreft de drie meetdoorsneden evenwijdig aan de paden.

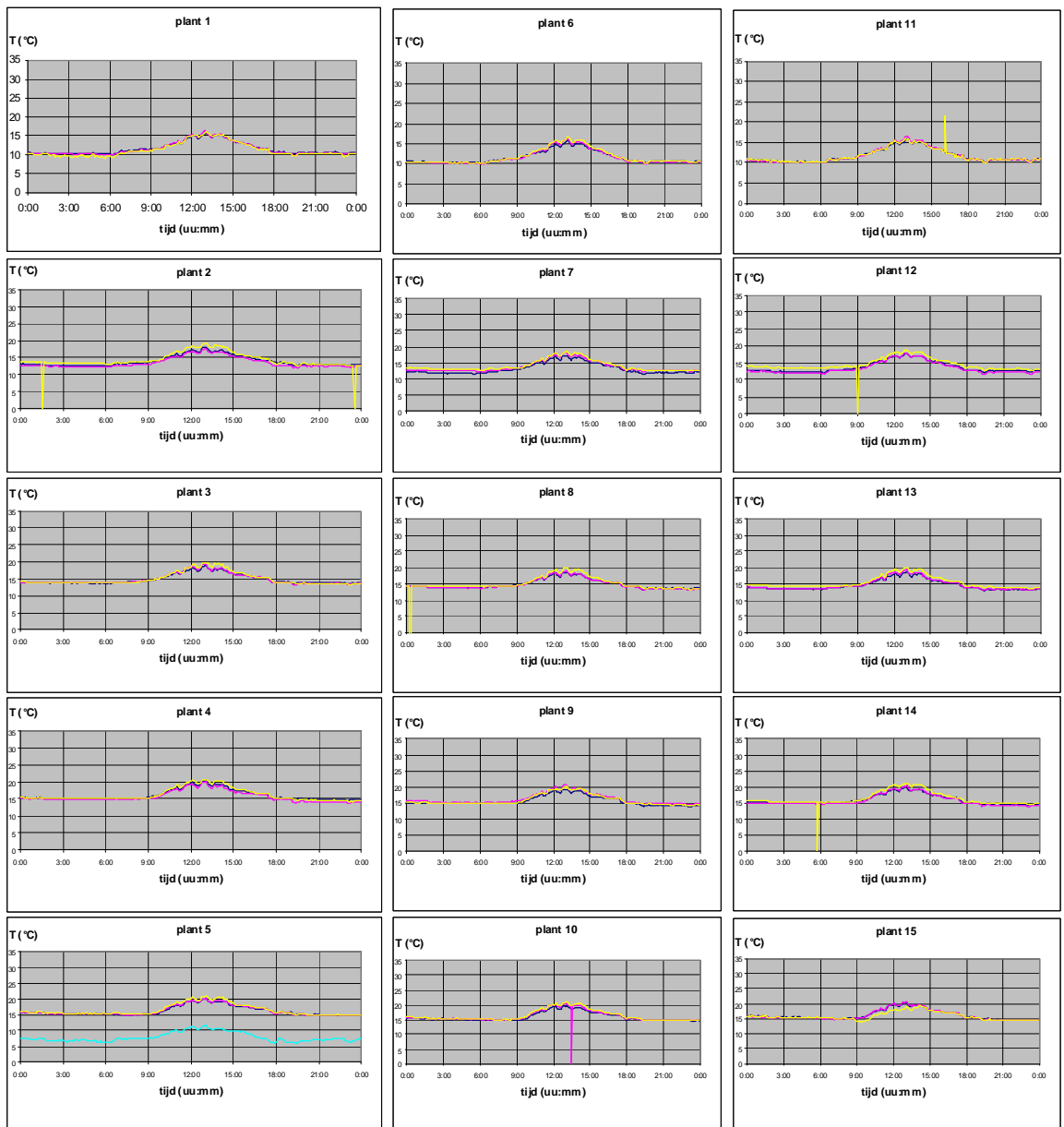
Per grafiek worden drie lijnen getoond voor de drie meethoogten.

Bij de temperaturen van plant 5 wordt een extra lijn getoond voor de temperatuur boven het scherm.

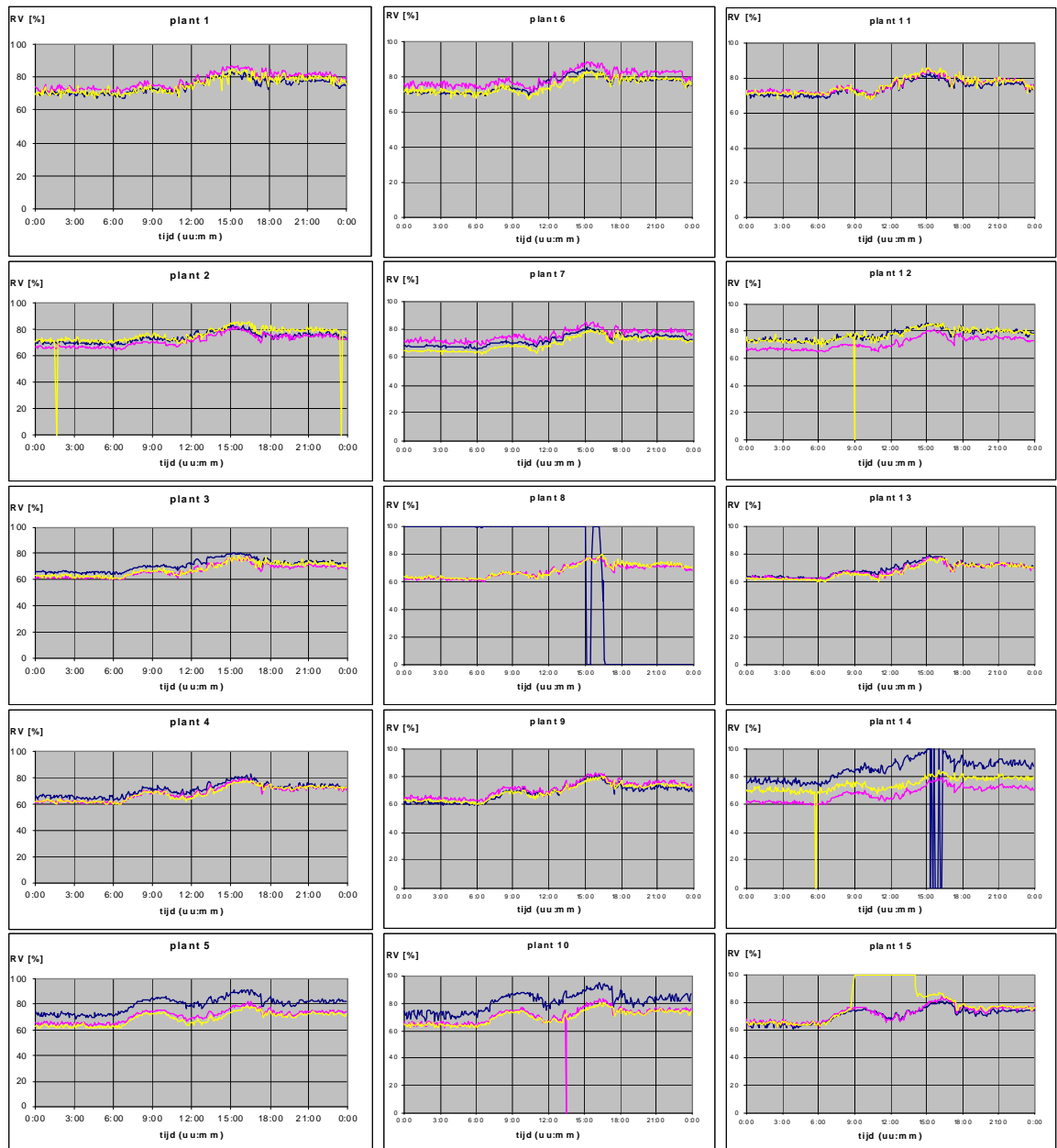
De meetwaarden vertonen soms uitschieters. Deze kunnen tot stand komen door storing in de radiografische overdracht van gegevens naar de centrale verzamelkast.

Bij de vochtsignalen kan dit tevens gebeuren door het nat worden van de voeler. De verstoring is dan langduriger (totdat de voeler weer is opgedroogd).

Dergelijke uitschieters zijn bij de verdere analyse zoveel mogelijk weg gefilterd.

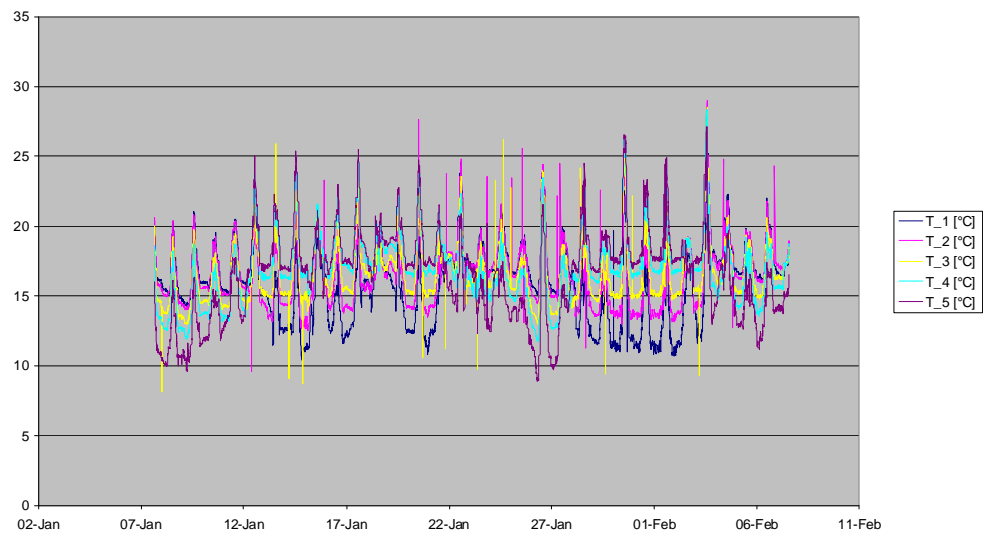


Figuur 3 Etmaalverlopen van de temperaturen op 8 januari 2010 bij 15 planten op drie hoogten

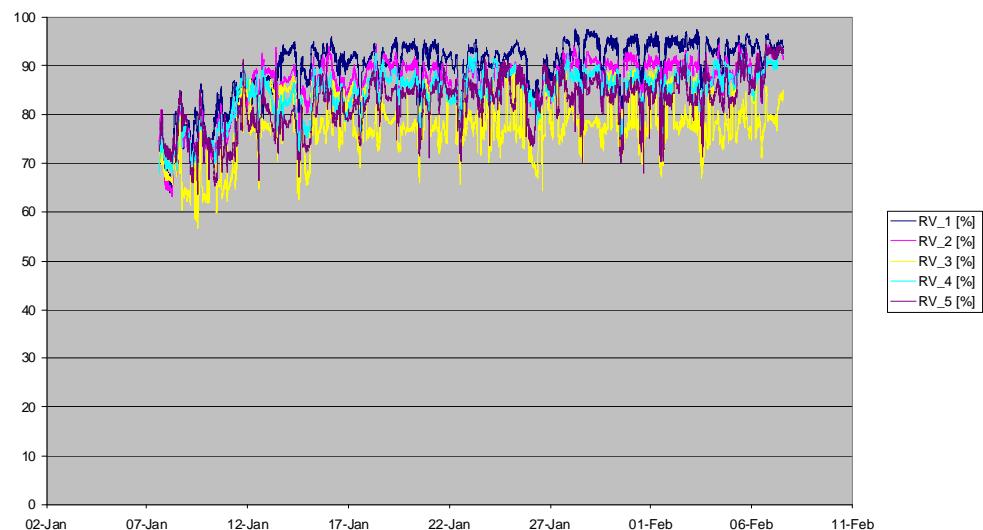


Figuur 4 Etmaalverlopen van de relatieve vochtigheden op 8 januari 2010 bij 15 planten op drie hoogten

Het etmaalverloop van de temperaturen of vochtigheden kan per meetdag aanzienlijk verschillen. Figuur 5 laat dit zien voor vijf temperatuurmeetpunten over de lengte van de kap, in eenzelfde doorsnede halverwege het gewas (middelste hoogte). Figuur 6 laat de bijbehorende relatieve vochtigheden op de vijf meetpunten in de kaplengte zien.



Figuur 5 Temperatuurverloop in de kas over een wintermaand. De vijf lijnen betreffen temperaturen op vijf afstanden vanaf het pad (T_1) naar de gevel (T_5)



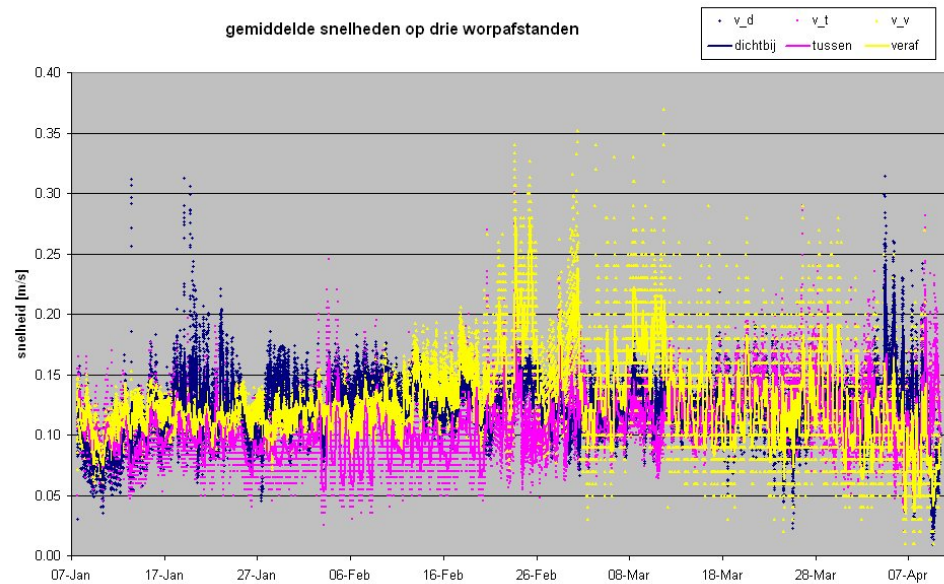
Figuur 6 Verloop van de relatieve vochtigheid in de kas over een wintermaand. De vijf lijnen betreffen relatieve vochtigheden op vijf afstanden vanaf het pad (RV_1) naar de gevel (RV_5)

Behalve temperaturen en vochtigheden zijn ook luchtsnelheden gemeten op een deel van de meetplaatsen, halverwege de gewashoogte. Figuur 7 toont de verlopen van de gemiddelde luchtsnelheden op drie afstanden vanaf de luchtslang:

- recht boven de slang (v_d),
- halverwege twee luchtslangen (v_v), wat overeenkomt met een horizontale afstand van 2,4 m vanaf de slang,
- tussen die beide meetpunten in (v_t), dus horizontaal op circa 1,2 m van de slang.

De getoonde snelheden zijn achteraf gecorrigeerd voor afwijkingen van de sensoren. De snelheden zijn namelijk gemeten met thermo-anemometers, die gevoelig zijn voor afwijkingen en verstoringen. Behalve een systematisch verloop (drift) zijn ook tijdelijke verstoringen regelmatig opgetreden, bijvoorbeeld door waterdruppels of bladdelen op

de meetelementen. Vaak waren die verstoringen wel herkenbaar, zodat ook daarvoor zo goed mogelijk is gecorrigeerd. Vanwege de opgetreden afwijkingen en verstoringen zijn ondanks de doorgevoerde correcties de snelheidssignalen uiteindelijk minder betrouwbaar. Er is getracht dit te ondervangen door grote meetseries uit te middelen en vooral te gebruiken voor globale trendanalyse.



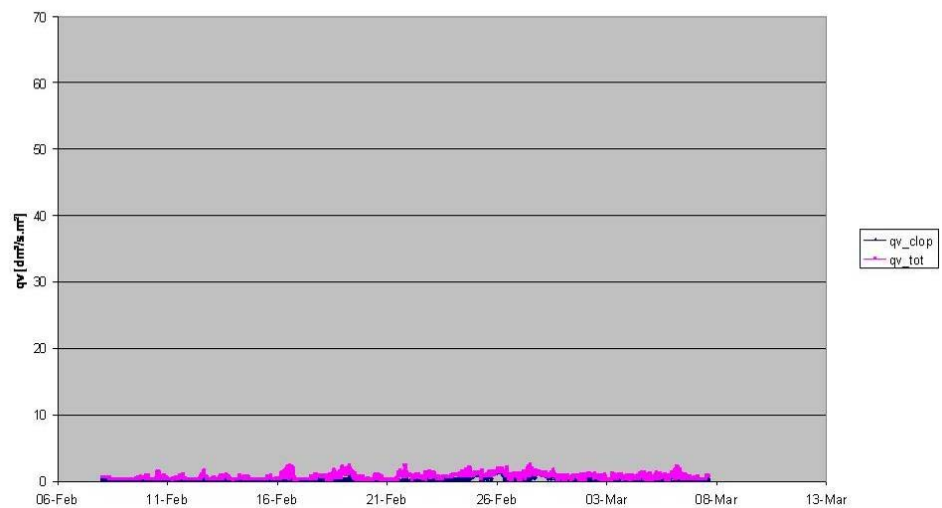
Figuur 7 Gemeten luchtsnelheden in het gewas op drie afstanden vanaf de luchtslang (donkerblauw = dichtbij, paars = tussenin, geel = veraf)

4 Analyse

4.1 Ventilatie

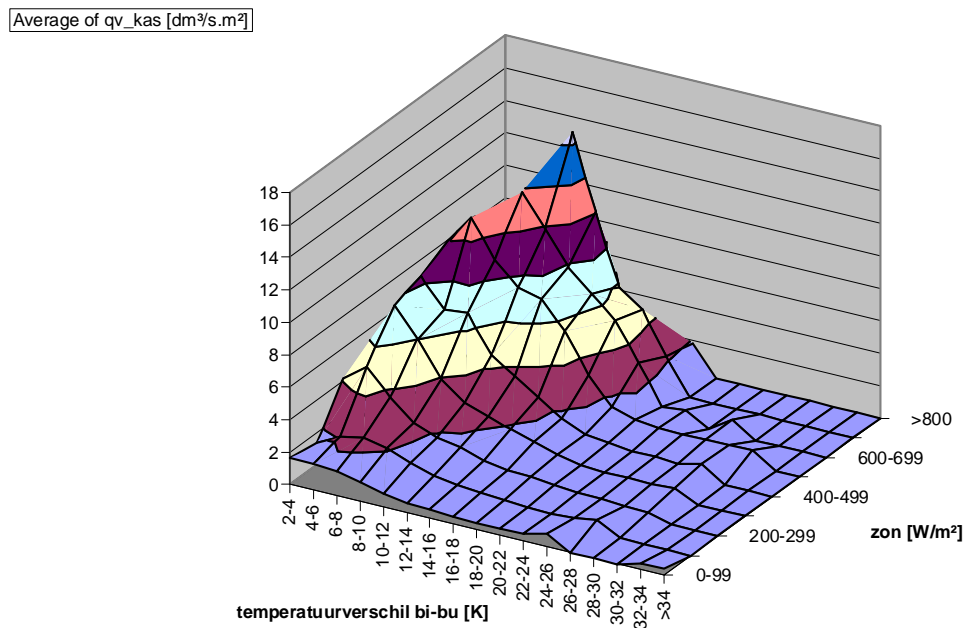
4.1.1 Kas

De ventilatie (luchtuitwisseling met buitenlucht) is wederom berekend met het ventilatiemodel COMIS uit de geregistreerde raamstanden, klep- en ventilatorstanden van de luchtslangen, binnen- en buitentemperaturen en windsnelheden en -richtingen. De kasventilatie (qv_{tot}) blijkt zoals te verwachten beperkt te zijn in de winterperiode (Figuur 8). Dientengevolge is ook de bijdrage van de luchtslangen aan de ventilatie (qv_{clop}) in die periode gering. De luchtslangen zijn wel ingezet voor luchtcirculatie (uitwisseling met kaslucht c.q. luchtbeveging in de kas).



Figuur 8 Voorbeeld ventilatiestromen met het aandeel via luchtslangen in een wintermaand (qv_{clop} = luchtslangen; qv_{tot} = luchtslangen plus luchtramen)

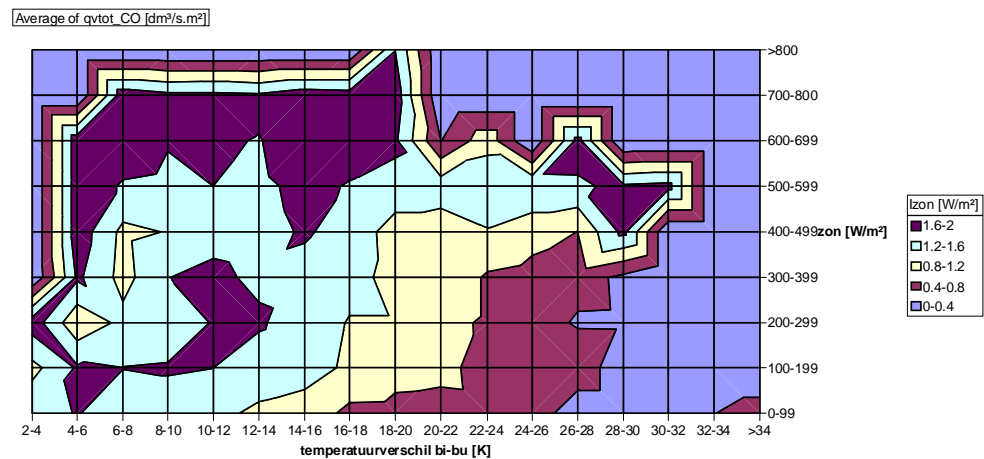
De ventilatie blijkt te worden ingezet als de buitentemperatuur oploopt (ofwel het temperatuurverschil tussen binnen en buiten kleiner wordt) en er meer zon is. Figuur 9 laat dit zien. Het gaat dan al snel om grotere luchtstromen dan de $2 \text{ dm}^3/\text{s.m}^2$ (= $7,2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ of een ventilatievoud van ongeveer 2,2 luchtwisselingen per uur) die door de luchtslangen kan worden verzorgd.



Figuur 9 Kasventilatie als functie van temperatuurverschil binnen-buiten en zonstraling

4.1.2 Luchtslangen

De luchtslangen blijken meer lucht te verplaatsen in de warmer, zonniger situaties, dus als ook de totale kasventilatie oploopt (Figuur 10).

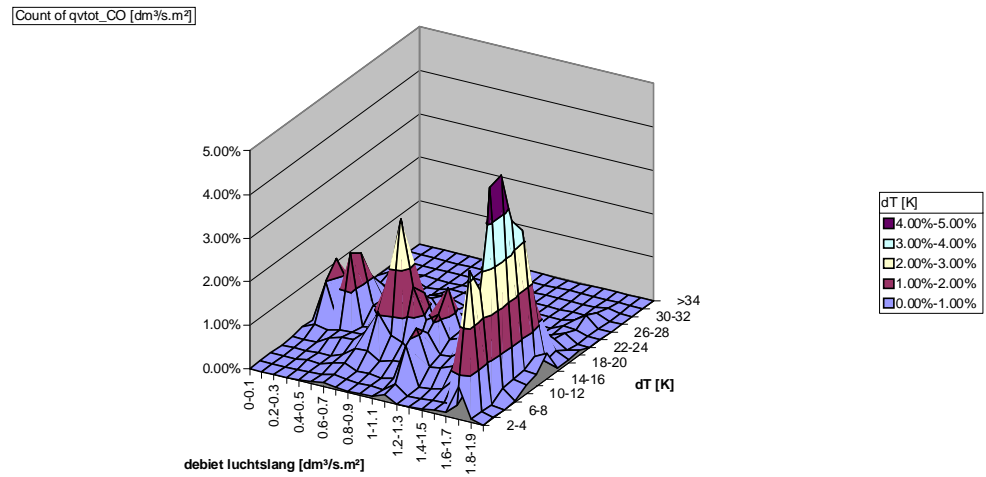


Figuur 10 Slangluchting als functie van zon en temperatuurverschil tussen binnen en buiten (de slangebieten verlopen in klassen van $0,4 dm^3/s.m^2$ tussen 0 en $2 dm^3/s.m^2$ en zijn aangeduid met de kleurvelden, zie legenda rechts. Ontbrekende waarnemingen zijn als 0 geïnterpreteerd en met blauw weergegeven, maar hebben dus geen betekenis)

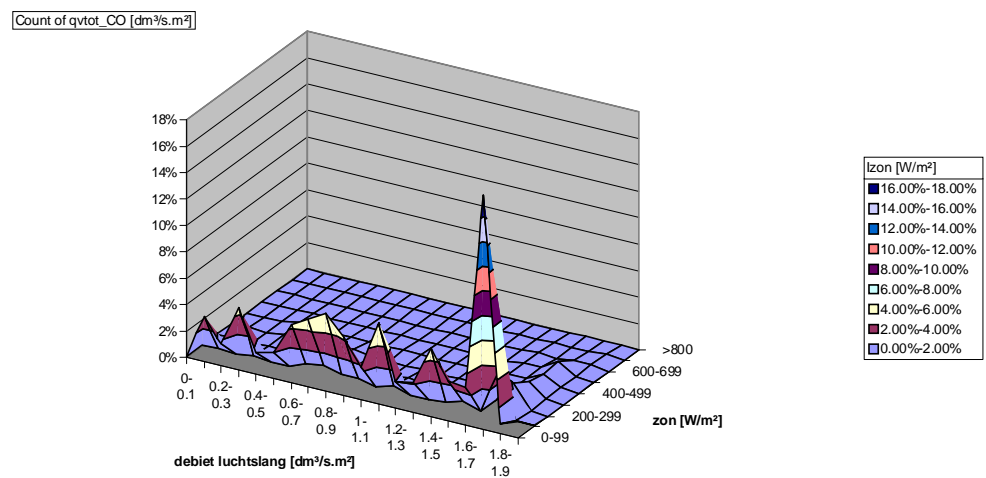
De luchtslangen blijken evenals de (totale) kasventilatie te worden ingezet als de buitentemperatuur minder laag is (Figuur 11). De slangen blijken echter niet vaker te worden gebruikt bij de situaties met meer zon (Figuur 12).

De verklaring lijkt dat de slangluchting vooral bij vochtig, bewolkt weer wordt ingezet, om zo het vocht in de kas te reguleren. De gedachte hierachter is dat een gelijkmatiger

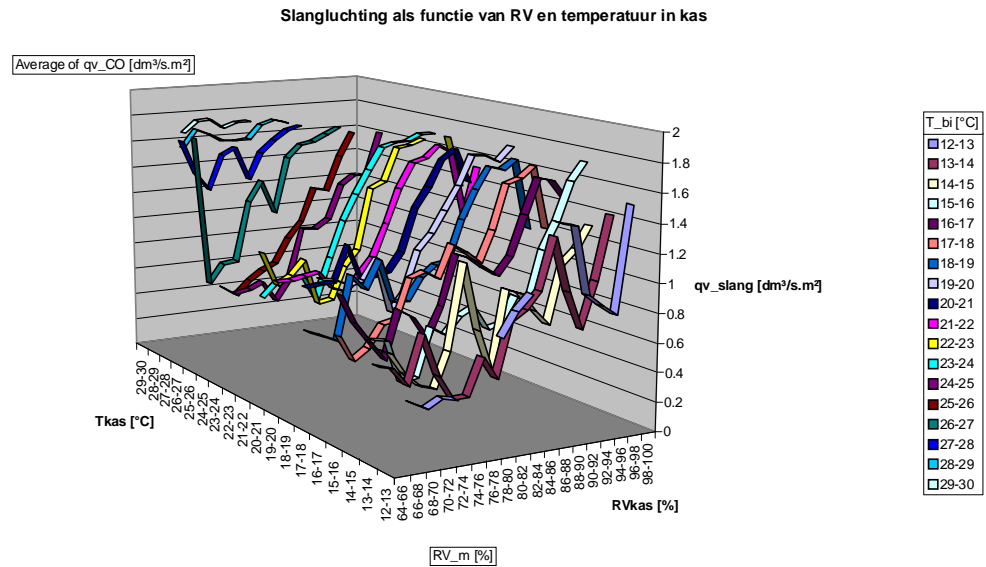
doorluchting van het gewas c.q. vochtafvoer uit het gewas kan worden bereikt met de onderbeluchting (via de slangen), zo nodig aangevuld met de bovenbeluchting (ramen).



