



Luchtcirculatie, Kasklimaat en Productie

Deel rapportage maart – oktober 2004

Auteur(s) ir. A. de Gelder, PPO-Glastuinbouw
 ir. J.B. Campen, A&F
 dr. C. Stanghellini, A&F

© 2004 Wageningen, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden veeelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Praktijkonderzoek Plant & Omgeving.

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

PPO 41616052 deelrapportage 1



Projectnummer: 41616052

Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V.

Glastuinbouw

Adres : Kruisbroekweg 5, Naaldwijk
: Postbus 8, 2670 AA Naaldwijk
Tel. : 0174 – 636 700
Fax : 0317 – 636 835
E-mail : infoglastuinbouw.ppo@wur.nl
Internet : www.ppo.wur.nl

Inhoudsopgave

pagina

VOORWOORD	4
1 INLEIDING	5
2 THEORETISCHE EFFECT VAN LUCHTBEWEGING.....	7
2.1 Denkkader	7
2.1.1 Grenslaagweerstand	8
2.1.2 Fysiologische gevolgen	9
2.2 literatuur	9
2.3 Analytische bepaling van de effecten van luchtsnelheid	10
2.4 Modelberekeningen met KASPRO op overall gewasfotosynthese.....	13
3 EXPERIMENTEN IN KLIMAATKAMERS MET TOMAAT	16
3.1 Doel van de experimenten	16
3.2 Aanpak	16
3.3 Resultaten luchtbeweging en klimaat	18
3.4 Resultaten luchtbeweging op groei.....	20
3.5 Discussie	23
4 CONCLUSIE.....	25
LITERATUUR.....	26
BIJLAGE 1 EFFECT OF INCREASED WIND SPEED ON PLANT GROWTH PROCESSES.....	1
BIJLAGE 2 MEETGEGEVENS	1
BIJLAGE 3 GEREALISEERD KLIMAAT IN DE KLIMAATCELLEN.....	1
BIJLAGE 4: ENERGIEVERBRUIK T.B.V. DE LUCHTVERPLAATSING.....	4
BIJLAGE 5: CFD ANALYSE VAN SYSTEEM VOOR LUCHTBEWEGING	5
BIJLAGE 6: MODELVORMING VOOR GEWASEXPERIMENTEN	9

Voorwoord

Beweging van lucht om gewassen te stimuleren in groei is een voor de glastuinbouw vrijwel onbekend terrein van onderzoek. In dit rapport worden de resultaten van een eerste verkenning op dit terrein beschreven. Het is een boeiende materie. Graag nodig ik de lezers van dit verslag uit om hun kennis en ideeën over dit onderwerp met mij en de collega's te delen. Jouke, Cecilia en ik hebben een eerste resultaat van onze denken over deze materie in dit verslag weergegeven. Dit is een vertrekpunt vanwaar uit we met de inbreng van anderen verder kunnen komen. De praktijk zal vrij spoedig kijken hoe de resultaten van dit onderzoek praktisch toegepast kunnen worden. De verklaring van de processen die leiden tot een betere groei is het werkteerrein van onderzoek. Van beide kanten is inbreng welkom.

Ir A. de Gelder
Arie.deGelder@WUR.NL

1 Inleiding

In kassen treedt veel luchtbeweging op. De invloed van geforceerde luchtbeweging in de kas ten gevolge van verwarming en/of ventilatoren in combinatie met luchtverdeelsystemen op de ruimtelijke klimaatverdeling en de daaraan gekoppelde fysische en fysiologische processen in het gewas zijn vrijwel onbekend. Uit het onderzoek met een gesloten kas (Schoonderbeek et al. 2003) kwam naar voren dat de geforceerde luchtbeweging een belangrijke verandering in het kasklimaat rond de plant tot gevolg had. De veronderstelling is dat deze verandering heeft bijgedragen aan de, in dat onderzoek gevonden, meerproductie en de behaalde energie-efficiëntie.

Naar aanleiding van de resultaten van het gesloten kas experiment is door de LTO commissie tomaat gevraagd om nader onderzoek naar de oorzaken van de productieverhoging ten opzichte van de verhoging die op basis van simulatiemodellen werd verwacht.

In de huidige gewasgroeimodellen is een vaste waarde aangenomen voor de grenslaagweerstand. Bij teeltsystemen, waarin luchtbeweging door geforceerde ventilatie of door beweging van planten optreedt, zal deze weerstand veranderen. Door verlaging van de weerstand kan als gevolg van een hogere CO₂ uitwisseling de maximale fotosynthese toenemen. Een verlaging van de weerstand kan de transpiratie doen toenemen.

Verder heeft geforceerde luchtbeweging invloed op de ruimtelijke klimaatverdeling voor temperatuur en vochtigheid. De verschillen in absolute luchtvochtigheid worden onder normale condities gering verondersteld.

Een nadere analyse van het microklimaat, voor CO₂- en vochtuitwisseling en de ruimtelijke verdeling bij geforceerde luchtbeweging en de daaraan gekoppelde gewasreacties geeft inzicht in de onderliggende mechanismen voor productieverbetering. Het onderzoek richt zich op de korte termijn effecten van luchtcirculatie. Benutting van deze kennis bij de keuze en besturing van de klimaatinstallaties in normale en (semi-) gesloten kassen biedt uitstekende mogelijkheden om op energie-efficiënte wijze meerproductie te verkrijgen.

Doelstelling

De kennis over de microklimaatomstandigheden en luchtbewegingen in kassen is essentieel bij de verdere ontwikkeling van (semi-)gesloten kassystemen en levert daarmee een bijdrage aan de energie doelstellingen. Een energiezuinige en efficiënte luchtverdeling resulteert in een verhoging van de energie-efficiëntie.

Inzicht in de effecten van luchtbeweging op verdamping en groei kan gebruikt worden om betere regelingen voor sturing van het kasklimaat toe te passen en tevens om betere analyses te kunnen maken van de energie-efficiëntie bij nieuwe kassystemen. De luchtbeweging moet zorgen voor een homogener klimaat, minder risico's van hoge luchtvochtigheid op microschaal en een betere CO₂-uitwisseling. Deze factoren samen moeten leiden tot een productieverhoging en een besparing aan primaire energie.

Technische en teeltkundige doelstellingen

Verkrijgen van inzicht in (de mate van)

- Invloed van geforceerde luchtbeweging ter plaatse van de plant
- Invloed van luchtbewegingen op verdamping en groei
- Verdeling van de luchtvochtigheid, ruimtetemperatuur en planttemperatuur in de kas bij geforceerde luchtbeweging.

Energiedoelstellingen

Door productieverhoging ontstaat een verbetering van de energie-efficiëntie van circa 5%.

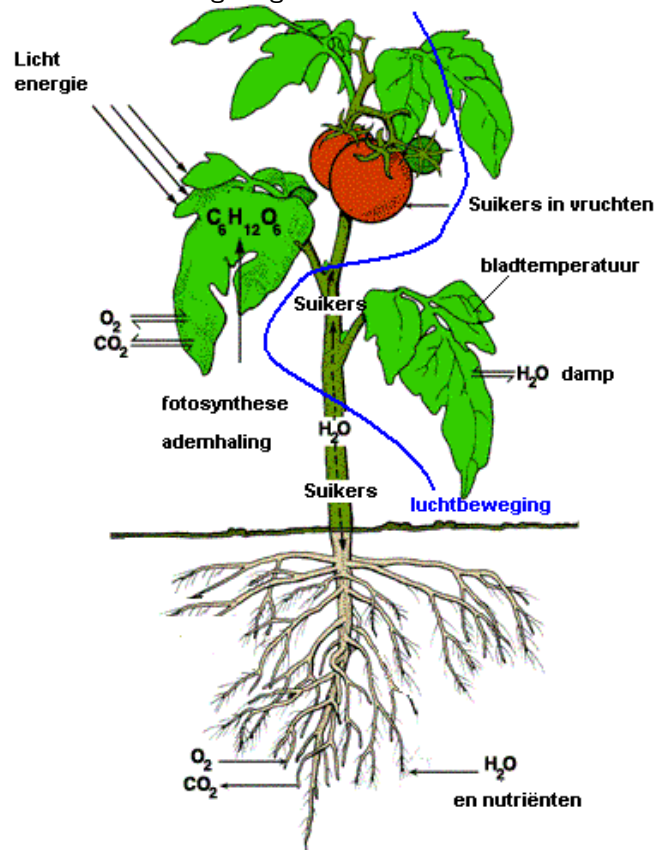
Door kennis over de klimaatverdeling kan temperatuurintegratie ruimer worden ingesteld en het setpoint voor de relatieve luchtvochtigheid kan worden verhoogd. Deze maatregelen kunnen tot een

energiebesparing van 4% leiden.

2 Theoretische effect van luchtbeweging

2.1 Denkkader

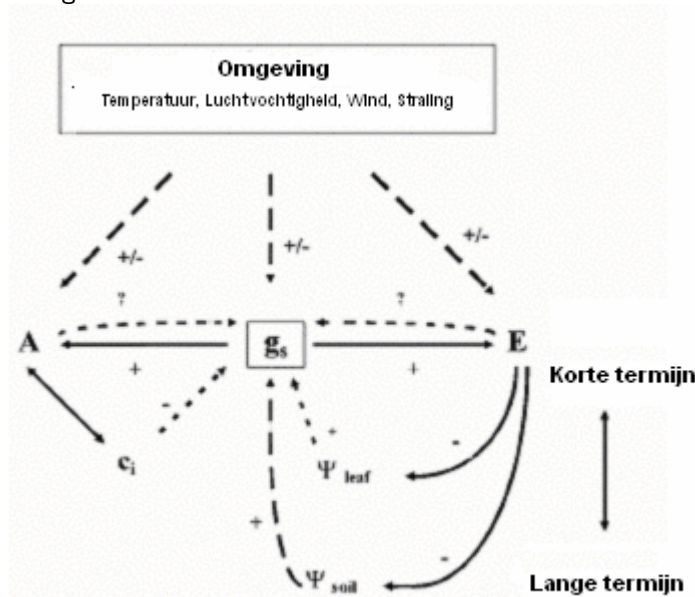
Voor de achtergronden van het onderzoek naar de effecten van luchtbeweging is het nodig om een kader te schetsen van de processen rond het bladoppervlak, die een rol spelen in de verdamping en fotosynthese. In Figuur 1 is een schematische weergave van de belangrijkste verschijnselen gegeven. Er vindt aan de oppervlakte van het blad uitwisseling plaats van waterdamp, zuurstof, CO_2 en warmte. Het water komt in de plant via de wortels en verlaat de plant via de huidmondjes. Water verlaat de huidmondjes als de druk van de waterdamp in het blad hoger is dan die van de lucht. Er is dan een positief verschil in dampdruk van water tussen blad en lucht. De verdamping die dan plaats vindt kost energie. Er ontstaat een evenwicht waarbij energieverlies door transpiratie gelijk is aan de opname van energie uit de omgeving. Een belangrijke bron van energie is de straling van de zon en een tweede bron is de omgevingslucht waaraan door convection en straling warmte wordt onttrokken. Bij geen of lage instraling zijn de bladeren, als er verdamping plaatsvindt, kouder dan de omgeving.



Figuur 1 Schematische weergave van processen rond de plant (bewerking van: <http://extension.oregonstate.edu/mg/botany/images/fig24.gif>)

Zoals hierboven geschetst is het evenwicht tussen verdamping, temperatuur, luchtvochtigheid, huidmondjes opening, en instraling en luchtbeweging al een complex geheel. Als daarbij de CO_2 uitwisseling wordt betrokken is het geheel nog een slag complexer (Jones, 1998). Onderstaande figuur is ontleend aan dit artikel en geeft schematisch weer hoe het gedrag van een huidmondje door invloeden van buitenaf en feedbackmechanismen wordt beïnvloed. Fotosynthese en ademhaling worden beïnvloed door de opening

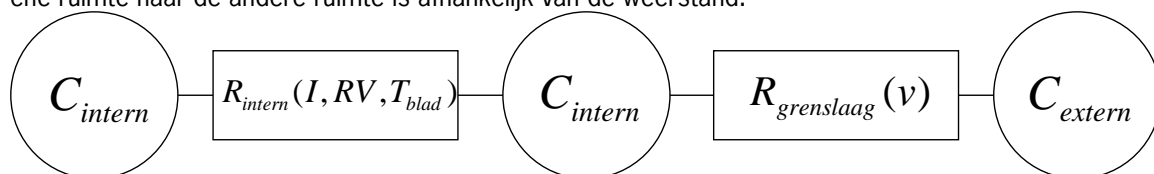
van de huidmondjes en omgekeerd.



Figuur 2 Schematische weergave van feedback mechanismen op de weerstand van een huidmondje (g_s).
A = fotosynthese, E = verdamping. C_i = interne concentratie CO₂, ϕ = waterpotentiaal

Plant- en luchttemperatuur vertonen in een kas vrijwel altijd kleine verschillen. Dit heeft gevolgen voor de verdamping en CO₂ uitwisseling. Voor transpiratie zijn de temperatuurveranderingen van grotere invloed dan voor CO₂ uitwisseling. Terwijl bij de CO₂ uitwisseling tussen de cellen en de omgeving de diffusie van CO₂ door het mesophyl een invloed heeft (Aalto, T & E. Juurola, 2002).

Om inzicht te krijgen in processen rond het blad kan het transport van water en lucht worden weergegeven als een keten van ruimtes waarin een zekere concentratie van water en CO₂ heerst. Het transport van de ene ruimte naar de andere ruimte is afhankelijk van de weerstand.



Figuur 3 Weerstandsschema voor een blad met C voor concentratie en R voor weerstand

Bovenstaand schema laat het weerstandsschema voor de verdamping van een gewas zien. Voor de fotosynthese komt er nog een extra weerstand in serie bij welke de opname van CO₂ in het gewas beschrijft. De interne weerstand (huidmondjes weerstand) kan variëren als gevolg van een adaptieve reactie van de plant aan de omstandigheden. In het bijzonder is het bekend dat instraling, het vochtdeficit van de lucht en de CO₂ concentratie een invloed kunnen hebben. Hiervoor bestaan empirische modellen. Hoe groot het effect op de fotosynthese zal zijn als de grenslaag weerstand wordt verlaagd hangt af van de grootte van de interne (huidmondjes) weerstand. Indien de interne weerstand groot is ten opzichte van de grenslaagweerstand dan zal een verkleining van de grenslaagweerstand weinig effect hebben op de fotosynthese. Met een interne weerstand van de zelfde orde van grootte of kleiner als de grenslaag weerstand heeft verlaging van de weerstand wel effect op de fotosynthese.

2.1.1 Grenslaagweerstand

De grenslaagweerstand is afhankelijk van de luchtsnelheid langs het blad en de mate van turbulentie. Gijzen (Bakker *et al.*, 1995) heeft het effect van de grenslaagweerstand op de assimilatie modelmatig bepaald. Bij een verdubbeling van de grenslaagweerstand nam de assimilatie bij veel licht 8% af en bij weinig licht 1%.

2.1.2 Fysiologische gevolgen

Een belangrijk aspect bij het toepassen van luchtbeweging is wat het effect op de plant zal zijn. De structuur en de afmetingen van de bladeren bepalen uiteindelijk hoe de fotosynthese wordt. In de gesloten kas experimenten die tot nu toe zijn uitgevoerd zijn de bladeren kleiner dan in een referentie situatie. Mogelijk verandert het aantal huidmondjes en de beharing van het blad ten gevolge van de luchtbeweging.

2.2 Literatuur

In gewasgroeimodellen wordt algemeen een standaardwaarde voor de grenslaagweerstand van 100 s/m gehanteerd (Houter 1991, Gijzen 1994, Heuvelink 1996, Körner, 2003). Auteurs maken geen onderscheid tussen gewassen. De grenslaagweerstand voor CO₂ is in vergelijking tot de mesofylweerstand gering. De mesofylweerstand is in het ECP-model (Houter 1991) minimaal 250 s/m.

Bij landbouwgewassen wordt soms een aërodynamische weerstand gehanteerd om het effect van luchtbeweging in het gewas te verdisconteren (Zuidema et al, 2003). De aërodynamische weerstand is afhankelijk van de gewasopbouw. In modellen voor kasgewassen wordt deze weerstand niet gehanteerd. Stanghellini (1987) stelt dat, hoewel het opsplitsen van de weerstand in weerstanden per laag en aërodynamische weerstand fysisch goed gefundeerd is, dit voor kasgewassen in standaardkassen niet nodig is. Stanghellini (1987) laat zien dat als de luchtbeweging kleiner wordt dan 0.3 m/s de externe weerstand toeneemt. De interne weerstand is echter belangrijker voor de verdamping. In het model voor cacao van Zuidema et al. 2003 heeft de aërodynamische weerstand wel effect op de verdamping, maar niet op de fotosynthese.

In een model voor kassen met Pad-Fan systeem voor koeling hanteert Willits (2003) een relatie tussen de windsnelheid en de warmteoverdracht van het gewas ontleent aan Seginer en Livne (1978). De warmte overdracht van het gewas is daarin afhankelijk van de windsnelheid, de bladgrootte, het temperatuurverschil tussen blad en lucht, totale bladoppervlak en de mate waarin het gewas door de bewegende lucht wordt bereikt. Deze laatste factor biedt de mogelijkheid om bij een gegeven bladoppervlak per m² de uitkomsten van het model aan te laten sluiten bij de metingen. Verwacht mag worden dat een groter bladoppervlak leidt tot een kleiner deel dat door de bewegende lucht wordt bereikt. De huidmondjes weerstand is in dit model een gegeven en wordt niet door de luchtbeweging beïnvloed.

Aërodynamische weerstand: totaal weerstand in een gewas voor uitwisseling van CO ₂ afhankelijk van gewasopbouw en grootte. Deze weerstand is onafhankelijk van windsnelheid. Interne weerstand; weerstand vanaf het oppervlak van het blad tot in het blad Externe weerstand: weerstand vanaf het oppervlak van het blad naar de kaslucht. Grenslaagweerstand: weerstand direct aan het oppervlak van het blad.

Dixon en Grace (1984) hebben voor vier boomsoorten het effect van wind op de aërodynamische weerstand bepaald. Zij vonden een sterke afname van de weerstand als de windsnelheid toenam van 0 tot 3 m.s⁻¹. Boven die windsnelheid nam de weerstand vrijwel niet meer af.

Kittas et al. (2003) stellen, onder verwijzing naar het ASHRAE- Handbook of Fundamentals, dat luchtsnelheden in de orde van 0.5 -0.7 m/s gunstig zijn voor groei. Boven de 1 m/s zou er sprake kunnen zijn van groeiremming.

