

Luchtcirculatie en productie

Resultaten kasexperiment 2005, vervolg op deskstudie en klimaatkamer experimenten.

Arie de Gelder, Jouke Campen, Anne Elings,
Cecilia Stanghellini en Esther Meinen

© 2006 Wageningen, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, 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 Publicatienr. 41616052.2



Projectnummer: 41616052

Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V.

Glastuinbouw

Adres : Kruisbroekweg 5, 2671 KT Naaldwijk
: Postbus 8, 2670 AA Naaldwijk
Tel. : 0174 – 636 700
Fax : 0174 – 636 805
E-mail : info.ppo@wur.nl
Internet : www.ppo.wur.nl

Inhoudsopgave

pagina

1.	INLEIDING.....	9
1.1	Doelstelling	10
2.	TEELT	12
2.1	Opzet	12
2.2	Uitvoering	16
2.3	Resultaten.....	16
2.3.1	Klimaat	16
2.3.2	Productie	18
2.3.3	CO ₂	19
2.3.4	Gewas temperatuur.....	20
2.3.5	Gewasverdamping	21
2.3.6	Morfologie.....	22
2.4	Conclusie kasteelt.....	24
3.	FOTOSYNTHESE- EN VERDAMPINGSCAPACITEIT	26
3.1	Inleiding	26
3.2	Materiaal en Methoden	26
3.2.1	Fotosynthese- en verdampingsmetingen	26
3.2.2	Statistische verwerking fotosynthesemetingen	27
3.2.3	Statistische verwerking verdampingsmetingen	28
3.2.4	Narekenen van de gewasgroei	28
3.3	Resultaten.....	29
3.3.1	Fotosynthesemetingen	29
3.3.2	Verdampingsmetingen	32
3.3.3	Narekenen van de gewasgroei en verdamping	35
3.4	Discussie	38
3.4.1	Adaptatie van fotosynthese.....	38
3.4.2	Adaptatie van verdamping	39
3.4.3	Berekening van gewasgroei en verdamping	40
3.5	Conclusie bladmetingen fotosynthese en verdamping	41
4.	CHLOROFYLFLUORESENTIEMETINGEN	42
4.1	Doel metingen	42
4.2	Materiaal en methode.....	42
4.2.1	Meetschema	43
4.2.2	Data verwerking.....	43
4.3	Resultaten.....	43
4.3.1	Maximale Elektronen Transport Snelheid (Jmax)	43
4.4	Discussie	44
4.5	Conclusie	45
5.	LUCHTBEWEGING EN 3-D MODELWERK	46
5.1	Luchtbeweging in het gewas.....	46
5.2	Invloed van de wanddikte op het snelheidsprofiel.....	48
5.3	Invloed van luchtbeweging op de verdeling van temperatuur, vocht en CO ₂	49
5.4	Conclusies	55
6.	DISCUSSIE	56
6.1	Invloed van luchtbeweging op groei en productie.....	56
6.2	Invloed van luchtbeweging op verdamping en planttemperatuur	57

6.3	Verdeling van luchtvochtigheid, temperatuur en CO ₂	58
6.4	Toepassing in een regeling en de energiedoelstelling	58
7.	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN.....	59

Samenvatting

In een kas is de lucht door warmtestromen altijd licht in beweging. De luchtbeweging neemt toe bij ventileren, bij het opstoken van de buizen of inschakelen van recirculatieventilatoren. Toch is deze luchtbeweging zwak in vergelijking tot de luchtbeweging in een gesloten kas. Daarin wordt voor de koeling de lucht tot zo'n 20 keer per uur rondgepompt. In de gesloten kas is een productietoename gerealiseerd, die voor een groot deel toe te schrijven is aan de verhoging van het CO₂ gehalte in de zomer.

In dit onderzoeksproject is nagegaan of de luchtbeweging een verklaring is voor de toegenomen productie en of de fotosynthese bij geforceerde luchtbeweging zich aanpast aan de gewijzigde klimaatomstandigheden.

Voor dit onderzoek is eerst een studie gedaan op basis van literatuur, experimenten in klimaatcellen en theoretische modelberekeningen. In dat deel werden effecten van luchtbeweging aannemelijk gemaakt, maar waren de resultaten niet eenduidig. Daarbij zijn de lichtomstandigheden in een klimaatcel niet gelijk aan kascondities. Vervolgens is een kasexperiment uitgevoerd met tomaten, cv. Aromata, die geplant zijn op 18 mei. Tot eind juni is er eerst gewerkt aan de ontwikkeling van een representatief gewas. Begin juli is er geforceerde luchtbeweging aangelegd. Er zijn naast de normale teelt een drietal behandelingen ingezet. De luchtbeweging werd opgewekt met ventilatoren die verbonden waren aan luchtslangen. De luchtslangen hingen tussen het gewas; laag - vlak boven de teeltgoot of hoog - vlak onder de kop van het gewas. Bij de luchtslangen bij de kop is de luchtsnelheid op twee niveaus ingesteld. Alle behandelingen zijn in tweevoud aangelegd.

Tot eind oktober zijn de productie en gewasontwikkeling gevolgd. Hierin werden geen verschillen gevonden. Uitvoerig is gemeten aan de werking van het fotosynthesesysteem. De conclusie is dat de luchtbeweging niet leidt tot een systematische aanpassing van de fotosynthesecapaciteit.

Voor de gewasverdamping en de planttemperatuur werden wel verschillen gevonden als gevolg van de luchtbeweging. De gewasverdamping werd in dit experiment door luchtbeweging verlaagd. De koptemperatuur van de plant was bij de luchtbeweging laag in het gewas iets lager dan bij de overige behandelingen. In deze proef is niet met gekoelde of verwarmde lucht gewerkt. In kassen met installaties om warme of koele lucht door het gewas te blazen zullen de effecten van de luchtbeweging op de gewasstemperatuur en verdamping anders zijn en specifiek voor die condities moeten worden gemeten. Advies is daarom om bij luchtbeweging in combinatie met luchtbehandeling de planttemperatuur te meten.

Op het punt van de gewasverdamping is er een onverklaard verschil tussen metingen van de bladverdamping en de daarmee uitgevoerde simulaties enerzijds en de metingen van de gewasverdamping met een weeggoet anderzijds. Theoretisch kan worden beredeneerd en berekend dat de verdamping door luchtbeweging soms afneemt en in andere gevallen juist toeneemt. De samenhang tussen verdamping op blad- en gewasniveau in relatie tot de CO₂ opname is een punt waarop verder onderzoek nodig is. Als de samenhang goed wordt begrepen is op dit punt mogelijk nog verdere optimalisatie van de groei haalbaar.

De veranderende omstandigheden voor temperatuur, vochtverdeling en CO₂ concentratie zijn in simulatieberekeningen zichtbaar gemaakt. De extra luchtbeweging zorgt voor een homogener verdeling, maar de verbetering ten opzichte van een normaal systeem is gering. Luchtbeweging forceren om de groei te verhogen is daarom niet zinvol.

Voor luchtbeweging via een slang zijn de axiaal ventilatoren zoals in dit experiment gebruikt minder geschikt omdat deze tot een ongewenste turbulentie van de lucht in de luchtslang leiden.

Luchtbeweging is niet de verklarende factor voor de meerproductie in semi-gesloten kassen. De verklaring moet gezocht worden bij de combinatie van veel licht met veel CO₂, die in de eerste modelberekeningen onvoldoende nauwkeurig werden verwerkt door de gebruikte fotosyntheseroutines, die niet voor die omstandigheden waren ontwikkeld. De nauwkeurigheid van de modellen zal in de toekomst door extra

informatie die nu in verschillende situaties wordt verzameld toenemen.

Voorwoord

Rond Luchtcirculatie en productie was de verwachting hoog gespannen. Kan met geforceerde luchtbeweging de productie worden verhoogd. Dat was de cruciale vraag die opkwam naar aanleiding van de resultaten van het telen in een gesloten kas, waarbij een deel van de meerproductie niet kon worden verklaard. Een theoretische studie en experimenten in klimaatcellen gaven geen eenduidige antwoorden. Een groot kasexperiment moest de antwoorden geven. Aan de uitvoering daarvan hebben vele medewerkers van PPO, A&F en PRI een bijdrage geleverd. Zij hebben met elkaar dit project tot een goed einde gebracht. Daarvoor dank aan

PPO – Peter Lagas, Jaco Klap, Ruud Kaarsemaker, medewerkers van de afdeling bedrijf voor gewasverzorging en techniek

A&F – Els Otma

PRI – Johan Steenhuizen en Dik Uenk

Extern - Jan Mulder voor wekelijks teeltadvies

De resultaten zijn anders dan vooraf als hypothese was gesteld. Luchtbeweging op zich had geen effect op de productie, wel op de verdamping. Dat de uitkomst anders is een mogelijkheid waarmee in onderzoek altijd rekening moet worden gehouden.

Arie de Gelder
Projectleider

1. Inleiding

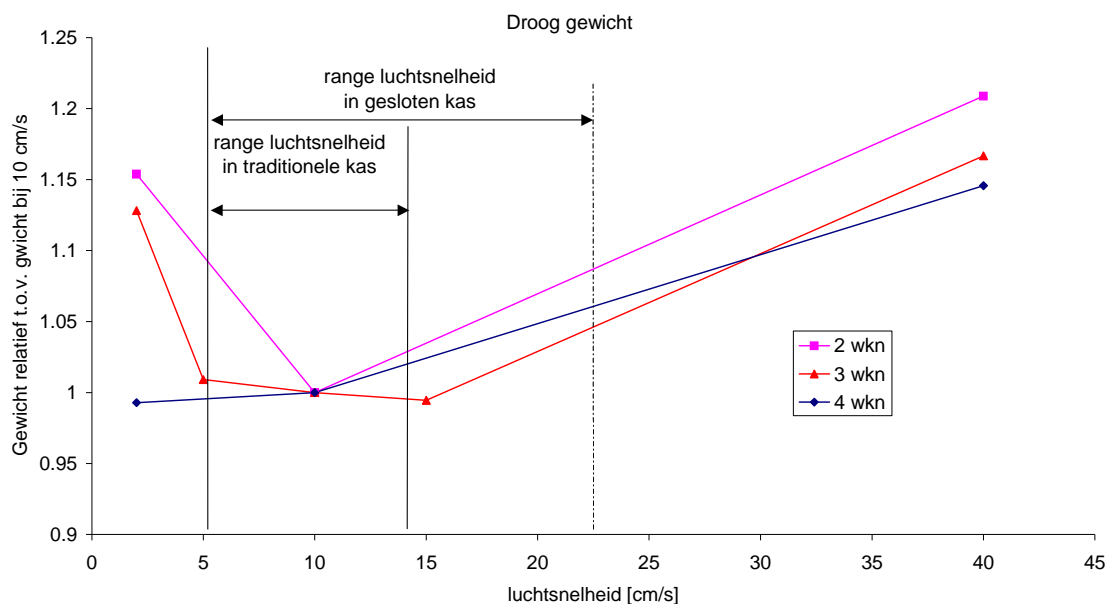
In kassen treedt veel luchtbeweging op. De invloed van geforceerde luchtbeweging in de kas ten gevolge van verwarming en/of ventilatoren in combinatie met luchtverdeelsystemen op de ruimtelijke klimaatverdeling en de daaraan gekoppelde fysische en fysiologische processen in het gewas zijn vrijwel onbekend.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

De resultaten van het gesloten kas experiment waren aanleiding voor onderzoek naar de oorzaken van de productieverhoging ten opzichte van de verhoging die op basis van simulatiemodellen werd verwacht. De telers zijn hierbij via de LTO-commissie tomaat betrokken.

Bij teeltsystemen, waarin luchtbeweging door geforceerde ventilatie of door beweging van planten optreedt, zal de uitwisseling van CO₂ tussen blad en lucht mogelijk beïnvloed worden. De uitwisseling van CO₂ is een diffusieproces waarin verschillende stappen worden onderscheiden die elk een specifieke weerstand kennen. Eén weerstand is de opname van CO₂ vanuit de huidmondjes in de bladcellen (interne weerstand), een tweede weerstand is de openingstoestand van de huidmondjes (huidmondjesweerstand) en een derde weerstand treedt op door een dunne luchtlaag direct grenzend aan het oppervlak van het blad (grenslaagweerstand). In de huidige gewasgroeimodellen kan de waarde van de grenslaagweerstand worden gedefinieerd, zodat op deze manier rekening kan worden gehouden met de windsnelheid. Luchtbeweging kan 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 verdeling van 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. In het eerste deel van het project is nagegaan of de hypothese dat luchtbeweging de fotosynthese kan bevorderen op basis van theorie en literatuur aannemelijk is. Daarbij zijn in een klimaatcel experimenten gedaan met luchtbeweging. In dat deel van het onderzoek werd op basis van de theorie aannemelijk gemaakt dat luchtbeweging de groei kan bevorderen. In de klimaatcel experimenten werden effecten op de groei gevonden (De Gelder et al, 2004). De droge stof hoeveelheid van tomaat verschilde tussen behandelingen. Geen luchtbeweging had een iets hoger drogestof gewicht dan een luchtbeweging van 10 cm/s. Een luchtbeweging van 40 cm/s gaf juist weer hogere drogestof gewichten (Figuur 1-1). De betekenis voor de praktijk kon niet worden aangetoond, omdat er weinig experimenten met geforceerde luchtbeweging in kassen zijn gedaan. De lichtintensiteit in de klimaatcel is duidelijk lager dan in een kas in de zomer. De resultaten gaven geen eenduidig antwoord, maar waren zodanig dat een kasexperiment nodig was om de effecten van luchtbeweging te toetsen.



Figuur 1-1 Resultaten uit het klimaatkamerexperiment, elk punt in de grafiek is een experiment waarbij het CO₂ niveau 1000 ppm was

Dit verslag beschrijft de resultaten van het experiment. In hoofdstuk 2 wordt het teeltkundige deel beschreven met de resultaten voor de productie en verdamping.

De belangrijkste parameter voor de groei is de fotosynthese. Deze potentiële fotosynthese is gemeten met de klassieke methode, namelijk door meting van de CO₂ uitwisseling, (hoofdstuk 3) en daarnaast is met chlorofylfluorescentie (hoofdstuk 4) de actuele fotosynthese gemeten. In hoofdstuk 3 wordt de gemeten productie op basis van de fotosynthese kenmerken nagerekend met behulp van het INTKAM model. In hoofdstuk 5 is de luchtverdeling in het gewas onderwerp van bespreking. De luchtbeweging wordt beschreven met behulp van 3D-modellering.

De samenhangende resultaten en de bespreking daarvan is verwoord in hoofdstuk 6. De conclusies en aanbevelingen vormen het slot van dit verslag- hoofdstuk 7.

1.1 Doelstelling

Vaststellen van het effect van luchtbeweging op de groei, ontwikkeling en productie onder kasomstandigheden.

De hoofdvraag is: In welke mate wordt de productie beïnvloedt door luchtbeweging en hoe?

Als er sprake is van beïnvloeding van de productie moet worden vastgesteld wat de oorzaak daarvan is.

Met deze informatie kan het effect in de praktijk optimaal benut worden. Hiertoe dient ook te worden vastgesteld in welke mate het productie-effect afhankelijk is van de klimaatomstandigheden zoals lichtintensiteit, temperatuur van het gewas, luchtvochtigheid

Technische en teeltkundige doelstellingen

Verkrijgen van inzicht in (de mate van)

- Invloed van luchtbewegingen op verdamping en groei. Verwacht wordt een productie verhoging als gevolg van de luchtbeweging van 6-8 %.
- Verdeling van de luchtvochtigheid, luchttemperatuur, CO₂ gehalte van de lucht en planttemperatuur in de kas bij geforceerde luchtbeweging.
- De morfologische/ fysiologisch gevolgen van luchtbeweging op de plant
- De relatie tussen luchtbeweging, lichtniveau, CO₂ niveau, temperatuur, relatieve luchtvochtigheid in kaart brengen voor de optimale regeling

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.

Kennis over luchtbeweging draagt bij aan de energetische optimalisatie van semi-gesloten kassystemen zoals Kas als Energiebron.

Nevendoelstelling

Aangeven van mogelijkheden voor aanpassing van gewasmodellen.

2. Teelt

2.1 Opzet

Het experiment is uitgevoerd in acht afdelingen. De luchtbeweging is laag of hoog in het gewas aangebracht. De luchtbeweging hoog in het gewas is op twee snelheden toegepast. Alle luchtbehandelingen zijn in tweevoud aangelegd. Het kasklimaat in alle compartimenten moet bij benadering hetzelfde zijn zodat alleen de luchtbeweging van invloed is op de ontwikkeling van het gewas.

De behandelingen zijn:

- Controle
- Luchtbeweging laag in het gewas, met een uitblaassnelheid van 10 m/s
- Luchtbeweging hoog in het gewas, met een uitblaassnelheid van 10 m/s
- Luchtbeweging hoog in het gewas, met een uitblaassnelheid van 5 m/s



Figuur 2-1 Schematische weergave van de plaats van de luchtslangen tussen het gewas. Linker afbeelding de luchtslangen hoog rechterafbeelding de luchtslangen laag.

Voor het experiment is gebruik gemaakt van 8 afdelingen in complex 103 van PPO-Naaldwijk. Deze hebben een lichttransmissie van 66%.

De vier behandelingen zijn als volgt over de kassen verdeeld.

Behandeling	Omschrijving	Afdeling
C	Controle	11, 18
LL	Luchtbeweging laag in het gewas	10, 17
LH	Luchtbeweging hoog in het gewas, Snelheid gelijk aan laag in het gewas	12, 15
LH$\frac{1}{2}$	Luchtbeweging hoog in het gewas, Snelheid helft van behandeling 3	9, 16

Een gedetailleerde plattegrond is opgenomen als Bijlage 1.

In afdeling 9, 10 en 12 zijn 5 luchtslangen gebruikt en in de afdelingen 15, 16 en 17 zijn 7 luchtslangen toegepast. De luchtslangen zijn tussen twee gewasrijen opgehangen aan de groeibuis. De groeibuis kan in hoogte worden versteld zodat de luchtslang op de gewenste hoogte tussen het gewas komt. Tijdens het experiment is de groeibuis niet gebruikt voor verwarming. De luchtslang laag in het gewas hing op 0.6 m vanaf de grond. De luchtslang hoog in het gewas hing op 2.50 vanaf de grond.



Figuur 2-2 Ventilator met luchtslang hoog tussen de koppen van het gewas.

De luchtslangen zijn van transparant polyethyleen (Oerlemansplastics CO₂ buis) met een diameter van 38.2 cm voorzien van een perforatie van 8 mm op een onderlinge afstand van 4 cm op 30° en 60° links en rechts vanaf de bovenzijde. De keuze voor deze specifieke onderlinge afstand en gat diameter is in bijlage 6 toegelicht. De slangen zijn aangesloten op ventilatoren (*Priva PCF*). Deze hangen in afdeling 10, 12 en 16 bij de zuidgevel en in afdeling 9, 15 en 17 bij de noordgevel. De ventilatoren konden afhankelijk van de instraling worden ingeschakeld. In het experiment was dit ingesteld op een straling boven 15 W/m². De snelheid kon door een toerenregeling worden ingesteld. De verdere detaillering over luchtbeweging is opgenomen in hoofdstuk 6.

Teelt

Geplant is op 18 mei 2005 met een plantdichtheid van 3,3 plant/m², cultivar Aromata. Om een goede uitgangssituatie voor de behandelingen te realiseren is eerst gewerkt aan de opbouw van het gewas. Hiervoor is een relatief hoge kasttemperatuur gebruikt om een snelle ontwikkeling te krijgen. De temperatuur is na de zetting geleidelijk verlaagd. Op 30 juni was de gewasontwikkeling zodanig in balans dat met normale teelttemperaturen de behandelingen konden starten.



Figuur 2-3 Foto van een luchtslang aan de groeibuis tussen het gewas

Klimaatregistraties

Alle klimaatparameters: temperatuur, vochtigheid, CO₂ niveau, stralingsintensiteit, buistemperaturen en raamstanden zijn gelogd op basis van 10 minuten gemiddelden. Verticale temperatuur verdeling is gemeten met losse dataloggers (Tiny talk) op vijf hoogtes in vier afdelingen.

Productie

Per afdeling is van drie rijen de versproductie bijgehouden. Het aantal vruchten werd geteld, gesorteerd en gewogen. Op twee momenten is het drooggewicht van de vruchten bepaald.

Van de meetrijen is bij bladplukken en andere gewasverzorging bijgehouden hoeveel versgewicht aan blad en dergelijke is weggenomen.

CO₂

Voor dosering is een aangepaste CO₂ regeling gebruikt. In deze regeling is opgenomen dat als er geen rookgas CO₂ beschikbaar is omgeschakeld kan worden op zuiver CO₂. Setpoint voor de behandelingen is de gemiddelde gemeten waarde van de controle behandelingen (afdeling 11 en 18). Hierdoor wordt voorkomen dat door mogelijke verschillen in luchten verschillen in CO₂ concentratie ontstaan.

CO₂ metingen om gradiënten vast te stellen zijn in drie afdelingen gedaan op drie hoogtes, onder in het gewas, halverwege en bij de kop. Deze metingen zijn per afdeling gelijktijdig, maar voor de afdelingen na elkaar uitgevoerd.

Planttemperatuur meting.

In vier afdelingen (15 t/m 18) is een infrarood-camera opgehangen om de planttemperatuur van de bovenzijde van het gewas te meten.

Weeggoten

In afdelingen 15 t/m 18 is een weeggot (Blok en De Gelder, 2004) geïnstalleerd aan de noordzijde van een gewasrij. De goten zijn pas operationeel gemaakt toen de behandelingen werden ingezet. Tot die tijd lagen de goten op gelijke hoogte als het normale systeem.

Destructieve plantmetingen.

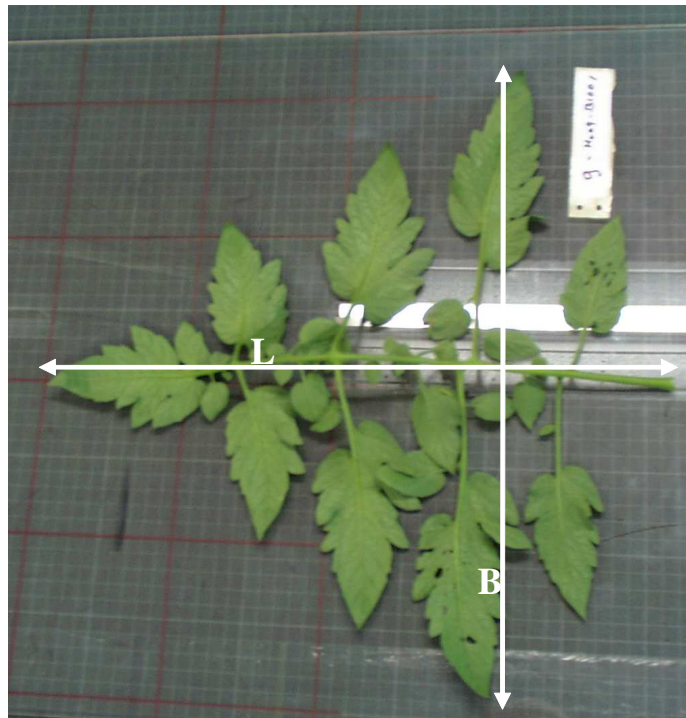
Bij het planten zijn van 12 planten plantlengte, bladoppervlak, versgewicht blad en stengel en vruchten, drooggewicht blad, stengel en vruchten gemeten.

Tijdens de eerste weken van de teelt tot het inzetten van de behandelingen zijn van de dieven van 12 planten vers en drooggewicht gemeten.

Na de start van de behandelingen is wekelijks uit elke afdeling een plant weggehaald om daaraan dezelfde metingen te doen als bij de start. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen de gegevens van de bovenste 11 bladeren en de overige bladeren aan de plant. Deze meting is wekelijks gedaan, omdat dit een vrij arbeidsintensief werk is. Hierdoor was het meten van vier planten per afdeling met een interval van vier weken niet uitvoerbaar. De gegevens over bladoppervlak en drooggewicht zijn gebruikt voor de berekeningen die beschreven zijn in hoofdstuk 3.

Morfologie

Metingen aan voor het vaststellen van de vorm van de bladeren zijn eind september gedurende twee dagen uitgevoerd. In elke afdeling werden 15 bladeren hoog en 15 halverwege in het gewas geplukt. Van die bladeren is de lengte (van stengel tot top) de maximale breedte en de oppervlakte gemeten. In de behandeling met de luchtslangen laag, waarvoor geen herhaling [meer] was, zijn in de resterende afdeling 30 bladeren per laag geplukt. Daarnaast, werden foto's genomen van 2 bladeren van elke set (zoals in Figuur 2-4).



Figuur 2-4 Voorbeeld van een tomatenblad. L en B zijn respectievelijk de lengte en de breedte zoals gemeten

2.2 Uitvoering

De teelt ging goed van start. De planten kwamen goed in balans. Op 17 augustus is bij een derde van de planten de kop er uitgehaald, om de stengel dichtheid naar het najaar te verminderen. Op 18 september zijn van alle planten de koppen verwijderd omdat de teelt op 31 oktober zou worden beëindigd.

In verschillende afdelingen deden zich problemen voor met ziekten en plagen. In het begin van de proef kwam veel meeldauw voor. In afdeling 16 ontwikkelde zich een hardnekkige spint aantasting. Naar het einde van de teelt bleven spanrupsen aanwezig. Hierdoor vertoonden veel bladeren een patroon van gaten waar de rupsen het blad hadden weggevreten. Mineervlieg kwam in alle afdelingen voor. Bij de luchtbeweging hoog (LH) leek de vraat vooral voor te komen in het onderste deel van het gewas en niet boven in.

In afdeling 17 is op 17 augustus een aantasting met pepino-mozaïek-virus geconstateerd. De hygiëne maatregelen zijn daarna verscherpt en de afdeling is geïsoleerd. Op 8 september is de afdeling geruimd om het risico van verspreiding te minimaliseren. Dit bleek een geslaagde ingreep te zijn. Visuele effecten van het virus zijn niet in andere afdelingen waargenomen, ook in een ELISA-toets werd voor de andere afdelingen geen aanwezigheid van virus vastgesteld. Hieruit mag geconcludeerd worden dat de andere afdelingen virus vrij zijn gebleven en het geen schade voor de rest van het experiment heeft gehad. Het ruimen van de afdeling heeft wel consequenties gehad voor de oogstwaarnemingen en de metingen van de fotosynthese. Deze konden in de betreffende afdeling niet worden uitgevoerd.

Tijdens de teelt kwam het CO₂-niveau bij openluchtramen niet boven de 450 ppm. De beperkende factor was de doseercapaciteit van de CO₂ slangen.

Op 22 september zijn de ventilatoren ook 's nachts aangezet om na te gaan of dit een effect had op de temperatuur gedurende de nacht. Dit was niet het geval.

Botrytis op de stengel kwam in alle afdelingen voor. Eerst vooral in de afdelingen met luchtbeweging. Later juist in de controle afdelingen.

In afdeling 12 en 15 met de luchtslang hoog (LH) werd bij vrijwel bladeren in augustus bruine vlekken en bladranden geconstateerd. Er is niet bewust op vocht geregeld. Op 16 augustus is wel een minimum raamstand ingesteld bij een buitentemperatuur boven de 8 °C.

Teeltkundig vroeg de teelt veel aandacht om het gewas in goede conditie te houden. Dit is in voldoende mate gelukt om voor het experiment conclusies te kunnen trekken.

2.3 Resultaten

2.3.1 Klimaat

Het streven was om in alle afdelingen een gelijk klimaat te realiseren, die doelstelling is gerealiseerd. De gemiddelde waarden voor de temperatuur en relatieve luchtvochtigheid waren in de acht afdelingen gemiddeld over de hele periode vrijwel gelijk (Tabel 2-1). Afdeling 10 heeft een iets lagere relatieve luchtvochtigheid. Dit verschil was niet het gevolg van de behandeling want afdeling 17 had tot week 35 dezelfde RV als de overige afdelingen, terwijl ook toen afdeling 10 iets lager uitkwam. Voor afdeling 17 zijn alleen de temperatuur en RV gegeven, omdat de proef in die afdeling eerder is afgesloten. In het verloop van temperatuur en RV gedurende de dag zijn geen verschillen te zien.

Tabel 2-1 Gemiddelde waarden voor temperatuur, relatieve luchtvochtigheid, buistemperatuur, raamstanden per etmaal en CO₂ tussen 8 en 18 uur per afdeling.

Afdeling	9	10	11	12	15	16	17	18
Behandeling	LH½	LL	C	LH	LH	LH½	LL	C
T in °C	21.3	21.5	21.3	21.5	21.3	21.4	20.9	21.2
RV in %	85	82	84	85	85	86	86	86
T-buis in °C	28.6	29.0	27.9	28.4	28.8	29.1	26.2	30.3
Raam oost- in %	11.0	12.0	11.1	11.9	10.1	11.6		9.9
Raam west in %	9.1	10.1	9.2	9.9	8.3	9.7		8.2
CO ₂ in ppm	487	486	477	477	483	480		534

Met behulp van kleine dataloggers (Tiny Talks) zijn verticale temperatuurverdelingen gemeten bij de vier behandelingen. Dit is gedaan gedurende 2 meetcycli waarbij de temperatuur is geregistreerd met een interval van 2.5 minuut. De dataloggers zijn niet geventileerd, daardoor zijn ze gevoeliger voor opwarming door directe straling. Dit was in de uitkomsten goed te zien. De dataloggers die boven het gewas hingen, en dus directe straling konden opvangen registreerden hogere temperaturen. Dit vertroebelt enigszins de waarnemingen.

De dataloggers hingen op 0.4, 1.3, 2.2, 3.1 en 4 meter boven de bodem. De gegevens zijn berekend als verschillen ten opzichte van de middelste dataloggers op 2.2 meter hoogte. Als de luchtbeweging van onderen wordt aangebracht heeft dit onderin het gewas een nivellerend effect op de temperatuur. Bij de luchtbeweging laag in het gewas is de temperatuur vrijwel gelijk in de onderste lagen vergeleken met het midden. Bij de luchtbeweging die hoog is aangebracht zijn de verschillen tussen het midden en onderin het gewas iets kleiner dan bij de controle, al zijn de effecten marginaal.

Tabel 2-2 Verschil in ruimtetemperatuur in °C tussen meting op 2.2 meter hoogte en de aangegeven hoogte over twee perioden.

Periode 1 is van 12 september 12 uur tot 14 september 15.15 uur. Periode 2 is van 24 september 12 uur tot 27 september 14 uur.

Hoogte in de kas		4.0 m		3.1 m		1.3 m		0.4 m	
Periode		1	2	1	2	1	2	1	2
Behandeling	Controle	1.6	0.8	0.4	-0.1	-0.5	-0.4	-0.5	-0.3
	LL	2.5	0.8	1.9	0.6	0.1	0.0	0.3	0.0
	LH	1.5	0.6	0.8	0.7	-0.2	0.1	-0.2	-0.1
	LH½	1.3	0.4	1.3	0.4	-0.3	-0.2	-0.3	-0.1

De geforceerde luchtbeweging kan de temperatuur gradiënt licht beïnvloeden. Daarbij is in dit experiment de lucht niet gekoeld of verwarmd. Koelen of verwarmen van de ingebrachte lucht zal de temperatuur gradiënt wel beïnvloeden, omdat de ingeblazen lucht in temperatuur dan afwijkt van de heersende condities.

2.3.2 Productie

Gedurende de proef is van drie rijen per afdeling de productie in kilo en aantal eerste kwaliteit en overige gemeten. Tot week 35 zijn er gegevens van alle afdelingen, daarna van 7 afdelingen. In de analyse zijn deze twee momenten genomen om te toetsen of er aantoonbare verschillen in productie waren.

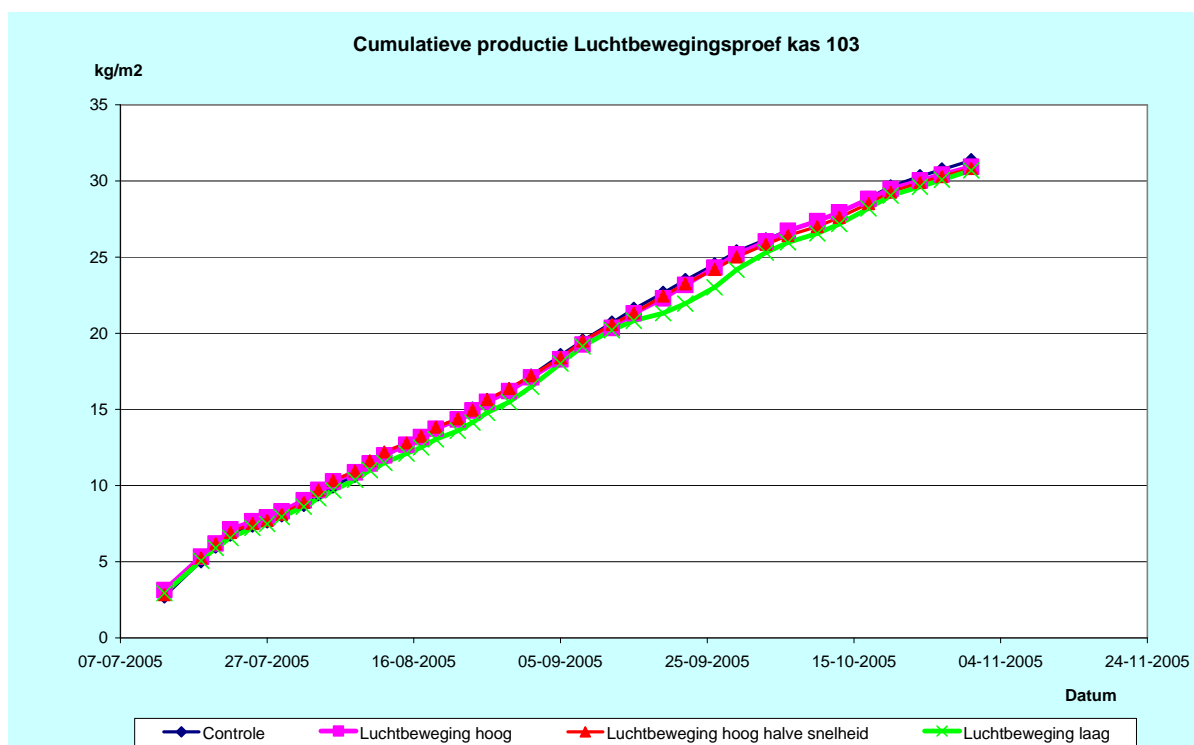
Voor totaal gewicht, totaal aantal, gemiddeld vruchtgewicht, gewicht eerste kwaliteit en aantal eerste kwaliteit zijn er geen verschillen tussen de behandelingen. Voor gewicht en aantal tweede kwaliteit is de controle lager dan de behandelingen met de luchtslangen hoog. De luchtbeweging gaf dus iets meer tweede kwaliteit, maar het verschil is zo klein dat het bij totaal productie niet van invloed is.