Figuur 11 Distributie (kans van voorkomen) van de slangluchting als functie van zijn debiet en het temperatuurverschil tussen binnen en buiten



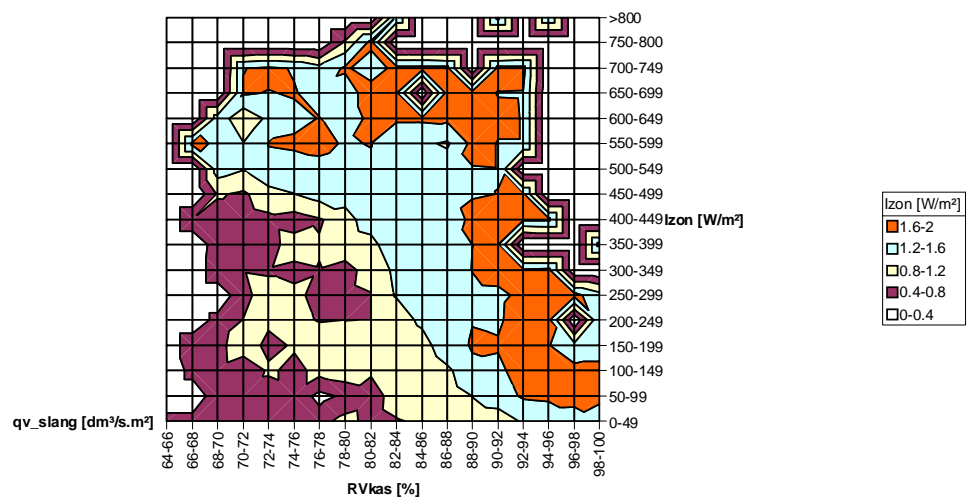
Figuur 12 Distributie (kans van voorkomen) van de slangluchting als functie van zijn debiet en de zonintensiteit



Figuur 13 Slangluchting als functie van relatieve vochtigheid en temperatuur in de kas

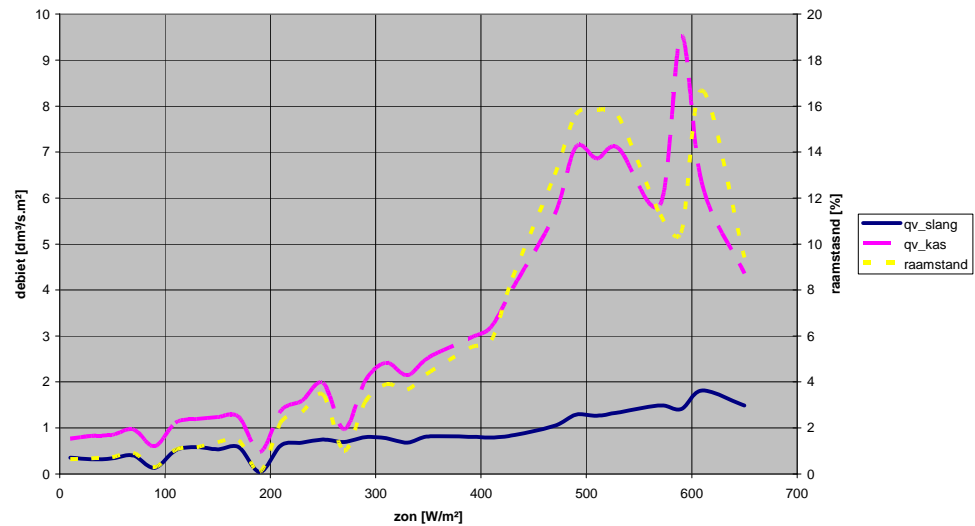
Figuur 13 laat zien dat de bewering juist is dat de slangluchting vooral bij vochtige condities wordt ingezet. Het debiet via de luchtslangen blijkt toe te nemen naarmate de relatieve vochtigheid in de kas hoger wordt, ongeacht de temperatuur in de kas. Bij hogere kastemperaturen wordt de slangluchting wel al bij lagere luchtvochtigheid op een hogere stand geschakeld.

De relatie tussen het slangdebiet en de temperatuur of warmteontwikkeling blijkt ook uit Figuur 14. Die figuur laat zien dat behalve bij toenemende vochtigheid (RV) ook bij meer zonintensiteit hogere slangdebieten worden gehanteerd. Dat de slangen dus weinig worden gebruikt bij de situaties met meer zon (Figuur 12) zegt kennelijk meer over het beperkt voorkomen van situaties met veel zon in de beschouwde winterperiode dan over de gewenste inzet van de slangluchting bij veel zon.

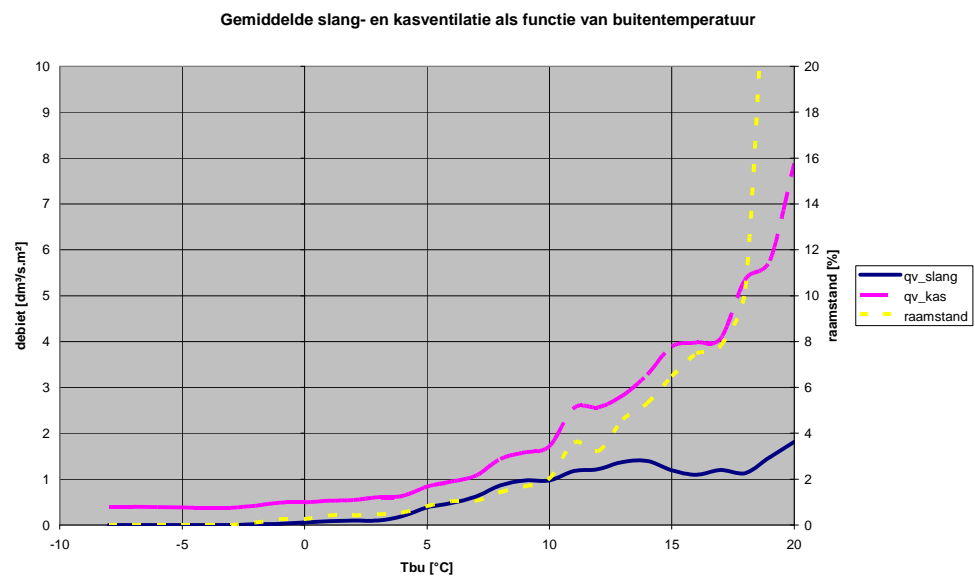


Figuur 14 Slangluchting (zie kleurvelden) als functie van zon en relatieve vochtigheid in de kas

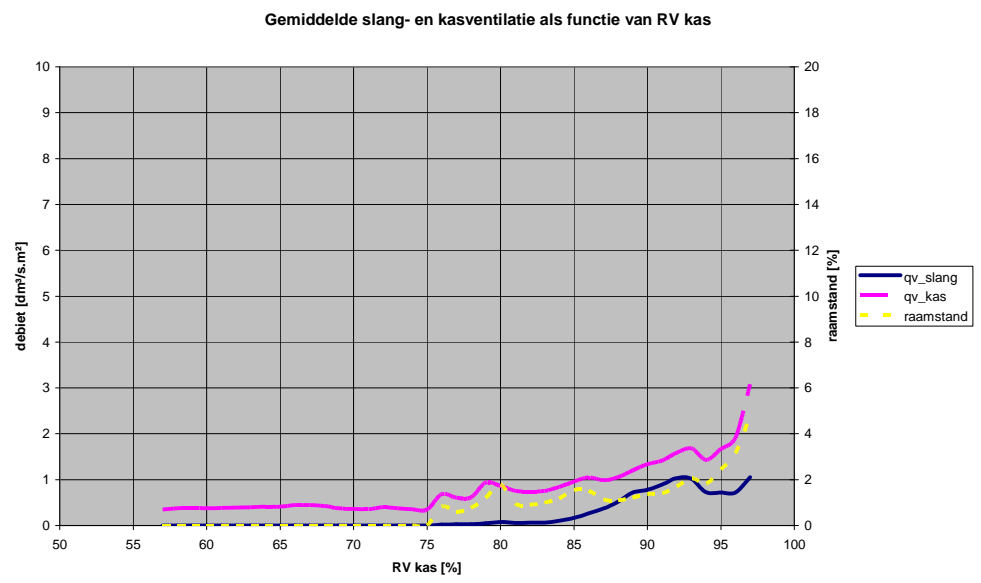
Figuur 15 t/m Figuur 17 onderstrepen het voornoemde beeld nogmaals. Ze tonen dat de slangluchting zowel bij hogere relatieve vochtigheid op hogere standen wordt geschakeld, als bij situaties met meer zon en hogere buitentemperatuur. De figuren laten tevens zien dat de slangluchting min of meer gelijk op wordt geschakeld met de raamluchting (totale ventilatie in de kas). Alleen wordt bij het opschakelen het aandeel van de slangen in de totale ventilatie minder, omdat dan grotere openingsstanden van de luchtramen worden gebruikt. Tenslotte valt in de figuren op dat de totale kasventilatie zonder slangluchting en bij gesloten ramen niet nul is, ten gevolge van het aandeel van luchtlekken.



Figuur 15 Gemiddelde slangluchting en kasventilatie in relatie tot de zonintensiteit



Figuur 16 Gemiddelde slangluchting en kasventilatie in relatie tot de buitentemperatuur



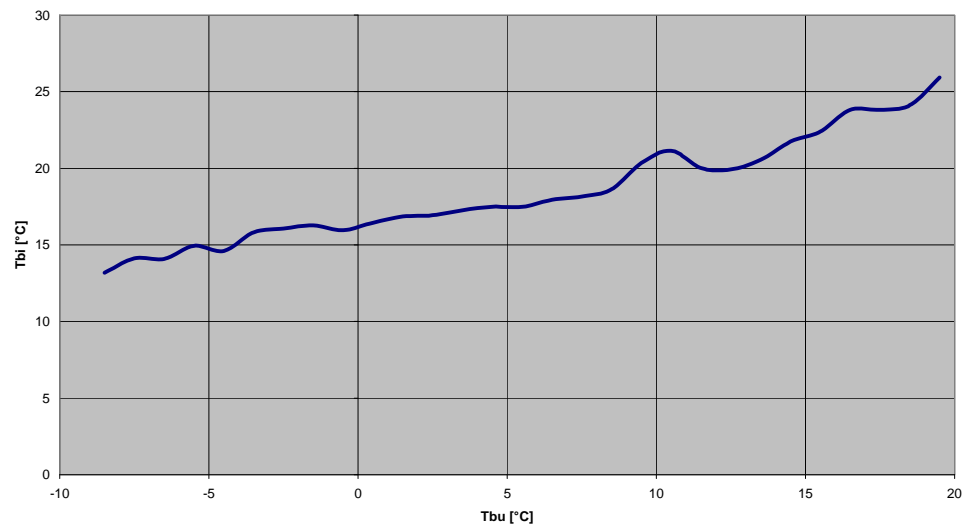
Figuur 17 Gemiddelde slangluchting en kasventilatie in relatie tot de relatieve vochtigheid in de kas

4.2 Temperatuur

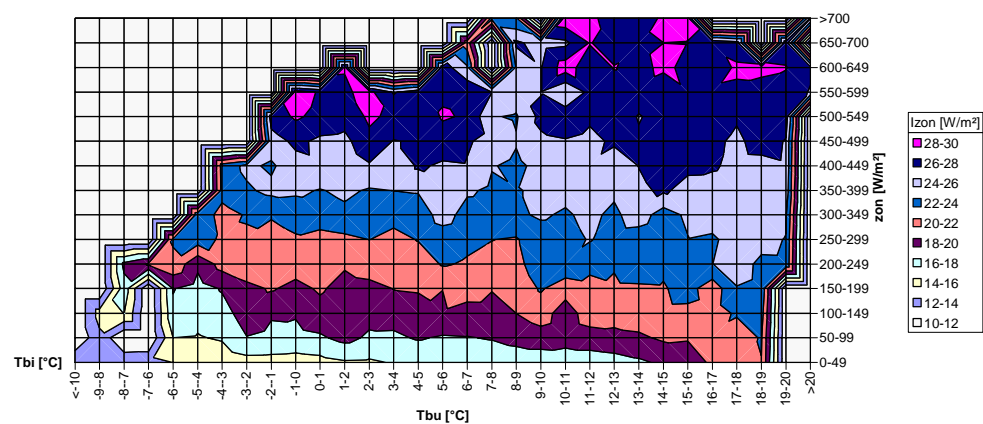
4.2.1 Niveau

Bij winterse omstandigheden blijkt de gemiddelde kasttemperatuur beduidend lager te liggen dan bij mildere buitencondities (Figuur 18). Globaal loopt de kasttemperatuur 1 K op met elke 3 K verhoging van de buitentemperatuur.

De zonintensiteit blijkt voor de kasttemperatuur een nog belangrijker factor te zijn dan de buitentemperatuur (Figuur 19). Beperkte zonstraling of veel zon blijkt een temperatuurverandering in de orde van 6 K te betekenen. Dit is exclusief de nachtsituaties (zonder zon) als de kasttemperatuur bewust wordt verlaagd.



Figuur 18 Gemiddelde kasttemperatuur als functie van buitentemperatuur



Figuur 19 Temperatuur in de kas (aangeduid met de kleurvelden, zie legenda rechts) als functie van buitentemperatuur en zon

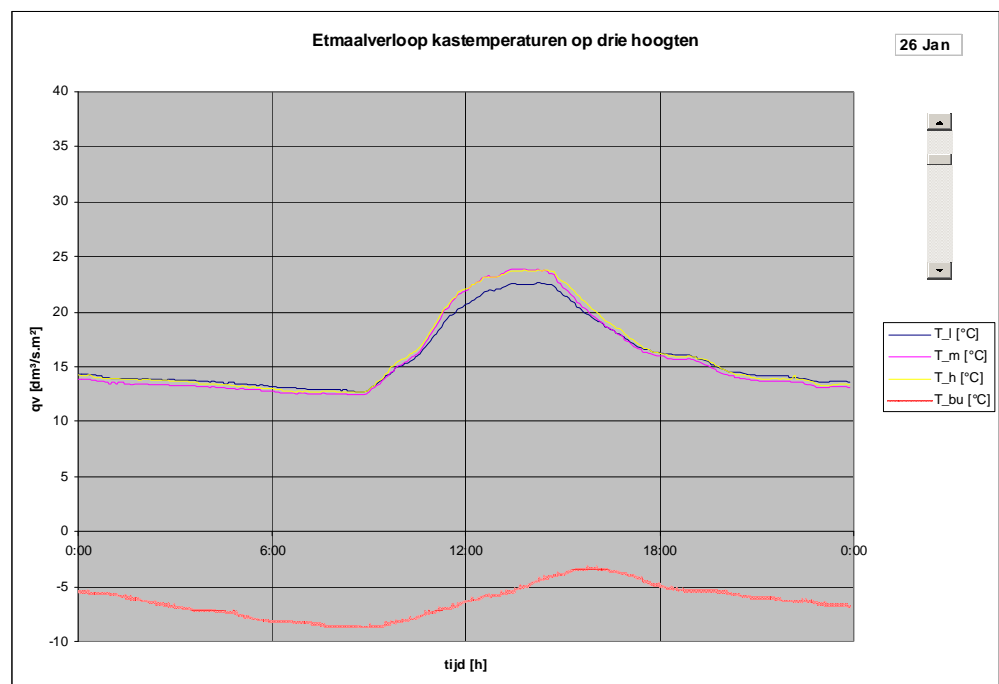
Op de verlopen van temperaturen wordt hierna nader ingegaan.

4.2.2 Verticale gradiënt

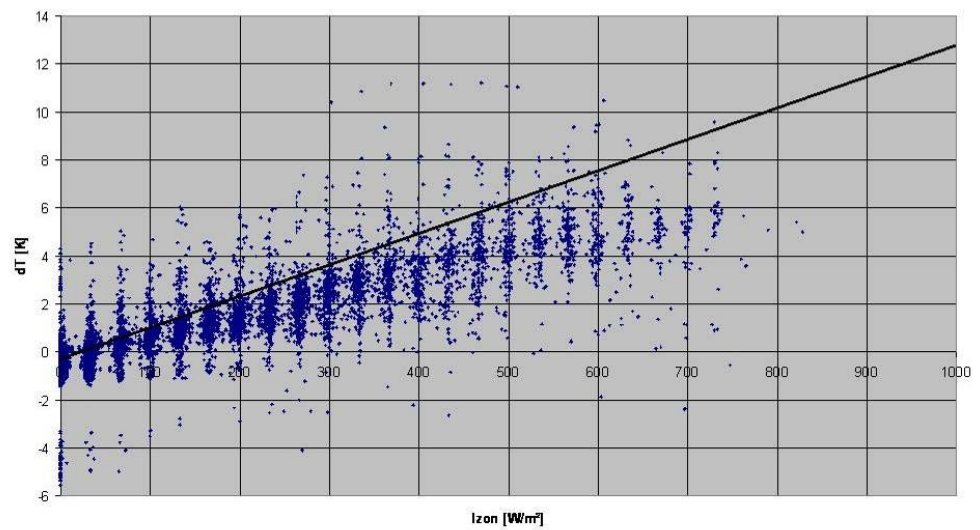
In de winterperiode blijken de temperatuurverschillen over de hoogte beperkt te blijven. Figuur 20 laat zien dat op een koude winterdag met name overdag de temperaturen bovenin het gewas circa 1 K hoger kunnen komen dan onderin het gewas. Dank zij het (dubbele) scherm treedt in de nacht bovenin nauwelijks extra afkoeling op (uitstraling via het dek). De temperaturen op de verschillende hoogten verschillen onderling dan weinig.

De temperatuurverschillen over de hoogte nemen toe met de zonintensiteit. Een nadere analyse toont dit verband (Figuur 21).

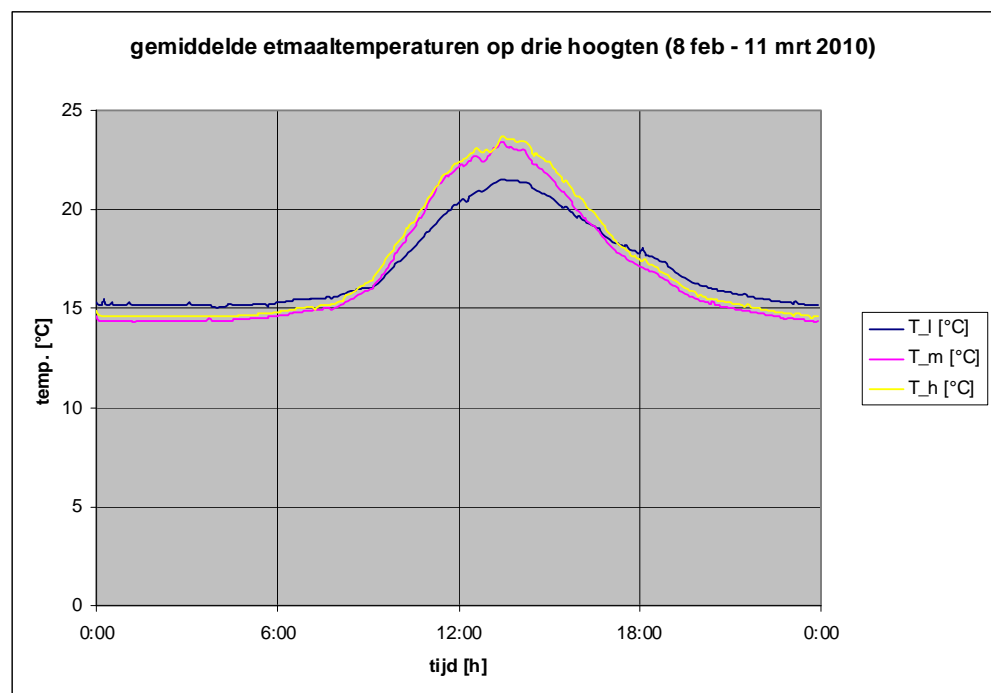
Gemiddeld over een hele wintermaand zijn de temperatuurverschillen over de hoogte dus wel hoger dan op de koude voorbeelddag. Figuur 22 laat dit zien. Vooral onderin het gewas blijft de temperatuur overdag gemiddeld circa 1,5 K achter. Daarentegen blijft het onderin het gewas in de nacht bijna 1 K warmer.



Figuur 20 Etmaalverloop van de temperaturen op drie gewashoogten (T_l = laag, T_m = midden, T_h = hoog, T_bu = buiten)



Figuur 21 Temperatuurverschil over de hoogte als functie van zonstraling

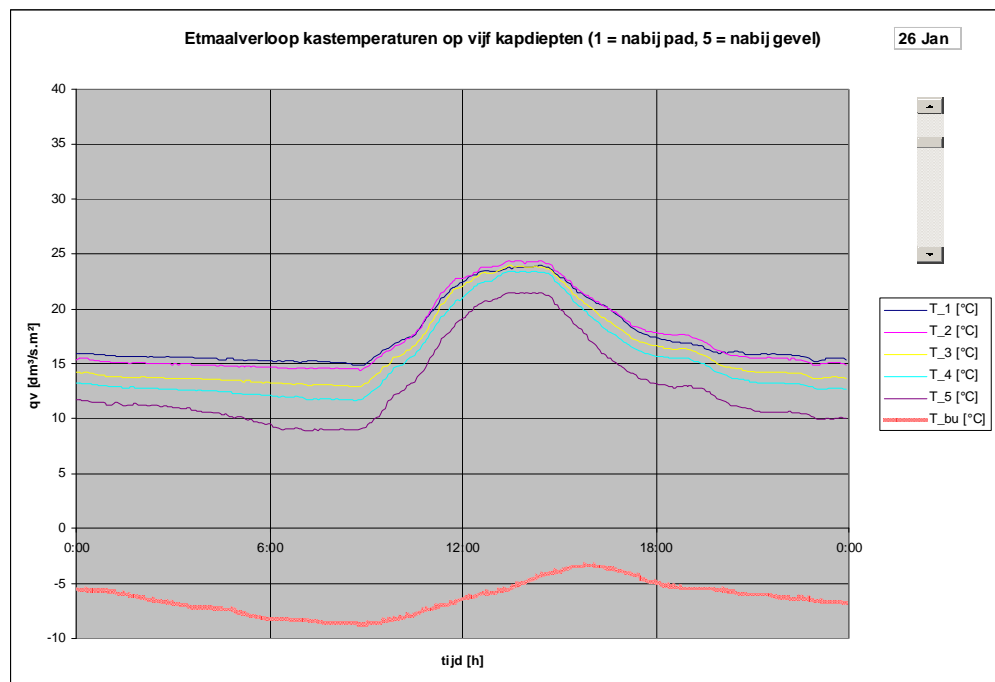


Figuur 22 Maandgemiddeld etmaalverloop van de temperaturen op drie gewashoogten (T_l = laag, T_m = midden, T_h = hoog)

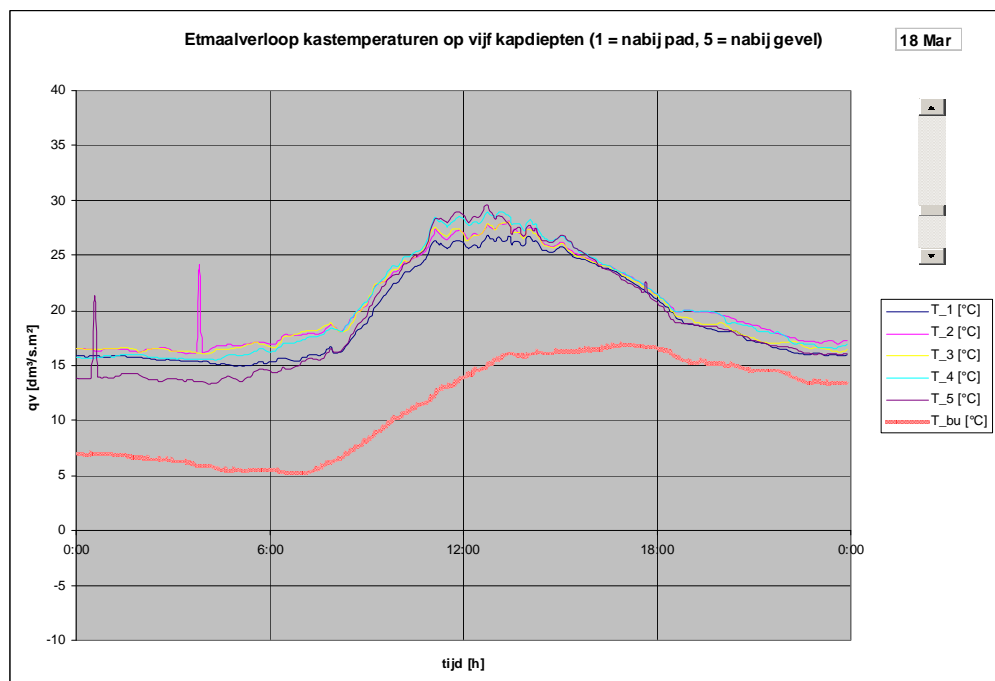
4.2.3 Horizontale gradiënt

Bij koud weer treden aanzienlijke temperatuurverschillen op over de kaplengte. Figuur 23 laat zien dat op een koude winterdag (buiten rond -5°C) in de zone bij de gevel 5 K verlaging ten opzichte van de zone bij het pad optreedt.

De temperatuurverschillen over de kaplengte nemen af als het minder koud wordt (Figuur 24). Ook bij veel zon blijken de temperatuurverschillen te worden beperkt.



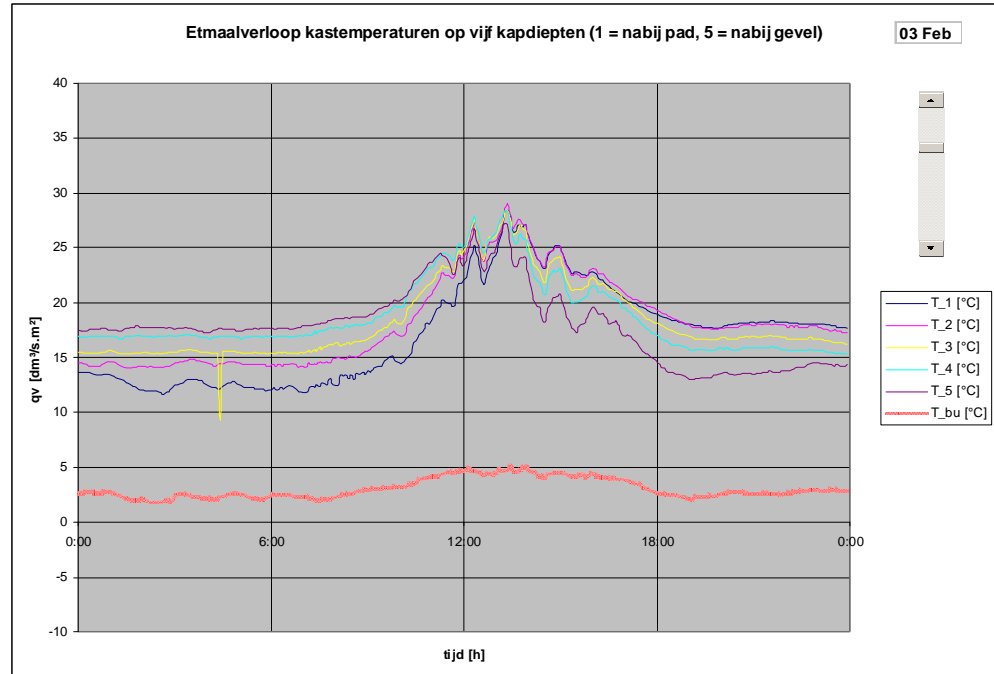
Figuur 23 Etmaalverloop temperaturen op een koude winterdag op vijf afstanden vanaf het pad (T_1) naar de gevel (T_5)



Figuur 24 Etmaalverloop temperaturen op een voorjaarsdag op vijf afstanden vanaf het pad (T_1) naar de gevel (T_5)

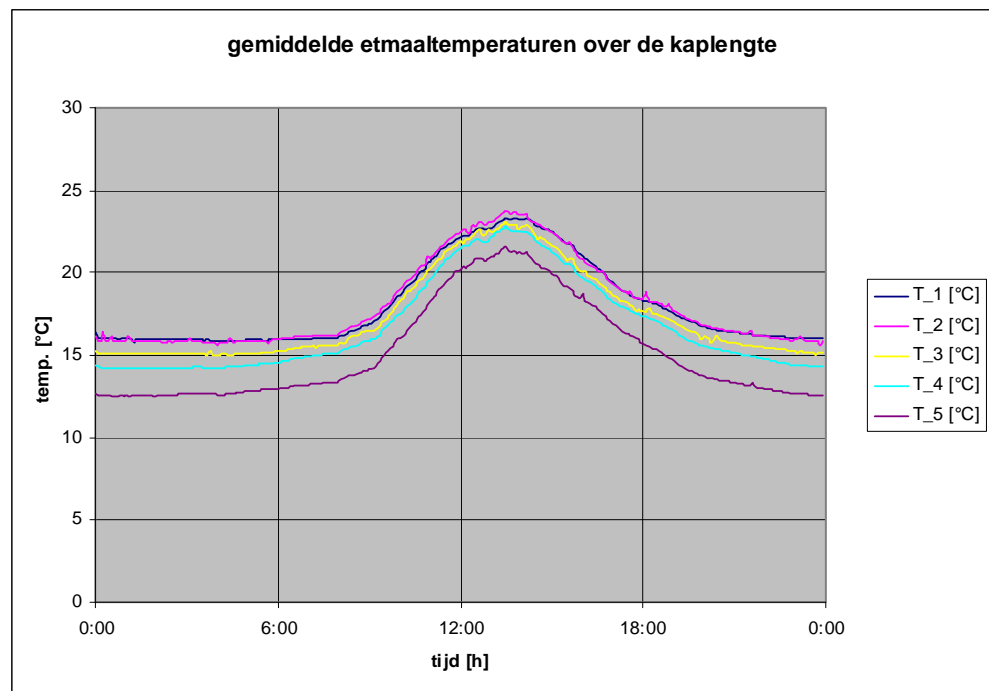
Het temperatuurverschil over de kaplengte kan worden beïnvloed door de luchtverdeling over de slang. Door de tuinder zijn op ongeveer de helft van de lengte om de slang elastieken aangebracht, zodat een groter deel van de lucht in het eerste deel vanaf de gevel wordt ingeblazen en nog maar een beperkte luchtstroom in het laatste

deel naar het middenpad toe. Figuur 25 laat tot circa 13:00 h deze toestand zien. Het blijkt dat de lagere temperaturen dan in de zone nabij het pad optreden in plaats van nabij de gevel. Als de elastieken worden verwijderd (na 13:00 h) ziet men dit temperatuurpatroon weer omkeren.