Over effecten van gewastype op de locale luchtbeweging is geen informatie in de literatuur gevonden. Vogelesang et al. (1990) vonden geen positieve effecten van geforceerde luchtbeweging (0.3 m/s) door een tabletbodem bij de potplanten Saintpaulia en Ficus benjamina. Wel werd de bladtemperatuur van Ficus verlaagd.

In bijlage 1 geeft Stanghellini een uitgebreide beschouwing over mogelijke verandering van de grenslaagweerstand in een gesloten kas met geforceerde luchtbeweging en de mogelijke effecten daarvan op groei en ontwikkeling. Zij concludeert dat de grenslaagweerstand in een gesloten kas 2-2.5 keer zo klein zal zijn als in een conventionele kas. Deze lagere grenslaagweerstand zal vooral effect hebben op de CO₂ uitwisseling en minder op de verdamping. Het effect op bladtemperatuur is complex omdat de plant door

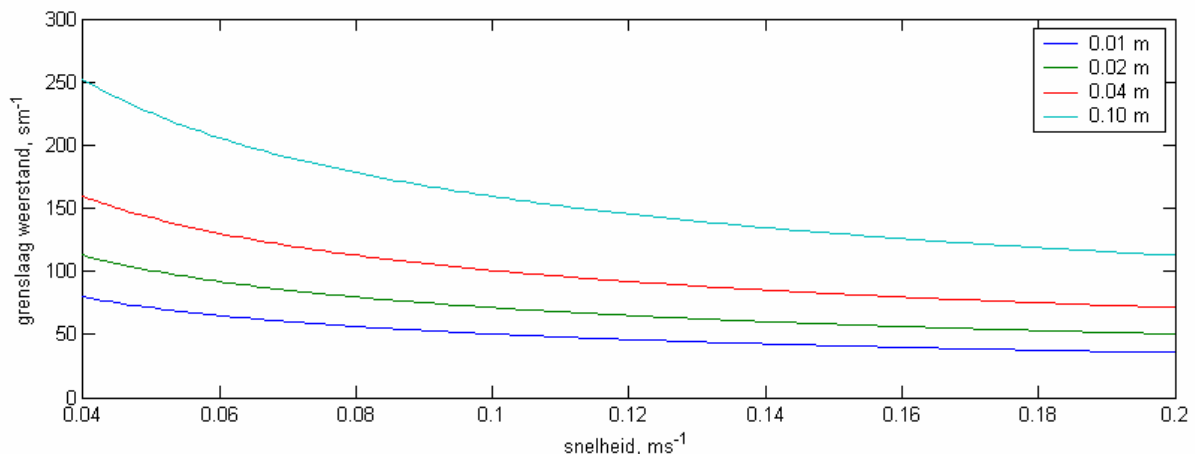
verandering van de opening van de huidmondjes een feedback regulatie van de temperatuur heeft. Via dit feedback mechanisme kan de uitwisseling van CO₂ eveneens beïnvloed worden, zodat bij een geringe opening van de huidmondjes de verdamping wel op peil blijft, maar de CO₂ uitwisseling zelfs wordt geremd. Het gunstige effect van de lagere grenslaagweerstand wordt te niet gedaan door de sluiting van de huidmondjes.

2.3 Analytische bepaling van de effecten van luchtsnelheid

Voor de berekeningen in deze paragraaf is het model van Nederhoff *et al.*, 1992 gebruikt. De externe (grenslaagweerstand) wordt gegeven door (Vesala, 1998)

$$R_{\text{extern}} = \frac{1}{\alpha D} \sqrt{\frac{\mu A}{\rho v_{\infty}}} \quad (1)$$

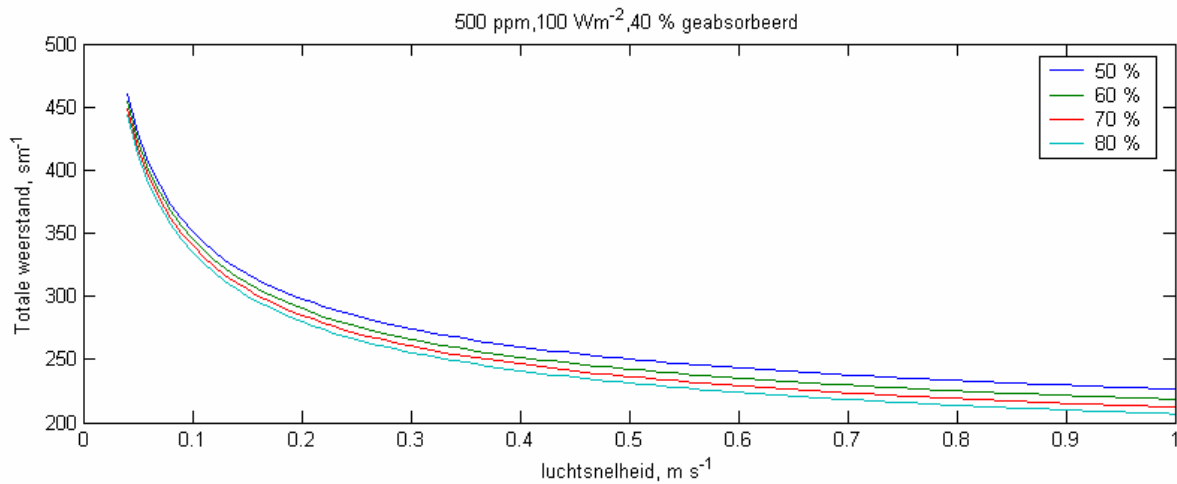
waarin α een empirische coëfficiënt is met de waarde 0.6, D is de diffusie coëfficiënt van waterdamp of CO₂ in lucht, μ is de dynamische viscositeit, A is straal van het blad, ρ is de dichtheid van de lucht en v_{∞} is de luchtsnelheid ver van het blad.



Figuur 4 De grenslaagweerstand voor CO₂ als functie van de luchtsnelheid voor verschillende bladdiameters

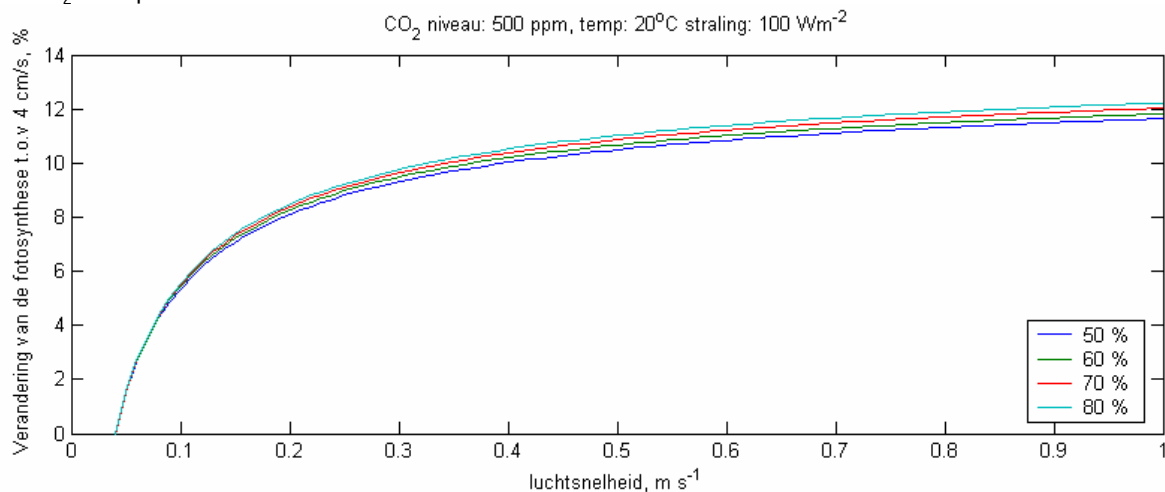
Figuur 4 laat de grenslaag weerstand voor CO₂ zien op basis van formule (1). Hoe groter het blad hoe groter de grenslaagweerstand. De weerstand neemt af naarmate de luchtsnelheid toeneemt. De diffusie van CO₂ in lucht is 36% kleiner dan van waterdamp in lucht. Dit houdt in de waterdamp makkelijker van het blad wegstroomt als CO₂ er naartoe stroomt.

Op basis van de theorie van Nederhoff en formule (1) is de totale weerstand voor het vochttransport van het blad te bepalen.



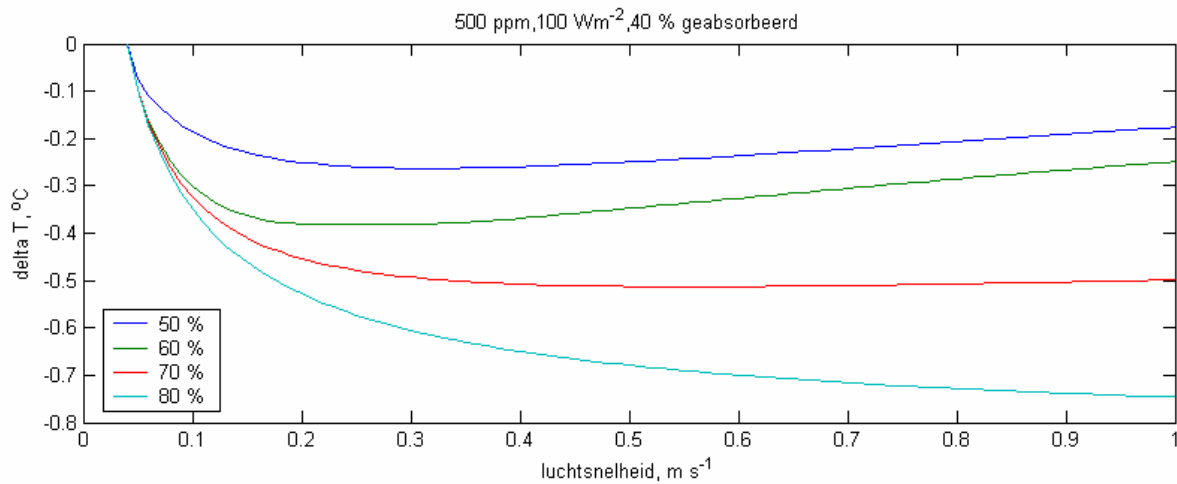
Figuur 5 Verandering van de totale weerstand voor CO₂ als functie van de luchtsnelheid bij verschillende niveaus van relatieve luchtvochtigheid

Figuur 5 laat de optelling van de interne en externe weerstand zien voor een verhoogd CO₂ niveau en een lage instraling. De totale weerstand neemt af bij toenemende luchtsnelheid waardoor het vochttransport en het CO₂ transport toenemen.



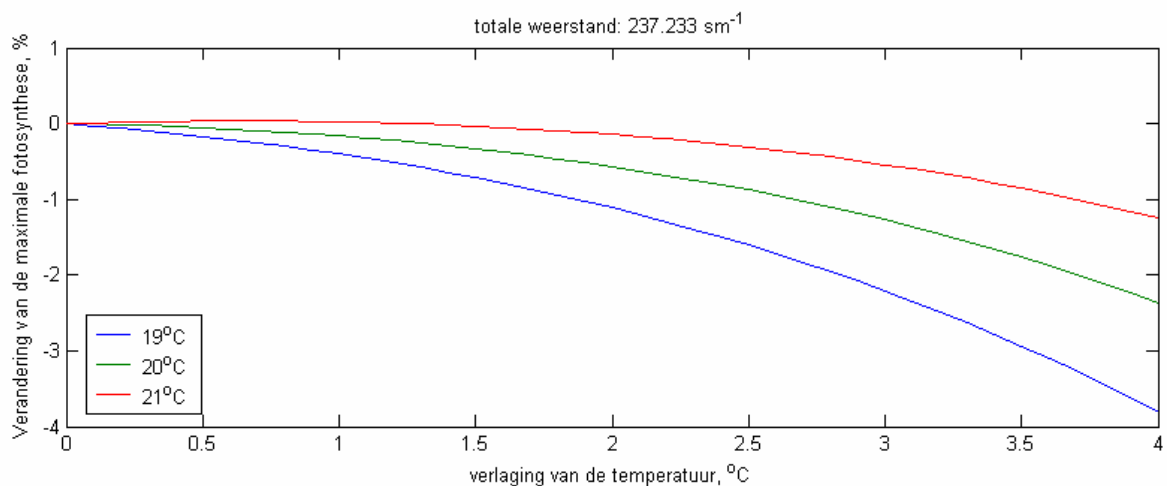
Figuur 6 Relatieve verhoging van de fotosynthese ten opzichte van een luchtsnelheid van 4 cm/s ten gevolge van een verlaging van de totale weerstand als functie van de luchtsnelheid bij verschillende niveaus van luchtvochtigheid

De fotosynthese is berekend door de assimilatie te berekenen welke afhangt van de temperatuur van het blad, de totale weerstand, de instraling en het CO₂ niveau, en de respiratie te berekenen welke afhangt van de temperatuur van het blad. De relatieve toename van de fotosynthese als gevolg van een verhoging van de luchtsnelheid t.o.v. een luchtsnelheid van 4 cm/s is in Figuur 6 te zien. In deze berekening is rekening gehouden met de verandering van de bladtemperatuur door een verlaging van de totale weerstand waar de verdamping van het gewas en het warmtetransport van afhangen.

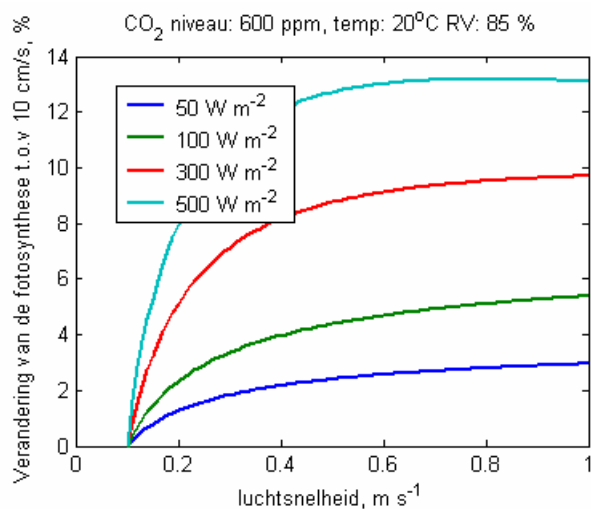


Figuur 7 Verandering van de bladtemperatuur als functie van de luchtsnelheid voor een verschillende relatieve luchtvochtigheid waarbij 40% van het zonlicht wordt omgezet in warmte.

Uit Figuur 7 kan geconcludeerd worden dat de verlaging van de weerstand zorgt voor een verlaging van de bladtemperatuur bij de gegeven condities. De verdamping neemt toe waardoor het blad afkoelt. Deze afkoeling wordt niet gecompenseerd door de grotere warmteoverdracht naar het blad t.g.v. convectie en straling.



Figuur 8 Verandering van de maximale assimilatie als functie van de temperatuurdaling voor verschillende gewastemperaturen. Alleen bij een grote verlaging van de temperatuur zal de fotosynthese afnemen (Figuur 8).



Figuur 9 Relatieve verhoging van de fotosynthese ten opzichte van een luchtsnelheid van 10 cm/s ten gevolge van een verlaging van de totale weerstand als functie van de luchtsnelheid bij verschillende niveaus van lichtintensiteit

Het effect van vergroting van de luchtsnelheid is groter bij hogere lichtniveau's (Figuur 9). In bovenstaande benadering is de het gedrag voor CO₂ uitwisseling en verdamping van H₂O op overeenkomstige wijze benaderd. Er kunnen verschillen tussen verdamping en CO₂ uitwisseling optreden, die worden veroorzaakt door verschil in reactie op temperatuur van plant en lucht.

Samenvattende conclusie

Geforceerde luchtbeving langs het gewas heeft:

positieve gevolgen:

- De som van de stomataweerstand en grenslaagweerstand neemt af, waardoor stoftransport van en naar de plant wordt bevorderd.
- Bij verhoging van lichtniveau is de toename van de fotosynthese t.g.v. de luchtsnelheid groter.

negatieve gevolgen

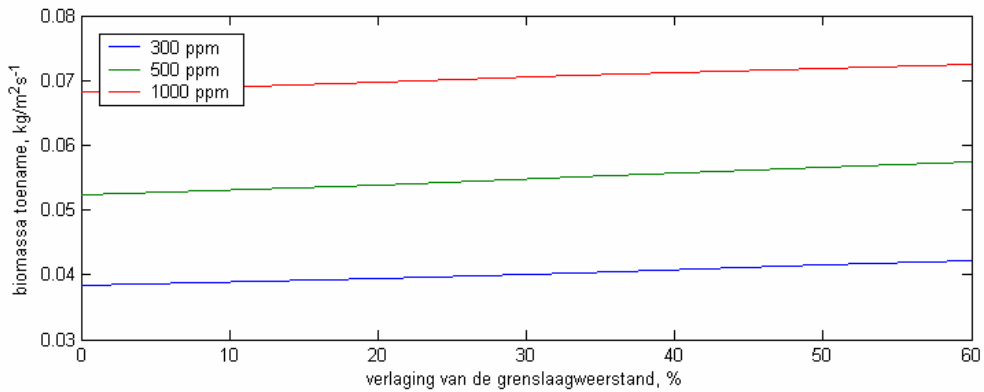
- De temperatuur van het gewas daalt door de verhoging van de luchtsnelheid hierdoor neemt de fotosynthese af. Echter is deze afname kleiner dan de toename van fotosynthese.
- Waarschijnlijk neemt de respiratie ook toe als gevolg van de luchtbeving.

2.4 Modelberekeningen met KASPRO op overall gewasfotosynthese

De relaties tussen luchtbeving en grenslaagweerstand zijn onvoldoende gekwantificeerd en ook de luchtsnelheidsverdeling binnen het gewas is onvoldoende bekend. Daarom is voor een indicatieve analyse gekozen door te werken met een relatieve verandering van de grenslaagweerstand ten opzichte van de normaal gehanteerde waarden in de beschikbare klimaatmodellen. Het gewas type speelt bij de grenslaagweerstand in de modellen geen rol.

Voor de beeldvorming is bij drie CO₂ niveaus en voor een situatie met hoog en laag lichtniveau het effect bepaald van verkleining van de gewasweerstand op de fotosynthese. De berekening is gedaan voor een zomerse dag waarbij de totale zonnestraling 25 MJ bedraagt en een winterdag waarbij de zonneinstraling totaal 1 MJ bedraagt. Het gewas is tomaat en de CO₂ dosering is zo hoog dat het gewenste niveau altijd gehaald wordt ook al is de ventilatie hoog.

De gewasweerstand wordt in KASPRO berekend via de warmteoverdrachtscoëfficiënt. Om het effect van de gewasweerstand op de fotosynthese volgens het model te bepalen is de warmteoverdrachtscoëfficiënt verlaagd. Het effect op de verdamping wordt met deze aanpak ook meegenomen.

