

TNO-rapport

TNO-060-DTM-2011-00350

Klimaatmetingen in een tomatenkas met aanvullende
luchting onder het gewas

Climate Optimizers bij Themato

Datum	11 februari 2010
Auteur(s)	ing. B. Knoll ing. P. de Jong
Opdrachtgever	Themato Advies namens het ministerie LNV en het Productschap Tuinbouw
Projectnummer	034.20565
Projectleiding	ing. R.F. Chin-Kon-Sung
Rubricering rapport	
Titel	
Samenvatting	
Rapporttekst	
Bijlagen	
Aantal pagina's	53 (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

Vraagstelling

In de open kas bij Themato wordt in beperkte mate in mechanische basisventilatie voorzien via luchtslangen onder het gewas. De capaciteit is globaal afgestemd op de vochtafvoer bij stookcondities. Voor hogere ventilatie worden de luchtramen erbij geopend. Dat betreft warme, vochtige situaties en situaties met overtollige zonnewarmte.

De toevoerstroom via de luchtslangen is nauwkeurig instelbaar. De lucht kan tevens worden verwarmd met behulp van een warmtewisselaar in de aanzuig. Zonder deze bijverwarming kan met de buitenlucht een zekere natuurlijke koeling worden verzorgd. Met behulp van wisselkleppen kan behalve buitenlucht ook kaslucht worden aangezogen. Daarmee kan voor circulatie door het gewas worden gezorgd, om klimaatverschillen tussen het gewas te nivelleren. De mengverhouding tussen circulatie en ventilatie is instelbaar en wordt op vocht gestuurd.

In combinatie met de bestaande raamluchting en buisverwarming wordt met de luchtslangen een efficiëntere ventilatie en gelijkmatiger klimaatopbouw nagestreefd. Om dit vast te stellen, is vanaf het voorjaar gedurende een aanzienlijk deel van de tomatenteelt het klimaat in de kas gemeten. De klimaatmetingen maken onderdeel uit van een groter raamproject, waarin ook de effecten op het energiegebruik en op de teeltresultaten zijn bepaald.

Werking luchtslangen

Met de luchtslangen blijkt een ventilatievoud tussen 0,4 en 2,0 luchtwisselingen per uur instelbaar te zijn. Indien de luchtslangen zijn ingeschakeld op buitenlucht, blijken ze gemiddeld voor 17% aan de totale ventilatiestroom bij te dragen. In een vochtige maand zoals oktober loopt dit op naar 40%.

Bij het ontwerp is uitgegaan van een gelijkmatige luchtverdeling in plaats van warmteverdeling. De luchtverdeling over de lengte van de luchtslangen blijkt inderdaad vrij constant te zijn en de warmteverdeling niet. Stroomafwaarts in de slang loopt door afkoeling aan de slangwand de inblaastemperatuur af, vooral bij lage ventilatorstanden. Vanwege de ongelijkmatige warmtedistributie zijn de slangen als bijverwarming gebruikt, op een temperatuurniveau dat niet hoger is dan noodzakelijk. De buisverwarming geldt als hoofdverwarming. Het extra verwarmend oppervlak van de slangen wordt hierdoor niet optimaal benut, waardoor met de warmtepomp niet het hoogst mogelijke rendement (COP-factor) wordt gehaald.

Stroming door het gewas

De luchtslangen zijn om de vijf plantrijen aangebracht en blazen tweezijdig horizontaal onder het gewas uit. Waar de lucht het gewas intreedt, blijkt sterk afhankelijk van de stand van de ventilator:

- Bij hoge capaciteit lopen de luchtstralen van twee opvolgende luchtslangen onder de teeltgoten door, om elkaar halverwege te treffen en daar een stijgstroom door het gewas te veroorzaken. Er ontstaat dan een gesloten wervel, die bovenlangs terugloopt en daarna door het gewas omlaag stroomt ter hoogte van de luchtslangen. In het centrum van de wervel wordt het gewas duidelijk minder doorstroomd;
- Bij middencapaciteiten is het begin van de voornoemde luchtbeweging slechts onder in het gewas gericht aanwezig. De bewegingsenergie is niet voldoende om verderop in het gewas een merkbare stroming te veroorzaken;

- Bij lagere capaciteiten treedt de lucht al dichter bij de slangen het gewas in. De luchtbeweging is dan nog sneller uitgewerkt.

De temperatuur van de inblaaslucht is eveneens van invloed op de voornoemde luchtstromen. Vooral bij lagere capaciteiten zorgt een hogere inblaastemperatuur ervoor dat de lucht eerder gaat stijgen en hoger komt.

De gemeten luchtsnelheden tussen het gewas liggen globaal rond 0,1 m/s. De fluctuatie is groot. Momenteaan komen uitschieters tot circa 0,5 m/s voor. De gemiddelde waarden zijn alleen in de zomer overdag bij ruim geopende luchtramen systematisch hoger. De voornoemde invloed van de capaciteit van de luchtslangen is enigszins terug te zien in de meetwaarden op de verschillende posities. Voor het overige zijn geen duidelijke relaties gevonden tussen de luchtsnelheden en belangrijke invloedsfactoren, zoals het ventilatiedebiet.

De voornaamste conclusie is dat er vooralsnog geen dominant effect van de luchtslangen, maar ook niet van de luchtramen op de stroming kon worden aangetoond. Kennelijk geeft geen van beide ventilatievoorzieningen voldoende gerichte stroming om dieper in het gewas door te dringen. Dit is wel wenselijk, afgaande op de grote verschillen in vochtigheid die nog tussen het gewas zijn gevonden.

In combinatie met verwarming blijkt een verhoogde capaciteit van de luchtslangen wel te zorgen voor een verlaging van de luchtvochtigheid tussen het gewas. De luchtslangen hebben dus een aantoonbaar positief effect.

Klimaatopbouw

Het klimaat in de kas kent een duidelijk etmaalpatroon. In de nacht liggen de jaargemiddelde temperaturen rond 16°C en de relatieve vochtigheden rond 90%. Overdag verloopt dat tot circa 24°C en 75% RV. De dynamiek is in de zomer het grootst. Ook is het gemiddelde temperatuurniveau in de zomer circa 3°C hoger en de RV 10% lager dan in het voor- of najaar. Het najaar heeft de hoogste relatieve vochtigheden.

Het klimaat vertoont zowel in de hoogte als over de kaplengte gradiënten. Verschillen over de hoogte treden vooral overdag op en zijn in de nacht klein. Het gaat om een natuurlijk thermisch effect van de zoninstraling. Het gemiddelde beeld is dat overdag bovenin het gewas circa 2°C hogere temperaturen en 10% lagere relatieve luchtvochtigheden optreden dan onderin. De verschillen nemen in de warmere maanden toe en vertonen een relatie met de hoeveelheid zonstraling. Er kon geen effect worden aangetoond van de slangventilatie of de totale ventilatie op de verticale verschillen. Ook over de kaplengte blijken verschillen in het klimaat op te treden. De verschillen worden groter met het temperatuurverschil tussen kas en buiten en enigszins met het vergroten van de circulatiestroom via de luchtslangen. Bij buitentemperaturen rond het vriespunt is de kastemperatuur in de gevelzone wel 4°C lager dan bij het middenpad. Dit effect wordt voornamelijk toegeschreven aan thermiek ten gevolge van het afschot van de kappen naar de gevelzijde. Het wordt versterkt door veel te circuleren via de luchtslangen. Het probleem is dus beperkt het gevolg van het toegepaste concept met luchtslangen en meer algemeen voor de moderne kassystemen met lage temperatuur verwarming en scherming. De luchtslangen kunnen de gradiënt over de kaplengte wel deels beperken door ze op relatief hoge temperatuur en laag debiet in te zetten. De ongelijkmatige warmteverdeling over de slangen werkt dan compenserend, zolang de circulatiestroom beperkt blijft.

Vochtbeheersing

Door ventilatie kan in veel omstandigheden de luchtvochtigheid worden gereguleerd. De huidige installatie met zijn regeling biedt daarvoor goede mogelijkheden. Dat blijkt uit het vergelijkbare etmaalpatroon van de absolute vochtigheid dat ondanks de

wisselende buitencondities in de verschillende maanden is gemeten. De relatieve vochtigheid in de kas blijkt een eenduidig verband te vertonen met ventilatiestromen tot circa 6× de capaciteit van de luchtslangen. Dit is een aanwijzing dat de luchtvochtigheid vaker met de luchtramen is gereguleerd dan met de luchtslangen. Het lijkt daarom wenselijk de bijdrage van de luchtslangen aan de vochtregulatie te vergroten. Het blijkt dat de meest kritieke relatieve vochtigheden in de kas optreden bij warme, vochtige buitenomstandigheden. Het betreft vooral nachten met temperaturen tussen 14 en 20°C. Bij die condities is de mogelijkheid beperkt om nog met ventilatie vocht af te voeren zonder bij te warmen. Daarom is het zinvol de mogelijkheden van ontvochten hiervoor na te gaan.

Slotopmerkingen bij het onderzoek

Het systeem met de luchtslangen was kort na het begin van de teelt operationeel, maar nog niet voorzien van buitenluchtaansluitingen. Deze zijn eind april gereed gekomen. Vanaf het begin van de teelt in december is het klimaat beperkt gemeten, doch de volledige installatie van de meetapparatuur kon niet voor begin maart plaatsvinden. Daarom is nog geen compleet beeld verkregen van de gehele teeltperiode. In het bijzonder de beginperiode van de teelt in de winter en het vroege voorjaar is onderbelicht.

Voorts is er sprake geweest van 'kinderziekten'. In de loop van de teelt bleken verbeteringen noodzakelijk aan de afsluiting van de buitenluchtkleppen. De regeling is verbeterd door extra meetboxen te plaatsen en leerervaringen te verwerken in de standaard instellingen en stuuralgoritmen.

Aan de opdrachtgever is daarom voorgesteld het meetsysteem nog operationeel te houden in de winter en het voorjaar van de nieuwe teelt, zodat het beeld kan worden gecompleteerd. Tevens kan dan het effect van het nieuw aangebrachte, dubbele scherm worden meegenomen.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
1	Inleiding.....	6
2	Systeembeschrijving.....	7
2.1	Kas.....	7
2.2	Beluchting	7
3	Meetopzet en -uitvoering	9
3.1	Registrerende metingen.....	9
3.2	Momentane metingen	11
4	Meetresultaten	12
4.1	Momentane metingen	12
4.2	Registrerende metingen.....	15
5	Modellering ventilatie	26
6	Analyse en bespreking.....	29
6.1	Luchtbehandeling	29
6.2	Luchtbeweging bij planten	31
6.3	Ongelijkmatigheden in klimaat	34
6.4	Seizoenverloop	42
6.5	Vocht en buitencondities	43
6.6	Vochtreductie door ventilatie	44
6.7	Ventilatie en warmteafvoer	47
6.8	Ventilatie en CO ₂	50
7	Conclusies en aanbevelingen	51
8	Referenties.....	53

1 Inleiding

Themato B.V. heeft het “open” gedeelte van hun kas uitgerust met een nieuw ontwikkelde luchtbehandelingsinstallatie. Dit systeem kan 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.

Dit rapport beschrijft metingen van TNO aan het kasklimaat. Via de analyse van die metingen dient te worden geverifieerd of inderdaad een efficiënter ventilatie en gelijkmatiger klimaatopbouw kan worden gerealiseerd.

Het werk is 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. Een analyse van het energiegebruik en de teeltresultaten zijn tevens opgenomen in dit raamproject.

2 Systeembeschrijving

2.1 Kas

De kas, waarin het klimaat is bestudeerd, is voorzien van een Venlo-dek met circa 12 % luchtramen. De ramen zijn om en om ter weerszijden van de nok geplaatst en per oriëntatie onafhankelijk regelbaar (loef- en lijlichting). Onder het glas is een beweegbaar scherm aangebracht.

De tralieliggers dragen een dubbele kap en overspannen 8 m. De kappen zijn ter weerszijden van het middenpad circa 85 m lang, met een pootafstand van 5 m. De goothoogte is circa 4 m.

Er wordt geteeld op goten die op circa 0,9 m hoogte zijn geplaatst. Hieronder is om de 5 teeltgoten een luchtslang (\varnothing 440 mm) van een Priva Climate Optimizer aangebracht (figuur 1).



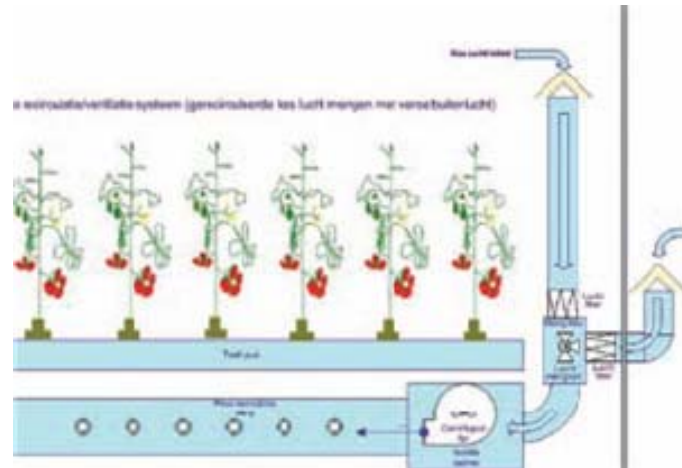
Figuur 1 Beluchting onder het gewas met de Climate Optimizer

De hoofdverwarming vindt plaats met een buisrail net boven de bodem (2 stuks \varnothing 51 mm per pad van 1,6 m breed). De Climate Optimizers kunnen als bijverwarming worden ingezet. De beide systemen worden apart gevoed met lage temperatuur (ontwerptemperatuur 40°C) en onafhankelijk gestuurd. Als primaire warmtebron geldt een warmtepomp die warmte of koude onttrekt aan de bodemopslag, die vanuit het gesloten kasdeel wordt gevoed. De mogelijkheid om het verwarmingsnet als laagthermische (top)koeling in te zetten, wordt niet benut.

2.2 Beluchting

De Climate Optimizers zijn nabij de gevels geplaatst. Elk toestel heeft een eigen buitenluchtaansluiting via de gevel, alsmede een hoog geplaatste aanzuig van kaslucht (figuur 2). Met behulp van een wisselklep kan worden ingesteld welk aandeel van de lucht van buiten wordt aangezogen en welk deel vanuit de kas. De aangezogen lucht passeert vervolgens een warmtewisselaar, waarmee desgewenst kan worden verwarmd of beperkt gekoeld. Na passage van de ventilator bereikt de lucht de verdeelslang. Via een uitgekiend gatenpatroon wordt gezorgd dat de lucht zo gelijkmatig mogelijk over de slanglengte naar twee kanten horizontaal wordt uitgeblazen.

De instelling van temperaturen en debieten wordt op enkele leidende toestellen (masters) bepaald en gevolgd door de overige toestellen (slaves). Het maximaal haalbare ventilatie- of circulatievoud is circa 2 luchtwisselingen per uur. Het toerental van de ventilatoren is tussen 30 en 100% instelbaar. In de praktijk is het regelbereik benut van 40 tot 90%.



Figuur 2 Principe van de Climate Optimizer (de buitenluchtaansluiting is in werkelijkheid hoog geplaatst)

Het systeem is zowel in te zetten voor luchtcirculatie (100% kaslucht) als ventilatie (100% buitenlucht) of combinaties van beide.

In de circulatiemodus vervangt het systeem de traditionele mengventilatoren tussen het gewas. Deze modus wordt ingezet om lokale klimaatverschillen te verkleinen, als geen ventilatie nodig is voor vocht- of warmteafvoer.

In de ventilatiemodus zorgt het systeem voor een goed doseerbare basisventilatie, die wordt ingebracht nabij de meest kritieke, vochtige plaatsen (onderin het gewas). Bij beperkte ventilatie voor vochtregulatie blijven de luchtramen gesloten. Neemt de ventilatie toe, dan wordt er een kiertje lucht bij gezet om goed af te voeren. Is er veel ventilatie nodig om overtollige warmte af te voeren, dan blijven de luchtramen het primaire ventilatiesysteem en zijn de luchtslangen additioneel. Ze helpen dan de temperatuurverschillen te verkleinen.

De Climate Optimizers waren kort na het begin van de teelt operationeel, maar nog niet voorzien van buitenluchtaansluitingen. Deze zijn eind april gereed gekomen. Overigens is de behoefte om (met buitenlucht) te ventileren in de winter laag.

Hierna bleek nog dat de aanvoer van buitenlucht bij gesloten kleppen niet afdoende was af te sluiten. Pas tegen het einde van de teelt is hiervoor een fundamentele oplossing gevonden. De lek heeft een zekere nadelige invloed gehad op de kwaliteit van de klimatisering.

3 Meetopzet en -uitvoering

3.1 Registrerende metingen

Een sectie in het noordoostelijke deel van de open kas van Themato (afdeling 1) is uitgerust met registrerende klimaatmeetapparatuur. Hiermee zijn elke 5 minuten de volgende grootheden gemeten:

- Luchttemperatuur en relatieve luchtvochtigheid op 50 posities;
- Toevoertemperatuur in de luchtslang op 3 posities;
- CO₂-concentratie op 10 posities;
- Luchtsnelheid op 5 posities.

In Figuur 3 zijn de meetposities aangegeven. In Tabel 1 is aangegeven welke metingen zijn verricht op welke meetposities.

Deze registraties hebben in volledige omvang plaatsgevonden van begin maart t/m het einde van de teelt in november 2009. Voorafgaand aan deze periode was nog niet voldoende meetapparatuur beschikbaar. Daarom zijn vanaf het begin van de teelt in december 2008 beperkte registraties verricht. Het betreft metingen van de temperatuur en relatieve vochtigheid op 8 posities (op 3 kapdiepten en in 1 naastliggende kap elk 2 hoogten). Omdat in die periode ook de buitenluchtaansluitingen ontbraken is een interpretatie van de winterperiode slechts beperkt mogelijk.

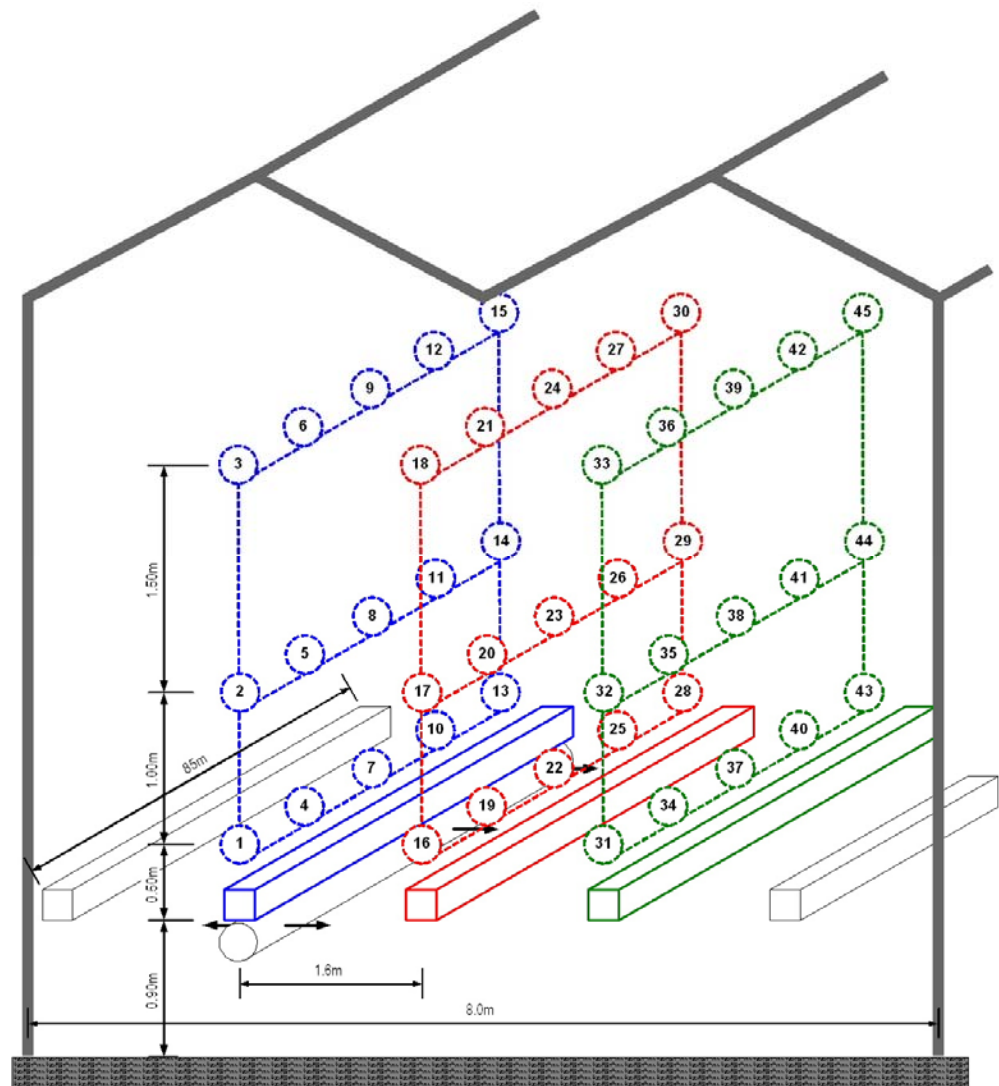
De registrerende metingen zijn uitgevoerd met behulp van een draadloos meetsysteem. De meetresultaten zijn aan een centrale datalogger doorgegeven via draadloze transmitters, waarop de voelers zijn aangesloten. De datalogger is ongeveer maandelijks uitgelezen.

Om na te gaan hoe de verdeling van temperatuur en relatieve vochtigheid in de kas is op globaler niveau, zijn deze grootheden tevens op 5 andere posities (46-50) in de kas gemeten (niet aangegeven in Figuur 3).

Daarnaast is medio april een enkel meetpunt boven het scherm geplaatst, om het effect van het schermgebruik op het klimaat vast te leggen.

Via het eigen meet- en opslagsysteem van de klimaatcomputer zijn aanvullende kenmerkende grootheden verzameld, zoals:

- meteogegevens;
- temperaturen van de verwarming (buisrail en luchtslang);
- standen van de luchtbehandeling, luchtramen en het scherm.