Aan het einde van de teelt zijn alle groene vruchten geoogst. Hierin was ook geen verschil tussen de behandelingen. De resultaten voor productie staan in Figuur 2-5 en Tabel 2-3 en Bijlage 4, hierin zijn niet de gegevens over groene vruchten verwerkt.

Tabel 2-3 Cumulatieve productie in kilogram per m² en gemiddelde vruchtgewicht per behandeling op twee tijdstippen in de proef. (De twee momenten zijn aangegeven omdat tot week 35 alle afdelingen in de productie zijn meegenomen. Na week 35 is afdeling 17 met een luchtbeweging laag in het gewas uit de gegevens weggelaten)

	Behandeling	Totaal		Eerste kwaliteit		Tweede Kwaliteit	
		Kilo	Vruchtgewicht in gram	Kilo	Vruchtgewicht in gram	Kilo	Vruchtgewicht in gram
Week 35 1 septembe	Controle	17.2	101	14.8	103	2.4	87
	LL	16.5	99	13.8	102	2.7	86
	LH	17.1	103	14.4	105	2.7	93
	LH½	17.2	101	14.3	103	2.9	91
Week 45 1 november	Controle	31.4	92	26.9	97	4.5	71
	LL	30.7	91	26.0	96	4.6	69
	LH	30.9	94	26.0	99	5.0	75
	LH½	30.8	93	25.8	98	5.0	74

In Bijlage 4 is te zien dat de controle afdeling 18 een iets hogere totaal productie lijkt te geven. Dit kan samenhangen met een licht hogere CO₂ concentratie (paragraaf 2.3.3). Geen verschil in versgewicht productie in kilo's wil nog niet zeggen dat er geen verschil is in de aanmaak van assimilaten, deze wordt uitgedrukt in de groei in drogestof voor de hele plant. Ook daarin is tussen de behandelingen geen verschil te vinden (Bijlage 5).

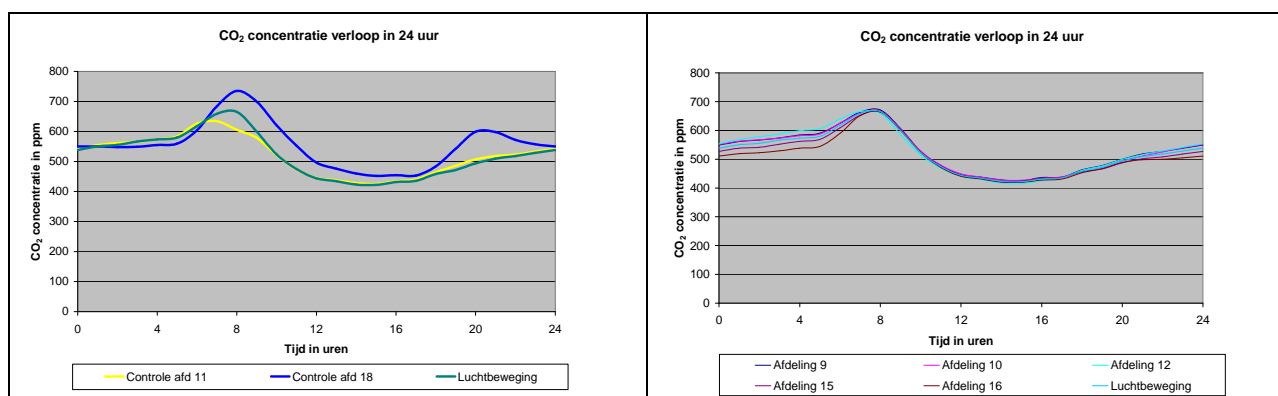


Figuur 2-5 Productieverloop voor de vier behandelingen.

2.3.3 CO₂

CO₂ werd gedoseerd van zon-op tot zon-onder. De twee controle behandelingen werden gestuurd naar het realiseren van het ingestelde setpoint. Bij geopende luchtramen was dit 700 ppm. De CO₂ klep werd hiervoor 100 % open gestuurd. Het verloop van de gemiddeld gerealiseerde concentratie gedurende 24 uur was voor de controle afdelingen niet gelijk. Afdeling 18 heeft ongeveer 50 ppm meer CO₂ gehad (Figuur 2-6A, Bijlage 2).

De regeling van de CO₂ voor alle behandelingen met luchtbeweging was op één principe gebaseerd. De CO₂ werd gestuurd naar het gemiddelde van de gerealiseerde waarden van de beide controle afdelingen. De gerealiseerde concentratie overdag is voor de verschillende behandelingen en afdelingen vrijwel gelijk (Figuur 2-6B).

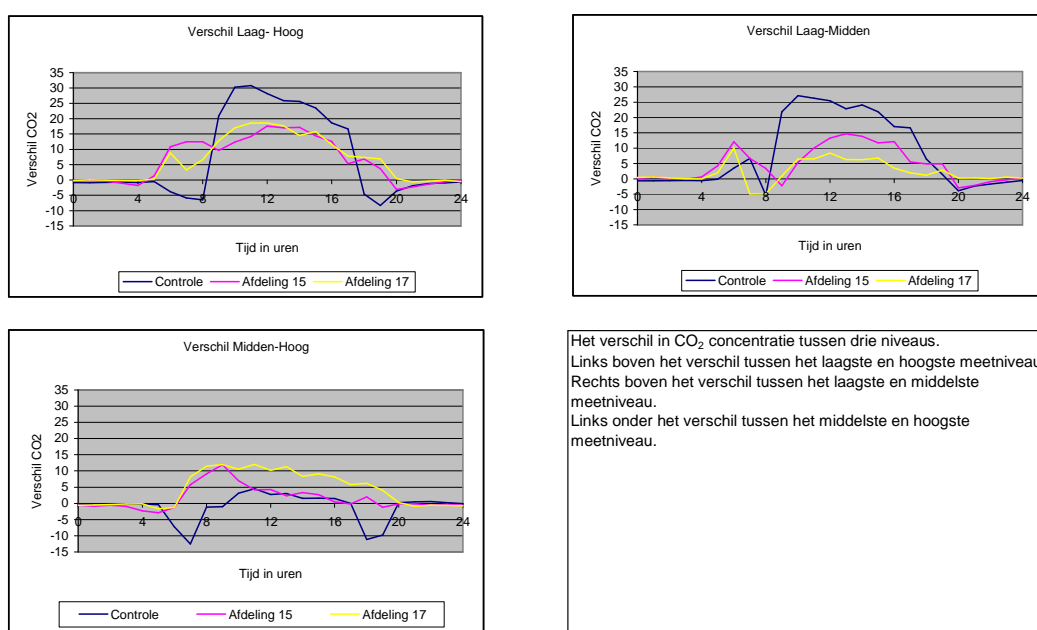


Figuur 2-6 CO₂ concentratie verloop gedurende 24 uur. Links voor de twee controle behandelingen en het gemiddelde van de luchtbeweging. Rechts voor de afdelingen met luchtbeweging.

Het verschil in concentratie kan de productie van afdeling 11 iets negatief hebben beïnvloed. Terwijl de productie in afdeling 18 positief is beïnvloed.

De lijnen in de figuren zijn gemiddelden over de hele duur van het experiment. Tussen dagen kan het CO₂ verloop verschillen door de mate van ventilatie. Omdat het experiment in de zomer is uitgevoerd is er vrijwel alle dagen gelucht, zodat het gemiddelde verloop wel een goed beeld geeft van de CO₂ niveaus die gerealiseerd kunnen worden.

Naast de normale meting van CO₂ concentratie in het midden van de afdeling is er met een tweede meetset op drie niveaus, 0.5, 1.5 en 2.5 m van de bodem, in drie afdelingen gemeten (Bijlage 3). De metingen zijn per afdeling na elkaar uitgevoerd. Per niveau zijn drie meetpunten gebruikt, tussen het gewas recht boven de doseerslang, in het pad en tegen de rij zonder CO₂ doseer slang. Bij de alle behandelingen werd een licht hogere CO₂ concentratie in de buurt van de doseerslang gemeten. De luchtbeweging zorgde er wel voor dat het verschil kleiner werd.

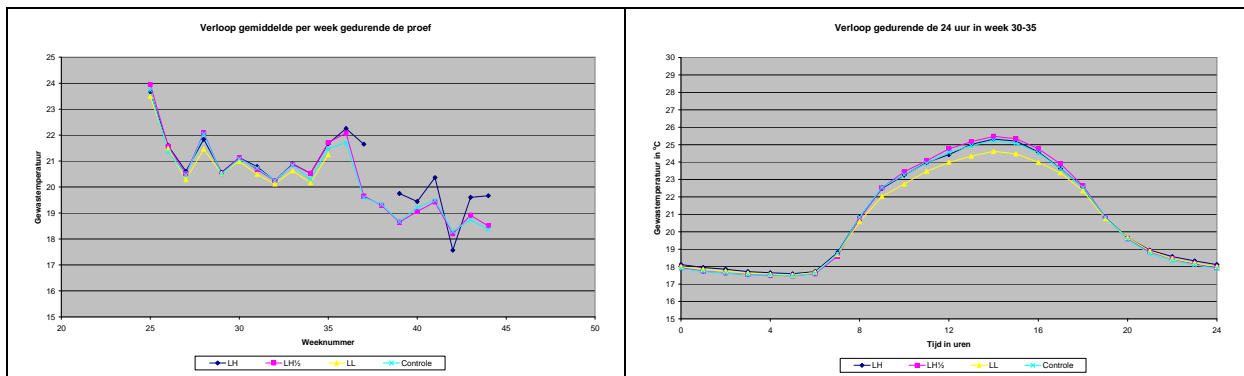


Figuur 2-7 Verschillen in CO₂ concentraties op drie niveaus bij drie verschillende behandelingen.

2.3.4 Gewastemperatuur

De gewastemperatuur is gemeten met infrarood-camera's. De plaats van de meters was onder de goot aan de zuidzijde van de afdelingen 15 tot en met 18. De camera's zijn volgens de gebruiksaanwijzing gericht op de koppen van het gewas.

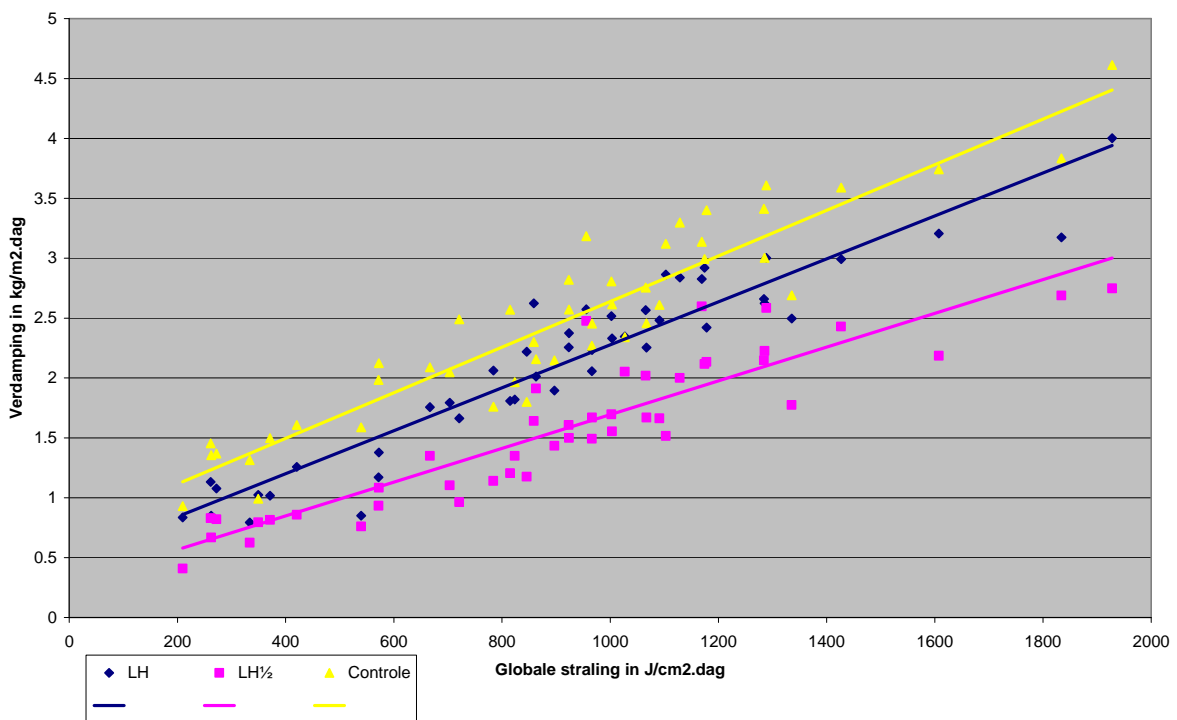
Er werden kleine verschillen gemeten tussen de afdelingen in de weken 29 tot en met 35. Afdeling 17 met de luchtbeweging laag in het gewas was steeds iets lager dan de controle afdeling. Dit verschil ontstaat vooral midden op de dag, maar is gering. In afdeling 15 (LH) zijn de metingen na week 35 onbetrouwbaar. Midden op de dag werden zeer hoge waarden gemeten. Mogelijk was de richting van de meter niet correct.



Figuur 2-8 Gewastemperaturen gemeten met infra-rood camera's. Linker figuur gemiddelde per week in de periode juni – november. Rechter figuur verloop gedurende 24 uur in de periode week 30-week 35.

2.3.5 Gewasverdamping

De verdamping is in vier afdelingen gemeten met behulp van een weegoot (Blok en de Gelder, 2004). Hiermee kan de verdamping continu worden gemeten. Voor dit experiment is vooral gekeken naar de verschillen in verdamping per dag en niet naar het verloop van de verdamping. Door diverse oorzaken van verstoring zijn alleen de gegevens van de maanden september en oktober bruikbaar voor vergelijking. Daarbij was afdeling 17 met de luchtbeweging laag in het gewas vanwege de virusaantasting niet bruikbaar. De metingen zijn niet gecorrigeerd voor bladoppervlak per m². Het is bekend dat de verdamping bij hogere LAI nog steeds kan toenemen (Dieleman, pers med.).



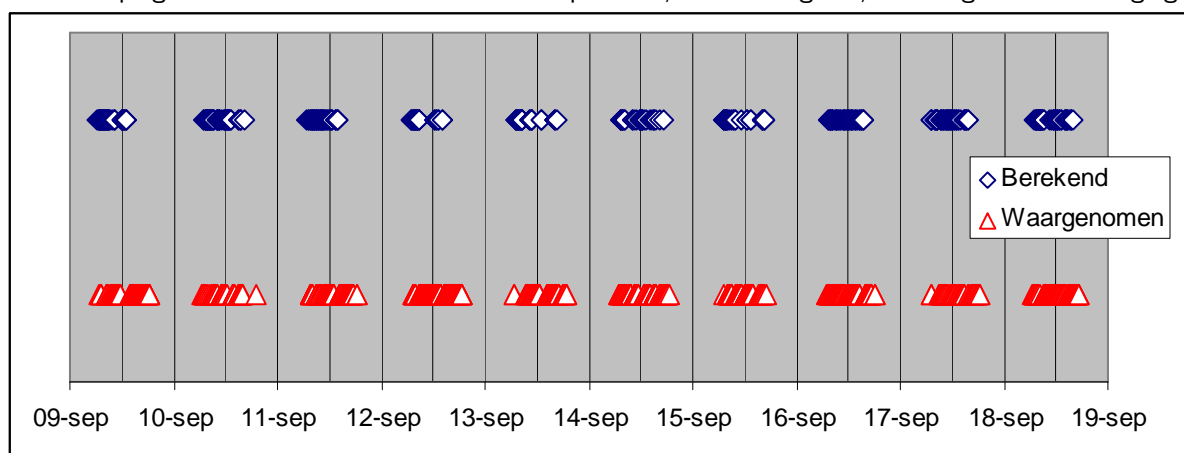
Figuur 2-9 Relatie tussen straling en dagelijkse verdamping van de controle en behandelingen waarbij de luchtslang hoog tussen het gewas hing.

Het blijkt dat de verdamping in de controle afdeling hoger is dan in de afdeling met de luchtbeweging hoog in het gewas (Figuur 2-9). De luchtbeweging met lagere snelheid had een nog lagere verdamping. Verschillen in verdamping zijn ook geconstateerd door gedurende week 39 nauwkeurig opnemen van de

drainpercentages per afdeling. De percentages waren voor de Controle, LH en LH½ respectievelijk 58, 67 en 68 %. Een hoger percentage drain wijst op minder verdamping. De verschillen tussen LH en LH½ zijn in deze meting geringer dan bij de weegoot, maar beide behandelingen zijn duidelijk afwijkend van de controle.

De dagwaarden voor de verdamping zoals weergegeven in Figuur 2-9 zijn niet gecorrigeerd voor mogelijke verschillen in LAI. Voor de periode 9 tot 18 september is gekeken wat de invloed van de LAI is op de gemeten verschillen. Dan komt de verdamping gecorrigeerd voor bladoppervlak bij de controle, de luchtbeweging hoog en de luchtbeweging hoog met halve snelheid op respectievelijk 2.5, 2.1 en 2.1 kg/(m².dag). De verschillen tussen de twee niveaus van luchtbeweging verdwijnen hierdoor vrijwel geheel. Wel blijft de verlaagde verdamping ten opzichte van de controle.

In Bijlage 6 wordt theoretisch onderbouwd dat er situaties kunnen voorkomen waarin bij toenemende luchtbeweging de verdamping afneemt. Voor de periode 10 – 18 september is berekend wanneer de omstandigheden zodanig waren dat verdamping in de controle hoger zou zijn dan in de behandeling met de luchtbeweging hoog. Dit is vergeleken met wanneer dit ook is waargenomen (Figuur 2-10). Berekende momenten zijn vooral in de morgen uren, terwijl de waargenomen momenten ook in de namiddag voorkomen. De effecten op verdamping kunnen verklaard worden. Een stimulerende of remmend effect op de verdamping is een subtiel evenwicht tussen temperatuur, luchtvochtigheid, instraling en luchtbeweging.



Figuur 2-10: Berekende en waargenomen momenten waarbij de verdamping in de behandeling met luchtbeweging lager zou zijn dan in de controle afdeling.

2.3.6 Morfologie

Uitwisseling van warmte, waterdamp en CO₂ gebeurt via de grenslaag van de bladeren. Het “gemak” waarmee warmte en stoffen door de grenslaag heen kunnen om aan en van het oppervlak van de bladeren te komen, wordt weergegeven door de grenslaag weerstand, r_b . De theorie betreffende warmte/stoffen uitwisseling geeft aan dat in deze omstandigheden de bijdrage van vrije convectie aan de warmte/waterdamp uitwisseling verwaarloosbaar is en de weerstand berekend kan worden zuiver als gevolg van gedwongen convectie, d.m.v. de volgende formule:

$$r_b \cong 300 \sqrt{\frac{l}{u}} \quad (\text{s/m})$$

waarin l de “karakteristieke” dimensie is van de uitwisselings-elementen (in ons geval dus de afmetingen van de blaadjes), m en u de windsnelheid is, m/s . De grenslaag weerstand wordt door luchtsnelheid (u) beïnvloed. Daarnaast is het noodzakelijk vast te stellen of de dimensies van de bladeren/blaadjes veranderen als gevolg van adaptatie aan de verhoogde luchtbeweging. In de literatuur zijn er enige

aanwijzingen van dit effect, zij het bij hogere windsnelheden dan deze (b.v. Grace, 1978; Hovenden & Vander Schoor, 2003).

Het vaststellen van de “karakteristieke” dimensie bij tomatenblaadjes is een bekend probleem vanwege de grote variaties in vorm en dimensie van de elementen van elke blad.

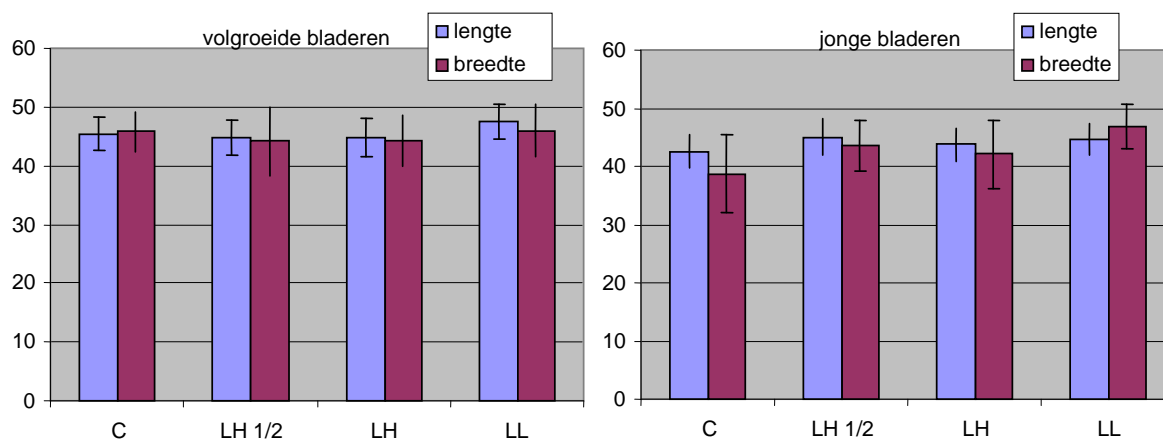
Om mogelijk significante verschillen tussen behandelingen uit de grote variatie binnen een behandeling vast te kunnen stellen, is een enorme hoeveelheid metingen vereist, wat in dit onderzoek niet mogelijk was. Als alternatief is er voor gekozen om de totale lengte (L, van stengel tot top, zie Figuur 2-4), de maximale breedte, B, en de totale oppervlakte, O, van de bladeren te meten. Uit deze waarden voor elk blad zijn de twee parameters C en R berekend:

$$O = C \cdot L \cdot B \quad \text{en} \quad R = L/B$$

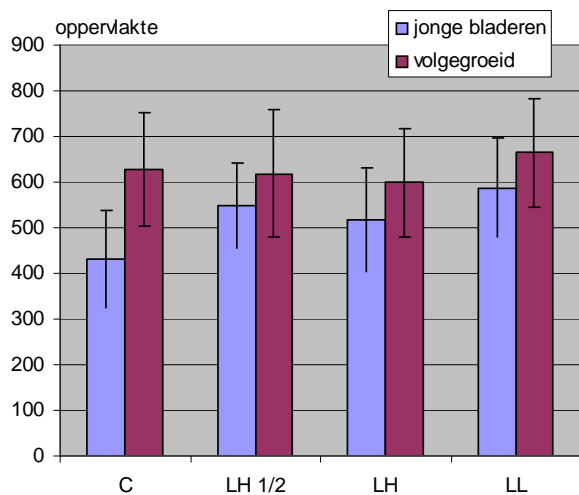
De onderliggende aanname is dat als er adaptatie plaatsvindt aan de hogere lichtsnelheid dit moet resulteren in een variatie in de gemeten variabelen of in een van de parameters. De parameter C geeft de mate aan waarin het blad de rechthoek L·B vult, het is dus een indicator van de insnijding van het blad. Bij een perfecte driehoek is $C = 0.5$. Bij tomaat, vanwege de versnippering in kleine, ingesneden blaadjes is het ongeveer 0.3. De andere parameter, “aspect ratio” genoemd, geeft de vorm van de rechthoek aan: bij een perfect vierkant is $R = 1$.

De onderstaande figuur geeft de resultaten aan van de metingen van lengte en breedte (Figuur 2-11). Tussen de behandelingen zijn er geen significante verschillen in lengte. De breedte toont meer variatie.

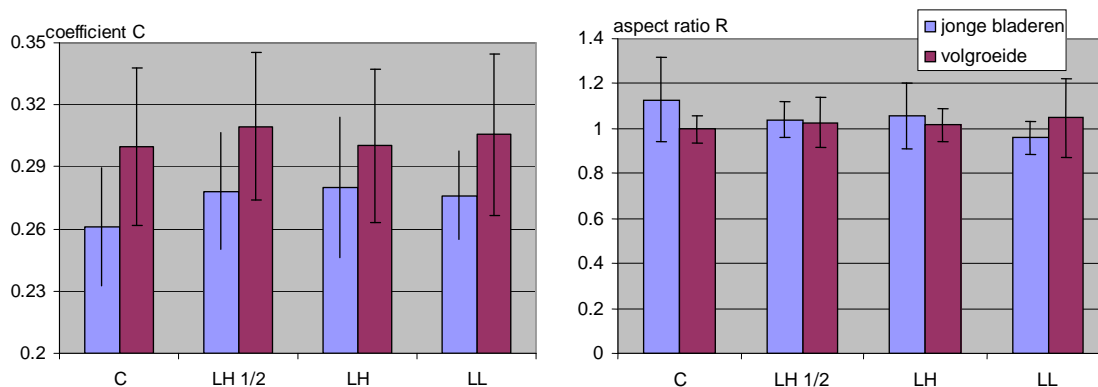
Voor de oppervlakte lijkt er wel een effect van de behandelingen te zijn, namelijk de bladeren hoog in het gewas in de controle afdelingen waren iets kleiner en de bladeren uit de afdeling met de luchtbehandeling van onder juist iets groter, zie Figuur 2-12.



Figuur 2-11 Gemiddelde lengte en breedte in cm per behandeling, met standaard afwijking van 30 bladeren (uit twee afdelingen, m.u.v. LL). Links halverwege in het gewas genomen. Rechts hoog in het gewas genomen.



Figuur 2-12 Gemiddelde oppervlakte (cm²) per behandeling, met standaard afwijking, van 30 bladeren (uit twee afdelingen, m.u.v. LL), op twee niveaus in het gewas, zoals aangegeven



Figuur 2-13 Links: Coëfficiënt van de vergelijking Oppervlakte = coëfficiënt * lengte * breedte. Rechts: ratio lengte/breedte. In beide gevallen gemiddelde en standaard afwijking over de berekende waarde van 30 bladeren per behandeling (uit twee afdelingen, m.u.v. LL), op twee niveaus in het gewas, zoals aangegeven.

Als we naar de twee berekende waarden kijken, zie Figuur 2-13, valt het volgende op te merken: de coëfficiënt C toont zulke hoge variaties dat de relatief kleine verschillen niet significant kunnen zijn. Het is duidelijk dat de bladeren voller worden van hoog naar laag (dus, tijdens de groei) en er lijkt een klein effect van de behandeling te zijn op de jonge bladeren. De behandelingen lijken ook een (niet significant) effect te hebben op het aspect ratio van jonge bladeren. Alle effecten lijken echter te verdwijnen met de strekking van de bladeren. Het lijkt er dus op dat er geen significante morfologische adaptatie aan de verhoogde luchtbeweging in de bladeren heeft plaatsgevonden.

2.4 Conclusie kasteelt

- De luchtbeweging heeft geen productie verandering opgeleverd.
- In de afdelingen met luchtbeweging was er een klein negatief effect op de kwaliteit. Dit moet met meer ervaring zijn te ondervangen.
- De beheersing van de luchtvochtigheid in relatie tot de gewastemperaturen op micro –niveau is niet

- optimaal geweest om problemen met botrytis te voorkomen.
- De luchtbeweging vermindert de verdamping, maar dit had geen negatieve effecten op de groei.
 - De verhoogde luchtbeweging zorgt niet voor een significante morfologische adaptatie.
 - De effecten op verdamping kunnen verklaard worden. Een stimulerende of remmend effect op de verdamping is een subtiel evenwicht tussen temperatuur, luchtvochtigheid, instraling en luchtbeweging.
 - De relatie tussen verdamping en luchtbeweging vraagt een diepgaandere studie.

3. Fotosynthese- en verdampingscapaciteit

3.1 Inleiding

Er zijn metingen aan de fotosynthese en verdamping uitgevoerd om te bepalen of er adaptatie van deze processen hebben plaatsgevonden als gevolg van de groei in verschillende luchtcirculatie-omstandigheden. Deze adaptatie kan gevolgen hebben voor de groei, productie en verdamping van het gewas, en uiteindelijk mogelijk voor het energieverbruik van de kas.

De experimenten zijn vervolgens met het INTKAM tomatenmodel van PRI doorgerekend om een beter begrip van de fysiologische processen te verkrijgen.

3.2 Materiaal en Methoden

3.2.1 Fotosynthese- en verdampingsmetingen

De lichtresponscurven voor fotosynthese en verdamping zijn gemeten aan drie van de vier behandelingen, te weten de controle (C) in afdelingen 11 en 18, luchtbeweging laag in het gewas (LL) in afdeling 10, en luchtbeweging hoog in het gewas (LH) in afdelingen 12 en 15. Er zijn geen fotosynthesemetingen verricht aan luchtbeweging hoog in het gewas met halve lichtsnelheid (LH^{1/2}). Afdeling 17 (LL) is uitgevallen wegens de aanwezigheid van PepinoMozaïekVirus.

De lichtresponscurven zijn per behandeling bepaald op twee gewashoogten, te weten hoog in het gewas (gedefinieerd als het eerste of tweede niet-beschaduwde blad onder de eerste bloeiende tros) en halverwege het gewas (gedefinieerd als een blad tussen de vierde en de vijfde tros), en bij drie CO₂-niveaus in de bladkamer, te weten 400, 700 en 1000 ppm. Het onderscheid in gewashoogte is gemaakt omdat de fotosynthesekarakteristieken worden beïnvloed door het lichtniveau (adaptatie), dat halverwege het gewas lager is dan bovenin het gewas. Het is verder bekend dat ook het CO₂-niveau sterk bepalend is voor de fotosynthesekarakteristieken. In het experiment werd met open ramen een concentratie van ongeveer 400 ppm bereikt, en met gesloten ramen een concentratie van 700 ppm. Iedere curve is bepaald door de lichtintensiteit in de bladkamer in stappen te laten afnemen. Er is gemeten bij een lichtintensiteit op het blad van 1395, 930, 698, 465, 233, 93 en 0 $\mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Deze waarden zijn 93% van de lichtintensiteit van de lichtbron, omdat de lichttransmissie van het glas van de bladkamer 93% is. Per te bepalen curve zijn er steeds drie representatieve planten per afdeling geselecteerd, die ten opzichte van de zon zich steeds aan dezelfde kant van de rij bevonden.

Samenvattend zijn er lichtresponscurven voor fotosynthese en verdamping bepaald voor:

- 3 luchtcirculatiebehandelingen, en 2 afdelingen per behandeling (behalve LL)
- 3 CO₂ niveaus
- op 2 hoogtes in het gewas
- per afdeling 3 planten per curve

Dit heeft in totaal: 3 (behandelingen) x 2 (herhalingen) x 3 (planten) x 3 (CO₂) x 2 (hoogtes) = 108 curven opgeleverd.

De metingen zijn uitgevoerd tussen 3 augustus en 13 september 2005 verricht met een draagbare fotosynthesemeter (LCpro+, ADC, Hoddesdon, Verenigd Koninkrijk) met een bladkamer van 6.25 cm² (Figuur 3-1), waarin lucht met een constante snelheid langs het blad in de bladkamer stroomt. Het distale blaadje van het samengestelde tomatenblad werd ingeklemd in de bladkamer. Uit het verschil tussen de hoeveelheid CO₂ en water van de ingaande en uitgaande lucht wordt de fotosynthese en de verdamping berekend. Naast het stralingsniveau kunnen in de bladkamer CO₂-niveau, temperatuur en relatieve

luchtvochtigheid worden ingesteld. Er is gemeten bij een constante luchttemperatuur in de meetkamer van 25 °C. Achteraf werd vastgesteld dat de kasluchttemperatuur tussen 9 en 17 uur tussen ongeveer 22 en 25 °C varieerde (met extreme waarden van 20 en 29 °C). De gemiddelde relatieve luchtvochtigheid van de uitgaande lucht werd bij de metingen op 80% ingesteld. Dit vereist een lagere relatieve luchtvochtigheid van de ingaande lucht. Ervaring heeft geleerd dat deze waarden laag genoeg zijn om het blad te laten verdampen, terwijl het dicht genoeg bij de relatieve luchtvochtigheid van de kas licht. Iedere dag is twee maal met een lege bladkamer gemeten om te kunnen corrigeren voor het geringe CO₂ verlies (ongeveer 0.5%) als gevolg van lekkage van de bladkamer.

De metingen zijn dus uitgevoerd bij geconditioneerde omstandigheden in de bladkamer en niet bij actuele condities waaraan het gewas tijdens de groei blootstaat. Ook de grenslaagweerstand in de bladkamer is veranderd ten gevolge van de luchtstroom langs het blad in de bladkamer.



Figuur 3-1 De bladkamer van de fotosynthesemeter voor het meten van fotosynthese en verdamping aan tomaat.

De dag van het jaar is van invloed op de fotosynthesekarakteristieken van tomaat. Doordat de maximale fotosynthesesnelheid bij hoge lichtintensiteit (A_{\max}) positief is gecorreleerd aan het stralingsniveau, is de A_{\max} in de zomer hoger dan in de winter. Er is weliswaar in een relatief beperkte periode gemeten, maar uit voorzorg is hier toch rekening mee gehouden. Ook het tijdstip binnen een dag is van invloed op de fotosynthesekarakteristieken. Er is daarom een zorgvuldige warring uitgevoerd binnen een dag en over de dagen van het meetmoment van de te meten curven, dusdanig dat het gemiddelde meetmoment voor iedere behandeling (6 curven) gelijk was. Aan ieder van de drie luchtbewegingsbehandelingen is steeds een meting hoog in het gewas en een meting halverwege het gewas uitgevoerd. De 2 herhalingen zijn steeds op verschillende, niet opeenvolgende dagen gemeten, en ook de 3 planten per kas per curve zijn steeds op verschillende, niet opeenvolgende dagen gemeten.

Doordat in afdeling 17 (behandeling LL) op 17 augustus het PepinoMozaïekVirus werd geconstateerd, en de planten in deze afdeling werden geruimd, zijn er in dit afdeling geen metingen verricht. Ter compensatie zijn in de andere afdeling met deze zelfde behandeling (afdeling 10) aan zes in plaats van drie planten metingen verricht.