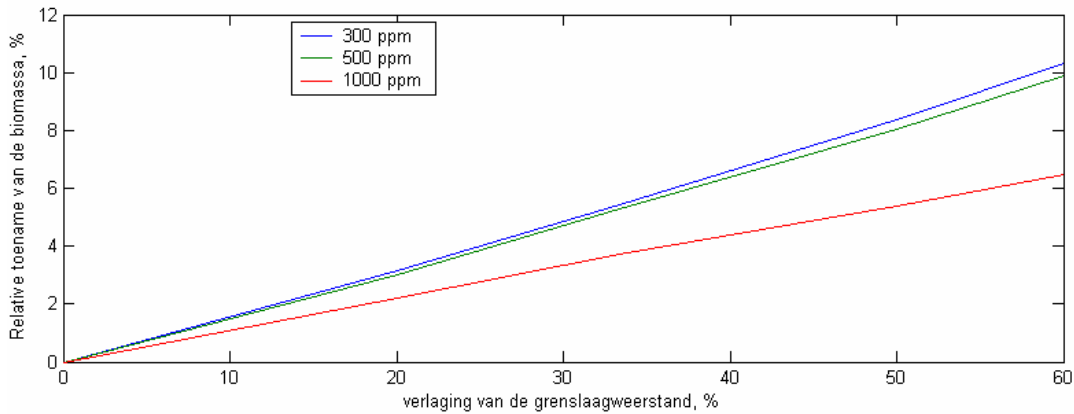


Figuur 10 Absolute biomassa toename per uur voor twee CO₂ niveaus onder condities met veel licht (totaal 25 MJ) bij verandering van de gewasweerstand.

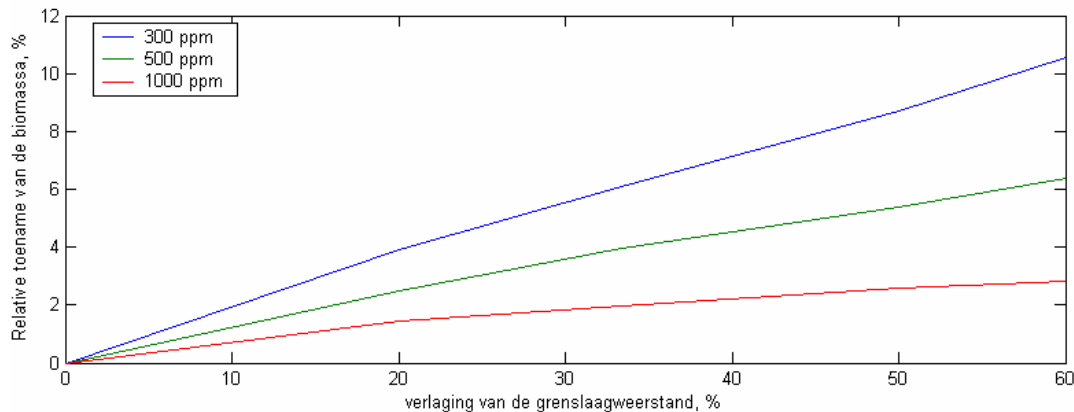
Bovenstaande figuur laat de biomassa toename per dag voor drie CO₂ niveaus zien. Dit is voor een dag met veel licht.

Omdat in gesloten kassystemen naast een mogelijke verlaging van de weerstand ook een verhoging van het CO₂ gehalte optreedt, stijgt de fotosynthese in potentie van de lijn bij 300 ppm en percentage verlaging 0 (linksonder) naar rechts (door verlaging van de weerstand) en naar boven (door de verhoging van de CO₂ concentratie) in deze figuur.

Om een goed beeld te krijgen van de relatieve effecten zijn deze in onderstaande figuren weergegeven voor een dag met veel licht (zomerniveau) en een dag met lagere lichtomstandigheden (winterniveau).



Figuur 11 Relatieve toename van de gewasfotosynthese als functie van de verlaging van de grenslaagweerstand voor veel licht situatie

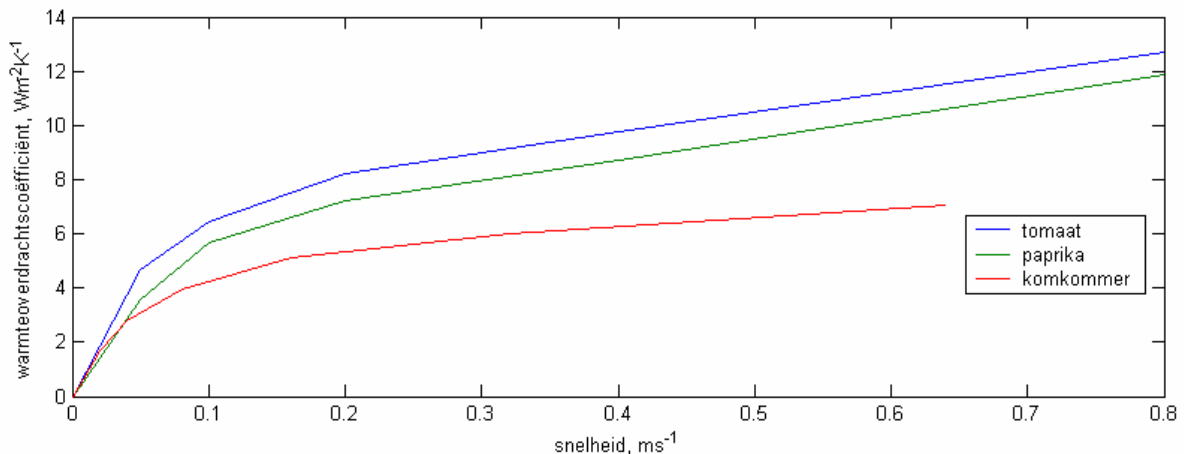


Figuur 12 Relatieve toename van de gewasfotosynthese als functie van de toename van de overdracht onder lage lichtomstandigheden.

De effecten bij laag CO₂ niveau zijn fors. Een verlaging van de grenslaagweerstand met 50% leidt tot 6-8% hogere berekende fotosynthese. De effecten bij laag CO₂ niveau zijn voor beide lichtomstandigheden vergelijkbaar. Bij hoog CO₂ niveau zijn de effecten bij hoge lichtintensiteit groter dan bij lage lichtintensiteit. Dit komt door verschil in CO₂ concentratie in de laag vlak bij het blad. Onder winteromstandigheden is licht beperkend. Dan heeft een verlaging van de weerstand bij een verzadigd niveau van CO₂ nauwelijks invloed. Bij laag CO₂ niveau is er nog geen sprake van verzadiging. Dan heeft verlaging van de weerstand een positief effect.

De overall conclusie is dat de indicatief berekende relatieve effecten van verlaging van de grenslaag (gewas)weerstand op de gewasfotosynthese in de orde grootte liggen van 5- 8 %.

De berekende waarde ligt op een lager niveau dan in de literatuur is beschreven. De interne weerstand verschilt mogelijk met de planten in de literatuur.



Figuur 13 De warmteoverdrachtscoëfficiënt als functie van de luchtsnelheid

Hoe groter het blad hoe kleiner de warmteoverdracht. Dit komt overeen met de literatuur, formule (1).

3 Experimenten in klimaatkamers met tomaat

3.1 Doel van de experimenten

Klimaatkamers zorgen voor constante klimaatcondities waardoor vergelijkbare metingen uitgevoerd kunnen worden. Het klimaat in de kamer is homogeen voor temperatuur, relatieve luchtvochtigheid, CO₂ en hoeveelheid licht. Door lokaal in de klimaatkamer luchtbeweging toe te passen kan de invloed hiervan op de ontwikkeling van het gewas worden vergeleken.

3.2 Aanpak

De proeven zijn uitgevoerd in twee klimaatkamers (cel 127 en 128) op het PPO te Naaldwijk. De klimaatkamers hebben een oppervlakte van 30,5 m² (7,1 * 4,3 m) en zijn voorzien van speciale TL-buizen (type Osram L58W/840), die licht afgeven met een spectrale verdeling afgestemd op de plantengroei. De lichtintensiteit is 45 W.m⁻² PAR (Photosynthetic Activ Radiation). Dit komt ongeveer overeen met 90 W.m⁻² globale straling.

De belichting met TL-lampen brandde van 23:00 tot 11:00. Aansluitend werd een uur met gloeilampen belicht. Dit is noodzakelijk om de planten goed te laten groeien. Ontbreekt de nabelichting met gloeilampen dan treden ongewenste negatieve effecten op de gewasopbouw op. Dit komt door de naar verhouding lage hoeveelheid verrood licht bij TL belichting. Dit wordt gecompenseerd door de belichting met gloeilampen die veel verrood licht geven.

Temperatuur en luchtvochtigheid werden onafhankelijk van elkaar geregeld. De temperatuur en luchtvochtigheid wordt gemeten met een TFDL psychrometer. De CO₂-concentratie wordt geregeld met een Siemens CO₂-meter.

In de klimaatkamers zijn teeltgoten om planten op te zetten. De planten krijgen via druppelbevloeiing water en voeding. De planten staan op ca 30 cm afstand.

In de klimaatcellen is een systeem voor geforceerde luchtbeweging geconstrueerd. De afmetingen van het systeem zijn bepaald door CFD berekeningen (bijlage 5). Het systeem bestond uit een ventilator die lucht via PVC pijpen met daarop pijpjes van 8 en 3 mm doorsnede het gewas in blies. De druk was ongeveer 250 Pa. Binnen een klimaatcel werden naast de standaard luchtbeweging die in een klimaatcel optreedt, twee niveaus van geforceerde luchtbeweging gecreëerd. De standaard luchtbeweging is in horizontale richting 0.04 m/s. De geforceerde luchtbeweging is verticaal gericht vanaf de wortel naar de top van de plant (Figuur 14 en Figuur 15). De luchtbeweging werd constant (dag en nacht) aangezet.

Er zijn drie experimenten uitgevoerd. Het eerste experiment startte op 23 april en eindigde op 6 mei. Een periode van twee weken tussen begin en eind was vrij kort. De planten waren aan het eind van het experiment nog vrij klein. Daarom is er voor gekozen het tweede experiment langer te laten duren. Het tweede experiment startte op 12 mei en eindigde op 9 juni. De planten waren bij aanvang van het tweede experiment aanzienlijk groter. Deze grotere planten resulteerden na drie weken in planten van een omvang dat de waarnemingen over meerderde dagen moesten worden uitgevoerd. Bij de verwerking is hiermee rekening gehouden.

Het derde experiment startte op 2 augustus en eindigde op 25 augustus.

Aan het begin van de experimenten en aan het eind zijn aan 8 planten per behandeling de volgende waarnemingen gedaan: versgewicht, drooggewicht van blad en stengel, bladoppervlak, aantal bladeren en

stengellengte van de hoofdscheut en versgewicht, drooggewicht en bladoppervlak van de dieven.

In beide eerste experimenten zijn twee CO₂ niveaus gehanteerd, 500 en 1000 ppm.

In het derde experiment is een CO₂ niveau van 1000 ppm in beide klimaatcellen gerealiseerd en is de luchtsnelheid gevarieerd. In een cel is de luchtbeving vergelijkbaar met die in experiment 1 en 2. In de tweede cel is luchtsnelheid sterk verlaagd, van 5 m/s naar 1 m/s bij een inblaasopening van 8 mm. Hierdoor is de hoeveelheid verplaatste lucht slechts 20 %. Bij de inblaasopening van 3 mm is de luchtsnelheid verlaagd van 1 m/s naar 0.5 m/s.

Voordat de planten op de goten zijn gezet is de luchtbeving gemeten.

Tijdens de experimenten is het klimaat gemonitord voor temperatuur, luchtvochtigheid en CO₂.

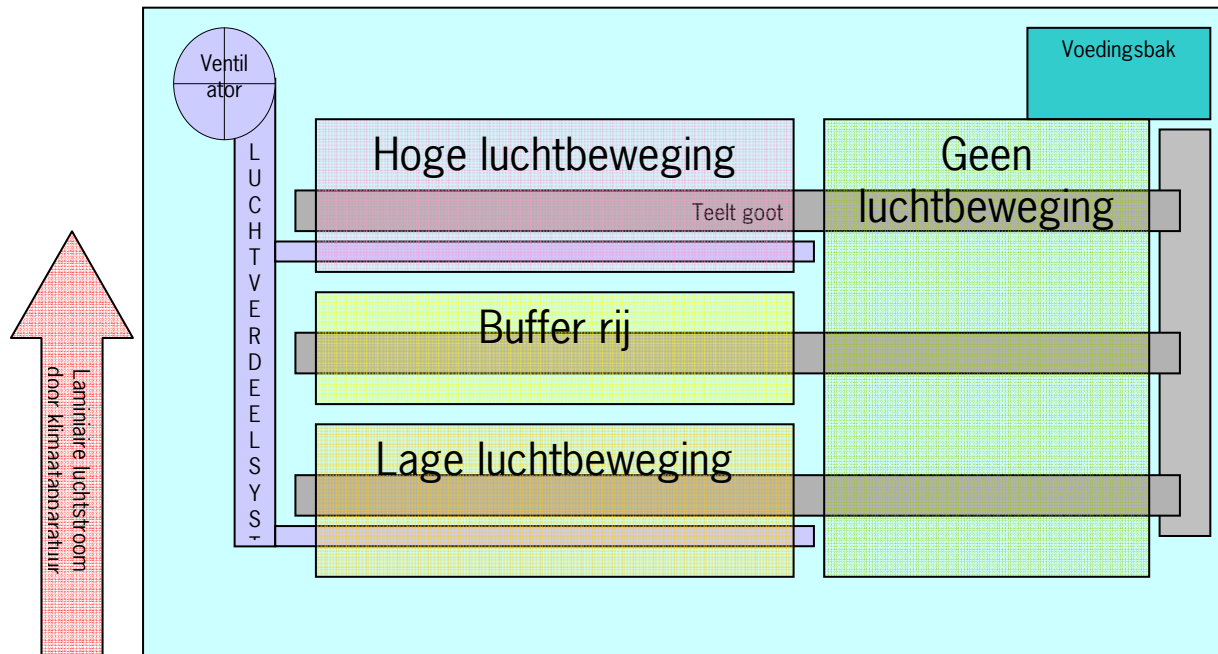
Ook is met een IR- handmeter de bladtemperatuur gemeten.

Het bleek in deze opstelling niet mogelijk om de verdamping per plant te meten. De planten kregen via één druppelsysteem water en de drain werd centraal opgevangen, zodat dit geen informatie kon leveren over de verdamping afhankelijk van de luchtbeving. Dit betekent dat we geen relatie kunnen leggen tussen luchtbeving en verdamping. Uit de beschouwingen van Stanghellini blijkt dat de relatie met verdamping vergelijkbaar zal zijn met de CO₂ uitwisseling. De effecten op productie kunnen goed uit de groei worden afgeleid. Het ontbreken van verdampingsgegevens heeft geen negatieve gevolgen hiervoor.



Figuur 14 Inrichting van de klimaatcel met planten en luchtverdeelsysteem

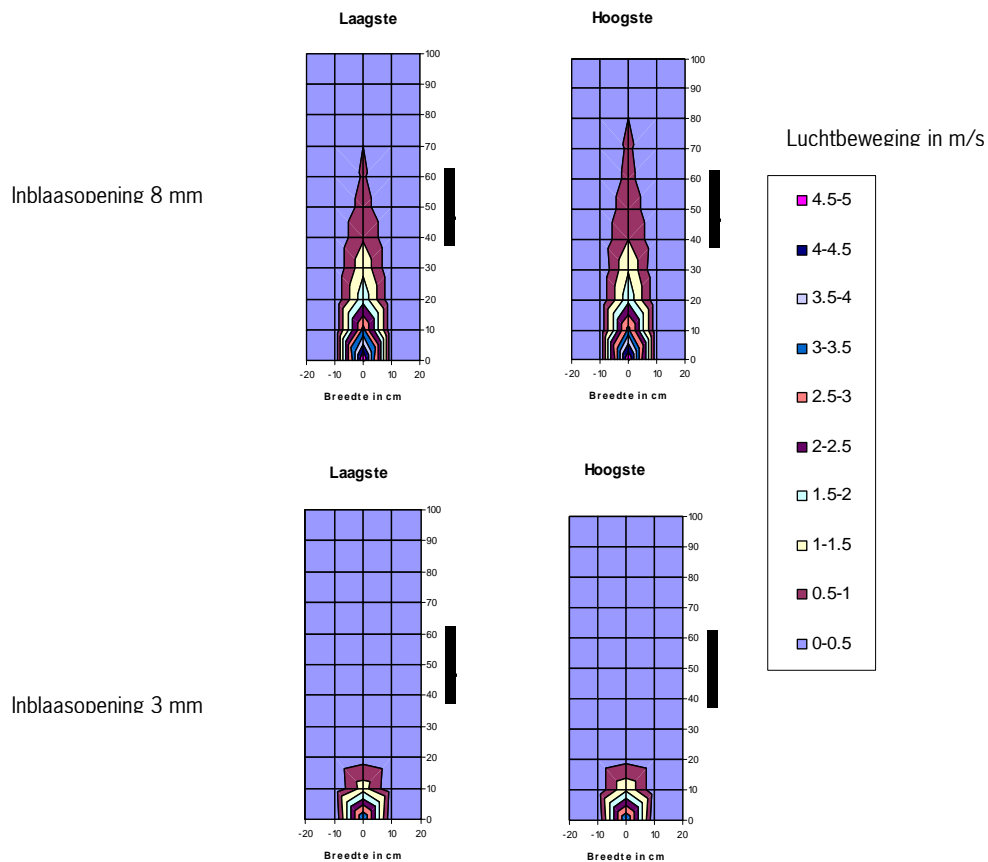
Indeling van de klimaatcellen



Figuur 15 Schema van de inrichting van de klimaatcellen met de velden met verschillende luchtbeweging

3.3 Resultaten luchtbeweging en klimaat

De inblaasopeningen van 3 en 8 mm veroorzaken een duidelijk verschil in luchtbeweging tussen de planten. De druk die de ventilator opbouwde was maximaal 250 Pa. Dit is binnen het traject van de gemaakte modelberekeningen. De gemeten luchtsnelheid is wel iets lager dan de modelberekeningen. De snelheid in het gewas bij de gaatjes van 8 mm komt redelijk in de buurt van de in de literatuur gevonden waarden van 0.5 m/s. Onder in een gewas is de snelheid zelfs nog hoger. Bij gaatjes met een diameter van 3 mm was de luchtsnelheid op een afstand van 40 cm al gedaald tot onder de 0.10 m/s. De luchtweging was door het systeem van buisjes goed te richten op het gewas. Bij de buisjes met een diameter van 8 mm was de beweging van het gewas goed zichtbaar. Het gewas werd in de eerste proef ca 30 cm hoog. De bovenkant van het gewas is dan ongeveer 50 cm vanaf de uitblaasopening. In de tweede proef werd het gewas ruim 100 cm hoog, dit is ruim 120 cm boven de uitblaasopening. Uit de CFD berekeningen volgt dat de aanwezigheid van gewas de verschillen in luchtbeweging in het horizontale vlak nivelleert. Er is dan sprake van een luchtbeweging op een bepaalde hoogte. Een buisje met een diameter van 3 mm leverde bij de inblaasopening een luchtsnelheid van ca 1 m/s. Een buisje met een diameter van 8 mm leverde bij inblaasopening een luchtsnelheid van ongeveer 5 m/s. Het inblaasprofiel is bepaald door de luchtsnelheid op verschillende posities vanaf de uitblaasopening te meten. In de opstelling ligt de inblaasopening onder een kleine hoek ten opzichte van het gewas, maar dit heeft geen grote gevolgen voor de snelheden in het gewas. De onderste bladeren bevinden zich op ca 15 centimeter vanaf de opening.