Figuur 25 Etmaalverloop temperaturen op een winterdag op vijf afstanden vanaf het pad (T_1) naar de gevel (T_5) na aanpassing van de luchtverdeling over de slang (meer lucht in het eerste deel vanaf de gevel)

Het gemiddelde beeld in een wintermaand toont aflopende temperaturen vanaf het middenpad naar de gevel, met een extra grote temperatuurdip in de gevelzone (Figuur 26).



Figuur 26 Gemiddeld etmaalpatroon van temperaturen over de kaplengte in februari op vijf afstanden vanaf het pad (T_1) naar de gevel (T_5)

Het geschetste temperatuurbeeld ondersteunt de volgende hypothese betreffende het ontstaan van de temperatuurverschillen:

In elke ruimte treden natuurlijke luchtbewegingen op. Ze worden gegenereerd door lokale temperatuurverschillen. Het koude glas van het kasdek vormt zo'n natuurlijke 'motor'. Koude (= zwaardere) lucht wil op het laagste punt zakken. Dat punt ligt nabij de gevel, omdat de goot op afschot moet liggen. Met de *vergroting van de kaplengten* in moderne kassen is het hoogteverschil tussen gevel en middenpad toegenomen, hoewel dit is beperkt doordat tegenwoordig minder afschot per meter wordt toegepast. Door *toepassing van schermen* is de luchtlaag onder het glas bovendien kouder geworden. Met dubbele schermen is die afkoeling nog sterker. Deze factoren zorgen voor een versterkt valeffect van de lucht (thermiek) in de gevelzone.

Het *scherm is niet dicht genoeg* om de vallende koude luchtstroom nabij de gevelzone tegen te houden (hooguit zakt het in een wat grotere zone). Dat geldt zeker voor de huidige schermen met hun hoge perforatiegraden (daarbij mag men dus uit het oogpunt van dit probleem vraagtekens zetten). Door de koude valstroom komt een thermische wervel op gang. De warmte van het verwarmingssysteem trekt naar het hoogste punt bij het middenpad en zorgt zo voor extra aandrijving van die wervel.

In oude kassen werden zulke luchtbewegingen geremd door de luchtweerstand van het gewas. Dat wortelde in de bodem en reikte vaak met de kruin tot aan het dek. In moderne, hoge kassen is echter zowel boven het gewas als onder de teeltgoten van het gewas *voldoende vrije ruimte voor een redelijk onbelemmerde stroming*. Bovendien blijkt het gewas in beluchte kassen met minder blad toe te kunnen en heeft dus zelf ook (iets) minder luchtweerstand.

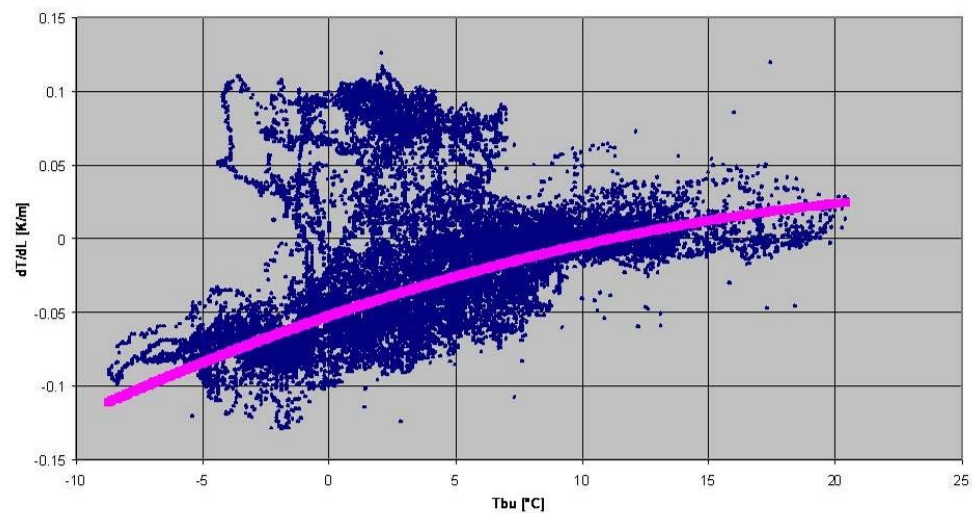
In oude kassen werd voorts met hoge temperatuur verwarmd (bij vorst 90°C). Dat zorgde boven de buizen voor sterke, plaatselijke stijgstroom, die voornoemde

wervel verstoorden (lokale thermische barrières). Nu kassen worden *gestookt met steeds lagere temperaturen* (maxima nauwelijks boven 40°C in de winter) zijn die ‘verstorende’ stijgstroom veel zwakker en valt ook deze ‘rem’ weg.

Het *gebruik van luchtslangen* kan zowel positief als negatief werken op het ongewenste stromingseffect:

- Als de luchtslangen kaslucht circuleren, hetgeen juist bij koude een voorkeursstand is, trekken de toestellen daarvoor kaslucht naar het aanzuigrooster in de gevelzone (wat de meest gebruikte opstelplaats is van de luchtbehandelingskasten). De luchtbeweging van de thermische wervel wordt dan ongewild bevorderd door deze kasluchtstroom;
- Als de lucht in de slangen (sterk) wordt verwarmd, wordt relatief meer warmte afgegeven in het begindeel, vanwege de afkoeling aan het slangoppervlak. De slangen kunnen hiermee de extra afkoeling in deze zone ten gevolge van de koude luchtval (deels) compenseren;
- Als via de slangen een minimale toevoer van buitenlucht in stand wordt gehouden, dient deze te ontwijken via de openingen in het scherm en de lekken in het (gesloten) dek. Voldoende overdruk over de openingen in het scherm voorkomt dat koude lucht door het scherm in de kas zakt. Zo valt een belangrijke ‘motor’ weg voor de wervel, die het temperatuurverschil veroorzaakt. De prijs voor deze maatregel is wel het extra warmteverlies (energiegebruik) door de ventilatiestroom en eventueel een lagere luchtvochtigheid in de kas (met de extra ventilatie meer vochtafvoer dan gewenst is).

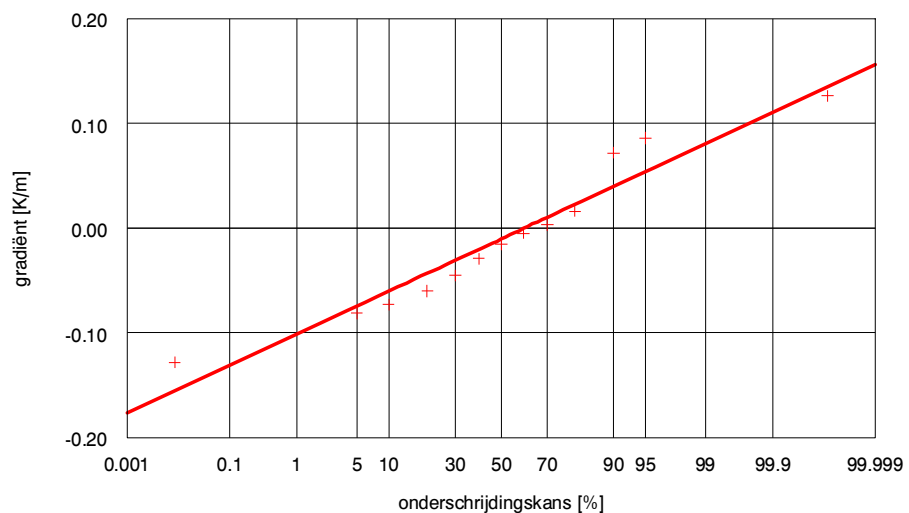
Een nadere analyse van de meetresultaten ondersteunt de voornoemde hypothese. Figuur 27 laat zien dat het temperatuurverschil over de kaplengte een vrij duidelijke relatie vertoont met de buitentemperatuur, hoewel het beeld wel wat wordt verstoord door de meetwaarden met ingesnoerde luchtslangen (de puntenwolk boven de hoofdpopulatie rond de curve). De buitentemperatuur kan als maatgevend worden beschouwd voor de thermiek die de wervel aandrijft. Als de buitentemperatuur ongeveer gelijk wordt aan de binnentemperatuur (in de beschouwde winterperiode iets onder 15°C) wordt ook de horizontale temperatuurgradiënt nul. De spreiding van de meetpunten rond de curve kan worden toegeschreven aan variaties in binnentemperatuur, zonintensiteit en schermstand.



Figuur 27 Temperatuurverschil over de kaplengte afhankelijk van de buitentemperatuur

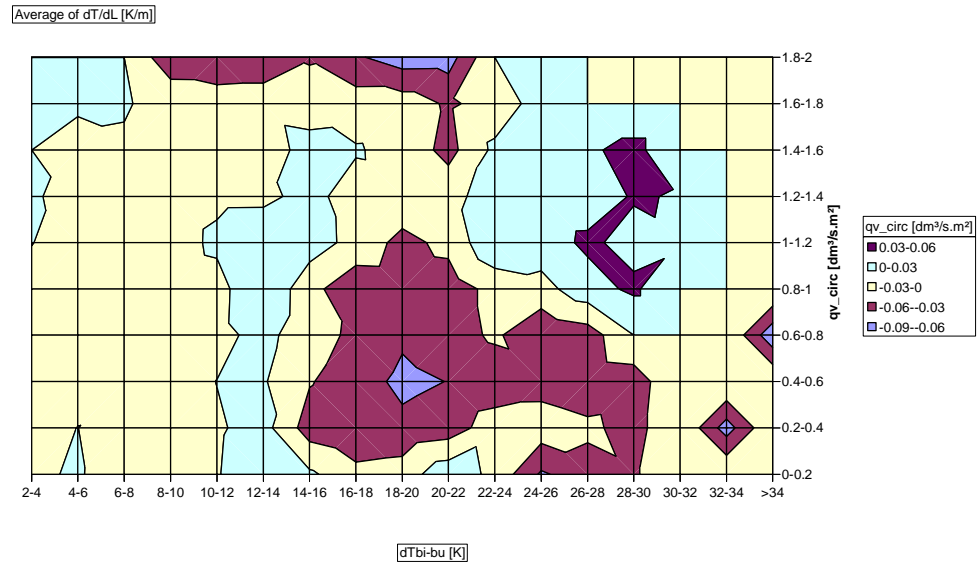
Voor het overige is opvallend dat bij hoge buitentemperaturen de gradiënt positief kan worden, ofwel de temperatuur vanaf het middenpad naar de gevel juist oploopt in plaats van afloopt. Anders gezegd, de wervel keert om als het temperatuurverschil tussen binnen en buiten omkeert.

Door het inbinden van de luchtslangen door de tuinder is nog een extra aantal situaties met positieve gradiënt ontstaan. Figuur 28 brengt dit tot uiting in de cumulatieve verdeling. Volgens deze grafiek is de kans op een negatieve gradiënt ongeveer 60%. Bij oorspronkelijk gebruik van de luchtslangen zou dit percentage dus hoger zijn geweest. De kans op een gradiënt van $-0,1$ K/m of nog kleiner is zo'n 1%. Er is dus 1% kans op een temperatuurverschil van 9 K of meer bij een kaplengte van 90 m. De kans op 5 K of meer temperatuurverschil (een gradiënt van $-0,055$ K/m) is circa 15%.



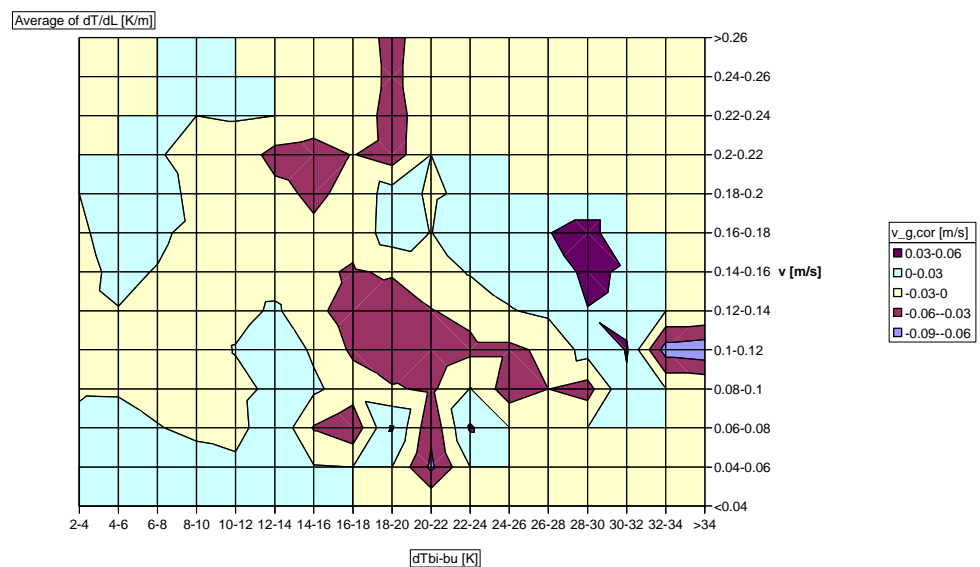
Figuur 28 Cumulatieve verdeling temperatuurverloop over de kaplengte

Circulatie van kaslucht via de luchtslangen kan, zoals eerder aangegeven, (mede) van invloed zijn op de temperatuurgradiënt over de kaplengte. In Figuur 29 is dit getoetst. Er blijkt geen duidelijk verband te zijn tussen het circulatie-aandeel in het slangengebied (verticale as) en de gradiënt (kleurvelden).



Figuur 29 Temperatuurverloop over de kaplengte afhankelijk van het temperatuurverschil met buiten en het circulatieaandeel in het slangengebied

Het verband tussen de temperatuurgradiënt over de kaplengte en de luchtsnelheid in de kas is eveneens onderzocht (Figuur 30). De vraag is of meer luchtbeweging voor meer menging en daarom voor verkleining van temperatuurverschillen zorgt. Ook voor deze relatie is geen duidelijk verband aangetoond.



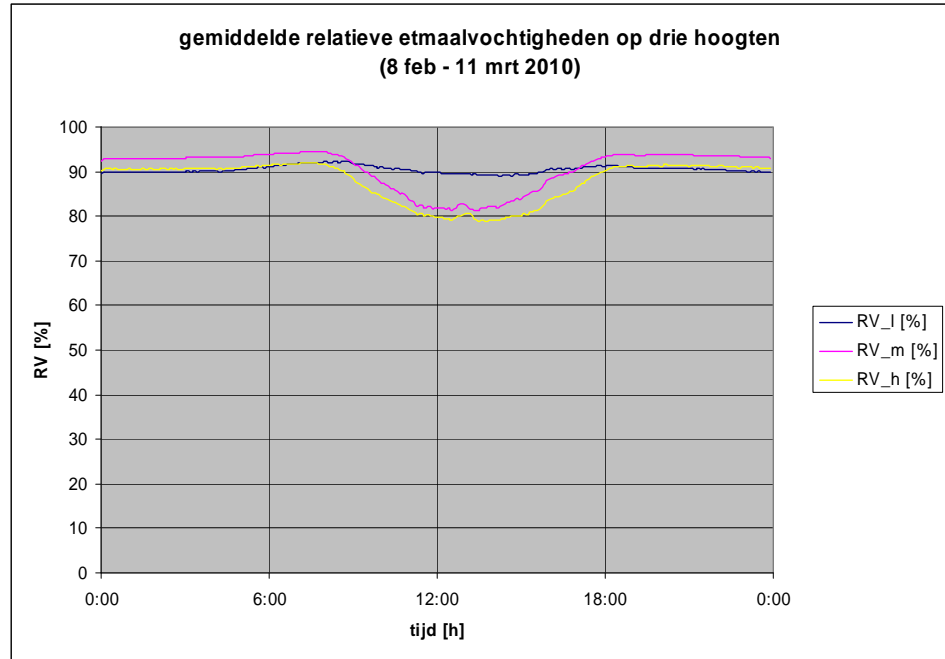
Figuur 30 Temperatuurverloop over de kaplengte afhankelijk van het temperatuurverschil met buiten en de luchtsnelheid

4.3 Vocht

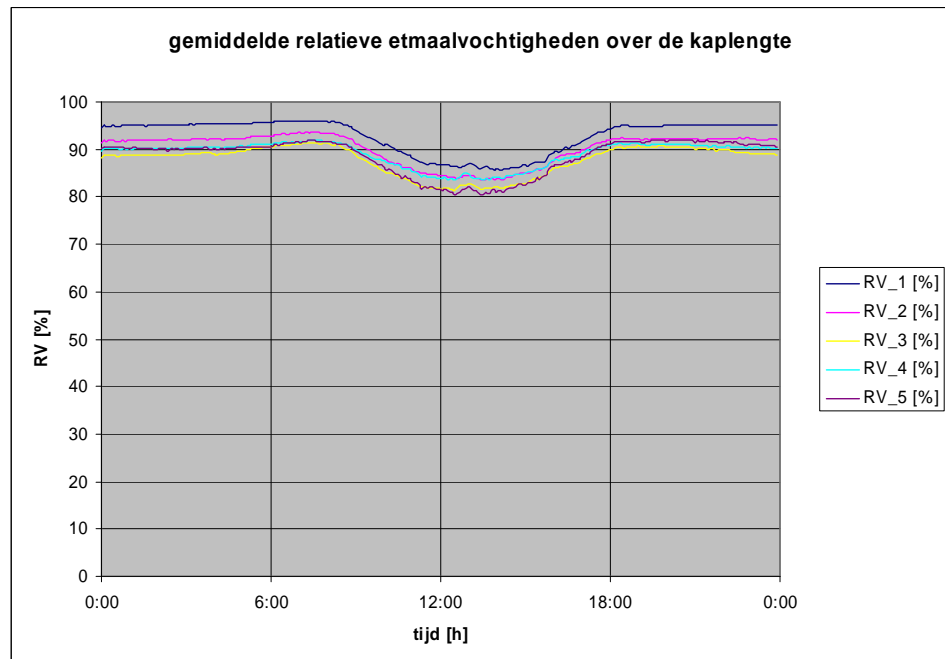
De relatieve vochtigheid blijkt ook in de winterperiode duidelijk temperatuurgebonden te zijn. Als de temperatuur overdag stijgt, daalt de relatieve vochtigheid.

Figuur 31 toont het maandgemiddelde etmaalpatroon op drie gewashoogten.

Figuur 32 toont het maandgemiddelde etmaalpatroon op vijf kapdiepten.



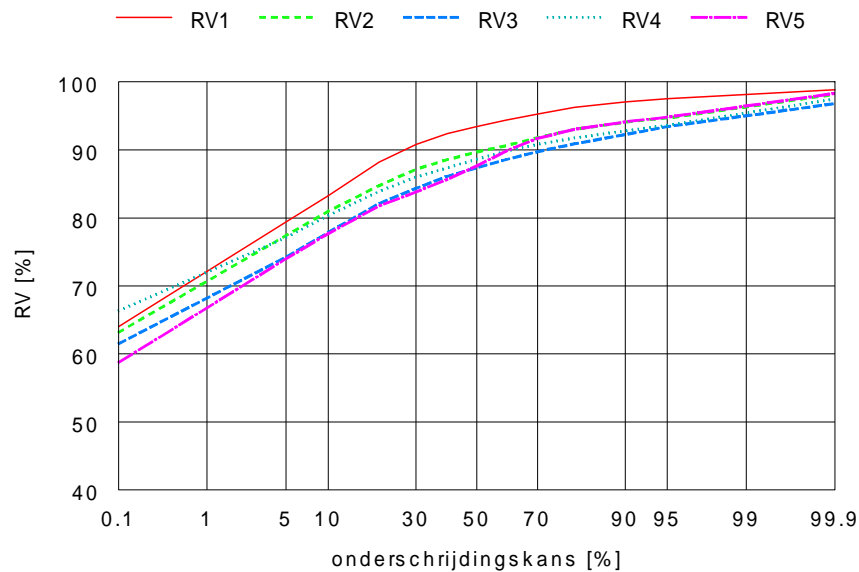
Figuur 31 Gemiddeld etmaalpatroon van de relatieve vochtigheid op drie hoogten in het gewas (RV_l = onderin, RV_m = middenin, RV_h = bovenin gewas)



Figuur 32 Gemiddeld etmaalpatroon van de relatieve vochtigheid op vijf afstanden vanaf het pad (RV_1) naar de gevel (RV_5) in februari

In Figuur 31 valt op dat overdag de RV's onderin het gewas hoog blijven. Dit lijkt vooral verband te houden met de bijbehorende lagere temperaturen (Figuur 22).

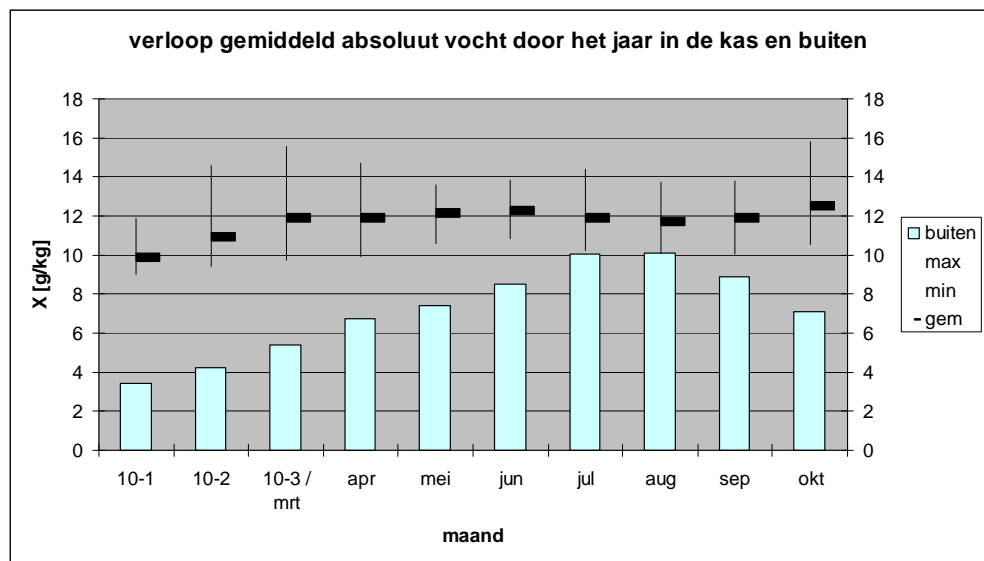
In Figuur 32 is opvallend dat de hoogste RV's niet optreden op de plaatsen met de laagste temperaturen dicht naar de gevel, maar juist dicht bij het middenpad waar de temperaturen hoger zijn. Dit kan komen doordat hogere temperaturen voor meer gewasverdamping zorgen en voor een lokaal hogere glastemperatuur, die resulteert in minder vochtafvoer door condensatie. Ook uit de kansgrafiek (cumulatieve verdeling) van Figuur 33 blijkt dit. Bij hoge, meer kritieke RV's blijken de droogste plaatsen zich van de gevel tot halverwege de kaplengte te bevinden. Een belangrijke oorzaak lijkt het feit dat met de wervel over de kaplengte lucht door het gewas van de gevel naar het middenpad stroomt en daarbij door vochtname uit het gewas steeds vochtiger wordt.



Figuur 33 Cumulatieve verdeling relatieve vochtigheid op vijf kaplengten vanaf middenpad (RV1 = nabij pad) tot gevel (RV5 = nabij gevel)

Opvallend is dat ondanks de lagere absolute vochtigheid buiten in de winter nog steeds hoge RV's binnen worden bereikt. Daarvoor moet de verdamping door de planten vrij hoog zijn. Weliswaar is er bij koude buitenomstandigheden geen bewuste ventilatie en bijbehorende vochtafvoer uit de kas, maar het glas is zeker bij dubbele scherming kouder en de vochtafvoer door condensatie zal dus toenemen. De voorwaarde hiervoor is overigens dat het condensvocht daadwerkelijk wordt afgevoerd. Het lijkt er echter op dat het condensvocht tenminste gedeeltelijk opnieuw verdampt, gezien de onbalans in vochtproductie (H 4.5).

Figuur 34 laat duidelijk zien dat er in de winter meer vocht in de kas blijft. De figuur toont de absolute vochtigheden, herleid uit de gemeten temperaturen en relatieve vochtigheden voor zowel de kas als buiten. De grafiek geeft voor de kas gemiddelde waarden (als blokjes) en maxima en minima (als verticale lijntjes) per maand. De staafjes geven de maandgemiddelden buiten weer.



Figuur 34 Jaarverloop van de absolute luchtvochtigheid in de kas (gemiddelde per maand en spreiding) in vergelijking met buiten

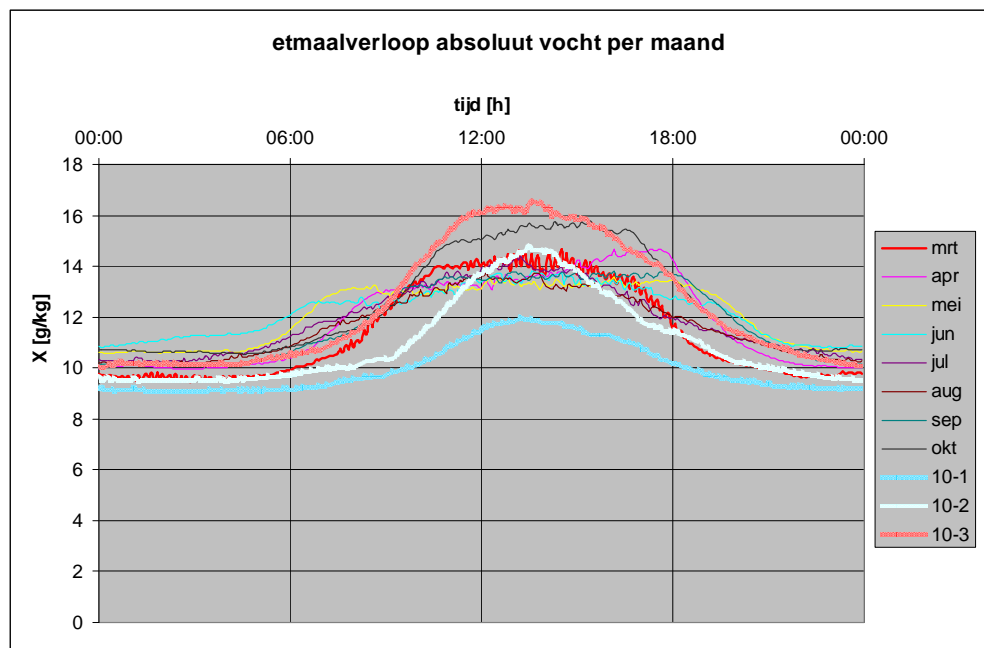
In de droge wintermaanden (10-1, 10-2 en 10-3) blijken inderdaad de absolute vochtverschillen tussen de kas en buiten het grootst (gemiddeld ca 6,5 g/kg). De hoogste absolute vochtigheden in de kas treden in de voorjaarsmaand maart (10-3) en de najaarsmaand oktober op. Het verschil is dat in maart de absolute vochtigheid buiten lager is. In oktober is de ventilatie voor vochtbeheersing daarom kritischer. De grafiek toont aan dat de ventilatie uiteraard ook in de zomerperiode belangrijk is voor vochtbeheersing. De ventilatie is dan echter makkelijker te realiseren omdat het energiegebruik dan ondergeschikt is (de verdampingswarmte hoeft niet door de verwarming te worden geleverd). De ventilatie voor temperatuurbeheersing zal in de zomer veelal vanzelf voor afdoende vochtbeheersing zorgen. Alleen tijdens zwoele zomernachten bleek eerder [1] dat bewust voor vochtbeheersing moet worden geventileerd.