3.2.2 Statistische verwerking fotosynthesemetingen

De metingen resulteerden in 108 fotosynthese-lichtresponscurven die het verband aangaven tussen het lichtniveau ($\mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en CO₂-assimilatiesnelheid ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Iedere curve is apart gefit met een 'non-rectangular' hyperbool:

$$A_{ss} = \left(\varepsilon R + (A_{\max} - R_d) - \sqrt{\left((\varepsilon R + A_{\max} - R_d)^2 - 4\Theta \varepsilon R (A_{\max} - R_d) \right)} \right) / (2\Theta) \quad (1)$$

Waarin:

A_{ss} : bruto CO₂-assimilatiesnelheid (μmol m² s⁻¹)

A_{\max} : maximale netto CO₂-assimilatiesnelheid bij (zeer) hoge lichtintensiteit (μmol m² s⁻¹)

R_d : donkerademhaling, mitochondrische respiratie (μmol m² s⁻¹)

ε : initiële lichtbenuttingssnelheid (μmol CO₂ m² s⁻¹ / [μmol PAR m² s⁻¹])

Θ : parameter die de buiging van de curve beschrijft

R : fotosynthetisch actieve straling (PAR, (μmol m² s⁻¹))

A_{\max} is de maximale A_{ss} bij zeer hoge lichtintensiteit, of de asymptotische waarde van A_{ss} . Niet in alle gevallen werd dit hoge lichtniveau gehaald, zodat de hoogst gemeten waarde van A_{ss} soms lager was dan $(A_{\max} - R_d)$.

Om te beoordelen of twee curven gelijk aan elkaar zijn of van elkaar verschillen, is geanalyseerd of de parameters aan elkaar gelijk zijn (A_{\max} , R_d , ε , en Θ). Als er een significant verschil bestaat tussen de waarden van een of meer van de parameters, zijn de curven niet gelijk aan elkaar.

Omdat in afdeling 17 niet was gemeten, was van de behandeling LL een herhaling met zes metingen beschikbaar, in plaats van twee herhalingen met elk drie metingen. De proefopzet was daardoor ongebalanceerd, zodat een variantie-analyse in de vorm van een REML-procedure (residual maximum likelihood) werd toegepast. REML verschaft in een dergelijk geval een juiste schatting van de restvariantie. De variantie-analyse werd uitgevoerd voor alle 108 curven, met luchtcirculatie, CO₂-concentratie en gewashoogte als hoofdeffecten. Er werd getoetst bij $p < 0.05$. Indien een effect als significant werd beoordeeld, werden onderlinge verschillen tussen behandelingsniveaus getoetst (Isd, $p < 0.05$).

3.2.3 Statistische verwerking verdampingsmetingen

De metingen resulteerden daarnaast in 108 verdamping-lichtresponscurven die het verband aangaven tussen het lichtniveau (μmol PAR m² s⁻¹) en de verdampingsnelheid (mmol H₂O m² s⁻¹). De verdampingsnelheden vertoonden een lineair stijgend verband vanaf 93 μmol PAR m² s⁻¹, en een veel sterker stijgend verband tussen 0 en 93 μmol PAR m² s⁻¹. Er is voor gekozen om ten behoeve van de vergelijking tussen de behandelingen alleen het gedeelte vanaf 93 μmol PAR m² s⁻¹ lineair te fitten, en de verdampingswaarnemingen bij 0 μmol PAR m² s⁻¹ buiten beschouwing te laten. Het erbij betrekken van het gedeelte onder 93 μmol PAR m² s⁻¹ zou een lastige fit met zich meebrengen, zonder de resultaten wezenlijk te beïnvloeden.

3.2.4 Narekenen van de gewasgroei

Er werd geen effect van de luchtbeweging op de fotosyntheseparameters gevonden (zie paragraaf 3.3.1), net zomin als er verschillen in totale biomassa en geoogst droog- en versgewicht werden gevonden (zie paragraaf 2.3.2). Het was dus niet nodig om verkennende studies op dit vlak uit te voeren. Er is wel geëvalueerd of het INTKAM tomatenmodel de experimenteel verkregen gegevens kon reproduceren. Omdat de klimaten per afdeling licht van elkaar verschilden, en het lastig is om een gemiddeld klimaat te beschrijven, is iedere afdeling apart doorgerekend.

In het INTKAM tomatenmodel werd het volgende gedefinieerd:

- plantdatum
- orgaangewichten op plantdatum
- aanhouden en toppen van scheuten
- de grenslaagweerstand, per behandeling, en per gewasdiepte (zie paragraaf Bijlage 7)

3.3 Resultaten

3.3.1 Fotosynthesemetingen

In Tabel 3-1 zijn de gemiddelde netto fotosynthesesnelheden bij de hoogste lichtintensiteit van $1395 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ samengevat. Bij een hoog CO_2 -niveau van 1000 ppm is de gemeten fotosynthesesnelheid bovenin het gewas bij een hoge lichtintensiteit $45.4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Een CO_2 -niveau lager dan 700 ppm, een lagere lichtintensiteit, en een lagere positie in het gewas hebben allemaal een reducerend effect.

Uit Figuur 3-2 blijkt dat deze verschillen ook bij andere lichtniveaus te vinden zijn. Daarnaast blijkt dat alleen bij 400 ppm CO_2 het verzadigingsniveau in de fotosynthese is bereikt. Bij 700 en 1000 ppm CO_2 is het aannemelijk dat de curve voorbij het hoogste gemeten lichtniveau verder stijgt.

Tabel 3-1 Gemiddelde netto fotosynthese bij een lichtintensiteit van $1395 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ op het tomatenblad, gemeten bij drie luchtcirculatiebehandelingen in de kas, drie CO_2 -niveaus in de bladkamer en op twee gewashoogtes.

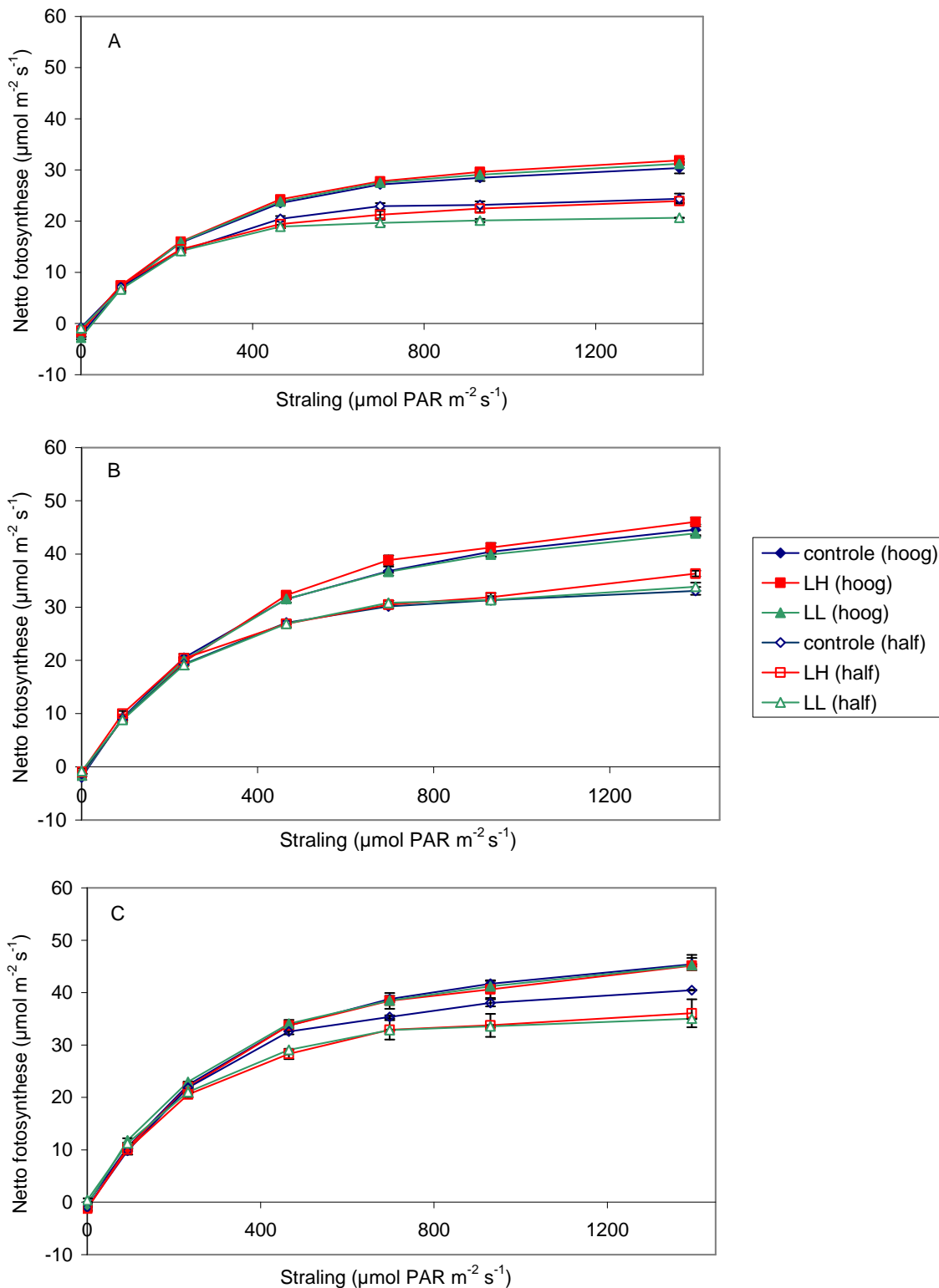
Meethoogte	Luchtcirculatie-behandeling	Netto fotosynthesesnelheid ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)		
		400 ppm CO_2	700 ppm CO_2	1000 ppm CO_2
Bovenin gewas	Controle	30.4	44.6	45.4
	LH	31.9	46.1	45.1
	LL	31.2	43.9	45.2
Halverwege gewasdiepte	Controle	24.4	33.1	40.5
	LH	23.9	36.3	36.1
	LL	20.7	33.8	35.0

De vraag is echter in hoeverre deze verschillen statistisch significant zijn. Hiertoe werden de 108 curven elk apart met een 'non-rectangular' hyperbool gefit. De gemiddelde r^2 van deze fits was 99.5%. De resultaten van de variantie-analyse zijn in Tabel 3-2 samengevat:

- de luchtcirculatiebehandeling had geen significant effect op ieder van de vier parameters;
- het CO_2 niveau had een significant effect op A_{max} , R_d en ε ;
- de meethoogte had een significant effect op A_{max} en Θ .

Aangezien twee curven alleen dan aan elkaar gelijk zijn als alle parameters aan elkaar gelijk zijn, kan worden geconcludeerd dat er vier significant verschillende curven zijn gevonden (Tabel 3-3):

- bij 400 ppm CO_2 hoog in het gewas,
- bij 700 en 1000 ppm CO_2 hoog in het gewas
- bij 400 ppm CO_2 halverwege het gewas,
- bij 700 en 1000 ppm CO_2 halverwege het gewas.



Figuur 3-2 Lichtresponscurven van tomaat gemeten bij drie luchtcirculatiebehandelingen en op twee meethoogtes bij 400 (A), 700 (B) en 1000 (C) ppm CO₂ in de bladkamer. De gegeven punten zijn het gemiddelde van 6 metingen. De verticale lijnen geven de standaardfout weer.

Tabel 3-2 De overschrijdingskans op significante verschillen voor de vier parameters die de gefitte fotosyntheselichtresponscurve beschrijven voor de factoren luchtcirculatiebehandeling, CO₂ niveaus waarbij is gemeten en meethoogte in het gewas.

Parameter	Luchtcirculatie- behandeling	CO ₂ niveau (ppm)	meethoogte
A_{\max}	0.87	< 0.001 *	< 0.001 *
ε	0.64	< 0.001 *	0.09
R_d	0.61	0.04 *	0.05
Θ	0.97	0.10	0.01 *

*: significant bij $p < 0.05$

Alleen het interactie-effect tussen luchtcirculatie en gewashoogte met betrekking tot de initiële lichtbenuttingsefficiëntie ε was significant ($p = 0.02$). Dit betekent dat de waarde van ε per gewashoogte wordt beïnvloed door het type luchtcirculatie. Nadere bestudering van de meetgegevens leidt niet tot structurele effecten, wat eigenlijk ook niet te verwachten was, omdat het een interactie-effect betreft. Een verklarende analyse is alleen mogelijk door diepere processen te kwantificeren. Hiervoor ontbreken de gegevens. Het is in ieder geval zo dat de variatie in ε leidt tot 3% variatie in totale drogestofproductie, wat beperkt is. Het zal nuttig zijn om in geval van verder energieonderzoek alert te blijven op de waarde van ε .

Bij een hoog CO₂-niveau is na fitten de A_{\max} 52.6 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Dit is hoger dan de gemeten gemiddelde fotosynthesnelheid bovenin het gewas bij een hoge lichtintensiteit 45.4 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Het verschil tussen deze twee grootheden is dat A_{\max} hoort bij een hoger lichtniveau dan het hoogste gemeten lichtniveau. Een lager CO₂-niveau, een lagere lichtintensiteit, en een lagere positie in het gewas hebben een reducerend effect.

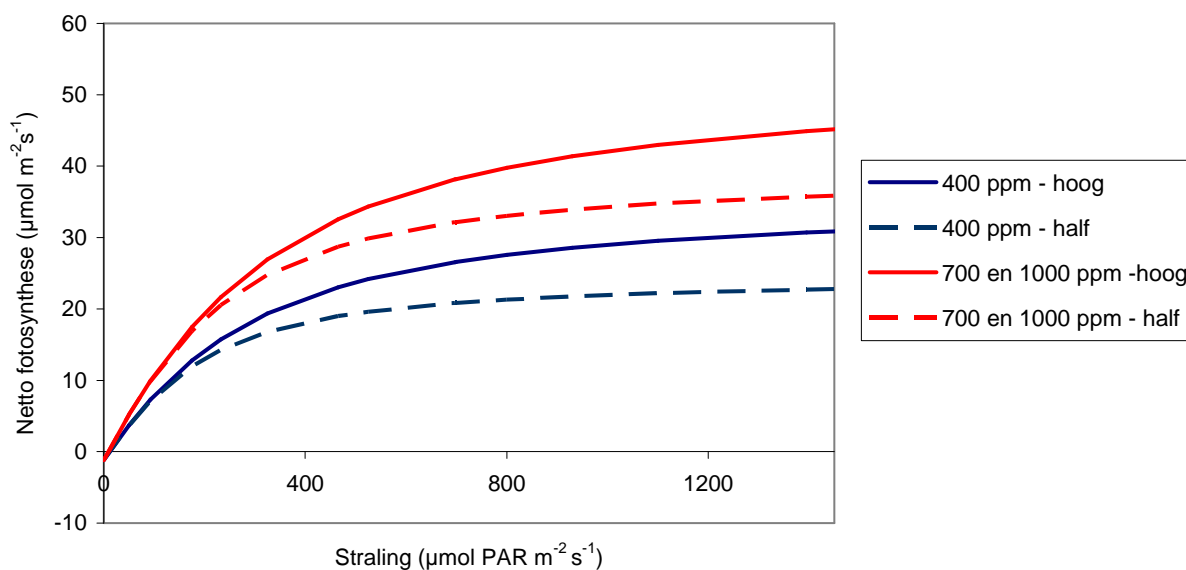
De variatie in de waarde van R_d resulteert in 0.39% variatie in de totale drogestofproductie. Dit is zeer laag. Omdat daarnaast de parameterschatting van R_d vaak slechte resultaten oplevert (Medlyn et al., 2002, Yin et al., 2004), is het verantwoord om het effect van R_d buiten beschouwing te laten in het denken over de energiebesparende mogelijkheden.

De uiteindelijke 4 curven staan weergegeven in Figuur 3-3.

De metingen waren goed binnen een dag en over dagen gewaard omdat er rekening werd gehouden met een effect van de tijd op de potentiële fotosynthese. Zoals uit de figuren in Bijlage 9 blijkt, is er binnen een dag geen tijdseffect op A_{\max} bij 400 ppm, maar wel bij 700 en 1000 ppm. Omdat de afname binnen een meetdag lineair lijkt te zijn - er is geen statistische toets uitgevoerd - zorgt de warring voor een goede berekening van het gemiddelde. Binnen de meetperiode zijn er lichte lineaire trends (Bijlage 10). Ook in dit geval is de warring voldoende goed geweest om tot juiste gemiddelden te komen.

Tabel 3-3 Gemiddelde parameterwaarden die de lichtresponscurven voor fotosynthese beschrijven voor twee meethoogtes in het gewas en twee CO₂-niveaus.

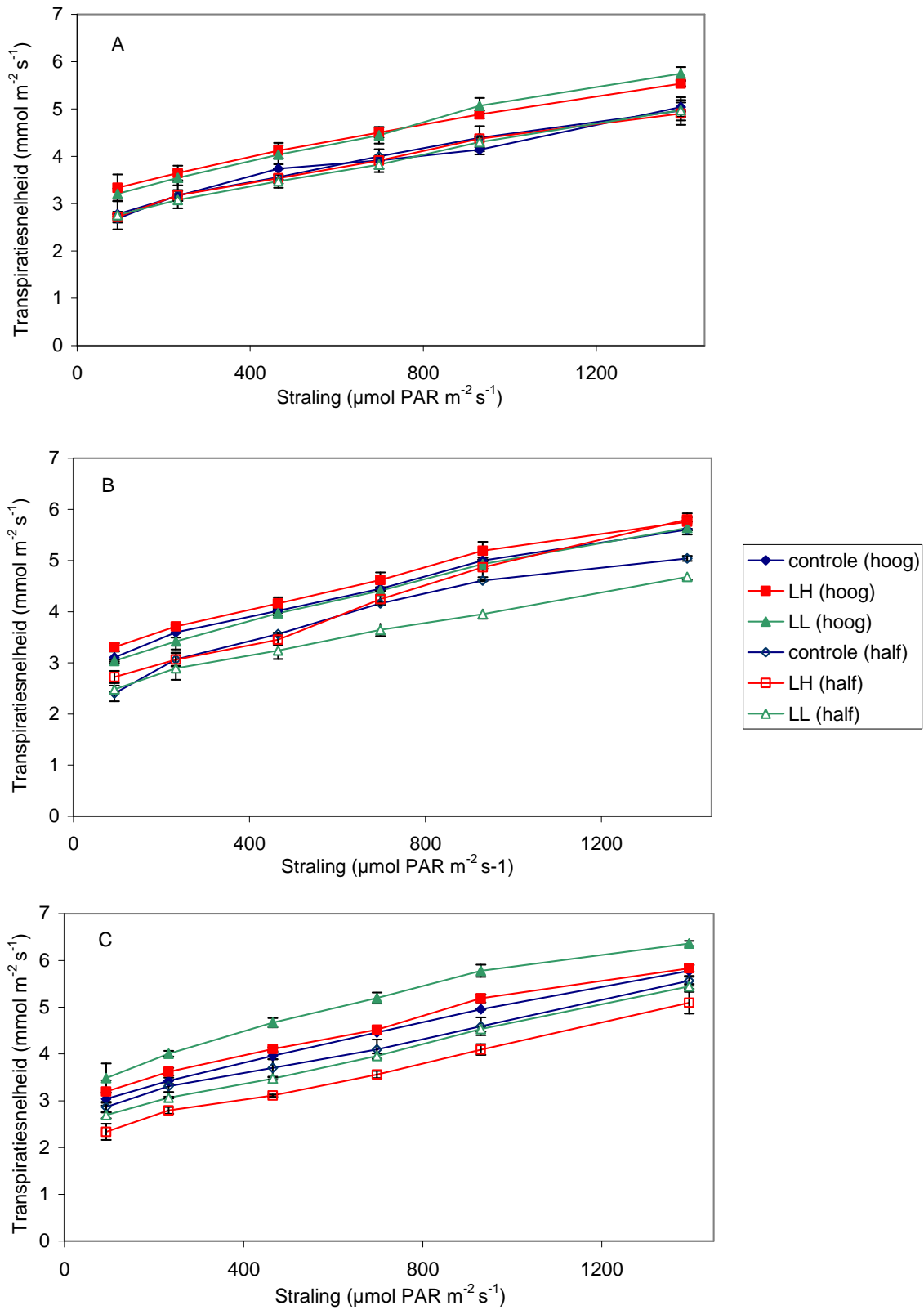
Hoogte	Parameter	CO ₂ (ppm)	
		400	700 en 1000
Hoog	A_{\max}	35.2	52.6
	ϵ	0.11	0.14
	R_d	-1.2	-1.2
	Θ	0.48	0.48
Halverwege	A_{\max}	24.5	39.2
	ϵ	0.11	0.14
	R_d	-1.2	-1.2
	Θ	0.61	0.61



Figuur 3-3 De vier lichtreponscurven voor fotosynthese die significant verschillend zijn met betrekking tot de CO₂ concentratie in de bladkamer en de meethoogte in het gewas.

3.3.2 Verdampingingsmetingen

In Figuur 3-4 zijn de verdampingmetingen bij de verschillende lichtniveaus, onder belichte omstandigheden weergegeven. In alle gevallen is er een lineair stijgend verband met toenemend lichtniveau. De verdamping stijgt van ongeveer 3 mmol H₂O m² s⁻¹ bij 93 µmol PAR m² s⁻¹ tot ongeveer 5 mmol H₂O m² s⁻¹ bij 1395 µmol PAR m² s⁻¹.



Figuur 3-4 Verdampingssnelheid van tomaat gemeten bij drie luchtcirculatiebehandelingen en op twee meethoogtes in het gewas bij 400 (A), 700 (B) en 1000 (C) ppm CO₂ in de bladkamer. Meetpunten zijn het gemiddelde van 6 metingen met de se. Het betreft hier de bladverdamping, niet de gewasverdamping.

Uit Tabel 3-4 blijkt dat er significante verschillen bestaan tussen de hellingshoeken van de fits voor wat betreft het CO₂ niveau, en tussen de intercepts voor wat de gewashoogte. Er bestaan geen significante verschillen voor wat betreft de wijze van luchtcirculatie. Er werden geen significante interactieverschillen gevonden. Het effect van een hoger CO₂-niveau uit zich in een grotere hellingshoek, terwijl het effect van een hogere locatie in het gewas zich uit in een hoger algemeen niveau.

Er kan dus net als in het geval van de fotosynthesecurven worden geconcludeerd dat er vier significant verschillende curven zijn gevonden: bij 400 ppm, 700 en 1000 ppm, hoog in het gewas en halverwege het gewas (Tabel 3-5 en Figuur 3-5).

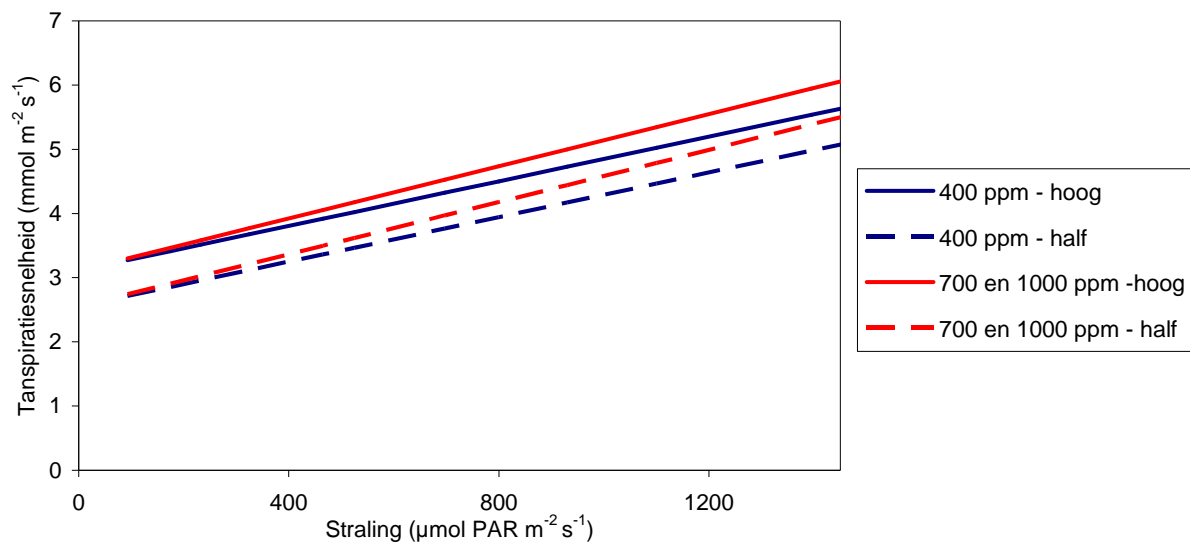
Tabel 3-4 De overschrijdingskans op significante verschillen voor de twee parameters die de gefitte verdampingslichtresponscurve beschrijven voor de factoren luchtcirculatiebehandeling, CO₂ niveaus waarbij is gemeten en meethoogte in het gewas.

Parameter	Luchtcirculatie-behandeling	CO ₂ (ppm)	meethoogte
Helling	0.85	0.009*	0.98
intercept	0.98	0.93	<0.001*

*: significant bij $p < 0.05$

Tabel 3-5 Gemiddelde waarden voor de parameters die de verdampingscurven beschrijven voor tomaat, voor twee meethoogtes in het gewas en voor twee CO₂ niveaus.

Hoogte	Parameter	CO ₂ (ppm)	
		400	700 en 1000
Hoog	Helling	0.0017	0.0020
	intercept	3.11	3.11
Halverwege	Helling	0.0017	0.0020
	intercept	2.55	2.55



Figuur 3-5 De vier lichtreponscurven voor verdamping die significant verschillend zijn met betrekking tot de CO_2 concentratie in de bladkamer en de meethoogte in het gewas.

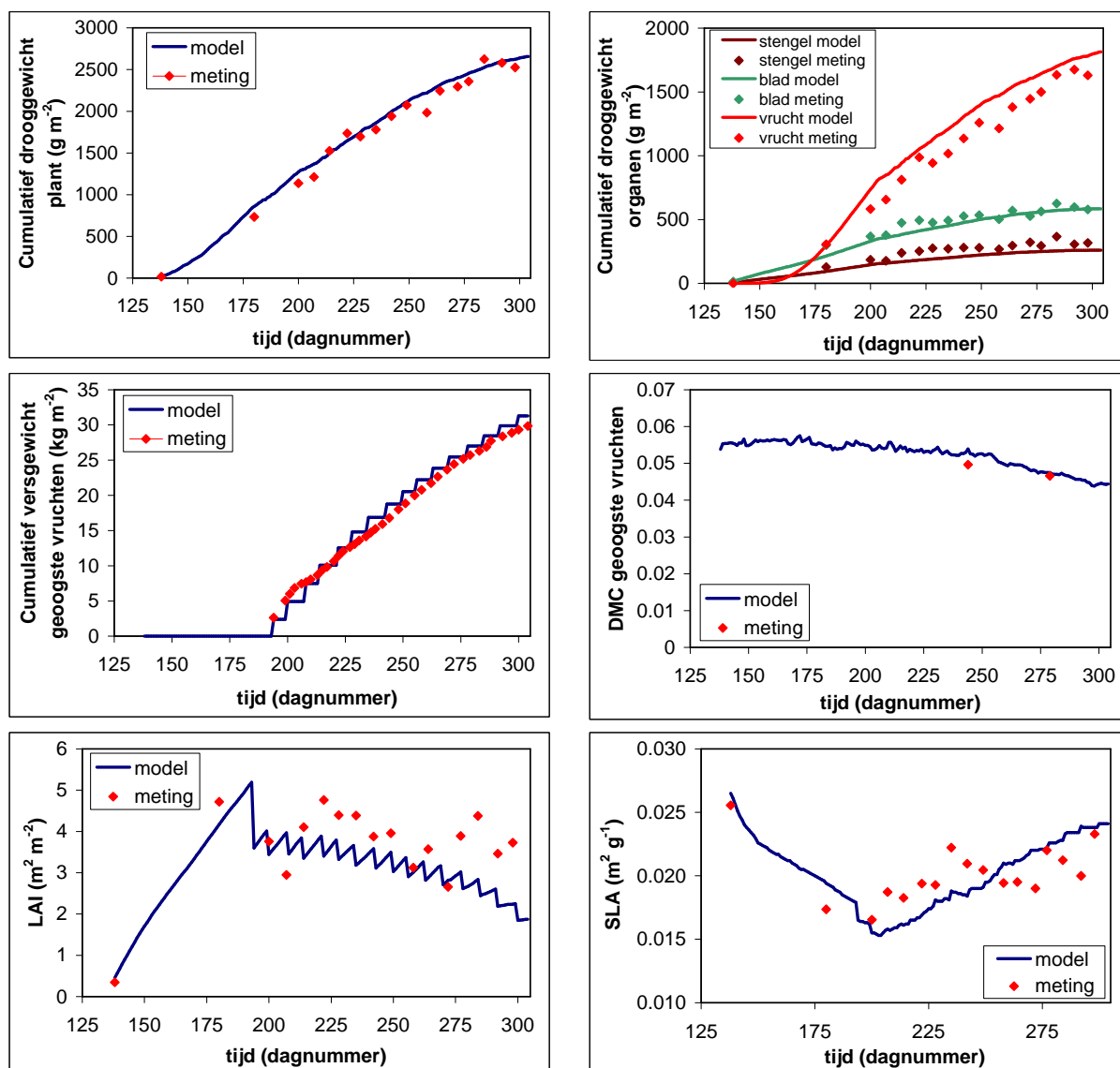
3.3.3 Narekenen van de gewasgroei en verdamping

Gewasgroei

De totale bovengrondse drogestoftoename wordt goed gesimuleerd, zoals uit Figuur 3-6 blijkt. De cumulatieve waarnemingen vertonen – hoe vreemd dit in eerste instantie ook lijkt – nu en dan een daling. Dit wordt veroorzaakt doordat ieder meetpunt is gebaseerd op slechts een plant, en niet op het gemiddelde van bijvoorbeeld vier waarnemingen. Door de normale variatie tussen planten kan het gewicht van de betreffende plant relatief laag zijn geweest, en kan het gewicht op basis hiervan berekende cumulatieve gewicht ook relatief laag zijn geweest; lager dan het gemiddelde van het hele gewas. De simulatieresultaten moeten dus worden vergeleken met de trend van de waarnemingen.

Als de totale bovengrondse cumulatieve groei wordt uitgesplitst naar organen, dan blijkt dat het vruchtgewicht licht wordt overschat, ten koste van een lichte onderschatting van het stengelgewicht. Het moment van eerste oogst goed wordt goed gesimuleerd, en daarnaast komt ook het gesimuleerde drogestofgehalte van de vruchten en het geoogste versgewicht goed overeen met de waarnemingen. Ook de gesimuleerde ontwikkeling van het specifiek bladgewicht volgt goed de waarnemingen. De gesimuleerde bladbedekkingsgraad (LAI) vertoont aan het einde van het seizoen een onderschatting. Dit kan het gevolg zijn van het feit dat het model een sterkere bladpluk aanneemt dan in de praktijk is gerealiseerd. De gevolgen hiervan voor de simulatieresultaten zijn beperkt: als wordt gerekend met een opgelegde LAI volgens de waarnemingen, dan geeft dit 1,7% extra totale drogestof. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat de lichte onderschatting van de LAI aan het einde van de teelt, wanneer de lichtniveaus laag zijn, weinig gevolgen heeft voor de totale hoeveelheid onderschept licht.

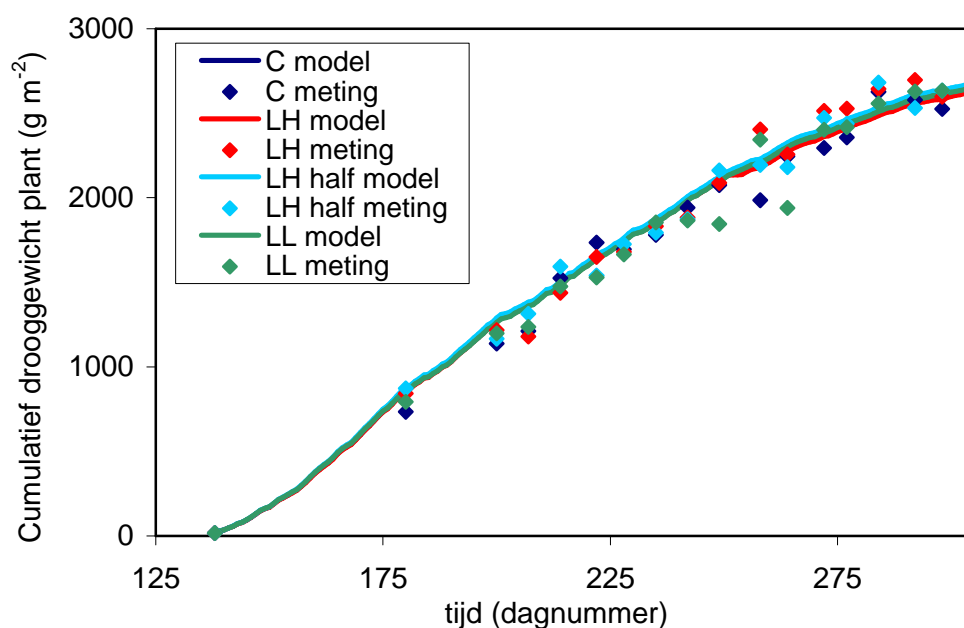
De simulatieresultaten per afdeling zijn te vinden in Bijlage 8.



Figuur 3-6 Waargenomen en gesimuleerde waarden voor de controlebehandeling in afdeling 11. Gegeven zijn de volgende eigenschappen:

- cumulatieve totale bovengrondse drogestoftoename
- cumulatieve drogestoftoename van de bovengrondse organen
- cumulatieve toename van het versgewicht van de geoogste vruchten
- drogestofgehalte van de vruchten
- leaf area index (LAI)
- specifiek bladgewicht (SLA)

Er zijn tussen de behandelingen (afdelingen) geen significante verschillen in klimaat (met uitzondering van de RV behandeling LL, zie Tabel 2-1) en fotosynthesekarakteristieken gemeten. Hierdoor worden er ook geen significante groeiverschillen gesimuleerd (Figuur 3-7 en Tabel 3-6). Dit heeft tot gevolg dat de gesimuleerde vruchtproducties ook weinig van elkaar verschillen (Tabel 3-6), net als in het geval van de waarnemingen.



Figuur 3-7 Waargenomen en gesimuleerde cumulatieve totale bovengrondse drogestoftoename voor de behandelingen C, LL en LH. Van iedere behandeling is een afdeling gekozen.

Tabel 3-6 Gesimuleerde totale drogestofproductie en vruchtproductie (droog) per compartiment.