Figuur 16 Luchtbewegingspatroon in de klimaatkamers afhankelijk van de diameter van de inblaasopening loodrecht op de verdeelbuis

Het klimaat in de cellen was ingesteld op een constante luchttemperatuur van 20 °C en een luchtvochtigheid van 80%. Gedurende de lichtperiode is CO₂ gedoseerd tot een niveau 500 en 1000 ppm.

Bij het eerste experiment zakte door een defecte circulatie pomp gedurende de eerste drie dagen de temperatuur naar 19 °C in cel 128. Nadat dit hersteld was bleven temperatuur en RV op het gewenste niveau.

Het CO₂ niveau bereikte tijdens de lichtperiode de gewenste waarden. In het tweede experiment moest het gedoseerde volume wel worden verhoogd om de concentratie op 1000 ppm te handhaven, anders zakte het niveau aan het eind van de lichtperiode onder het gewenste niveau. Dit is vooral te zien rond 25 mei.

In het tweede en derde experiment werden de streefwaarden voor temperatuur, relatieve luchtvochtigheid en CO₂ goed gerealiseerd. (Bijlage 3)

3.4 Resultaten luchtbeweging op groei.

Zoals te verwachten was heeft het niveau van CO₂ duidelijk effect op de groei zowel in het eerste experiment als het tweede experiment (Tabel 1 en Tabel 2 en Bijlage 2), In geen van beide experimenten werd er een interactie gevonden tussen de CO₂ concentratie en de luchtbeweging. Dit zou op basis van de modelberekeningen wel zijn te verwachten. Mogelijk zijn temperatuur en licht toch nog te beperkend om het extra effect van CO₂ te benutten. In het tweede experiment zijn de planten die bij 1000 ppm stonden korter, met minder blad aan de dieven die ook korter zijn.

Tabel 1 Gegevens over plantkenmerken aan het einde van een experiment met luchtbeweging gedurende 2 weken.

Orgaan	Waarneming	eenheid	CO ₂ niveau in ppm 500				CO ₂ niveau in ppm 1000				CO ₂ niveau in ppm gemiddelde			
			Inblaassnelheid				Inblaassnelheid				Inblaassnelheid			
			geen	1m/s	5 m/s	Gemiddelde	geen	1m/s	5 m/s	Gemiddelde	geen	1m/s	5 m/s	Gemiddelde
Plant	vers gewicht	gram	94	85	91	90	105	94	103	100	99	90	97	95
	droog gewicht	gram	9.0	8.2	9.2	8.8	10.5	9.1	11.0	10.2	9.8	8.7	10.1	9.5
	droge stof %	%	9.6	9.6	10.2	9.8	10.0	9.7	10.8	10.2	9.8	9.6	10.5	10.0
Hoofdtak	Blad vers gewicht	gram	62.5	56.6	59.2	59.4	69.7	62.0	68.7	66.8	66.1	59.3	64.0	63.1
	droog gewicht	gram	6.9	6.2	6.9	6.7	8.0	6.8	8.5	7.8	7.4	6.5	7.7	7.2
	droge stof %	%	11.0	11.0	11.7	11.2	11.4	11.0	12.4	11.6	11.2	11.0	12.1	11.4
	aantal		11.0	11.1	10.6	10.9	11.1	11.3	11.1	11.2	11.1	11.2	10.9	11.0
	oppervlakte	cm ²	1486	1304	1351	1380	1361	1223	1301	1295	1424	1263	1326	1338
Steel	vers gewicht	gram	25.2	24.4	25.4	25.0	28.1	25.2	27.7	27.0	26.7	24.8	26.5	26.0
	droog gewicht	gram	1.6	1.5	1.6	1.6	1.8	1.6	1.9	1.8	1.7	1.5	1.7	1.7
	droge stof %	%	6.2	6.0	6.4	6.2	6.5	6.4	6.7	6.5	6.3	6.2	6.6	6.4
	lengte	cm	31	31	31	31	31	30	30	30	31	30	30	31
Dief	vers gewicht	gram	5.8	4.3	6.1	5.4	7.0	6.8	6.3	6.7	6.4	5.6	6.2	6.1
	droog gewicht	gram	0.6	0.5	0.7	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.7	0.6
	droge stof %	%	10.3	11.0	11.0	10.8	10.3	10.2	10.6	10.4	10.3	10.6	10.8	10.6
	oppervlakte	cm ²	8.4	7.9	8.8	8.3	9.0	8.5	9.3	8.9	8.7	8.2	9.0	8.6

Tabel 2 Gegevens over plantkenmerken aan het einde van een experiment met luchtbeweging gedurende 4 weken

Orgaan	Waarneming	eenheid	CO ₂ niveau in ppm 500				CO ₂ niveau in ppm 1000				CO ₂ niveau in ppm gemiddelde			
			Inblaassnelheid				Inblaassnelheid				Inblaassnelheid			
			geen	1m/s	5 m/s	Gemiddelde	geen	1m/s	5 m/s	Gemiddelde	geen	1m/s	5 m/s	Gemiddelde
Plant	vers gewicht	gram	1105	1143	1014	1087	917	1019	1028	988	1011	1081	1021	1038
	droog gewicht	gram	85.7	79.6	88.6	84.7	83.1	83.7	95.9	87.6	84.4	81.6	92.3	86.1
	droge stof %	%	7.8	7.0	8.7	7.8	9.1	8.3	9.4	8.9	8.5	7.6	9.0	8.4
Hoofdtak	Blad vers gewicht	gram	310	315	288	304	280	307	310	299	295	311	299	302
	droog gewicht	gram	27.0	25.4	27.6	26.7	28.6	28.9	32.5	30.0	27.8	27.2	30.1	28.3
	droge stof %	%	8.7	8.1	9.6	8.8	10.2	9.5	10.5	10.1	9.5	8.8	10.0	9.4
	oppervlakte	cm ²	4471	6156	5628	5418	5516	5617	5457	5530	4993	5886	5543	5474
Steel	vers gewicht	gram	144	155	140	146	132	140	152	142	138	148	146	144
	droog gewicht	gram	11.2	10.4	12.0	11.2	12.0	11.6	14.3	12.6	11.6	11.0	13.2	11.9
	droge stof %	%	7.8	6.7	8.6	7.7	9.0	8.3	9.3	8.9	8.4	7.5	9.0	8.3
	lengte	cm	104	108	102	105	90	91	96	92	97	100	99	99
Dief	Blad vers gewicht	gram	268	256	245	256	230	238	247	238	249	247	246	247
	droog gewicht	gram	25.4	22.6	26.6	24.9	24.4	23.2	27.5	25.0	24.9	22.9	27.0	24.9
	droge stof %	%	9.5	8.8	10.8	9.7	10.6	9.9	11.2	10.6	10.1	9.4	11.0	10.2
	oppervlakte	cm ²	5227	5658	4316	5067	3904	3993	4427	4108	4565	4826	4372	4588
Steel	vers gewicht	gram	383	418	342	381	274	334	318	309	329	376	330	345
	droog gewicht	gram	22.2	21.2	22.4	21.9	18.3	20.0	21.7	20.0	20.2	20.6	22.0	20.9
	droge stof %	%	5.8	5.1	6.5	5.8	6.7	6.1	6.8	6.5	6.3	5.6	6.6	6.2
	lengte	cm	52	56	44	50	34	38	38	37	43	47	41	44

Tabel 3 Gegevens over plantkenmerken aan het einde van een experiment met luchtbeweging gedurende 3 weken in augustus

Orgaan	Waarneming	Cel Behandeling Inblaassnelheid Diameter inblaasopening Verhouding verplaatste hoeveelheid lucht in % van behandeling 3 eenheid	127			128			Gemiddelde alle behandelingen
			Controle	2	3	Controle	4	5	
			Geen	1	5	Geen	0.5	1	
			-	3	8	-	3	8	
			0	2.8	100	0	1.4	20	
Plant	vers gewicht	gram	816	746	804	802	776	639	764
	droog gewicht	gram	62.1	54.6	63.7	61.2	55.1	54.3	58.5
	droge stof %	%	7.6	7.3	7.9	7.6	7.1	8.5	7.7
Hoofdtak	Blad vers gewicht	gram	254	242	259	263	241	237	249
	droog gewicht	gram	22.5	20.9	23.5	23.6	20.2	23.6	22.4
	droge stof %	%	8.8	8.6	9.0	9.0	8.4	10.0	9.0
	aantal		15.5	17.0	16.5	15.1	16.5	16.3	16.1
	oppervlakte	cm2	4445	4086	4462	4427	4181	3916	4253
	Steel vers gewicht	gram	103	100	110	101	99	92	101
	droog gewicht	gram	7.0	6.7	7.8	6.9	6.3	7.0	7.0
	droge stof %	%	6.9	6.7	7.0	6.9	6.3	7.6	6.9
	lengte	cm	73	71	72	70	73	63	70
Dief	vers gewicht	gram	460	405	435	438	436	310	414
	droog gewicht	gram	32.6	27.0	32.4	30.6	28.7	23.7	29.2
	droge stof %	%	7.1	6.7	7.5	7.0	6.6	7.6	7.0
	oppervlakte	cm2	4684	3730	4457	4297	4195	2918	4046

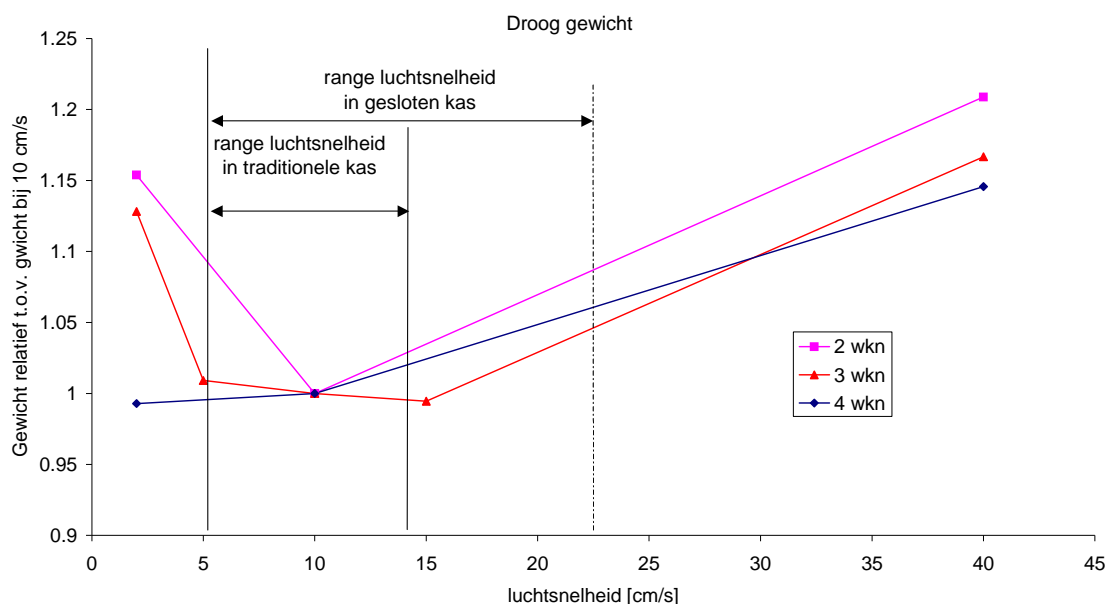
De sterkste luchtbeving had in het tweede experiment een positief effect op de hoeveelheid droge stof die aangemaakt werd. Het verschil in droge stof gewicht is ongeveer 9 % ten opzigt van geen luchtbeving. In het eerste experiment was er slechts een geringe toename in drogestof hoeveelheid. Mogelijk heeft dit experiment te kort geduurd om duidelijke effecten te krijgen. In het derde experiment is de totale droge stof productie bij de hoogste luchtbeving gelijk aan de controle behandelingen. De behandelingen met minder luchtbeving hebben een lagere droge stof productie.

3.5 Discussie

Op grond van de berekeningen met KASPRO zou de relatieve toename door luchtbeving bij 500 ppm groter moeten zijn dan bij 1000 ppm CO₂. Dit wordt door deze experimenten niet bevestigd. Bij de lagere luchtbeving in het derde experiment (behandeling 5) blijkt de plant duidelijk korter met kleiner blad, ook zijn de dieven kleiner. De hoeveelheid droge stof is wel gelijk, maar niet omgezet in versgewicht een effect dat ook in de kas is gemeten. Het kleinere bladoppervlak moet voor droge stof productie zijn gecompenseerd door een hogere fotosynthese per cm².

Een belangrijk verschil met de luchtbeving in een gekoelde, gesloten kas is dat in deze experimenten de lucht de normale temperatuur heeft. In een gekoelde kas heeft de ingeblazen lucht een andere temperatuur en zal de relatie tussen warmteoverdracht en stofoverdracht voor water en CO₂ duidelijk anders zijn. Een tweede verschil is de lichtintensiteit, deze is in de klimaatkamer 45 W/m². Dit is veel lager dan in een kas wordt bereikt.

Omdat in de klimaatcellen de temperatuur gelijk is, dit is gecontroleerd met een handinfrarood meter, is er geen verschil in ontwikkeling van het aantal bladeren. Daardoor kon de grotere hoeveelheid drogestof niet worden omgezet in versgewicht toename, maar is het vastgelegd in stengel en blad.



Figuur 17 Resultaten uit het klimaatkamerexperiment, elk punt in de grafiek is een experiment waarbij het CO₂ niveau 1000 ppm was

In alle drie de experimenten blijft de behandeling met weinig luchtbeving achter in droge stof ten opzichte van geen luchtbeving (Figuur 17). Dit is in tegenstelling tot wat verwacht werd. Blijkbaar heeft een geringe luchtbeving andere gevolgen dan een forse luchtbeving. Dat een lage luchtbeving geen positief effect heeft komt overeen met de resultaten uit onderzoek met luchtbeving door tabletbodems van Vogelesang (Vogelesang et al, 1990) maar het komt niet overeen met de publicaties van Kitaya.

Mogelijke verklaringen zijn:

- De planttemperatuur is hoger bij geen luchtbeweging. Stanghellini (bijlage 1) laat zien dat de bladtemperatuur afhangt van luchttemperatuur, luchtvochtigheid, straling, huidmondjes weerstand en grenslaagweerstand. De samenhang tussen deze factoren is complex. Maar een hogere bladtemperatuur in deze temperatuurrange kan een hoger fotosynthese tot gevolg hebben.
- Door de lage luchtsnelheid wordt het vochtgehalte van de lucht nabij de bladeren hoog waardoor de huidmondjes ver open gaan ten behoeve van de verdamping. De weerstand voor de CO₂ opname wordt hierdoor gering.
- De luchtbeweging is niet uitgeschakeld op het moment dat de lichten uitgingen. Mogelijk wordt de respiratie groter t.g.v. de luchtbeweging.

Echter de zeer geringe luchtbeweging zoals in de klimaatkamer komt in een praktijk kas niet voor door de verwarming en de ventilatie van de kas. Deze mogelijkheid tot verhoging van de productie is daarom voor de praktijk geen haalbare optie.

De toename van droge stof productie als de luchtsnelheid van 0.10 m/s naar hogere snelheden wordt gebracht is in overeenstemming met de verwachting.

Een punt van kritiek op de resultaten is dat de locatie in de cel waar geen, een geringe en veel luchtbeweging is toegepast niet is veranderd voor de verschillende experimenten. Een temperatuurgradiënt te gevolge van de belichting en verschillen in belichtingsintensiteit in de cel hebben hierdoor mogelijk invloed op de resultaten.

Belangrijkste conclusie op basis van de resultaten tot nu toe zijn

- op basis van theorie, literatuur en modellen is verhoging van de productie door luchtbeweging aannemelijk
- in de eerste experimenten werd bij grote luchtbeweging een toename of gelijk niveau van de productie gemeten
- een lage luchtbeweging zorgde voor een lager versgewicht van de planten.

Het ontbreken van gegevens over verdamping betekent dat de relatie tussen luchtbeweging en verdamping niet kan worden gelegd. Uit de beschouwing van Stanghellini komt naar voren dat deze geringer is dan de effecten op CO₂ opname. Door in het vervolg van de experimenten wel een voorziening voor verdampingsmeting te creëren kan de relatie mogelijk wel worden gelegd.

4 Conclusie

- Uit het denkkader, het literatuuronderzoek en de klimaatkamer experimenten blijkt dat effecten van luchtbeweging op groei als gevolg van luchtbeweging zeer aannemelijk zijn. De stofoverdracht tussen blad en omgeving wordt door een verhoogde luchtbeweging zeker bevorderd. De resultaten van de drie experimenten in de klimaatcellen geven aan dat luchtbeweging een effect heeft op de groei. De resultaten zijn echter anders dan verwacht. Bij lage luchtbeweging trad een afname in groei op, bij sterke luchtbeweging is er een toename in groei. Toch is de verwachting dat in een praktijkkas de fotosynthese zal toenemen omdat de luchtsnelheid hier wordt verhoogd van een geringe luchtsnelheid (10-20 cm/s) naar een hoge luchtsnelheid (0.4-0.7 m/s). In de experimenten was in deze range een stijging van de droge stof productie te zien.

▪ Voor het vervolg zijn twee wegen mogelijk. Voortzetting van experimenten in klimaatkamers, wat als voordeel heeft dat de klimaatcondities nauwkeuriger kunnen worden vastgehouden. Nadeel is dat niet de lichtniveau's van de zomer worden gehaald. De theorie voorspelt een grotere toename van de fotosynthese bij hogere lichtniveau's waarvoor experimenten in kassen met een luchtverdeelsysteem nodig zijn. Dit is de tweede mogelijkheid. Het experiment zou in twee gescheiden identieke kascompartimenten moeten worden uitgevoerd om een goede vergelijking te kunnen maken.