Behalve het jaarpatroon met maandgemiddelde absolute vochtigheden is ook het etmaalpatroon per maand vastgesteld en voor de verschillende maanden vergeleken. Figuur 35 geeft dit weer.

De figuur bevestigt dat de wintermaand januari (10-1) duidelijk iets droger is, vooral overdag. Dit zal samenhangen met het lagere aantal zonuren (minder gewasverdamping). Meer zon zal de oorzaak zijn dat in februari (10-2) al duidelijk meer verschil tussen dag en nacht optreedt.

De figuur bevestigt ook dat in voor- en najaar (10-3 en oktober) gemiddeld de hoogste absolute vochtigheden in de kas optreden.

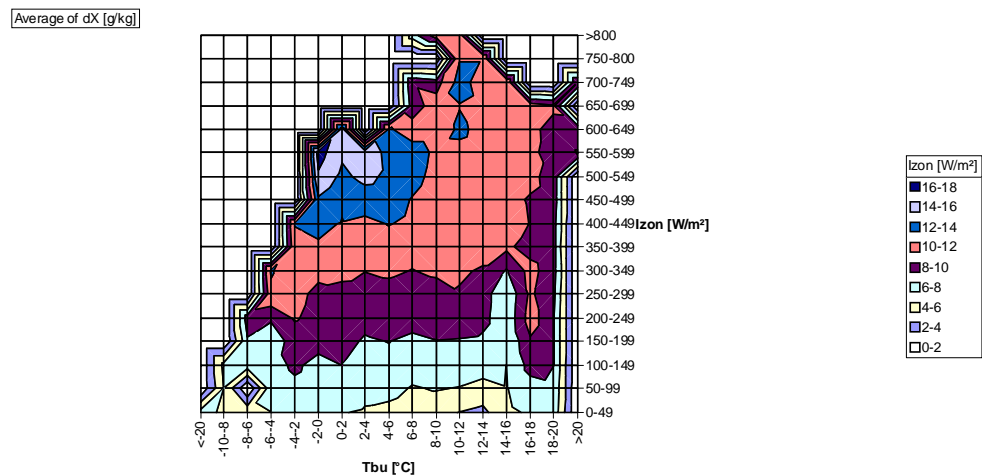
Opvallend is het verschil tussen maart 2009 (rode lijn) en de vergelijkbare periode in 2010 (10-3, oranje lijn). Vooral overdag was de absolute vochtigheid hoger in de vergelijkbare periode van 2010. Het is niet duidelijk of dit samenhangt met een ander aantal zonuren of dat er sprake is van beter gedoseerde luchting in combinatie met effecten van het dubbele scherm.



Figuur 35 Gemiddeld etmaalverloop van de absolute vochtigheid in verschillende maanden

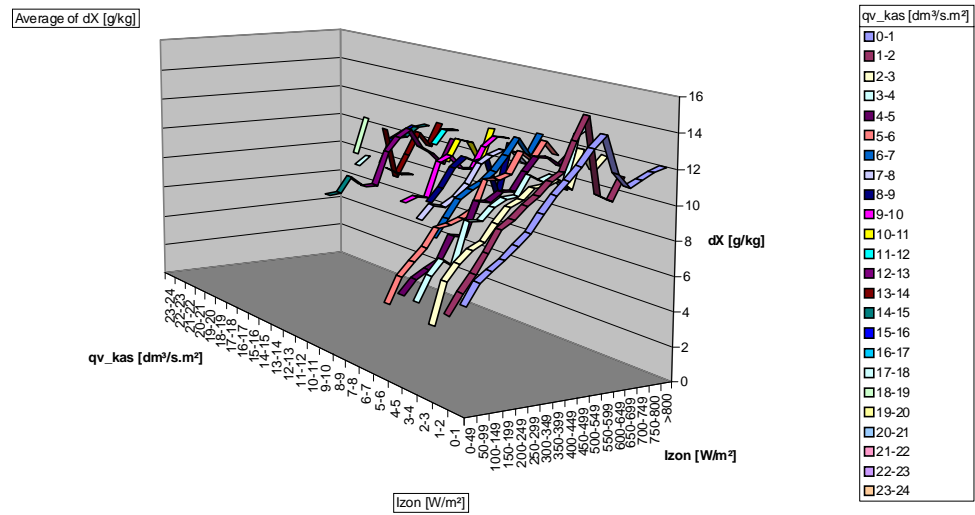
Figuur 36 laat zien dat de toename van de absolute vochtigheid in de kas ten opzichte van buiten vrij sterk samenhangt met meer zon, ten gevolge van het stimuleren van verdamping.

De figuur laat ook zien dat bij lagere buitentemperaturen het absolute vochtverschil groter is. Dit hangt samen met minder ventilatie bij lagere buitentemperaturen.



Figuur 36 Absolute vochttoename als functie van zon en buitentemperatuur

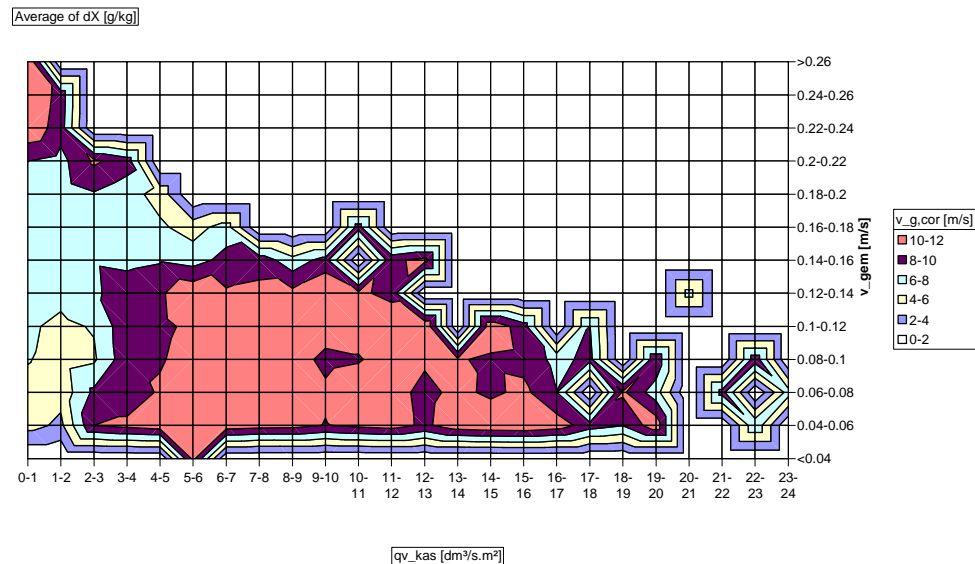
Figuur 37 laat zien dat door de zon de absolute vochtverhoging in de kas ten opzichte van buiten duidelijk toeneemt. De verhoging door minder ventilatie is echter beperkt. Dit komt natuurlijk doordat de ventilatie in de beschouwde winter- en voorjaarsperiode vooral nog wordt afgestemd op de vochtigheid c.q. de vochtproductie en niet op warmteafvoer tijdens zonnige warme dagen, die in deze periode nog schaars zijn.



Figuur 37 Toename van de absolute vochtigheid als functie van zon en ventilatie

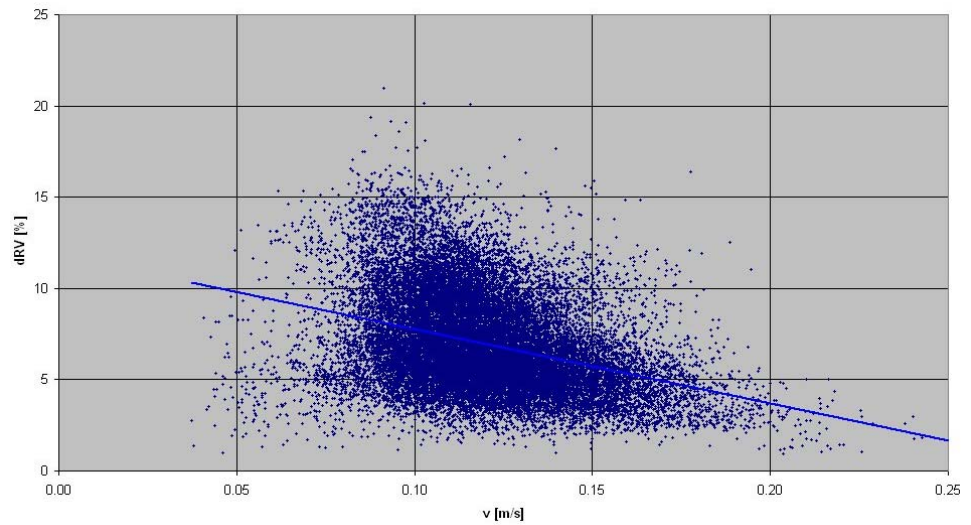
De verdamping vanaf het gewas wordt in principe ook gestimuleerd door luchtbeweging. Luchtbeweging zorgt namelijk voor een betere overdracht van vocht van het blad naar de lucht.

Figuur 38 laat zien dat bij geringe kasventilatie een verhoogde luchtbeweging inderdaad leidt tot een grotere absolute vochttoename. Het gaat dan om ventilatiestromen in de orde van grootte van de capaciteit van de slangluchting (2 dm³/s.m²). Als er echter grotere ventilatiestromen plaatsvinden, dan is de invloed van de luchtbeweging niet meer duidelijk herkenbaar.



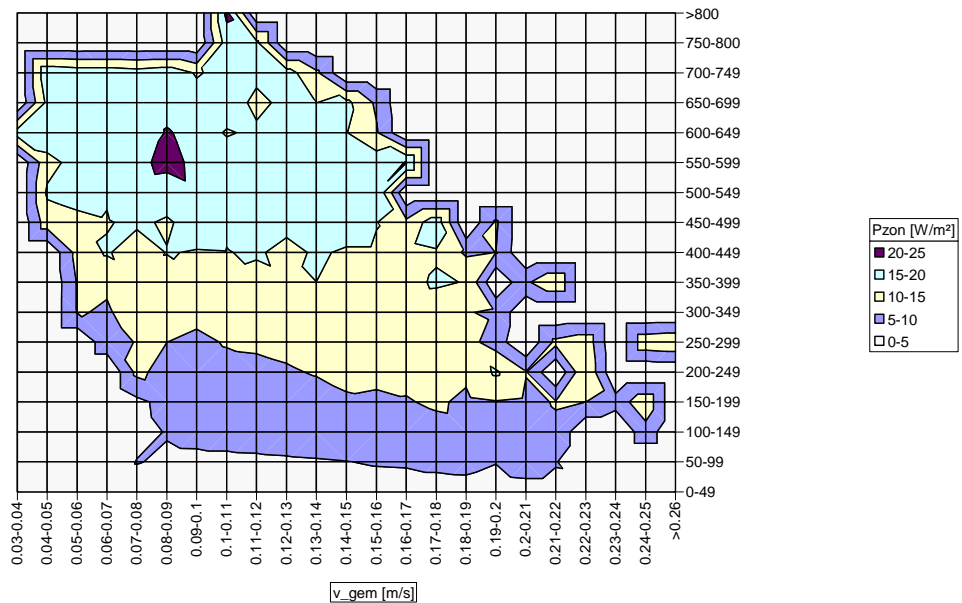
Figuur 38 Absolute vochttoename in relatie tot luchtbeweging en ventilatie

Luchtbeweging zorgt ook voor meer menging. Hierdoor kunnen lokale verschillen in vochtigheid worden verkleind. Figuur 39 laat zien dat verschillen in RV over de kaplengte inderdaad kleiner worden als de luchtbeweging toeneemt.



Figuur 39 RV-gradiënt over de kaplengte als functie van de gemiddelde luchtsnelheid

Voor verschillen in RV over de hoogte kon geen duidelijk verband met de luchtbeweging worden aangetoond. Daar blijkt vooral de zonstraling een belangrijke invloed te hebben (Figuur 40).

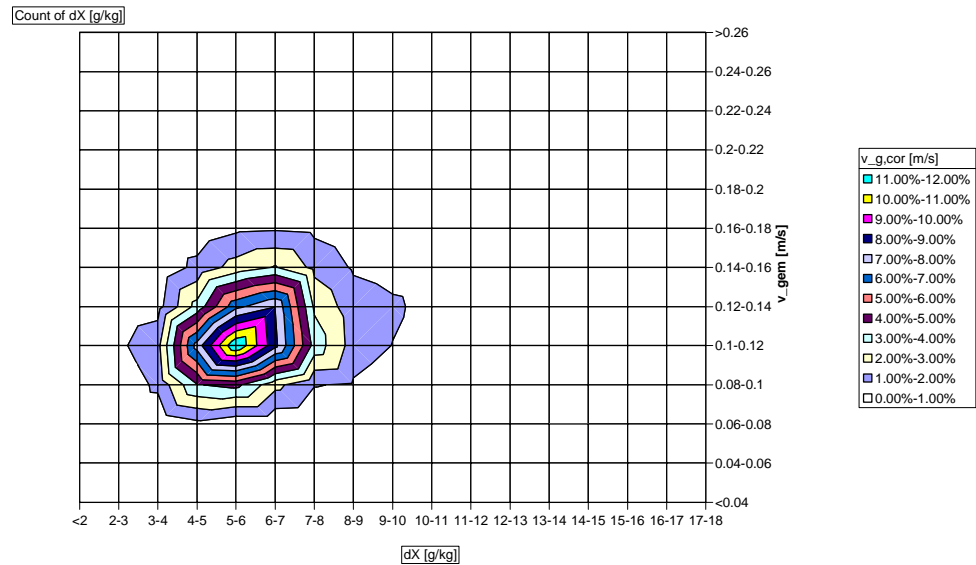


Figuur 40 RV-gradiënt over de kaphoogte als functie van de gemiddelde luchtsnelheid en zon

Omdat de betrouwbaarheid van de uitspraken over vocht en luchtbeweging samenhangt met het aantal waarnemingen van de verschillende condities, is tevens geanalyseerd welke combinaties van absolute vochttoename en luchtsnelheid vooral voorkomen. Figuur 41 geeft dit weer.

De waarnemingen blijken ruim gespreid te liggen rond een vochttoename van 6 g/kg en 0,12 m/s luchtsnelheid. De min of meer ronde vormen rond dit maximum geven aan dat

er geen duidelijke voorkeurscombinaties zijn. Als grotere vochttoenames systematisch gepaard zouden gaan met hogere luchtsnelheden, dan zou een meer langgerekte vorm van linksonder in de grafiek naar rechtsboven zichtbaar zijn. Dit onderstreept dat er geen harde relatie is aan te tonen tussen vochttoename en luchtbeweging.

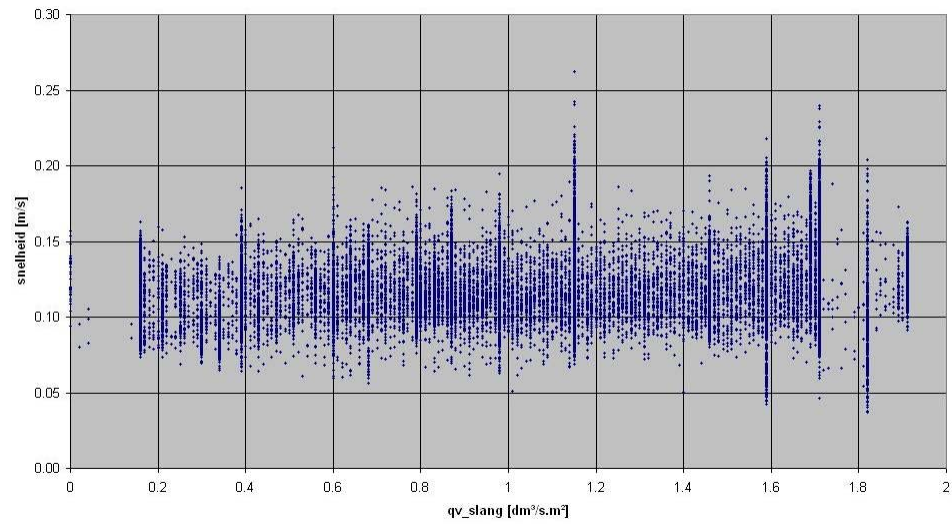


Figuur 41 Distributie (kans van voorkomen) van absolute vochttoename in relatie tot luchtbeweging

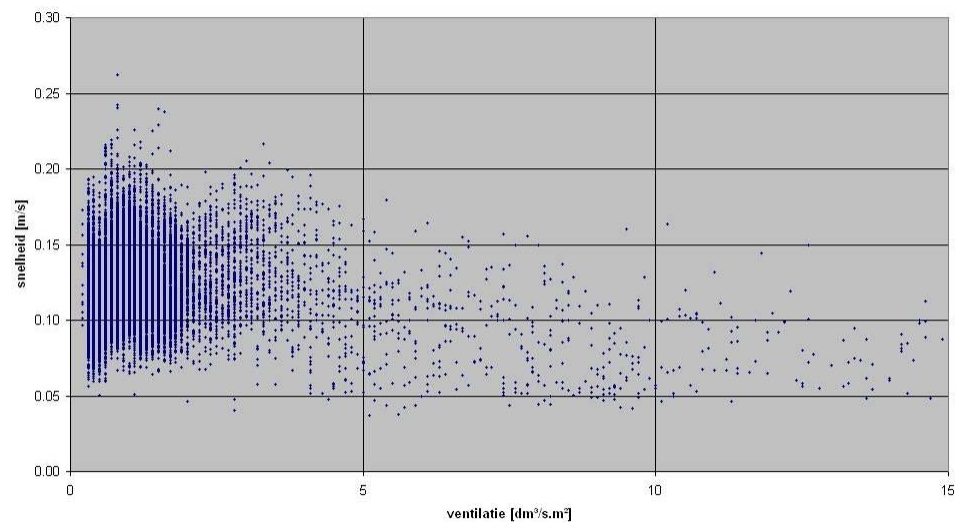
4.4 Luchtbeweging

Er is geanalyseerd of de luchtbeweging aantoonbare verbanden vertoont met invloedsfactoren. Als eerste is de relatie met de luchtstroom door de luchtslangen nagegaan (Figuur 42).

De figuur toont geen systematisch verband van de luchtsnelheid met het slangdebiet. Dat wil nog niet zeggen dat de luchtslangen niet (mede) van invloed zijn. Alleen is de invloed van de luchtslang op de luchtbeweging niet dominant.



Figuur 42 Gemiddelde luchtsnelheid in het gewas als functie van het debiet van de luchtslangen

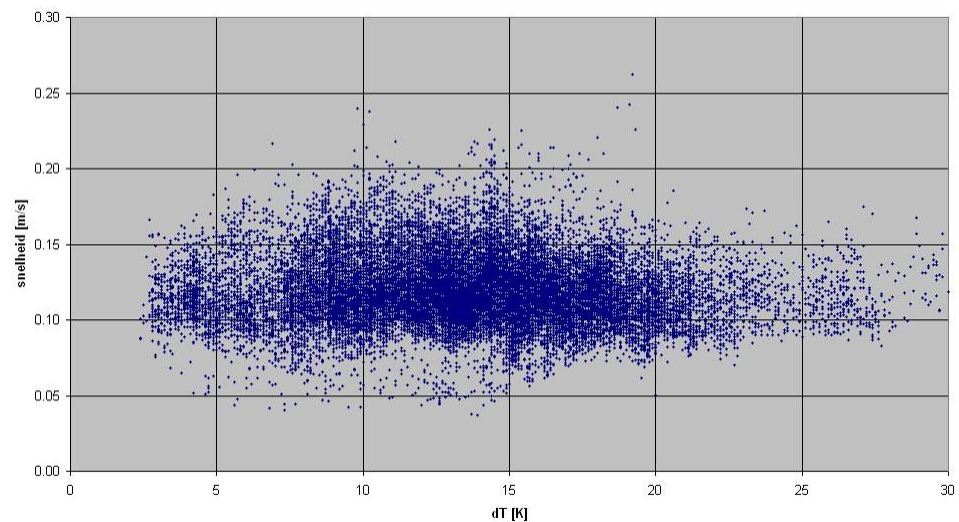


Figuur 43 Gemiddelde luchtsnelheid in het gewas als functie van de totale kasventilatie

De luchtslang verzorgt maar een beperkt deel van de totale kasventilatie. Daarom is nagegaan of er een verband bestaat tussen de totale kasventilatie en de luchtbeweging (Figuur 43). Ook deze grootte blijkt echter geen duidelijke relatie met de

luchtbeweging te vertonen. Als er al iets van een trend zichtbaar is, dan lijkt het eerder het aflopen van de luchtsnelheid met toenemende kasventilatie.

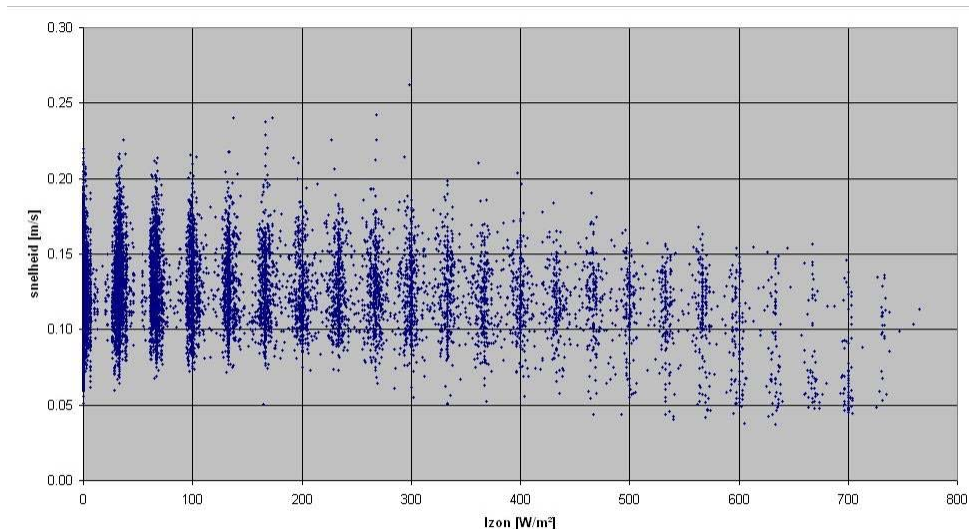
Hogere luchtsnelheden in de kas kunnen behalve met luchtinblaas via de slangen of kasramen samenhangen met thermische effecten. Temperatuurverschillen van bijvoorbeeld verwarmingselementen met de kaslucht of van het koude dek genereren natuurlijke luchtstromen. Als het buiten kouder is, zullen de drijvende krachten voor zulke luchtstromen sterker zijn. Daarom is ook de relatie tussen de luchtbeweging en het temperatuurverschil tussen binnen en buiten nagegaan (Figuur 44). Ook met deze grootheid is geen trend zichtbaar.



Figuur 44 Gemiddelde luchtsnelheid in het gewas als functie van het temperatuurverschil tussen binnen en buiten

De zoninstraling vormt een belangrijk element in de thermische luchthuishouding van de kas. Zonnewarmte valt vooral op de bovenste bladlagen en zorgt daarom voor hogere temperaturen boven dan beneden. Dit zorgt voor een stabiele gelaagde klimaatopbouw, waarin natuurlijke luchtstromingen worden onderdrukt. Zon kan dus een belangrijke oorzaak zijn voor de spreiding in de voorgaande figuur.

Figuur 45 laat zien wat de invloed is van zoninstraling op de luchtbeweging in het gewas. Er lijkt inderdaad een licht remmend effect te zien (aflopen van de luchtsnelheid) bij hoge zonbelasting. De trend is echter zwak en de spreiding is groot. De relatie is dus niet hard.



Figuur 45 Gemiddelde luchtsnelheid in het gewas als functie van de zoninstraling

Geen van de voornoemde effecten lijkt dominant te zijn voor de luchtbeweging. Er zal dus meer inzicht moeten komen in het samenstel van die effecten om de luchtbeweging te kunnen verklaren. Er zijn verschillende bronnen die de luchtbeweging veroorzaken.

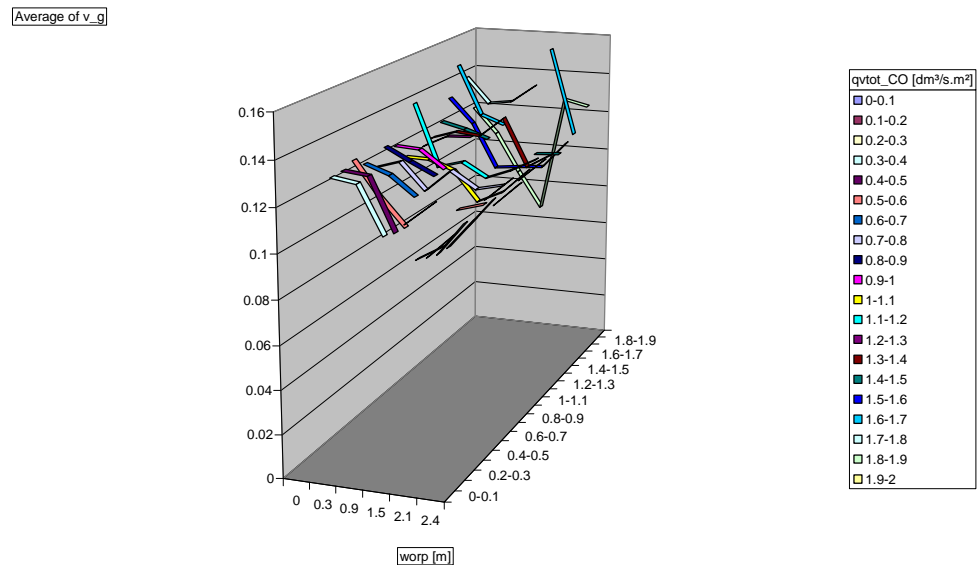
De impuls die zorgt voor luchtbeweging in de kas is afkomstig van:

- kinematische impuls van de onderbeluchting (inblaasenergie van de luchtslangen);
- kinematische impuls van de raamluchting (energie van de intredende lucht via de ramen);
- thermische impuls van de buisverwarming (opstijgende lucht boven de warme buizen);
- thermische impuls van de luchtslangen (opstijgende lucht boven de warme luchtslangen);
- thermische impuls van het koude dek of scherm (koude vallende lucht onder het dek of scherm bij lage buitentemperaturen);
- thermische impuls van de ingestraalde zonnewarmte (opstijgende lucht boven de door de zon beschenen bladeren).

Al deze bronnen leveren bewegingsenergie (impuls). De bewegingsenergie van de ene bron kan die van de andere bron versterken, maar ook tegenwerken. Er zal dus inzicht moeten komen in het samenspel, om beter te leren begrijpen welke luchtbewegingen er ontstaan en in het bijzonder wat daarin de rol is van circulatie, ventilatie en warmtelevering via slangluchting. Zoiets wordt gezien als een studie op zich.

Vooralsnog kan het analyseren van meervoudige relaties een volgende stap naar een verdere verklaring van de luchtsnelheden bieden.