Figuur 3 Meetposities registrerende metingen

Tabel 1 Overzicht meetgrootheden en meetposities

Grootheid	Meetposities
Temperatuur en relatieve vochtigheid	1-45, 46-50
Toevoertemperatuur luchtslang	1, 7, 13
CO ₂ -concentratie	4, 6, 10, 12, 20, 26, 34, 36, 40, 42
Luchtsnelheid	5, 11, 20, 26, 35, 41

3.2 **Momentane metingen**

Op karakteristieke momenten zijn tevens detailmetingen rond de planten uitgevoerd. Deze momentane metingen zijn uitgevoerd in situaties die representatief zijn voor verschillende seizoenen, op karakteristieke momenten van de teelt, bij diverse schakelstanden van de luchtbehandeling.

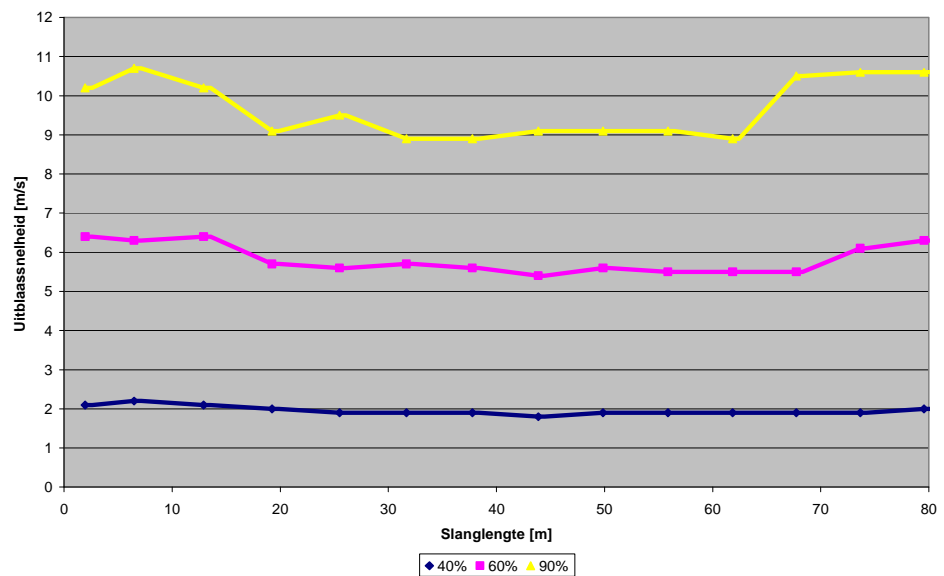
Om inzicht te krijgen in de luchtstroming in de kas en rond de planten bij verschillende condities (buitentemperatuur, zonbelasting, schermpositie, toevoertemperatuur, toevoercapaciteit) is het stromingsprofiel een aantal malen momentaan in kaart gebracht. Hierbij is gebruik gemaakt van rookproeven en metingen van lokale luchtsnelheden, temperaturen en vochtigheden. Bij deze metingen zijn de luchttoevoercapaciteit en -temperatuur van de luchtslangen systematisch gevarieerd, om hun effect op het klimaat in de kas te bepalen. Tevens zijn metingen uitgevoerd om systeeminstellingen vast te leggen, zoals de lucht- en temperatuurverdeling over de inblaasslangen.

4 Meetresultaten

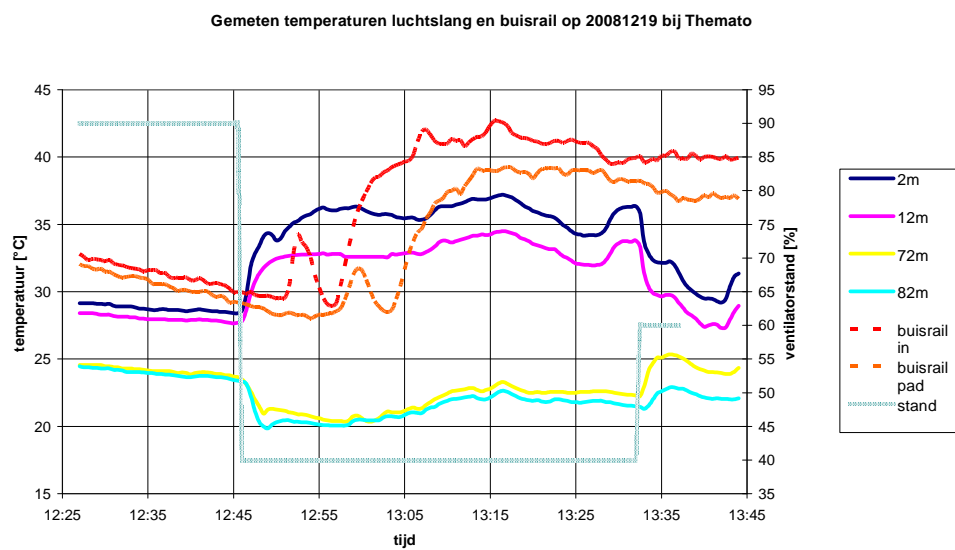
4.1 Momentane metingen

4.1.1 Luchtslangen

Bij typische ventilatorstanden zijn metingen verricht van de uitblaassnelheden in de gaten van de luchtslang op verschillende afstanden vanaf de ventilator (figuur 4). Tevens zijn de bijbehorende temperaturen enige tijd geregistreerd (figuur 5).



Figuur 4 Verloop van uitblaassnelheden over de slanglengte, afhankelijk van de ventilatorstand



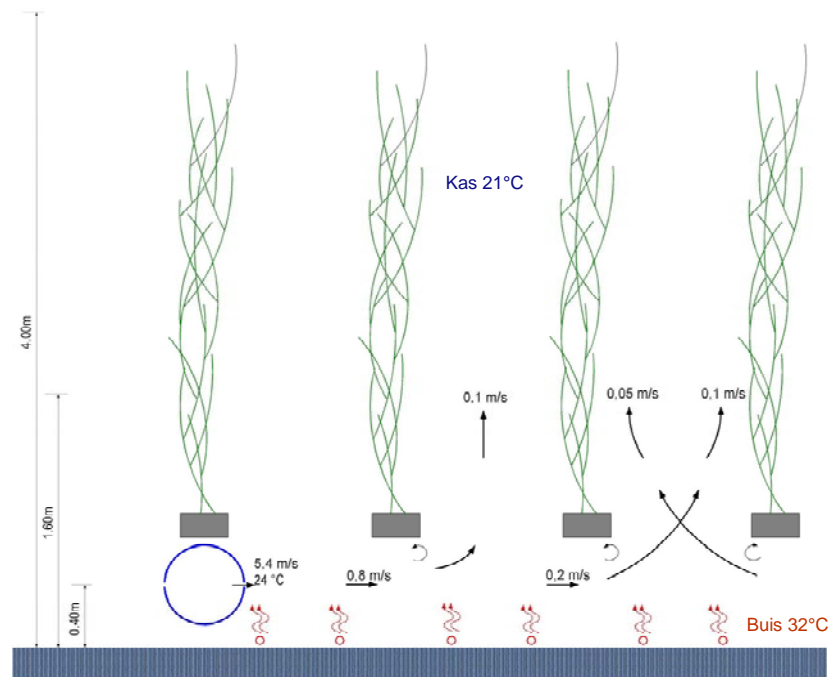
Figuur 5 Temperatuurverloop op verschillende plaatsen in de luchtslang, afhankelijk van de ventilatorstand

4.1.2 *Stromingspatroon*

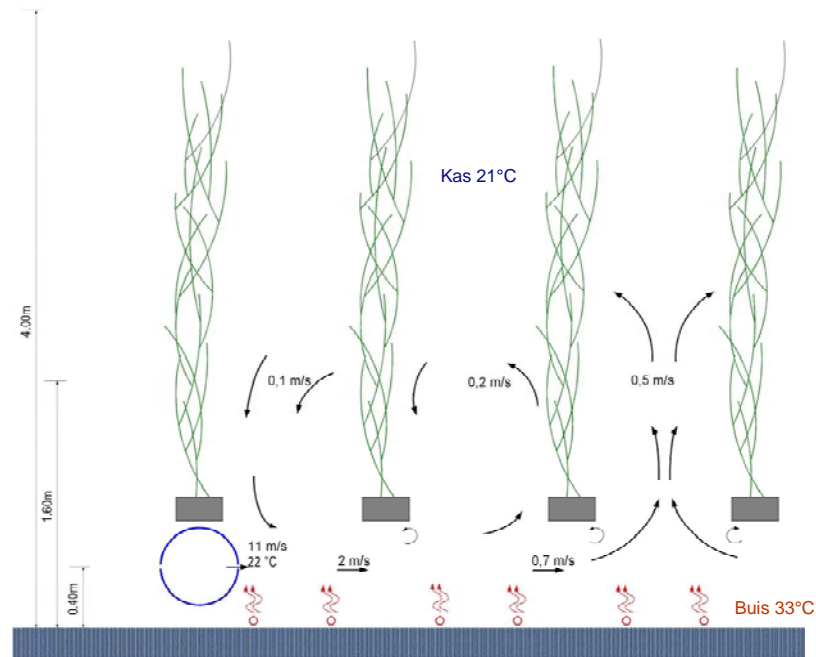
Op karakteristieke momenten zijn detailmetingen uitgevoerd om het stromingsbeeld vast te leggen. Deze metingen zijn uitgevoerd in de winter (19 december 2008), het voorjaar (14 april 2009) en de zomer (27 augustus 2009). Bij (vrijwel) gesloten luchtramen (winter en voorjaar) en hogere ventilatorstanden domineert de inblaas van de luchtslangen het stromingspatroon (zie Figuur 6 en Figuur 7). De invloed van de temperaturen van buisrail en luchtslang blijkt hierbij ondergeschikt, wat zal samenhangen met de geringe stooktemperaturen.

In de figuren is te zien dat de uitgeblazen lucht onder de teeltgoten door stroomt en elkaar halverwege treft. Daar stroomt de lucht omhoog door het gewas. Alleen bij hoge ventilatorstand (Figuur 7) blijkt de luchtstroom daarna een duidelijke hoofdwervel te vormen. Die wervel loopt boven door en over het gewas terug om bij de planten boven de luchtslangen omlaag te stromen.

Bij een lage ventilatorstand van 40% blijft de werp vanaf de luchtslang beperkt. Onder invloed van de stookwarmte stroomt de lucht ongeveer bij de eerstvolgende teeltgoot omhoog het gewas in, om daarna zodanig te diffuseren dat deze niet meer als gedefinieerde stroming is te volgen.



Figuur 6 Typisch stromingspatroon bij 60% ventilatorstand



Figuur 7 Typisch stromingspatroon bij 90% ventilatorstand

In de zomer overheersen de natuurlijke luchtstromen door de geopende luchtramen het stromingsbeeld, in combinatie met de thermische effecten door de zoninvloed. Bij het afnemen van het debiet via de luchtslangen wordt deze invloed groter.

Bij een ventilatorstand van 40% wordt het luchtstromingspatroon volledig beheerst door de natuurlijk luchtstromen. Bij een ventilatorstand van 90% is het stromingspatroon tot op enkele meters van de luchtslang vergelijkbaar met de wintersituatie en worden de natuurlijke luchtstromen op grotere afstand dominant.

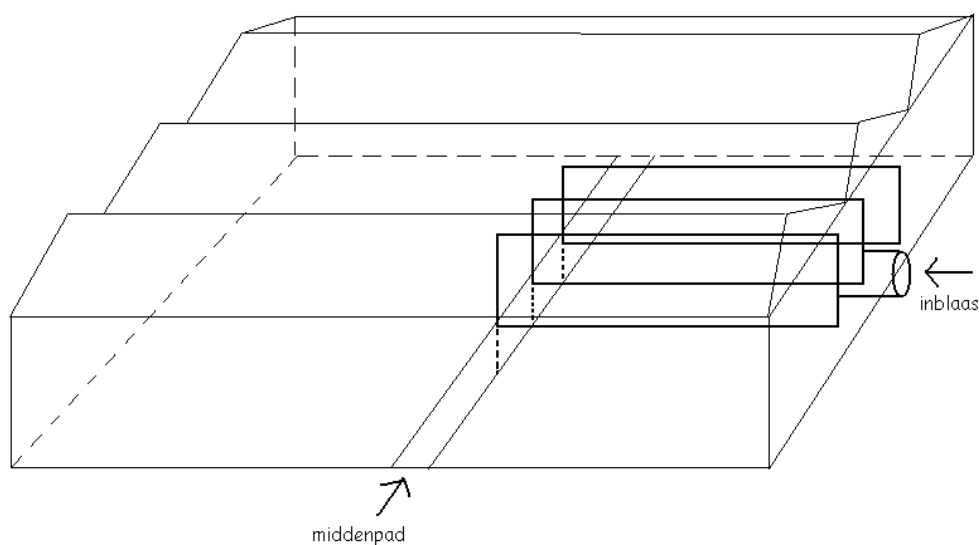
Bij zonnig weer worden de slangen nog wel ingezet, om grote verticale temperatuurverschillen te verkleinen (verbeteren van de warmteverdeling).

4.2 Registrerende metingen

4.2.1 Algemeen

Na het uitlezen van de meetapparatuur is gebleken dat soms gegevens ontbraken. Dit kwam doordat storingen bij de gegevensoverdracht optraden, batterijen voortijdig leeg raakten of voelers tijdens werkzaamheden in de kas beschadigden. Er is echter voldoende bruikbare informatie verzameld om een goed beeld te vormen.

De metingen zijn uitgevoerd in drie kapdoorsneden (Figuur 8). De meetresultaten zijn onder andere in contourplots van deze doorsneden verwerkt. Karakteristieke voorbeelden worden hierna getoond.



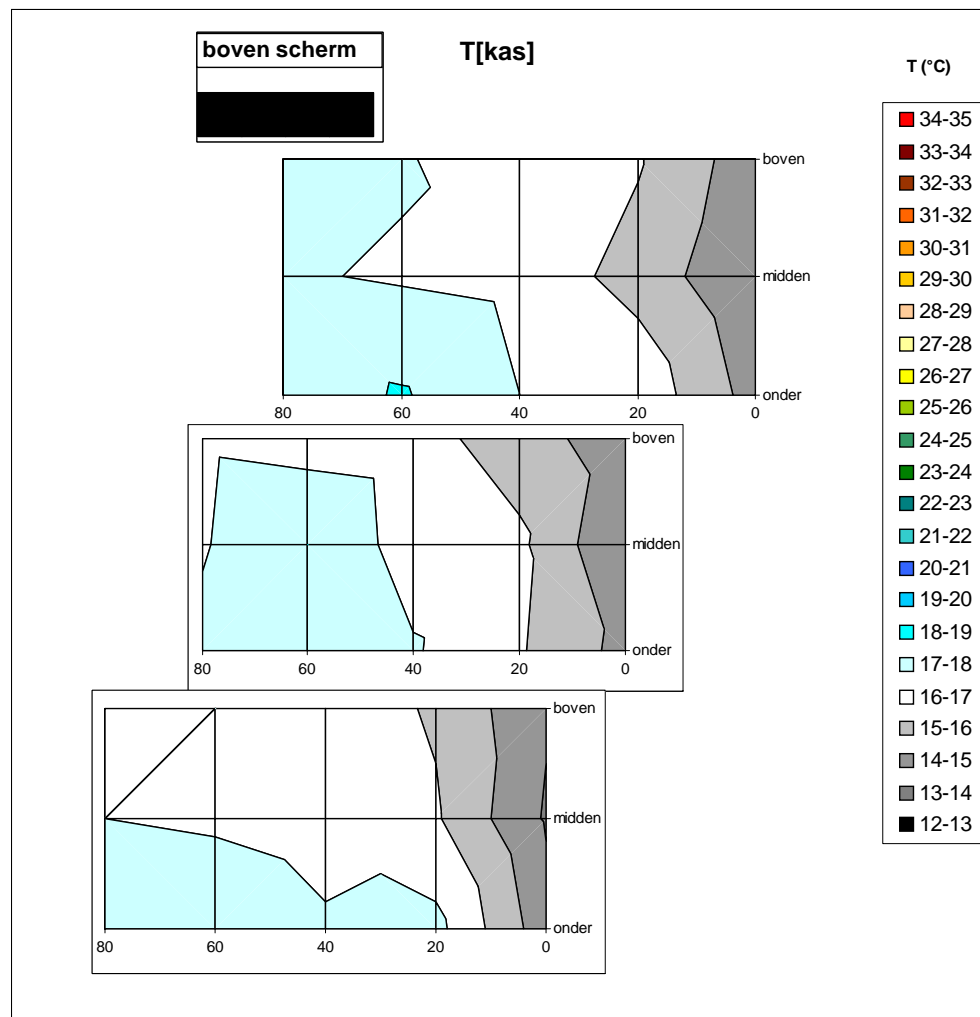
Figuur 8 De meetresultaten zijn schematisch weergegeven in drie naastliggende doorsneden

4.2.2 Klimaat

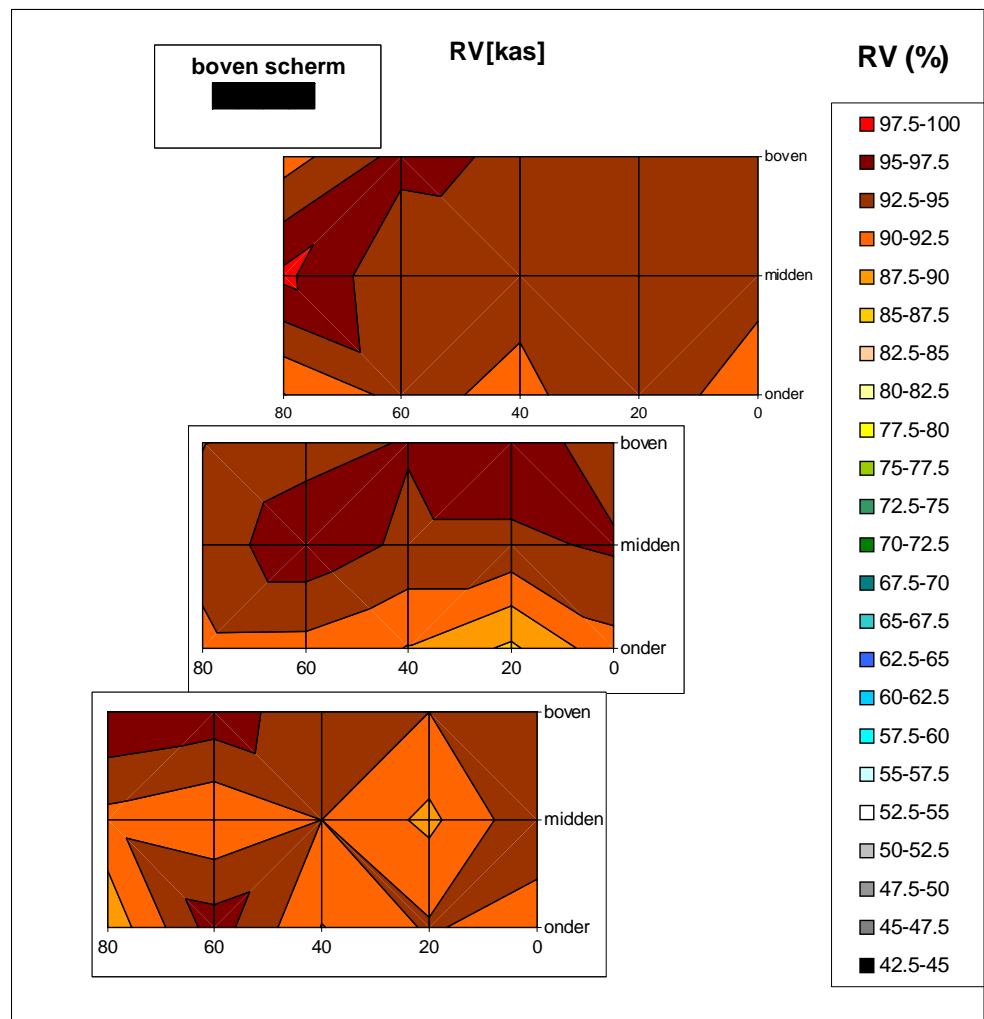
Figuur 9 laat de contourplots voor temperatuur zien op een koele voorjaarsmorgen. Figuur 10 toont de bijbehorende plaatjes voor de relatieve vochtigheid.

De gemiddelde temperatuur ligt op de ingestelde waarde (16,5°C). Figuur 9 laat zien dat de temperatuur over de kaplengte (horizontaal verloop) echter aanzienlijk varieert rond het instelpunt (14 - 18°C). De circulatie door de luchtslangen heeft kennelijk onvoldoende effect op de verdeling over de kaplengte.

Figuur 10 laat op deze koele voorjaarsmorgen hoge relatieve luchtvochtigheden zien van 85 tot 100%. De bijbehorende absolute luchtvochtigheden vertonen echter een geringe variatie over de doorsneden (11 ± 1 g/kg).