In een vervolg onderzoek zal naast de plantmetingen zoals die in de voorgaande experimenten zijn uitgevoerd ook de verdamping (uurlijks), de planttemperatuur en de fotosynthese worden gemeten. De meting van de fotosynthese zal gebeuren met de chlorofylfluorescentie methode omdat deze meting zonder additionele luchtbeweging nabij het blad kan worden gedaan. Ten slotte zal het luchtsnelheid profiel in het gewas in verschillende stadia worden gemeten.

Inzichten n.a.v. gesprekken met PRI en Ad Scahapendonk van Plant Dynamics

- De fysiologische gevolgen van de luchtbeweging zijn van groot belang op de productie. In de gesloten kas experimenten en ook bij het experiment in de klimaatkamer zorgt de luchtbeweging voor kleinere bladeren. Hierdoor neemt de LAI af en daarmee de fotosynthese.
- Luchtbeweging zorgt voor een homogener klimaat in de kas. Een gelijkmatiger verdeling van temperatuur, vocht en CO₂ kan ook de aanleiding voor een hogere productie.
- De luchtbeweging kan het beste worden toegepast bij de bladeren waar het meeste licht opvalt aangezien deze de hoogste fotosynthese hebben.

Literatuur

- Aalto, T. & E. Juurola, 2002. A three-dimensional model of CO₂ transport in airspaces and mesophyll cells of a silver birch leaf. *Plant, Cell and Environment* 22: 1399-1409
- Bakker, J.C.; Bot G.P.A.; Challa H.; Braak NJ van de, 1995. Greenhouse climate control an integrated approach. Wageningen pers, Wageningen.
- Dixon, M and J. Grace, 1984. Effect of wind on the transpiration of young trees. *Annals of Botany*, 53, 811-819.
- Gijzen, H., 1994. Ontwikkeling van een simulatiemodel voor transpiratie en wateropname en van een intergraal gewasmodel: Verslag van een onderzoek gedaan in opdracht van NOVEM. Rapport AB-DLO 18; 94 pp
- Heuvelink, E., 1996. Tomato growth and yield: quantitative analysis and synthesis. Wageningen, proefschrift, 326 pp.
- Houter, G., 1991. ECP - model: simulatiemodel voor energieverbruik, CO₂-verbruik en kg-productie in de glastuinbouw: eindverslag. Naaldwijk: Proefstation voor Tuinbouw onder Glas. Verslag 4; pp 30.
- Jones, H.G., 1998. Stomatal control of photosynthesis and transpiration. *Journal of Experimental Botany*, Vol 49, Special Issues, pp 287-398.
- Körner, O., 2003. Crop based climate regimes for energy saving in greenhouse cultivation. Wageningen, proefschrift, 240 pp.
- Monteith, J.L., 1973. Principles of Environmental Physics. Arnold, London.
- Nederhoff E M; Rijdsijk A A; Graaf R de (1992). Leaf conductance and rate of crop transpiration of greenhouse grown sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) as affected by carbon dioxide. *Scientia Horticulturae* 52 pp. 283-301
- Schoonderbeek, G.G., A. de Gelder, E.M.B. Heller en J.J.G. Opdam 2003, Telen in een gesloten tuinbouwkas; praktijkexperiment. E48031, Ecofys Utrecht
- Seginer, I and A. Livne, 1978. Effect of ceiling height on the power requirement of forced ventilation in greenhouses. *Acta Hort.* 87:51-68
- Stanghellini, C., 1987. Transpiration of greenhouse crops. An aid to climate management. Wageningen, proefschrift, 150 pp.
- Vesala T. (1998). On the concept of leaf boundary layer resistance for forced convection. *J. theor. Biol.* 194 91-100
- Vogelezang, J., P. van Weel, C. van Schijndel en Th. van den Berg, 1990. Tabletverwarming met geforceerde ventilatie. PBN, Aalsmeer, Proefverslag 1407-1.
- Willits, D.H., 2003. Coolinf Fan-ventilated Greenhouses: A Modelling Study. *Biosystems Engineering* 84(3):315-329
- Zuidema, P.A., W. Gerritsma, L. Mommer en P.A. Leffelaar, 2003. A physiological production model for cacao: Model description and technical program manual of Case2 version 2.2 Department of Plant Sciences, Wageningen University, The Netherlands.

Bijlage 1 Effect of increased wind speed on plant growth processes

Cecilia Stanghellini, July 2004

Content

1	Introduction	2
1.1	Boundary layer resistance	2
1.2	Effect on carbon dioxide and vapour transfer	4
1.3	Effect on leaf temperature	5
1.4	Discussion and conclusion	7
1.5	Literature	8

1. Introduction

A drastic increase of air speed in the greenhouse, such as by the forced ventilation rate in the closed greenhouse, can affect crop growth through several processes.

The most obvious is through a better mixing of the air, so that local high humidity and depletion of carbon dioxide within the canopy are prevented. Whiting & Lang, 2001, measuring with a whole-canopy cuvette, have shown that both the air distribution system and the canopy architecture have an effect on gas exchange and canopy temperature. This effect, therefore, needs to be analysed with more detail through CFD simulation. An additional advantage of this effect, is that it may allow for smaller “security margins” in the climate control.

Secondly, a higher “wind speed” obviously lowers the transfer resistance for carbon dioxide, which may mean increased carbon assimilation, other conditions being the same. And if the increased air speed would cause the prevailing transfer regime to become turbulent, the increase in transfer could be much higher than it would be predicted by existing greenhouse models (all based on the assumption of a laminar flow).

The biological trade-off of an increased carbon dioxide exchange, however, is a possibly increased transpiration rate, and that would affect leaf temperature, which in turn means: nearly all plant processes. In the next sections we describe first what can be expected on the basis of the theory of heat and mass transfer, and then analyse existing literature and unpublished results that may be relevant to this case.

1.1 Boundary layer resistance

The two main resistances in the exchange of gases (carbon dioxide and water vapour) between leaves and the air within a greenhouse are the stomatal and boundary layer resistances. As it is well known, stomatal resistance is regulated by the plant and its typical level varies among crops. The term “boundary layer resistance” refers to the existence of a layer between the leaf surface and the air, where the air properties (humidity and temperature) are still affected by the properties of the leaf surface. Gas exchange between the leaf and the “free” air takes place across this layer. In all literature about field crops, the “thickness” (hence the resistance) of this layer is calculated assuming the existence of a logarithmic profile of wind speed within the vegetated layer, broken by “roughness elements” whose size is typical of the vegetation, that determine the size of turbulent eddies within the canopy. This obviously does not hold in greenhouses, since air movement is usually very low, without a constant direction, so that heat and gas transfer driven by air movement (forced convection) may interfere with buoyancy effects (free convection) caused by the temperature of the leaves. Stanghellini (1987 and 1993) proved that:

- air movement in the boundary layer of leaves in a greenhouse is largely laminar (rather than turbulent)
- heat transfer across the boundary layer of leaves in a greenhouse could best be described by the vector sum of the free and forced convection fluxes calculated according to the heat transfer theory for laminar flow

In particular:

$$Nu = 0.37(\text{Gr} + 6.92 \text{Re}^2)^{1/4} \Rightarrow \alpha \approx \left[\frac{|T_l - T_a|}{d} + 200 \left(\frac{u}{d} \right)^2 \right]^{1/4} \quad \text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$$

where α is the heat transfer coefficient; d is the typical dimension of leaves (m); T_l and T_a are respectively the temperature of the leaves and of the air ($^{\circ}\text{C}$) and u is the “wind speed” (m s^{-1}). For negligible wind speeds this equation describes the pure “free convection” transfer and for negligible temperature differences it describes the pure forced convection. In fact, the free convection contribution to heat transfer is small for most greenhouse conditions, except with very high sun radiation; large leaves (such as cucumbers) or very small air movements (less than 5 cm s^{-1}),

The boundary layer resistance r_b is very easily related to the heat transfer coefficient through:

$$r_b = \frac{\rho c}{\alpha} \quad \text{s m}^{-1}$$

where ρc is the volumetric heat capacity of air ($\sim 1200 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$). Since transfer of water vapour in air is almost identical to transfer of heat, commonly no distinction is made between resistance to heat and to vapour transfer. However, since the molecule of carbon dioxide is much larger than that of vapour, transfer of CO_2 is less efficient:

$$r_{b,\text{CO}_2} \cong 1.56 r_{b,\text{H}_2\text{O}} \cong r_{b,\text{heat}} \quad \text{s m}^{-1}$$

From the first equation above, it may be deduced that if the free convection transfer can be neglected, the heat transfer coefficient changes with the square root of a change in wind speed (other things being the same). That is, if air movement increases from 10 cm s^{-1} (a good estimate for usual greenhouses) to 40 cm s^{-1} (measured values in the closed greenhouse), the transfer coefficient of heat, vapour and carbon dioxide doubles.

This is the lower boundary of estimates, since if this also means that the flow regime becomes more turbulent, the increase may be much larger. Theory does not predict transition to turbulent mode to take place at such low Reynolds numbers; however, there is plenty of literature showing that the presence of surrounding canopy elements (starting with Haseba, 1973), or indentations in the leaf edge (f.i. Grace & Wilson, 1976) or roughness of the leaf surface (up to Schreuder et al., 2001) lowers significantly the transition. A common result is then that heat and mass transfer are 25 to 30% larger than theory (f.i. Monteith & Unsworth, 1990) would predict.

Altogether, one would expect that the boundary layer resistance is 2 to 2.5 times smaller in the closed greenhouse than in a conventional Dutch greenhouse. In the next sections we will analyse what this may mean in term of plant processes related to growth.

1.2 Effect on carbon dioxide and vapour transfer

Dalton's law govern exchange of water vapour and carbon dioxide between leaves and the air outside the boundary layer:

$$E = \frac{C_{H_2O,leaf} - C_{H_2O,air}}{r_{s,H_2O} + r_{b,H_2O}} \quad A = \frac{C_{CO_2,air} - C_{CO_2,leaf}}{r_{s,CO_2} + r_{b,CO_2}} \quad \text{g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

where E and A are respectively the water loss by transpiration and the carbon dioxide assimilation; C is the concentration of the gas (g m^{-3}) and r_s is the stomatal resistance. A decrease of the boundary layer resistance therefore must enhance the gas exchange, although the final effect depends on how large is the stomatal resistance with respect to the boundary layer resistance. In most field conditions the boundary layer resistance is negligible with respect to the stomatal resistance, which does make evolutionary sense, since stomata evolved as a control mechanism. In greenhouses, however, the two are usually in the same order of magnitude (some 100 to 500 s m^{-1}), so that a variation in the boundary layer resistance must yield measurable effects on the gas flow. Obviously, this does not hold when assimilation is limited by other factors such as light intensity or photosynthetic capacity of leaves.

When speaking about transpiration, however, one has to keep in mind what is called the thermal feed back, that is: transpiration increases \rightarrow leaf temperature decreases \rightarrow vapour concentration at the leaf surface decreases \rightarrow vapour gradient decreases \rightarrow transpiration decreases. This “dampening” effect of the thermal feed back means that the effect of a variation of the boundary layer resistance must be more apparent on the assimilation than on the transpiration rate. This is confirmed by the results shown in Fig. 1, referring to a cuvette experiment performed by A&F for the Hydrionline II project (EETK02032).

In the experiment we measured net carbon exchange rate of four tomato leaves (35 to 40 days old) in response to variations in carbon dioxide concentration, at a constant light level (1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). The flow in the cuvette was changed halfway, so that 2 leaves were measured with a r_{b,H_2O} of 70 s m^{-1} , and two with a boundary layer resistance 20% higher. The left panel of Fig. 1 shows the assimilation rate A , vs the carbon dioxide concentration of the air, $C_{CO_2,air}$, that was the forcing factor in the experiment. Obviously, the transpiration rate is not affected by $C_{CO_2,air}$ except for the known reaction of stomata closing (\rightarrow increasing stomatal resistance) with increasing $C_{CO_2,air}$. Therefore the right panel of Fig. 1 shows the transpiration rate, E , measured in the two cases, vs the measured stomatal resistance, r_{s,H_2O} . It can be observed that the data confirm the analysis: the effect of changing boundary layer resistance is more evident in the assimilation than in the transpiration rate, and in the latter it is more evident at small than at large stomatal resistances.

As far as we were able to find out, only Kitaya et al., 2003 and Kitaya and al., 2004 have made whole canopy experiments, aimed at finding out the effect of air movement on growth of various

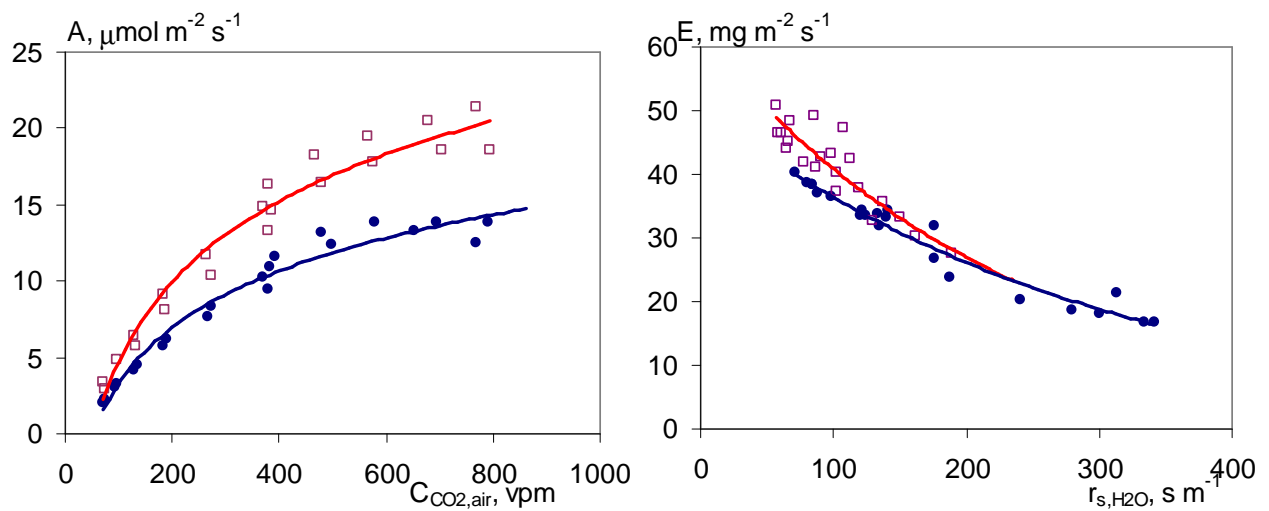


Figure 1: Left: net carbon exchange rate response to ambient carbon dioxide concentration, measured on tomato leaves in a cuvette with boundary layer resistance 70 s m^{-1} (open symbols) and 20% higher (closed symbols). Right: concurrent data of transpiration, plotted against the stomatal resistance (that varied in response to the variation of carbon dioxide concentration).

crops in life support systems in space. Therefore, their “canopies” were limited to seedlings of a few weeks. Their most relevant results are shown in Fig. 2, which allows for a number of observations.

As said above, the boundary layer resistance increases at least with the square root of wind speed, but the effect on assimilation depends on the size of the boundary layer resistance with respect to the stomatal resistance. Since the left panel of Fig. 2 (whole canopy assimilation) shows assimilation to increase roughly with 70% of the square root of wind, one may infer that the two resistances are about the same at a wind speed of 10 cm s^{-1} . The two panels on the right show assimilation per unit leaf area with respect to wind speed at the leaf surface (the speed within the canopy decreased by increasing leaf area index: above the canopy it was 1 m s^{-1}). It is clear that assimilation reaches a ceiling beyond which there is no effect of wind speed, since other factors may be limiting. One could have been light intensity (the least dense canopy has a higher saturation level than the other two), another ambient CO_2 concentration. This may be deduced by comparing the two panels on the right: the far right one displays results at a CO_2 concentration of 800 vpm , whereas the other one at 400 vpm .

1.3 Effect on leaf temperature

We know that temperature is the factor that balances the energy flows in and out of a leaf, that is radiation, transpiration and sensible heat exchange. Since transpiration, sensible heat exchange and, to a lesser extent, net radiation, all depend on leaf temperature, it is easy to see that this must have an “equilibrium value” that is determined by external factors, such as sun radiation and air humidity, as well as “crop” ones, such as stomatal and boundary layer resistance.

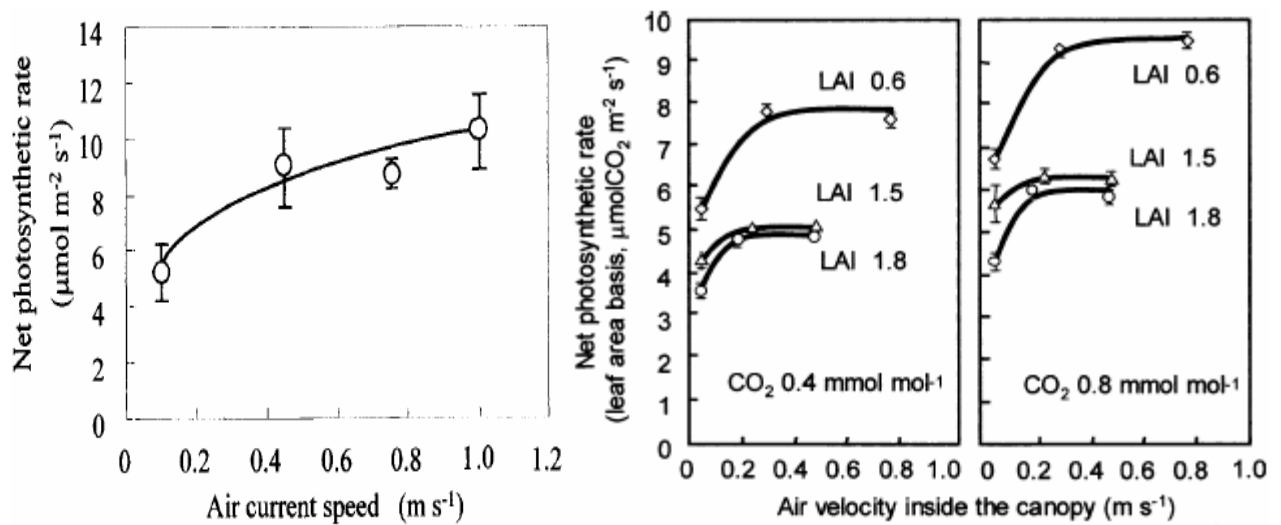


Figure 2: Left: net carbon exchange of a canopy of tomato seedlings, in response to changing air velocity in the growth chamber, ambient CO_2 concentration was 400 vpm, and light intensity $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (from Kitaya et al., 2003). Center and right: the same, this time per unit leaf area, analysing the additional factor leaf area index (air velocity in the canopy decreased with LAI) and the factor ambient carbon dioxide concentration (center is 400 vpm; right is 800 vpm).