Bij de eerdere, momentane metingen aan de slanguitblaas was geconstateerd dat door de worp van de lucht vooral plaatselijk verhoogde snelheden optraden. Figuur 46 is samengesteld om hierin inzicht te krijgen.

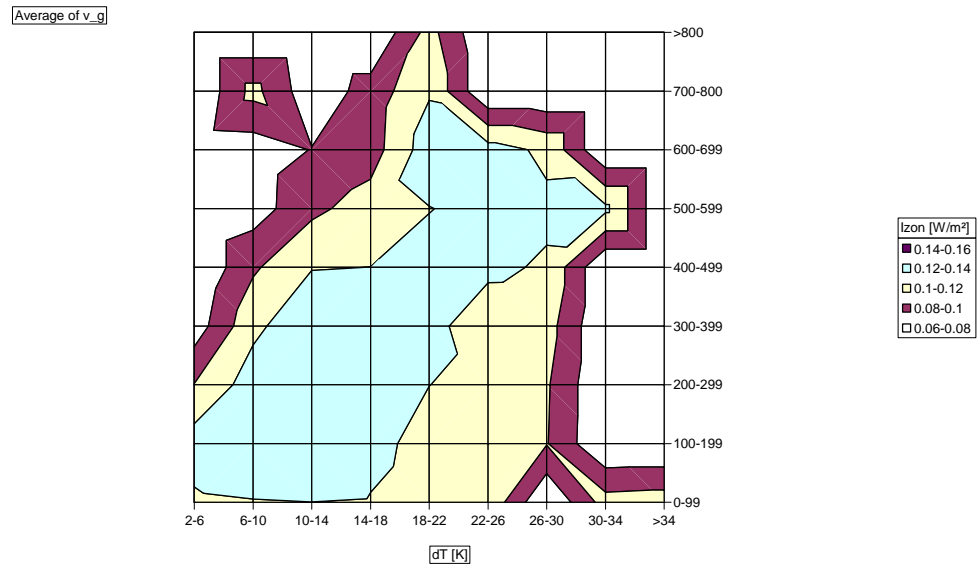


Figuur 46 Luchtsnelheid afhankelijk van slangdebiet en worpafstand

Uit de figuur lijkt dat op de tussenafstand iets lagere snelheden voorkomen, vooral bij hoge of lage slangdebieten.

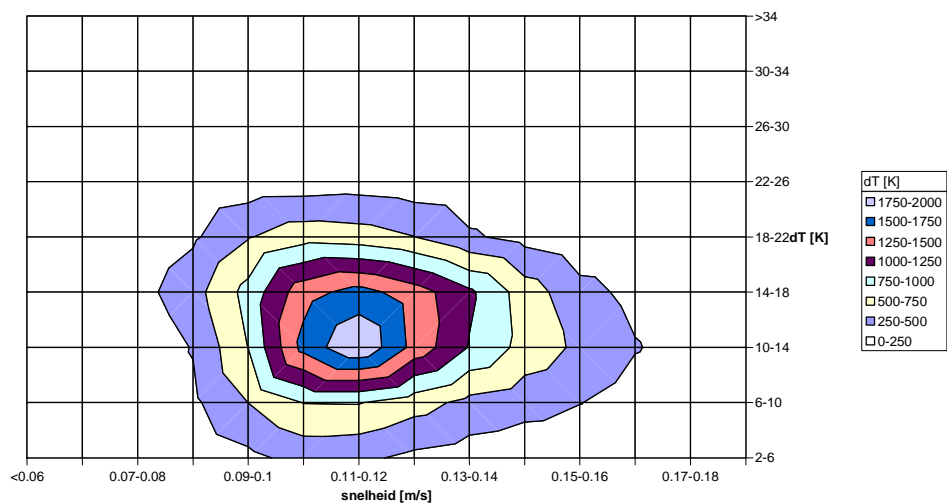
Bij de hogere debieten is dit beeld te verklaren uit het verloop van de luchtsnelheid met de worpafstand vanaf de luchtslang. De worp hangt samen met de horizontale uitblaasrichting onder de teeltgoten, in interactie met de verwarming. Dit zorgt veelal voor een hoofdwervel door het gewas, die halverwege twee slangen (worpafstand ca 2,4 m) omhoog stroomt en boven de slangen (worpafstand ca 0 m) omlaag. Hier tussen ontstaat dan een luwte, die de lagere snelheden op de tussenafstand kan verklaren. Bij debieten rond 1 dm³/s.m² is het verloop met de worp niet zichtbaar. De worp reikt dan kennelijk juist tot de middenafstand in het gewas.

Voor een consistent beeld zou bij lage slangdebieten vooral de snelheid op korte worpafstand moeten zijn verhoogd. Dat is niet duidelijk zichtbaar. Het gehele beeld is al met al niet erg sterk.

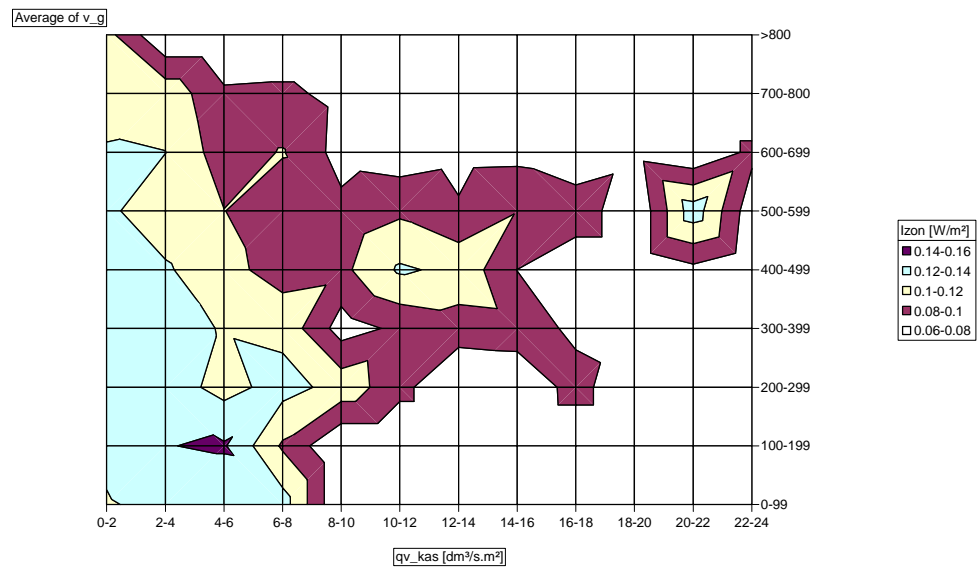


Figuur 47 Luchtsnelheid in de kas als functie van zon en temperatuurverschil tussen binnen en buiten

Eerder is opgemerkt dat de zon voor een stabiele klimaatopbouw kan zorgen, die tot lagere luchtsnelheden tussen het gewas zou kunnen leiden. Figuur 47 laat zien dat dit klopt tot temperatuurverschillen tussen binnen en buiten van circa 20 K. De figuur laat voor dit bereik ook zien dat de snelheden toenemen als het buiten kouder wordt. Er zijn dan meer warmtebronnen in de kas, hetgeen de natuurlijke, thermisch gedreven luchtstromen bevordert. Bij temperatuurverschillen tussen binnen en buiten boven circa 20 K klopt dit beeld niet meer en lijkt zelfs om te keren. Figuur 48 laat zien dat dergelijke grote temperatuurverschillen echter weinig zijn voorgekomen, zodat men voor deze situaties voorzichtig moet zijn met conclusies.



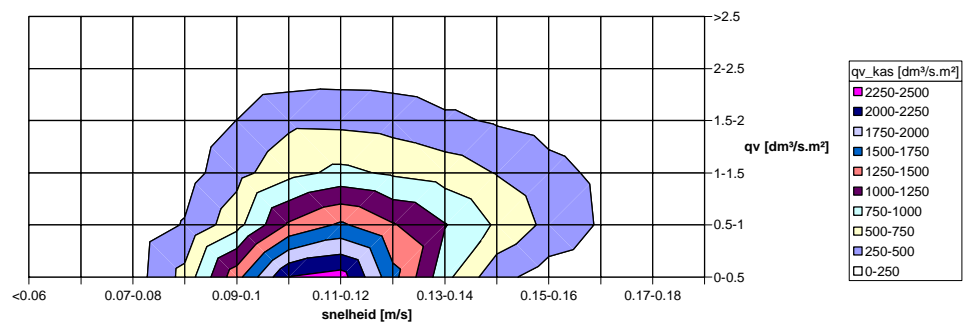
Figuur 48 Distributie (kans van voorkomen) van de luchtsnelheid in relatie tot het temperatuurverschil tussen binnen en buiten



Figuur 49 Luchtsnelheid in de kas als functie van ventilatie en zon

Het openen van ramen zorgt voor bewegingsenergie van de intredende lucht. Figuur 49 geeft dit niet aan bij de overeenkomstige kasventilatie, dat wil zeggen ruim boven het bereik van de luchtslangen ($> 2 \text{ dm}^3/\text{s.m}^2$). In combinatie met de zoninvloed is dit niet terug te zien in de luchtsnelheden in de kas. In tegendeel, des te meer ventilatie, des te lager de luchtsnelheden. De figuur laat ook zien dat meer ventilatie vooral plaatsvindt bij meer zon. Die zorgt voor meer verdamping (vochtafvoer nodig) of meer warmte (warmteafvoer nodig). Kennelijk is dus de stabiele klimaatopbouw bij zon dominantier voor het snelheidsbeeld in het gewas dan de bewegingsenergie van de ventilatie die vooral boven het gewas vrijkomt.

Overigens dient men voorzichtig te zijn met conclusies op dit punt. Figuur 50 laat namelijk zien dat in de beschouwde, koude periode situaties met hoge ventilatie weinig voorkomen, zeker niet met ventilatieniveaus die bij ruim geopende kasramen kunnen worden verwacht.



Figuur 50 Distributie (kans van voorkomen) van de luchtsnelheid in relatie tot de kasventilatie

4.5 Energie

Uit de klimaatmeetgegevens en de registraties van de klimaatcomputer zijn de belangrijke energiegebruiksposten (per m² kasoppervlak) afgeleid:

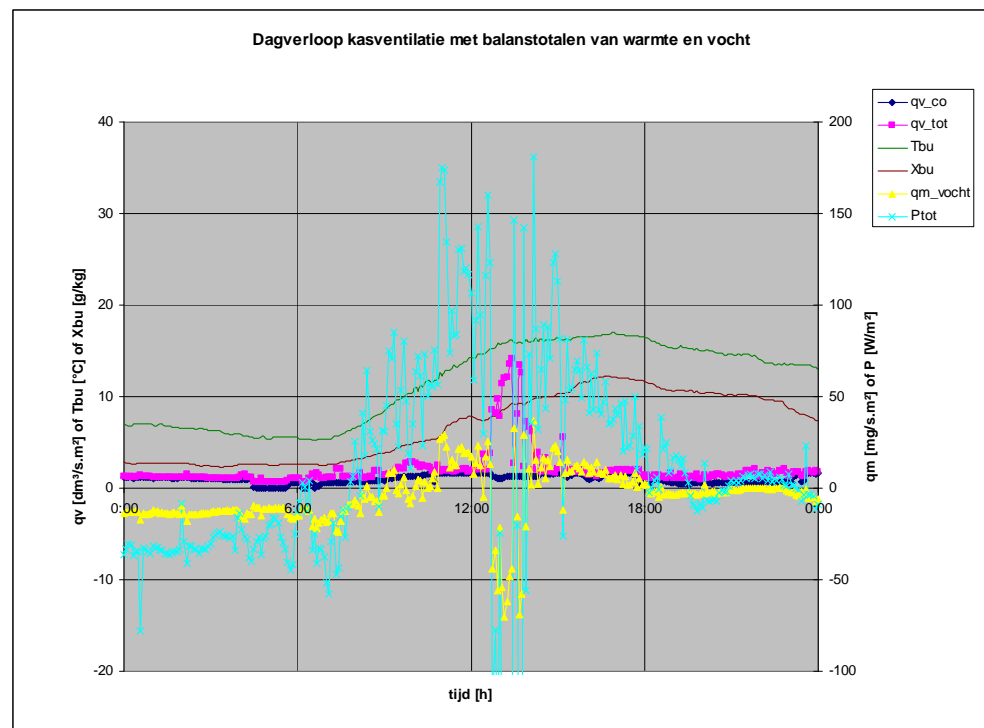
- De *zonnewarmte* is berekend door vermenigvuldiging van de stralingsintensiteit (toename van de stralingsom per tijdsfractie) met de instralingsfactor ZTA, die een functie is van het schermgebruik;
- De afgifte van de *buisrails* is berekend door vermenigvuldiging van het buisoppervlak met het temperatuurverschil tussen buis en kaslucht (onderin) en met de warmteoverdrachtscoëfficiënt voor straling en convectie (die beide een functie zijn van de buistemperatuur);
- De afgifte van de *luchtslangen* is berekend door de luchtstroom via de slangen te vermenigvuldigen met het temperatuurverschil van de lucht voor en na de warmtewisselaar van de luchtslang, de soortelijke massa van lucht en de soortelijke warmte van lucht;
- Om de vrijkomende *condenswarmte* te bepalen is eerst de condensproductie berekend uit het dampspanningsverschil tussen de kaslucht bij kastemperatuur en bij ruittemperatuur (die is afgeleid uit de transmissie). Door dit te vermenigvuldigen met de verdampingswarmte van water is de warmteproductie door condensatie berekend. Het aandeel dat naar buiten ontwijkt, is bepaald via de transmissie van het glas. Overigens is een onzekere factor in de vochtbalans welk aandeel van de condens wordt afgevoerd of in de kas blijft en mogelijk weer verdampt;
- Het *transmissiewarmteverlies* is berekend door vermenigvuldiging van het temperatuurverschil tussen (bovenin) de kas en buiten met een oppervlaktecorrectiefactor (voor gevelaandeel en dekhelling) en de (variabele) U-waarde van het dek met zijn (instelbare) schermen;
- Het voelbare *ventilatiwarmteverlies* is berekend door de kasventilatiestroom te vermenigvuldigen met het temperatuurverschil tussen (bovenin) de kas en buiten, de soortelijke massa van lucht en de soortelijke warmte van lucht. Het latente deel is berekend door de absolute vochttoename tussen inlaat (buitenconditie) en afvoer (kasconditie) in de kasventilatiestroom te vermenigvuldigen met de verdampingswarmte van het vocht. De kasventilatiestroom is hiervoor (en voor de eerdere analyses) apart berekend met een ventilatiemodel uit de raamstanden en de drijvende krachten bij de heersende wind- en temperatuurcondities (thermiek), alsmede het mechanische ventilatieaandeel door de luchtslangen (afhankelijk van de ingestelde ventilator- en klepstand);
- De benodigde warmte voor *verdamping* tenslotte is afgeleid door de dampproductie bij het geraamde bladoppervlak te berekenen met een (voor kastemperatuur enigszins gecorrigeerde) Penman-vergelijking (functie van de intensiteit van de binnenkomende zonstraling op het beschenen bladaandeel, het vochtdeficit en de dampdruk) en die te vermenigvuldigen met de verdampingswarmte van water. Op de dampproductie is enige correctie toegepast, die is afgeleid door de gemiddelde dagsom van het verdampte vocht gelijk te maken aan de watergift gecorrigeerd voor groei (wateromzetting in vaste stof).

De warmtelevering aan de buisrails en de luchtslangen tezamen is hierna betiteld als de stookwarmte (totale levering door de verwarmingssystemen).

Zowel de warmte- als vochtbalans is gecontroleerd. Systematische afwijkingen over langere duur zijn gebruikt voor fijnafstelling van de rekenmodellen ('fitten'). Momentane verschillen tussen het totaal aan warmtelevering en het totaal aan warmteverlies kunnen worden verklaard door warmteaccumulatie in de bodem en kasconstructie.

In de vochtbalans bestaat een bepaalde onzekerheid omtrent het aandeel van de condens dat uit de kas wordt afgevoerd en het aandeel dat terugkomt in de kas, om opnieuw in de vochtkringloop te komen. Ook de vochtaccumulatie en eventuele verdamping uit of vanaf de met plastic afgedekte bodem is niet precies te schatten.

Het zal duidelijk zijn dat de energiebeschouwingen in dit hoofdstuk daarom uitsluitend als indicatief moeten worden beschouwd.



Figuur 51 Netto warmte- en vochtstromen en ventilatie op een zonnige voorjaarsdag (18 maart)

Figuur 51 laat de balanstotalen van de vocht- en warmtestromen zien voor een zonnige voorjaarsdag.

De gele lijn geeft de netto vochtstroom aan (q_{m_vocht}), zijnde de gewasverdamping, verminderd met de condensatie en de vochtafvoer via ventilatie. Duidelijk is de verdampingsperiode overdag te zien met de invloed van de ventilatie; als de (afvoer door) ventilatie toeneemt, daalt de netto vochtstroom.

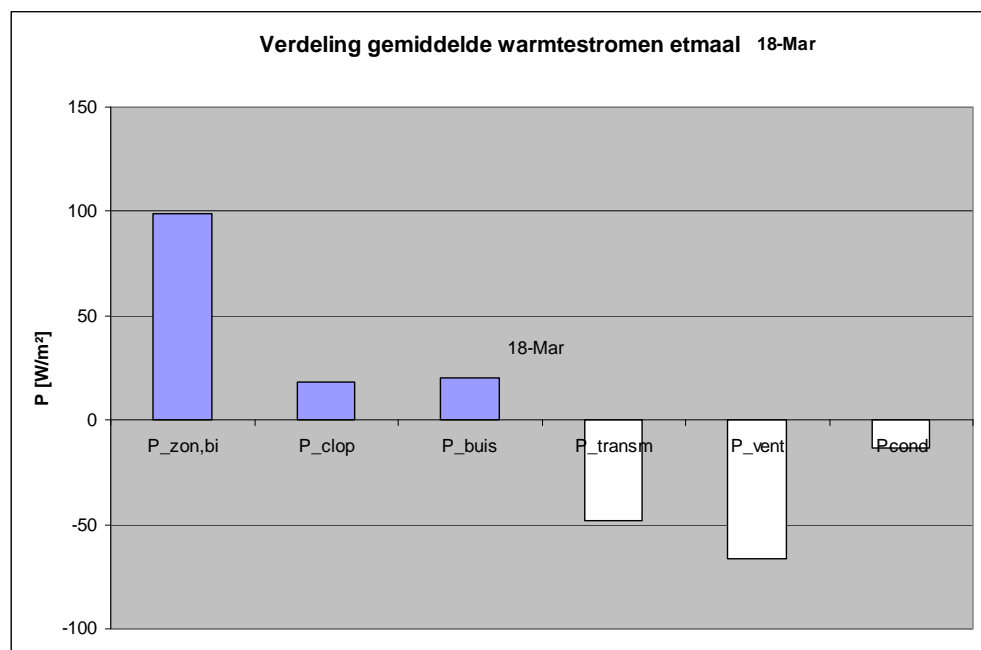
De lichtblauwe lijn geeft de netto warmtestroom aan (P_{tot}), zijnde zoninstraling en stookwarmte (via buis en luchtslang), verminderd met transmissie, ventilatie en condensatie. Ook hierin is duidelijk de invloed van zon en ventilatie te zien.

De momentane waarden van vocht- en warmteproductie schommelen sterk. Hun meerdaagse gemiddelden zijn weliswaar nul, maar de dagsommen kunnen nog afwijken van nul. De overschotten overdag worden globaal gecompenseerd door de tekorten in de nacht. De verschillen tussen dag en nacht zullen voor een belangrijk deel worden gebufferd in de bodem en kasconstructie, maar kunnen ook samenhangen met onnauwkeurigheden van de modellen.

[Ter oriëntatie: het getoonde vochttekort in de eerste 8 uren van de ochtend komt overeen met verdamping uit de bodem van een beker water ($0,28 \text{ dm}^3$) per m^2 . De hiervoor benodigde verdampingswarmte van 700 kJ komt overeen met de getoonde, gemiddelde warmteonttrekking van 25 W/m^2 gedurende die 8 uren].

Voor de interpretatie zijn in de grafiek verder nog lijnen weergegeven voor temperatuur (T_{bu}) en absolute vochtigheid buiten (X_{bu}) en voor de kasventilatie (q_{v_tot}) met het aandeel van de luchtslangen (q_{v_co}).

Figuur 52 geeft voor dezelfde dag de bijbehorende etmaalgemiddelden van de genoemde deelposten in de warmtebalans. Stookwarmte ($P_{buis} + P_{clop}$) blijkt nog maar één derde van de warmteproductie uit te maken. Er wordt geventileerd om de vochtproductie ten gevolge van de bezonning te beheersen. Het warmteverlies door deze ventilatie is al groter dan het transmissieverlies. Het condensatieverlies is beperkt.

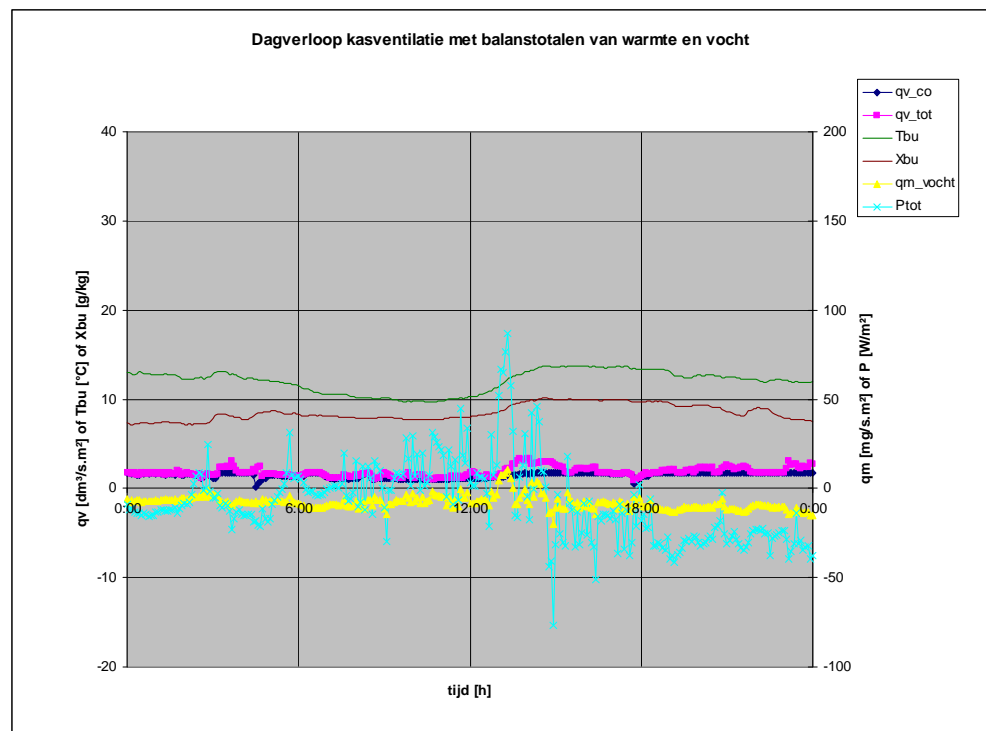


Figuur 52 Verdeling warmtestromen op een zonnige voorjaarsdag

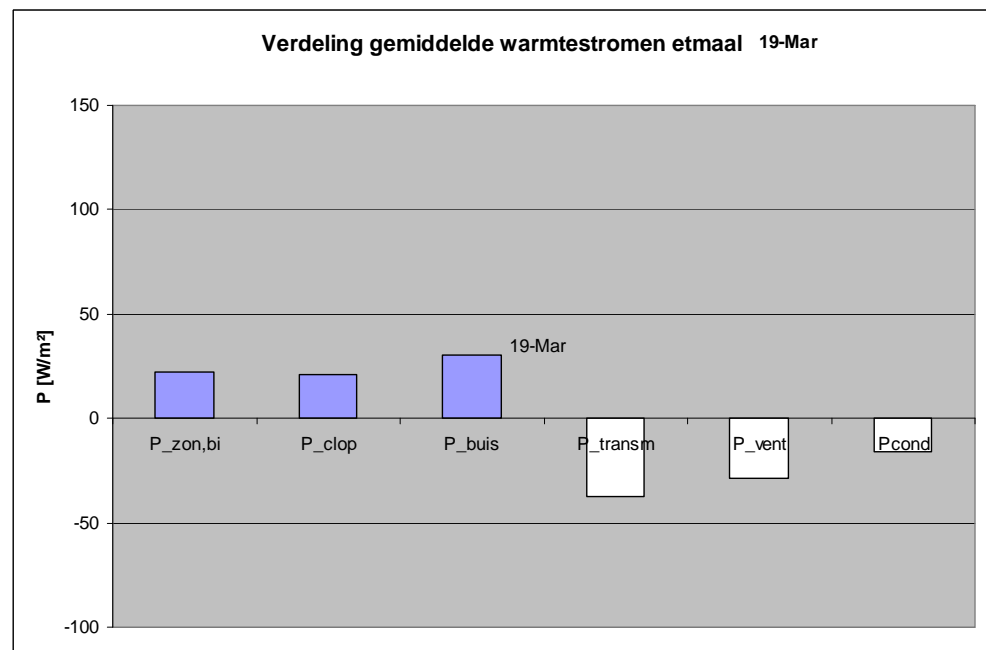
Ook voor een meer bewolkte voorjaarsdag en typische winterdagen met en zonder zon worden soortgelijke grafieken gegeven.

Op de bewolkte voorjaarsdag (Figuur 53 en Figuur 54) vertoont de vochtbalans minder dynamiek, omdat er vanwege het mindere zonlicht minder verdamping optreedt.

Doordat er minder zon is, moet iets meer worden verwarmd, maar het verschil met de zonnige voorjaarsdag is beperkt. Dat komt omdat er beduidend minder hoeft te worden geventileerd en omdat het scherm langer kan worden gebruikt (kleiner transmissieverlies).

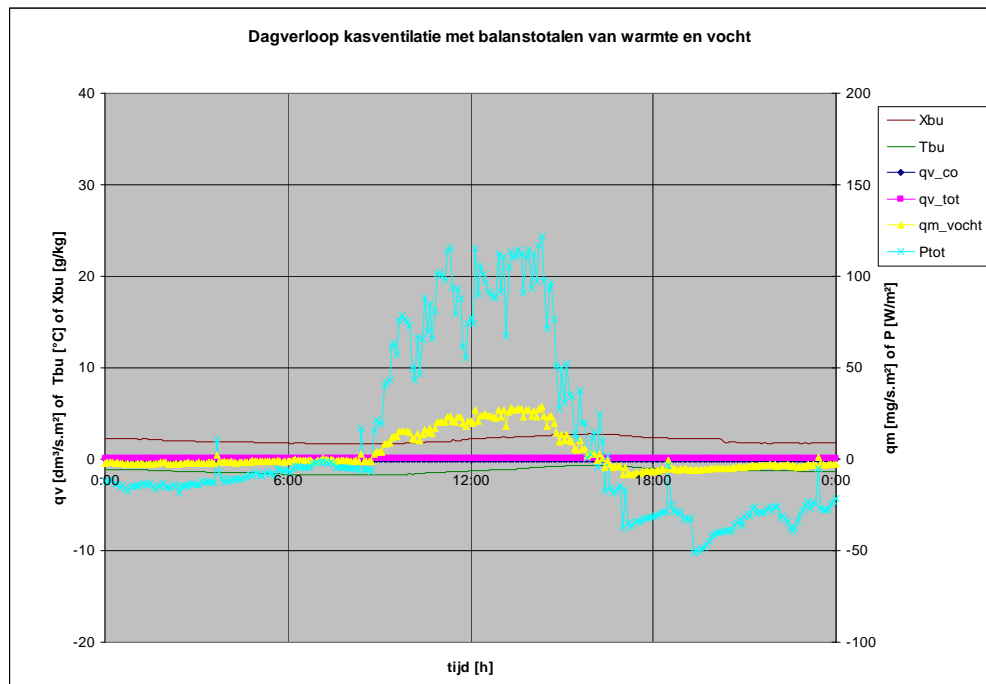


Figuur 53 Warmte- en vochtstromen en ventilatie op een bewolkte voorjaarsdag (19 maart)

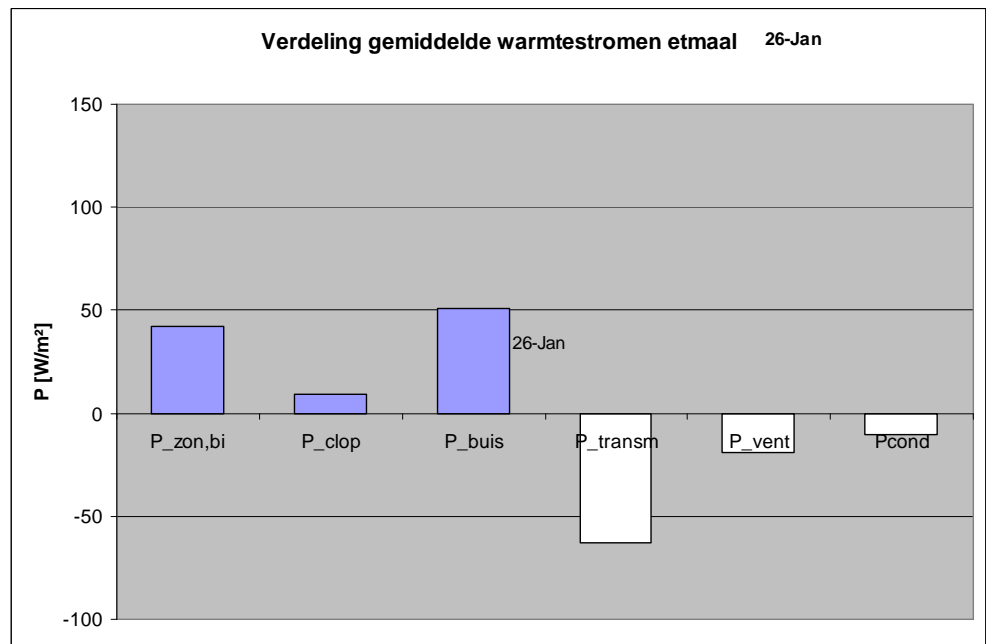


Figuur 54 Verdeling warmtestromen op een bewolkte voorjaarsdag

Op de zonnige winterdag (Figuur 55 en Figuur 56) blijkt het stookverlies ongeveer $1,5\times$ zo groot als op de zonnige voorjaarsdag. Ondanks de veel lagere buitentemperatuur en minder zonuren en zonsterkte wordt er niet heel veel meer gestookt. Dat komt omdat het ventilatieverlies lager blijft (geen vochtafvoer nodig) en door een lagere binnentemperatuur en langer schermen.