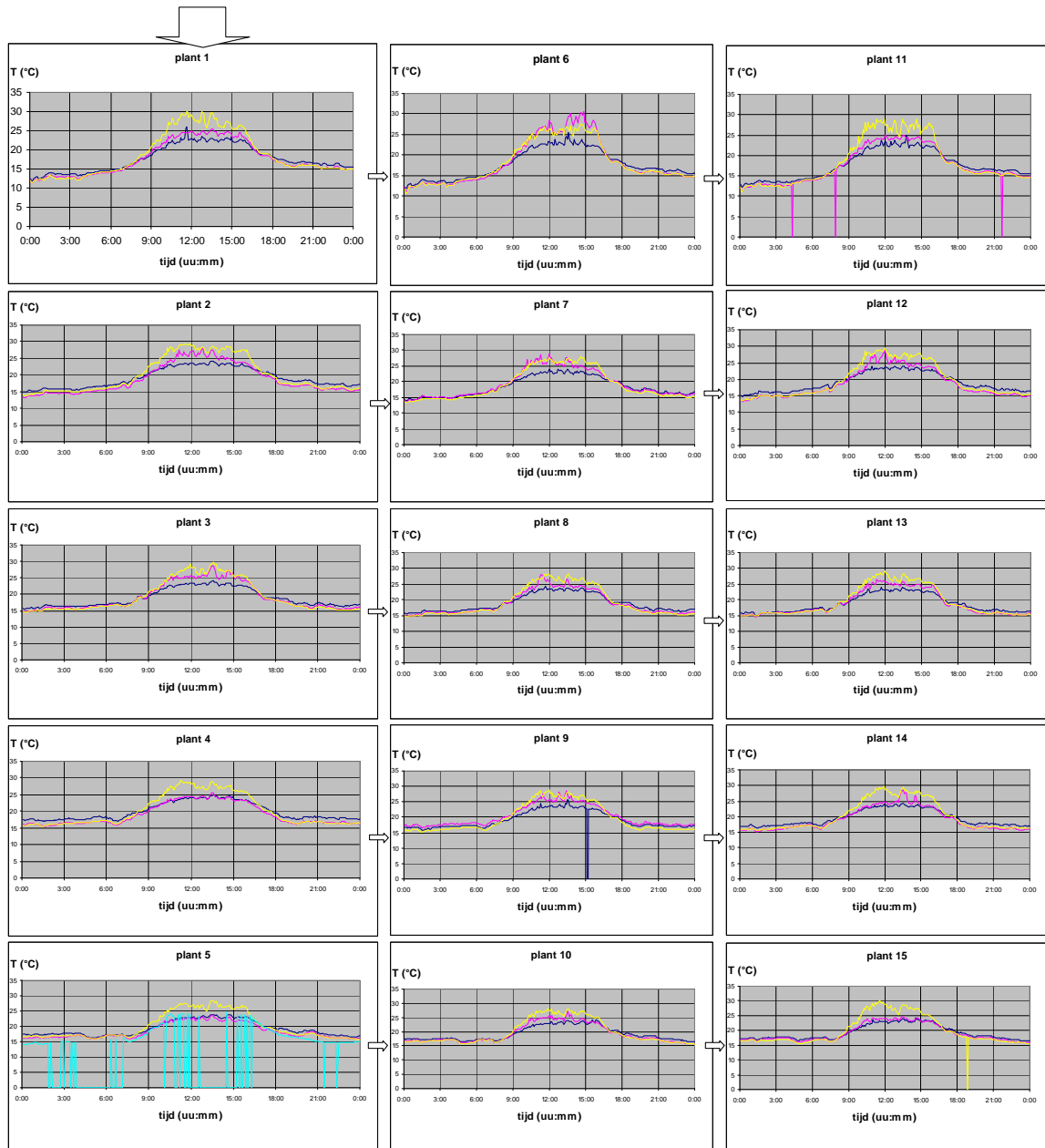


Figuur 9 Contourplots van gemeten luchttemperaturen in drie opvolgende kapdoorsneden op 22 maart om 6:00 h (rechts = gevelzijde; links = bij middenpad). Temperatuurstelling 16,5°C. Frisse voorjaarsnacht ($T_{bu} = 5,8^{\circ}\text{C}$). Lucht slang op 85% stand circulerend. Luchtramen dicht. Buistemperatuur 19,1°C, slangtemperatuur 16,9°C.

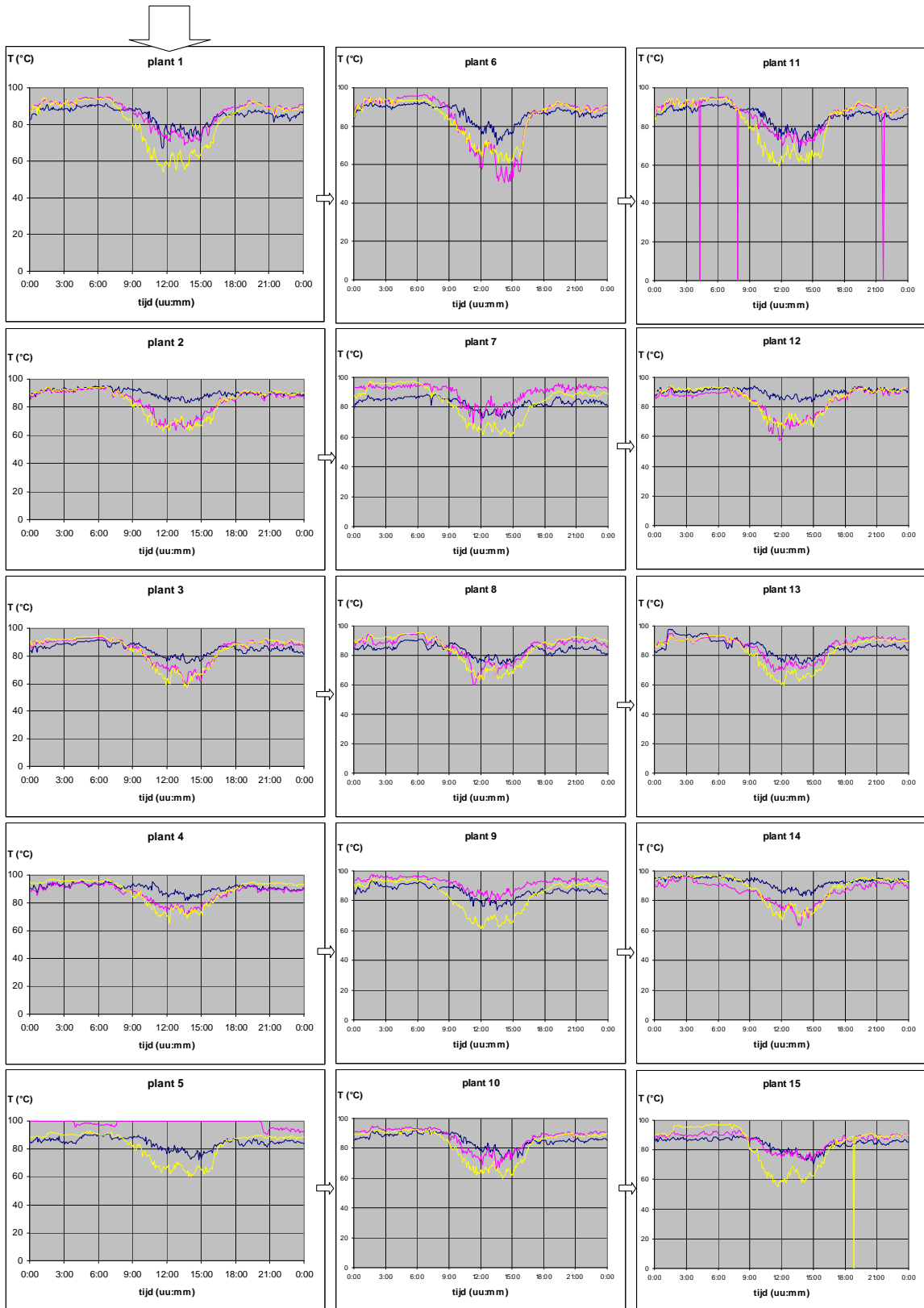


Figuur 10 Bijbehorende contourplots van gemeten relatieve luchtvochtigheden in drie opeenvolgende kapdoorsneden op 22 maart om 6:00 h (rechts = gevelzijde; links = bij middenpad)

Figuur 11 toont voor 22 maart de etmaalverlopen van de temperaturen op de 45 meetpunten in het gewas. Figuur 12 toont de overeenkomstige relatieve vochtigheden. Kenmerkend is het duidelijke etmaalpatroon dat bij tomatenteelt wordt nagestreefd, met verhoogde temperaturen overdag. Als gevolg treden overdag verlaagde vochtigheden op. In de nacht liggen de RV's veelal rond 90%. De hoogste RV's treden overdag vooral onderin het gewas op. Dit patroon is iets dat op andere dagen ook steeds terugkomt. Alleen de niveaus en amplitudes verschillen door het jaar.



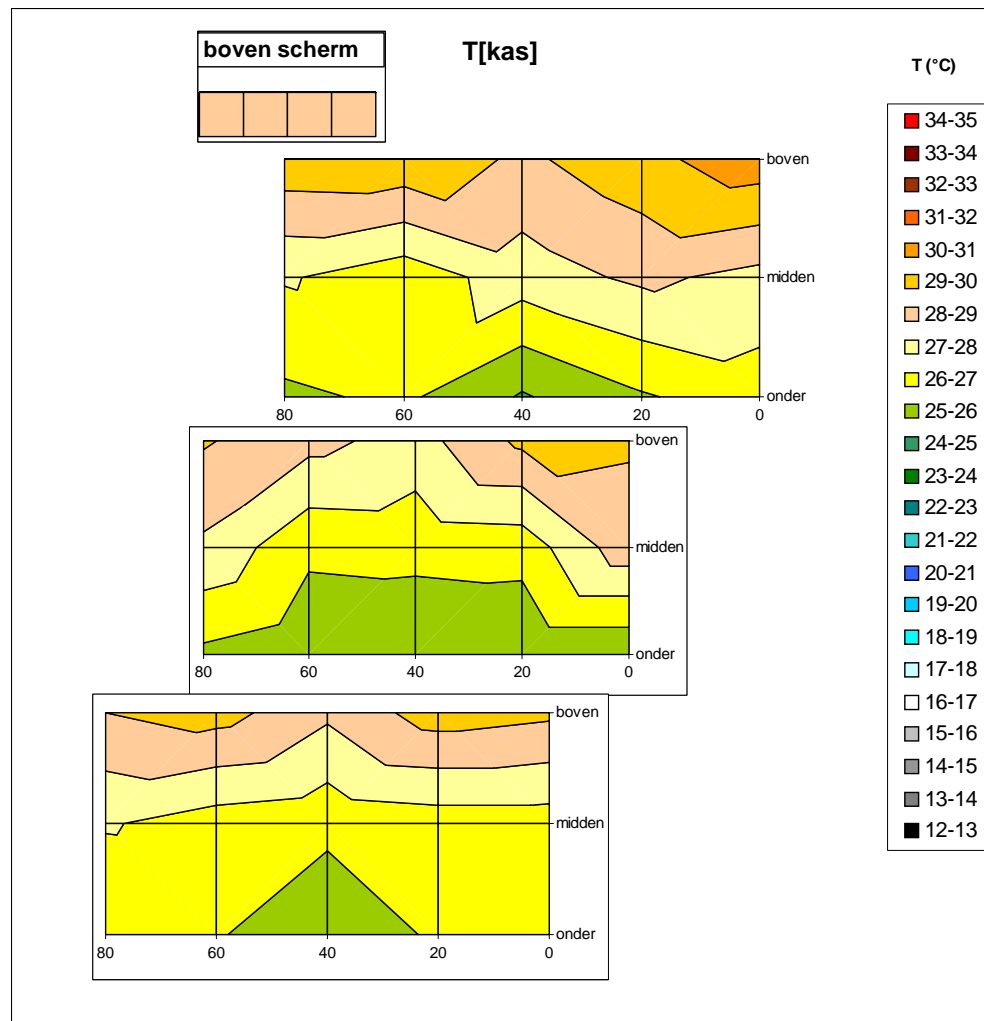
Figuur 11 Temperatuurverlopen bij de 45 meetpunten in het gewas op 22 maart. Van links naar rechts worden de grafieken voor de drie meetdoorsnedes getoond en van boven naar beneden de vijf meetposities per kaplengte. De drie lijnen per grafiek zijn voor de drie hoogten (geel = bovenin, paars = midden en blauw = onderin het gewas).



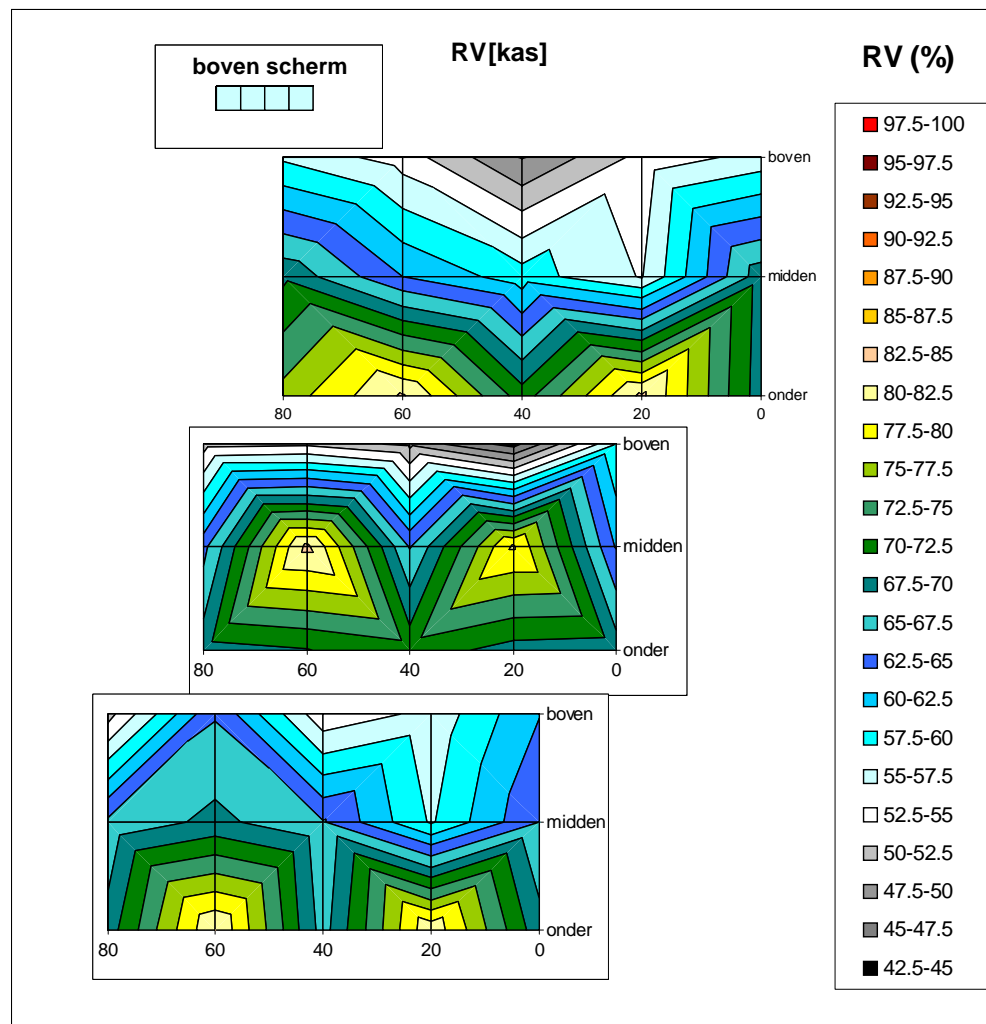
Figuur 12 Overeenkomstige etmaalverlopen van de relatieve luchtvochtigheid bij de 45 meetpunten in het gewas op 22 maart.

Figuur 13 betreft het warmste deel van een zonnige, zomerse voorjaarsdag. Het laat een aanzienlijke verticale temperatuurgradiënt zien (24 – 30°C), ondanks het feit dat er ruim wordt gelucht.

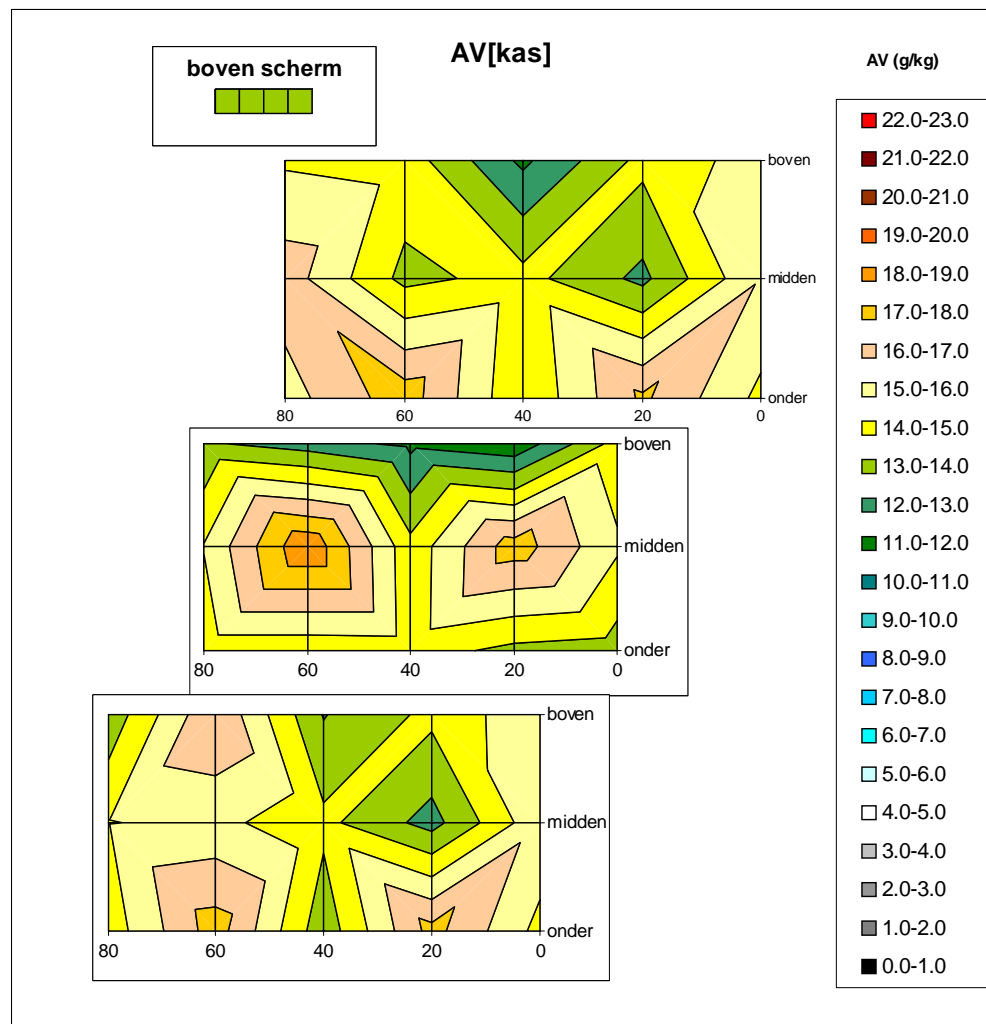
De relatieve luchtvochtigheid varieert van onder 50% tot boven 80% (Figuur 14). De laagste waarden ziet men bovenin, waar de ventilatie en de zonlast hoog is. De hoogste vochtigheden treden onderin en tussen het gewas op. Figuur 15 laat zien dat de absolute luchtvochtigheid hier wel 7 g/kg hoger kan liggen dan bovenin, wat duidt op een hoge vochtproductie door het gewas.



Figuur 13 Contourplots van temperaturen op 25 mei 14:00 h (rechts = gevelzijde; links = bij middenpad). Warme zonnige dag ($T_{bu} = 22^{\circ}\text{C}$) met luchtramen wijd open (loef en lij 95%). In de onderste plot ontbreekt informatie van het meetpunt midden-rechts, wat het beeld vertekent.



Figuur 14 Bijbehorende contourplots van relatieve luchtvochtigheden op 25 mei om 14:00 h (rechts = gevelzijde; links = bij middenpad)



Figuur 15 Bijbehorende contourplots van de absolute luchtvochtigheid op 25 mei om 14:00 h (rechts = gevelzijde; links = bij middenpad)

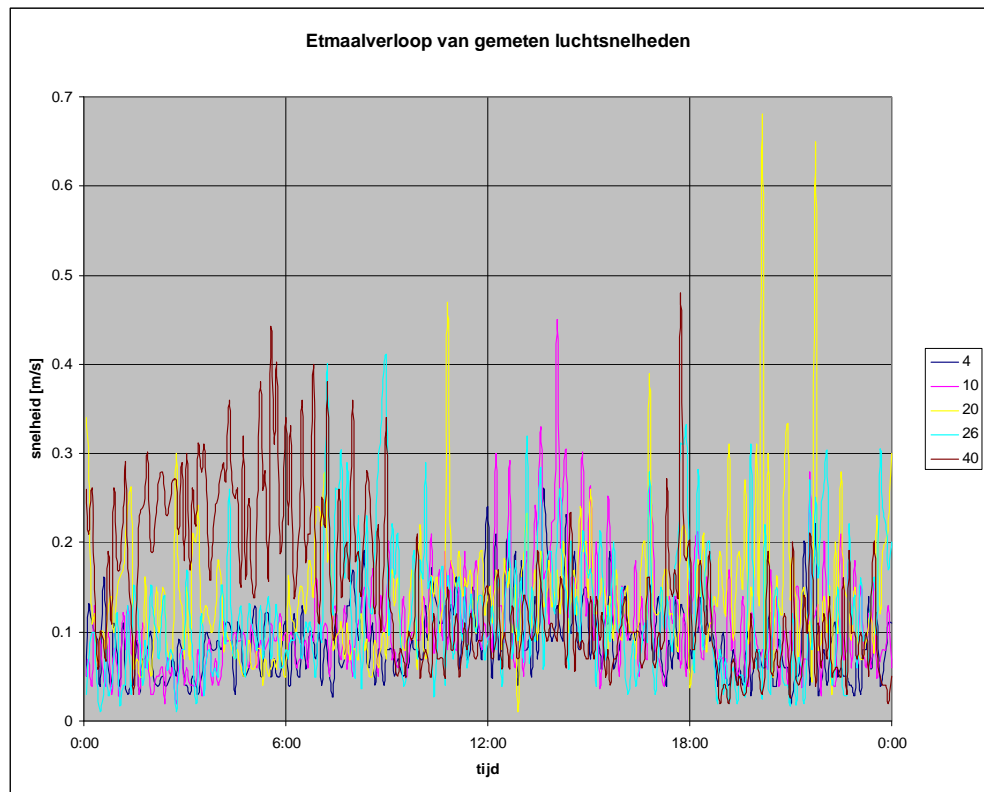
4.2.3 *Luchtbeweging*

Om na te kunnen gaan of de luchtslangen de luchtuitwisseling tussen het gewas bevorderen, zijn op de middelste hoogte in alle drie meetdoorsneden luchtsnelheden gemeten.