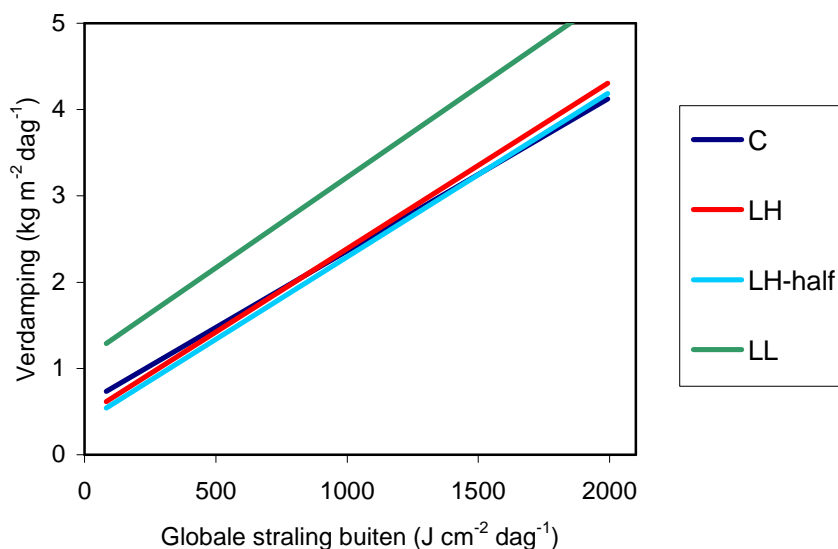
Behandeling	Kas	Gesimuleerde totale drogestofproductie (kg m ⁻²)	Gesimuleerde totale vruchtproductie (kg (vers) m ⁻²)
Controle	11	2623	31.3
	18	2649	31.8
LL	10	2608	30.8
	LH	12	2584
LH ½	15	2624	31.3
	16	2603	31.0
gemiddeld		2618	31.2

Gewasverdamping

Omdat de LAI aan het einde van de teelt iets werd onderschat en de grootte van de LAI van invloed is op de berekende gewasverdamping, is de simulatie van de gewasverdamping geëvalueerd met een opgelegde LAI. De simulatieresultaten hiervan zijn weergegeven in Figuur 3-8.

Voor LL werd een hogere verdamping gesimuleerd dan voor de andere behandelingen, die onderling weinig verschillen vertoonden. Windsnelheid zelf is niet een invoervariabele van het gewasmodel, maar is 'vertaald' naar een waarde voor de grenslaagweerstand (Bijlage 7). Voor LL heeft de grenslaagweerstand onderin het gewas een waarde van 80 s m⁻¹, terwijl deze waarde voor de andere gewashoogten 190 s m⁻¹ bedraagt. Door deze lagere grenslaagweerstand onderin het gewas is de gewasverdamping van LL hoger dan die van

de andere drie behandelingen. Als voor alle gewashoogten een grenslaagweerstand van 190 s m^{-1} wordt aangenomen, daalt de gewasverdamping van LL aanzienlijk, maar ligt nog steeds ongeveer $0.35 \text{ kg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ boven het niveau van de andere drie behandelingen. Als voor de simulatie LL het klimaat van C wordt gebruikt, dan zakt de gewasverdamping van LL verder tot het niveau van de andere behandelingen. Dit betekent dat er tussen het klimaat van LL en de andere behandelingen dusdanige verschillen hebben bestaan, dat dit tot een hogere gesimuleerde waarde heeft geleid. Nadere bestudering van de klimaatgegevens gaf aan dat de relatieve luchtvochtigheid van LL over het geheel genomen iets lager is geweest dan dat van de controle (zie ook Tabel 2-1).



Figuur 3-8 Gesimuleerde dagelijkse gewasverdamping in relatie tot de globale straling buiten. Zie voor een vergelijking Figuur 2-9.

LH verschilt van C in een grenslaagweerstand van 75 s m^{-1} in de bovenste bladlaag. De omvang van deze bladlaag is in het model echter relatief klein, en draagt niet voldoende bij aan de gesimuleerde gewasverdamping om voor een wezenlijke verschuiving ervan te zorgen. $\text{LH}^{1/2}$ verschilt van C in een grenslaagweerstand van 105 s m^{-1} in de bovenste bladlaag, wat uiteraard evenmin voor een grote verschuiving van de gesimuleerde gewasverdamping zorgt.

3.4 Discussie

3.4.1 Adaptatie van fotosynthese

Het meest relevante gegeven van het experiment is dat de wijze van luchtcirculatie geen effect heeft op de karakteristieken van de fotosynthese-lichtreponscurve. In dit verband is het goed op te merken dat ook een langdurig hoog of laag CO_2 -niveau bij paprika niet leidt tot een adaptatie van de fotosynthese (Dieleman et al., 2003). Er hebben dus geen adaptatieprocessen plaatsgevonden die geleid hebben tot een andere potentiële fotosynthese bij bepaalde omstandigheden. Het blijft uiteraard wel mogelijk dat de luchtcirculatie zorgt voor verschillende momentane omstandigheden die leiden tot een andere actuele fotosynthese.

De fotosynthesemetingen gaven aan dat de fotosynthesesnelheid stijgt bij stijgend lichtniveau, stijgend CO_2 -niveau en een hoger meetpunt in het gewas. De eerste twee resultaten zijn bekende fysiologische basisprincipes, die ook bij fotosynthesemetingen aan andere gewassen naar voren komen (paprika: Dieleman & de Zwart, 2004; roos: Marissen et al., 2005). Het derde resultaat houdt verband met adaptatie

van de fotosynthese aan lichtomstandigheden: het relatief lage lichtniveau dieper in het gewas uit zich in een verlaagde capaciteit van de fotosynthese. Dit is uit eerdere onderzoeken bekend (Dueck et al., 2005; Hydrion-project, ongepubliceerde resultaten).

De controle laat van 400 naar 1000 ppm CO₂ een stijging zien van 30.4 naar 45.4 μmol m⁻² s⁻¹ (49%). Dit komt overeen met een stijging van 44% die Heuvelink (1996) heeft gemeten tussen 340 naar 900 ppm CO₂. Het is opvallend dat de gemeten fotosynthesesnelheden bij 700 ppm CO₂ relatief hoog lagen en er als gevolg hiervan geen significante verschillen zijn gevonden tussen de fotosynthesesnelheden bij 700 en 1000 ppm CO₂. Nederhoff & Vegter (1994) voerden metingen uit in verschillende experimenten, en vonden tussen 350 en 700 ppm CO₂ een gemiddelde stijging in fotosynthesesnelheid van 30% (variërend van 14% tot 50%). En Heuvelink (1996) vond tussen 500 en 900 ppm CO₂ een stijging van 17%. Bij het gewas paprika vonden Dieleman & de Zwart (2004) tussen 600 en 1100 ppm CO₂ een stijging in de fotosynthesesnelheid van 48%. Er is geen duidelijke verklaring voor het feit dat de fotosynthesecapaciteit bij 700 ppm CO₂ wordt bereikt, terwijl het gebruikelijk is dat dit niveau hoger ligt.

Bij 700 en 1000 ppm CO₂ is het punt van lichtverzadiging niet bereikt, en is het aannemelijk dat de gefitte curve voorbij het hoogste gemeten lichtniveau verder stijgt. Dit doet echter niets af aan de waarde van de metingen, aangezien met de fitprocedure parameters worden geschat die onafhankelijk van het lichtniveau zijn, en met behulp van deze parameters de verschillende behandelingen worden vergeleken.

Het is erg belangrijk geweest dat er een goede warring is toegepast. Zeker binnen een meetdag vond er bij 700 en 1000 ppm CO₂ een verandering van de A_{max} plaats tussen 9 en 16 uur. Op basis van metingen in andere experimenten kan worden aangenomen dat in de vroege uren van een dag er een stijging van de A_{max} plaatsvindt (zie te zijner tijd het verslag 'Energiezuinige Teeltstrategie' voor een uitgebreide behandeling). Ook dan is een goede warring belangrijk.

3.4.2 Adaptatie van verdamping

In vereenvoudigde vorm kan de verdamping als volgt worden beschreven:

$$E = \alpha \cdot \Delta VPD / (r_s + r_b)$$

E : verdampingssnelheid (mmol H₂O m⁻² s⁻¹)

α : parameter

ΔVPD : dampdrukverschil tussen lucht en blad (intern) (kPa)

r_s : huidmondjes (stomataire) weerstand (s m⁻¹)

r_b : grenslaag (boundary) weerstand (s m⁻¹)

Hierbij is er vanuit gegaan dat de cuticulaire weerstand zeer groot is en dat de cuticulaire gelijkbaarheid tot nul nadert. De verdamping is steeds bij dezelfde luchtsnelheid en dus bij dezelfde r_b gemeten. Als wordt aangenomen dat de straling evenredig is met het dampdrukverschil, dan ontstaat de volgende, verder vereenvoudigde (de werkelijkheid is complexer), vergelijking:

$$E = \beta \cdot R_{tot} / (r_s + r_b)$$

β : parameter

R_{tot} : totale straling (μmol m⁻² s⁻¹)

De resultaten van de verdampingsmetingen zijn consistent met de resultaten van de fotosynthesemetingen in de zin dat in beide gevallen er geen effect werd gevonden van de wijze van luchtcirculatie. Alleen CO₂-niveau en gewasdiepte hadden een effect. Het effect van een hogere locatie in het gewas uit zich in een hoger algemeen niveau, terwijl het effect van een hoger CO₂-niveau zich uit in een grotere hellingshoek.

Het hogere algemene niveau van de verdamping hoger in het gewas wijst er op dat hoger in het gewas de huidmondjesopening groter is en r_s kleiner is dan lager in het gewas. Immers, r_b was bij de metingen constant. Dit wijst op een adaptief proces als gevolg van de hogere lichtniveaus, die een hogere fotosynthese en een grotere huidmondjesopening induceren. Het is een adaptief proces omdat ook bij zeer lage lichtniveaus het effect in even grote mate merkbaar is. In het geval van paprika (Dueck et al., 2005)

zijn eerder aan vijf bladlagen transpiratiemetingen uitgevoerd tot een PAR lichtniveau van $1400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Ook hier bleek de verdampingssnelheid af te nemen met de gewasdiepte. Terwijl bij tomaat tussen boven en halverwege het gewas een daling in de verdampingssnelheid van $0.56 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ optrad, was dit bij paprika $1-2.5 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Dit houdt verband met het feit dat paprika op dat moment een aanzienlijk hogere LAI had dan tomaat, zodat de verdamping ook hoger lag.

Als er bij een hoger CO_2 -niveau wordt gemeten, is de hellingshoek in de relatie lichtintensiteit – verdampingssnelheid groter. Ook dit kan alleen worden verklaard door een grotere r_s . Het is echter geen adaptief proces omdat de verhoging van de verdamping niet optreedt bij zeer lage lichtniveaus. Bij een relatief hoog CO_2 -niveau gaan bij toenemende straling de huidmondjes sneller open, zodat r_s sterker daalt. Dit is consistent met het feit dat zowel een hoog CO_2 -niveau als een hoge straling tot een hogere fotosynthesesnelheid leiden, en de huidmondjesopening groter wordt om de diffusie van CO_2 mogelijk te maken.

Terwijl er op bladniveau, onder gestandaardiseerde omstandigheden, verschillen zijn met betrekking tot de verdampingssnelheid, is hiervan met modelberekeningen op gewasniveau weinig van terug te vinden. De belangrijkste reden is het feit dat de klimaten van de behandelingen min of meer gelijk zijn geweest, zodat dit niet tot andere gewasverdampingen heeft kunnen leiden. Verschillen in grenslaagweerstand waren opgelegd, en leidden alleen voor LL tot een wezenlijk andere verdamping. Voor de andere behandelingen waren de verschillen in grenslaagweerstand te klein.

3.4.3 Berekening van gewasgroei en verdamping

Gewasgroei

De gewasgroei en de versproductie werden goed gesimuleerd. De drogestofverdeling over de organen week enigszins af van de waarnemingen, en er werd door het model iets te veel drogestof naar de vruchten verdeeld. Het moment van de eerste oogst werd goed gesimuleerd, net als de daarop volgende hoeveelheden vers geoogste vruchten.

Als gevolg van de bemonsteringstechniek, waarbij iedere week een plant werd geoogst in plaats van om de paar weken een aantal planten, vertaalde de variatie tussen planten zich in een grillig verloop van de cumulatieve gewichtstoename. De gesimuleerde waarden moesten daarom worden vergeleken met de trend van de waarnemingen. Op zich levert deze aanpak goede resultaten. De arbeid van deze bemonsteringstechniek kan beter door de tijd worden gespreid; de dataverwerking is echter lastiger en kost echter meer tijd dan wanneer er minder vaak een aantal planten wordt geoogst.

Gewasverdamping

De gesimuleerde gewasverdamping van LL was hoger dan die van de andere behandelingen. Dit werd voor het grootste deel verklaard uit de lagere grenslaagweerstand onderin het gewas, en voor een kleiner deel uit het feit dat de relatieve luchtvochtigheid van deze behandeling over het geheel genomen iets lager was.

De grenslaagweerstand van de andere behandelingen verschilden niet voldoende om voor wezenlijk andere gewasverdamping te zorgen.

De gewasverdamping van LL is echter niet experimenteel bepaald, zodat niet kan worden geëvalueerd of het model in dit opzicht werkelijkheidsgetrouw is. De gewasverdamping van de andere drie behandelingen is wel gemeten (zie Figuur 2-9). Er werd aangetoond dat, na correctie voor LAI, de gewasverdamping van $\text{LH}^{1/2} \approx \text{LH} < \text{C}$. Deze verschillen worden door het model niet verklaard door alleen de effecten van de luchtbeweging op de grenslaagweerstand. Als een lagere gewasverdamping uit de grenslaagweerstand moet worden verklaard, moet worden aangenomen dat de grenslaagweerstand stijgt (indicatieve berekeningen tonen aan dat de grenslaagweerstand voor $\text{LH}^{1/2}$ dan ongeveer 400 s m^{-1} zou moeten bedragen). In paragraaf 5.3.2. is echter afgeleid dat de grenslaagweerstand juist kleiner, en niet groter, is geworden als gevolg van de luchtbeweging.

Een andere mogelijkheid is dat de luchtbeweging een effect heeft op de huidmondjesweerstand. Hier is vanuit de literatuur weinig bekend. Het uitgangspunt is dat het dampdrukdeficit (VPD) op het bladoppervlak (surface -> VPDs) zeer beperkt wordt beïnvloed door de VPD van de lucht, vanwege de voordurende

verdamping vanuit de huidmondjes en weerstand van de grenslaag. Bij hogere windsnelheden kan VPDs toch afnemen doordat er meer vocht door de grenslaagweerstand verdwijnt. In reactie hierop kunnen de huidmondjes sluiten, om te veel vochtverlies tegen te gaan. Dit effect is niet in het gewasgroeimodel opgenomen. Het kan wel nagebootst worden door per behandeling de waarde van een parameter die sterk bepalend is in het huidmondjesgedrag, aan te passen. Er kan zo een ruwe schatting worden verkregen van het effect van de windsnelheid op de huidmondjesgeleidbaarheid (Tabel 3-7). Het blijkt dat er forse veranderingen in de huidmondjesgeleidbaarheid aangenomen moeten worden.

Het lijkt raadzaam om de verdampingsroutines van het gebruikte model voor gebruik onder luchtcirculatie nog eens goed te evalueren.

Tabel 3-7 De uitgangssituatie gaf een bepaalde verdamping. De relatieve verandering in de huidmondjesgeleidbaarheid (Gs) om de gewasverdamping in overeenstemming te brengen met de waarnemingen.

Behandeling	Ten opzichte van de standaard Gs, de relatieve verandering in Gs om de gewasverdamping te calibreren	Relatieve waarde van de gecalibreerde Gs ten opzichte van de gecalibreerde Gs voor de controle
C	+ 76%	-
LH	- 21%	45%
LH½	- 63%	21%

3.5 Conclusie bladmetingen fotosynthese en verdamping

- De lichtresponscurven voor de fotosynthese werden niet door de luchtcirculatie beïnvloed. Er vindt dus geen adaptatie plaats. Wel door CO₂ niveau en plaats in het gewas.
- De lichtresponsecurven verschillen niet bij 700 en 1000 ppm CO₂.
- De verdampingscurven die gelijktijdig met de lichtresponscurven zijn bepaald werden niet beïnvloed door de luchtbeweging. Wel door CO₂ niveau en plaats in het gewas.
- De gewasgroei werd door het simulatie model INTKAM goed gesimuleerd. De gelijke kasklimaten met vergelijkbare parameters voor de fotosynthese leiden tot gelijke gesimuleerde producties. Dit komt overeen met de gemeten productie
- De gesimuleerde verdamping komt niet overeen met de verdamping gemeten met de weeggoet.
- Het verdient aanbeveling de verdampingsroutines voor gebruik onder luchtcirculatie goed te evalueren.

4. Chlorofylfluorescentiemetingen

4.1 Doel metingen

Om te kijken of er momentane effecten van de behandelingen op de fotosynthese kunnen optreden, is er voor gekozen om een indicator van de fotosynthese capaciteit ook d.m.v. chlorofylfluorescentie te bepalen. Omdat het bij fotosynthese metingen noodzakelijk is om te meten met een bekende, vastgestelde luchtsnelheid (dit is inherent aan de metingen als in hoofdstuk 3 beschreven), kunnen die metingen slechts bepalen of er adaptatie heeft plaatsgevonden, maar niet of er een momentaan effect bestaat van luchtbeweging op assimilatie.

Chlorofylfluorescentie is een bekende en veel gebruikte methode om de fotosynthese snelheid te schatten door een directe meting aan het fotosynthese apparaat van bladeren. Dit soort meting heeft een geforceerde luchtstroom niet nodig, waardoor noch de luchtsnelheid, noch de CO₂-concentratie om het blad wordt beïnvloed door de meting.

Een nadeel is echter dat hierbij in feite de beschikbare energie in het fotosysteem wordt gemeten, wat een maat is voor de elektronen transport snelheid in het systeem. Deze is gerelateerd aan de fotosynthese snelheid, maar het is zeker geen directe meting daarvan.

4.2 Materiaal en methode

Chlorofylfluorescentie werd gemeten met behulp van een aangepaste PAM-2000. Hierbij is het mogelijk om bij verschillende intensiteiten van het omgevingslicht (tot 2000 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) te meten welk deel van het toegediende meetlicht wordt teruggekaatst in de vorm van fluorescentie.



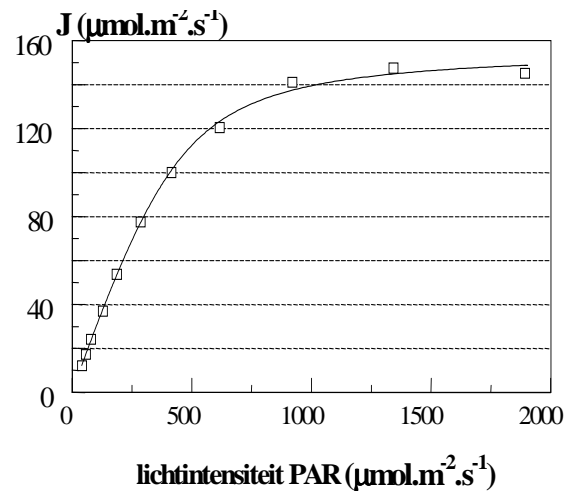
Figuur 4.1 Foto van een chlorofylfluorescentie meting

Het blad wordt vastgehouden door een klem om het lichtfiber op een vaste afstand van het blad te krijgen. Een meting bestaat uit een lichtresponse curve met 11 lichtstappen van 0-2000 PAR. Bij elke lichtintensiteit

wordt de fluorescentie (F) en de maximale fluorescentie (Fmax) van fotosysteem II bij die lichtintensiteit gemeten. Hieruit wordt de efficiëntie (Yield) berekend waarmee het licht gebruikt wordt en deze, samen met de lichtintensiteit, geeft de Elektronen Transport Snelheid (J , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), onafhankelijk van CO_2 concentratie en temperatuur. De metingen worden gefit met de volgende curve (niet rechthoekig hyperbool).

$$J = \frac{1}{2\theta} \left(\alpha I + J_{max} - \sqrt{(\alpha I + J_{max})^2 - 4\alpha I J_{max}} \right)$$

Waarin I de lichtintensiteit is, J_{max} is de elektronen transportsnelheid bij heel hoge lichtintensiteit, α is de initiële helling van de curve en θ is een parameter die de kromming aan geeft (dat is het gedrag tussen de minimale en maximale waarde). Met behulp van een statistisch pakket worden van een lichtresponse curve zoals hiernaast staat, de parameters J_{max} , α en θ geschat.



Figuur 4-1 Voorbeeld van lichtresponse curve

4.2.1 Meetschema

Er is in juli 2 dagen gemeten, vrij snel nadat de luchtslangen waren geïnstalleerd en vervolgens nog een keer in augustus, in de periode dat ook de fotosynthese werd gemeten.

Er werd steeds aan bladeren gemeten die voldoende licht kregen. Bijlage 10 laat dag, tijd, plant en blad zien waaraan is gemeten, met eventuele bijzonderheden.

In juli is niet aan de LH½-behandeling gemeten en op 2 augustus is door tijdgebrek slechts aan 1 i.p.v. 2 planten gemeten van de de LH-behandeling.

In de LH en LH½ compartimenten hingen de middenbladeren waaraan werd gemeten (net) onder de gaatjes van de luchtbuis.

Er is steeds aan planten gemeten, links van het pad. De bladeren hingen voldoende in het licht. In compartiment 9-12 is in het pad links van het midden gemeten, in 15-18 in de rij tegenover de deur.

4.2.2 Data verwerking

In de figuren van J_{max} , boven in het gewas gemeten, zijn de metingen van 2 meetdagen samengenomen. Van de metingen in augustus is de dataverwerking het meest uitgebreid. In juli waren de behandelingen nog maar nauwelijks begonnen.

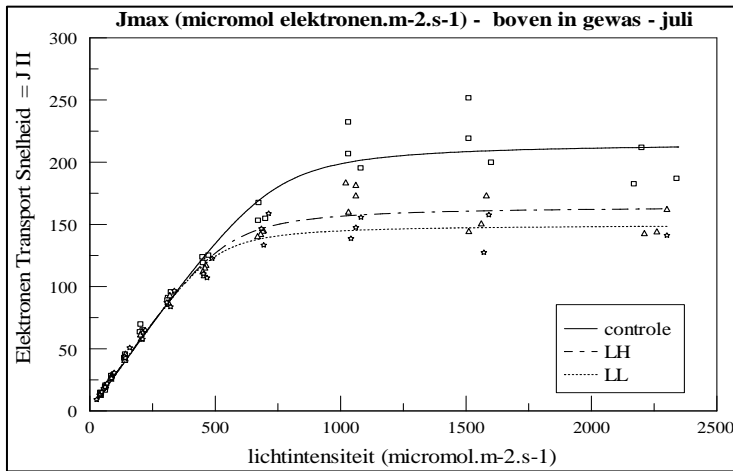
Voor alle chlorofylfluorescentie metingen in augustus is een aparte lichtresponse curve gefit. De waarden van J_{max} , van de hellingshoek alfa en van de kromming theta zijn met behulp van Genstat geanalyseerd. In eerste instantie zijn in één keer geanalyseerd:

behandeling * datum (2 en 3 aug.) * plaats (boven,midden). Omdat er een interactie bleek te zijn tussen behandeling, datum en plaats, zijn de metingen boven en in het midden van het gewas afzonderlijk geanalyseerd.

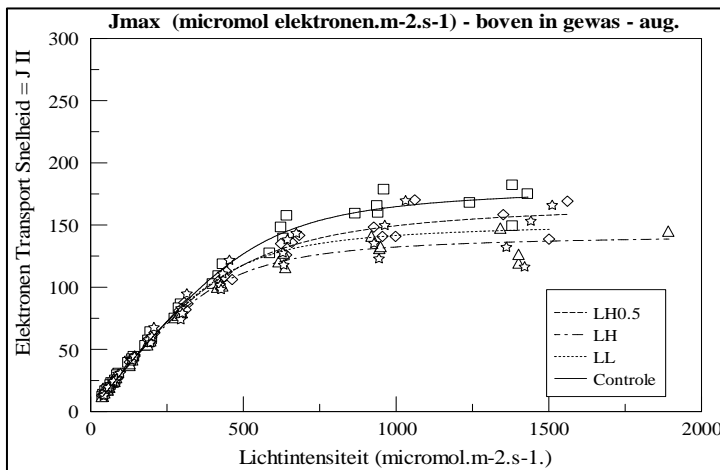
4.3 Resultaten

4.3.1 Maximale Elektronen Transport Snelheid (Jmax)

In juli is de maximale Elektronen Transport Snelheid (J_{max}) alleen bij de Controle bovenin het gewas hoger dan bij de andere behandelingen. Er is geen verschil tussen metingen in het midden van het gewas



Juli	J_{max} boven	J_{max} midden
Controle	215	178
LH $\frac{1}{2}$	-	-
LH	165	168
LL	150	179



Augustus	J_{max} boven	J_{max} midden
Controle	186	140
LH $\frac{1}{2}$	170	156
LH	145	97
LL	159	130
Lsd-waarde	34.4	31.7

Maximale Elektronen Transport Snelheid (J_{max}) gemeten in juli en augustus.

In augustus geeft de LH-behandeling, boven in het gewas gemeten, een lagere J_{max} te zien dan de Controle. Met de andere behandelingen is er geen verschil. Midden in het gewas gemeten geeft de LH-behandeling een lagere J_{max} te zien dan de andere 3 behandelingen. Er is een tendens dat de J_{max} van de LL-behandeling iets lager is dan bij de controle, maar deze verschillen zijn niet significant.

De waarden van J_{max} liggen in juli hoger dan in augustus. Bij de metingen boven in het gewas zijn de hellingshoek en de kromming voor alle behandelingen gelijk, zowel in juli als in augustus.

4.4 Discussie

De maximale elektronen transport snelheid (J_{max}) ligt bij de LH-behandeling significant lager dan bij de controle behandeling. Dit geldt zowel voor de topbladeren als voor de bladeren halverwege het gewas. In de andere behandelingen is J_{max} ook wat lager (althoewel niet significant) dan in het controle. Dus, de actuele maximale elektronen transport snelheid (een indicator van de fotosynthesecapaciteit) lijkt door luchtbeweging eerder te worden beperkt dan gestimuleerd. Vergelijking met de resultaten uit hoofdstuk 3 laat concluderen dat dit effect, als inderdaad aanwezig, een lokaal effect van de behandeling moet zijn en geen adaptatie in het gewas veroorzaakt.

De verlaging van J_{max} zou betekenen dat bij echt hoge lichtintensiteiten de maximale fotosynthese als gevolg van de luchtbeweging daalt. De globale straling is onder zomerse omstandigheden maximaal 4030 micromol.m⁻².s⁻¹. (Hemming, et al. 2004). Hiervan is circa 50 % in het PAR gebied, dus is de maximale straling 2000 micromol.m⁻².s⁻¹. Dit maximum wordt slechts een beperkt deel van de tijd bereikt en alleen bij de onbeschaduwde bladeren.

Dus, aangezien geen enkeleffect van luchtbeweging is waargenomen op de initiële helling (de lichtbenutting efficiëntie bij lage licht-intensiteiten), zal een geringe verlaging van J_{max} door luchtbeweging (zoals hier waargenomen) op de gewasfotosynthese (en dus op de productie op lange termijn) een zeer beperkte invloed hebben.

4.5 Conclusie

- De actuele maximale fotosynthese (J_{max}) kan door luchtbeweging worden beperkt.
- Bij lagere lichtintensiteiten wordt de actuele fotosynthese niet beperkt.

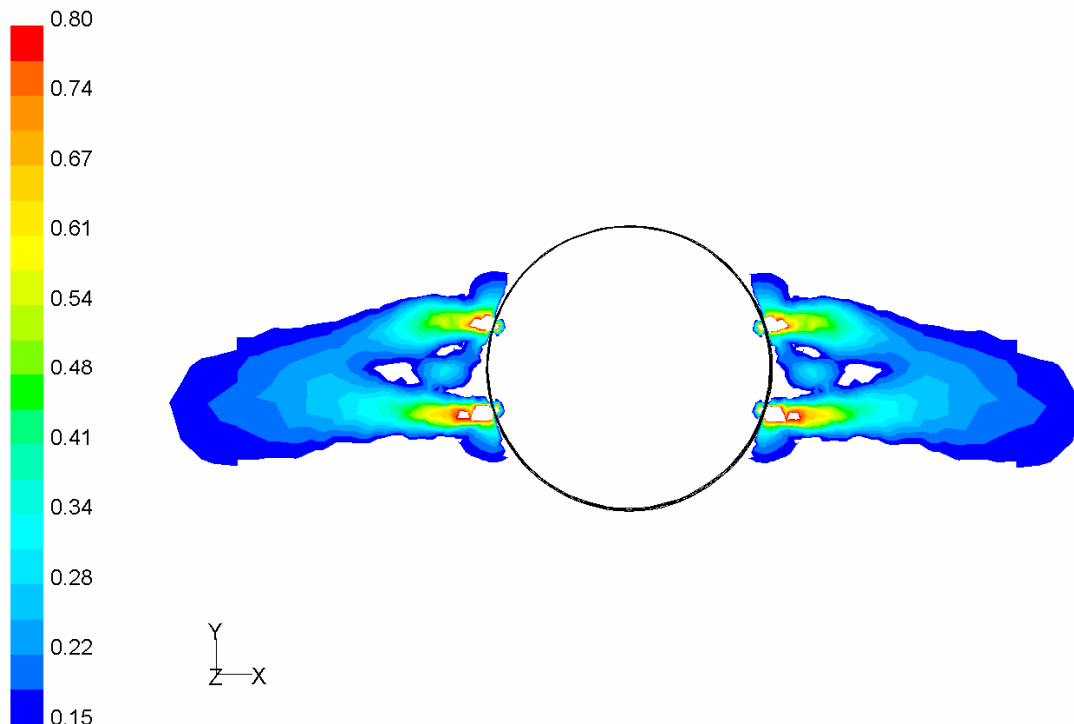
5. Luchtbeweging en 3-D modelwerk

Het functioneren van het systeem ten behoeve van de luchtbeweging is middels CFD geanalyseerd. De luchtsnelheden die in het gewas optreden zijn hierbij berekend. Uit de experimenten in een klimaatkamer en de literatuur volgde dat de luchtsnelheid groter dan 20 cm/s moet zijn voor een duidelijk positief (>5%) effect op de productie.

Naast het feit dat de luchtbeweging zorgt voor een verkleining van de grenslaagweerstand, zorgt het ook voor meer luchtbeweging in de kas. De extra luchtbeweging heeft gevolgen voor de temperatuur-, vocht- en CO₂ verdeling in de kas.

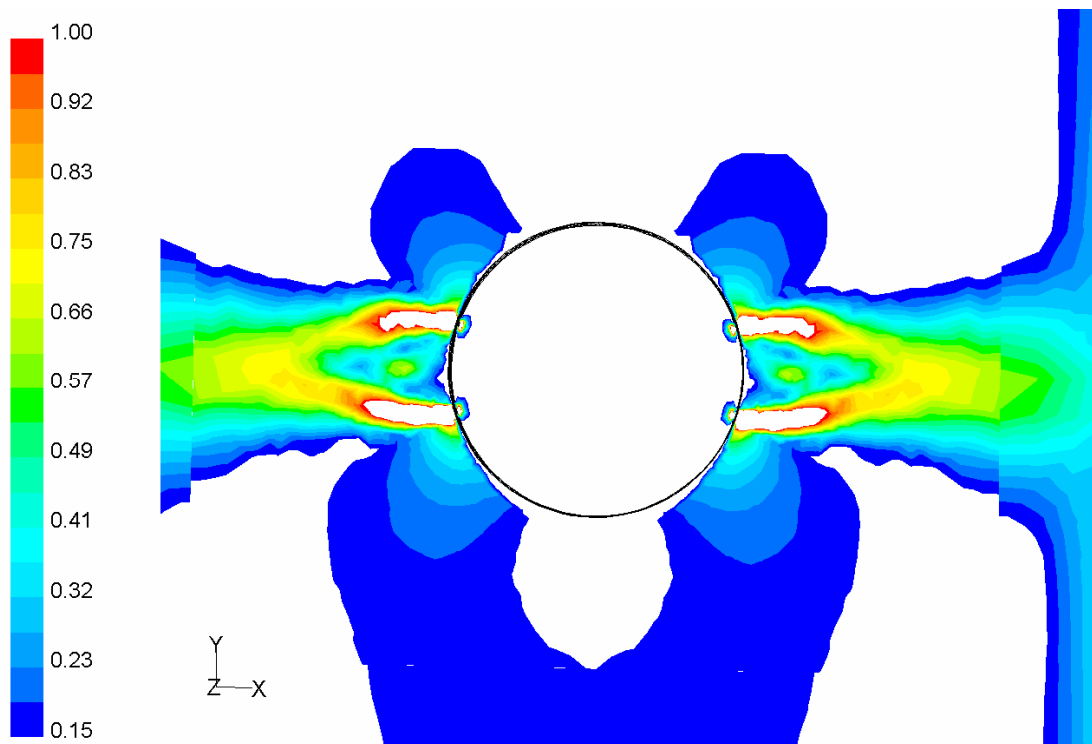
5.1 Luchtbeweging in het gewas

Voorafgaande aan het experiment is vastgesteld wat de snelheid van de lucht moet zijn die uit de slang stroomt opdat deze voldoende luchtcirculatie in het gewas geeft. De luchtsnelheid in het gewas moet meer dan 20 cm/s zijn om de grenslaag dusdanig te verkleinen dat deze de CO₂ opname beïnvloedt. Met de voorgestelde luchtslang is een berekening gedaan wat de luchtsnelheid in het gewas wordt indien de druk wordt gevarieerd. Het gewas wordt voorgesteld als een poreus medium met dezelfde eigenschappen als een gewas. Het gewas vormt een weerstand voor de lucht die er doorstroomt. Deze weerstand is voor de verschillende gewassen kwantitatief vast te stellen.