Changing the boundary layer resistance, therefore, changes the equilibrium temperature. If that means getting warmer or cooler, depends on the conditions. This is not the place to make a complete analysis of this effect, since what is of importance here is whether the crop is likely to get warmer or cooler and by how much. An attempt to show what might happen is in Fig. 3. In theory, if the boundary layer resistance were zero, leaves would be exactly at air temperature, since sensible heat transfer would be the most efficient way to exchange energy. Therefore, near this extreme, any lowering of the boundary layer resistance must get leaf temperature nearer to air temperature, that is: if leaves are warmer than air, their temperature will decrease and it will increase if they are cooler than air. However, there is an intermediate regime where lowering the boundary layer resistance cools the leaves to well below air temperature (energy release by transpiration is more efficient than by sensible heat exchange), and only lowering the resistance further does warm up leaves towards air temperature.

Since in Dutch glasshouses air temperature is controlled around the optimum for growth, whatever decreases the deviation of leaf temperature from what is controlled, must be beneficial. Therefore one would expect that increased air movement must have a positive effect on growth and not only because increased assimilation. However, we have seen that there is a range of micrometeorological conditions (that can be identified) where lowering the boundary layer resistance may actually cool leaves further. The air movement needs to be increased more before the trend is reversed and leaves approach air temperature.

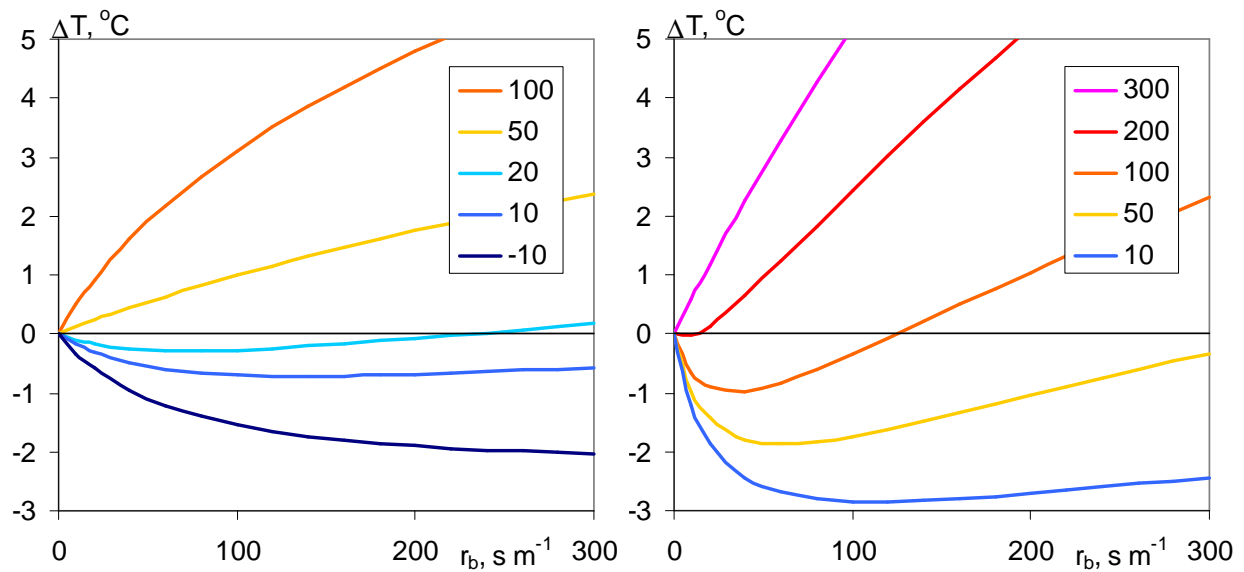


Figure 3: Left: theoretical temperature difference between leaves and air as function of the boundary layer resistance, for the net radiation indicated (W m^{-2}). Left: air temperature is 19°C ; relative humidity 75% and stomatal resistance 300 s m^{-1} . Right: air temperature 25°C ; RH 65% and stomatal resistance 100 s m^{-1} . After Stanghellini, 1987.

1.4 Discussion and conclusion

Some word of caution is due: Hammer & Evensen found that post-harvest susceptibility of greenhouse roses was positively correlated with mean wind speed in the greenhouse in the 5 weeks before harvest, in a range between 6 and 22 cm s^{-1} . Since their result display also a positive correlation between leaf-to-air temperature gradient and wind speed (in spite of large spreading), their data must largely come from the range of conditions where a decreasing boundary layer resistance may lower leaf temperature. Nevertheless, they found out the same negative effect of wind speed on susceptibility to *Botrytis* in roses from growth chambers where air movement was controlled respectively to 18 and 55 cm s^{-1} .

In addition, Clemente & Marler, 2001, have shown that also dark respiration is much increased by wind, and in their case the net result of wind exposure on assimilation was negative, though referring to wind speeds much larger than we are dealing here.

As we have seen, carbon assimilation must increase (so does, to a lesser extent, crop transpiration) with an increase in wind speed, whenever photosynthesis is not limited by other factors. The magnitude of the effect depends on the relative size of the boundary layer and of the stomatal resistance. In addition, an increase in air speed in many micrometeorological conditions has a positive effects on canopy temperature by getting it nearer to the temperature of the air. However, the conditions that would cause just the reverse to happen may well take place in a greenhouse. Overall conclusion, therefore, is the combined effect of an increase of “wind speed” within the canopy in the range between 5 to 50 cm s^{-1} is most likely increased production (though it would not be easy to forecast a priori by how much) and, to a much lesser extent, more

transpiration.

1.5 Literature

- Clemente, H.S. & Marler, T.E., 2001. Trade winds reduce growth and influence gas exchange patterns in papaya seedlings. *Ann. Bot.* 88:379-385.
- Grace, J & Wilson, J., 1976. The boundary layer over a *Populus* leaf. *J. Exptl. Bot.*, 27:231-241.
- Hammer, P.E. & Evensen, K.B., 1996. Effects of the production environment on the susceptibility of rose flowers to postharvest infection by *Botrytis cinerea*. *J.Amer.Soc.Hort.Sci.* 121(2):314-320.
- Haseba, T., 1973. Water-vapour transfer from leaf-like surfaces within canopy models. *J. Agric. Meteorol.*, Tokio, 29:25-33
- Kitaya, Y., Tsuruyama, J., Shibuya, T., Yoshida, M. & Kiyota, M., 2003. Effects of air current speed on gas exchange in plant leaves and plant canopies. *Adv. Space Res.*, 31(1): 177-2003.
- Kitaya, Y., Shibuya, T., Yoshida, M. & Kiyota, M., 2004. Effects of air velocity on photosynthesis of plant canopies under elevated CO₂ levels in a plant culture system. *Adv. Space Res.*, in press, available on line at www.sciencedirect.com.
- Kittas C., T. Bartzanas & A Jaffrin; 2003. Temperature Gradients in a Partially Shaded Large Greenhouse equipped with evaporative cooling Pads. *Biosystems Engineering*, 85(1):87-94
- Monteith, J.L. & Unsworth, M.H. *Principles of environmental physics*. Edward & Arnold Publishing Co., London: 291 pp.
- Schreuder, M.D.J., Brewer, C.A. & Heine, C., 2001. Modelled influences of non-exchanging trichomes on leaf boundary layers and gas exchange. *J. Theor. Biol.*, 210: 23-32.
- Stanghellini, C., 1987. *Transpiration of greenhouse crops: an aid to climate management*. PhD dissertation, Wageningen University: 150 pp.
- Stanghellini, C., 1993. Mixed convection above greenhouse crop canopies. *Agric. For. Meteorol.*, 6: 111-117.
- Whiting, M.D. & Lang, G.A., 2001. Canopy Architecture and Cuvette Flow Patterns Influence Whole-canopy Net CO₂ Exchange and Temperature in Sweet Cherry. *HortScience* 36(4):691-698.

Bijlage 2 Meetgegevens

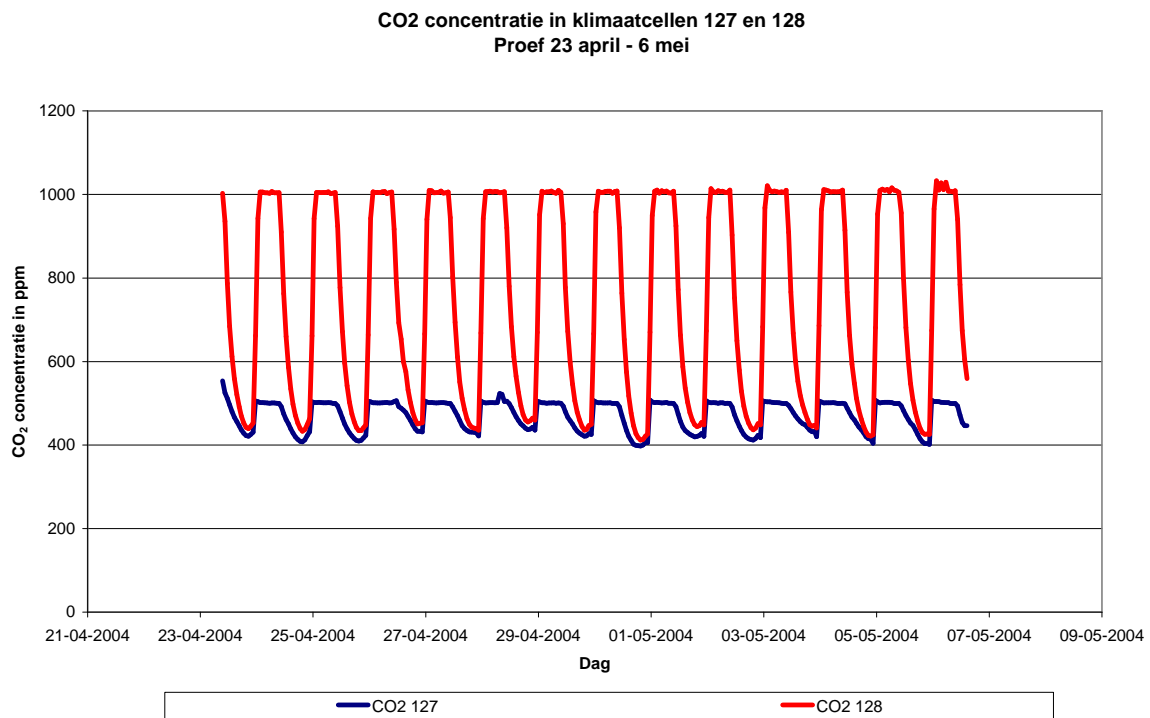
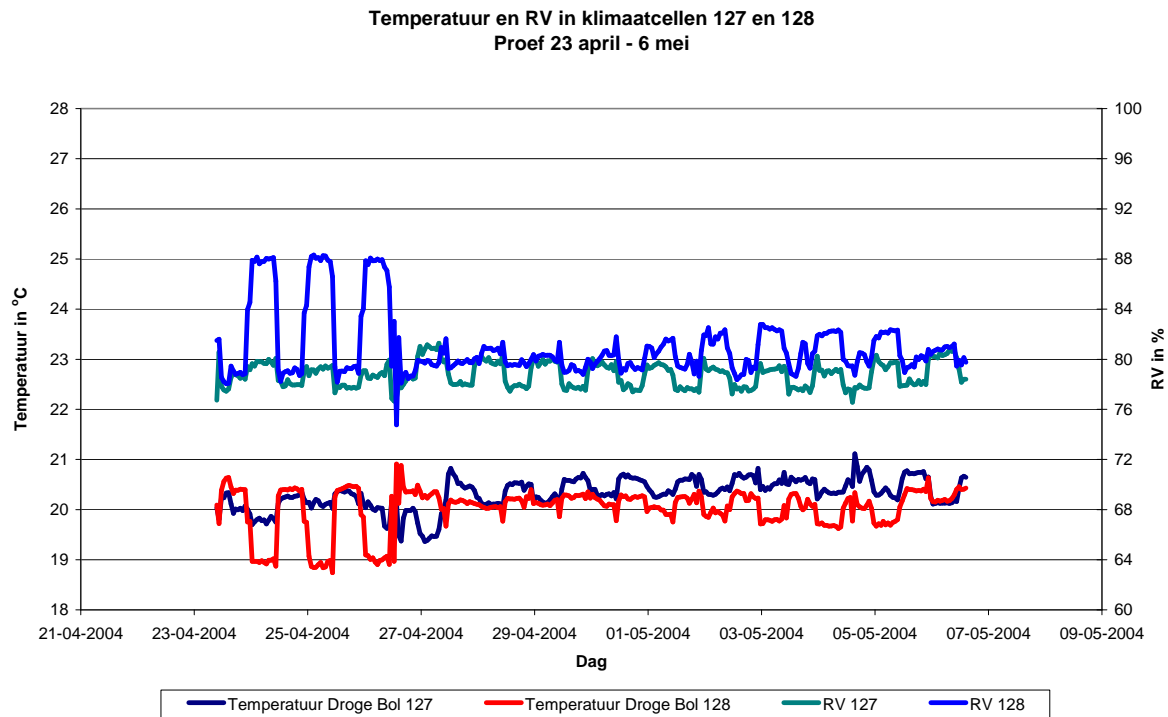
Gegevens over plantkenmerken aan het einde van een experiment met luchtbeweging in de periode 23 april- 6 mei 2004

Orgaan			CO ₂ niveau in ppm			Luchtbeweging					
			500	1000	betrouwbaar verschil	geen	1m/s	5 m/s	betrouwbaar verschil		
		eenheid									
Plant	vers gewicht	gram	90	101	Ja	99	90	97	b	a	ab
	droog gewicht	gram	8.8	10.2	Ja	9.8	8.7	10.1	b	a	b
	droge stof %	%	9.8	10.2	Ja	9.8	9.6	10.5	a	a	b
Hoofdtak											
Blad	vers gewicht	gram	59.4	66.8	Ja	66.1	59.3	64.0			
	droog gewicht	gram	6.7	7.8	Ja	7.4	6.5	7.7	b	a	b
	droge stof %	%	11.2	11.6	Ja	11.2	11.0	12.1	a	a	b
	aantal		10.9	11.2		11.1	11.2	10.9			
	oppervlakte	cm ²	1380	1295		1424	1263	1326			
Steel	vers gewicht	gram	25.0	27.0		26.7	24.8	26.5			
	droog gewicht	gram	1.6	1.8	Ja	1.7	1.5	1.7			
	droge stof %	%	6.2	6.5	Ja	6.3	6.2	6.6	a	a	b
	lengte	cm	31	30		31	30	30			
Dief	vers gewicht	gram	5.4	6.7	Ja	6.4	5.6	6.2			
	droog gewicht	gram	0.6	0.7	Ja	0.7	0.6	0.7			
	droge stof %	%	10.8	10.4		10.3	10.6	10.8			
	aantal		8.3	8.9	ja	8.7	8.2	9.0			

Gegevens over plantkenmerken aan het einde van een experiment met luchtbeweging in de periode 12 mei- 9 juni 2004

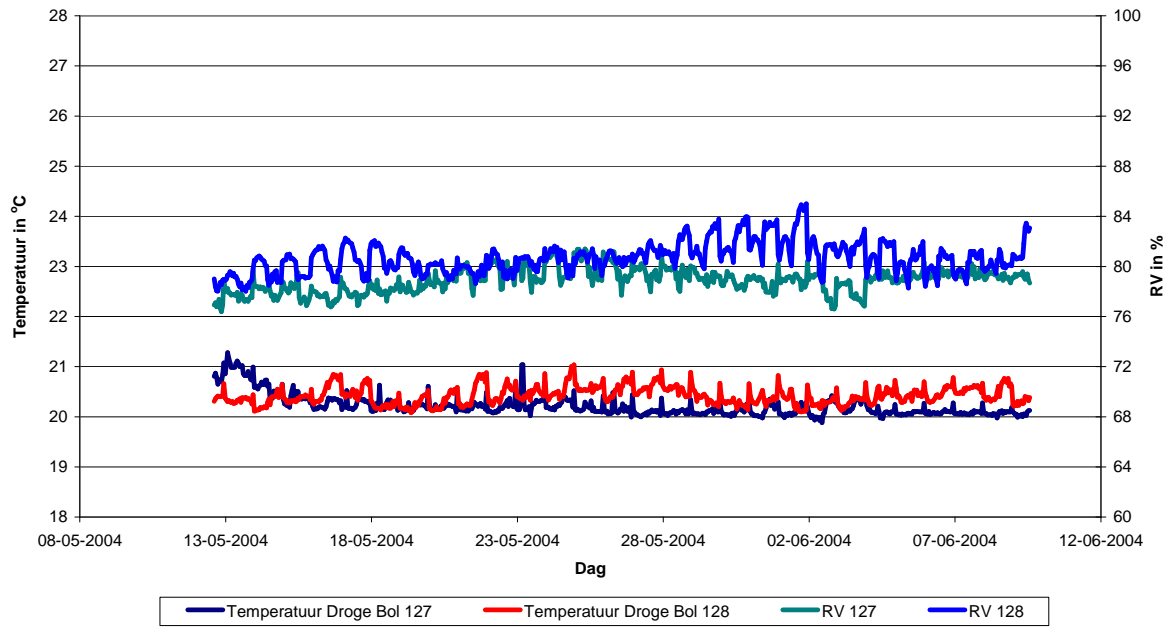
Orgaan	Waarneming	eenheid	CO ₂ niveau in ppm			Luchtbeweging					
			500	1000	betrouwbaar verschil	geen	1m/s	5 m/s	betrouwbaar verschil		
Plant	vers gewicht	gram	1087	988	ja	1011	1081	1021			
	droog gewicht	gram	84.7	87.6		84.4	81.6	92.3	a	a	b
	droge stof %	%	7.8	8.9	ja	8.5	7.6	9.0	b	a	c
Hoofdtak	Blad vers gewicht	gram	304	299		295	311	299			
	droog gewicht	gram	26.7	30.0	ja	27.8	27.2	30.1	a	a	b
	droge stof %	%	8.8	10.1	ja	9.5	8.8	10.0	b	a	c
	oppervlakte	cm ²	5418	5530		4993	5886	5543			
Steel	vers gewicht	gram	146	142		138	148	146			
	droog gewicht	gram	11.2	12.6	ja	11.6	11.0	13.2	a	a	b
	droge stof %	%	7.7	8.9	ja	8.4	7.5	9.0	b	a	b
	lengte	cm	105	92	ja	97	100	99			
Dief	Blad vers gewicht	gram	256	238		249	247	246			
	droog gewicht	gram	24.9	25.0		24.9	22.9	27.0			
	droge stof %	%	9.7	10.6	ja	10.1	9.4	11.0	a	a	b
	oppervlakte	cm ²	5067	4108	ja	4565	4826	4372			
Steel	vers gewicht	gram	381	309	ja	329	376	330	a	b	a
	droog gewicht	gram	21.9	20.0	ja	20.2	20.6	22.0			
	droge stof %	%	5.8	6.5	ja	6.3	5.6	6.6	b	a	c
	lengte	cm	50	37	ja	43	47	41	a	b	a