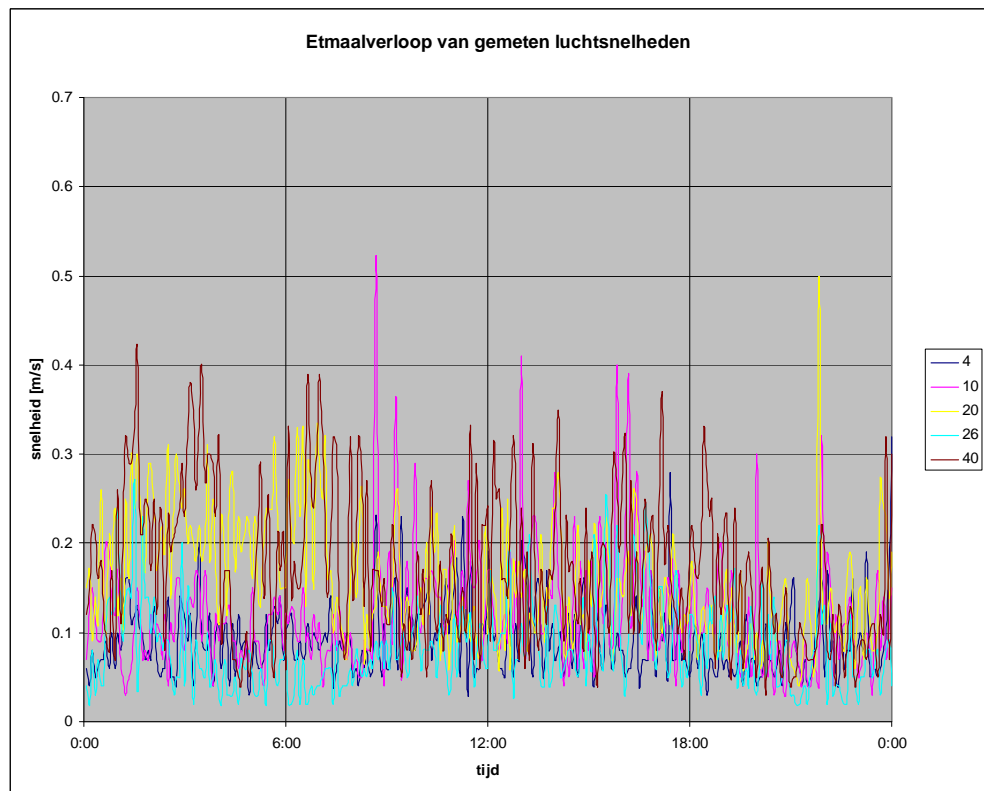
Figuur 16 geeft een voorbeeld van het etmaalverloop op 22 maart als overdag alleen aan lijkzijde de luchtramen een kiertje worden geopend.

Figuur 17 toont het beeld voor 25 mei met overdag zowel aan loef- als lijkzijde wijd geopende luchtramen. Het is opmerkelijk dat de wijd geopende luchtramen niet in opvallend hogere luchtsnelheden tussen het gewas resulteren.

Overigens ontbreekt in de figuren één van de meetsignalen (34). Dit signaal is als uitschieter behandeld, omdat het niet-verklaarbare, hoge snelheden opleverde. Een meetfout is niet uitgesloten, omdat de apparatuur voor het meten van de luchtsnelheden gevoelig is en relatief gemakkelijk te verstoren.



Figuur 16 Etmaalverloop luchtsnelheden op 22 maart

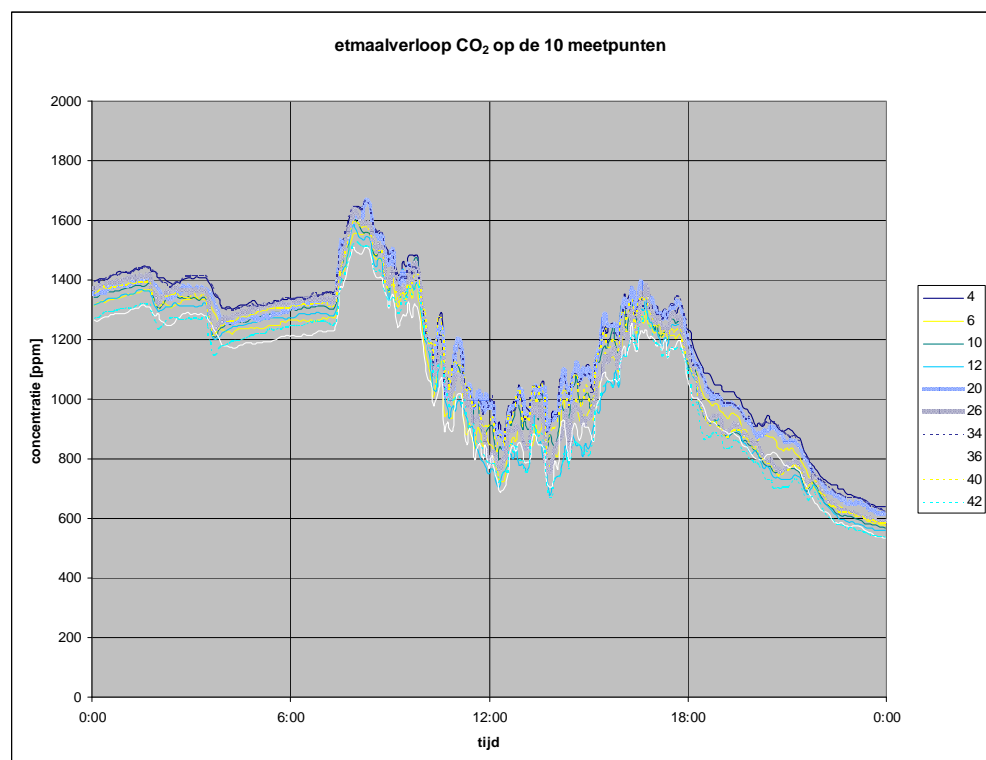


Figuur 17 Etmaalverloop luchtsnelheden op 25 mei

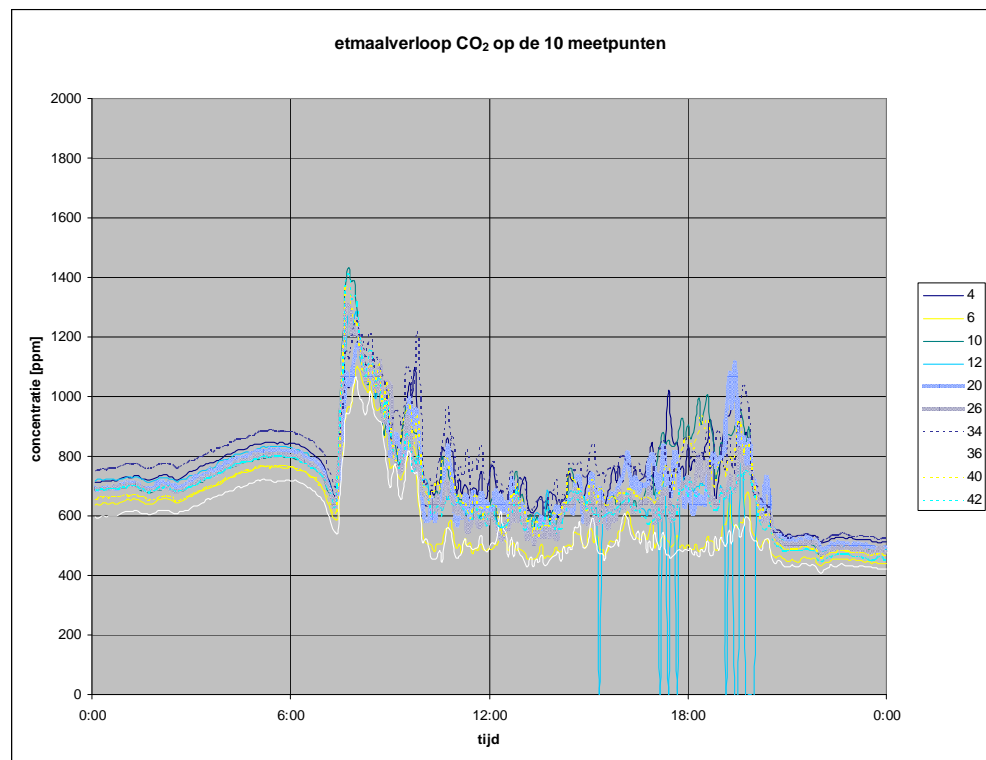
4.2.4 Kooldioxide

Om na te gaan of de luchtbeweging invloed heeft op de verdeling van de gedoseerde CO₂ in de kas, zijn de concentraties op 10 plaatsen geregistreerd. Figuur 18 toont het etmaalverloop voor 22 maart als alleen overdag miniem wordt gelucht. Figuur 19 toont het beeld voor 25 mei als overdag ruim wordt gelucht.

Bij de interpretatie van de figuren moet men bedenken dat de achtergrondconcentratie buiten circa 380 ppm is. De CO₂-dosering is dus verantwoordelijk voor de verhoging boven dit niveau. In dat licht gezien, zijn de onderlinge concentratieverschillen tussen de meetpunten op 25 mei al als fors te beschouwen. Ook meetafwijkingen tussen de sensoren kunnen een rol spelen, omdat de maximale meetonauwkeurigheid ± 50 ppm is.



Figuur 18 Etmaalverloop gemeten CO₂-concentraties op 22 maart

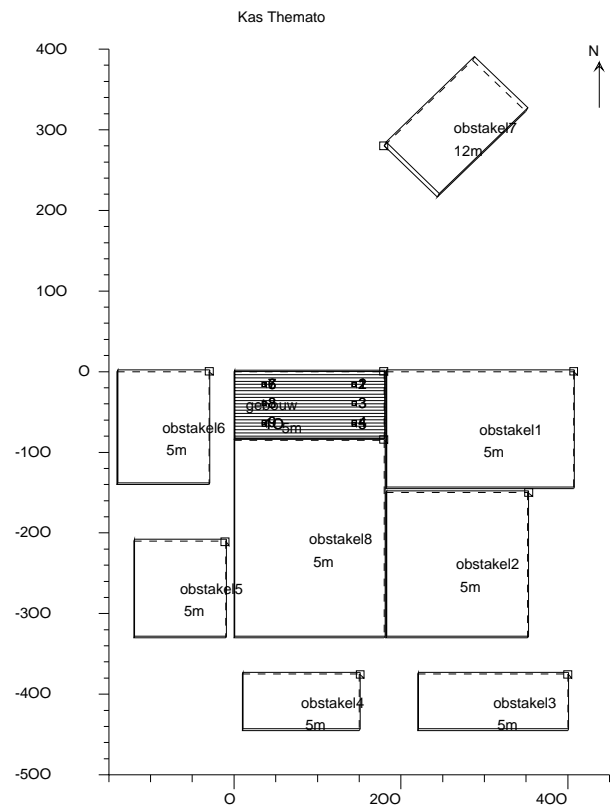


Figuur 19 Etmaalverloop gemeten CO₂-concentraties op 25 mei

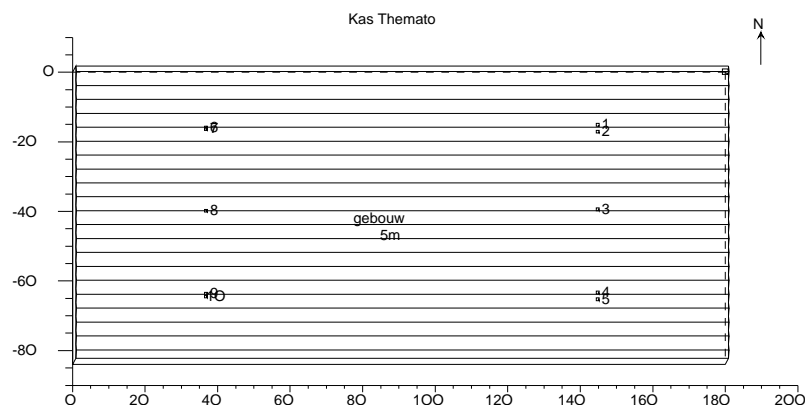
5 Modelling ventilatie

Voor de vocht- en warmteafvoer is de grootte van de ventilatiestromen van belang. De momentane ventilatiestromen zijn afhankelijk van de standen van de luchtramen, de schakelstanden van de luchtslangen, de windsnelheid en –richting en het

temperatuurverschil tussen binnen en buiten. Met behulp van een ventilatiemodel [1] van de kas is de ventilatie herleid voor elke meetconditie. Als invoergrootte voor het ventilatiemodel zijn winddrukfactoren bepaald met het TNO-model Cp-Generator [2]. Figuur 20 toont de toegepaste modelconfiguratie. Ter vereenvoudiging zijn in dit model groepen luchtramen samengevoegd. Aanvankelijk is van een groter aantal groepen uitgegaan, maar dit bleek vanwege geringe onderlinge drukverschillen verder te kunnen worden vereenvoudigd tot 10 posities (Figuur 21).



Figuur 20 Plattegrond van model open kasafdeling Themato

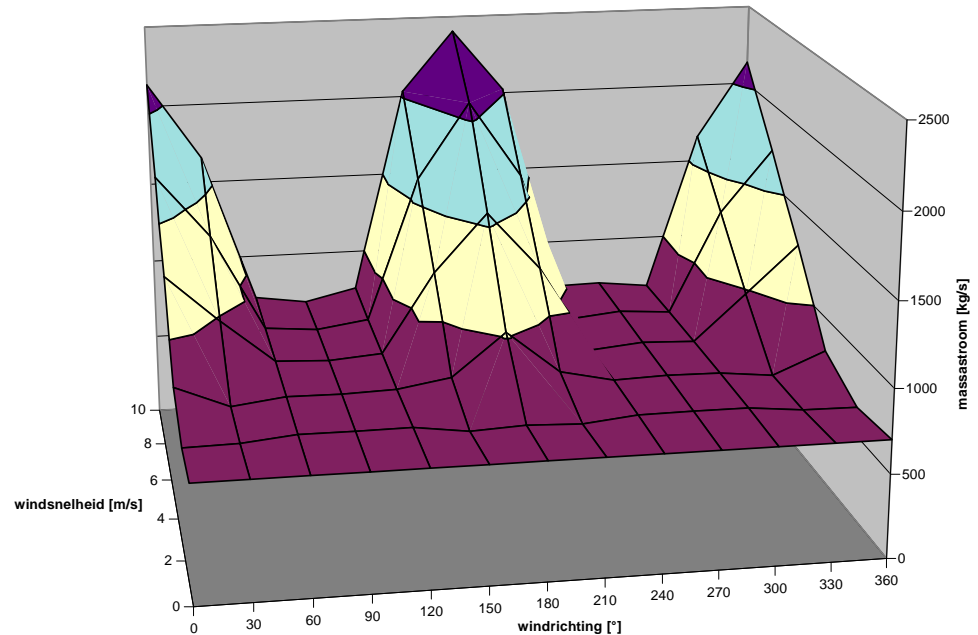


Figuur 21 Vereenvoudigde posities luchtramen

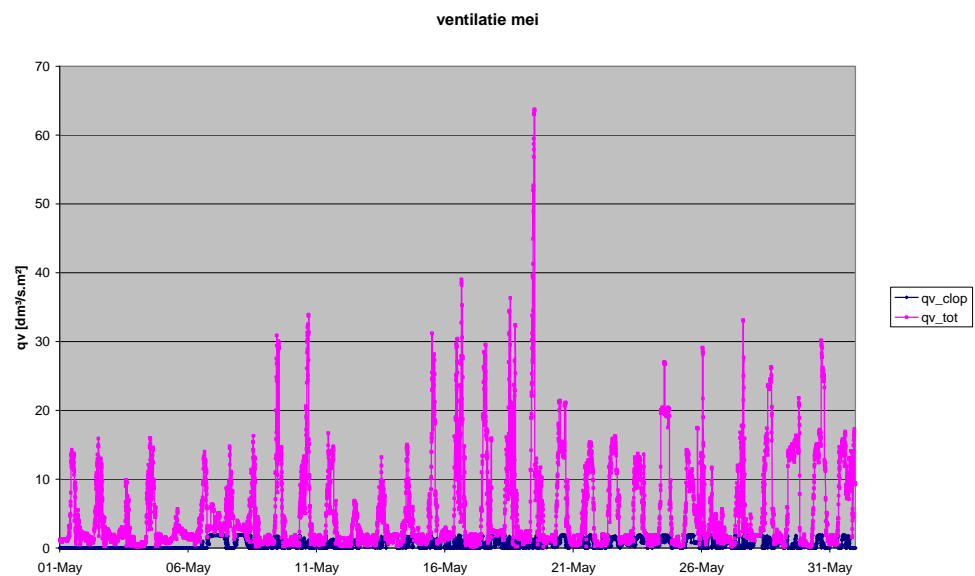
Op elke modelpositie is naar rato van het kasoppervlak een groep luchtramen verondersteld. Er is een opsplitsing gemaakt in loef- en lijramen en in bovenste en

onderste raamdelen. Dat laatste is van belang vanwege de drijvende kracht van thermiek.

Figuur 22 geeft een beeld van de windinvloed op de ventilatie. Het blijkt dat de windsnelheid een groot effect heeft bij wind dwars op de kaprichting. Bij wind evenwijdig aan de kappen is de invloed van de windsnelheid beperkt.



Figuur 22 Kasventilatie bij volledig geopende luchtramen, afhankelijk van de windcondities

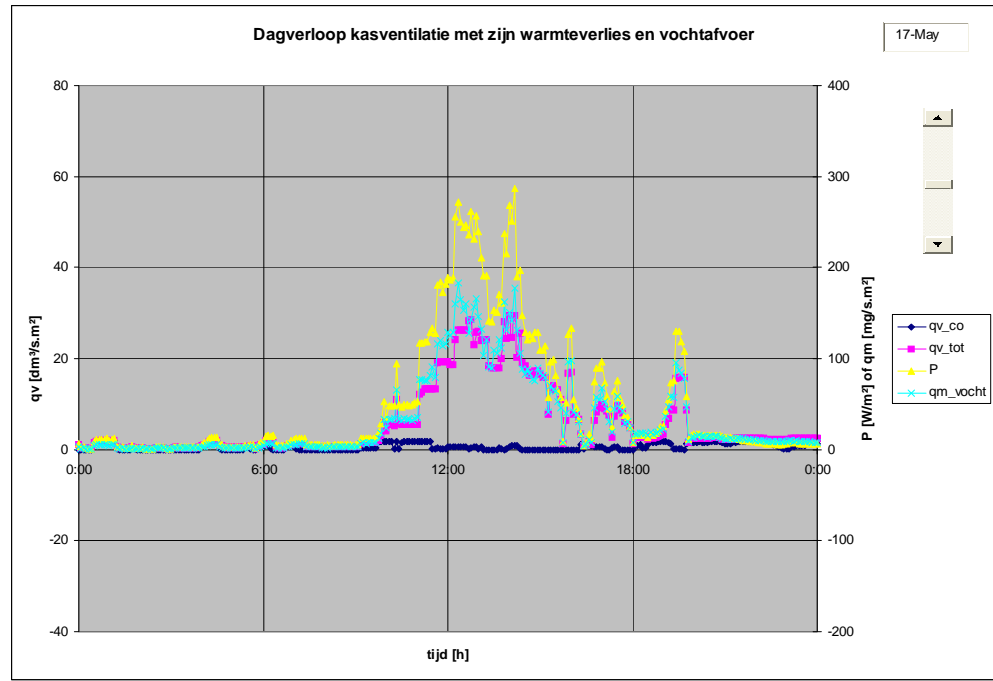


Figuur 23 Ventilatie in de maand mei

Figuur 23 geeft een voorbeeld van het verloop van de ventilatie bij reële raam- en schakelstanden. Overdag blijkt de ventilatie in sterk wisselende mate te worden

verhoogd door het openen van de luchtramen. De bijdrage van de luchtslangen (qv_{clop}) blijkt beperkt te zijn.

Figuur 24 toont het verloop op een typische dag meer in detail. Behalve de ventilatiestroom zijn tevens de bijbehorende vochtafvoer en het warmteverlies door ventilatie weergegeven.



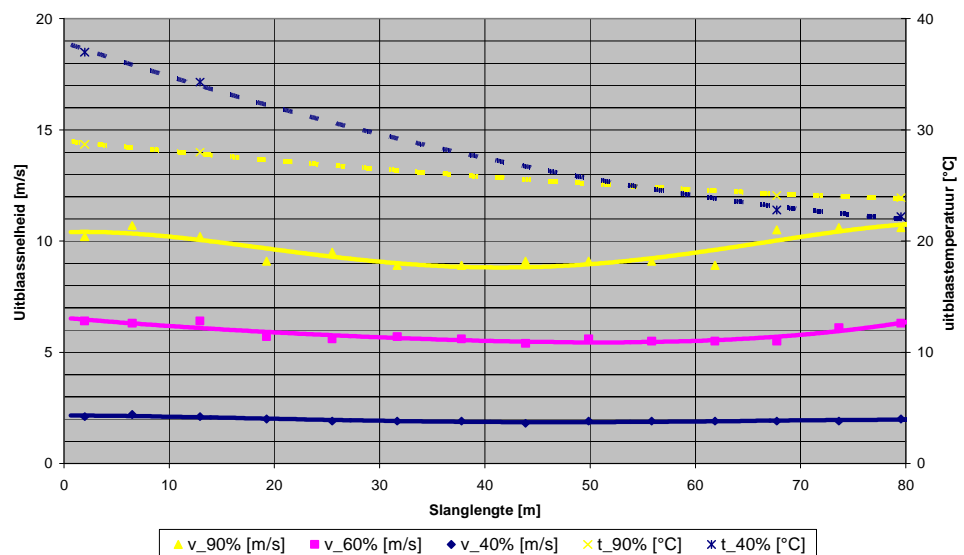
Figuur 24 Voorbeeld van het dagverloop van de ventilatie met bijbehorende vocht- en warmteafvoer (qv_{co} = ventilatie luchtslangen in $dm^3/s.m^2$, qv_{tot} = totale ventilatie, P = warmte in W/m^2 , qm_{vocht} = vochtafvoer in $mg/s.m^2$)

6 Analyse en bespreking

6.1 Luchtbehandeling

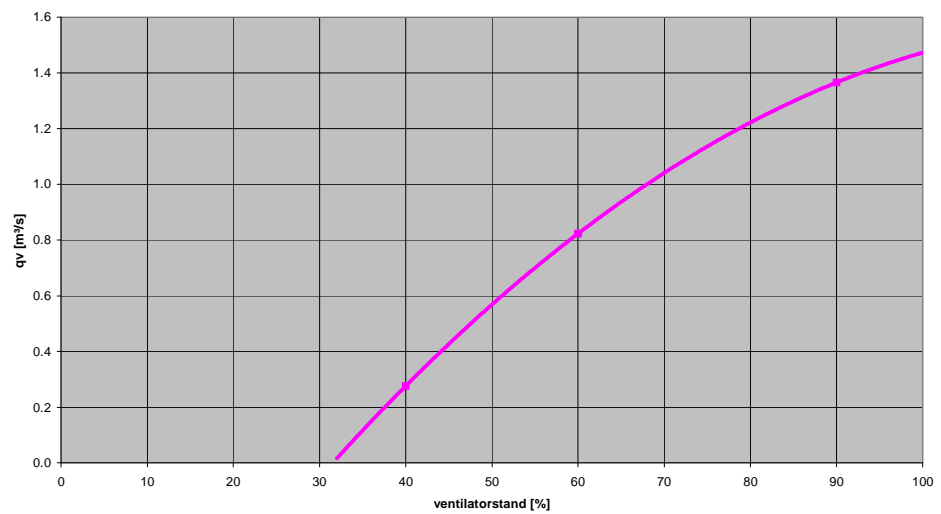
De gemeten verlopen van uitblaassnelheden en -temperaturen over de luchtslang zijn vergeleken. Figuur 25 geeft deze verlopen over de slanglengte weer.