Figuur 5.1. Luchtsnelheidpatroon rond de luchtslang indien de uitstroomsnelheid 4.7 m/s is

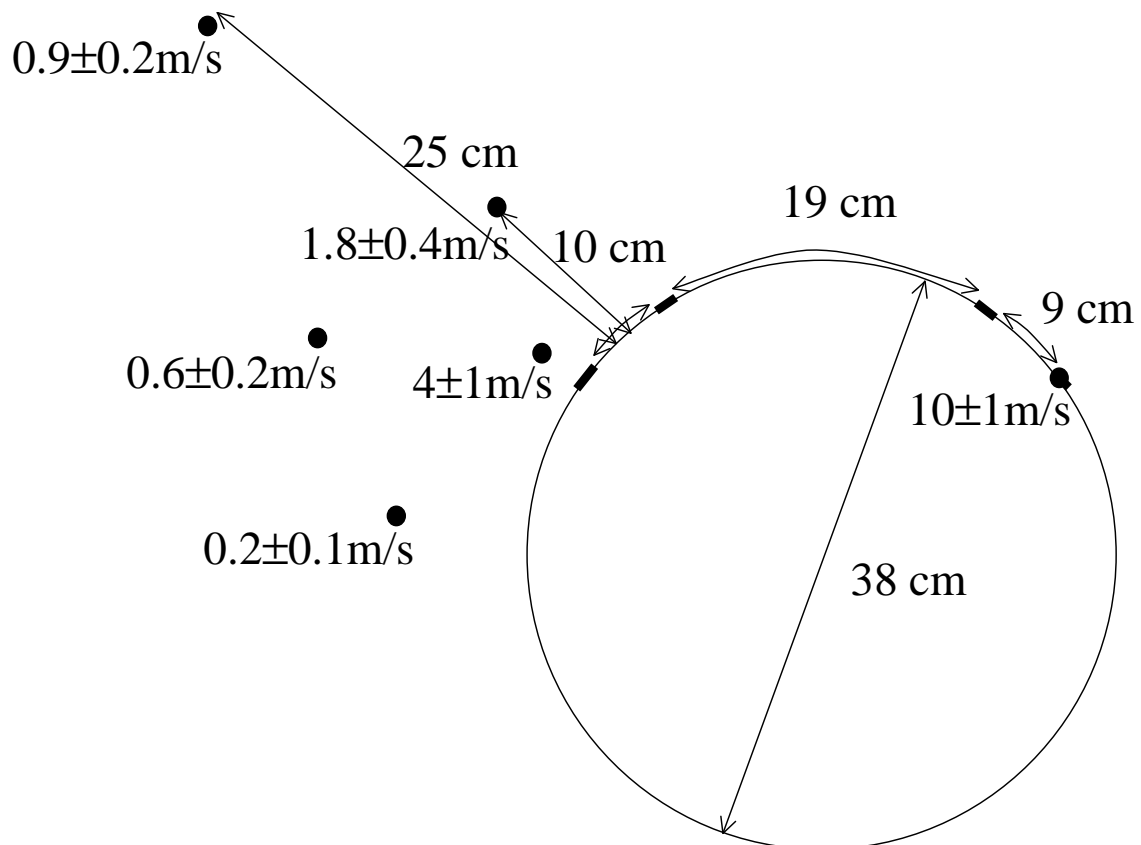
Bovenstaande figuur laat de luchtslang zien zoals deze in het experiment is gebruikt. Indien de druk in de slang 30 Pa wordt, is de luchtsnelheidsverdeling zoals in bovenstaande figuur. De luchtsnelheid in de gaatjes wordt dan 4.7 m/s. In het model is voor het gewas een poreus medium genomen. In werkelijkheid zal de stroming sterk worden beïnvloed door de plaats, vorm en stand van de bladeren. Op een afstand van 20 cm van de slang is de luchtsnelheid nog boven de 20 cm/s in de uitstroomrichting van de gaatjes.



Figuur 5.2. Snelheidsprofiel indien de luchtsnelheid in de gaatjes 9.8 m/s is

Bij de uitblaassnelheid weergegeven in bovenstaande figuur is de luchtbevinging aanzienlijk (meer dan 0.4 m/s) op een halve meter afstand van de slang in het gebied tussen de twee gaten in de slang. Bij deze uitstroomsnelheid is de luchtbevinging dusdanig dat een substantiële productieverbodging (op basis van de resultaten uit de klimaatkamer >15%, zie inleiding) gehaald moet worden.

Het luchtsnelheidpatroon ten gevolge van de installatie is gemeten met een hete draad anemometer (Lambrecht Thermische Anemometer 642). Uit de metingen kwam naar voren dat de axiaal ventilatoren zorgen voor een werveling in de slang. Deze werveling was meetbaar in de slang. Langs de binnenwanden van de slang is luchtsnelheid aanmerkelijk hoger dan in het midden van de slang. Eén meter van de ventilator is de snelheid langs de wanden 4 m/s en in het midden 0.8 m/s. Deze werveling heeft een gering gevolg voor de verdeling van lucht over de slang en kan daarom in systemen waarbij de slang langer is beter worden voorkomen. De verdeling over de slang in de lengterichting is gemeten door de uitstroomsnelheid te bepalen. Nabij de ventilator is deze snelheid hoger (12 m/s) dan aan het eind van de slang (8 m/s). Dit verschil wordt veroorzaakt door de werveling t.g.v. de ventilator.

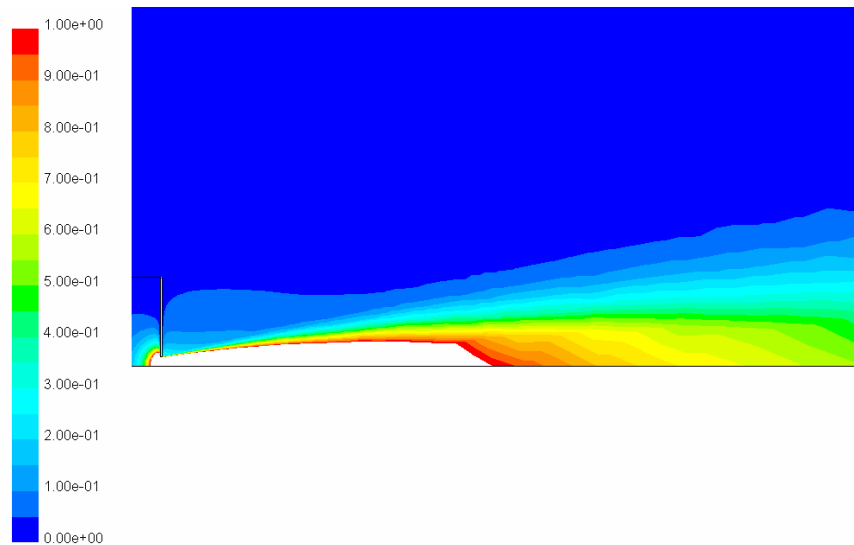


Figuur 5.3. Resultaten van de luchtsnelheidsmetingen rondom de slang

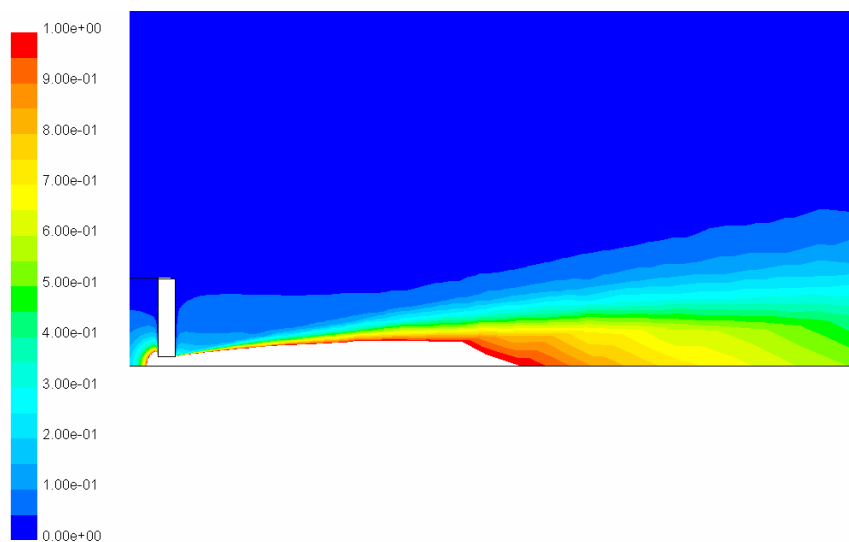
Bovenstaande figuur laat een aantal resultaten zien van de luchtsnelheidsmetingen die rond de slang zijn uitgevoerd. De luchtbeving rond de slangen is erg turbulent. Dit houdt in dat de luchtsnelheid op een bepaalde locatie erg varieert, dit kwam ook al uit de berekeningen naar voren. Dit is ook duidelijk in de metingen terug te vinden, te zien aan de range binnen een meetpunt. De metingen komen overeen met de CFD berekeningen.

5.2 Invloed van de wanddikte op het snelheidsprofiel

Om de invloed van de wanddikte op de diffusie van de luchtstroom op het moment dat de lucht uit de slang komt te bepalen is een CFD berekening uitgevoerd met twee verschillende wanddiktes. Van de wand (links in de figuur) naar de andere zijde van de figuur is 40 cm.



Figuur 5.4. Luchtbeweging bij 20 Pa als de wand 1 mm dik is en het gat een diameter heeft van 10 mm.



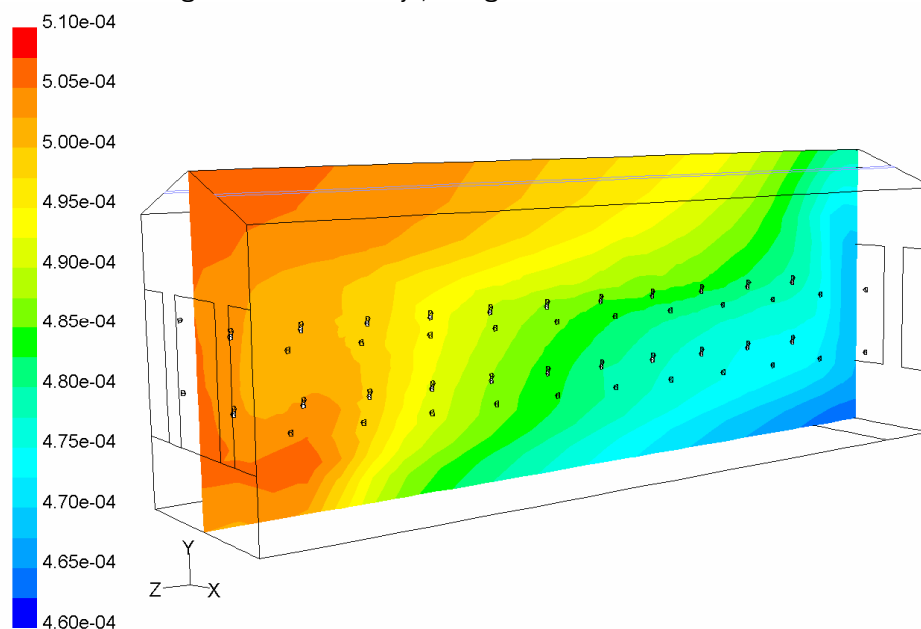
Figuur 5.5. Luchtsnelheid bij 20 Pa als de wand 10 mm dik is en het gat een diameter heeft van 10 mm.

De wanddikte heeft volgens de berekeningen weinig invloed op het stromingsprofiel kan uit bovenstaande figuren worden geconcludeerd. Een dun folie volstaat dus als luchtslang.

5.3 Invloed van luchtbeweging op de verdeling van temperatuur, vocht en CO₂

Geforceerde luchtbeweging heeft ook invloed op de verdeling van vocht, temperatuur en CO₂ in de kas. Om het effect van de luchtbeweging te bepalen is een berekening gedaan met en zonder luchtbeweging. Uitgangspunt is de situatie zoals deze in het experiment was. Er is één kap gemodelleerd waarbij er 75 W/m² aan zonnearmte in de kas wordt gebracht waarvan er 50% in voelbare warmte wordt omgezet en 50% in latente (verdamping) warmte. De zonnearmte wordt direct in het gewas omgezet in waterdamp en warmte. De weerstand van het gewas op de lucht is in de berekeningen meegenomen. De warmte en de waterdamp worden via ramen, gemodelleerd als spleten in het dek, afgevoerd. De CO₂ wordt onder het gewas in de lucht gebracht net als in de praktijk waar dit gebeurt via de CO₂ darmen. De CO₂ concentratie

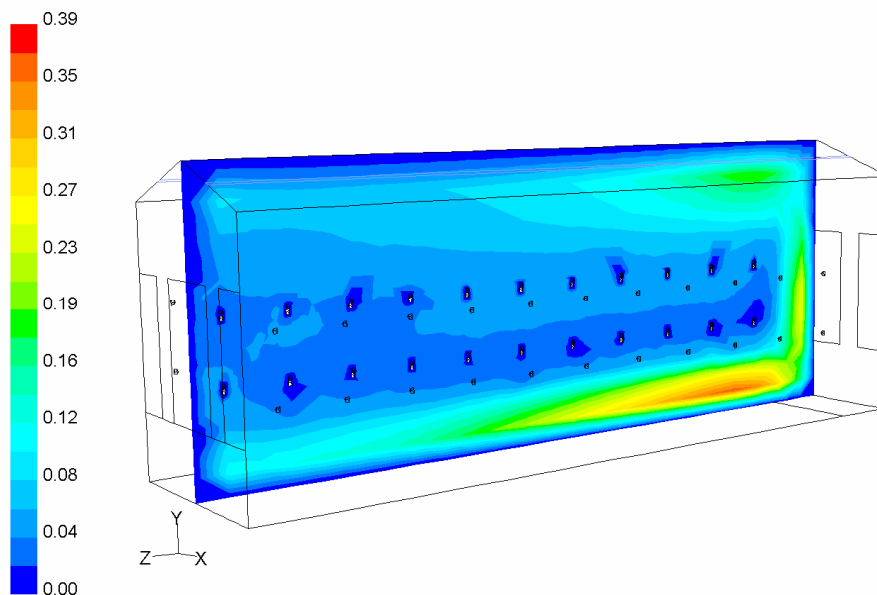
buiten is 350 ppm. Het is niet mogelijk de gaatjes zoals deze in de slang zitten te modelleren aangezien hierdoor de rekentijd en ook de computercapaciteit te groot wordt. Om toch het effect te zien van de luchtbeving op de verdeling van vocht, temperatuur en CO_2 , zijn de gaten samengevoegd tot grotere gaten. Het oppervlak van deze gaten is gelijk aan die in het experiment. Deze methode geeft op macro niveau waar deze berekeningen voor bedoeld zijn, een goed resultaat.



Figuur 5.6. CO_2 concentratie als aantal CO_2 moleculen per lucht molecuul in het vlak onder de nok van de kas zonder geforceerde luchtbeving

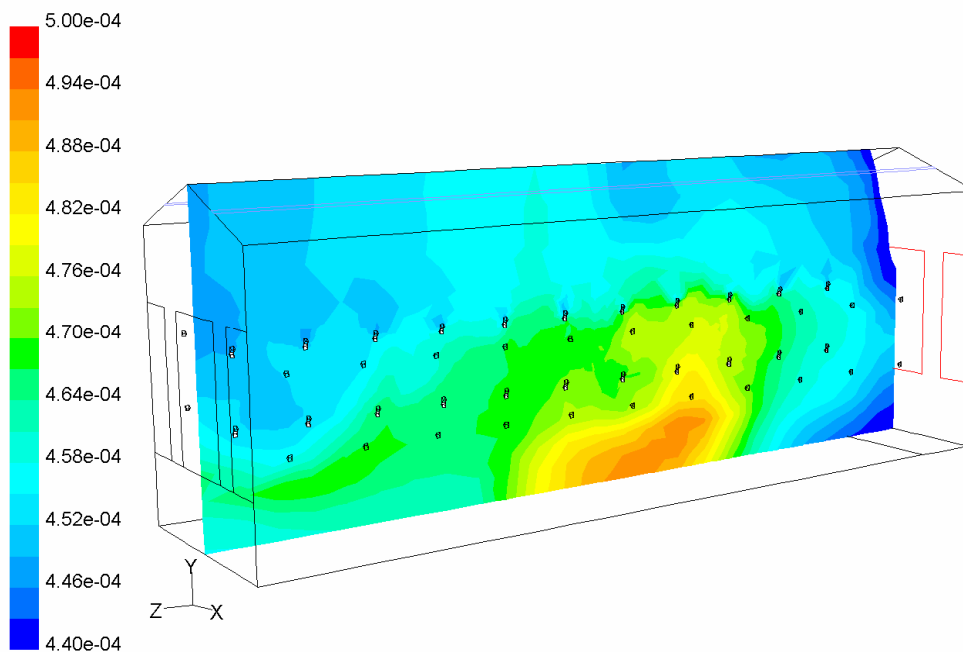
Bovenstaande figuur laat de CO_2 concentratie onder de nok van de kas zien indien er geen luchtbeving wordt toegepast. De zwarte blokjes in de figuur representeren de uitstroomopeningen. De schaal van het figuur moet met 10^6 worden vermenigvuldigd om de concentratie in ppm te krijgen. Ten gevolge van de opwarming van de lucht in het gewas, gaat de lucht in het gewas omhoog en in de corridor naar beneden. Dit is duidelijk in bovenstaande figuur te zien waar de corridor zich rechts bevindt. Het CO_2 niveau in de kas bevindt zich tussen de 460 en 510 ppm. De CO_2 verdeling zoals deze in bovenstaande figuur te zien is zal variëren in de tijd. Gemiddeld in de tijd zullen de variaties in het CO_2 niveau geringer zijn. Het gemiddelde niveau in het gewas is 485 ppm.

In het gewas is een verticale temperatuurgradiënt van 1 K te zien (zie Bijlage 11).



Figuur 5.7. Luchtsnelheidsprofiel onder de nok van de kas zonder geforceerde luchtbeweging in m/s.

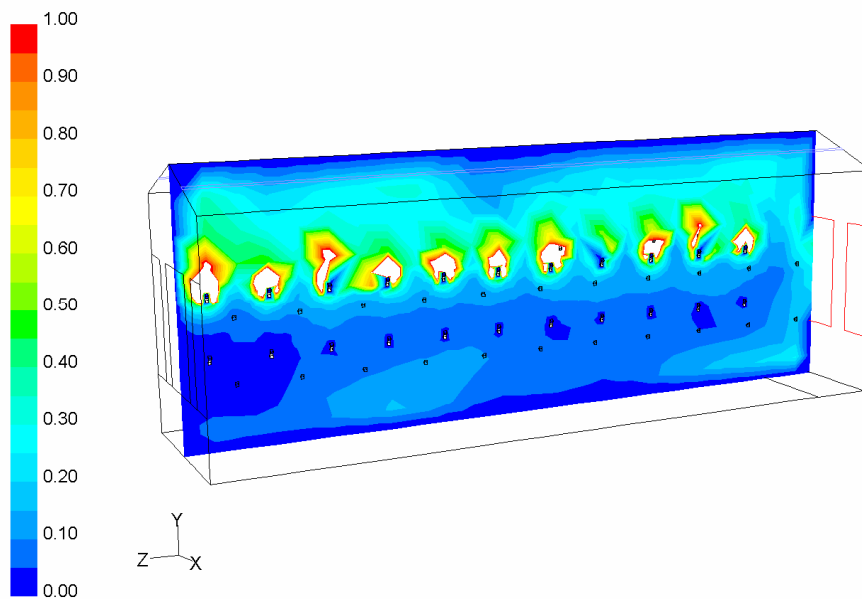
Bovenstaande figuur laat de luchtsnelheid in de kas zien als er geen luchtbeweging wordt toegepast. De luchtsnelheid in het gewas is niet hoger dan 5 cm/s ten gevolge van de ventilatie en de natuurlijke convectie. De hoogste luchtsnelheid wordt in de corridor en onder het gewas gehaald.



Figuur 5.8. CO₂ concentratie als aantal CO₂ moleculen per lucht molecuul indien luchtbeweging wordt toegepast hoog in het gewas waarbij de uitstroomsnelheid 10 m/s is

De CO₂ concentratie verschillen zijn bij luchtbeweging is kleiner dan zonder luchtbeweging. Ter hoogte van het gewas is het verschil in CO₂ concentratie ongeveer 20 ppm terwijl deze zonder luchtbeweging ongeveer 30 ppm is echter het gemiddelde CO₂ niveau in het gewas is lager namelijk 460 ppm. Door de betere opmenging gaat er ook meer CO₂ door het raam naar buiten.

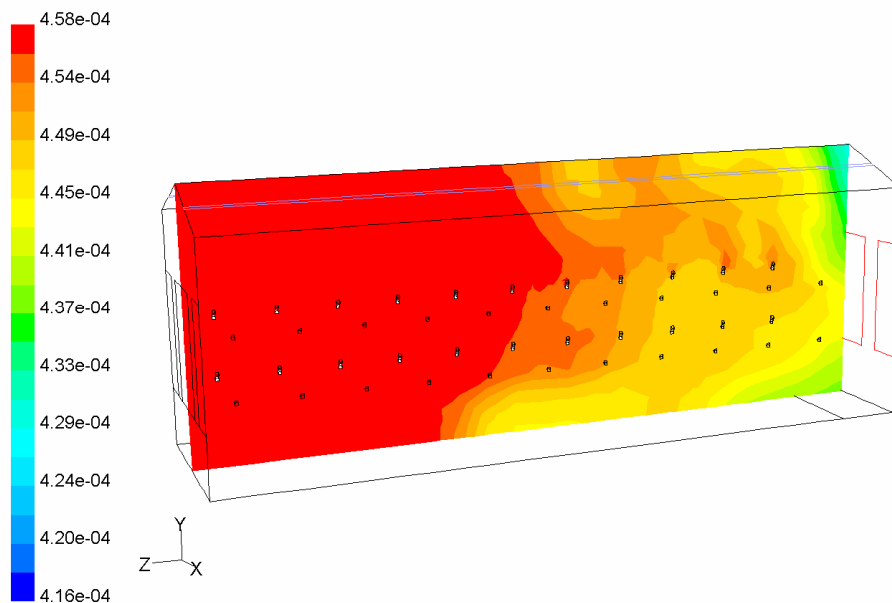
De temperatuurgradiënt over het gewas is in het geval van luchtbeweging iets minder groot namelijk 0.7 K. (zie Bijlage 11).



Figuur 5.9. Luchtsnelheid in m/s onder de nok van de kas met luchtbeweging van 10 m/s als uitstroomsnelheid hoog in het gewas

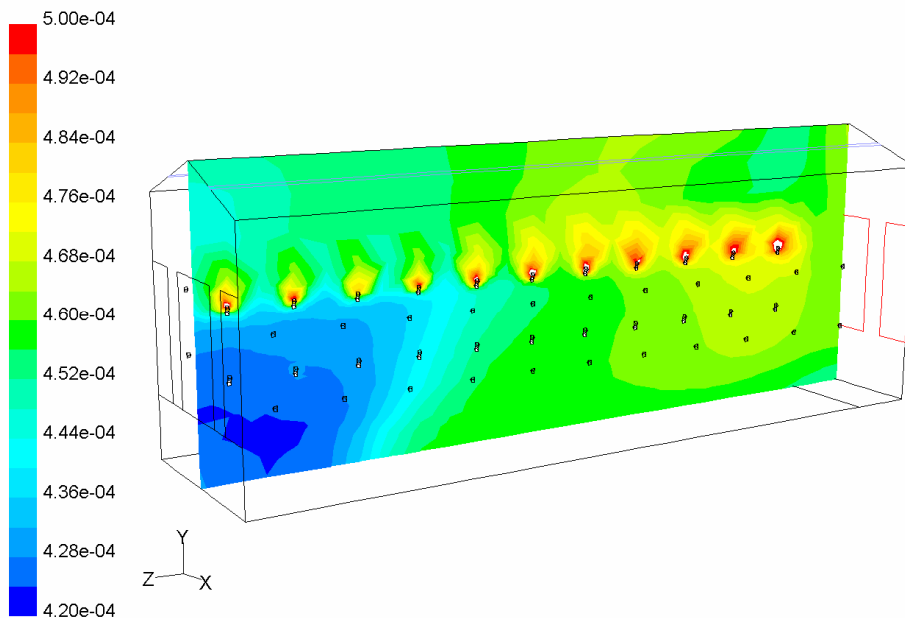
De schaal voor de luchtsnelheid is aangepast zodat de luchtsnelheden boven de 1 m/s niet zichtbaar zijn, deze liggen in het gebied waar zich een rode rand omheen bevindt. Onder het systeem voor de luchtbeweging is de luchtsnelheid maximaal 15 cm/s. Maar iets hoger dan zonder luchtbeweging. Uit dit figuur volgt duidelijk dat alleen het bovenste deel van het gewas wordt blootgesteld aan een hoge luchtsnelheid.

In het experiment werd de CO₂ op de conventionele manier in de kas gebracht namelijk met een CO₂ darm. CO₂ zou ook direct via het systeem voor de luchtbeweging in de lucht worden gebracht. Voordeel van deze methode is dat het CO₂ niveau direct bij de bladeren met een hoge luchtsnelheid hoger komt te liggen. De verhoging van het CO₂ niveau ten opzichte van het niveau waarop de lucht wordt aangezogen is afhankelijk van de hoeveelheid lucht die wordt verplaatst en de hoeveelheid CO₂ die wordt gedoseerd. Met de in deze berekening gekozen dosering en een uitblaassnelheid van 10 m/s kan het CO₂ niveau van de lucht die wordt uitgeblazen 17 ppm boven het niveau liggen waarop de lucht wordt aangezogen. Om een zo hoog mogelijk CO₂ niveau bij de bladeren te krijgen is het daarom ook van belang het aanzuigpunt ook op een punt in de kas te plaatsen waar het CO₂ niveau hoog is. Indien de opmenging van CO₂ in de kas groot is zal dit niet uitmaken.



Figuur 5.10. CO₂ verdeling onder de nok indien luchtbeweging wordt toegepast met een uitblaassnelheid van 10 m/s en de CO₂ dosering ook via het systeem plaatsvindt. De lucht wordt aangezogen bij de corridor.

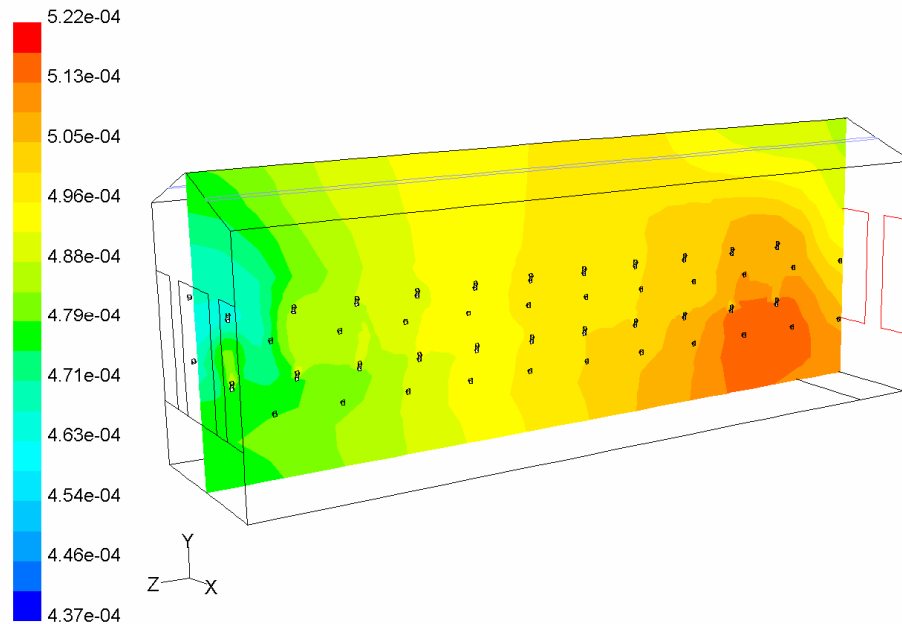
Bovenstaande figuur laat de situatie zien waarbij de CO₂ met het systeem wordt gedoseerd. Het gemiddelde CO₂ niveau ter hoogte van het gewas is in dit geval 454 ppm. De CO₂ verdeling is bij deze aanpak beter dan bij de conventionele manier van toediening en de toepassing van luchtbeweging. De CO₂ gradient is kleiner dan 15 ppm in het gewas. Echter er gaat nog meer CO₂ verloren door ventilatie.



Figuur 5.11. CO₂ verdeling onder de nok indien luchtbeweging wordt toegepast met een uitblaassnelheid van 1 m/s en de CO₂ dosering ook via het systeem plaatsvindt. De lucht wordt aangezogen bij de corridor.

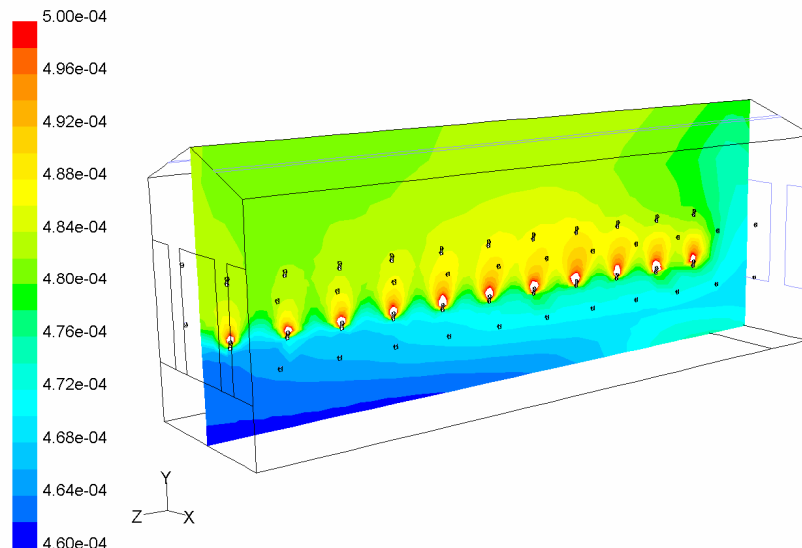
De geringe verhoging bij het gewas ter plaatse van de uitblaas komt door de hoge luchtsnelheid, de opmenging is hierdoor groot. In bovenstaande figuur is de luchtsnelheid bij de uitblaas verlaagd tot 1 m/s. Indien de dosering gelijk blijft ligt het CO₂ niveau van de lucht die uit het systeem stroomt 170 ppm boven de gemiddelde kaslucht concentratie. Het gemiddelde CO₂ niveau in de kas is vergelijkbaar met de vorige

situaties. Nabij de uitstroom is duidelijk een hoger CO₂ niveau aanwezig. Echter door opmenging daalt de concentratie snel verder van het systeem.



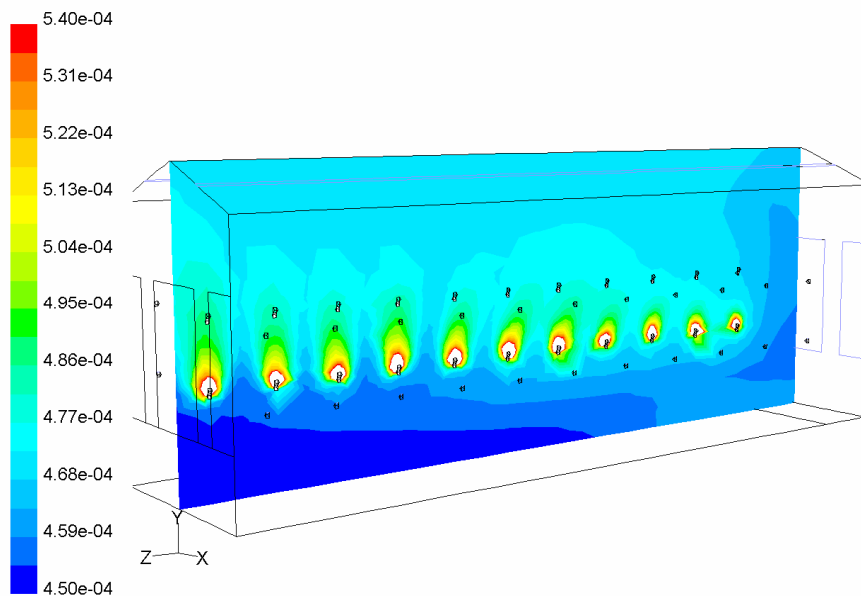
Figuur 5.12. CO₂ verdeling onder de nok indien luchtbeweging wordt toegepast met een uitblaassnelheid van 10 m/s onder in het gewas

De verschillen in CO₂ concentratie zijn in het geval dat het systeem voor de luchtbeweging laag in het gewas wordt opgehangen ongeveer gelijk met de situatie waarbij het systeem hoog in het gewas hangt. De CO₂ gradient in het gewas is vergelijkbaar met de situatie waarbij het luchtsysteem hoog in het gewas hangt.



Figuur 5.13. CO₂ verdeling onder de nok indien luchtbeweging wordt toegepast met een uitblaassnelheid van 1 m/s en de CO₂ dosering ook via het systeem plaatsvindt. De lucht wordt aangezogen bij de corridor en onderin het gewas ingeblazen.

Indien de CO₂ middels het systeem onderin het gewas wordt gebracht waarbij de luchtsnelheid laag is ontstaat lokaal in het gewas een hoger CO₂ niveau. Door de CO₂ bij het gewas in de lucht te brengen i.p.v. onder de goot kan lokaal de CO₂ concentratie 10 ppm hoger zijn.



Figuur 5.14. CO₂ verdeling onder de nok indien luchtbeveging wordt toegepast met een uitblaassnelheid van 0.10 m/s en de CO₂ dosering ook via het systeem plaatsvindt. De lucht wordt aangezogen bij de corridor en onderin het gewas ingeblazen.

Indien de lichtsnelheid nog verder wordt verlaagd tot 10 cm/s wordt de CO₂ verdeling zoals in bovenstaande figuur. De geringe lichtsnelheid zorgt ervoor dat de opmenging minder wordt waardoor de CO₂ dichtbij de planten blijft. Te plaatse van het gewas kan hiermee het CO₂ niveau ongeveer 20 ppm boven het gemiddelde niveau worden gebracht. Verdere onderzoek is nodig voor een nauwkeuriger kwantificering.

5.4 Conclusies

- Het systeem zorgt voor voldoende (>20 cm/s) luchtbeveging in het gewas. Echter een beperkt deel van het gewas wordt aan de verhoogde lichtsnelheid blootgesteld.
- Axiaal ventilatoren zorgen voor een werveling in de lucht slang. Bij lange slangen (>10 m) kan dit beter worden voorkomen aangezien dit nadelig kan zijn voor de luchtverdeling over de slangen.
- De vuist regel dat het doorstroomde oppervlak van de lucht slang groter (minstens 1.5 maal) moet zijn dan het totale oppervlak van alle uitstroom gaatjes zorgt voor een goede verdeling.
- Luchtbeveging zorgt voor een betere verdeling van de CO₂ in de kas maar daarmee gaat er ook iets meer CO₂ verloren door het raam.
- Directe toediening van de CO₂ via het systeem voor de luchtbeveging zorgt maar voor een geringe lokale verhoging van het CO₂ niveau (maximaal 40 ppm) aangezien de luchthoeveelheid die wordt verplaatst groot is.
- De dikte van het materiaal waar de slang van gemaakt is heeft geen invloed op het snelheidsprofiel bij de uitstroom.