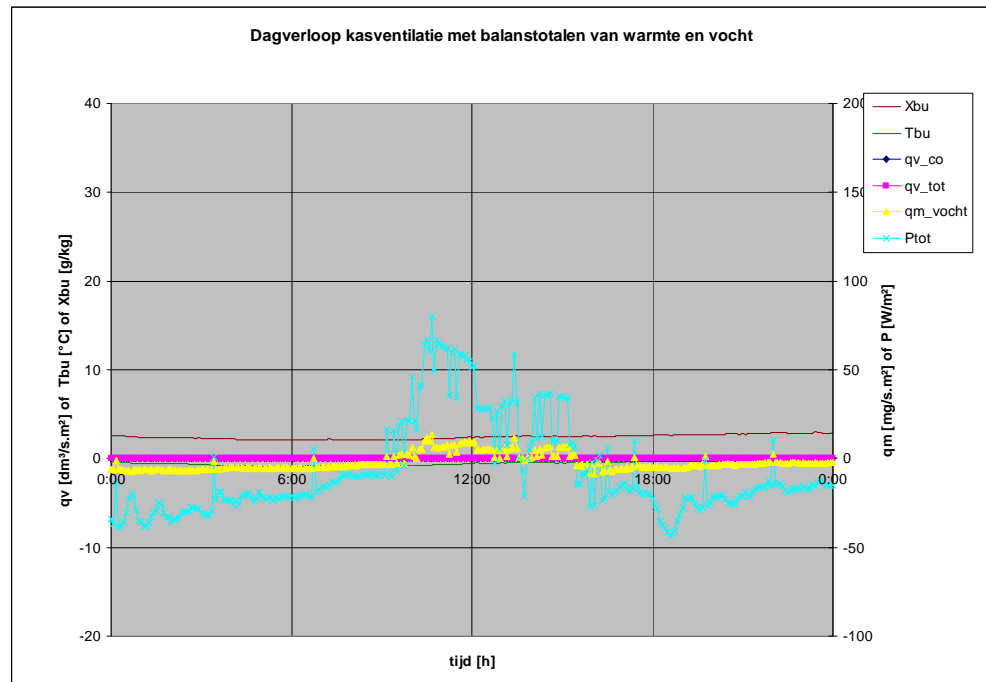
Figuur 55 Warmte- en vochtstromen en ventilatie op een typische zonnige winterdag (26 januari)



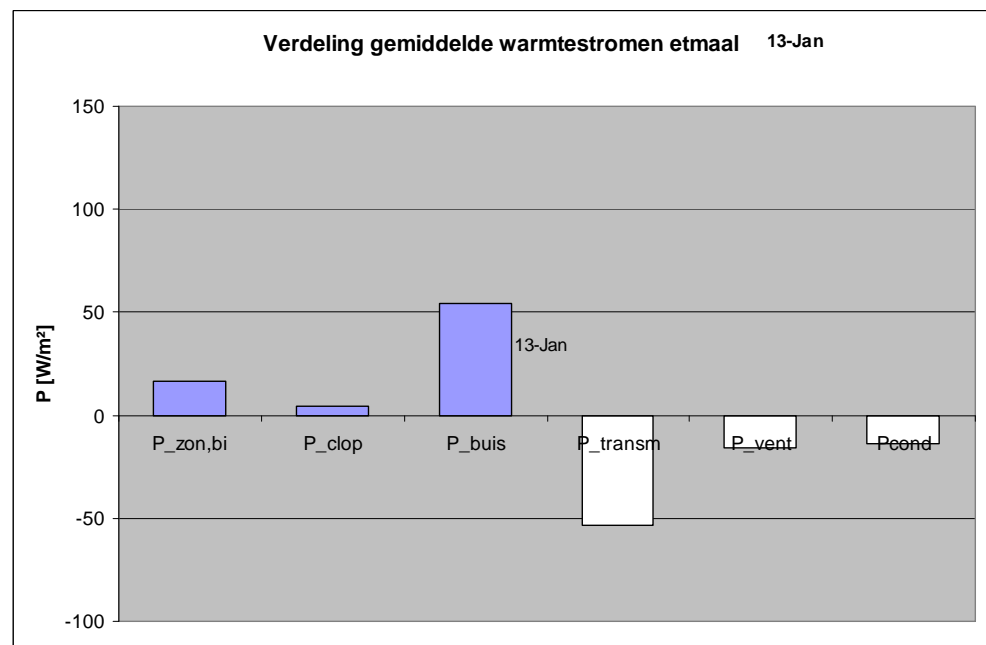
Figuur 56 Verdeling warmtestromen op een typische zonnige winterdag

Op de bewolkte winterdag (Figuur 57 en Figuur 58) hoeft maar iets meer te worden gestookt dan op de zonnige winterdag. De zon levert weliswaar minder, maar dit maakt meer schermen mogelijk. De bewolking zorgt bovendien voor iets minder strenge vorst. Beide effecten zorgen dat het transmissieverlies kan worden beperkt. Dan is in het model nog geen rekening gehouden met een verminderde nachtelijke uitstraling bij bewolking (slechts als gemiddelde, maar niet als variabele meegenomen).

Ook het ventilatiewarmteverlies is minder, omdat de buitentemperatuur minder extreem is. Het tekort aan zon zorgt tenslotte dat de verdamping ook minder warmte vergt. Het nadeel hiervan is echter wel dat het gewas minder productief zal zijn.



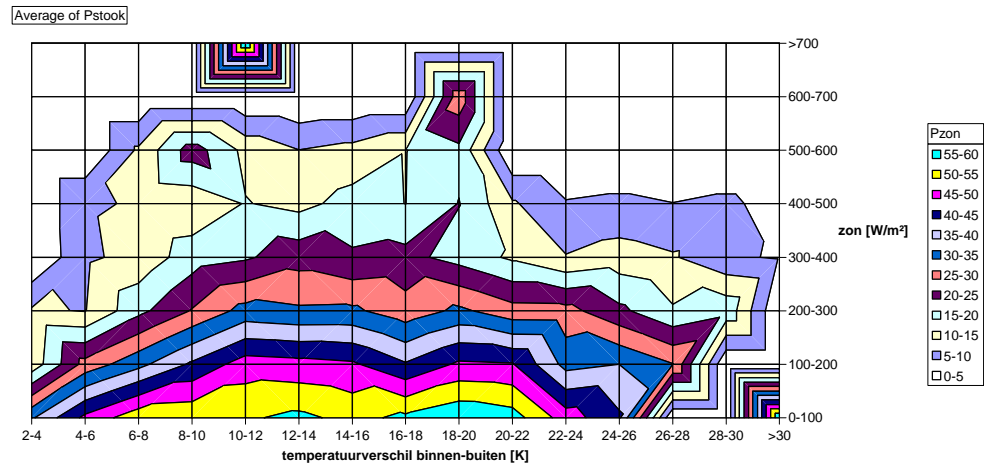
Figuur 57 Warmte- en vochtstromen en ventilatie op een typische bewolkte winterdag (13 januari)



Figuur 58 Verdeling warmtestromen op een typische bewolkte winterdag

Over de hele meetperiode gedurende de winter en het vroege voorjaar blijkt de stookbehoefte duidelijk sterk te worden beïnvloed door de zon (Figuur 59).

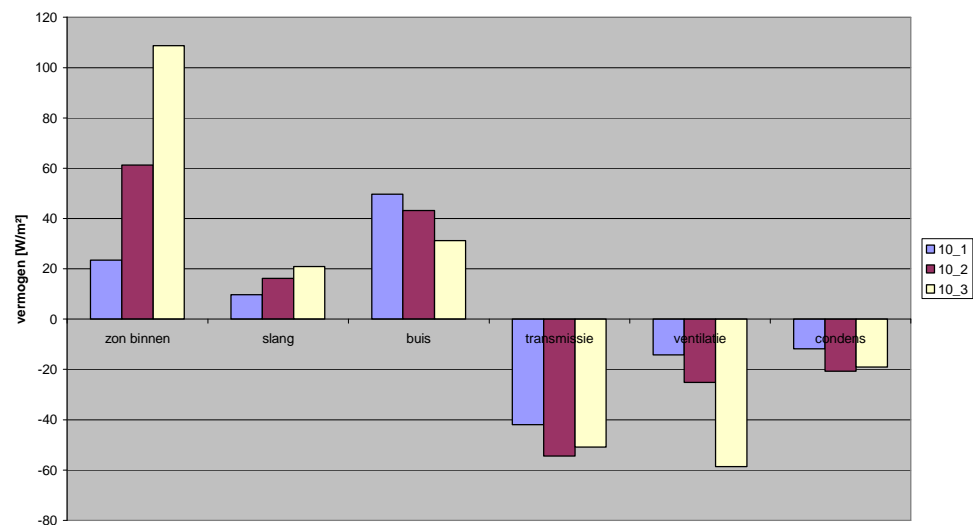
Uit dezelfde figuur blijkt verrassend genoeg dat geen flinke stijging optreedt bij toenemend temperatuurverschil tussen binnen en buiten. Een belangrijke reden hiervoor is het beperken van ventilatieverliezen bij kouder weer, doordat vocht binnen mag/moet blijven. Daarnaast is er bij grotere temperatuurverschillen ook sprake van een gunstiger invloed van de scherming op de transmissieverliezen.



Figuur 59 Stookwarmte als functie van temperatuurverschil binnen - buiten en zon

Figuur 60 onderschrijft voornoemd beeld, tezamen met de bijbehorende gegevens in Tabel 1. De figuur toont voor de drie meetmaanden de gemiddelde waarden van de belangrijke warmteposten. De tabel geeft de bijbehorende gemiddelde temperaturen en stookvermogens.

De transmissieverliezen blijken wel samenhang met de buitentemperatuur te vertonen, maar worden tevens beïnvloed door de zonintensiteit (zie ook Figuur 61). De ventilatieverliezen hangen vooral samen met de zoninstraling (gewasverdamping) en de absolute vochtigheid buiten (zie ook Figuur 62).

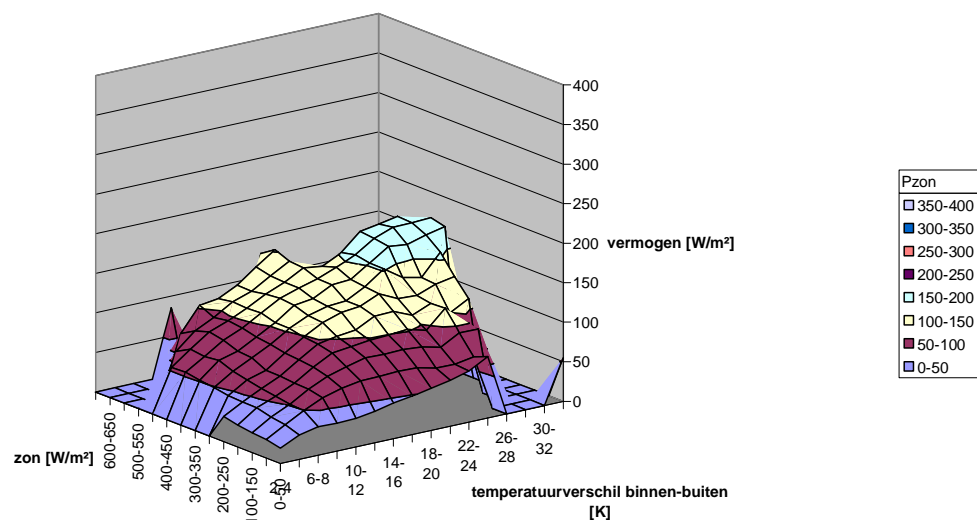


Figuur 60 Gemiddelde warmtebalans in de drie wintermaanden

Tabel 1 Gemiddelde condities in de drie meetmaanden

meetmaand	van	t/m	T _{buiten} [°C]	T _{binnen} [°C]	P _{stook} [W/m ²]
10_1	7 januari	7 februari	1,1	16,8	52,0
10_2	8 februari	11 maart	1,6	17,4	52,1
10_3	12 maart	12 april	8,7	18,7	45,1

Figuur 61 laat zien dat het warmteverlies door transmissie weliswaar toeneemt met het temperatuurverschil tussen binnen en buiten, maar ook hoger wordt bij meer zon, omdat dan minder kan worden geschermd.



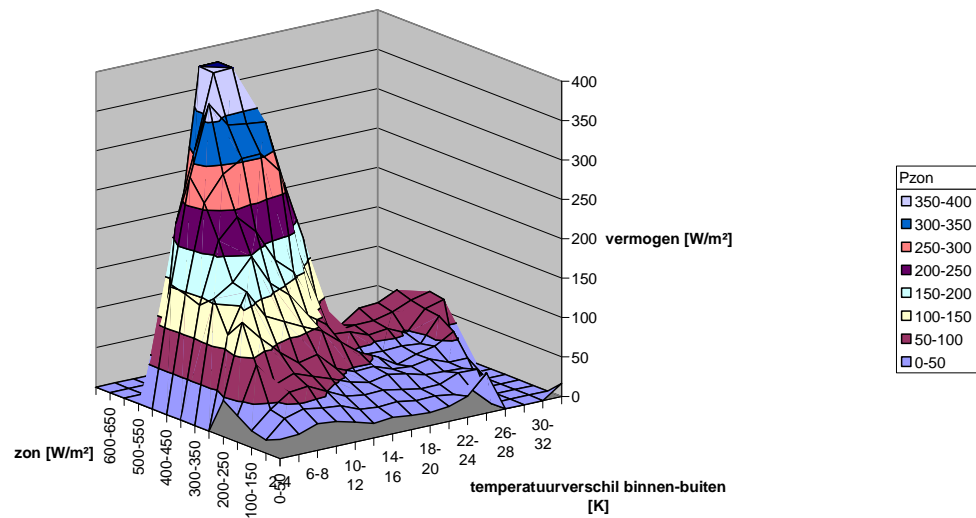
Figuur 61 Transmissiewarmteverlies als functie van temperatuurverschil en zon

Figuur 62 laat zien dat het warmteverlies door ventilatie juist afneemt bij grotere temperatuurverschillen, omdat er dan niet meer wordt geventileerd. Om bij koudere buitenomstandigheden, met lagere absolute vochtigheden, een aanvaardbare vochtigheid in de kas te houden, is ventilatie niet gewenst.

Er blijkt door luchtlekken wel een minimum ventilatiewarmteverlies op te treden dat niet verwaarloosbaar is.

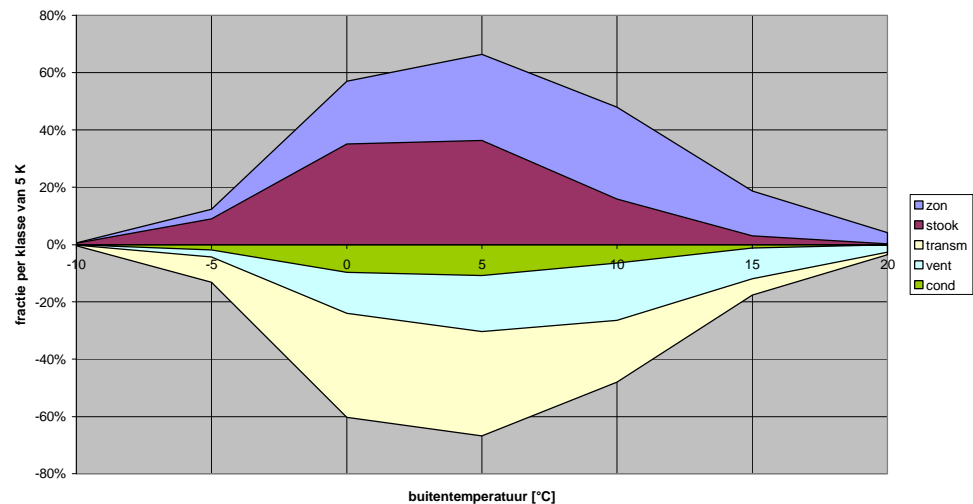
De warmteverliezen door ventilatie nemen duidelijk toe bij flinke zonstraling en niet zo grote temperatuurverschillen, als het teveel aan verdampt vocht (en eventueel zonnearmte) moet worden afgevoerd. Als er sprake is van warmteoverschot hoeft hiervoor uiteraard niet te worden gestookt. De bijdrage van ventilatie aan de stookverliezen bleek volgens eerder onderzoek [2] dan ook vooral bij mildere voor- en najaarscondities op te treden en zelfs dominant te worden in voor- en najaar, de periode die hier nu niet is beschouwd.

Figuur 63 laat zien dat de ventilatiebijdrage aan de warmteverliezen ook in de registratieperiode relatief groter is bij mildere omstandigheden.



Figuur 62 Ventilatiewarmteverlies als functie van temperatuurverschil en zon

Figuur 63 gaat nader in op het aandeel dat verschillende posten hebben in de warmtelevering en -consumptie. De grootten van de oppervlakken in de figuur representeren de totale hoeveelheid energie per post, met de totale hoeveelheid stookenergie in de registratieperiode als referentie. De vorm van de oppervlakken geeft een beeld van de afhankelijkheid van de buitentemperatuur (horizontale as). Daarbij moet overigens worden aangetekend dat het beeld aan de rechterkant van de grafiek wordt vertekend, omdat de registratieperiode niet het gehele stookseizoen besloeg, maar vooral het koudere deel ervan.



Figuur 63 Verdeling van de energiehoeveelheden over de voorgekomen buitentemperaturen in de beschouwde meetperiode (winter en vroege voorjaar). De energiehoeveelheden zijn uitgedrukt als fractie van de totale stookenergie in de periode (paarse vlak = 100%).

Het valt op dat veel stookenergie wordt gebruikt tussen -5 en 10°C buiten. Strengere vorst vergt weliswaar grote vermogens, maar is toch van beperkte invloed op de totale

stookbehoefte, omdat het minder voor komt. Tussen 10 en 15°C wordt de stookbehoefte gering, omdat het warmteverlies dan afneemt en de zon veel bijdraagt.

De bijdrage van de zon in de totale warmtelevering is groot, ook bij de condities met veel stookbehoefte.

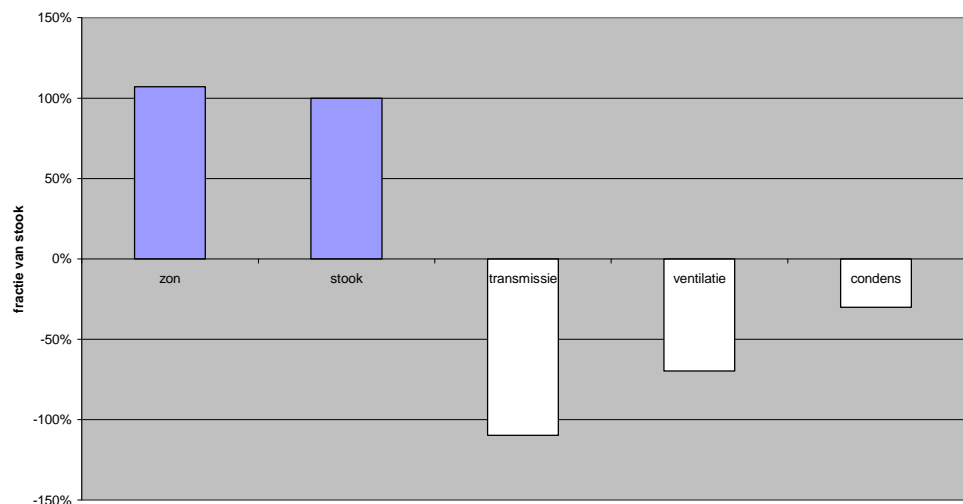
De totale energievraag (de som van alle positieve of negatieve posten) is maximaal rond 5 °C, hetgeen ongeveer de gemiddelde buitentemperatuur is van het stookseizoen.

Het transmissieverlies heeft zijn piek tussen deze waarde en het vriespunt, terwijl de ventilatie juist piekt tussen 5 en 10 °C, als het zonaanbod ook hoog is.

Figuur 64 toont de totalen van de verschillende posten over de gehele registratieperiode. Ze zijn wederom uitgedrukt als fractie van de totale stookenergie (= 100%).

Uit de figuur blijkt dat over de hele periode de energie nodig voor de transmissie de belangrijkste verliespost vormt (110% van de stookbehoefte). Het verlies door ventilatie blijft in dit koude deel van het stookseizoen duidelijk lager (70% van stook), op afstand gevolgd door het verlies door condensatie (30% van stook). Overigens strookt dit met eerdere bevindingen omtrent het ventilatiewarmteverlies in de verschillende maanden van het stookseizoen [2]. Alleen blijft de transmissiepost nu wat lager door de dubbele scherming.

Voor de energielevering is de zon een belangrijke post, die zelfs nog iets groter is dan de post stoken.

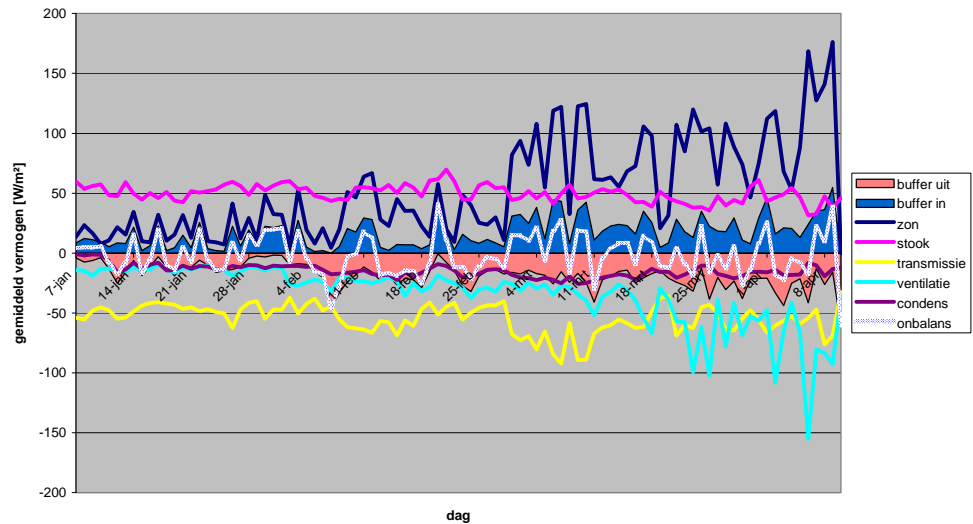


Figuur 64 Aandeel van de verschillende posten in de gemiddelde warmtelevering en het warmteverlies. De posten zijn uitgedrukt als percentage van de totale stookbehoefte (= 100%).

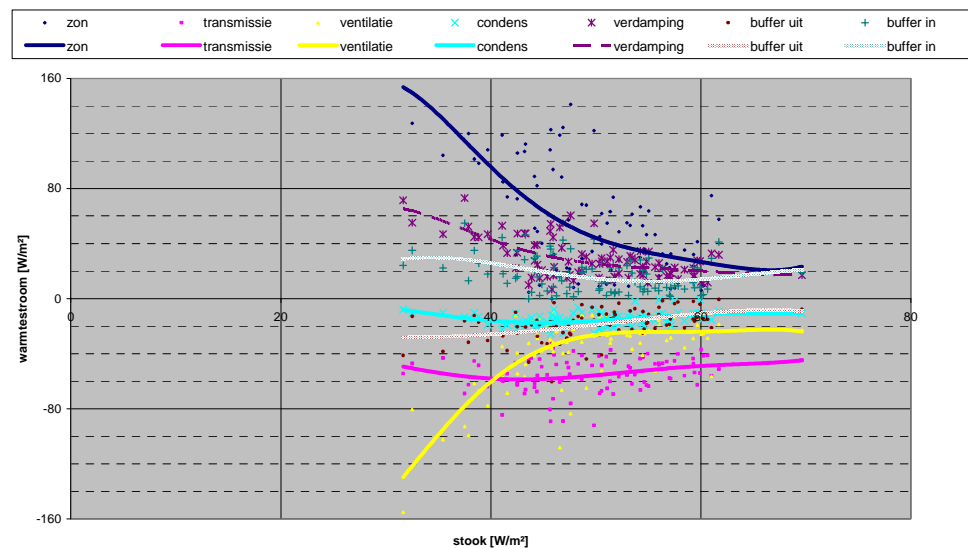
Zoals uit de getoonde voorbeelddagen blijkt, kunnen de aandelen van de warmteposten, afhankelijk van de optredende condities en de instellingen van de installaties, per dag sterk verschillen. Figuur 65 gaat hierop nader in. Zon en ventilatie blijken volgens deze figuur in de koude periode vrij sterk te kunnen variëren, terwijl dit met de andere warmteposten veel minder het geval is.

In de figuur is ook de dagelijkse onbalans tussen de warmteposten weergegeven. Het dagelijkse overschot aan warmte wordt verondersteld te zijn gebufferd (door vooral de bodem) en het dagelijkse tekort wordt geacht te worden vrijgegeven door deze buffer (zie in de figuur de gevulde vlakken 'buffer uit' en 'buffer in'). De gemiddelde warmtestroom door accumulatie blijkt tussen 6 en 35 W/m² te liggen met een gemiddelde van 18 W/m². Ter vergelijking, de totale warmtestroom van de kas ligt

tussen 60 en 210 W/m² met een gemiddelde van 103 W/m² en de stookbehoefte bedraagt 32 tot 70 W/m² met een gemiddelde van 50 W/m². De warmtestroom via de buffer (accumulatie) blijkt gemiddeld circa 38% te bedragen van de daggemiddelde stookbehoefte, maar er zijn dagen dat de accumulatiepost van vergelijkbare grootte is of kan dalen tot 10% ervan (vergelijk dit met de andere posten in Figuur 64). Er moet dus worden geconcludeerd dat ondanks de lichte constructie van een kas het dempend effect van accumulatie op de warmtestromen niet kan worden verwaarloosd.



Figuur 65 Gemiddelde warmtestromen per dag voor de verschillende posten, inclusief de buffer



Figuur 66 Gemiddelde warmtestromen per dag voor de verschillende posten, in verhouding tot de stookbehoefte

Figuur 66 geeft de verhoudingen aan tussen de daggemiddelden van de stookbehoefte en de verschillende warmteposten. Hieruit blijkt niet alleen hoe groot elke warmtepost is in verhouding tot de stookbehoefte (eerder gemiddeld beschouwd bij Figuur 64), maar ook hoe de verhouding ertussen verloopt.