De getrokken lijnen tonen de snelheidsverlopen. Daaruit blijkt dat er sprake is van een redelijk gelijkmatige luchtverdeling. Bij hogere debieten blijkt de uitblaas in het middengedeelte iets achter te blijven ten opzichte van het begin en eind van de slang. De onderbroken lijnen tonen typische temperatuurverlopen voor enkele karakteristieke tijdstippen. Met name bij lagere debieten blijkt de uitblaasstemperatuur aanzienlijk te dalen met toenemende afstand vanaf de ventilator. Dit wordt veroorzaakt door de afkoeling van de lucht aan het slangoppervlak. De afkoeling is groter naarmate de lucht langzamer door de slang stroomt.



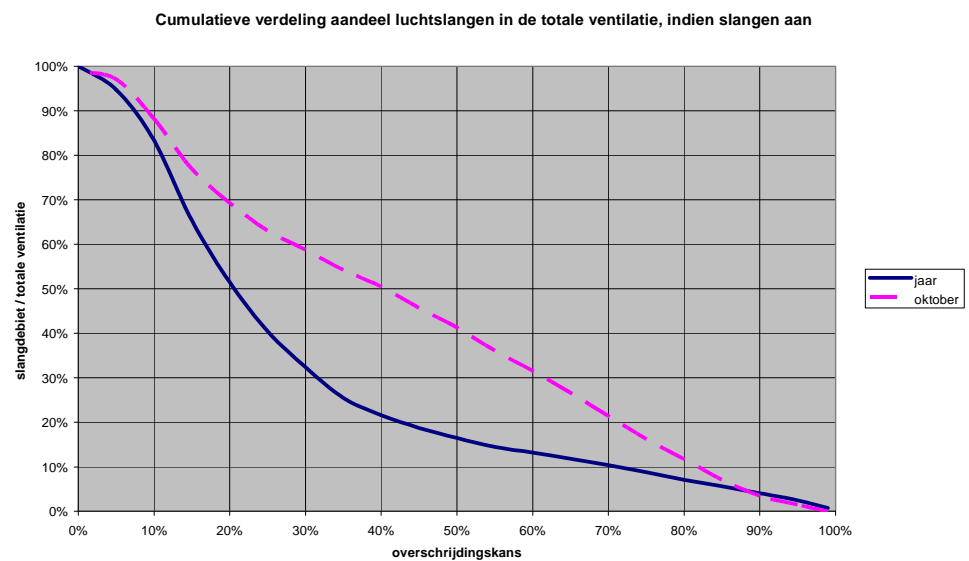
Figuur 25 Verloop van uitblaassnelheden en -temperaturen over de slanglengte, afhankelijk van de ventilatorstand

In de praktijk blijken de ventilatoren te worden geregeld tussen 40 en 90%. Uit de snelheidsmetingen is de capaciteit bij deze standen afgeleid. Dat geeft het verband tussen ventilatorstand en debiet van figuur 26. De debieten komen overeen met een ventilatievoud van 0,4 tot 2,0 h⁻¹.



Figuur 26 Ventilatie-debiet per Climate Optimizer, afhankelijk van de ventilatorstand

De luchtslangen en de luchtramen vullen elkaar aan. Om het belang van de luchtslangen voor de totale ventilatie vast te stellen, is hun verhouding geanalyseerd. Figuur 27 geeft dit weer.



Figuur 27 Cumulatieve verdeling van het aandeel van de luchtslangen in de totale ventilatie, voor alle situaties dat via de luchtslangen wordt geventileerd

Over de hele meetperiode bezien (getrokken lijn), blijkt de gemiddelde bijdrage van de luchtslangen aan de totale ventilatie 17% te zijn. Slechts in 20% van de situaties bepalen de luchtslangen voor meer dan de helft de ventilatie.

De luchtslangen zijn vooral bedoeld om te ventileren voor vochtbeheersing. Daarom is tevens bekeken hoe het aandeel van de luchtslangen is in de meest vochtige maand (oktober, zie onderbroken lijn). De gemiddelde bijdrage van de luchtslangen aan de totale ventilatie is dan circa 40%.

De luchtramen blijven dus de dominante ventilatievoorziening.

6.2 Luchtbeweging bij planten

De gemeten momentane luchtbeweging tussen het gewas vertoont veel variatie. Om vast te stellen of er bepaalde trends zijn te herkennen, zijn etmaalgemiddelden per maand bepaald. Figuur 28 toont het etmaalverloop in april. Figuur 29 toont dit voor augustus.

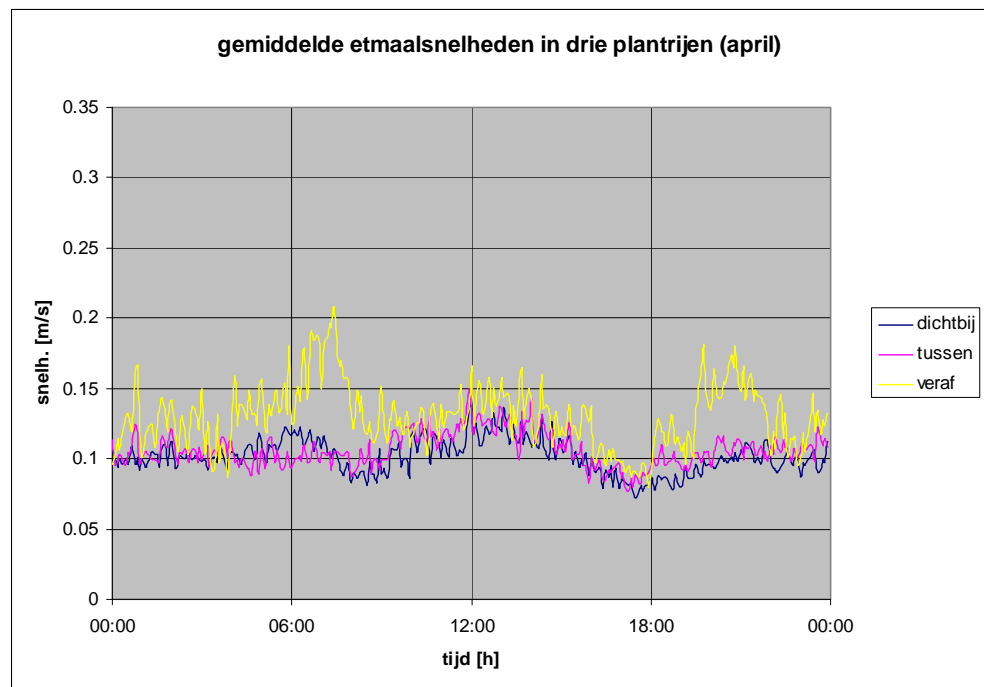
In de figuren zijn luchtsnelheden weergegeven voor drie afstanden vanaf de luchtslangen. In de verst van de luchtslang gelegen doorsnede blijken de luchtsnelheden relatief iets hoger te zijn dan in beide andere doorsneden. Dit valt te rijmen met de stromingsbeelden in figuur 6 en figuur 7.

Uit de figuren blijkt dat in de zomer overdag meer luchtbeweging tussen het gewas optreedt. Dit lijkt logisch, omdat er dan meer wordt gelucht met de kasramen. Om dit na te gaan, zijn nadere analyses verricht om het verband na te gaan tussen de gemeten snelheden en de raamstand (Figuur 30). Er werd echter geen duidelijk verband gevonden.

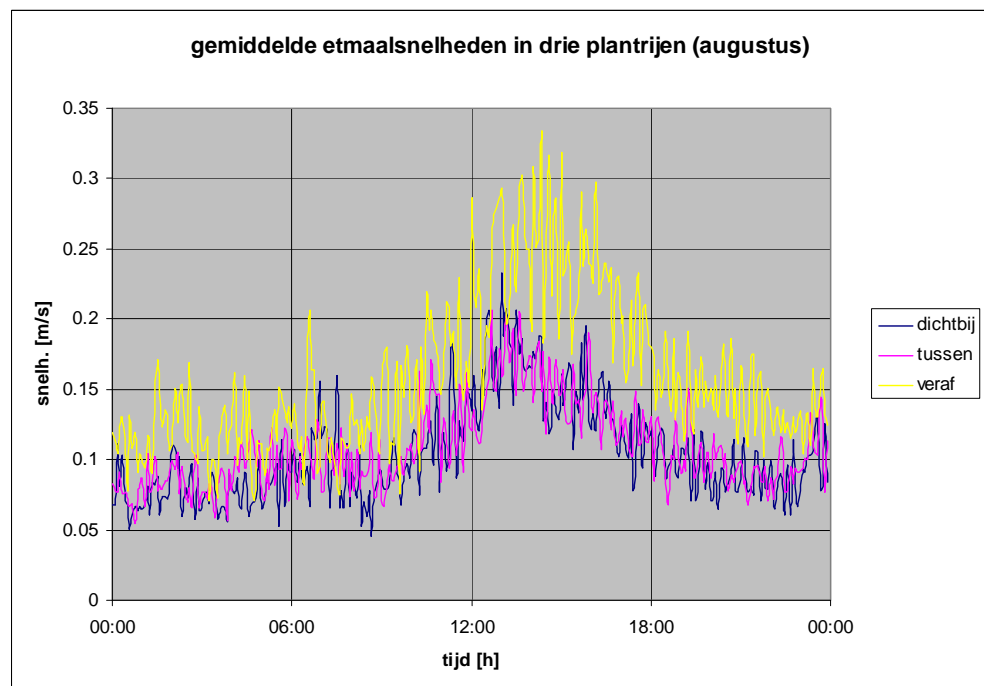
Er lijkt eerder sprake van het tegendeel. Juist bij geringe raamstanden lijken de luchtsnelheden hoger. Omdat in die situaties vooral de luchtslangen worden ingezet, is nagegaan of hiermee een verband wordt gevonden. Figuur 31 toont dit. Er lijkt wel sprake van enige snelheidstoename met de ventilatorstand, maar het is opvallend dat juist ook bij lage ventilatorstanden hogere snelheden worden gevonden.

Omdat de ramen en luchtslangen samen de ventilatie bepalen, is tevens nagegaan of de luchtsnelheden een verband vertonen met de totale ventilatiestroom (Figuur 32). Er blijkt geen aantoonbaar verband te worden gevonden.

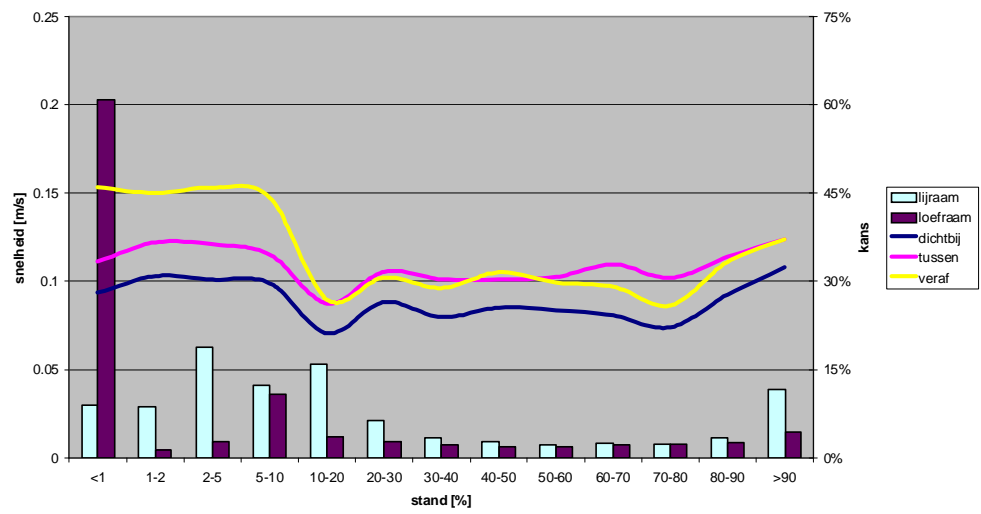
Tenslotte is onderzocht of er een samenhang kon worden gevonden tussen de gemeten luchtsnelheden en andere grootheden, zoals de zinstraling of de buistemperatuur. Ook voor deze grootheden werd geen duidelijk verband gevonden.



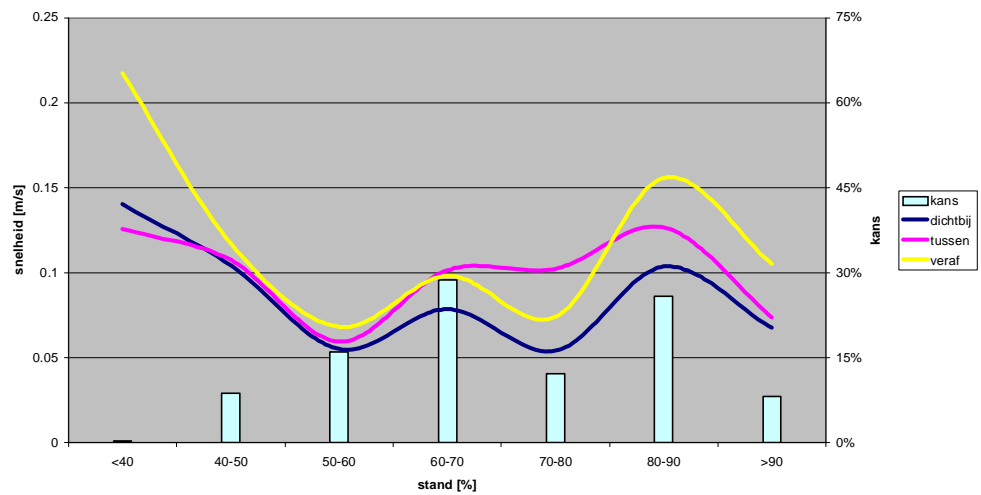
Figuur 28 Snelheden tussen het gewas op verschillende afstanden van de luchtslang in april



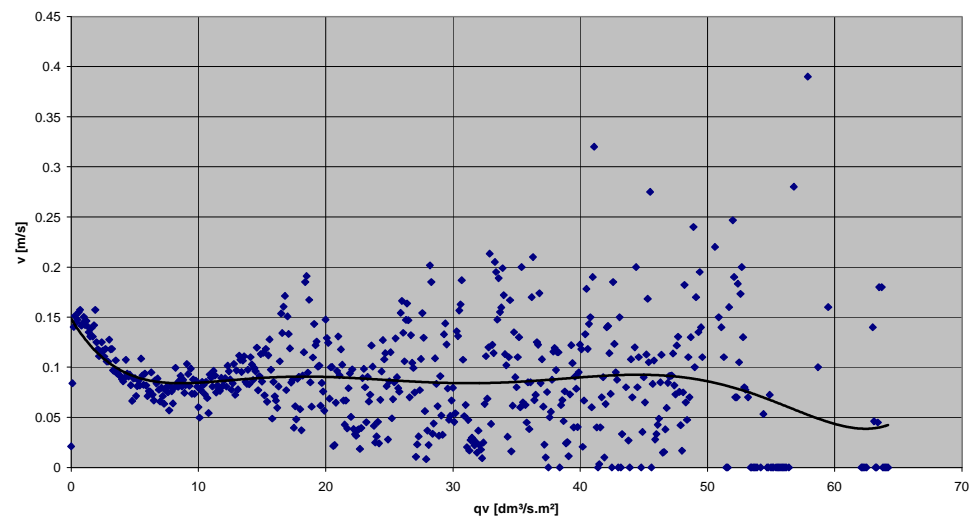
Figuur 29 Snelheden tussen het gewas op verschillende afstanden van de luchtslang in augustus



Figuur 30 Gemiddelde snelheden tussen het gewas op drie afstanden van de luchtslang (zie lijnen), als functie van de raamstanden (loef en lij). Tevens is aangegeven hoe vaak die standen voorkomen (staven).



Figuur 31 Gemiddelde snelheden tussen het gewas op drie afstanden van de luchtslang (zie lijnen), als functie van de ventilatorstand. Tevens is aangegeven hoe vaak een stand voorkomt (staven).

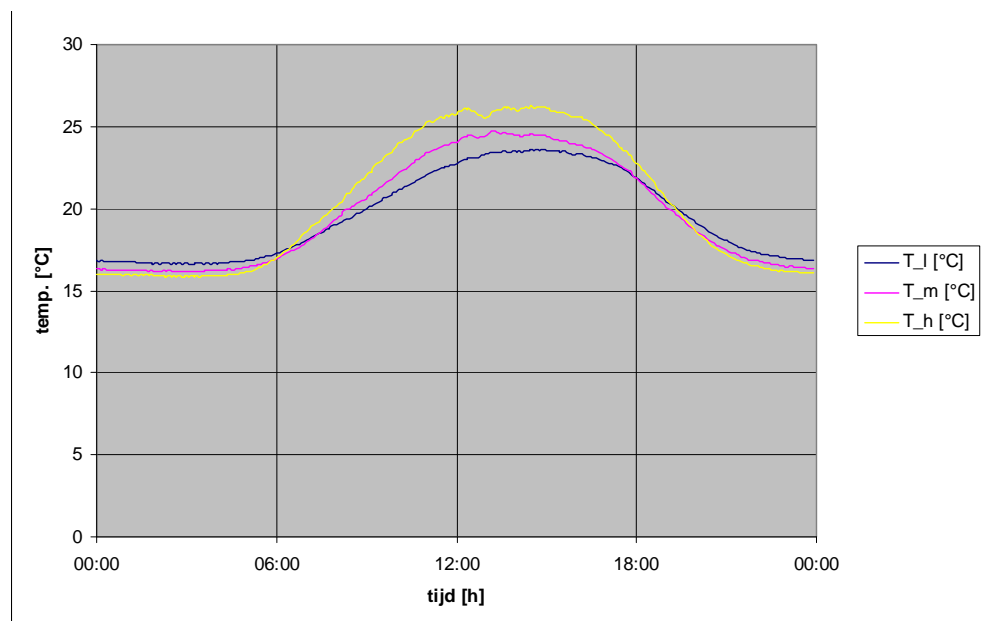


Figuur 32 Luchtsnelheid tussen het gewas als functie van de ventilatiestroom

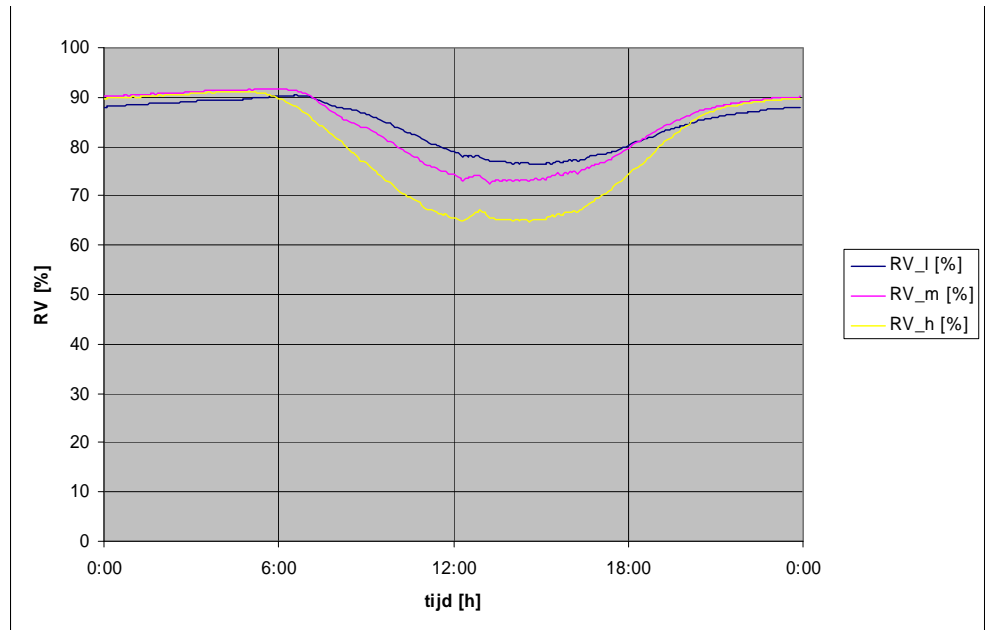
6.3 Ongelijkmatigheden in klimaat

6.3.1 Variaties

De meetgegevens (hoofdstuk 4.2.2) laten zien dat aanzienlijke klimaatvariaties optreden in de tijd en per meetpositie. Deels hangt dit samen met de gewenste etmaalcyclus. Daarom zijn de optredende variaties ten opzichte van de gemiddelde etmaalpatronen over de gehele meetperiode bepaald. Figuur 33 toont het jaargemiddelde etmaalpatroon voor de temperatuur. Figuur 34 toont dit voor de relatieve luchtvochtigheid.