Bijlage 3 Gerealiseerd klimaat in de klimaatcellen

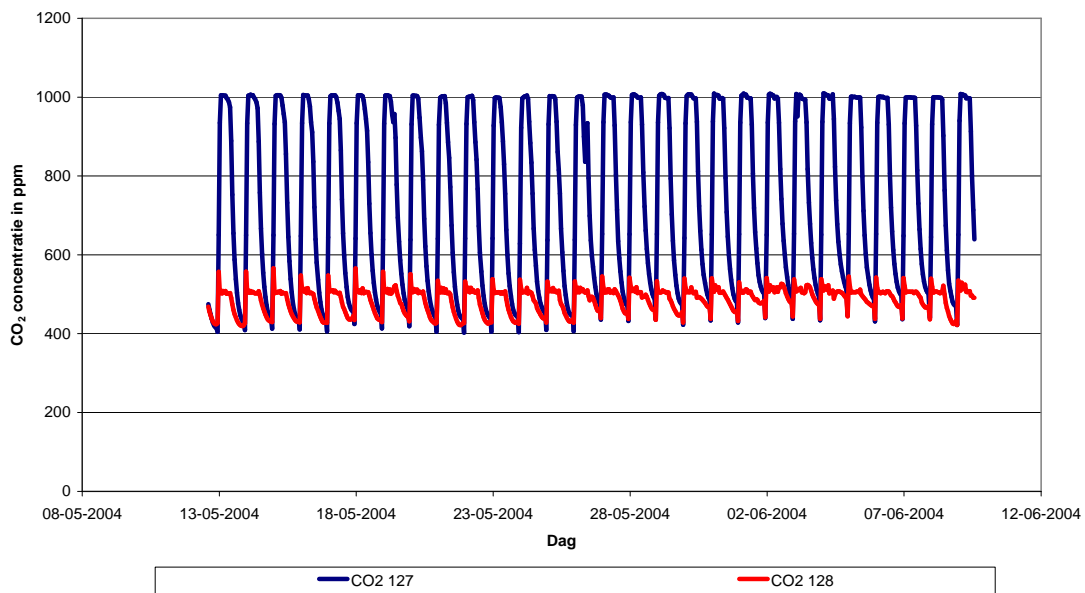


Figuur 1 Weergave gerealiseerd klimaat in eerste experiment

Temperatuur en RV in klimaatcellen 127 en 128
 Proef 12 mei- 9 juni

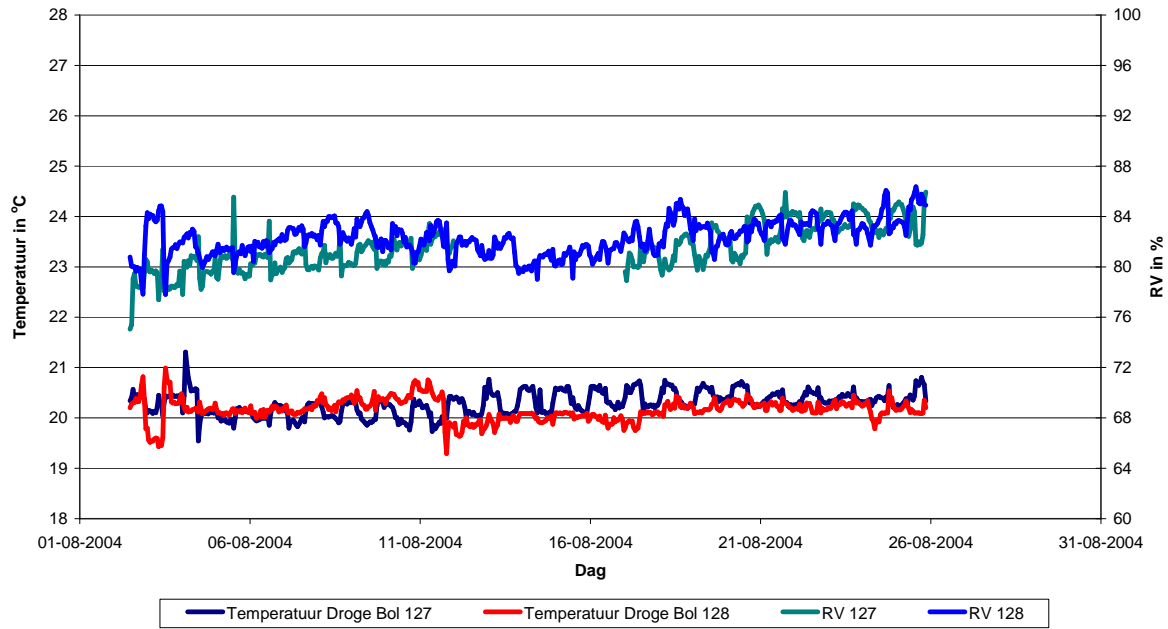


CO₂ concentratie in klimaatcellen 127 en 128
 Proef 12 mei - 9 juni

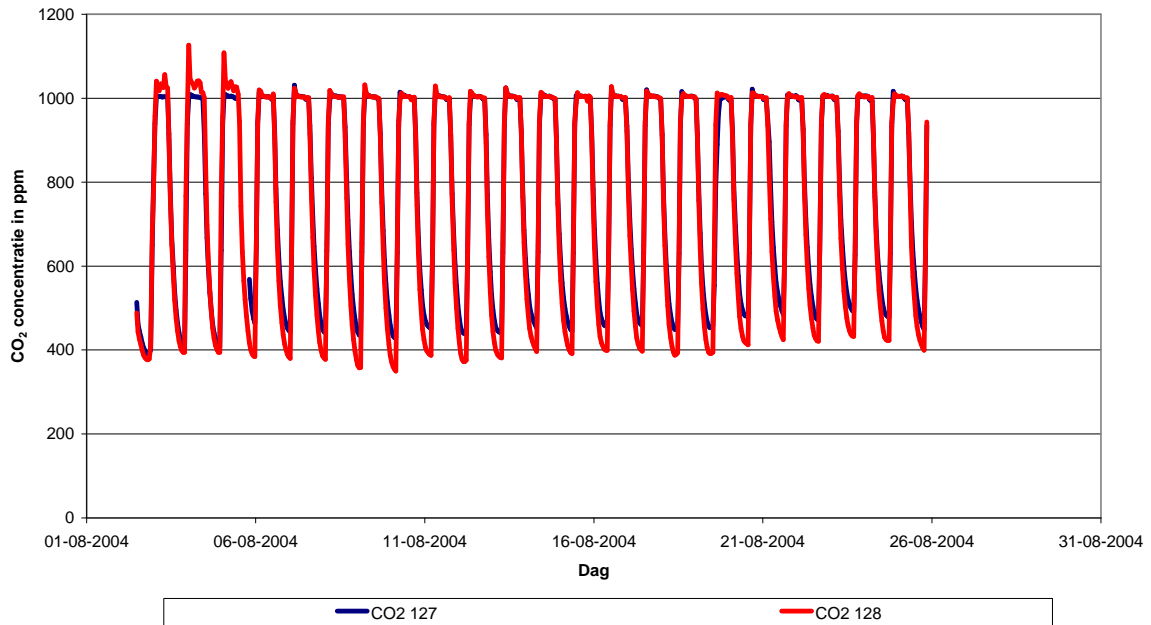


Figuur 2 Weergave gerealiseerd klimaat in tweede experiment

Temperatuur en RV in klimaatcellen 127 en 128
Proef 2 augustus - 25 augustus



CO₂ concentratie in klimaatcellen 127 en 128
Proef 2 augustus - 25 augustus 2004



Figuur 3 Weergave gerealiseerd klimaat in het derde experiment

Bijlage 4: Energieverbruik t.b.v. de luchtverplaatsing

Het energieverbruik voor de luchtbeweging wordt bepaald door het benodigde vermogen voor de ventilator. Het benodigde ventilator vermogen P wordt berekend met

$$P = \frac{1}{\eta} \phi_V \Delta p$$

waarin ϕ_V het volume debiet is in m^3s^{-1} ; Δp het drukverschil is dat door de ventilator wordt opgebouwd; en η is het rendement van de ventilator. Het rendement ligt voor kleinere ventilatoren of compressoren op 50%.

Grotere gaten, met meer volume debiet bij gelijk drukverschil resulteren in een lager benodigd vermogen. De totale oppervlakte van de gaten mag echter niet groter zijn dan de diameter van het luchtverdeekanaal. Een PVC buis met een diameter van 10 cm heeft een oppervlak van $7.9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$. Als de buis 6 m lang is en er om de 10 cm een gaatje zit mag de diameter van het gaatje maximaal 1.3 cm worden.

Tabel 4 Diameter van gaatje, druk over gaatje, debiet door gaatje, en benodigd vermogen bij een rendement van 50%.

d, m	p, Pa	ϕ_V , $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	P, W
3	100	$7.9 \cdot 10^{-5}$	0.016
3	200	$1.1 \cdot 10^{-4}$	0.046
3	500	$1.81 \cdot 10^{-4}$	0.182
3	1000	$2.6 \cdot 10^{-4}$	0.520
5	100	$2.3 \cdot 10^{-4}$	0.046
5	500	$5.2 \cdot 10^{-4}$	0.520
8	200	$8.2 \cdot 10^{-4}$	0.320
10	100	$9.3 \cdot 10^{-4}$	0.186

Uitgaande van het maximale vermogen is er $14\text{kWh}/\text{m}^2/\text{jaar}$ nodig als het systeem alleen wordt gebruikt als het lichtniveau boven de $50\text{W}/\text{m}^2$ komt. Dit komt neer op $56 \text{ eurocent}/\text{m}^2$. De verwachte productiestijging zal deze kosten ruimschoots goed maken.

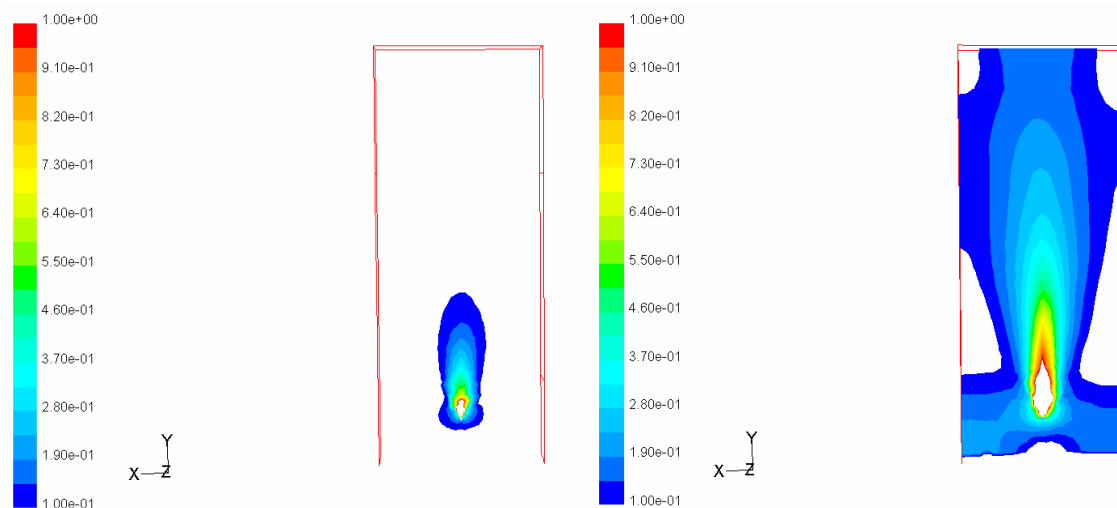
Bijlage 5: CFD analyse van systeem voor luchtbeweging

In de klimaatkamer worden extra luchtcirculaties systemen aangebracht omdat:

- De luchtsnelheid kan wordt gevarieerd
- De positie van het luchtdistributie systeem kan worden bepaald

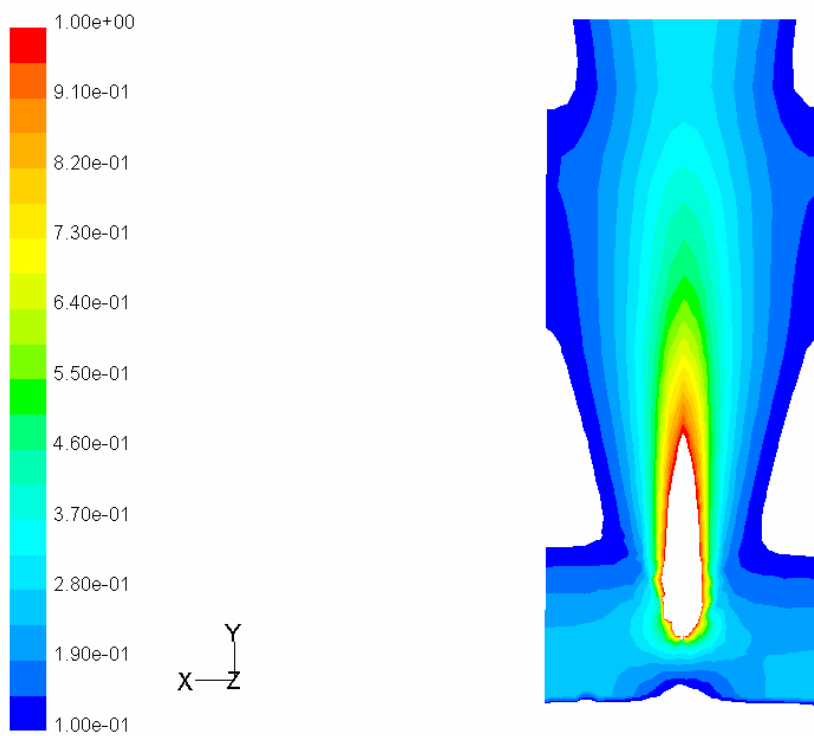
Twee identieke klimaatkamers van 4.28 x 7.10 x 2.15 m (b x l x h) worden hierbij gebruikt. Het klimaat (CO₂, temperatuur, luchtvochtigheid) in deze ruimtes kan nauwkeurig worden geregeld. De zijwanden van de klimaatkamer bestaan uit metalen platen waarin gaatjes met een diameter van 4.8 mm zitten. De doorstroomsnelheid is 3.9 cm s⁻¹.

In de klimaatcel zullen PVC buizen geplaatst worden met gaatjes waardoor een luchtstroom richting het gewas wordt opgewekt. Middels CFD berekeningen is gekeken welke afmeting de gaatjes moeten hebben om voldoende luchtbeweging bij het gewas te krijgen. De druk en de diameter van de gaatjes zijn gevarieerd. Het gaatje bestaat uit een 1 cm lang buisje welke 10 cm onder het gewas is geplaatst. Voor het gewas is een hoogte van 50 cm genomen met een luchtweerstand. De gaatjes zijn om de 10 cm geplaatst. De luchtbeweging kan worden gemaakt door een klein gaatje waardoor de lucht onder hoge druk wordt geperst of een groter gat met een lagere druk. Het voordeel van een kleiner gat is dat het debiet lager is waardoor de diameter van de buis kleiner kan worden.

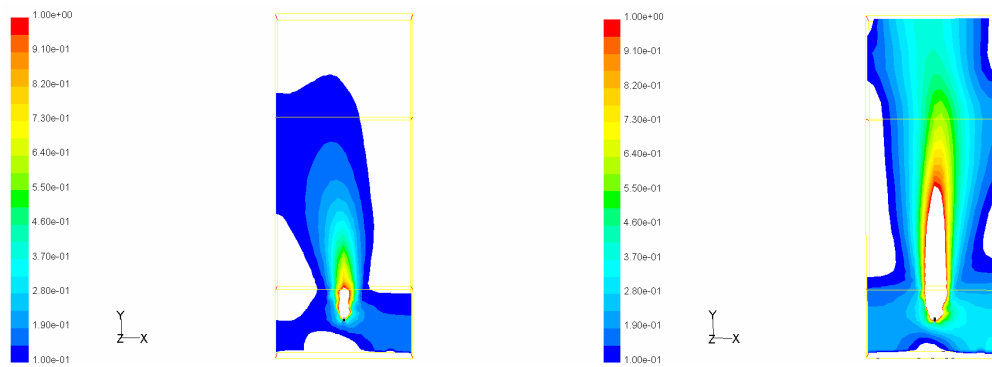


Figuur 4 Snelheidsprofiel loodrecht op de aanvoerbuis in het vlak van het buisje met een lengte van 1 cm en een diameter van 3 mm met 100 Pa druk (links) en 500 Pa (rechts)

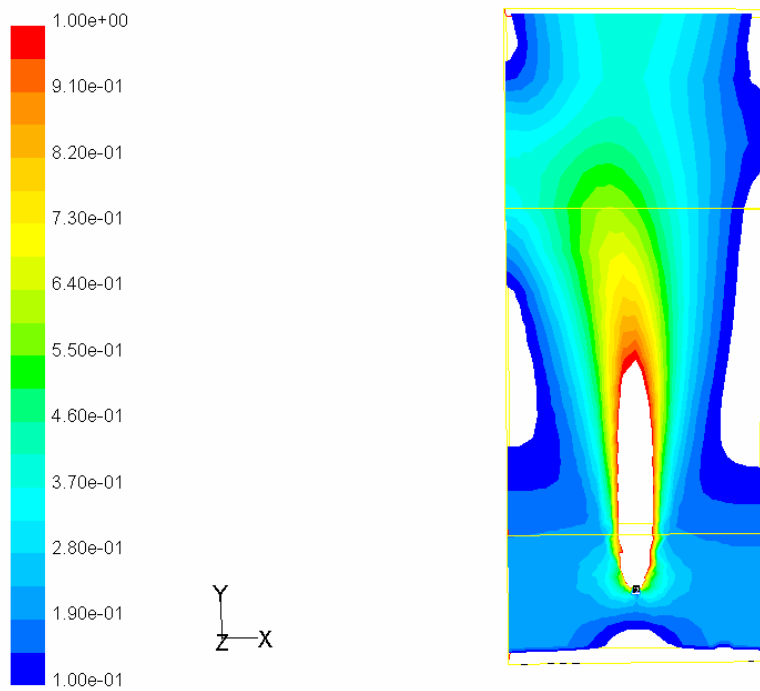
Het debiet bij een druk van 500 Pa is $1.82 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, wat betekent dat het benodigde vermogen minder dan 0.1 W is.