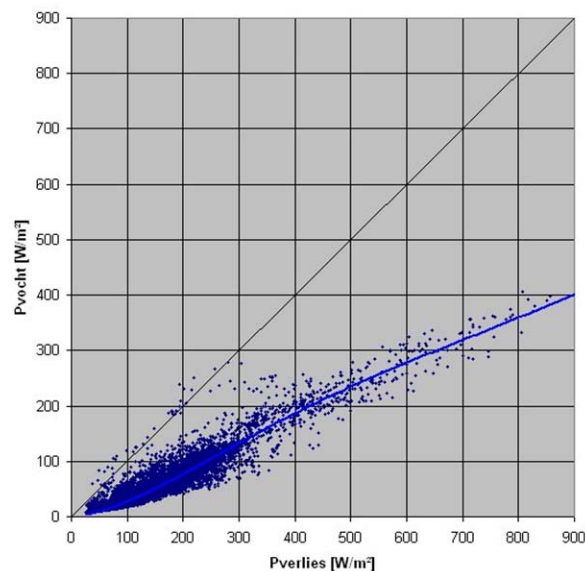
In de figuur vallen twee algemene trends op:

1. Transmissie en condensatie nemen niet toe met de stookbehoefte, zoals men zou verwachten, maar blijven vrij constant. Dit effect wordt toegeschreven aan scherming en aanpassing van de kasttemperatuur;
2. Zon, verdamping en ventilatie nemen toe als de stookbehoefte terugloopt. Het is logisch dat de warmtelevering door de installatie kan afnemen als de zon meer warmte levert. Zon stimuleert echter wel de verdamping en doet de behoefte aan vochtregulatie door middel van ventilatie toenemen.

De accumulatie (de buffer) vertoont in de figuur beperkte dynamiek. Als de zon toeneemt, ontstaan grotere etmaalfluctuaties en blijkt de rol van accumulatie iets groter te worden.

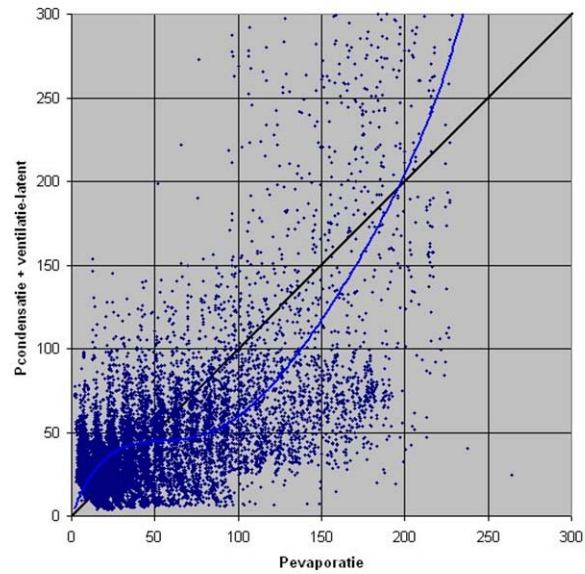
De warmte die door zon en stoken in de kas komt, wordt benut om een gewenst temperatuur- en vochniveau in de kaslucht te kunnen handhaven. Men kan ook zeggen dat die warmte nodig is om de verliezen van warmte en vocht via transmissie, ventilatie en condensatie te kunnen compenseren.

Het vocht dat met ventilatie en via condensatie uit de kaslucht verdwijnt, wordt aangevuld door verdamping van vocht uit het gewas. Ook het condensvocht dat niet via de goten of drainage naar buiten is afgevoerd, kan opnieuw verdampen. De warmte die nodig is om al het vocht te verdampen, is in de voorgaande analyse niet expliciet genoemd, maar heeft een belangrijk aandeel in de energiebalans. Uit Figuur 67 is af te leiden dat de verdampingswarmte bij grotere warmteverliezen ($>300 \text{ W/m}^2$) circa 45% uitmaakt van de totale warmtestroom door de kas. Bij kleine warmteverliezen ($<100 \text{ W/m}^2$) loopt dit aandeel terug tot circa 25%. De laatstgenoemde situaties zijn vooral interessant voor stoken, omdat bij de hogere warmteverliezen sprake is van veel zon. Meer begrip voor de rol van vocht in de totale warmtebehoefte kan een sleutel zijn tot hogere energie-efficiëntie. Daarom wordt hieraan nader aandacht besteed.



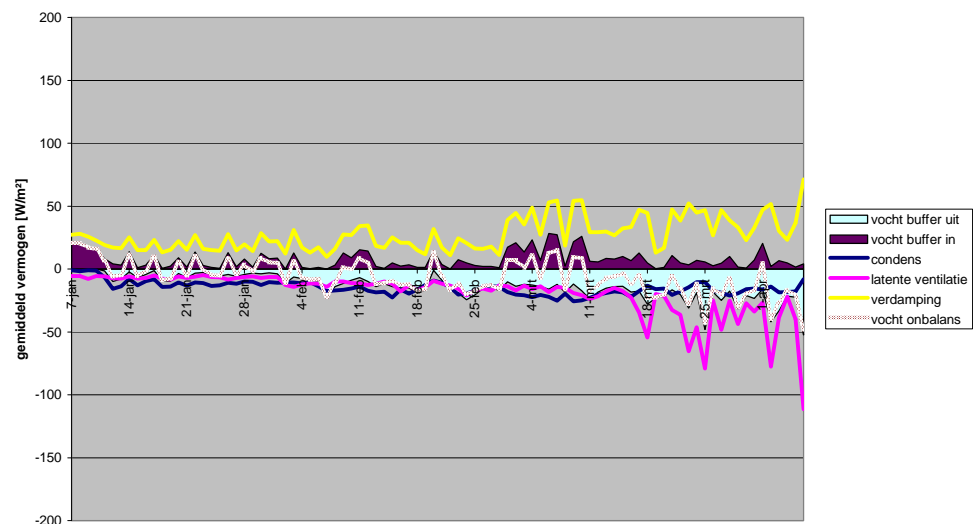
Figuur 67 Gemiddeld vermogen voor vocht in verhouding tot totaal warmteverlies

De energiestroom voor vocht in de voorgaande figuur is het gemiddelde van de warmteopname voor verdamping door het gewas (de ingaande warmtestroom voor vocht) en de beide posten voor warmteafvoer via condensatie en het latente aandeel in de ventilatie (uitgaande warmtestromen voor vocht).



Figuur 68 Vergelijking van in- en uitgaande warmtestromen voor vocht

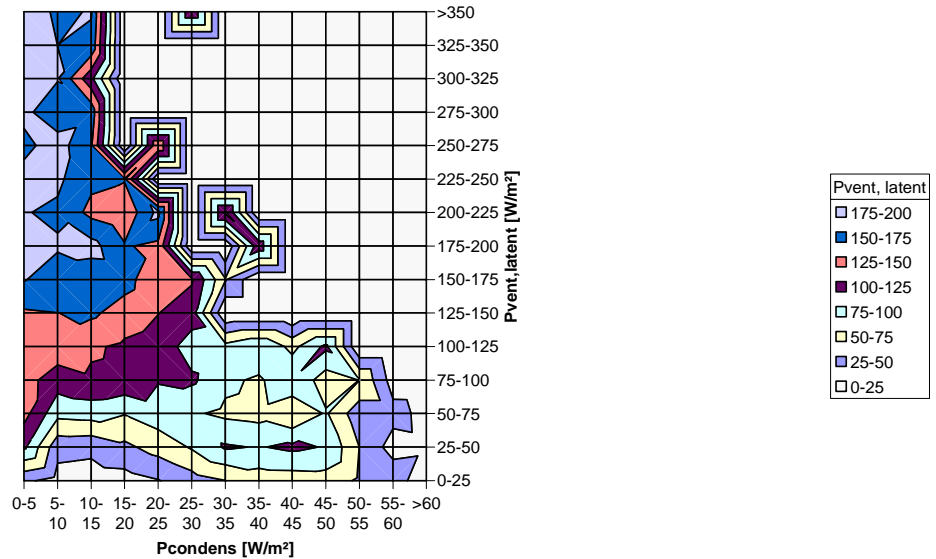
Figuur 68 laat zien dat die in- en uitgaande warmtestromen voor vocht gemiddeld wel gelijk zijn (rond de 45° lijn in de figuur liggen), maar niet op elk moment in evenwicht zijn. De afwijkingen kunnen samenhangen met het bufferen of vrijgeven van vocht (voornamelijk in of uit de bodem). Figuur 69 geeft aan dat de buffer daartoe gemiddeld circa 35% van de totale dagelijkse warmtestroom via vocht zou moeten reguleren, met uitschieters tussen 17 en 107% (zie de gevulde vlakken). Het is de vraag of de huidige modellering nauwkeurig genoeg is om dit te concluderen. Een verbeterslag lijkt gewenst om de rol van vocht in de warmtebalans volledig te kunnen doorgronden.



Figuur 69 Gemiddelde deelwarmtestromen per dag voor vocht, inclusief de buffer

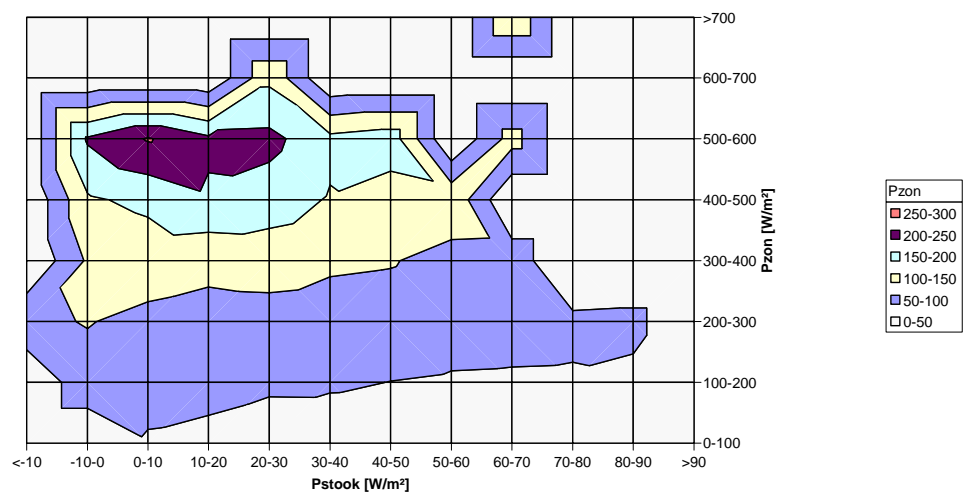
Figuur 70 laat het onderlinge verband tussen de drie warmteposten voor vocht zien. Bij hogere vermogens voor gewasverdamping (aangeduid door de kleurvelden in de figuur)

is ventilatie (verticale as) het dominante afvoermechanisme en is condensatie (horizontale as) ondergeschikt. Dit betreft in de praktijk de zonniger en minder koude situaties. Warmteverlies door condensatie speelt een rol als zowel de afvoer door ventilatie beperkt is en de vochtproductie door gewasverdamping flink is vermindert. Dat zijn in de praktijk de koudere omstandigheden.



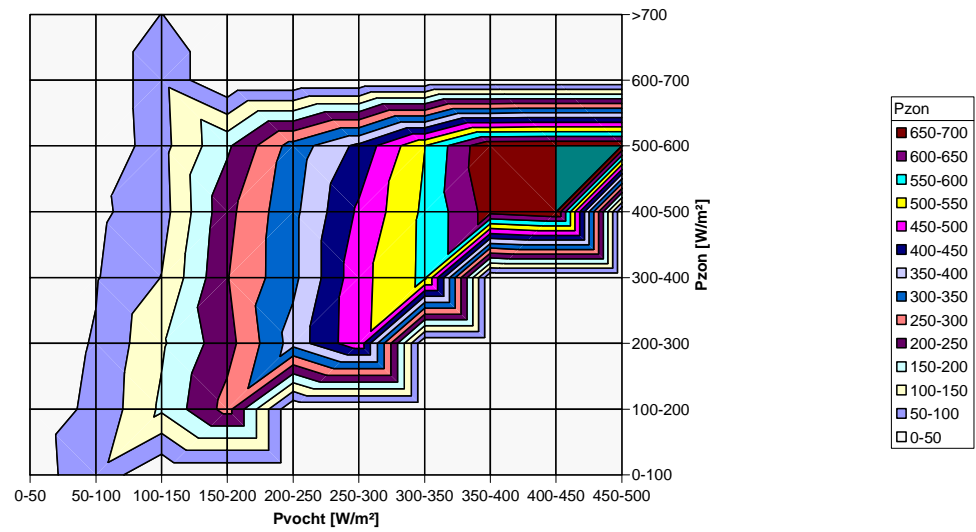
Figuur 70 Relatie tussen verdampingsvermogen en latente warmteafvoer met ventilatie en via condens

Figuur 71 laat zien dat voornamelijk de zonnewarmte verantwoordelijk is voor de warmtestroom die nodig is voor vocht (aangeduid door de kleurvelden in de figuur). Meer of minder stookvermogen blijkt daarop nauwelijks van invloed. Als meer wordt gestookt, is de zonnewarmte minder en loopt ook de warmtestroom terug die nodig is voor vocht.



Figuur 71 Warmtestroom voor vocht afhankelijk van zon en stookvermogen

Figuur 72 laat tenslotte zien dat de warmteafvoer door ventilatie (aangeduid met de kleurvelden) sterk samenhangt met de warmtestroom door vocht en dat hogere waarden van beide optreden bij meer zonnearmte.



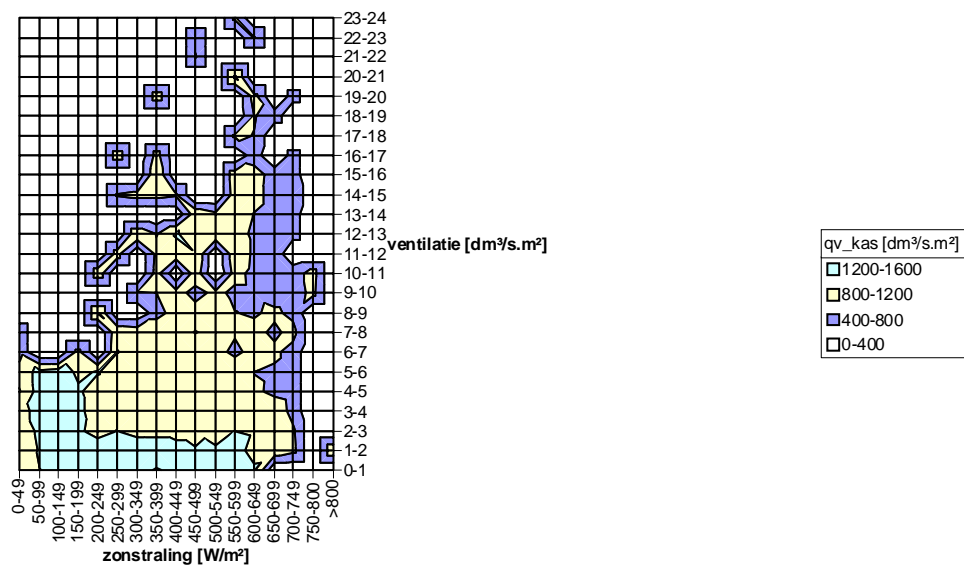
Figuur 72 Warmteafvoer met ventilatie (voelbaar en latent) afhankelijk van de warmtestroom voor vocht en door zon

4.6 CO₂

Als laatste is een analyse van de CO₂-concentraties in de kas uitgevoerd.

Om de groei optimaal te bevorderen, is bij de teelt op zo hoog mogelijke CO₂-concentraties bij zon gestuurd. Door het dubbele scherm slaat het gewas minder snel nat en kon de ventilatie worden beperkt. De CO₂-dosering is zo goed mogelijk op deze nieuwe condities afgestemd.

Figuur 73 geeft de verbanden van CO₂ met de grootheden zon en ventilatie weer. Het blijkt dat ook bij veel zon tot hoge ventilatie nog aanzienlijke CO₂-concentraties (800 – 1200 ppm) zijn gehaald.



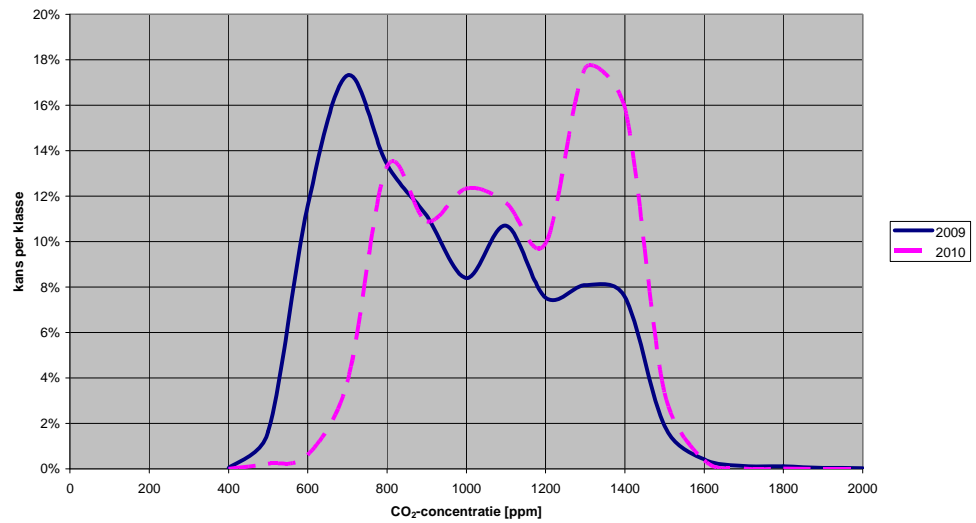
Figuur 73 CO₂-concentratie (in ppm) afhankelijk van zon en ventilatie

Een vraag is hoe de CO₂-concentraties zich verhouden tot die in het vorige seizoen. Er zijn helaas geen CO₂-meetgegevens van de winter in 2009 beschikbaar zijn. Om toch te kunnen vergelijken is een overeenkomstige periode van begin maart tot eind mei in beide jaren beschouwd (metingen met Priva meetbox).

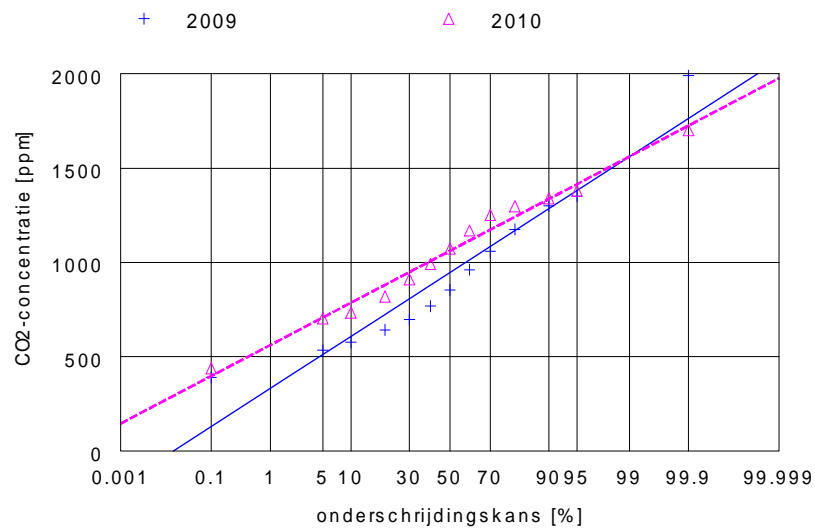
De distributieve verdeling in Figuur 74 geeft weer dat de CO₂-concentraties in het voorjaar van 2010 (parse onderbroken lijn) beduidend hoger waren dan in 2009 (blauwe doorlopende lijn). Volgens de cumulatieve verdeling in Figuur 75 bedraagt het verschil in CO₂-concentraties in het voorjaar van 2010 ten opzichte van 2009 gemiddeld circa 220 ppm. Vooral de situaties met lage CO₂-concentraties blijken in 2010 te zijn teruggedrongen in vergelijking met 2009.

Bij deze vergelijking moet worden opgemerkt dat in 2010 de buitentemperatuur over de hele periode lager was. De gemiddelde buitentemperatuur was 9,0°C in 2010 tegen 11,0°C in 2009. Het is te verwachten dat ook vanwege de lagere buitentemperatuur minder is geventileerd en dat daarom de CO₂-concentraties in 2010 hoger zijn gebleven. Om dit te achterhalen, zijn de CO₂-concentraties in beide jaren tevens uitgezet tegen de buitentemperatuur. Figuur 76 geeft dit weer. De figuur laat zien dat bij koudere omstandigheden in 2010 inderdaad geen hogere concentraties zijn bereikt, maar dat dit wel degelijk het geval is bij mildere stookcondities (boven 5°C), dus juist als de ventilatie actief wordt. De conclusie blijft dus gerechtvaardigd dat beduidend hogere

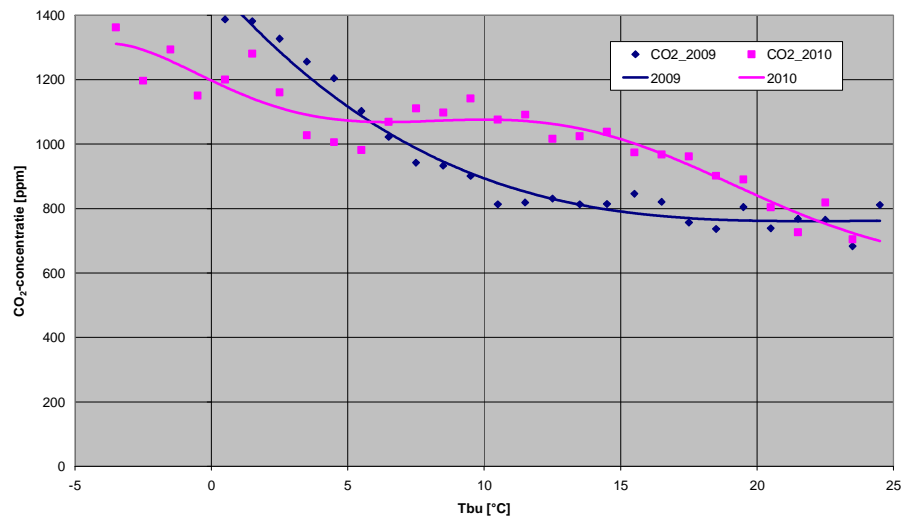
CO₂-concentraties zijn bereikt door het dubbele scherm in combinatie met een zuiniger ventilatieregime.



Figuur 74 Distributieve verdeling (kans van voorkomen) van CO₂-concentraties in de kas. Vergelijking 2009 en 2010 in de periode begin maart tot eind mei (Priva meetbox).

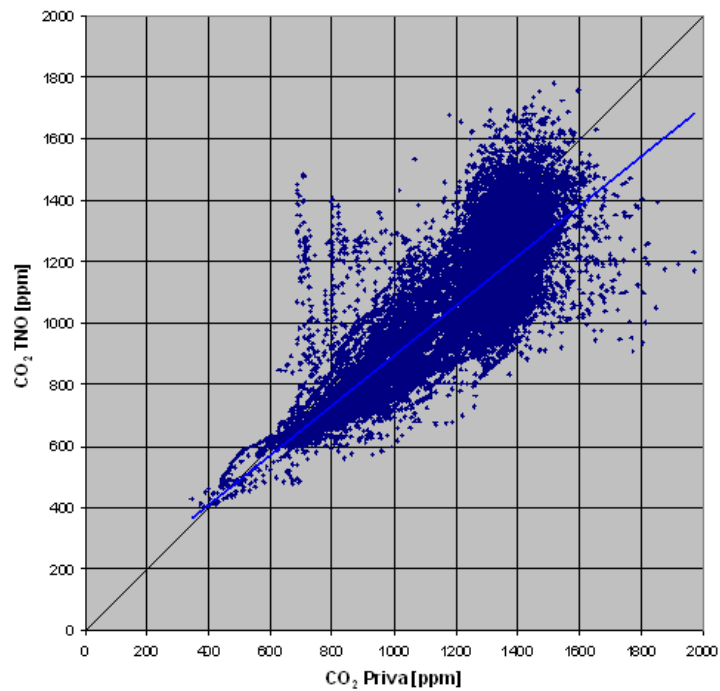


Figuur 75 Cumulatieve verdeling CO₂-concentraties in de kas. Vergelijking 2009 en 2010 in de periode begin maart tot eind mei (Priva meetbox).

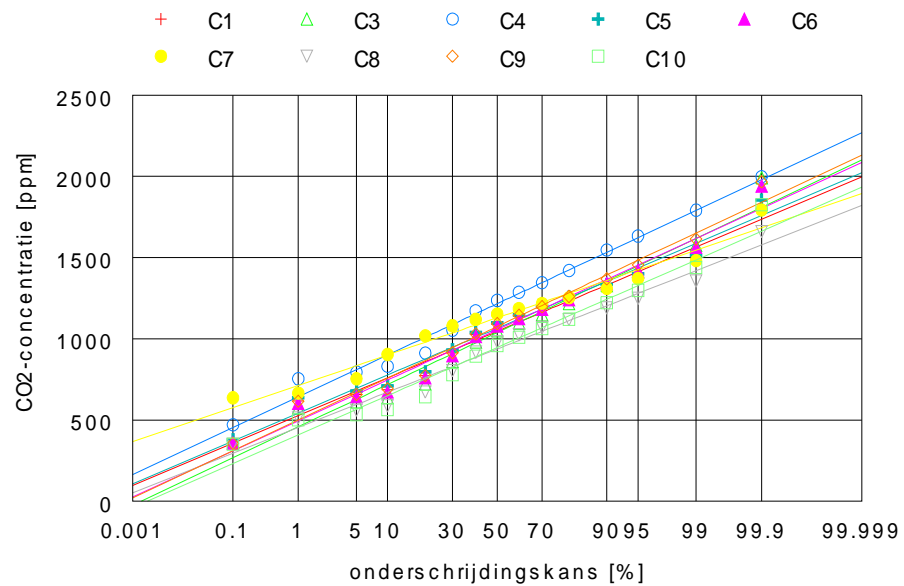


Figuur 76 Gemiddelde CO₂-concentraties in voorjaar 2009 en 2010 als functie van de buitentemperatuur

De vergelijking van CO₂-concentraties in het voorjaar van twee opeenvolgende jaren betreft meetgegevens van de Priva meetbox (klimaatregeling). Deze meetbox blijkt hogere waarden te geven dan gemiddeld op de negen meetpunten van TNO tussen het gewas (Figuur 77). De toename ten opzichte van de buitenconcentratie (circa 380 ppm) is met de Priva meetbox gemiddeld ongeveer 20% groter dan bij de TNO-metpunten in het gewas. In hoeverre het hier om een systematische fout of een reëel verschil gaat, is niet te zeggen. Verschillen van 10 à 15% komen ook voor tussen de CO₂-meetpunten in het gewas (Figuur 78). Meetonnauwkeurigheden van de sensoren kunnen al gauw in de orde van grootte van 50 ppm liggen. De verschillen kunnen verder samenhangen met de verspreiding vanaf de CO₂-slangen, absorptie door het gewas en verschillen in ventilatie.



Figuur 77 Vergelijking van de CO₂-metingen met de Priva meetbox en door TNO tussen het gewas (gemiddelde van negen meetpunten)



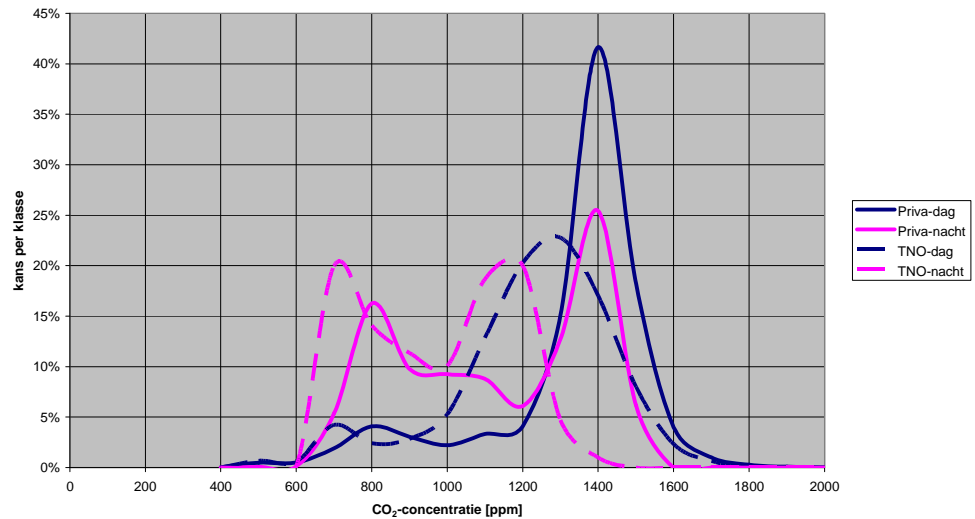
Figuur 78 Cumulatieve verdeling CO₂-concentraties 9 TNO-metpunten tussen het gewas

Het doseren van CO₂ is vooral overdag van belang als er veel daglicht aanwezig is. Het toevoegen van CO₂ gedurende de nacht wordt vooral gedaan omdat juist in de nacht meer wordt gestookt en er dan dus toch CO₂ beschikbaar is. Daarom is nagegaan wat in de winter en het vroege voorjaar de verschillen zijn in CO₂-concentraties tijdens de dag en de nachtperiode.