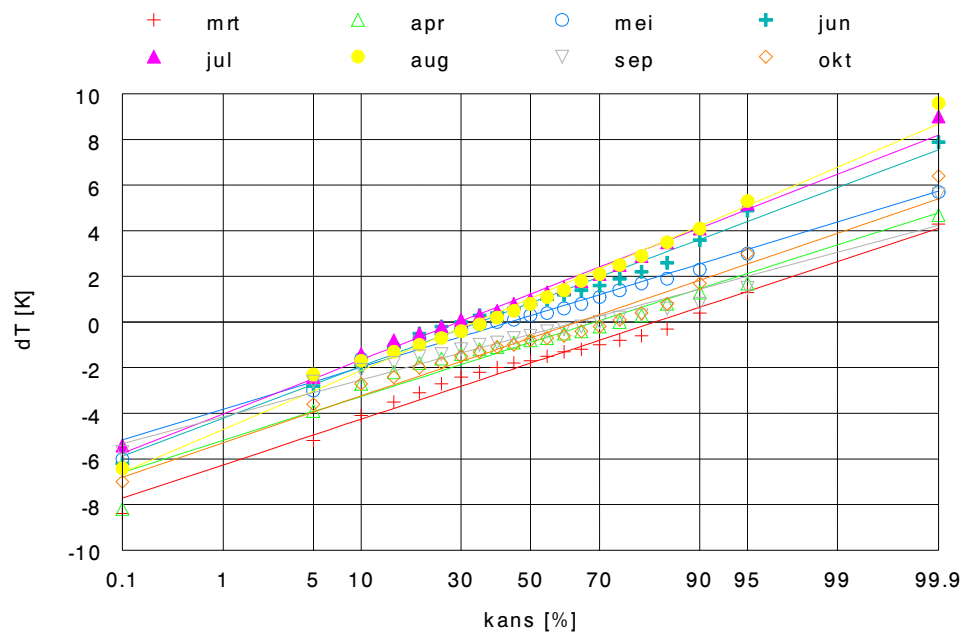


Figuur 33 Jaargemiddeld etmaalpatroon van de temperatuur op drie meethoogten

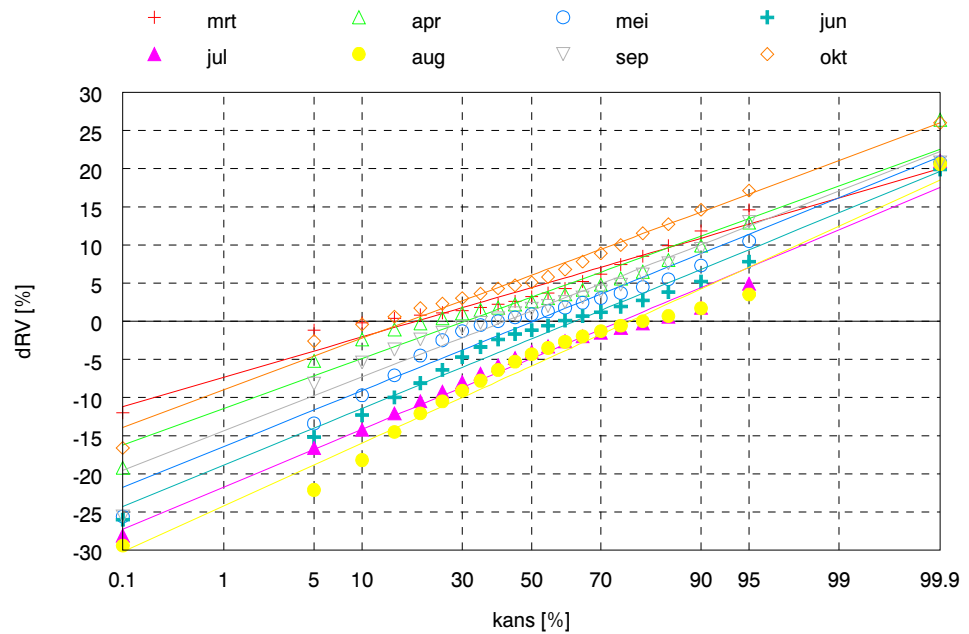


Figuur 34 Jaargemiddeld etmaalpatroon van de relatieve luchtvochtigheid op drie meethoogten

Figuur 35 toont de kans en grootte van temperatuurafwijkingen ten opzichte van het etmaalgemiddelde. Figuur 36 toont dit voor de afwijkingen in relatieve luchtvochtigheid.



Figuur 35 Cumulatieve verdeling van de afwijkingen in luchttemperatuur in verschillende maanden, ten opzichte van het jaargemiddelde



Figuur 36 Cumulatieve verdeling van de afwijkingen in relatieve luchtvochtigheid in verschillende maanden, ten opzichte van het jaargemiddelde

Uit de cumulatieve verdelingen blijkt dat in het najaar de relatieve vochtigheid circa 5% hoger is dan het jaargemiddelde en 10% hoger dan in de zomer. Het voorjaar is daarna het natst met circa 3% verhoging boven het jaargemiddelde.

De onderlinge verschillen van dag tot dag zijn echter nog groter. In het voor- en najaar beslaat 90% van de waarnemingen een bandbreedte van 20% RV, terwijl dit in de zomer oploopt naar 30% RV.

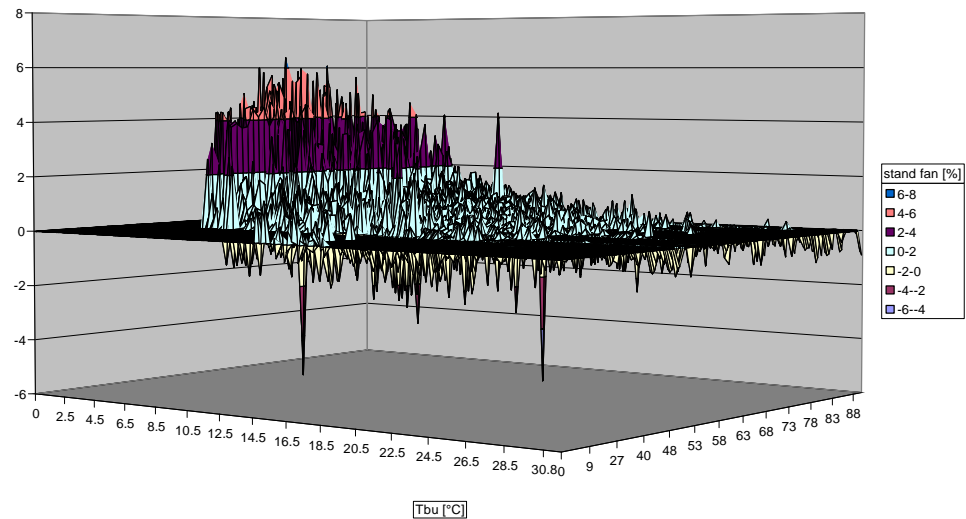
Er is nader onderzocht of de variaties een systematisch verband vertonen met belangrijke variabelen.

6.3.2 Verband met de kaplengte

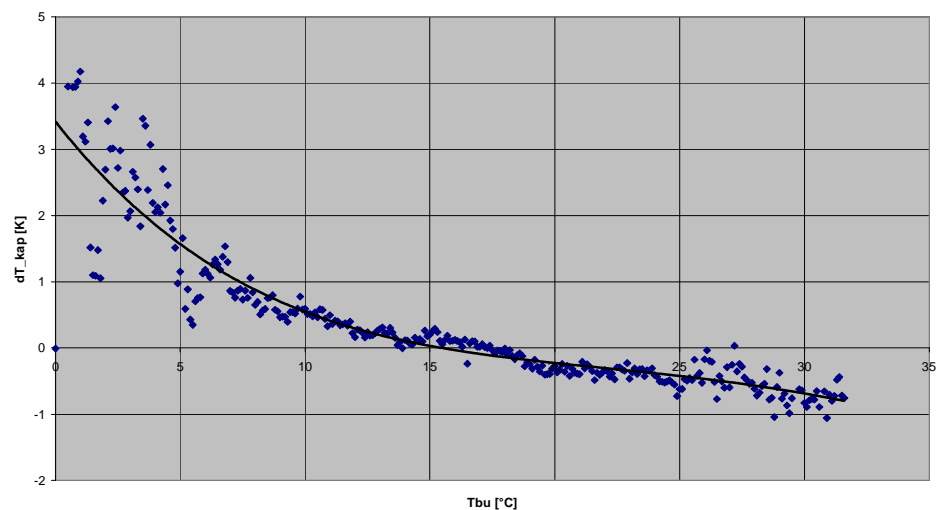
Figuur 9 had al laten zien dat bij koudere buitencondities over de kaplengte een temperatuurverloop optrad. Dit is nader onderzocht. Het temperatuurverschil tussen voor en achterin de kap is gerelateerd aan de buitentemperatuur en aan de ventilatorstand. Figuur 37 toont dit.

Het blijkt dat de buitentemperatuur een duidelijk effect heeft op het temperatuurverloop over de kaplengte. Een hogere ventilatorstand blijkt dit effect niet merkbaar te verkleinen. Anders gezegd, een nivellerend effect door extra mengen met de luchtslangen komt niet tot uitdrukking.

Bij koud weer is het achterin de kap (gevelzijde) beduidend kouder dan voorin (nabij het middenpad). Figuur 38 laat zien dat het rond het vriespunt gemiddeld al om een verloop van bijna 4 K gaat. Als de temperaturen buiten en in de kas vrijwel gelijk zijn, is er geen temperatuurverloop tussen voor en achter. Bij warm weer is het effect andersom.

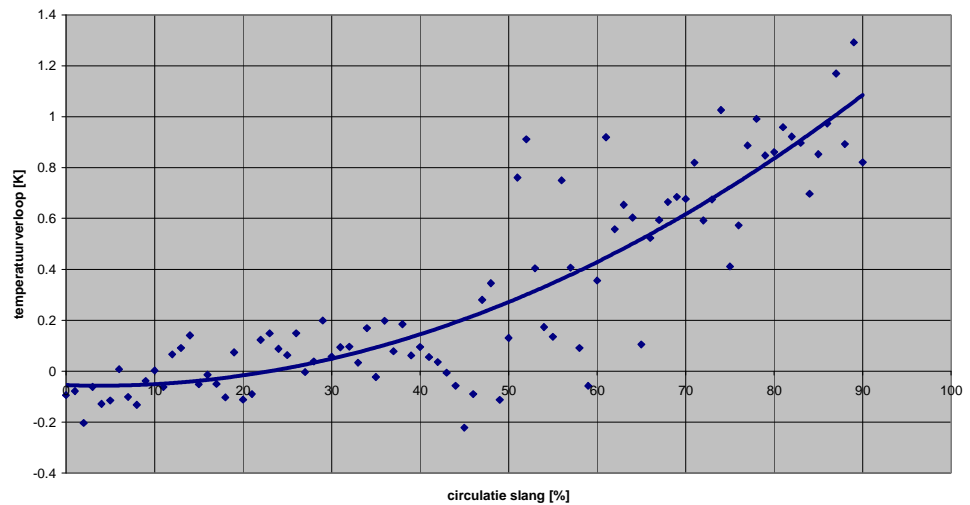


Figuur 37 Temperatuurverschil (verticale as [K]) over de kaplengte als functie van buitentemperatuur (linkeras [°C]) en ventilatorstand (rechteras [%])



Figuur 38 Gemiddeld temperatuurverschil over de kaplengte als functie van de buitentemperatuur

Als er via de slangen lucht wordt gecirculeerd, wordt de totale verplaatste volumestroom uit de kas naar de aanzuigopening nabij de gevel getrokken. Des te dichter bij de aanzuigopening, des te hoger de aanstroomsnelheid wordt. Uit een eenvoudig sommetje blijkt dat het om maximaal 0,04 m/s in lengterichting gaat bij maximale circulatie. Hoewel volgens hoofdstuk 6.1 via de slangen gelijkmatig wordt toegevoerd over de kaplengte, ontstaat dan dus toch een ongelijkmatig stromingsbeeld over de kaplengte. Als er via de luchtslangen wordt geventileerd treedt dit effect niet op. De lucht gaat dan niet in maar buiten de kas naar de gevelzone toe stromen. Figuur 39 laat zien dat inderdaad een relatie kan worden aangetoond tussen de temperatuurval over de kaplengte en de grootte van de circulatie.



Figuur 39 Temperatuurverloop over de kaplengte als functie van de grootte van de circulatie

De circulatiestand wordt vooral bij lage buitentemperaturen gebruikt. Er wordt dan tevens verwarmd via de slangen. Warme lucht wordt door de hele kas ingeblazen en afgekoelde lucht wordt naar de gevelzone getrokken. Dit verklaart waarom de temperatuurval over de kaplengte wordt bevorderd door de circulatie. Het gaat echter wel om een duidelijk kleiner effect dan van de buitentemperatuur (Figuur 38). Het temperatuurverloop over de kaplengte is dus maar deels te verklaren door het gebruik van circulatie. Circulatie verklaart vooral waarom het verloop sterker wordt bij lagere buitentemperaturen.

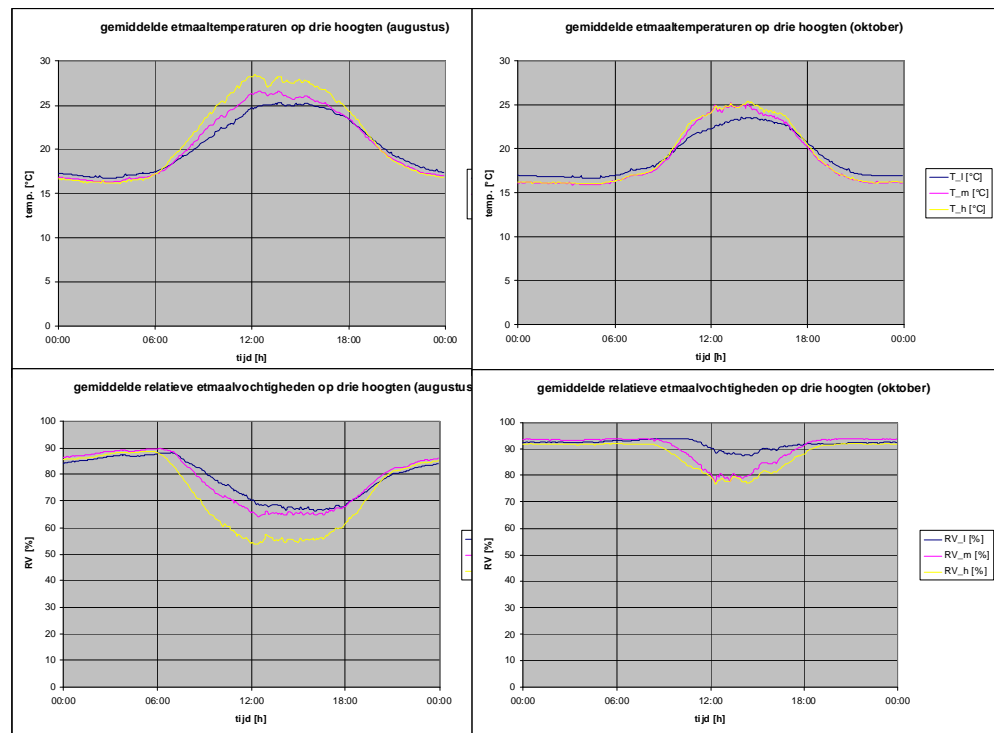
Een thermische wervel wordt als belangrijkste oorzaak voor het temperatuurverloop gezien. Omdat de goten op afschot moeten liggen, is de kas bij het middenpad hoger dan bij de kopgevels. Lucht die langs het dek afkoelt, stroomt naar het laagste punt aan de gevel. Op het hoogste punt boven het middenpad verzamelt zich de lucht die door de verwarming is opgewarmd. Daar begint het weer af te koelen aan het dek. Deze cyclus zorgt voor een gestage, maar moeilijk te remmen luchtbeveging, die de koude concentreert in de zone nabij de gevel. Het sluiten van het scherm zorgt voor een koudere luchtlaag bovenin en zal dit effect eerder versterken dan afremmen, omdat de koude lucht kan blijven infiltreren via de lekken in het scherm.

Een beperkte gevelverwarming kan nog een bijkomend effect vormen. Dit wordt echter niet als hoofdverantwoordelijke gezien. Niet alleen omdat er een redelijk aantal buizen aan de gevel ligt, maar vooral omdat het effect ook in de zomer in omgekeerde zin optreedt, als de verwarming geen rol speelt.

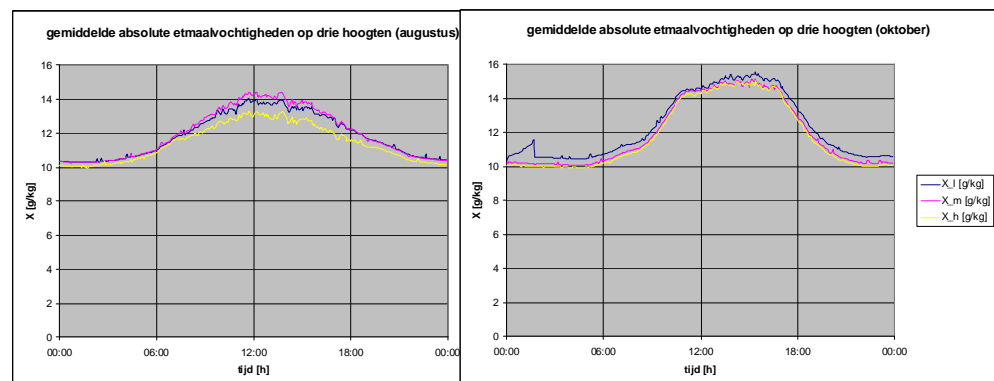
6.3.3 Verband met de hoogte

In verscheidene figuren is al tot uitdrukking gekomen dat er verschillen zijn tussen hoge en lage meetposities. Figuur 33 toont het gemiddelde effect voor de temperaturen. Figuur 34 toont dit voor vocht.

Overdag met zon zijn de verschillen over de hoogte het grootst. In de nacht zijn de verschillen klein. Figuur 40 illustreert dit voor typische condities in zomer en najaar. De belangrijkste oorzaak lijkt de zonnearmte, die vooral op de bovenste bladeren valt. Door de verhoogde temperaturen bovenin, nemen de RV's daar af.



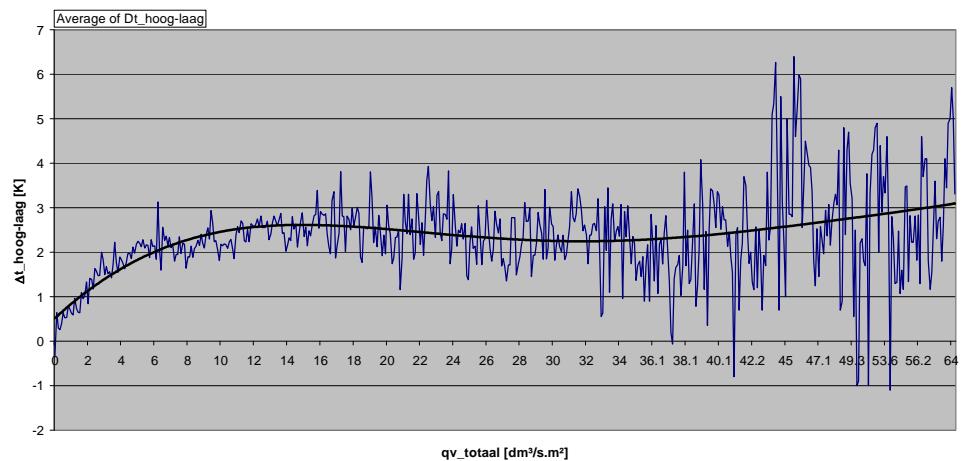
Figuur 40 Maandgemiddelde etmaalverlopen van temperatuur (boven) en relatief vocht (onder) voor augustus (links) en oktober (rechts)



Figuur 41 Maandgemiddelde etmaalverlopen van absoluut vocht voor augustus (links) en oktober (rechts)

Figuur 41 laat zien dat de combinatie van hogere temperatuur en lagere RV bovenin gemiddeld niet tot grote verschillen in absolute luchtvochtigheid over de hoogte leidt. Dit is opmerkelijk, omdat er wel grote momentane verschillen kunnen optreden. Figuur 15 liet dit eerder zien met een absolute luchtvochtigheid die onderin en tussen het gewas wel 8 g/kg hoger lag dan bovenin.

Een interessante vraag is of meer ventilatie voor een betere doormenging en dus voor een verkleining van de temperatuurverschillen zorgt. Figuur 42 laat zien dat dit niet kan worden aangetoond. Dat geldt overigens niet alleen voor het verband tussen het verticale temperatuurverschil en de totale ventilatie, maar ook voor het verband met de (beduidend kleinere) ventilatie via de luchtslangen (niet getoond). Bij de interpretatie van de figuur dient men overigens te bedenken dat zonder ventilatie waarschijnlijk beduidend grotere temperatuurverschillen zouden optreden in de zonnige situaties, de omstandigheden dat nu veel wordt geventileerd.

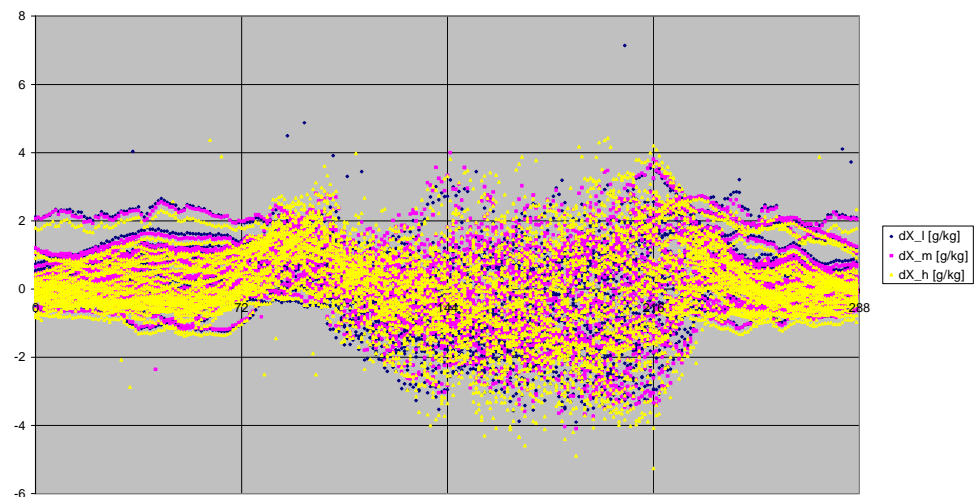


Figuur 42 Temperatuurverschil over de hoogte (overdag) als functie van de totale ventilatie

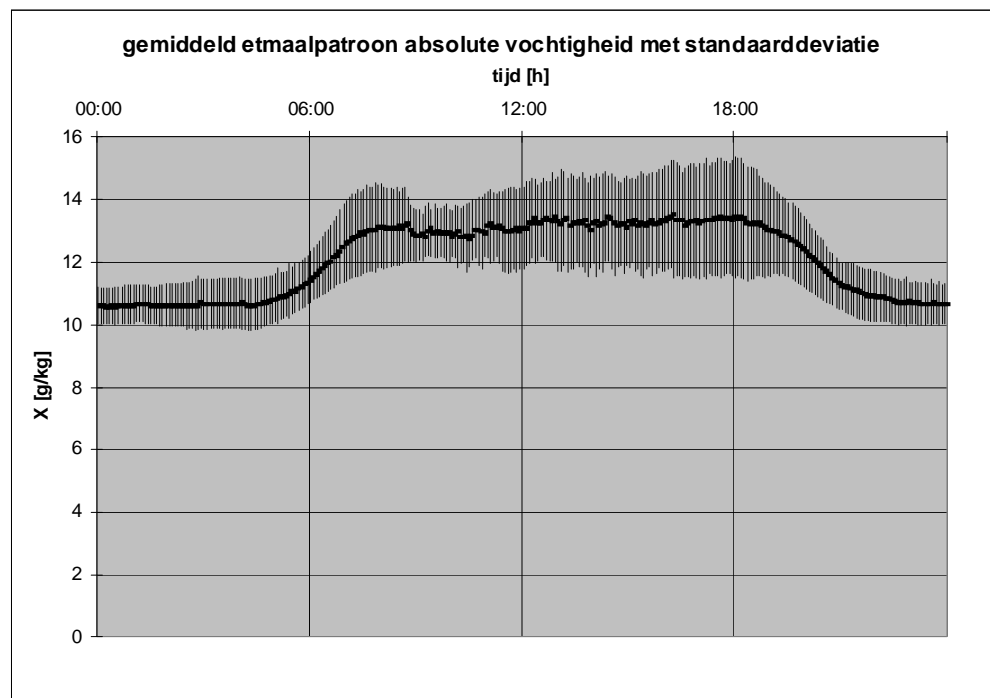
6.3.4 *Dagelijkse variatie*

Figuur 43 toont op de verschillende tijdstippen van het etmaal voor de drie meethoogten de dagelijkse afwijkingen van de absolute vochtigheid in de maand mei ten opzichte van het maandgemiddelde. Figuur 44 laat dit maandgemiddelde etmaalpatroon met standaarddeviaties zien.