6. Discussie

In de voorafgaande hoofdstukken is steeds per onderdeel het resultaat besproken. De meerwaarde van het onderzoek moet blijken uit de samenhang tussen de onderdelen en de mogelijke toepassing daarvan voor de praktijk. Daarbij hoort de beschrijving van de resultaten in confrontatie met de oorspronkelijke doelstellingen van het project. In dit hoofdstuk wordt aan de hand van de doelstellingen gekeken naar de resultaten en deze besproken.

Voordat op de afzonderlijke aspecten wordt ingegaan is het belangrijk te bedenken dat dit project teeltechnisch is uitgevoerd met een sterk van de praktijk afwijkende planttijd en onder zomerse omstandigheden.

Het effect van de planttijd is opgevangen door eerst een goed ontwikkeld gewas te telen voordat de behandelingen zijn gestart. Het gewas is daarmee representatief voor tomaat in de periode waarin het experiment is uitgevoerd. Als het project met een andere plantdatum was gestart zou de controle behandeling in de test periode een vergelijkbare groei hebben gekend. De vraag is dan nog of de behandelingen een andere ontwikkeling te zien zouden geven. Aangenomen mag worden dat als de onderliggende processen van de fotosynthese niet afwijkend zijn tussen de controle en de behandelingen dit ook geldt voor andere periodes van het jaar.

6.1 Invloed van luchtbeweging op groei en productie

De belangrijkste bevinding in dit onderzoek is dat de productie zowel in vers- als drooggewicht niet veranderde door de luchtbeweging (Hoofdstuk 2). Dit had ook geen lange-termijn adaptatie van het onderliggende proces van de fotosynthese tot gevolg (Hoofdstuk 3). Dit laatste was wel het geval bij verschillende niveaus van CO₂ en op verschillende hoogte in het gewas. Dit effect is in meer onderzoeken aangetoond.

Het niet optreden van lange-termijn adaptatie van het fotosyntheseprocess wil niet zeggen dat er geen momentane effecten zijn. Daarvoor zijn de onderliggende processen te complex. Metingen toonden aan dat de momentane bladfotosynthese in het gewas verschillend is. Vooral de jonge, bladeren hoog in het gewas hebben een hoge netto-fotosynthese. Op de totale gewasfotosynthese is dit echter niet van invloed. De lichtonderschepping door de bladlagen is zodanig groot dat het totaal van groei gelijk blijft. Het zelfde geldt voor de afname van de maximale actuele fotosynthese bij hoge lichtintensiteit. Inzicht in de lichtonderschepping en het fotosynthese rendement van bladlagen kan bijdragen aan een verdere optimalisatie van de netto gewasfotosynthese. Hierover is in andere onderzoeken al veel kennis vergaard. In dit onderzoek zijn geen adaptatie effecten van de fotosynthese aan de luchtbeweging gevonden. De lichtresponsecurves voor 700 en 1000 ppm CO₂ waren niet verschillend van elkaar. De vraag kan gesteld worden of dit betekend dat luchtbeweging de opname van CO₂ wordt zodanig beïnvloed dat eerder een maximaal effect is bereikt. Dit zou het geval zijn als er interactie zou zijn tussen luchtsnelheid en CO₂ niveau bij voor de lichtresponse curves. Dit was niet het geval (3.3.1). Ook zonder luchtbeweging werd een gelijke lichtresponsecurve waargenomen.

In dit project is de luchtbeweging niet gecombineerd met koeling of verwarming. Over het effect van temperatuur op de fotosynthese is veel bekend. Het temperatuuroptimum voor de netto fotosynthese neemt toe met toenemende CO₂ concentratie. Omdat koeling vooral wordt toegepast in de zomer als de kas- en gewastemperaturen oplopen zal koeling niet tot een suboptimale fotosynthese leiden, mits een hoog CO₂ gehalte wordt gehandhaafd. Eerder tot een beter bereiken van het temperatuur optimum voor de fotosynthese. Wel moet worden voorkomen dat een continu koude luchtstroom leidt tot plaatselijk koude plantendelen.

Bij de combinatie van luchtbeweging met verwarming die vooral 's winters wordt toegepast zou een te hoge luchttemperatuur kunnen leiden tot een gewastemperatuur die te hoog is voor de daarbij horende netto fotosynthese.

De menging van de uitgeblazen lucht met de kaslucht moet er voor zorgen dat de plant niet plaatselijk te warm of te koud wordt.

Een belangrijke vraag die de basis vormde voor dit onderzoek, was de meerproductie die in 2002 werd gevonden in het onderzoek van Schoonderbeek et al (2003). Voor een deel kon deze meerproductie niet worden verklaard.

In het onderzoek van Raaphorst (2006) is aangetoond dat de meerproductie uit 2002 met een andere model berekening slechts voor 3 % niet kon worden verklaard. Blijkbaar zijn de aannames die aan de modelberekeningen ten grondslag liggen voor een situatie met hoog licht en hoog CO₂ van doorslaggevend belang geweest om de effecten in het onderzoek van 2002 goed te kunnen analyseren.

Als in Nederland het aantal bedrijven met geconditioneerde teelten toeneemt komen door deze intensief te volgen steeds meer gegevens beschikbaar om de voorspellende kracht van de gewasmodellen voor deze situaties te verbeteren.

6.2 Invloed van luchtbeweging op verdamping en planttemperatuur

De planttemperatuur werd door de luchtbeweging gering beïnvloed. Vooral met de luchtbeweging laag tussen het gewas was de koptemperatuur lager. Dit zou betekenen dat de plant meer verdampte waardoor de planttemperatuur lager werd. Helaas zijn juist van die behandeling geen gegevens van de verdamping gemeten met de weegoot, vanwege een virus besmetting. De planttemperaturen van de drie andere behandelingen waren vrijwel gelijk, terwijl de verdamping wel verschillend was. Dit kan samenhangen met de luchtbeweging en zou overeenkomen met de effecten op de groei die in de klimaatkamer experimenten waren gevonden (Figuur 1-1). Voor verdamping geldt evenals voor groei dat de verdamping van het gewas de som is van alle plantdelen. Een goede samenhangende verklaring kan alleen gegeven worden als er meer gedetailleerde waarnemingen aan de bladverdamping worden gedaan. Het blijkt dat luchtbeweging in het samenspel met instraling, planttemperatuur en vochtgehalte van de lucht de verdamping zowel kan remmen als kan stimuleren (paragraaf 2.3.5, Bijlage 6). Theoretisch is onderbouwd dat er situaties kunnen voorkomen waarin bij toenemende luchtbeweging de verdamping afneemt.

Tussen de verdampingsmetingen tijdens de fotosynthese bepaling (paragraaf 3.3.2) en de metingen met de weegoot (paragraaf 2.3.5) zit een verschil, in de zin dat de eerste meting geen effect van luchtcirculatie vond en de tweede meting wel. Deze verschillen kunnen samenhangen met de gebruikte methode. Meting van de bladverdamping onder geconditioneerde omstandigheden in de bladkamer geeft andere cijfers dan een continue meting met de weegoot. De weegoot meet de verdamping van het gehele gewas gedurende 24 uur, dus bijvoorbeeld ook 's nachts.

De overeenstemming tussen de uitkomsten van verdampingsmetingen tijdens de fotosynthese bepaling en de fotosynthese metingen laten zien dat met die methode de luchtuitwisseling onder geconditioneerde omstandigheden wordt gemeten. CO₂, licht, luchtvochtigheid en temperatuur en uiteindelijk dus ook bladtemperatuur zijn gecontroleerde grootheden in de bladkamer. In de kas kunnen deze grootheden in sterk wisselende verhoudingen optreden. Vochtuitwisseling (verdamping) en CO₂ uitwisseling (fotosynthese) in een kas zijn daarom niet één op één aan elkaar gekoppeld.

De samenhang tussen verdamping, CO₂ uitwisseling en energiebalans voor een blad vraagt nog nader onderzoek. Mogelijk is op dit terrein nog winst te behalen is. De verschillen die geconstateerd zijn tussen de

metingen met een bladkamer voor bladverdamping en een weegoot voor gewasverdamping laten zien dat de processen die hieraan ten grondslag liggen nog nader moeten worden geanalyseerd om de juiste relaties hiertussen te beschrijven. Daarbij kan de vraag worden gesteld of wat voor verdamping geldt ook bij de CO₂ uitwisseling optreedt, al is op dit terrein voor de ontwikkelingen van gewasgroeimodellen al veel meer ervaring opgedaan. Dat blijkt ook uit het feit dat met de bladfotosynthese gegevens de groei en productie van het gewas goed was te simuleren.

In dit project is gewerkt met luchtbeweging zonder koeling of verwarming. Uit het onderzoek bij PPO en Themato is bekend dat luchtbeweging met lucht die is afgekoeld of verwarmt de verdamping van het gewas beïnvloed. Dit komt doordat koelen of verwarmen van lucht het vochtdeficiet van de lucht verkleint respectievelijk vergroot en door de convectieve warmteoverdracht die kan plaatsvinden. Een koude luchtstroom heeft zelf al een koelend effect op het gewas, zonder dat er verdamping nodig is. De combinatie koeling/verwarming met luchtbeweging is in de project niet onderzocht. Bij toepassing van deze combinatie in de praktijk moet met de effecten op planttemperatuur en verdamping wel rekening worden gehouden. Het meten/goed voorspellen van de planttemperatuur is daarvoor een vereiste.

6.3 Verdeling van luchtvochtigheid, temperatuur en CO₂

Luchtbeweging zorgt voor een betere verdeling van de CO₂ in de kas (hoofdstuk 5), maar ook in een kas zonder geforceerde luchtbeweging zijn de verschillen in CO₂ concentratie gering (paragraaf 2.3.3). Voor een goede CO₂ verdeling is luchtbeweging dus geen voorwaarde.

Voor vocht is de verdeling niet gemeten, maar aangenomen wordt dat de verdeling van het absolute vochtgehalte vergelijkbaar is met de verdeling van de CO₂.

Voor de temperatuurgradiënt in de kas heeft de luchtbeweging wel een duidelijk effect en is afhankelijk van de overige klimaatomstandigheden. Dit effect zal zich ook vertalen in een effect op de planttemperatuur op verschillende hoogtes. Als luchtbeweging wordt gecombineerd met verwarming of koeling zijn deze effecten weer anders. Naast de koptemperatuur van de plant moet daarom in een systeem met luchtbeweging en koeling/verwarming het totale temperatuurprofiel van de ruimte en van de plant in kaart worden gebracht. De effecten hiervan zijn vooral belangrijk voor de gewasontwikkeling en niet voor de fotosynthese.

6.4 Toepassing in een regeling en de energiedoelstelling

Luchtbeweging levert geen extra groei op. Hiermee wordt daarom ook geen verbetering van de energie-efficiëntie bereikt. De inzet van ventilatoren kost hulp energie en is in dat opzicht zelfs ongewenst. Zoals eerder besproken moet bij geforceerde luchtbeweging in combinatie met koelen of verwarmen duidelijk aandacht worden gegeven aan de effecten op de ruimtelijke temperatuur verdeling en op de effecten voor de gewas temperatuur. De systemen hiervoor zijn nog niet zodanig ontwikkeld dat dit als een automatisme in de regelingen wordt toegepast.

7. Conclusies en aanbevelingen

Per hoofdstuk zijn steeds conclusies geformuleerd. Die worden hier niet allemaal herhaald.

Voornaamste conclusies

- Geen productie verschillen door luchtbeweging.
- Geen effect op de fotosynthese karakteristieken door de luchtbeweging.
- Geen CO₂ gradiënt in de buurt van plant bij de verschillende behandelingen
- Geen adaptatie van het gewas - niet visueel en ook niet uit de fotosynthesemetingen
- Bladfotosynthese kan wel verschillen zonder gevolgen voor totale gewasfotosynthese, omdat de verschillen tot uiting komen bij hoge lichtniveaus in een klein deel van het bladoppervlak.
- Verdamping en planttemperatuur worden wel beïnvloed door luchtbeweging. De effecten zijn sterk afhankelijk van overige klimaatsomstandigheden.
- Verdamping en fotosynthese meting op bladniveau is zonder vertaling via modellen onvoldoende voor voorspelling van de verdamping en groei op gewasniveau
- Luchtbeweging op zich is niet de verklaring van meerproductie en levert geen bijdrage aan energiebesparing

Aanbevelingen

- Bij combinatie van luchtbeweging met verwarming of koeling moet het effect op planttemperatuur en ruimte temperatuur op meerdere lagen in het gewas worden gevolgd.
- Voor de vertaling van de verdamping van bladniveau naar gewasniveau is verder onderzoek en modelontwikkeling naar de samenhang tussen beide verschijnselen nodig. Op dit punt van het onderzoek is er een onverklaard verschil tussen de modelberekeningen en de metingen.
- Door het intensief volgen van de verschillende systemen van geconditioneerd telen kan de voorspellende kracht van de gewasmodellen worden verbeterd.
- Het is niet zinvol dit onderzoek te herhalen met een andere planttijd, zoals door sommige telers is bepleit in persoonlijke contacten.

Realisatie doelstellingen

Voor de start van het project zijn een aantal doelstellingen geformuleerd. Vergelijking van het resultaat met de ze doelstellingen levert het volgende op

Technische en teeltkundige doelstellingen

Verkrijgen van inzicht in (de mate van)

- Invloed van luchtbewegingen op verdamping en groei. Verwacht wordt een productie verhoging als gevolg van de luchtbeweging van 6-8 %.
Gebleken is dat er geen effect van luchtbeweging op groei is. Effect van luchtbeweging op verdamping kan zowel remmend als stimulerend zijn. Belangrijke conditie hierbij is dat de circulerende lucht niet gekoeld of verwarmd werd.
- Verdeling van de luchtvochtigheid, luchttemperatuur, CO₂ gehalte van de lucht en planttemperatuur in de kas bij geforceerde luchtbeweging.
Dit is zowel door meting in de kas als door de 3D modellering in getallen uitgedrukt. Het blijkt dat luchtbeweging de verdeling positief beïnvloed.
- De morfologische/ fysiologisch gevolgen van luchtbeweging op de plant
Morfologische werden geen effecten gevonden. Fysiologisch was er een verandering van de actuele fotosynthese in een klein deel van de bladeren bij hoge lichtintensiteit.
- De relatie tussen luchtbeweging, lichtniveau, CO₂ niveau, temperatuur, relatieve luchtvochtigheid in kaart brengen voor de optimale regeling
Omdat de luchtbeweging weinig effecten had is er niet gewerkt aan het in kaart brengen van de relaties en dit vertalen in een regeling.

Energiedoelstellingen

- Door productieverhoging ontstaat een verbetering van de energie-efficiëntie van circa 5%.
Er is geen productieverhoging aangetoond dus kan er ook geen verbetering zijn van de energie-efficiëntie
- 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.
De klimaatverdeling is door luchtcirculatie wel iets te beïnvloeden, maar onvoldoende om de hard te maken dat het setpoint voor RV kan worden verhoogd.
- Kennis over luchtbeweging draagt bij aan de energetische optimalisatie van semi-gesloten kassystemen zoals Kas als Energiebron.
De luchtbeweging kan met 3 D modellen worden gesimuleerd. Dit kan bijdrage aan de energetische optimalisatie.

Nevendoelstelling

- Aangeven van mogelijkheden voor aanpassing van gewasmodellen
Voor verdamping is nadere analyse van de modelroutines aan te bevelen. Vooral de vertaling van de verdamping op bladniveau naar de verdamping op gewasniveau moet opnieuw worden bekeken, omdat hierin een verschil werd gevonden tussen de metingen en de simulaties.

Literatuur

- Blok, C en A. de Gelder, 2004. Weeggoten op praktijkbedrijven. PPO rapport 41600048, 48 blz
- Dieleman, J.A. & H.F. de Zwart, 2004. Optimaal besturen van temperatuur en CO₂ op basis van fotosynthese en energie. Plant Research International, nota 323, 47 blz.
- Dieleman, J.A., E. Meinen, A. Elings, D. Uenk, J.J. Uittien, A.G.M. Broekhuijsen, P.H.B. de Visser & L.F.M. Marcelis, 2003. Effecten van langdurende hoog CO₂ op groei en fotosynthese bij paprika. Plant Research International, nota 274, 32 blz.
- Dueck, T., K. Grashoff, J. Steenhuizen, D. Uenk, G. Broekhuijsen, E. Meinen & L.F.M. Marcelis, 2005. Bladplukken bij paprika: Fase 2. Metingen van de bladactiviteit. Plant Research International, nota 234, 24 blz.
- Farquhar, G.D., S. von Caemmerer & J.A. Berry, 1980. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta* 149: 78-90.
- Gelder, A. de, J.B. Campen & C. Stanghellini, 2004. Luchtcirculatie, Kasklimaat en Productie. Deel rapportage maart – oktober 2004. PPO rapport 41616052
- Grace, J., 1978. The turbulent boundary layer over a flapping populus leaf. *Plant Cell Environment*, 1: 35-38
- Hemming, S., D. Waaijenberg, G. Bot, P. Sonneveld, F. de Zwart, T. Dueck, C. van Dijk, A. Dieleman, N. Marissen, E. van Rijssel, B. Houter., 2004. Optimaal gebruik van natuurlijk licht in de glastuinbouw. A&F report 100, 154 pp.
- Heuvelink, E., 1996. Tomato growth and yield: quantitative analysis and synthesis. PhD thesis Wageningen Agricultural University, 326 pages.
- Hovenden, M.J. and Vander Schoor, J.K., 2003. Nature vs nurture in the leaf morphology of Southern beech, *Nothofagus cunninghamii* (Nothofagaceae) *New Phytologist*, 161: 585–594
- Marissen, N., A. Elings, J. Snel, M. Warmenhoven, E. Meinen, P. Dijkhuis, D. Kauwenhoven, P. Schrama, D. Uenk, 2005. Energiebesparing mobiele belichting roos. *Praktijkonderzoek Plant en Omgeving*, nota 41616002.
- Medlyn, B.E., E. Dreyer, D. Ellsworth, M. Rorstruter, P.C. Harley, M.U.F. Kirschbaum, X. le Roux, P. Montpied, J. Strassmeyer, A. Walcroft, K. Wang & D. Loustau, 2002. Temperature response of parameters of a biochemically based model of photosynthesis. II. A review of experimental data. *Plant, Cell and Environment* 25: 1167-1179.
- Nederhoff, E.M. 1994. Effects of CO₂ concentration on photosynthesis, transpiration and production of greenhouse fruit vegetable crops. Diss. Agric. Univ. Wageningen, 213 pp.
- Nederhoff, E.M. & J.G. Vegter, 1994. Photosynthesis of stands of tomato, cucumber and sweet pepper measured in greenhouses under various CO₂-concentrations. *Annals of Botany* 73: 353-361.
- Raaphorst, M., F. Kempkes, E. Heuvelink, R. Kaarsemaker en M. Bakker, 2006. Teeltconcept voor de geconditioneerde kas PPO rapport 41414089 (in concept)
- Schoonderbeek, G., A. de Gelder, E.M.B. Heller, J.J.G. Opdam, 2003. Telen in een gesloten kas; Praktijk experiment. Eindrapportage. Ecofys E48031, 61 blz
- Yin, X., M. van Oijen & A.H.C.M. Schapendonk, 2004. Extension of a biochemical model for the generalized stoichiometry of electron transport limited C₃ photosynthesis. *Plant, Cell and Environment* 27: 1211-1222.

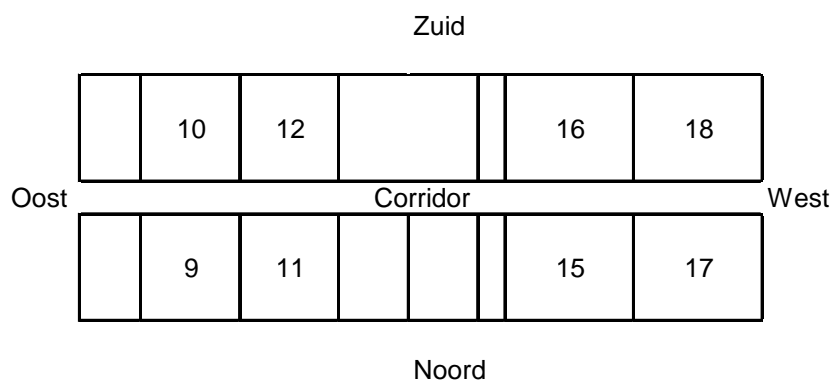
Bijlage 1 Indeling kassencomplex

Indeling van het kassencomplex met de afdelingen

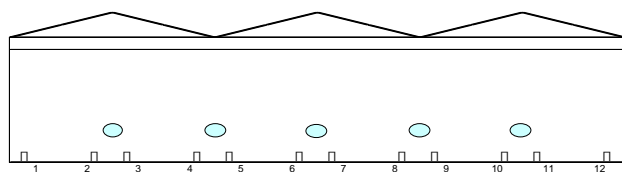
De afdelingen 9 t/m 12 zijn 134 m² (9.6 m * 14 m),

De afdelingen 15 t/m 18 zijn 179 m² (12.8 m * 14 m)

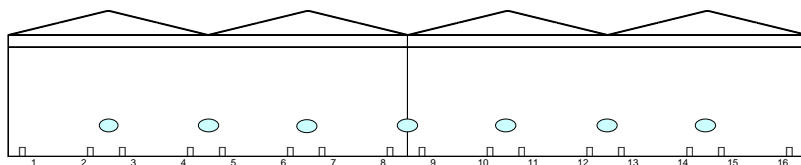
Afdeling 103 – 9 t/m 12 en 15 t/m 18

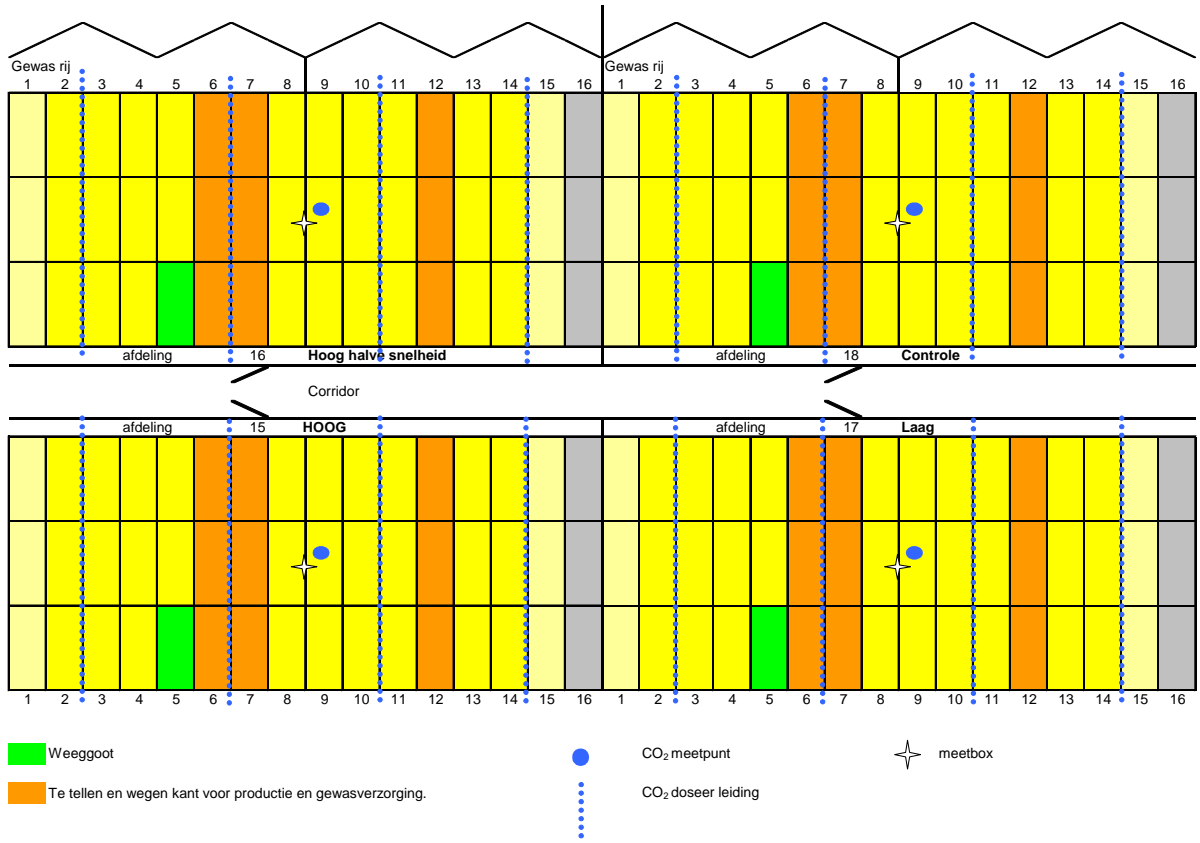
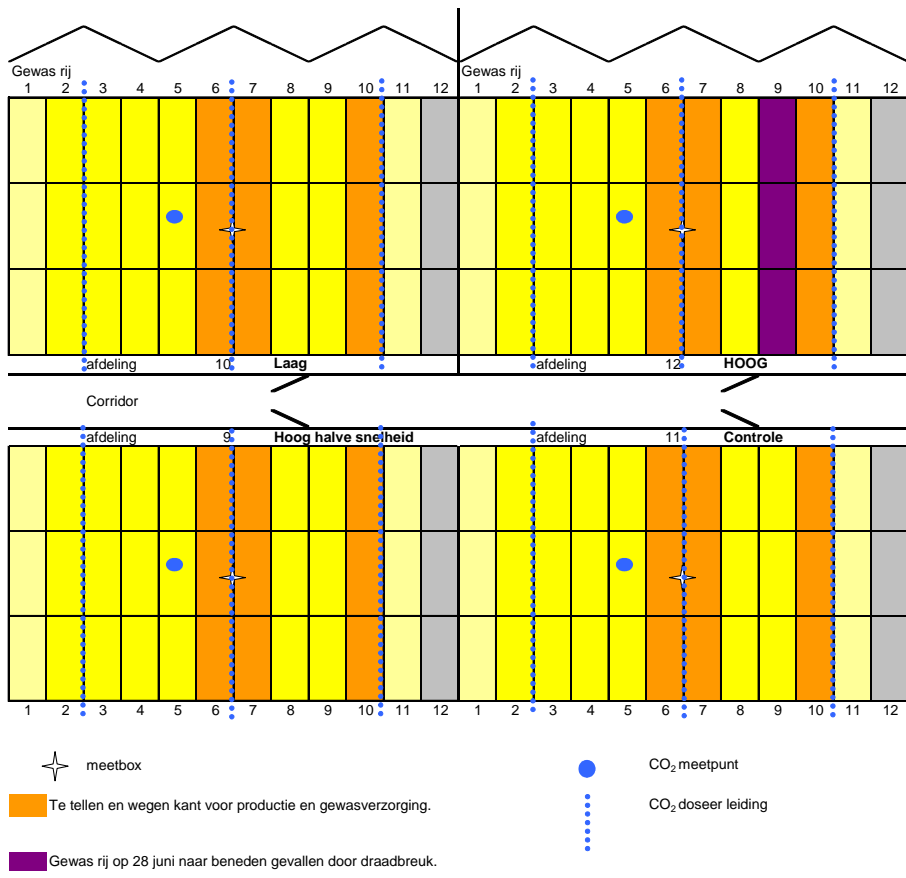


Indeling afdeling 9 t/m 12



Indeling afdeling 15 t/m 18





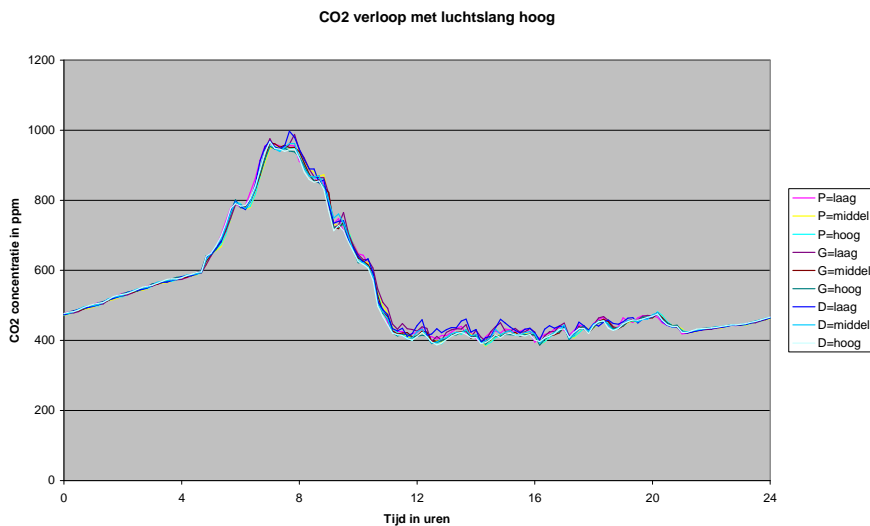
Bijlage 2 CO₂ concentratie metingen

CO₂ concentratie overdag (tussen 8 en 18 uur) per maand en per afdeling.

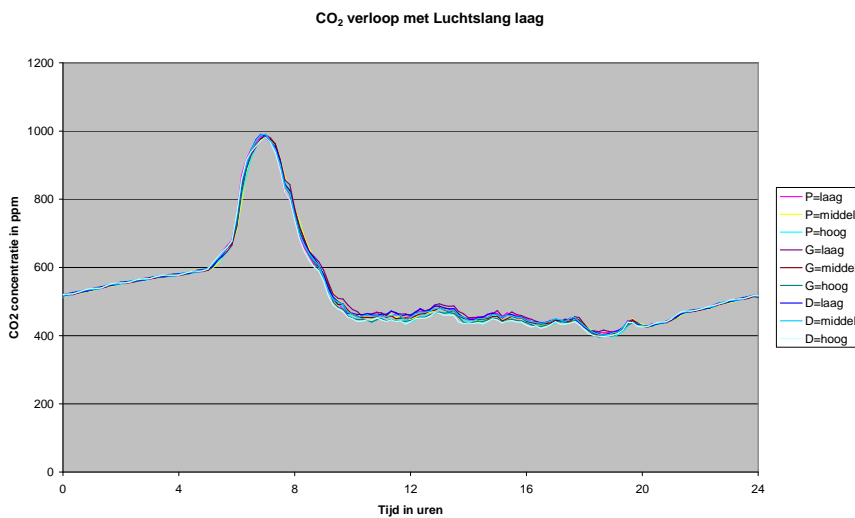
CO₂ concentratie tussen 8 en 18 uur per maand en per afdeling

Maand	Afdeling 9	Afdeling 10	Afdeling 11	Afdeling 12	Afdeling 15	Afdeling 16	Afdeling 17	Afdeling 18
Mei	522	510	505	498	505	503	505	498
Juni	426	424	420	409	417	413	418	414
Juli	463	463	449	458	450	451	489	507
Augustus	472	476	460	463	459	470	501	525
September	509	509	499	482	504	505		583
Oktober	546	545	543	561	572	547		652
Gemiddeld over de proef	487	486	477	477	483	480		534

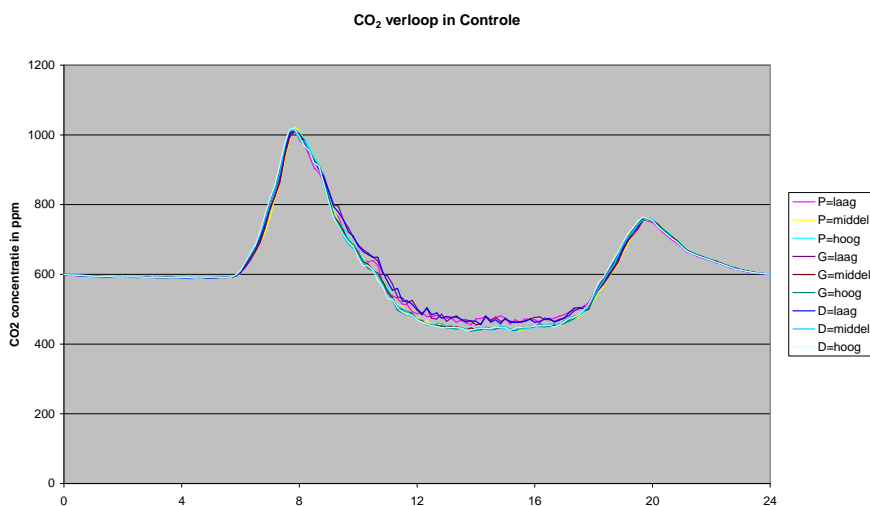
Bijlage 3 Figuren van verloop CO₂ concentratie van laag naar hoog in het gewas.



Afdeling 15 gemeten in periode 22-juli tot en met 28 juli.