Figuur 5 Snelheidsprofiel loodrecht op de aanvoerbuis in het vlak van het buisje met een lengte van 1 cm en een diameter van 3 mm met 1000 Pa druk

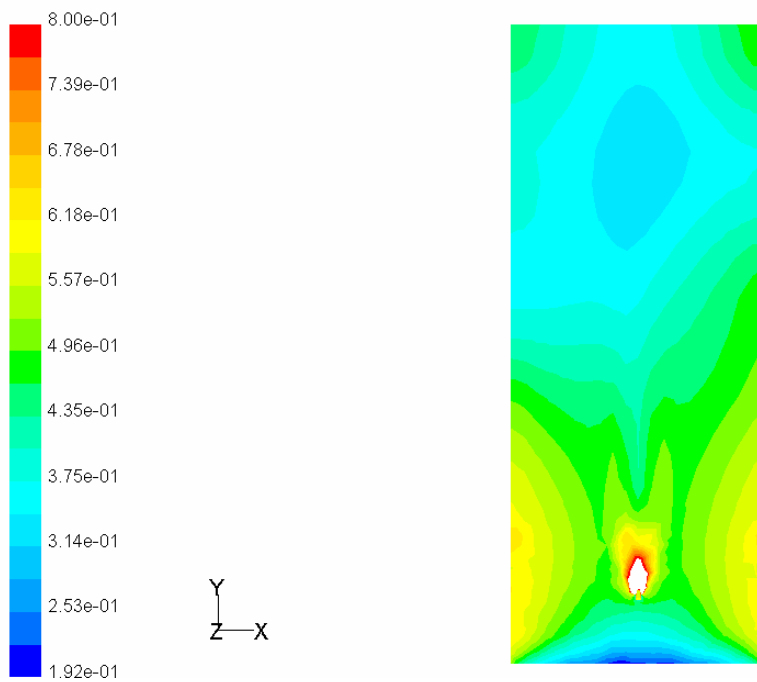


Figuur 6 Snelheidsprofiel loodrecht op de aanvoerbuis in het vlak van het buisje met een lengte van 1 cm en een diameter van 5 mm met 100 Pa druk (links) en 500 Pa (rechts)

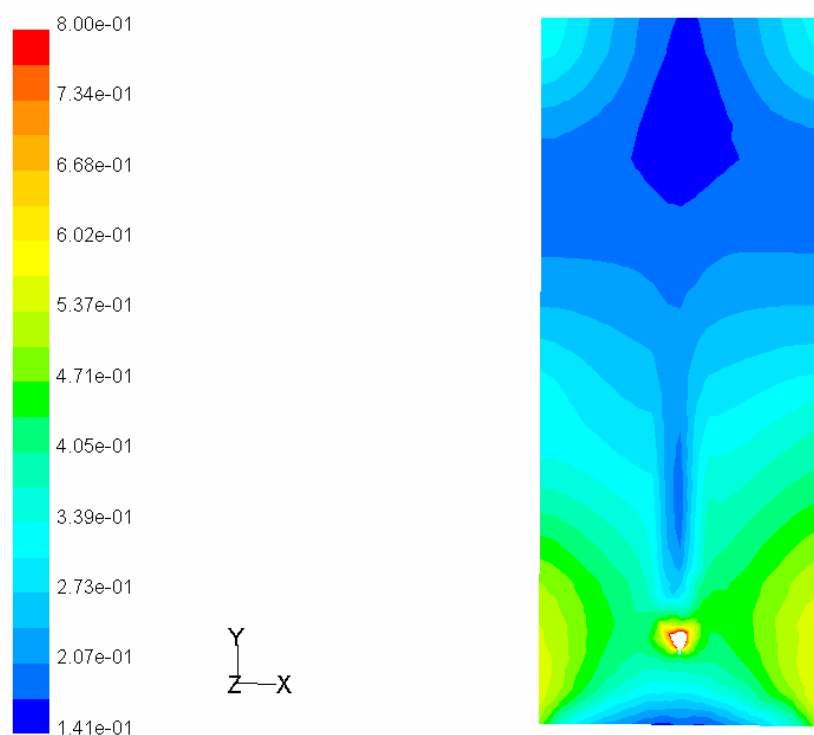


Figuur 7 Snelheidsprofiel loodrecht op de aanvoerbuis in het vlak van het buisje met een lengte van 1 cm en een diameter van 10 mm met 100 Pa druk

Een gaatje met een diameter van 3 mm en een druk van 1000 Pa kan een zelfde hoeveelheid luchtbeveging maken als een gaatje met een diameter van 10 mm en een druk van 100 Pa. Het gebruik van een kleinere diameter kost wel meer energie maar minder debiet, waardoor de toevoerslangen kleiner kunnen zijn.



Figuur 8 Turbulentie intensiteit bij een druk van 100 Pa en een diameter van het buisje van 10 mm



Figuur 9 Turbulentie intensiteit bij een druk van 1000 Pa en een diameter van het buisje van 3 mm

De turbulentie intensiteit (de variatie in de luchtstromingen in de tijd t.o.v. de gemiddelde luchtsnelheid) welke als randvoorwaarde dient voor de berekening is op basis van bovenstaande formule op 5% ingesteld. Voor de hydraulische diameter is de diameter van de pijp gebruikt. Overigens heeft de grootte van de turbulentie intensiteit weinig invloed op de turbulentie in het gewas zoals in weergegeven in bovenstaande figuur. De wervelingen die ontstaan als de lucht uit de pijp komt bepaald de turbulentie nabij het gewas. De pijp met een grote diameter veroorzaakt meer turbulentie.

Praktische toepassing luchtbeweging in de kas

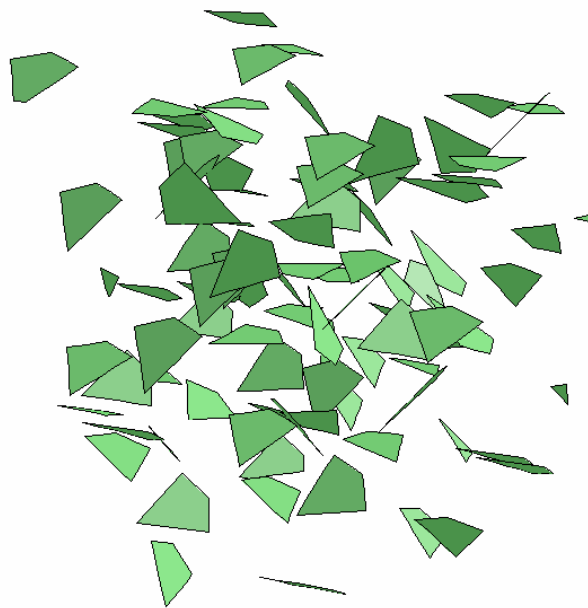
Uitgaande van de theorie heeft een relatief grote luchtbeweging het meeste resultaat. Toepassing van luchtslangen welke onder en tussen het gewas worden geplaatst lijkt de meest praktische oplossing. Hoe dichter de uitblaasopeningen bij het gewas in de buurt komen hoe beter het effect.

De diameter van de gaatjes in de luchtslang hangt af van de lengte van de slang. De diameter moet zo groot mogelijk gekozen worden om het ventilatorvermogen zo gering mogelijk te houden. Kleine buisjes op de luchtslang kunnen zorgen voor de luchtstroom richting het gewas.

De luchtsnelheid ter plaatse van het gewas is een afweging tussen de meeropbrengst en de energiebehoefte van de ventilator.

Bijlage 6: Modelvorming voor gewasexperimenten

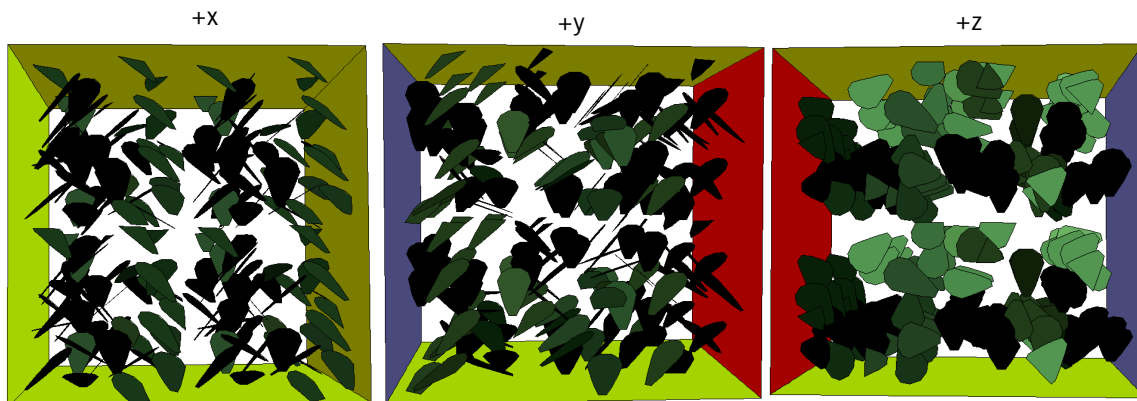
De relatie tussen de luchtsnelheid en warmteoverdracht van een gewas wordt bepaald met CFD. Hiertoe wordt het gewas gemodelleerd. Het gewas is gemodelleerd door de bladeren als vlakken te plaatsen in een volume. Het aantal vlakken wordt bepaald door de LAI van het gewas en de hoogte van het gewas. Over het model wordt een luchtstroming aangebracht met een bepaalde temperatuur. De bladeren in het model krijgen een temperatuur en de hoeveelheid warmte die van de bladeren naar de lucht stroomt wordt berekend. Hieruit wordt de warmteoverdrachtscoëfficiënt bepaald. Warmteoverdracht is eenvoudiger te berekenen dan stofoverdracht met CFD, en middels de theorie van paragraaf **Fout! Verwijzingsbron niet**



gevonden. is de stofoverdracht te bepalen uit de warmteoverdracht.

Figuur 10 Gewasmodel van tomaat

Voor tomaat is een kubus met de afmeting van 0.6 meter gevuld met bladeren die dezelfde afmetingen hebben als een tomatenplant. Het aantal bladeren in het volume zorgt ervoor dat er $1.57 \text{ m}^2/\text{m}^3$ bladoppervlak (éénzijdig) aanwezig is, wat overeenkomt met tomaat. De grootte van het blad in het model is gelijk.



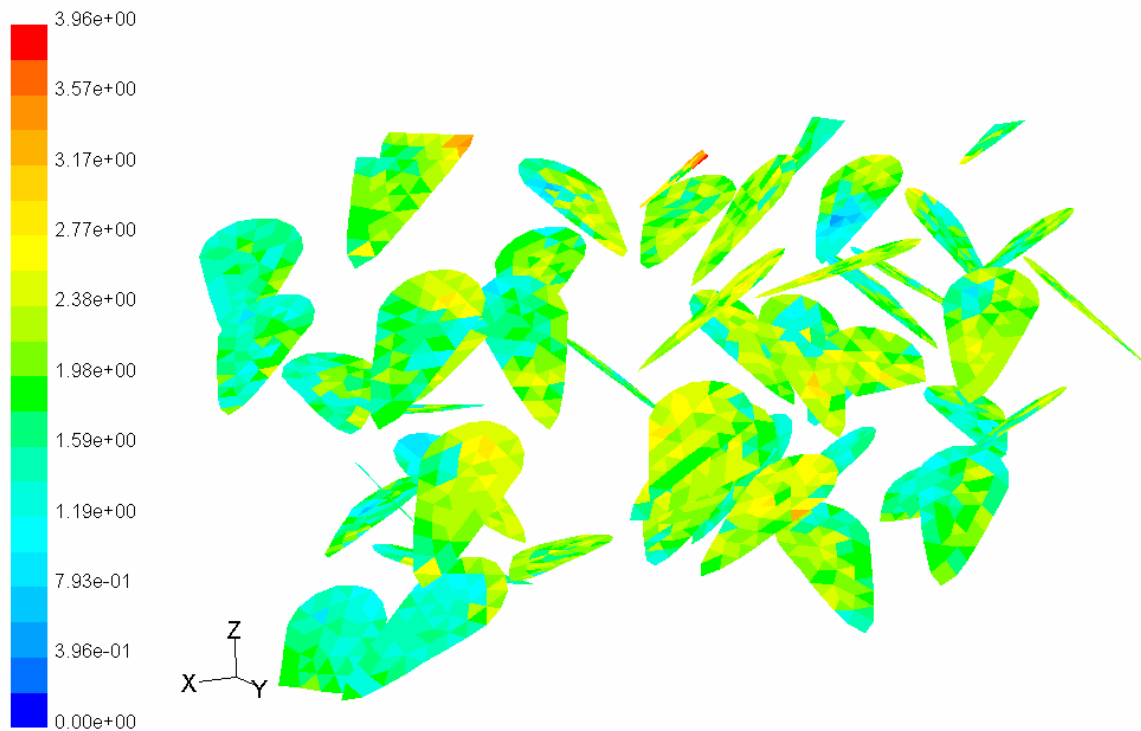
Figuur 11 Het model van paprika gezien van verschillende kanten

Paprika is ook gemodelleerd. Het blad van paprika heeft een lengte van 18 cm en een breedte van 10 cm met een totaal oppervlak van 0.0114 m².

De turbulentie in de lucht die ontstaat door de luchtinblaas is van invloed op de warmte- en stofoverdracht bij de bladeren. Hoe hoger de turbulentie, hoe groter de overdracht. In het CFD programma wordt met een turbulentie intensiteit gewerkt, welke is gedefinieerd als de variatie in de stroming gedeeld door de gemiddelde snelheid.

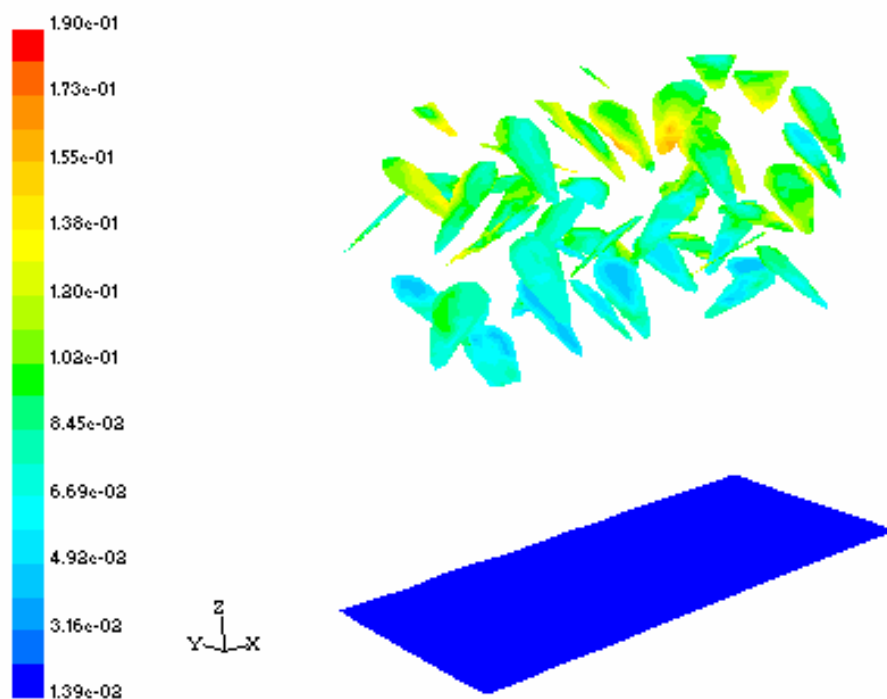
$$I \equiv \frac{u'}{u} \cong 0.16 \text{Re}^{-1/8} \quad (2)$$

Een intensiteit van minder dan 1% geeft aan dat de stroming weinig turbulent is, meer dan 10% is hoog turbulent (Fluent, 1998).



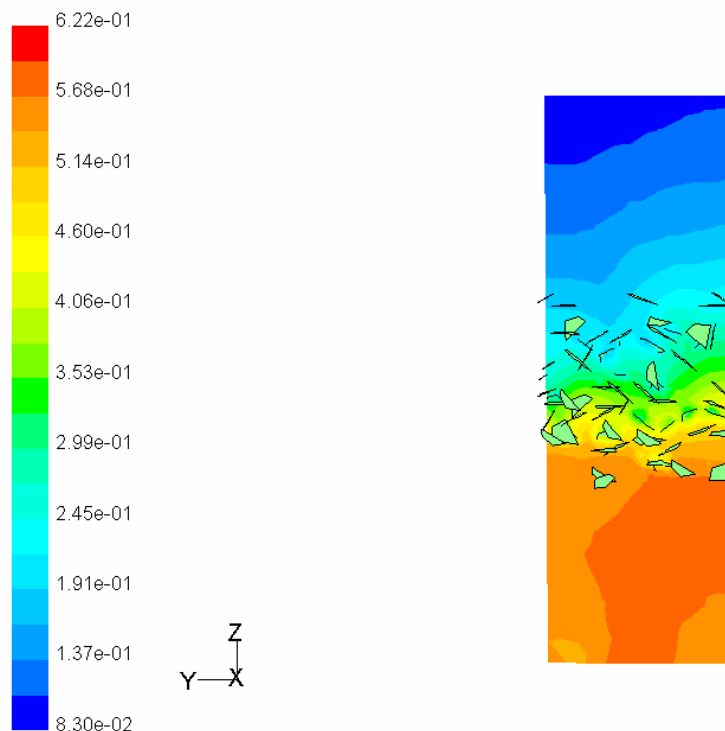
Figuur 12 Warmteoverdrachtscoëfficiënt aan de onderzijde van het blad bij een luchtsnelheid van 5 cm/s

Bovenstaand figuur laat de lokale warmteoverdrachtscoëfficiënt zien. Door de locatie van de bladeren hebben niet alle bladeren dezelfde warmteoverdracht. De gemiddelde warmteoverdrachtscoëfficiënt is 3.6 Wm²K⁻¹ bij 5 cm/s.



Figuur 13 Turbulentie in het gewas bij een snelheid van 40 cm/s

Bovenstaande figuur laat de turbulentie ontwikkeling zien bij een luchtsnelheid van 40 cm/s.



Figuur 14 Turbulentie intensiteit in een vlak door het tomaten gewas waarbij de stroming van onder naar boven is

In bovenstaande figuur is te zien dat het gewas de turbulentie vermindert. Uit de figuren volgt dat het gewas zorgt voor een turbulentie intensiteit van ongeveer 20%.

De turbulentie intensiteit bij de luchtinlaat heeft nauwelijks effect (< 2 % verschil) op de warmteoverdracht bij de bladeren. Het snelheidsprofiel en de bijbehorende turbulentie rond het gewas bepalen de warmteoverdracht bij de bladeren. Op basis van deze berekeningen is de warmteoverdracht als functie van

de snelheid te bepalen en het drukverlies dat door het gewas wordt veroorzaakt.