Het valt op dat de dynamiek overdag groter is dan in de nacht. Tevens is opmerkelijk dat verschillen tussen de meethoogten ondergeschikt zijn ten opzichte van de verschillen tussen de dagen.



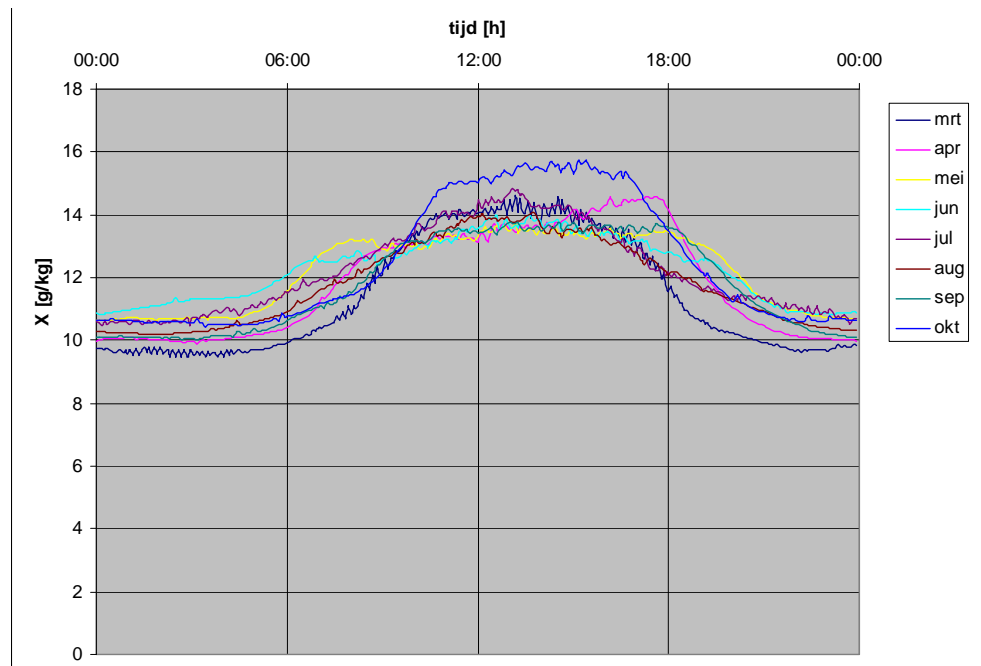
Figuur 43 Afwijkingen ten opzichte van het gemiddelde dagpatroon van de absolute vochtigheid op de drie meethoogten in mei (horizontaal = tijdstip van de dag [h]; verticaal = absoluut vochtverschil [g/kg])



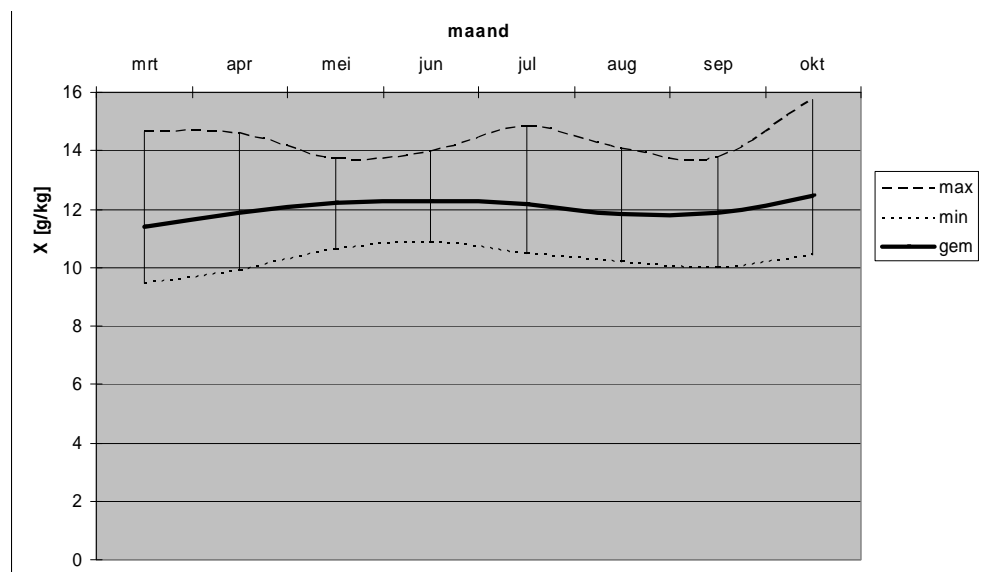
Figuur 44 Gemiddeld etmaalpatroon met standaarddeviatie van absoluut vocht in mei

6.4 Seizoenverloop

Figuur 45 laat het maandgemiddelde etmaalpatroon van de absolute vochtigheid zien voor alle meetmaanden. Alleen de najaarsmaand oktober lijkt zich nog enigszins te onderscheiden. Waar de RV door het seizoen duidelijke verschillen vertoont (Figuur 47), komt dit in de absolute vochtigheden beduidend minder tot uitdrukking.

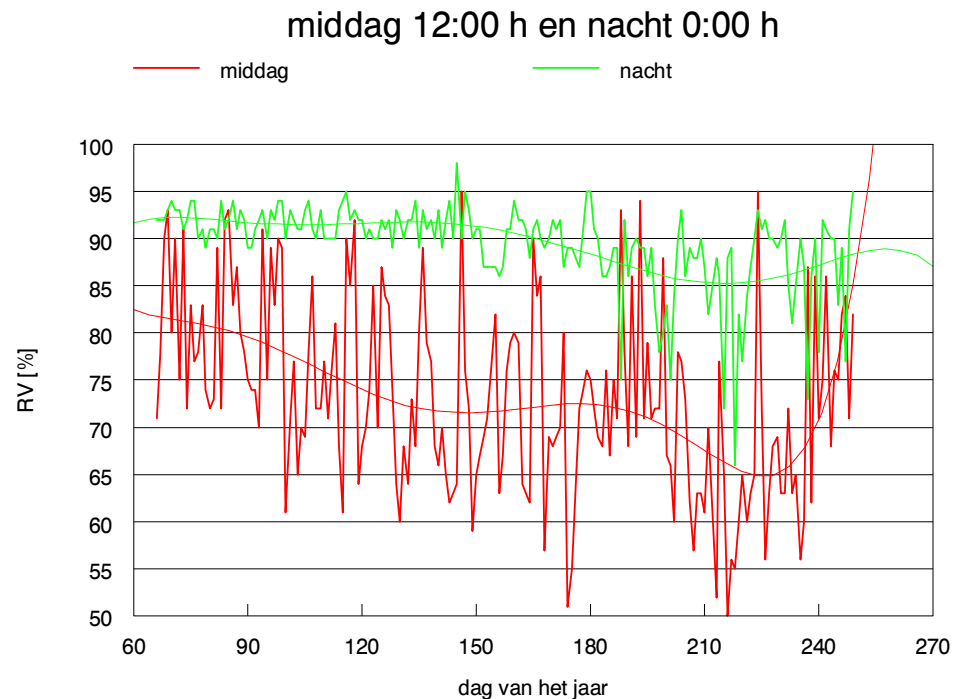


Figuur 45 Vergelijking van de maandgemiddelde etmaalverlopen van de absolute vochtigheid



Figuur 46 Verloop en variatie van de maandgemiddelde absolute vochtigheid

Figuur 46 laat zien dat de maandgemiddelde absolute vochtigheid gedurende het seizoen niet veel varieert. Dat is opmerkelijk, omdat op grond van de buitencondities (zowel absoluut vocht als zonneshijn) sterkere verschillen aannemelijk zouden zijn. Dit afvlakken van de absolute vochtigheid door het seizoen is deels te verklaren door het anticiperen met de ventilatie. Daarnaast wordt de eigen vochtregulatie door de planten (verdamping) een belangrijke rol toegedicht.



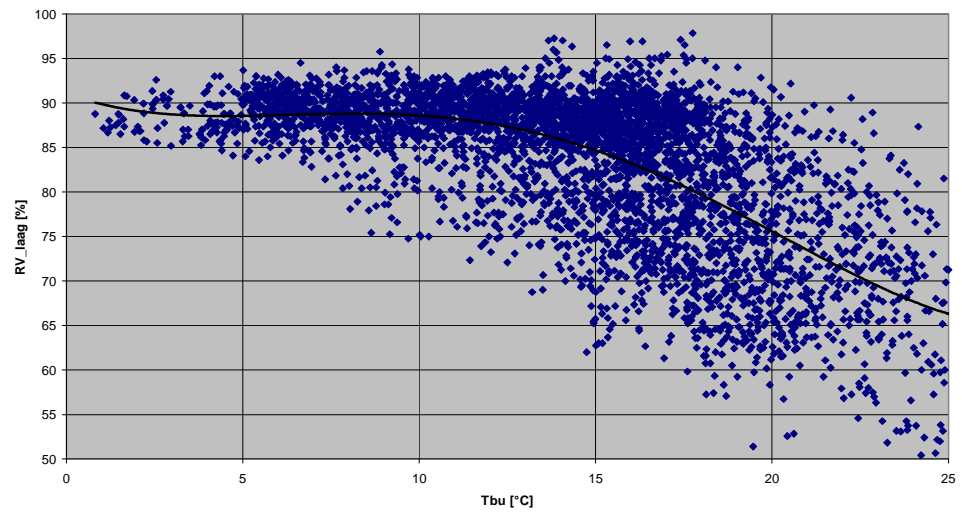
Figuur 47 Dynamiek van de relatieve vochtigheid rond het middaguur en middernacht

Figuur 47 laat zien dat de relatieve vochtigheid door het jaar beduidend meer variatie vertoont dan de absolute vochtigheid. Vooral overdag kunnen grote verschillen optreden tussen de ene en de andere dag. De verschillen zullen samenhangen met de wisselende buitencondities.

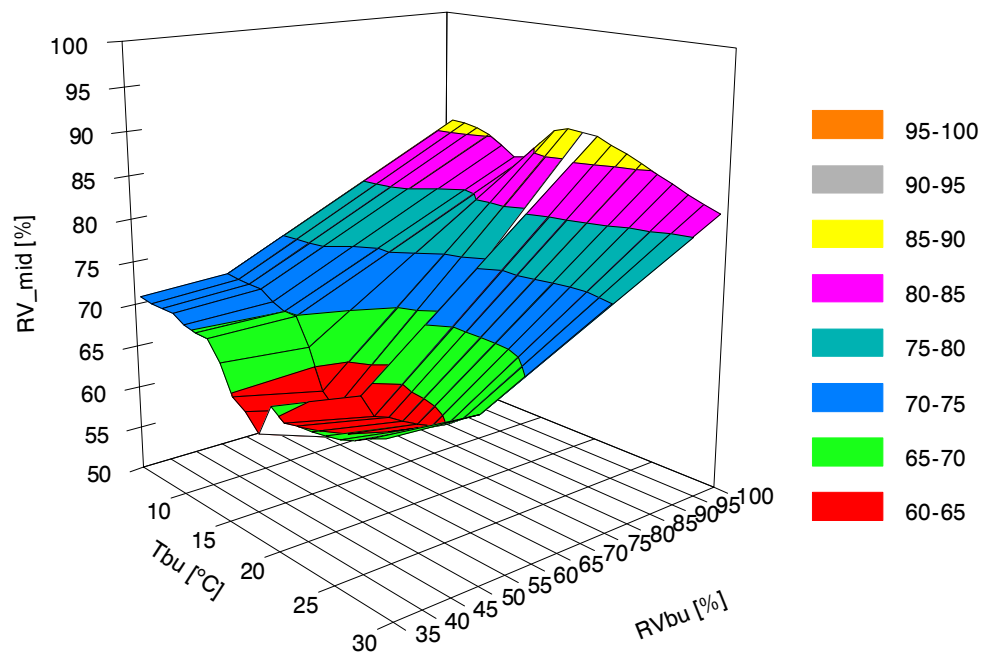
6.5 Vocht en buitencondities

Omdat de absolute vochtigheid door het jaar geen grote variaties vertoont, lijkt de invloed van de buitentemperatuur minder groot dan op voorhand zou worden verwacht. Figuur 48 illustreert dit. Pas bij buitentemperaturen boven circa 15°C is een duidelijke afname te zien van de relatieve vochtigheid onderin het gewas.

De spreiding in relatieve vochtigheid bij eenzelfde buitentemperatuur is groot. Figuur 49 laat zien dat dit sterk samenhangt met de vochtigheid buiten. Op vochtige dagen loopt de vochtigheid in de kas het meest op.



Figuur 48 Relatieve luchtvochtigheid onderin het gewas als functie van buitentemperatuur



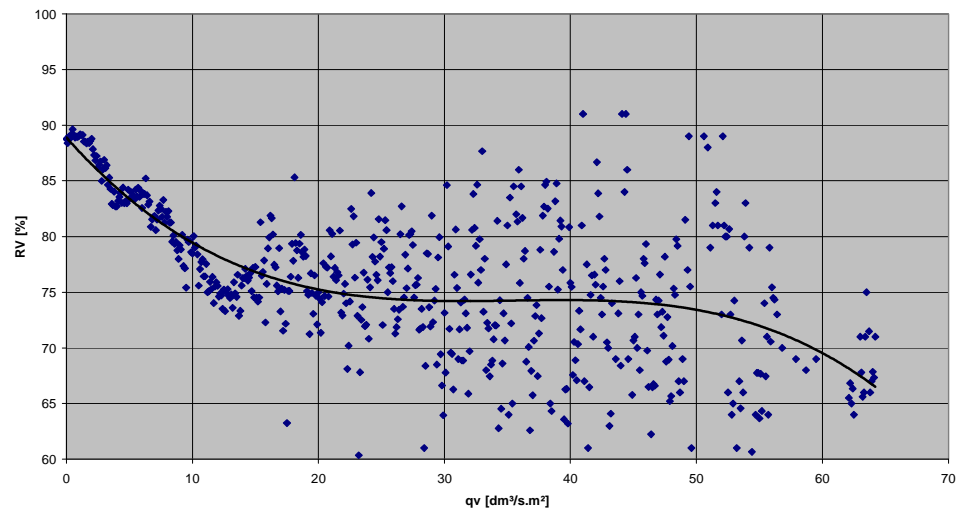
Figuur 49 Relatie tussen de relatieve vochtigheid halverwege de planten (verticale as) en de buitentemperatuur (linkeras) en relatieve vochtigheid buiten (rechteras)

6.6 Vochtreductie door ventilatie

Ventilatie heeft een belangrijke functie in het beheersen van de vochtigheid. Daarom is het effect van ventilatie op de vochtigheid nader beschouwd.

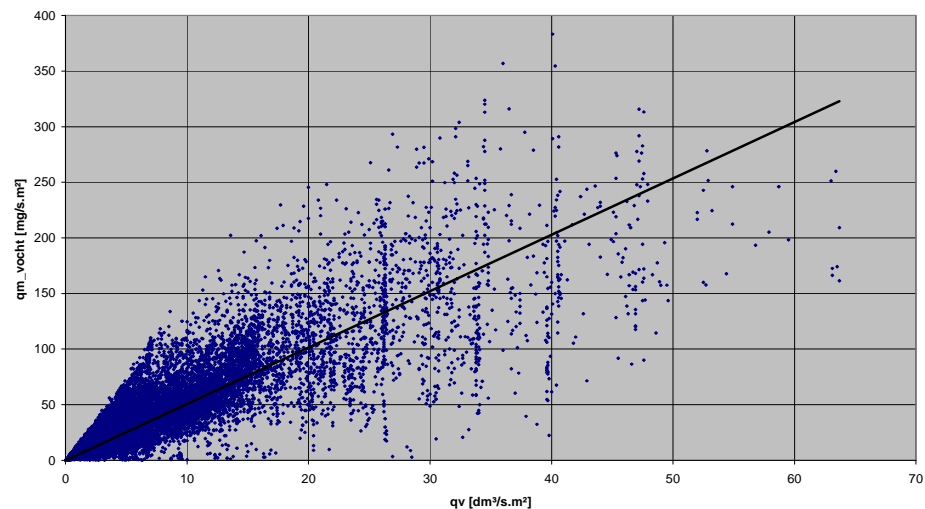
Figuur 50 toont de gemiddelde relatieve vochtigheid die onderin het gewas optreedt als functie van de totale ventilatie. Vooral bij beperkte ventilatiestromen is duidelijk te zien dat een verhoging van de ventilatie tot een lagere relatieve vochtigheid leidt. Bij grote

ventilatiestromen is dit verband er niet. Dit zijn normaliter de condities waarbij wordt gelucht om overtollige zonnewarmte af te voeren.



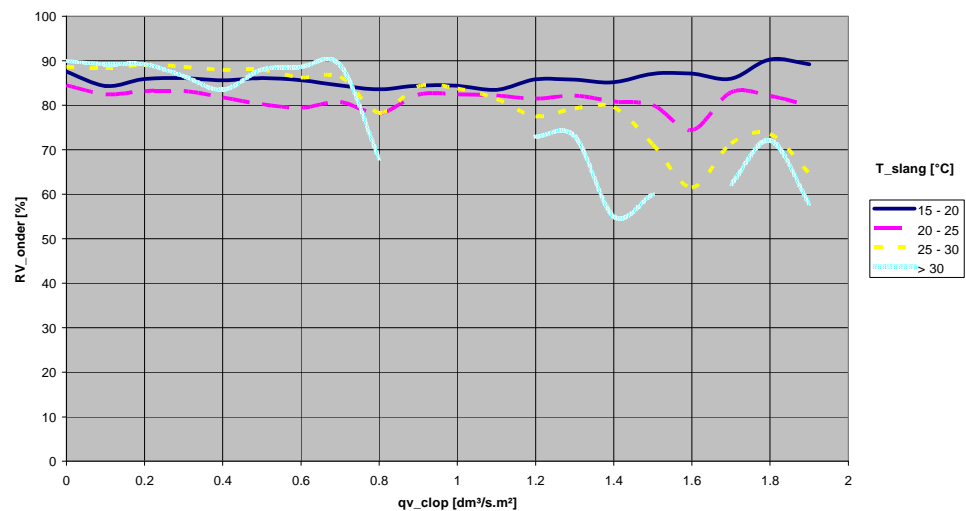
Figuur 50 Relatieve luchtvochtigheid onderin als functie van totale ventilatie

De grootte van de vochtafvoer bij eenzelfde ventilatiestroom kan aanzienlijk variëren. Figuur 51 toont dit. De variatie hangt samen met de opnamecapaciteit voor vocht van de ventilatielucht, of anders gezegd de vochtconditie en opwarming van de buitenlucht.



Figuur 51 Vochtafvoer als functie van ventilatie

Het is voor het onderzochte systeem met luchtslangen belangrijk te weten wat de bijdrage van de onderventilatie is in het beheersen van de vochtigheid. Figuur 52 geeft hiervan een beeld. Het blijkt dat ventilatie met de luchtslangen pas een merkbare verlaging van de luchtvochtigheid onderin het gewas bewerkstelligt als dit wordt gecombineerd met voldoende voorverwarming. Figuur 50 laat zien dat een ventilatie tot in de orde van grootte van $10 \text{ dm}^3/\text{s.m}^2$ duidelijk effect heeft op de vochtigheid. De capaciteit van de luchtslangen blijft hierbij duidelijk achter (zie ook Figuur 23). Dat verklaart waarom ze geen dominante invloed kunnen uitoefenen op de vochtigheid.



Figuur 52 Relatieve luchtvochtigheid onderin het gewas (verticale as) als functie van het ventilatiedebiet door de luchtslangen (horizontale as) bij verschillende voorverwarming van die lucht

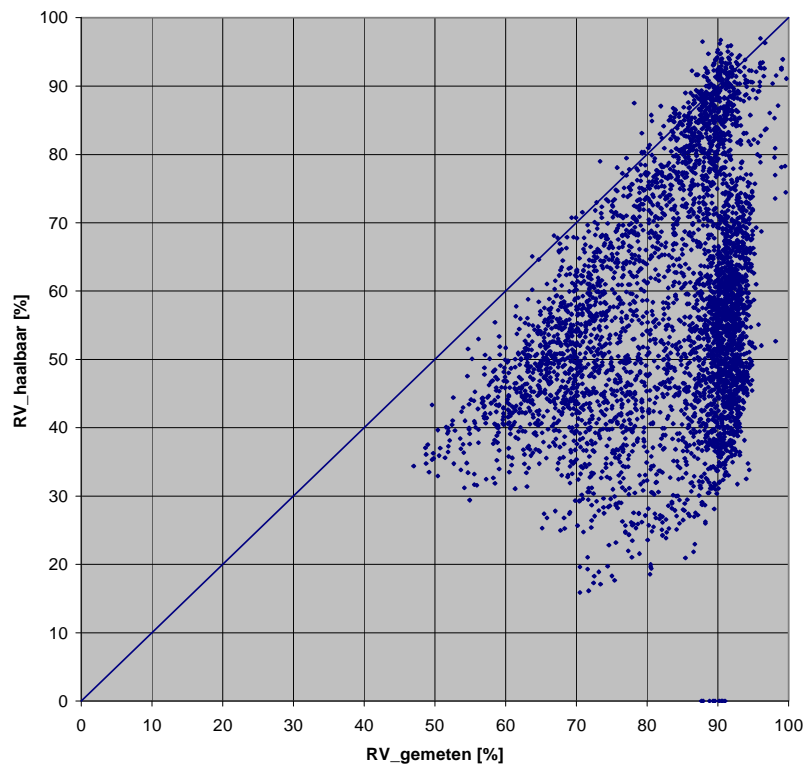
Door de kasregeling zijn een bepaalde ventilatorstand van de luchtslangen en bepaalde posities van de luchtramen ingesteld. Soms leidt dit toch nog tot (te) hoge relatieve vochtigheden in de kas. Door meer te ventileren zou dan een meer wenselijke RV kunnen zijn behaald. Er kunnen echter ook situaties zijn waarin meer ventilatie nog nauwelijks effect zou hebben. In die gevallen zou de RV alleen kunnen worden verlaagd door extra te stoken of door te ontvochten.