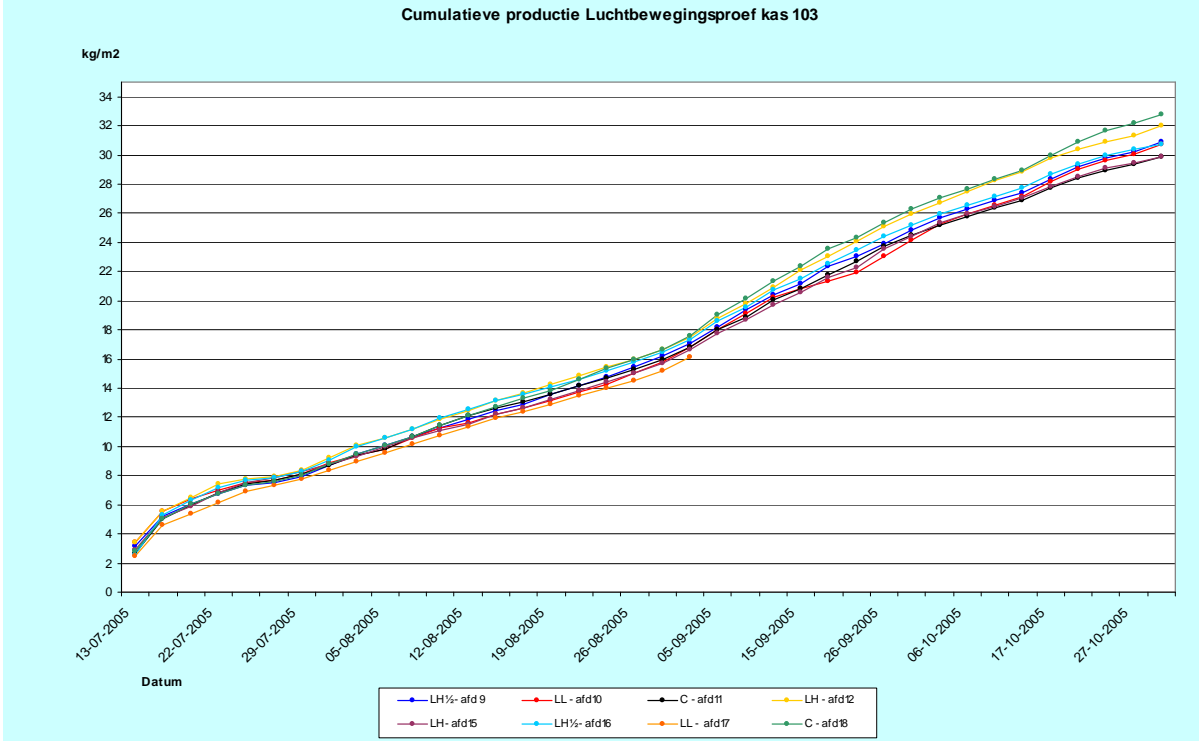


Afdeling 17 gemeten in de periode 30 juli tot en met 18 augustus

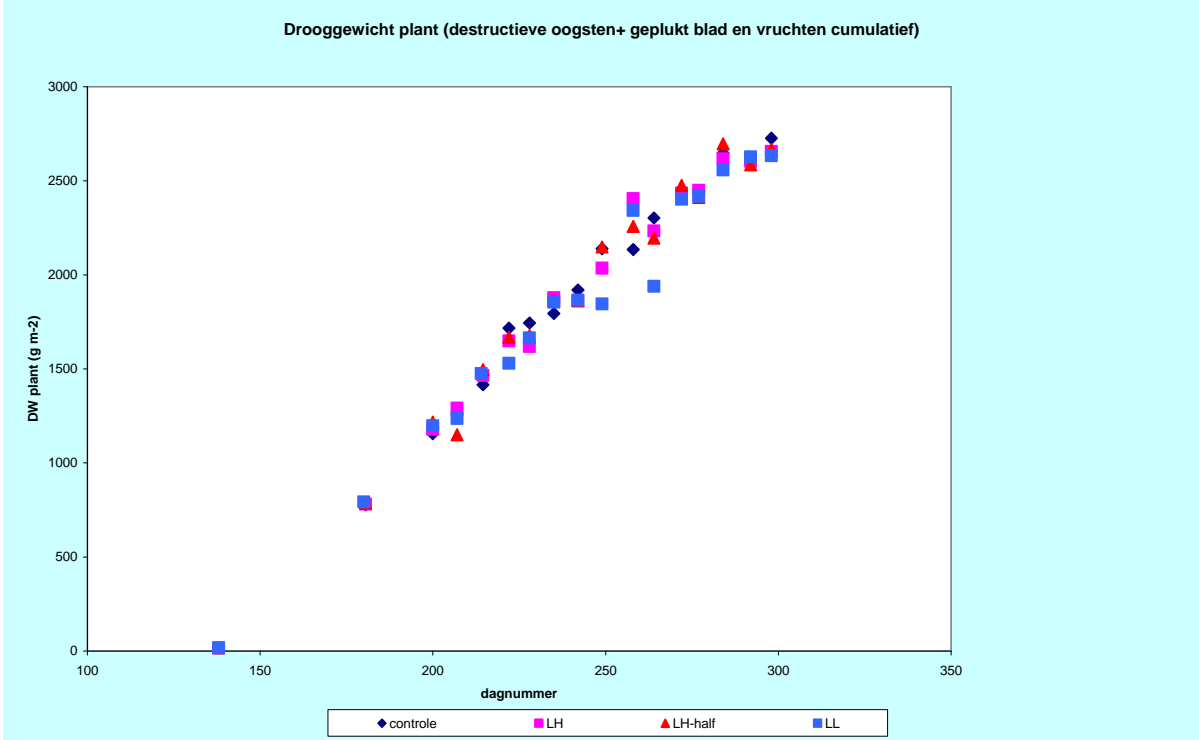


Afdeling 18 gemeten in de periode 23 augustus tot en met 14 oktober. De stijging in het tweede deel van de dag is het gevolg van meer sluiten van de luchtramen in vergelijking tot de zomer periode.

Bijlage 4 Productie verloop per afdeling



Bijlage 5 Drooggewicht toename per behandeling

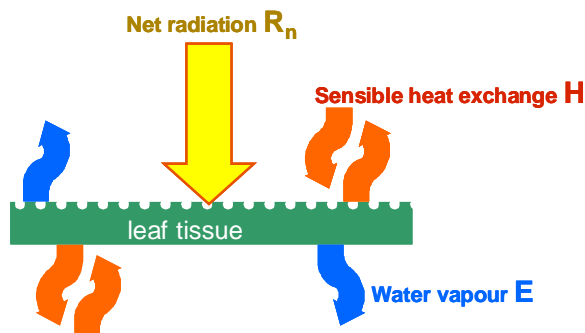


Bijlage 6 Crop transpiration in greenhouses: from processes to models

1. Theory of crop transpiration

We will now show that the physics of the process of transpiration (energy balance; vapour and heat transfer) allow us to write an explicit equation for crop transpiration rate **E**, Monteith (1965).

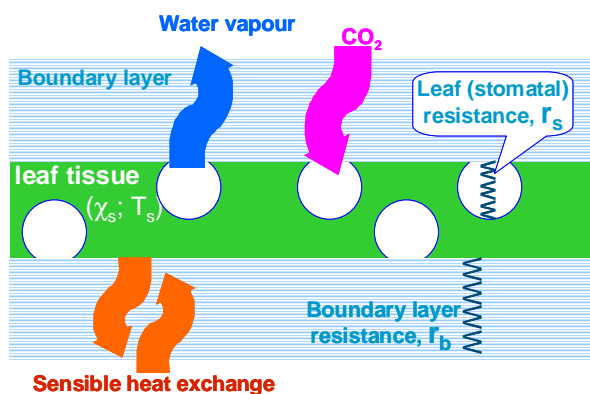
Transpiration from a simple surface (a leaf)



Energy balance:

$$\mathbf{R}_n + L\mathbf{E} + \mathbf{H} = 0 \quad \text{W m}^2 \quad (1)$$

Ambient air ($\chi_a; T_a$)



Transfer of sensible & latent heat:

$$\mathbf{H} = \rho c \frac{T_s - T_a}{r_b} \quad \text{W m}^2 \quad (2)$$

$$\mathbf{E} = \frac{\chi_s - \chi_a}{r_s + r_b} \quad \text{W m}^2 \quad (3)$$

Where:

- \mathbf{R}_n [W m^{-2}] is the net radiation of the leaf, that is the balance of intercepted and reflected sun radiation plus the balance of incoming and outgoing long-wave radiation
- L [J g^{-1}] is the latent heat of vaporization of water, almost constant and about 2450 for air temperature $T_a = 20^\circ\text{C}$
- \mathbf{E} [$\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$] is the evaporation flux density
- \mathbf{H} [W m^{-2}] is the density of sensible heat flux to or from the leaf surface
- ρc [$\text{J m}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$] is the volumetric heat capacity of air $\cong 1200 \text{ J m}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, being ρ the density of air ($\approx 1.2 \text{ kg m}^{-3}$) and c the specific heat ($\approx 1000 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$);
- T [$^\circ\text{C}$] is temperature, the subscript a indicates air; s is for leaf surface
- χ [g m^{-3}] is the vapour concentration, the subscript a indicates air; s is for leaf surface

r_s [$s\ m^{-1}$] is the stomatal resistance of the leaf

r_b [$s\ m^{-1}$] is the resistance of the leaf boundary layer

A fourth equation is obtained by assuming that water is freely available in the sub-stomatal cavities, that is: that the evaporating surface is saturated at its temperature: $\chi_s = \chi_s^*$, where the superscript * denotes "saturated".

Since saturated vapour concentration has an exponential trend with temperature, the system formed by the 4 equations cannot be solved analytically. Monteith (1965) used the first terms of the Taylor expansion with $T_s \approx T_a$

$$\chi_s = \chi_s^* \approx \chi_a^* + \chi' (T_s - T_a) \quad \text{g m}^{-3} \quad (4)$$

where χ' , $\text{g m}^{-3}\ ^\circ\text{C}^{-1}$ is the slope of the saturated vapour concentration curve at air temperature. $\chi'L$ [$\text{J m}^{-3}\ ^\circ\text{C}^{-1}$] is the variation of latent heat of saturated air for a change of 1 K in temperature. The corresponding variation in sensible heat is, obviously, ρc [$\text{J m}^{-3}\ ^\circ\text{C}^{-1}$] and the dimensionless ratio of the two is indicated by the symbol ε .

Substituting (4) into (3); then (2) into (1) and the new version of (1) into the new version of (3):

$$\mathbf{E} = \frac{1}{r_b + r_s} \left[(\chi_a^* - \chi_a) + \chi' \frac{r_b (\mathbf{R}_n - L\mathbf{E})}{\rho_a c_p} \right] = \frac{\chi_a^* - \chi_a}{r_b + r_s} + \varepsilon \frac{r_b}{r_b + r_s} \left(\frac{\mathbf{R}_n}{L} - \mathbf{E} \right) \Rightarrow$$

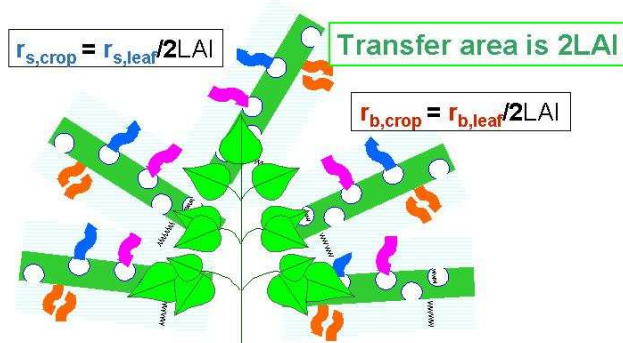
$$\Rightarrow \frac{r_b + r_s + \varepsilon r_b}{r_b + r_s} \mathbf{E} = \frac{\chi_a^* - \chi_a}{r_b + r_s} + \frac{\varepsilon r_b}{r_b + r_s} \frac{\mathbf{R}_n}{L} \Rightarrow$$

$$\mathbf{E} = \frac{\chi_a^* - \chi_a + \varepsilon r_b \frac{\mathbf{R}_n}{L}}{(1 + \varepsilon)r_b + r_s} \quad \text{g m}^{-2}\ \text{s}^{-1} \quad (5)$$

Transpiration from a canopy

Obviously the physics are the same for a canopy. The main difference is that there is a surface $2 LA$ for heat and vapour exchange, for any square meter of soil surface. On the other hand, the radiation energy available \mathbf{R}_n is usually less than the incoming radiation per square meter soil, since not all radiation will be intercepted. Once it is clear what is meant by it, one may retain the symbol \mathbf{R}_n and the energy balance equation (6) is formally the same as (1), whereas the transfer equations (2) and (3) must be re-written as (7) and (8):

Vapour and heat exchange of a crop:



Energy balance:

$$\mathbf{R}_n + LE + \mathbf{H} = 0 \quad \text{W m}^2 \quad (6)$$

Transfer of sensible & latent heat:

$$\mathbf{H} = 2LAI \rho c \frac{T_{crop} - T_a}{r_b} \quad \text{W m}^2 \quad (7)$$

$$\mathbf{E} = 2LAI \frac{\chi_{crop} - \chi_a}{r_s + r_b} \quad \text{W m}^2 \quad (8)$$

By solving eqs(6-8) as done above, taking into account (4) one gets:

$$\mathbf{E} = \frac{2LAI}{(1 + \varepsilon)r_b + r_s} \left[\chi_a^* - \chi_a + \frac{\varepsilon r_b}{2LAI} \frac{\mathbf{R}_n}{L} \right] \quad \text{g m}^2 \text{ s}^{-1} \quad (9)$$

where:

LAI [—] Is the leaf area index of the crop

ε [—] Is the ratio of the latent to sensible heat content of saturated air for a change of 1 °C in temperature. In the range of air temperature $T_a = 15$ to 30 °C it can be calculated through:

$$\varepsilon = 0.7584 \exp(0.0518T_a) \quad - \quad (10)$$

χ_a [g m^{-3}] Is the vapour concentration of air. χ_a^* is saturated vapour concentration a function of air temperature that can be approximated, for air temperature $T_a = 15$ to 30 °C, by:

$$\chi_a^* \cong 5.5638 \exp(0.0572T_a) \quad \text{g m}^{-3} \quad (11)$$

The difference $\chi_a^* - \chi_a$ is thus the vapour concentration deficit of air, and when one has relative humidity (RH) measurements, it can be calculated through:

$$\chi_a^* - \chi_a = \frac{100 - RH}{100} \chi_a^* \quad \text{g m}^{-3} \quad (12)$$

L [J g^{-1}] Is the latent heat of vaporization of water, almost constant and about 2450 for $T_a = 20$ °C

r_b [s m^{-1}] Is the resistance to heat transfer of the leaf boundary layer

r_s [s m^{-1}] Is the stomatal resistance

\mathbf{R}_n [W m^{-2}] Is the net radiation of the crop, that is the balance of intercepted and reflected sun radiation plus the balance of incoming and outgoing long-wave radiation

Variation of crop transpiration with wind speed

Since increasing wind speed has the effect of mixing better the air within the crop (reducing the resistance of the boundary layer, r_b) this ensures that the temperature of the crop gets nearer to air temperature. The driving force for transpiration (the difference in vapour concentration in eq(8)) may become smaller. However, also the total resistance on the vapour pathway (the denominator of eq(8)) gets smaller, so that

the crop transpiration may decrease as well as increase following and increase in wind speed. The conditions for the one or the other effect to happen can be seen by calculating the derivative of crop transpiration, eq(9), with respect to the boundary layer resistance.

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial r_b} = \frac{\varepsilon \frac{\mathbf{R}_n}{L} - (1 + \varepsilon)\mathbf{E}}{(1 + \varepsilon)r_b + r_s} \quad \text{g m}^{-1} \text{ s}^{-2} \quad (13)$$

The derivative must be analysed as follows: if wind speed increases $\rightarrow r_b$ decreases. If the derivative, eq(13) is positive, \mathbf{E} will decrease as well; otherwise \mathbf{E} will increase. That is: an increase in air movement will decrease the transpiration whenever the numerator of eq(10) is larger than 0, since the denominator always is. That is, whenever the following condition is satisfied:

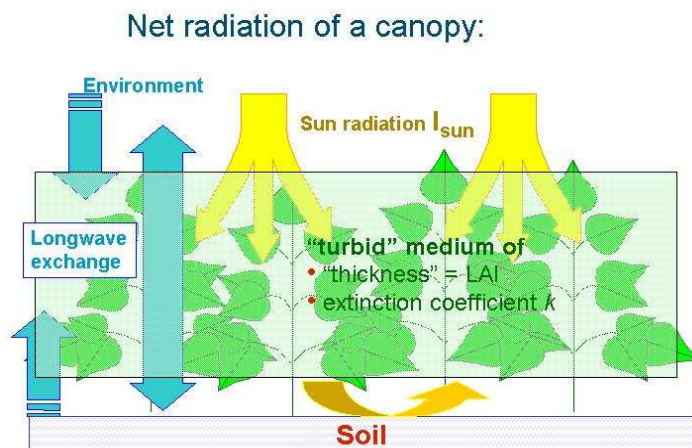
$$LE < \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon} \mathbf{R}_n \approx < \frac{2}{3} \mathbf{R}_n \quad \text{W m}^{-2} \quad (14)$$

Therefore, the simple analysis of the processes involved: energy balance, heat exchange and production and transport of vapour, allow us to determine that there are conditions whereby an increase in wind speed may cause a [counterintuitive] decrease of transpiration.

2. A model for crop transpiration

So far the physics. Now, the point is that equation (9) is useless unless we have values, and the last three items in the list above, that: is net radiation; stomatal resistance and resistance of the boundary layer, cannot be easily measured. So we need to model them.

Net radiation



"Turbid medium" model of a plant stand, Ross (1975). Transmission of sun radiation, I_{sun} is described similarly to what happens in a semi-transparent medium:

$$\frac{I_{sun,below}}{I_{sun,above}} = \exp(-k d)$$

the LAI having the function of the thickness d , of the medium. The coefficient of extinction k , is in a crop related to the inclination of the leaves.

In a greenhouse (almost isothermal conditions) longwave exchange can be neglected in first approximation. Baille et al (1994) and a lot of subsequent literature have shown that in most conditions the contribution of radiation to crop transpiration can be estimated solely through the shortwave component (solar radiation). Stanghellini (1987) extended Ross's analogy to account for reflection both of the canopy itself and of the soil surface, which is relevant for a crop cultivated in rows, such as in greenhouses. She determined experimentally the relevant coefficients for a tomato crop on a white-mulched soil. Her final model can be simplified with little loss of accuracy to:

$$\mathbf{R}_n = 0.86(1 - \exp(-0.7 LAI)) I_{sun} \quad \text{W m}^{-2} \quad (15)$$

where I_{sun} is global radiation at the top of the canopy. Since usually global radiation is measured outside the greenhouse, one has to reduce it by the transmissivity of the greenhouse, typically between 65 and 70%. Similar formulas with specific parameters can be found in the literature for other crops, such as roses (Baille et al., 1994); cucumber (Medrano et al., 2005) and sweet pepper (Lorenzo, personal communication, 2006).

Boundary layer resistance

Stanghellini (1987) determined the parameters of a model for the boundary layer resistance, based both on wind speed and leaf dimensions. She also showed that the relatively small variations in air movement within a greenhouse ensure that the boundary layer resistance is fairly constant. In addition, she showed that in such greenhouse conditions the transpiration rate is fairly un-sensitive to the boundary layer resistance, so that there is not much loss of accuracy in using a constant r_b in eq(1). Typical values for a standard greenhouse (no forced air movement) are in the table below.

Typical values of the minimal stomatal resistance; the boundary layer resistance and LAI of Dutch greenhouse crops.

Crop	r_s [s m ⁻¹]	r_b [s m ⁻¹]	LAI
Tomato	200	200	3
Sweet pepper	200	300	4
Cucumber	100	400	5
Eggplant	100	350	4

Stomatal resistance

On the other hand, stomatal resistance is known to change much during a day, particularly in response to light. Stomatal resistance is very high at night (stomata are closed), typically 1000 s m⁻¹ or higher, and decreases with light to a crop-specific minimum value. Factors such as water shortage or high/low temperatures may cause [partial] stomatal closure, so that the minimum value may be never reached. Jarvis (1976) proposed a model of the form:

$$r_s = r_{min} f_1(I_{sun}) f_2(T) f_3(\text{vapour pressure deficit}) f_4(CO_2)$$

where r_{min} is a crop-specific minimum value of the stomatal resistance (a list of values for many crops can be found in Körner, 1979) and the functions f_{1-4} (always larger than 1) describe the increase of it in dependence of light, temperature, humidity and carbon dioxide concentration.

Stanghellini (1987) determined experimentally the parameters of the f_{1-4} functions for a tomato crop. She found only a very weak effect of the carbon dioxide concentration of the air, a finding confirmed (for CO₂ concentrations above 350 vpm) through direct measurements of stomatal resistance in a leaf chamber by Stanghellini & Bunce (1993). Nederhoff (1994) found that stomatal resistance of tomato increased by only 27% for CO₂ concentration increasing from 200 to 1000 vpm. However, she found a larger effect in sweet pepper and eggplant.

However, Jolliet and Bailey (1992) analyzing the performance of a number of models in estimating the transpiration of greenhouse tomato crops concluded that the model of Stanghellini (1987) was best (a flattering conclusion confirmed again by Prenger et al., 2002), and that its performance was not worse if the dependency of the stomatal resistance on air temperature and CO₂ concentration was neglected. Indeed, Bakker (1991) did not include a leaf temperature function in the stomatal resistance models that he parametrised, for tomato, cucumber, sweet pepper and eggplant.

However, Fuchs and Stanghellini (2000, unpublished) cast doubt on the experimental method applied by all for determining the parameters of the function f_3 , in view of the feed-back between crop transpiration and air humidity in a greenhouse. That is: in a semi-closed environment stomatal closure (→ smaller transpiration) could be as well the **cause** as the **effect** of a dryer air.

In view of this and of the redundancy pointed out by Jolliet and Bailey (1992), and given the large correlation between saturation deficit and temperature, in her subsequent work (such as the series of experiments described by Li et al., 2001) Stanghellini has preferred to retain f_2 , the dependency on temperature of the stomatal resistance, rather than f_3 , the effect of saturation deficit. Therefore, her final model writes as:

$$r_s = 82 \frac{\frac{R_n}{2LAI} + 4.30}{\frac{R_n}{2LAI} + 0.54} \left(1 + 0.023(T_a - 24.5)^2\right) \quad \text{s m}^{-1} \quad (16)$$

Performance

The good performance of the transpiration model, eq(9), with the eqs(15) and (16) for the net radiation and the stomatal resistance, respectively, is shown here below for the control treatment.

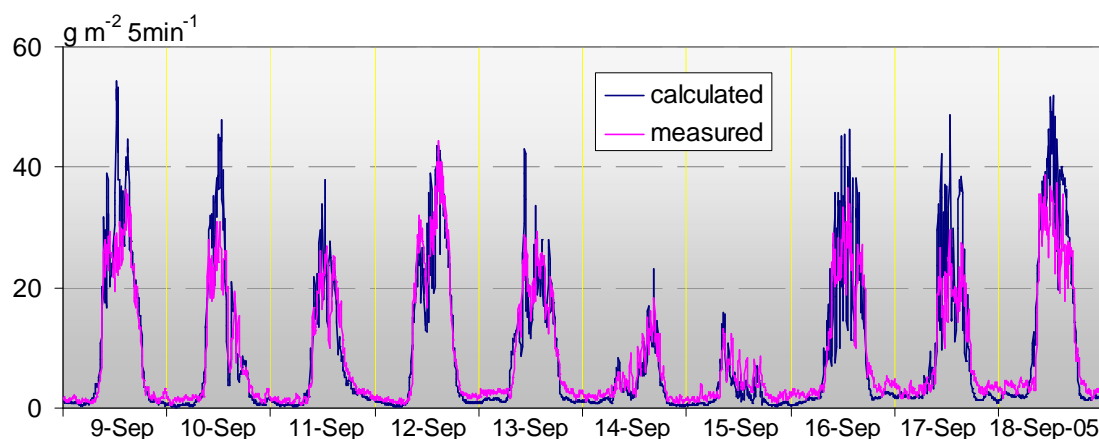


Figure 3. Transpiration in the control compartment, for a period of 10 days. Transpiration was measured by means of a weighing gutter, as described in the text. Calculated values are by means of eq(9), using the approximated formulae eqs(10), (11) and (12) and with substitution of eqs(15) and (16) for the net radiation and the stomatal resistance, and a constant value of 190 s/m for the boundary layer resistance.

3. References

- Baille M., Baille A., Delmon D., 1994. Microclimate and transpiration of greenhouse rose crops. *Agricultural and Forest Meteorology* 71: 83-9
- Bakker, J.C., 1991. Analysis of humidity effects on growth and production of glasshouse fruit vegetables. Ph.D. Dissertation, Agricultural University, Wageningen, 155 pp.
- Jarvis., P.G., 1976. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Phil. Trans. Roy. Soc. London, B*, 273:593-610.
- Jolliet, O., and B.J. Bailey, 1992. The effect of climate on tomato transpiration in greenhouses: measurements and models comparison *Agricultural and Forest Meteorology*, 58: 43-62
- Körner, Ch., J.A. Scheel and H. Bauer, 1979. Maximum leaf diffusive conductance in vascular plants. *Photosynthetica*, 13(1): 45-82.
- Li, Y L Stanghellini, C & Challa, H, 2001. Effect of electrical conductivity and transpiration on production of greenhouse Tomato (*Lycopersicon esculentum* L.). *Scientia Horticulturae* 88; 11.

- Medrano, E., Lorenzo, P. and Sánchez-Guerrero, M.C, Montero, J.I., 2005. Evaluation and modelling of greenhouse cucumber-crop transpiration under high and low radiation conditions. *Scientia Horticulturae*, 105: 163–175
- Monteith, J.L., 1965. Evaporation and the environment. In: State and movement of water in living organisms., 19th Symp. Soc. Exp. Biol.: 205-234.
- Nederhoff, E., 1994. Effects of CO₂ concentration on photosynthesis, transpiration and production of greenhouse fruit vegetable crops. Ph.D. Dissertation, Agricultural University, Wageningen, 213 pp.
- Prenger, JJ, RP Fynn and RC Hansen. 2002. An evaluation of four evapotranspiration models. *Transactions of the ASAE* 45(6): 1779-1788
- Ross, J., 1975. Radiative transfer in plant communities. In: J.L. Monteith (Ed), *Vegetation and the atmosphere*. Academic Prss, London: 13-55.
- Stanghellini, C., 1987. Transpiration of greenhouse crops: an aid to climate management. Ph.D. Dissertation, Agricultural University, Wageningen, 150 pp.
- Stanghellini, C., and J.A. Bunce, 1993. Response of photosynthesis and conductance to light, CO₂, temperature and humidity in tomato plants grown at ambient and elevated CO₂. *Photosynthetica*, 29(4): 487-497.

Bijlage 7 Bepaling van de grenslaagweerstand per laag en behandeling

De bepaling van de grenslaag weerstand t.b.v. de simulatie berekeningen is als volgt gedaan: uit de fot's die voor bepaling van de bladmorphologie zijn gemaakt is grofweg de gemiddelde doorsnede geschat van de ideale cirkel ingeschreven in het kleinste blaadjes (4 cm). Daarna werd aangenomen dat deze evenredig met de oppervlakte zou variëren tussen behandelingen en lagen. Omdat de simulatieberekeningen werden uitgevoerd met 5 lagen terwijl we slechts metingen hadden op twee hoogtes, is aangenomen dat wat "halverwege" in het gewas was gemeten, representatief is voor volgroeide bladeren. Deze is toegekend aan lagen 3 t/m 5 van boven. De metingen "hoog" in het gewas zijn toegekend aan laag 1, en voor laag 2 is het gemiddelde genomen van laag 1 en 3.

Door de berekeningswijze zoals aangegeven, is deze distributie van typische lengtes (cm) bepaald:

laag van boven	C	LL	LH	LH ^{1/2}
1	3.1	3.9	3.5	3.6
2	3.5	3.9	3.7	3.8
3	4.0	4.0	3.8	3.9
4	4.0	4.0	3.8	3.9
5	4.0	4.0	3.8	3.9

Naar aanleiding van de metingen zoals in hoofdstuk 5 omschreven werd de volgende verdeling van de luchtsnelheid voorgesteld, over 5 lagen per behandeling en in m/s:

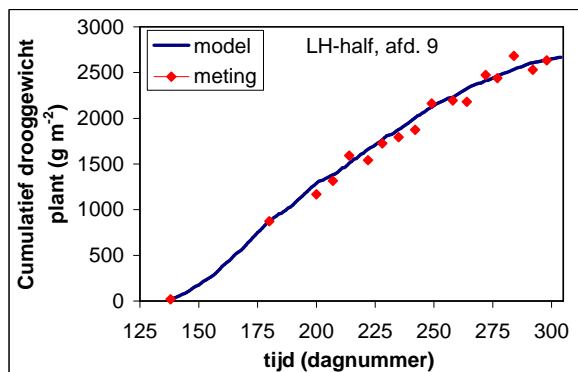
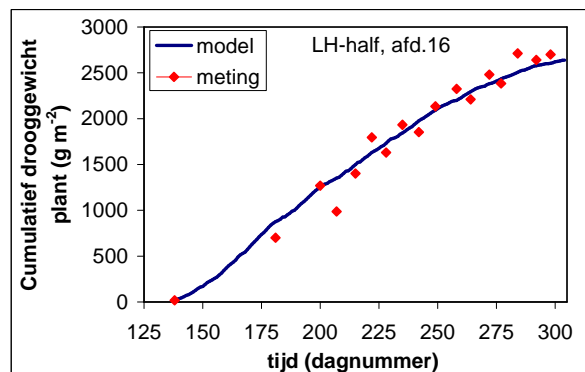
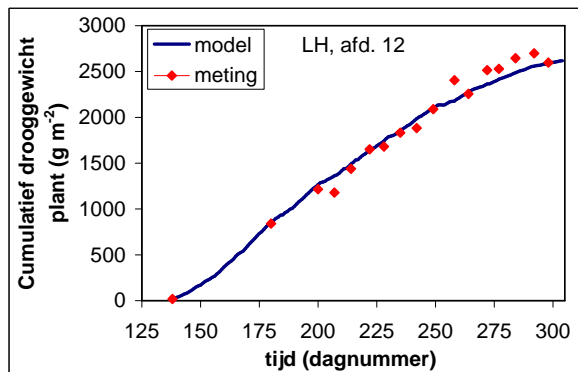
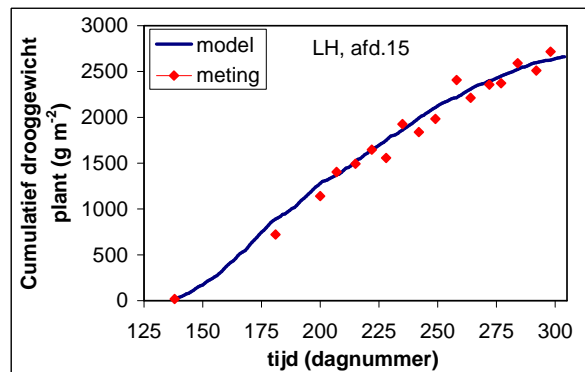
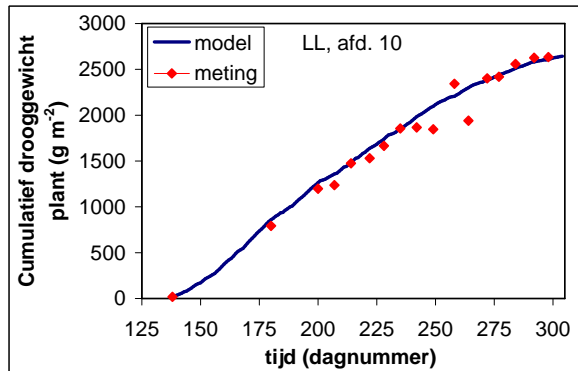
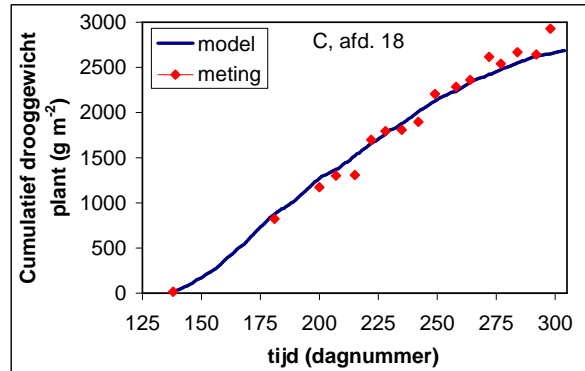
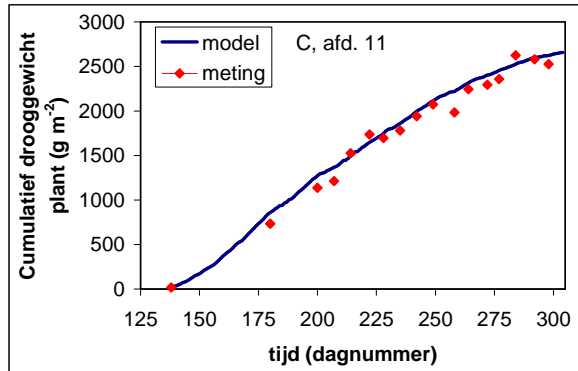
laag van boven	C	LL	LH	LH ^{1/2}
1	0.1	0.1	0.6	0.3
2	0.1	0.1	0.1	0.1
3	0.1	0.1	0.1	0.1
4	0.1	0.6	0.1	0.1
5	0.1	0.6	0.1	0.1

En de resulterende grenslaag weerstand (s/m) is in de tabel hieronder:

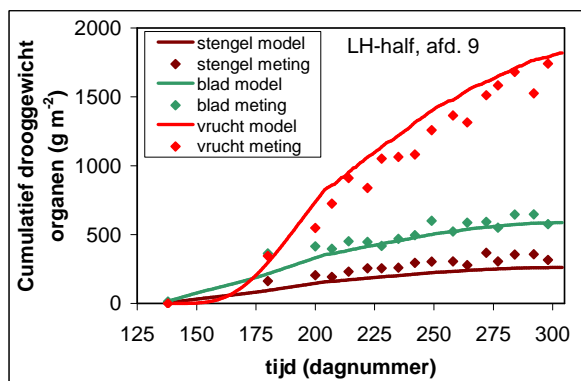
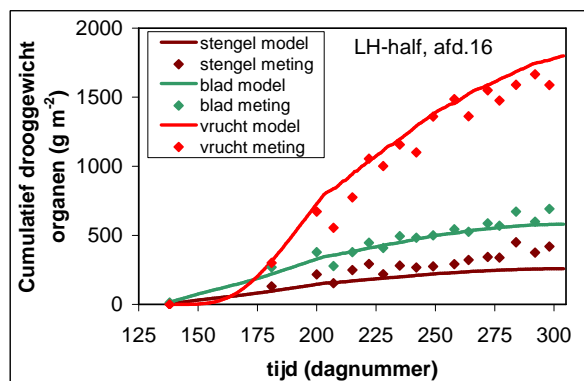
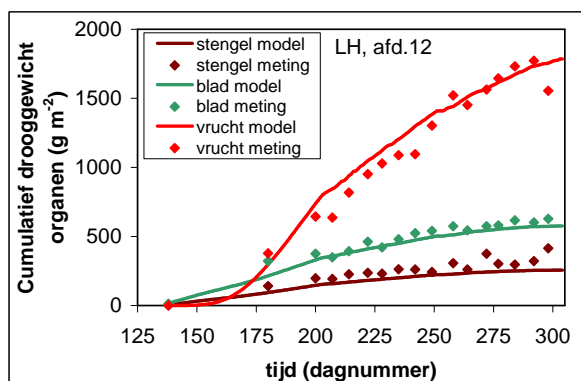
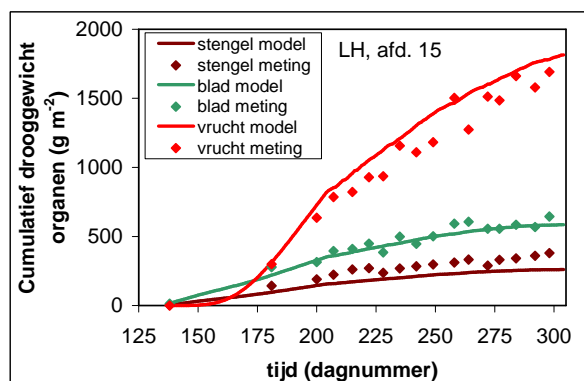
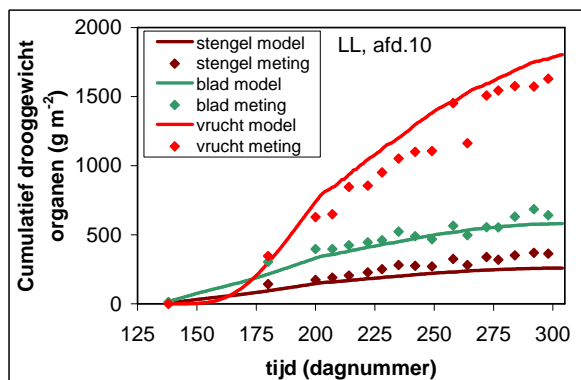
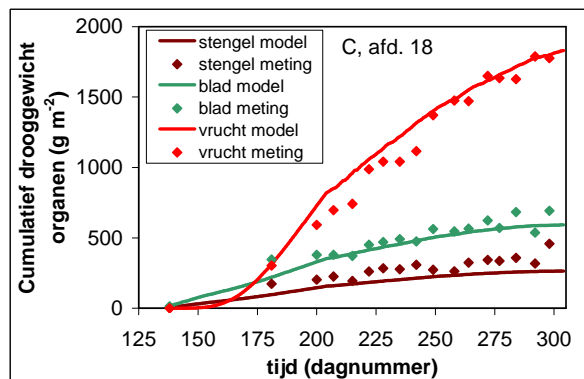
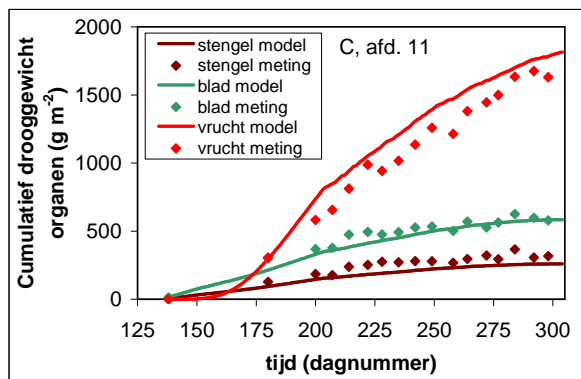
laag van boven	C	LL	LH	LH ^{1/2}
1	170	190	75	105
2	190	190	190	190
3	190	190	190	190
4	190	80	190	190
5	190	80	190	190

Deze waarden zijn gerefereerd aan warmte uitwisseling per bladoppervlak (dat is 2*LAI). In het geval dat LAI wordt gebruikt als referentie oppervlakte voor de uitwisseling, dan moeten de waarden in de bovenstaande tabel gehalveerd worden [het is namelijk een kwestie van definitie].