Figuur 79 toont dit in distributieve verdelingen.

Figuur 80 laat de verschillen in cumulatieve verdeling over de dag en nacht zien.

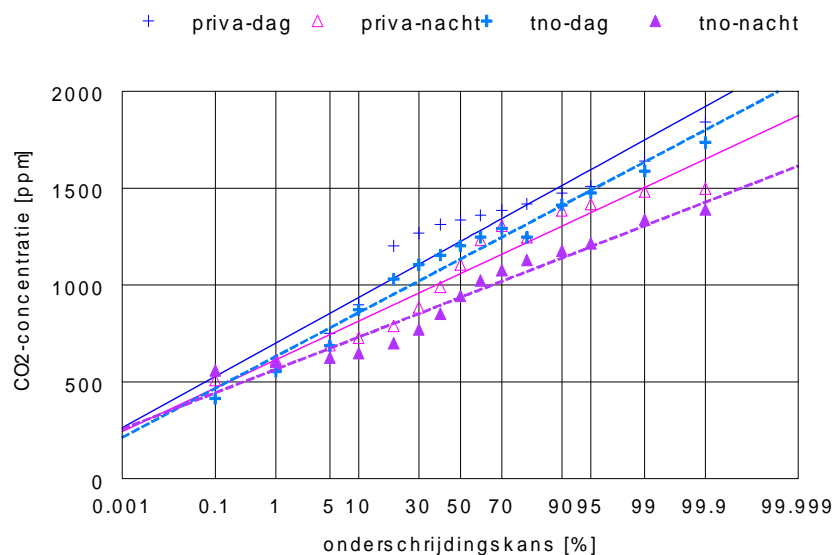
Behalve tussen dag en nacht is ook onderscheid gemaakt tussen de waarnemingen met de Priva meetbox en met de TNO-voelers tussen het gewas.



Figuur 79 Distributieve verdeling (kans van voorkomen) van CO₂-concentraties overdag en 's nachts

De meest voorkomende CO₂-concentraties overdag blijken rond 1300 à 1400 ppm te liggen. Ook in de nacht is er een piek rond of iets onder deze waarden. Daarnaast is er in de nacht echter een duidelijke tweede piek rond 700 à 800 ppm.

Uit een analyse van de cumulatieve verdelingen blijkt dat de concentratieverhoging ten opzichte van buiten overdag gemiddeld ongeveer 30 à 40% groter is dan in de nacht.



Figuur 80 Cumulatieve verdeling CO₂-concentraties overdag en 's nachts

5 Bespreking

5.1 Ventilatie

De kas wordt niet geventileerd gedurende een groot deel van de beschouwde winterperiode, als de buitentemperaturen laag zijn. Het is begrijpelijk dat de kas vooral blijkt te worden geventileerd zodra de relatieve vochtigheden hoog worden, er meer zon is en de temperatuurverschillen tussen binnen en buiten kleiner worden (dus bij veel vocht of warmte).

De inzet van de luchtslangen voor de ventilatie neemt duidelijk toe bij meer vocht in de kas. Het is dan belangrijk de hele kas goed gedoseerd en gelijkmatig te luchten, hetgeen met de slangen beter mogelijk is dan met de ramen. De gelijkmatiger luchting kan het gebruik van een minimum buis tussen het gewas en dus ook het hiermee gepaard gaande energiegebruik beperken of voorkomen.

De luchtslangen blijken voorts te worden ingezet bij kleinere temperatuurverschillen tussen binnen en buiten en meer zon, dus toch ook voor het (mede) afvoeren van warmte. Het nut hiervan lijkt misschien beperkt, omdat de capaciteit van de raamluchting veel groter is en bovendien geen ventilatorenergie kost. Twee argumenten voor slangluchting ten behoeve van warmteafvoer zijn echter:

1. Betere dosering, dus betere temperatuurcontrole bij behoefte aan beperkte warmteafvoer (in het overgangsgebied naar voluit spuien);
2. Nivellering van verticale temperatuurverschillen bij grotere zonlasten. De luchtbeweging ten gevolge van de onderbeluchting dient daarbij de menging te bevorderen (de indringing van raamlucht onderin het gewas). De analyse van de luchtbeweging indiceert namelijk dat bij meer zon, ondanks het bijkomen van de raamluchting, een stabielere klimaatopbouw over de hoogte ontstaat (gelaagdheid). Dit kunnen de luchtslangen dan (deels) compenseren, omdat ze onderin inblazen.

Ten aanzien van punt 1, de betere dosering met de luchtslangen, is het opmerkelijk dat het openen van de luchtramen vrijwel gelijk op gaat met het opschakelen van de slangventilatie. Men zou verwachten dat dit meer na elkaar zou plaatsvinden; eerst beperkt en oplopend ventileren met de luchtslangen en de ramen er bij openen als dan nog meer ventilatie is gewenst. Omdat dit niet het geval is, lijkt het schakelregime nog voor verbetering vatbaar.

5.2 Temperatuur

De gemiddelde temperatuur in de kas blijkt aanzienlijk te variëren met de buitentemperatuur en de zonintensiteit. Daarnaast is er, los van een gewenst verloop over het etmaal, sprake van aanzienlijke variaties in de temperatuurverdeling over de kas.

Verticale temperatuurgradiënten blijven in de winter beperkt. Ze vertonen vooral een relatie met de zonintensiteit. Zon versterkt de thermische gelaagdheid (is een warmtebron die vooral bovenin het gewas werkt), zodat het onderin gemiddeld iets kouder blijft overdag. Na het middaguur (bij de hoogste zonstand) is het temperatuurverschil het grootst, te weten 1,5 K gemiddeld in een wintermaand. In de nacht is het onderin juist iets warmer. De temperatuurverschillen zijn dan klein

(maandgemiddelde minder dan 1 K). Dit is mede te danken aan het dubbele scherm, dat de nachtelijke uitstraling beperkt.

De horizontale temperatuurgradiënten, in het bijzonder over de kaplengte, zijn groot bij koude. In een wintermaand (begin februari t/m begin maart) is het nabij de gevel gemiddeld 2,5 K kouder dan bij het middenpad. Gedurende 15% van de gehele registratieperiode is een gradiënt van 5 K of meer opgetreden en in 1% van de situaties was dit zelfs meer dan 9 K.

De afkoeling is in de laatste poten bij de gevel het sterkst. De gradiënt wordt groter als de buitentemperatuur lager wordt. De gradiënt is nul als de buiten- en binnentemperatuur ongeveer gelijk zijn en draait om als het buiten warmer wordt dan binnen. Verbanden tussen de temperatuurgradiënt over de kaplengte en andere grootheden, zoals de sterkte van de luchtbeweging (mogelijke nivellering door meer menging), zijn niet aangetoond.

Het temperatuurverloop over de kaplengte wordt geweten aan een natuurlijke luchtbeweging onder invloed van lokale temperatuurverschillen. De hypothese is dat lucht onder het glas (boven het scherm) afkoelt en naar het laagste punt in de zone bij de gevel zakt. Tegelijk trekt warme lucht, die van de verwarmingsbuizen opstijgt, schuin weg naar het hoogste punt in de zone rond het middenpad. Aangedreven door deze natuurlijke voorkeursstromen, ontstaat zo een thermische wervel over de kaplengte, waarin de temperatuurverschillen in stand blijven.

Factoren die deze thermische wervel in moderne kassen versterken, zijn:

- de grote kaplengte (meer afschot, dus door het grotere hoogteverschil een sterkere thermiek);
- het toepassen van schermen (koudere lucht boven het scherm, dus door het grotere temperatuurverschil een sterkere thermiek);
- de forse luchttek van de schermen (onvoldoende weerstand om het uitzakken van koude lucht naar de gewaszone te belemmeren);
- vrije stroomruimte boven en onder het gewas door toepassing van hoge kassen en teeltgoten (geringe stromingsweerstand voor de thermische wervel);
- stoken op lage temperatuur (wegvallen van sterke lokale thermische stijgstromen, die de thermische wervel verstoren en zo als 'rem' fungeren).

Het circuleren van kaslucht via de luchtslangen kan de hoofdstroombeweging van de thermische wervel nog ondersteunen (versterken), doordat alle gecirculeerde kaslucht naar één punt bij de gevel wordt gezogen. In combinatie met de uitblaas over de gehele slanglengte ontstaat dan een circulatiestroom die gelijkvormig is aan de voornoemde thermische wervel. Uit de analyse van de metingen blijkt echter geen aantoonbare invloed van het vergroten of verkleinen van de circulatiestroom via de slangen.

Er zijn verschillende remedies, die meer of minder zijn getest:

- Uit ingrepen door de tuinder blijkt dat de wervel kan worden geremd of zelfs omgekeerd door met de slangen meer lucht in het eerste deel vanaf de gevel uit te blazen;
- In principe moeten de luchtslangen ook een positieve invloed kunnen hebben door de luchtstroom te beperken en sterker op te warmen. Door afkoeling van het slangoppervlak aan de kaslucht, in combinatie met het langzaam doorstromen, wordt dan het grootste deel van de slangwarmte in het eerste deel van de slang afgegeven. Dat is het kasdeel dat kouder blijft, dus deze maatregel zal het ongelijkmatige temperatuurverloop compenseren;
- In experimenten in andere kassen (Climeco) is een flinke verbetering bereikt door ook in de winter met de slangen buitenlucht mechanisch te blijven toevoeren. De overmaat aan lucht moet via de openingen in het scherm

wegstromen om via de lekken in het dek te ontwijken. Deze tegengestelde luchtbeweging onderdrukt of verhindert het uitstromen van koude lucht door het scherm, zodat een 'motor' voor de thermische wervel wordt weggenomen. De extra ventilatie zal overigens wel meer verwarmingsenergie vergen en tot een lagere RV in de kas leiden;

- Het beter afdichten van de schermen zal het uitstromen van koude lucht naar de gewaszone bemoeilijken. Tegelijk wordt het effect getemperd omdat bij een dichter scherm het temperatuurverschil zal toenemen, dus de kracht groter zal worden waarmee de lucht uitzakt. De indruk is dat de huidige schermperforatie te groot is. Het is aan te bevelen de schermperforatie te optimaliseren op de aspecten temperatuurgradiënt, condensbeheersing en energiebesparing. Dit geldt zeker in verband met toepassing van overdruk (het voorgaande punt);
- In andere experimenten (o.a. rozenteler Porta Nova) heeft men dwars op de kaplengte stromingsbarrières voor de thermische wervel gecreëerd door het ophangen van 'foliegordijnen'. De resultaten hiermee blijken goed te zijn.

5.3 Vocht

De relatieve vochtigheid van de kaslucht vertoont, zoals te verwachten, in grote lijnen een beeld tegengesteld aan de temperaturen:

- onderin het gewas, waar overdag de temperaturen lager blijven, zijn de RV's hoger;
- in de nacht, als de temperaturen dalen, stijgen de RV's.

Het is echter opmerkelijk dat in de winter de hoogste RV's meer naar het middenpad optreden, waar de temperaturen hoger zijn. Vooral bij hoge, meer kritieke RV's zijn de waarden vanaf de gevel tot halverwege de kap gemiddeld lager. Vermoedelijk hangt dit samen met de eerder genoemde hoofdstroom (§ 5.2) van de gevelzone door het gewas naar de zone bij het middenpad, die door vochtopname uit het gewas onderweg steeds vochtiger wordt. In de warmere zone kan bovendien meer gewasverdamping optreden en resulteert een lokaal hogere glastemperatuur in minder vochtafvoer door condensatie.

De relatieve vochtigheid van de kaslucht kan soms hoge waarden bereiken. RV's boven 95% komen nog circa 5% van de tijd voor.

Plaatselijke verschillen in RV over de kaplengte blijken te verminderen bij meer luchtbeweging. Voor verschillen in RV over de hoogte kon dit niet worden aangetoond. Deze verschillen blijken vooral op te lopen bij meer zon.

Bij weinig ventilatie blijkt een hogere luchtsnelheid ook te zorgen voor grotere absoluut vochtverschillen tussen binnen en buiten. Blijkbaar stimuleert luchtbeweging de vochtafgifte, omdat de overdracht van vocht aan de lucht dan verbetert.

Het absoluut vochtverschil tussen binnen en buiten is in de winter, vergeleken met andere seizoenen, het grootst. Dit komt vooral doordat dan niet wordt geventileerd. Zo is het mogelijk in de kas de relatieve vochtigheden in de winter hoog genoeg te houden, terwijl de lucht absoluut gezien droog is.

Maart en oktober zijn de absoluut vochtigste maanden. Goede vochtbeheersing is in het voorjaar echter beter mogelijk dan in het najaar, omdat het in het voorjaar buiten absoluut gezien droger is.

Het verschil tussen de absolute vochtigheid binnen en buiten is sterk afhankelijk van de zonintensiteit, vanwege de bijbehorende verdamping.

Minder ventilatie leidt ook tot een groter absoluut vochtverschil tussen binnen en buiten. Die invloed is in de winter echter minder sterk dan van de zon. Dat komt doordat de ventilatie in de beschouwde periode vooral wordt afgestemd op de vochtproductie en nog niet op een warmteoverschot.

5.4 Luchtbeweging

De resulterende luchtbeweging tussen het gewas is moeilijk aan één of enkele dominante factoren toe te wijzen. Het ontstaat door een combinatie van grootheden die de bewegingsenergie genereren of juist temperen. Zonder nadere studie is hiervan nog onvoldoende te zeggen.

De huidige metingen laten alleen voorzichtige trends zien van de zonstraling en het temperatuurverschil tussen binnen en buiten:

- Veel zon onderdrukt de luchtsnelheden enigszins, waarschijnlijk ten gevolge van een stabielere gelaagde klimaatopbouw;
- Als het buiten kouder wordt, nemen de luchtsnelheden iets toe. De verklaring is dat er dan meer warmtebronnen zijn die voor bewegingsenergie zorgen.

Voorts is opmerkelijk dat er bij meer kasventilatie sprake lijkt van enige onderdrukking van de snelheden in plaats van dat ze toenemen. Omdat hogere kasventilatie plaatsvindt bij kleinere temperatuurverschillen en meer zon, lijkt het er op dat de stabiliserende werking van de zon bij overigens kleinere thermische verschillen in de kas belangrijker is voor de luchtbeweging tussen het gewas dan de bewegingsenergie van open ramen boven het gewas. Anders gezegd, de indringing van ventilatielucht in het gewas is dan beperkt.

Bij lage ventilatie, in het bereik van de luchtslangen, is geen onderscheidend effect van het slangdebit op de luchtsnelheden tussen het gewas waarneembaar. Dat leidt tot vraagtekens bij het nut van circulatie via de slangen. Anderzijds is de tuinder positief over het effect van slangluchting op het schimmelrisico. Dat duidt toch op een betere vochtuitwisseling tussen de gewaslagen, zonder dat daarvoor warmte van een groeibuis hoeft te worden ingezet en dus extra stookenergie moet worden gebruikt.

Er blijken voorkeursplekken voor iets hogere snelheden in het gewas te bestaan, ten gevolge van de worp van de luchtslangen: op de tussenafstand zijn de snelheden vaak iets lager dan halverwege tussen twee luchtslangen en er direct boven. Dit geldt alleen niet bij middelgrote debieten. Een en ander lijkt samen te hangen met een voorkeurswervel door het gewas ten gevolge van de slanguitblaas, zoals al eerder bij de detailmetingen is geconstateerd.

Om een gelijkmatiger luchtbeweging op alle plaatsen te bereiken, dient men te overwegen meer slangen dichter bij elkaar toe te passen of meer variatie in de worp te bewerkstelligen.

5.5 Energie

De stookbehoefte blijkt maar zeer beperkt af te hangen van het temperatuurverschil tussen binnen en buiten (c.q. de buitentemperatuur). Dit is toe te schrijven aan toenemend schermen en verlaging van de kastemperatuur als het buiten kouder is. De warmteposten transmissie en condensatie blijken hierdoor nauwelijks toe te nemen met het temperatuurverschil tussen binnen en buiten of de stookbehoefte.

Ook de ventilatieverliezen worden beperkt bij koude. Er wordt dan niet geventileerd, om het aanwezige vocht binnen te houden en geen te lage RV te laten ontstaan.

De stookbehoefte blijkt lager te worden bij meer zon. Dit is natuurlijk logisch voor een broeikas. Behalve dat zoninstraling voor een momentane bijdrage zorgt aan de kastemperatuur, blijkt bij meer zon ook meer warmte te worden gebufferd, waardoor naderhand minder hoeft te worden gestookt.

Toch loopt de stookbehoefte bij toenemende zonintensiteit niet zo sterk terug. Zon stimuleert namelijk de verdamping. Dit doet de behoefte aan vochtregulatie door middel van ventilatie toenemen. Vooral bij gematigder buitentemperaturen leidt dit tot een sterke toename van het warmteverlies door ventilatie.

Ook het transmissieverlies neemt toe met oplopende zonintensiteit, omdat de scherming dan minder wordt en het temperatuurverschil tussen binnen en buiten toeneemt.

In de beschouwde winterperiode blijkt de intredende zonnwarmte ruim de helft van het totale warmteverlies te hebben gedekt. Het overige verlies is gedekt met stookwarmte, die voor circa 1/5 deel via de luchtslangen in de kas is gebracht en voor het overige door de buisrail. De bijdrage van de luchtslangen aan de warmtelevering is daarmee relatief laag. Voor het energiezuinig verwarmen met zo laag mogelijke temperatuur (streven naar hoge COP) is dit nadelig. Het is echter gedaan om geen ongelijkmatige warmteverdeling door de luchtslangen te laten ontstaan.

De warmte die door de zon en door stoken is geleverd, blijkt gemiddeld in de registratieperiode voor ruim de helft door transmissie te zijn verloren, voor 1/3 door ventilatie en voor het overige door condensatie (bijna 15%). Over het totale stookseizoen zullen deze verhoudingen wijzigen, omdat ventilatie voor een groot deel het warmteverlies in het voor- en naseizoen bepaalt.

Als men naar het totale energieverlies door stoken kijkt (de totaal per jaar en per m² benodigde m³ gasequivalenten), dan blijken vooral buitencondities tussen -5 en 10°C hiervoor bepalend. Bij nog lagere buitentemperaturen is het warmteverlies wel groot, maar deze condities komen maar beperkt voor. Bij hogere buitentemperaturen dan 10°C dekt de zon in hoge mate de (teruglopende) warmteverliezen. Overigens is het aandeel van de zon in het dekken van de warmteverliezen al aanzienlijk vanaf temperaturen boven het vriespunt.

Het aandeel van transmissie in het jaarlijkse energieverlies is het belangrijkste tussen buitentemperaturen van 0 en 5°C, terwijl het ventilatieaandeel in de registratieperiode het belangrijkste is bij 5 à 10°C (en naar verwachting tot hogere buitentemperaturen als men het hele stookseizoen beschouwt).

Zoals aangegeven zijn ventilatie en condensatie tesamen verantwoordelijk voor bijna de helft van het totale warmteverlies van de kas. Een groot deel hiervan hangt samen met vocht. De warmte die in het latente aandeel in de ventilatie en de condensatie (c.q. het verdampen van vocht) gaat zitten, maakt gemiddeld 30% uit van het totale warmteverlies. Als er veel moet worden gestookt, is dit 25% van het totale warmteverlies en als er minder wordt gestookt en meer warmte door de zon wordt geleverd, loopt dit op naar bijna 50% van het totale warmteverlies.

De benodigde warmte voor verdamping begint dus sterk op te lopen als de zon toeneemt en het temperatuurverschil tussen binnen en buiten kleiner wordt. Het verschil in absolute vochtigheid tussen binnen- en buitenlucht neemt dan ook af, zodat exponentieel meer moet worden geventileerd om de vochtigheid in de kas te beheersen. Ondanks de hoge mate waarin de zon het warmteverlies voor vochtbeheersing afdekt,

dient toch nog in zekere mate te worden gestookt. Ventilatie wordt in dit geval de overheersende verliespost.

5.6 CO₂

De CO₂-concentraties bij de meetbox in het voorjaar van 2010 zijn vergeleken met die in dezelfde periode in 2009. De gemiddelde concentratie van bijna 900 ppm in 2009 blijkt in 2010 gemiddeld 220 ppm hoger te liggen. Bij relatief lage concentraties van 500 à 600 ppm, dus als er veel ventilatie (nodig) is, blijken in 2010 de concentraties eveneens nog bijna 200 ppm hoger uit te komen. Ook als wordt gecorrigeerd voor het koudere weer in 2010 blijft de conclusie overeind dat door het dubbele scherm een conservatiever ventilatieregime mogelijk was dat tot significant hogere CO₂-concentraties heeft geleid.

Overigens is enige reserve geboden bij de absolute hoogte van de concentraties, omdat de meetbox een bijna 20% grotere concentratietoename ten opzichte van buiten aangeeft dan de meetpunten tussen het gewas.

Ook de meetpunten tussen het gewas geven overigens onderlinge verschillen te zien van 10 à 15%. Het is niet duidelijk in hoeverre dit reële verschillen zijn of (deels) systematische fouten.

In de registratieperiode van 2010 is de CO₂-toename ten opzichte van buiten overdag 30 à 40% hoger dan 's nachts. De meest voorkomende dagconcentraties liggen rond 1300 à 1400 ppm.

Het blijkt dat ook bij veel zon tot vrij hoge ventilatie (> 10 dm³/s.m²) nog aanzienlijke CO₂-concentraties (800 – 1200 ppm) zijn gehaald.

6 Conclusies en aanbevelingen

In het strenge deel van het stookseizoen wordt noch met de luchtslangen, noch met de luchtramen geventileerd.

Vochtvermaat en de daarbij behorende behoefte aan ventilatie ontstaan pas als er genoeg zon is en de buitentemperatuur rond of boven de gemiddelde waarde voor het stookseizoen komt. Ventilatie, al dan niet met luchtslangen onder het gewas, speelt dus vooral een rol in het mildere deel van het stookseizoen.

In tegenstelling tot wat men zou verwachten, wordt de ventilatie via de luchtslangen niet eerst ingeschakeld bij beperkte behoeften en aangevuld met ventilatie via de luchtramen bij verder oplopende behoefte. Beide blijken gelijk op te worden geschakeld. Het wordt aannemelijk geacht dat een meer volgordelijke schakeling de nauwkeurige luchtdosering kan verbeteren.

De slangluchting blijkt ook in combinatie met grotere raamstanden voor afvoer van overtollige warmte te worden ingezet. Het nut voor de totale ventilatiestroom is dan beperkt. Bovendien gaat de slangluchting, in tegenstelling tot de raamluchting, gepaard met stroomgebruik.

De kweker prefereert dit gecombineerde gebruik om verticale verschillen in temperatuur en relatieve vochtigheid te beperken. Of de slangventilatie dit effect bewerkstelligt, kon via de metingen niet worden aangetoond. Er is wel geconstateerd dat bij condities met meer zon de klimaatopbouw inderdaad stabiel wordt.

Behalve voor ventilatie worden de luchtslangen voor circulatie van kaslucht ingezet. Er kon geen significant effect worden aangetoond van het opvoeren van de circulatiestroom via de slangen op de luchtsnelheden tussen het gewas. In de veelheid aan factoren die de luchtbeving in de kas beïnvloeden, is de slangluchting dus niet dominant.

Het voorgaande sluit overigens niet uit dat de slangen wel een nuttige bijdrage leveren aan de luchtbeving. Er is bijvoorbeeld wel enig onderscheid geconstateerd tussen de luchtbeving op verschillende afstanden vanaf de luchtslangen, die wordt toegeschreven aan een hoofdwervel die ontstaat door de slangluchting.

Het verhogen van de luchtbeving in de kas blijkt onder meer effectief te zijn om horizontale verschillen in relatieve luchtvochtigheid in de kas te verkleinen. Dit zal het risico van schimmels op kritieke plaatsen in het gewas verminderen.

Met de luchtslangen kan behalve lucht ook extra warmte direct onder het gewas worden ingebracht. Vooral in combinatie met luchtbeving kan dit vergelijkbare functionaliteit bieden als een minimum buis, waaraan in de onderzochte kas inderdaad geen behoefte meer blijkt te bestaan.

Met de luchtslangen is echter in niet meer dan circa 20% van de stookbehoefte voorzien. De verwarmingsmogelijkheid van de luchtslangen is dus maar beperkt benut. Hiervoor is bewust gekozen omdat de slangen alleen lucht gelijkmatig verdeeld kunnen invoeren, maar warmte niet. Het is aan te bevelen systemen te ontwikkelen die beide kunnen. Het wordt dan tevens mogelijk met nog lagere temperaturen te verwarmen, hetgeen gunstig is voor de energie-efficiëntie.

Bij de metingen is een nadeel van moderne, energiezuinige kassen aan het licht gekomen. Er blijken temperatuurgradiënten van ruim meer dan 5 K over de kaplengte te kunnen ontstaan. Als oorzaak wordt een natuurlijke luchtstroom gezien, die koude lucht vanonder het scherm meevoert naar en uit laat zakken nabij de gevelzone en na opwarming door de verwarming naar de middenzone van de kas trekt en zo rond loopt. De potentie voor zo'n stroming is er altijd wel geweest. Goede scherming heeft echter de temperatuurverschillen vergroot. Lekken in de schermen, vrije stromingsruimte boven en onder het gewas, hoogteverschil door afschot en het wegvallen van dominerende stijgstroom door stoken op lage temperatuur zorgen voor de rest. Een beter instelbare verwarming met een lucht- en warmteverdeling over de luchtslangen kan een remedie gaan vormen tegen de ongewenste gradiënten. Ook op dit punt wordt dus doorontwikkeling aanbevolen.

Door toenemend schermen en temperatuuradaptatie is voorkomen dat de stookbehoefte aanzienlijk oploopt naarmate het weer meer winters wordt.

Andersom ontstaat met het milder worden van het stookseizoen een snel oplopende ventilatiebehoefte om het vocht te reguleren. Hoewel dit samenvalt met meer gratis zonnearmte, loopt de stookbehoefte toch niet snel terug.

Voor de energie-efficiëntie blijven de thermische eigenschappen van de schil en de ventilatie voor beheersing van vocht belangrijke punten. Daarom is een verdere verbetering van scherming en dek aan te bevelen, mede in relatie tot de voornoemde problematiek van de horizontale temperatuurgradiënten.

Als andere doorontwikkelroute wordt aanbevolen efficiëntere ventilatie te ontwikkelen, met verfijnder en beter op kritieke plaatsen afgestemde en lokaal onafhankelijk naregelbare luchtdistributie, instelbare indringing en mengverloop. Een goed instelbare naverwarming van deze ventilatielucht moet in de optimalisatie worden betrokken. Ook de combinatie met geïntegreerde CO₂-dosering is te overwegen. Voor de ventilatie moet worden gezocht naar de optimale combinatie met ontvochtiging en terugwinning van latente en voelbare warmte.

Ook een vergrote inzet van accumulatie wordt zinvol geacht om de energiezuinigheid te vergroten.

7 Referenties

- [1] Knoll, B. en P. de Jong
Klimaatmetingen in een tomatenkas met aanvullende luchting onder het gewas.
Climate Optimizers bij Themato.
Delft, TNO Bouw, rapport TNO-060-DTM-2011-00351, februari 2010.
- [2] Knoll B. en N.R. Bootsveld
Ontwikkeling van een optimaal microklimaat door gerichte ventilatie.
Delft, TNO Bouw, rapport 2007-D-R0621, juni 2007.