Het is interessant om na te gaan hoe vaak en in welke situaties ventilatie nog soelaas kan bieden en wanneer niet. Om hierin inzicht te krijgen zijn de laagst haalbare RV's bepaald, die ontstaan als onbegrensd zou worden geventileerd. De kleinst haalbare RV voor een situatie kan worden afgeleid uit de kastemperatuur en de absolute vochtigheid buiten. Deze minima zijn theoretische waarden, omdat in werkelijkheid de ventilatie wel altijd zal zijn begrensd.

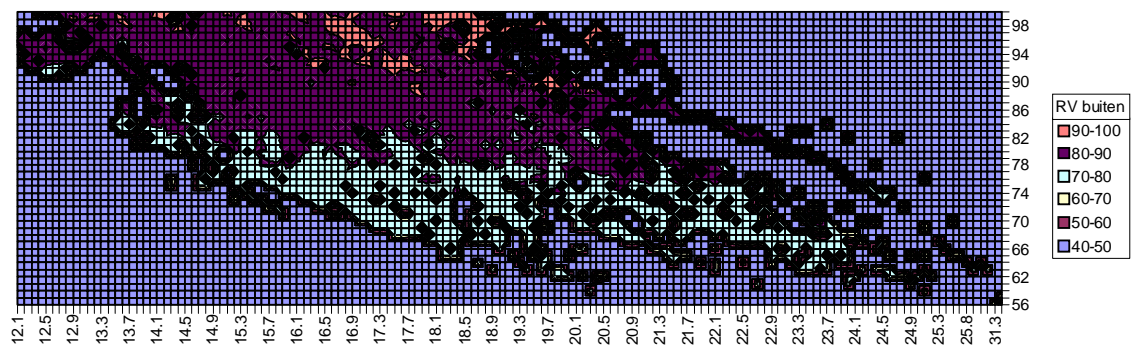
Figuur 53 toont de aldus bepaalde minimum, haalbare RV's in vergelijking met de werkelijke RV's in dezelfde situaties. Daaruit blijkt dat er situaties zijn met een RV boven 90%, terwijl die met ventilatie ruim onder 40% zou kunnen worden gebracht. In zulke situaties is verbetering van de ventilatie een logische optie.

Er zijn echter ook situaties waarin de haalbare RV hoog is en nauwelijks afwijkt van de gemeten RV. Er zijn zelfs situaties waarin de gemeten RV iets gunstiger is dan de theoretisch haalbare RV. In zo'n geval zal er sprake zijn van vochtopname door de kasbodem of van vochtreductie door condensatie aan het dek.

Het is interessant te weten bij welke omstandigheden de haalbare RV nog maar weinig afwijkt van de werkelijke RV. Figuur 54 toont daarom bij welke buitencondities de ventilatie weinig potentie heeft om de relatieve vochtigheid in de kas te verlagen. Uiteraard is dit op dagen dat het buiten ook vochtig is. Opvallend is echter dat dit vooral bij buitentemperaturen tussen 14 en 20°C optreedt met pieken tussen 17 en 19°C. In de praktijk blijkt er bij deze condities al ruim te worden gelucht, vooral ook in de nacht.



Figuur 53 Potentiële vochtreductie door ventilatie: vergelijking van de gemeten RV (horizontale as) en de door ventileren haalbare RV (verticale as)



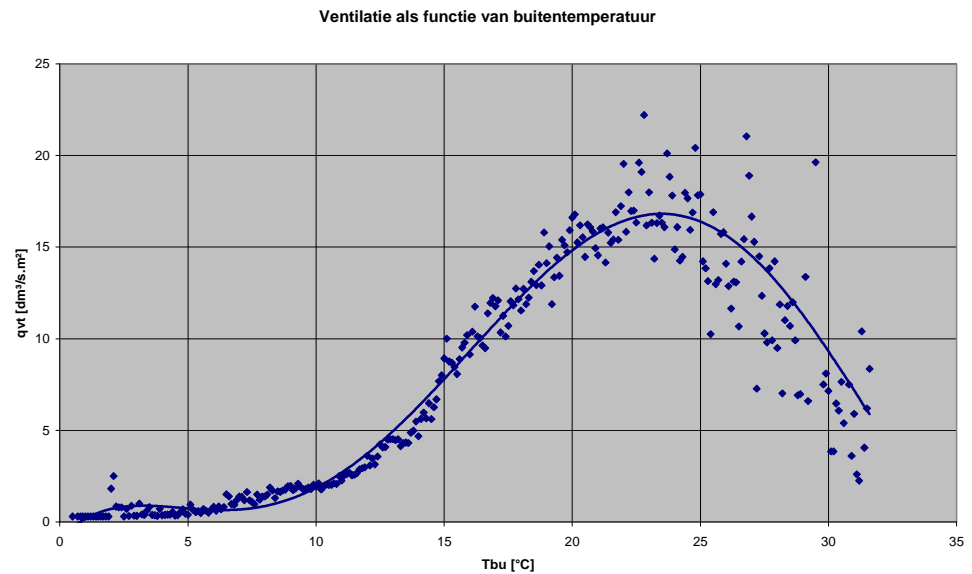
Figuur 54 De door ventilatie haalbare RV ([%] zie kleurcodes) als functie van buitencondities (temperatuur [°C] = horizontale as; RV buiten [%] = verticale as)

6.7 Ventilatie en warmteafvoer

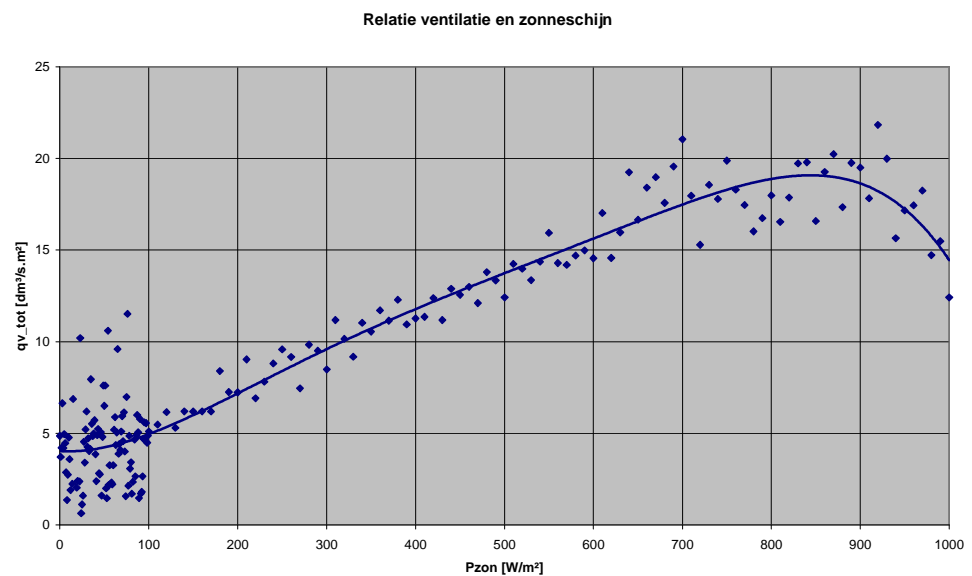
Naast het afvoeren van vocht is de tweede functie van de ventilatie het afvoeren van overtollige warmte. Het is te verwachten dat dit speelt bij hogere buitentemperaturen en veel zon. Figuur 55 toont de relatie met de buitentemperatuur. Figuur 56 toont de relatie met de zinstraling.

Tot 10°C buitentemperatuur blijkt de ventilatie gestaag toe te nemen, om daarna versneld toe te nemen. Het is opvallend dat bij buitentemperaturen rond 23°C maximaal

wordt geventileerd en dat bij echt hoge buitentemperaturen de ventilatie minder wordt. Dat zal te maken hebben met de mogelijkheid topkoeling toe te passen met de warmtepomp vanuit de bodembuffer via het 'verwarmingsnet'. De ventilatie blijkt vrijwel proportioneel toe te nemen met de zinstraling. Bij hoge zonbelastingen vlakkt dit af.



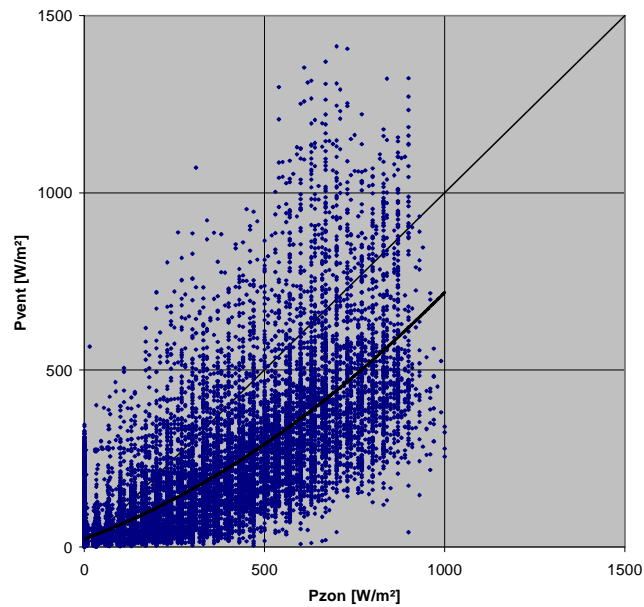
Figuur 55 Ventilatie als functie van buitentemperatuur



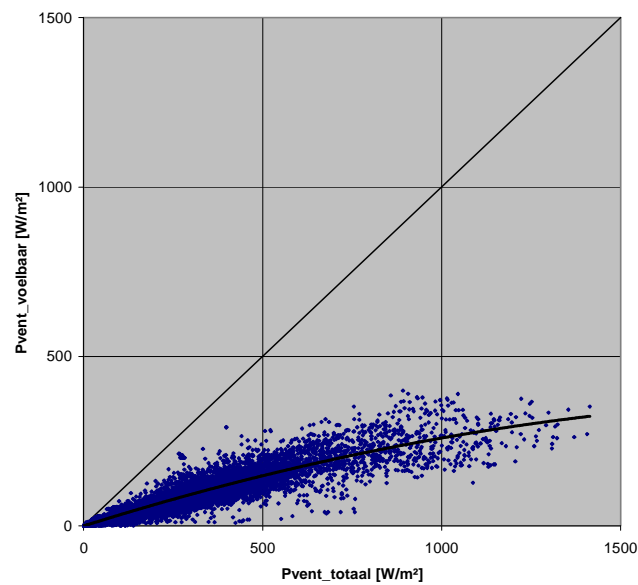
Figuur 56 Ventilatie als functie van zonstraling

Figuur 57 laat zien dat de warmteafvoer met ventilatie een dominante post vormt. Het zorgt voor de momentane afvoer van meer dan 2/3 deel van de zonbelasting. Het overige deel zal worden afgevoerd via transmissie door het glas of tijdelijk worden opgeslagen in vooral de bodem, om later te worden afgevoerd, c.q. de warmteverliezen te dekken.

Opvallend is dat niet meer dan circa 1/3 deel van de ventilatiewarmte voelbaar is (Figuur 58). De warmte die in verdamping is gaan zitten, vormt dus een belangrijke post. Het illustreert de grote rol van de gewasverdamping in de temperatuurregulatie. Bij lagere buitentemperaturen biedt condensatie van vocht dus goede mogelijkheden om warmte terug te winnen en zo energie te besparen. Dit kan zowel door ontvochten als door toepassing van warmteterugwinning met hoog rendement.



Figuur 57 Warmteafvoer met ventilatie versus zonlast

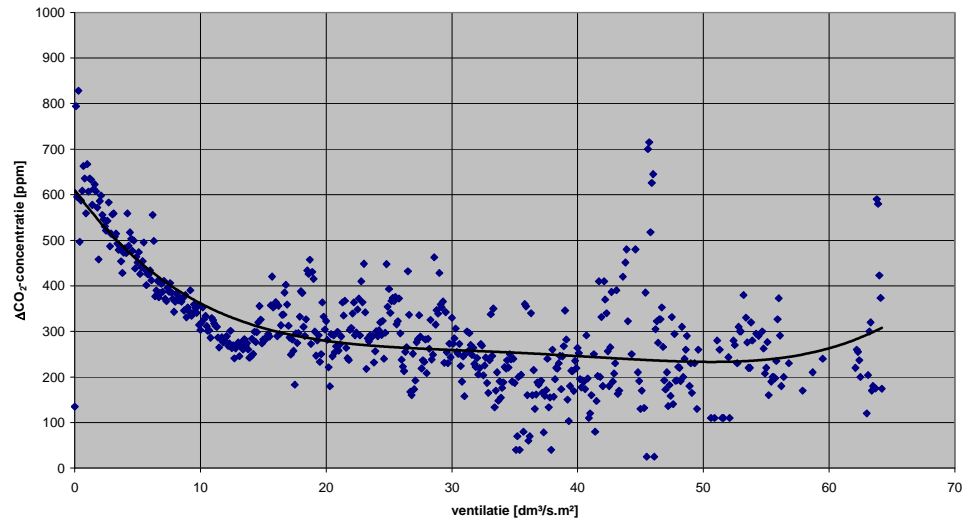


Figuur 58 Voelbare aandeel van de warmteafvoer met ventilatie

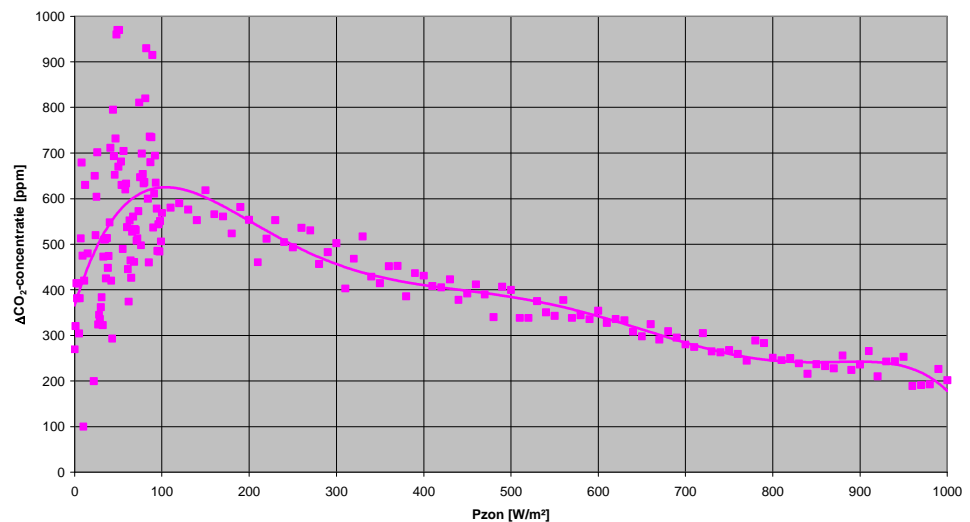
6.8 Ventilatie en CO₂

De planten zijn vooral bij zonnige condities in staat CO₂ op te nemen. Op warme, zonnige dagen moet echter extra worden geventileerd om de kasttemperatuur te beheersen. Daardoor wordt meer CO₂ afgevoerd.

Figuur 59 toont welke concentratieverhoging ten opzichte van buiten kan worden bereikt, als functie van de ventilatie. Figuur 60 toont dit als functie van de zonstraling.



Figuur 59 Verhoging van de CO₂-concentratie ten opzichte van buiten, als functie van de ventilatie



Figuur 60 Verhoging van de CO₂-concentratie ten opzichte van buiten, als functie van de zonstraling

Het CO₂-gehalte in de kaslucht blijkt aanvankelijk af te nemen bij opletende ventilatie, zoals was te verwachten. Bij een verdere toename van de ventilatie stabiliseert de CO₂-concentratie echter min of meer. Dit duidt op het aanpassen van de dosering. De CO₂-concentratie blijkt wel af te nemen met toenemende zonstraling, dus juist als meer CO₂ voor de plant is gewenst.

7 Conclusies en aanbevelingen

Met de luchtslangen is een ventilatie mogelijk tussen 0,4 en 2,0 luchtwisselingen per uur. In de praktijk dragen ze voor gemiddeld 17% bij aan de totale ventilatie. In een vochtige maand zoals oktober loopt dit op naar 40%. Gezien de nog optredende klimaatverschillen lijkt een dominantere rol wenselijk.

De luchtstroom vanuit de slangen blijkt vrij snel door het gewas te worden geremd. Alleen op hoogstand dringt de luchtstroom lokaal tot diep in het gewas door. De doorstroming van het gewas is echter ongelijkmatig. Dit wordt beïnvloed door de capaciteit en temperatuur van de inblaaslucht. Een fijnmaziger netwerk van luchtslangen wordt als mogelijkheid gezien om de verdeling te verbeteren.

Er is geen dominant effect van de luchtslangen op de stroomsnelheden tussen het gewas aangetoond. Dat geldt echter ook voor de luchtramen, die een orde hogere ventilatievouden bewerkstelligen. Alleen in de zomer is overdag bij ruim geopende luchtramen sprake van duidelijk verhoogde snelheden.

Kennelijk geven de huidige ventilatievoorzieningen niet een voldoende gerichte stroming, die dieper in het gewas door kan dringen. Dit is wel wenselijk, afgaande op de grote verschillen in vochtigheid die nog tussen het gewas zijn gevonden. In combinatie met verwarming blijkt een verhoogde capaciteit van de luchtslangen wel te zorgen voor een verlaging van de luchtvochtigheid tussen het gewas. De luchtslangen hebben dus een positief effect.

De inblaaslucht blijkt gelijkmatig over de slanglengte te worden verdeeld, maar de warmte niet. Dat geldt vooral bij lage ventilatorstanden. De rol van de slangen in de verwarming is daarom ingeperkt. De consequentie is dat het verwarmend oppervlak van de slangen niet optimaal wordt benut voor minimalisatie van het energiegebruik.

Het klimaat in de kas kent een duidelijk etmaalpatroon, met in de nacht relatieve vochtigheden rond 90%. Overdag daalt dat, vooral onder invloed van de zonstraling. Per dag kunnen aanzienlijke variaties optreden. In de zomer en bij wisselende bewolking treedt de meeste dynamiek op.

De seizoenverschillen in het etmaalpatroon zijn beperkt. De zomer is wel gemiddeld het warmst. In voor- en najaar treden de hoogste luchtvochtigheden op. Kennelijk is het verschil in vocht- en warmteaanbod van buiten grotendeels op te vangen met de regeling van ventilatie, verwarming en luchtscherm, in combinatie met het anticiperen van de gewasverdamping.

Het kasklimaat vertoont gradiënten over de hoogte, die vooral overdag optreden. Ze worden toegeschreven aan een natuurlijk thermisch effect van de zoninstraling. Bovenin het gewas is de temperatuur circa 2 K hoger en de relatieve luchtvochtigheid gemiddeld 10% lager dan onderin. De verschillen nemen toe met de zonstraling. De huidige luchtslangen en luchtramen lijken de verschillen niet aantoonbaar te verkleinen.

Ook over de kaplengte blijken verschillen in het klimaat op te treden. Ze hangen vooral samen met het temperatuurverschil tussen kas en buiten, terwijl ook circulatie via de luchtslangen het effect bevordert. Bij vriezende weer is de temperatuur in de gevelzone wel 4 K lager dan bij het middenpad. Als belangrijkste oorzaak wordt thermiek gezien, ten gevolge van het afschot van de kappen naar de gevelzijde. Ter beperking kunnen de

luchtslangen op relatief hoge temperatuur en laag debiet worden ingezet. De ongelijkmatige warmteverdeling over de slangen werkt dan in zekere mate compenserend, terwijl het negatieve effect van verhoogde circulatie beperkt blijft.

De installaties in de kas en hun regelmogelijkheden zijn globaal afdoende om de luchtvochtigheid te reguleren. Het ventilatiesysteem heeft daarin een prominente rol. Dat gebeurt nog veelal via de luchtramen, omdat een veelvoud van de capaciteit van de luchtslangen wordt gebruikt. Het is aan te bevelen na te gaan hoe de bijdrage van de luchtslangen aan de vochtregulatie kan worden vergroot.

Er blijken nog kritieke relatieve vochtigheden in de kas op te treden bij warme, vochtige buitenomstandigheden. Het betreft vooral nachten met temperaturen tussen 14 en 20°C. Bij die condities is de mogelijkheid beperkt om nog met ventilatie vocht af te voeren zonder bij te warmen. Daarom is het zinvol de mogelijkheden van ontvochten hiervoor na te gaan.

Ventilatie blijkt circa 2/3 deel van de afvoer van overtollige zonnewarmte uit de kas te verzorgen. De rol van de luchtslangen is hierin ondergeschikt.

Bij zon zijn vaak grote ventilatiestromen nodig. Daarom zijn maar beperkte CO₂-concentraties in de kas bereikt. De verhoging boven de buitenconcentratie bleek bij zonschijn van betekenis tussen 200 en 600 ppm te liggen.

Omdat de luchtslangen tijdens een deel van de teeltperiode niet volledig operationeel waren, is in het onderzoek nog geen compleet beeld verkregen. Voorts is er sprake geweest van 'kinderziekten' en zijn leerervaringen verwerkt. Daarom wordt aanbevolen het meetsysteem nog operationeel te houden bij de nieuwe teelt, zodat het beeld kan worden gecompleteerd.

8 Referenties

- [1] Feustel, H.E., J.C. Phaff et al
Fundamentals of the multizone air flow model COMIS.
Coventry (GB), AIVC TechNote 29, mei 1990.
- [2] Knoll, B. en J.C. Phaff
De Cp-Generator. Een eenvoudige methode voor bepaling van winddrukken.
Delft, TNO Bouw, publicatie in Bouwfysica vol. 7 no. 4, 1996.
<http://cpgen.bouw.tno.nl/cp/>

Auteur



Ing. B. Knoll

Afdelingshoofd

Ir. E.G.O.N. Janssen