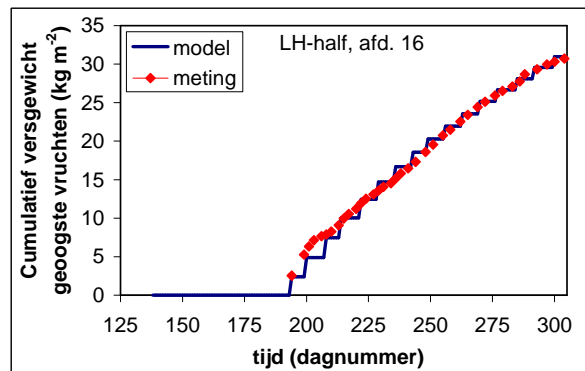
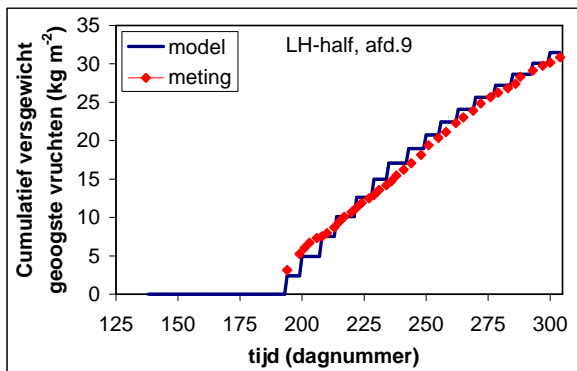
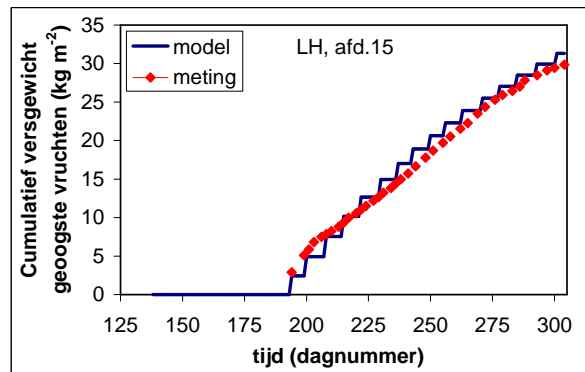
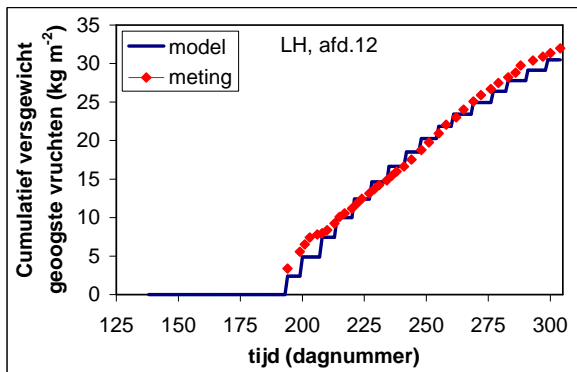
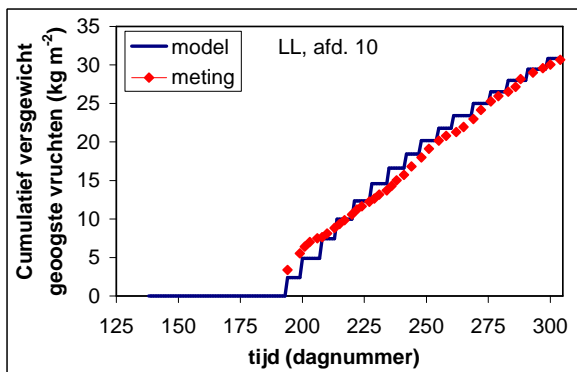
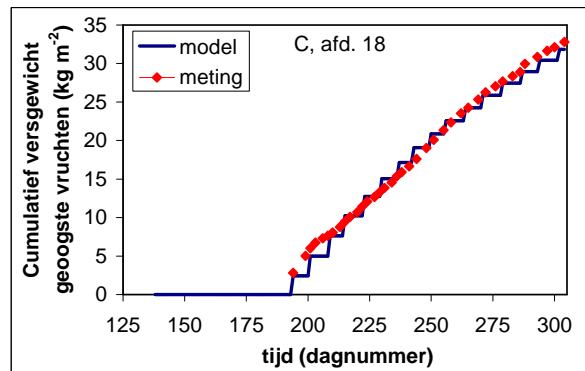
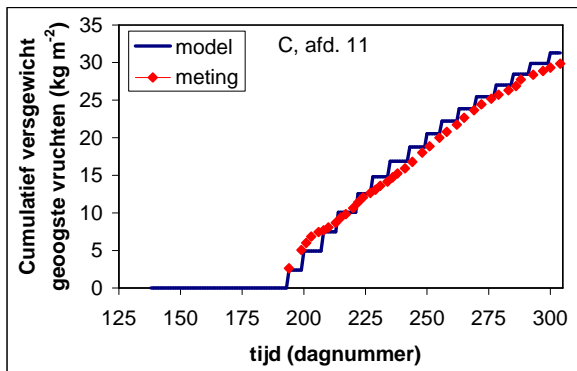
Bijlage 8 Gewasgroeisimulaties



Waargenomen en gesimuleerde cumulatieve, bovengrondse, drogestoftoename. Resultaten zijn gegeven per afdeling.

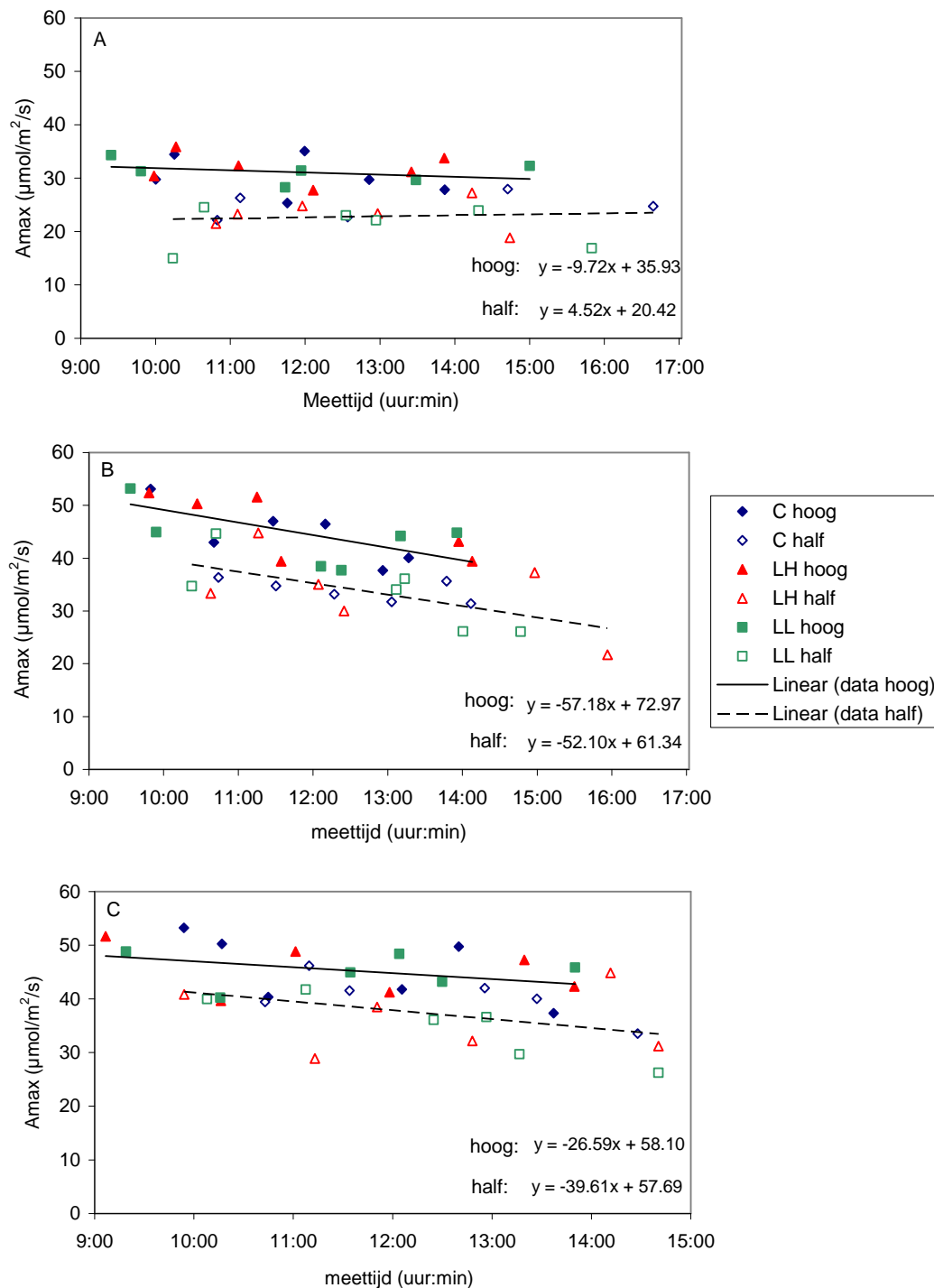


Waargenomen en gesimuleerde cumulatieve drogestoftoename van de bovengrondse organen. Resultaten zijn gegeven per afdeling.



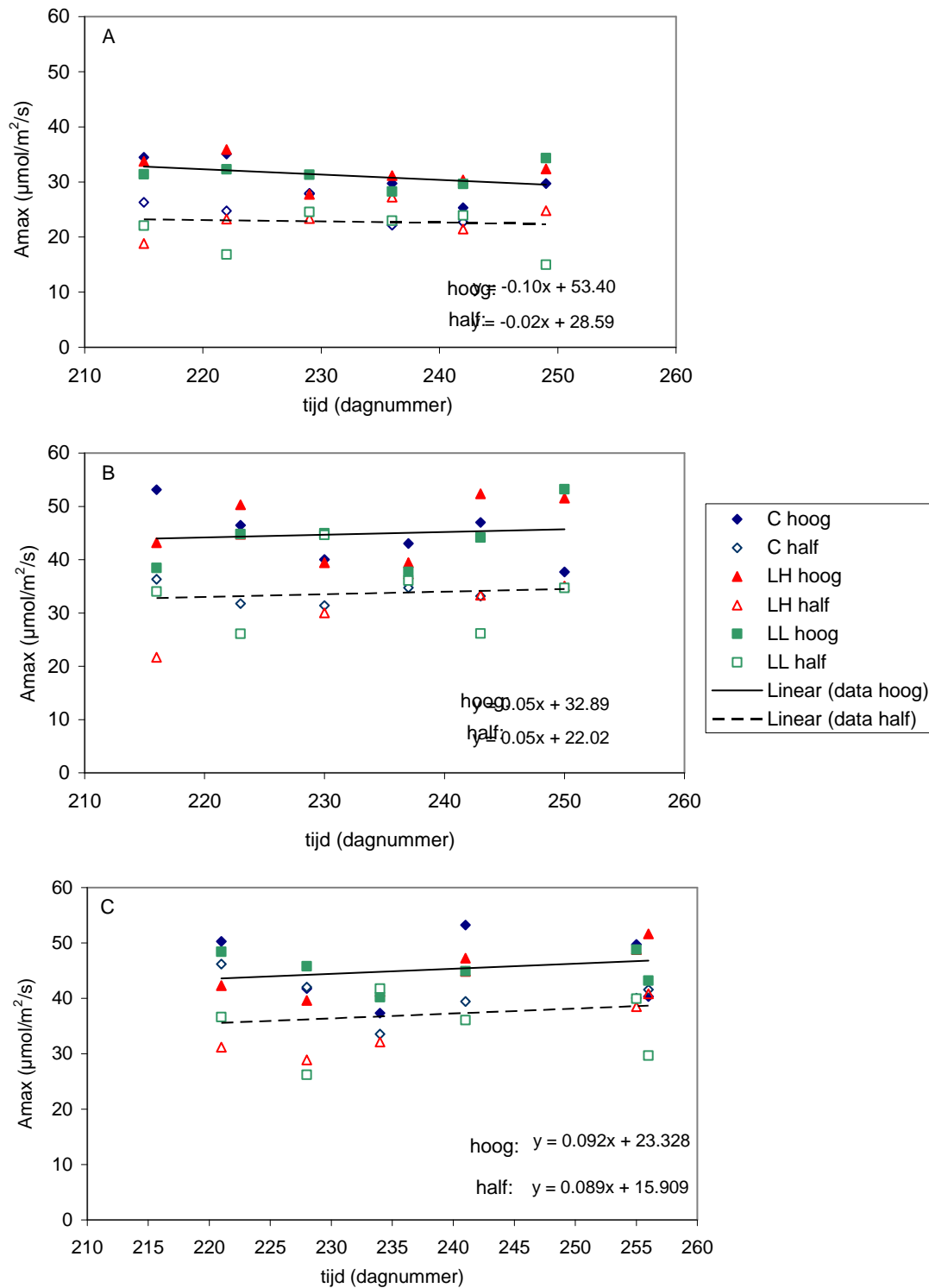
Waargenomen en gesimuleerde cumulatieve versogst. Resultaten zijn gegeven per afdeling.

Bijlage 9 Fotosynthesemetingen



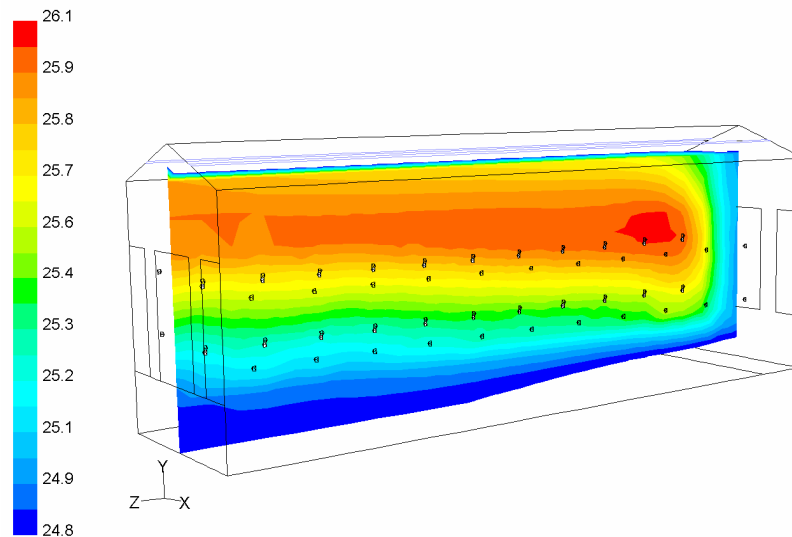
Invloed van het tijdstip van de dag op de netto fotosynthese gemeten bij $1395 \mu\text{mol PAR}/\text{m}^2/\text{s}$ in de bladkamer gemeten bij 3 luchtcirculatiebehandelingen, en 2 meethoogtes in het gewas en bij 400 (A), 700 (B) en 1000 ppm CO_2 (C).

Bijlage 10 Fotosynthesemetingen



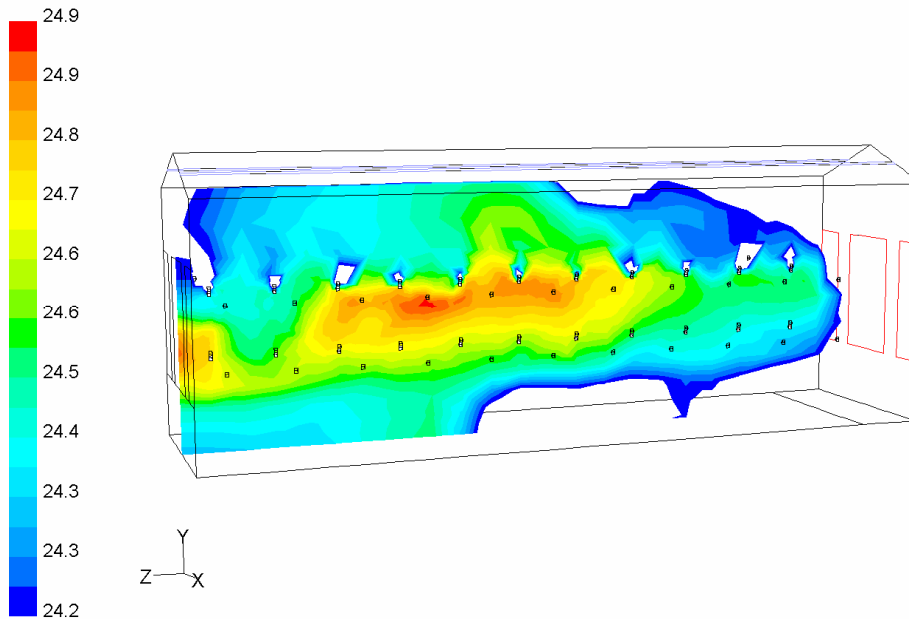
Invloed van het dagnummer op de netto fotosynthese gemeten bij 1395 µmol PAR/m²/s in de bladkamer gemeten bij 3 luchtcirculatiebehandelingen, en 2 meethoogtes in het gewas en bij 400 (A), 700 (B) en 1000 ppm CO₂ (C).

Bijlage 11 CFD berekeningen

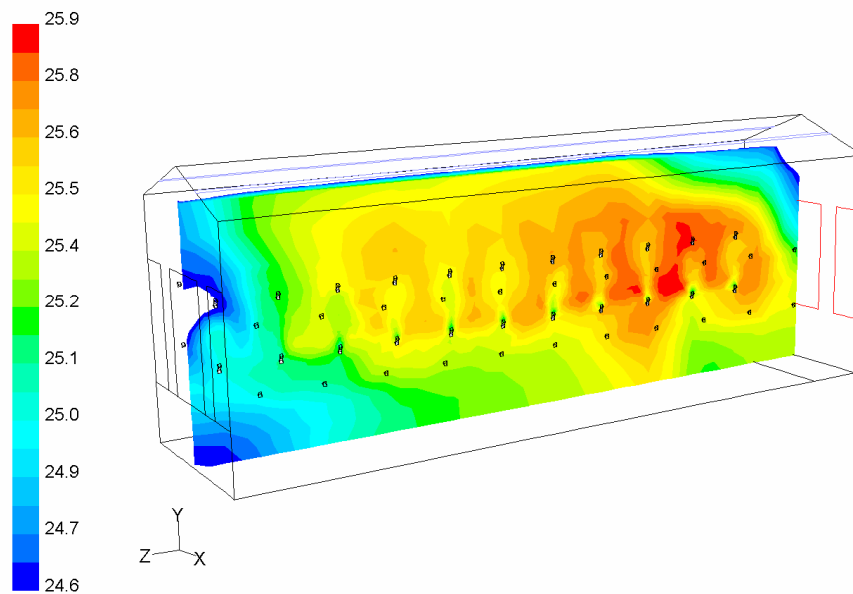


Figuur A.1 *Temperatuurverdeling in het vlak onder de nok zonder geforceerde luchtbeweging.*

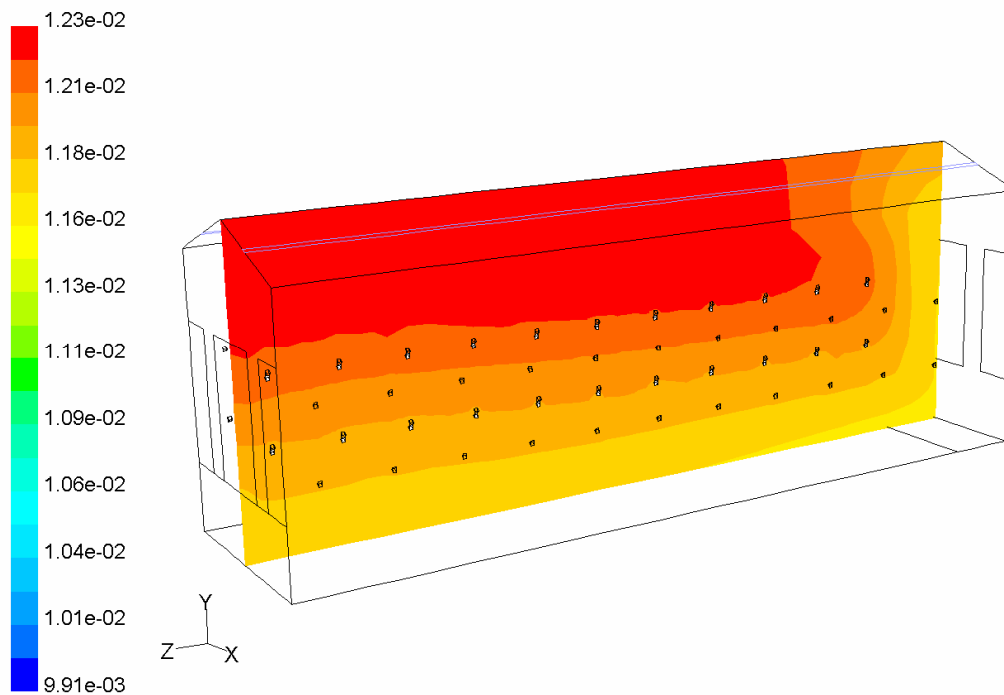
De schaal voor de temperatuur is aangepast op het temperatuurgebied dat voorkomt in het gewas.



Figuur A.2 *Temperatuurverdeling in het vlak onder de nok met luchtbeweging van 10 m/s als uitstroomsnelheid hoog in het gewas*

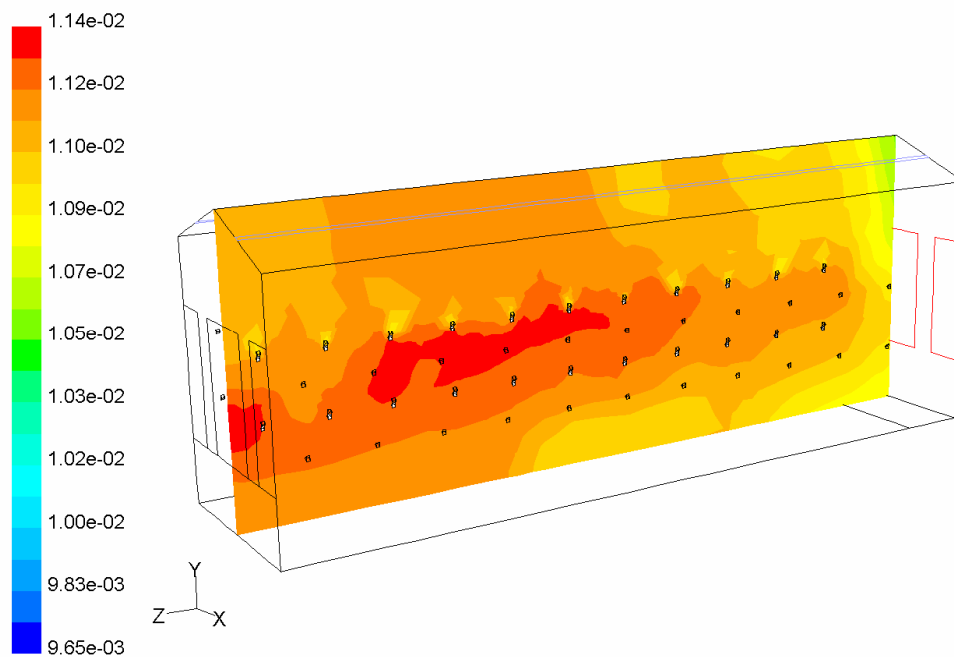


Figuur A.3 *Temperatuurverdeling in het vlak onder de nok met luchtbeweging van 10 m/s als uitstroomsnelheid laag in het gewas*



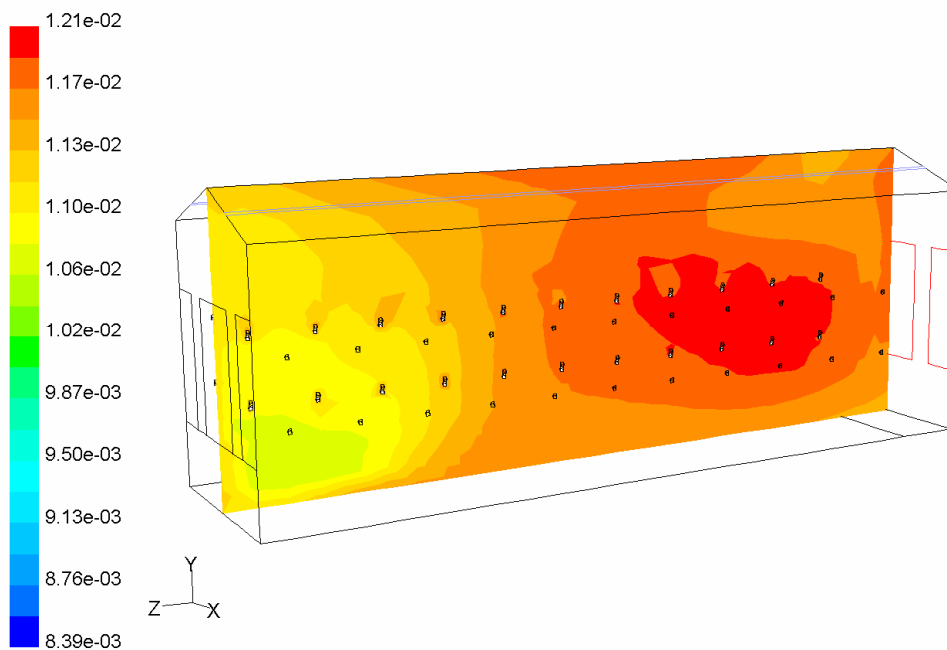
Figuur A.4 *Vochtverdeling in het vlak onder de nok zonder geforceerde luchtbeweging in kg/kg.*

Ten gevolge van de vochtproductie van het gewas en de luchtstroming van beneden naar boven in het gewas is de vochtgradiënt naar boven oplopend.



Figuur A.5 Vochtverdeling in het vlak onder de nok met luchtbeweging van 10 m/s als uitstroomsnelheid hoog in het gewas in kg/kg

De luchtbeweging zorgt van meer opmenging zodat de verdeling van het vocht in de lucht gelijkmatiger wordt.



Figuur A.6 Vochtverdeling in het vlak onder de nok met luchtbeweging van 1 m/s als uitstroomsnelheid hoog in het gewas in kg/kg

Bijlage 12 Theoretische benadering van de karakteristieken van de luchtslang

De luchtsnelheid uit de gaatjes in de luchtslang moet overal gelijk zijn. De factoren die voor de verdeling een rol spelen zijn:

- Hoe groot worden de gaatjes
- Hoe ver komen de gaatjes van elkaar
- Wat is de diameter van de slang
- Wat is de benodigde dikte van de slang
- Welk luchtdruk is nodig voor voldoende luchtbeweging.
- In welke richting wordt de lucht geblazen.

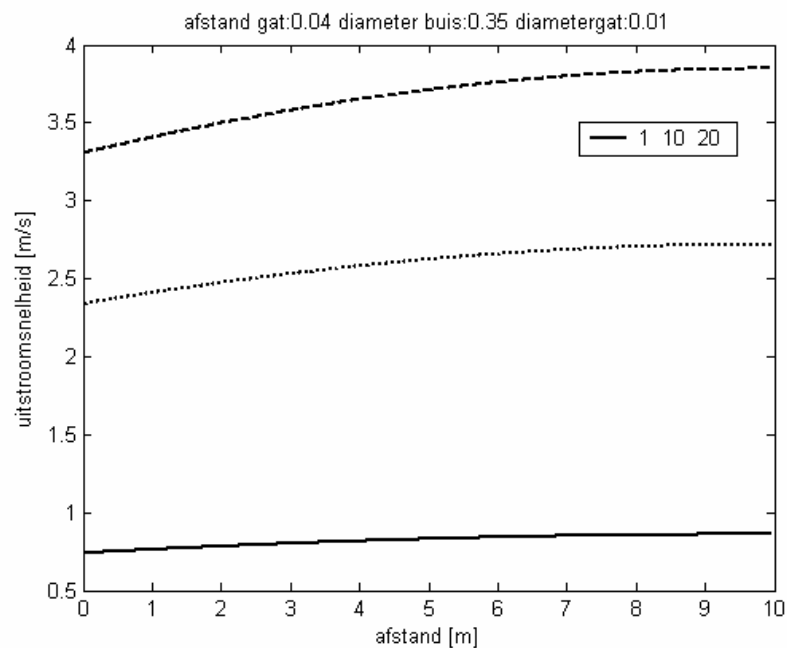
Het doorstroom oppervlak ($\frac{1}{4}\pi d_{buis}^2$) moet minstens 1.5x groter zijn dan het oppervlak van alle gaatjes

in de buis om een goede verdeling van de lucht over de gehele slang te krijgen.

De luchtsnelheid waarmee de lucht uit de slang stroomt wordt gegeven door:

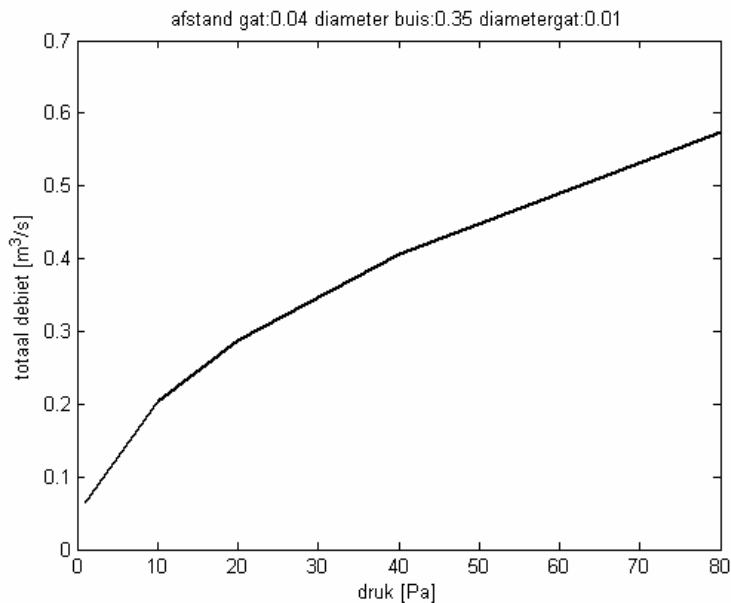
$$v = \left(\frac{2P_{buis}}{\rho_{lucht}} \right)^2$$

P_{buis} is de druk in de buis.



Uitstroomsnelheid als functie van de afstand van de ventilator als de afstand tussen de gaatjes 4 cm is, de buis een diameter heeft van 35 cm en de gaatjes een diameter van 1 cm voor 1 10 en 20 Pa

Met de karakteristieken voor de slang zoals aangegeven is er een verschil van 15% in de luchthoeveelheid die aan het begin en het eind van de slang wordt uitgeblazen.



Totale debiet door de slangen als functie van de begindruk

Op basis van de bovenstaande grafiek kan het benodigde vermogen van de ventilator worden berekend. Ventilator vermogen met een rendement van 50% als functie van de druk

$$P = 0.5 p_{buis} \phi_v$$

Hoe bovenstaande figuur er exact uitziet hangt af van de eigenschappen van de ventilator

Er zijn twee luchtsystemen aanwezig. Een nieuw systeem van Priva met ventilatoren met een omtrek van 126 cm in kas 15, 16 en 17. Een ouder systeem met een omtrek van 118 cm. De luchtslangen hebben een omtrek van 120 cm (diameter is 38 cm). Er zitten vier gaten met een diameter van 8 mm om de 4 cm. De slangen zijn 11 m lang. De doorsnede van de slang is daarmee 0.1134 m² en de totale oppervlakte van alle gaatjes is 0.0553 m² deze is dus een factor 2 kleiner.