



Verbetering van de lichtonderschepping in een tomatengewas door aanpassing van de rijstructuur

Effecten van de rijstructuur op lichtverdeling, fotosynthese en productie

Tom Dueck¹, Elly Nederhoff¹, Sjoerd Nieboer², Kees Scheffers², Johan Steenhuizen¹, Svetlana Chizhmak¹, Dik Uenk¹, Vaia Sarlikioti¹, Pieter de Visser¹

¹ Wageningen UR Glastuinbouw ² Improvement Centre, Bleiswijk



© 2010 Wageningen, Wageningen UR Glastuinbouw

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 Wageningen UR Glastuinbouw

Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Bornsesteeg 65, 6708 PD Wageningen
: Postbus 16, 6700 AA Wageningen
Tel. : 0317 - 47 70 01
Fax : 0317 - 41 80 94
E-mail : glastuinbouw@wur.nl
Internet : www.glastuinbouw.wur.nl

Inhoudsopgave

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
2	Materiaal & methoden	9
	2.1 Kas, gewas en teelt	9
	2.2 Behandelingen - rijstructuren	10
	2.3 Metingen	13
	2.3.1 Bladhoekmetingen	13
	2.3.2 Lichtmetingen	13
	2.3.3 Bladfotosynthesemetingen	14
	2.3.4 Productiewaarnemingen	14
	2.4 Overzicht gewasaanpassingen en metingen	15
3	Resultaten	17
	3.1 Rijstructuren en stengelhoogtes	17
	3.2 Bladhoek	18
	3.3 Resultaten lichtmetingen	19
	3.3.1 Lichtmetingen in februari	19
	3.3.2 Lichtmetingen in maart	21
	3.3.3 Lichtmetingen in juli en augustus	22
	3.3.4 Lichtonderschepping - discussie en conclusie	24
	3.4 Bladfotosynthese	25
	3.4.1 Lichtresponsecurve	25
	3.4.2 Bladfotosynthese – lichtresponse – ontwikkeling in de tijd	26
	3.4.3 Bladfotosynthese - bespreking van de resultaten	27
	3.4.4 Relatie actuele fotosynthese en –capaciteit	28
	3.5 Stomataire geleidbaarheid en bladverdamping	29
	3.6 Productie	31
4	Simulatie in 3D van de lichtverdeling	35
	4.1 Inleiding	35
	4.2 Methodes	35
	4.3 Resultaten	36
	4.4 Conclusies	38
5	Conclusie	39
6	Literatuur	41
	Bijlage I - Kasindeling	43

Samenvatting

Aanleiding. Uit onderzoek en uit de praktijk waren suggesties gekomen dat de productie verhoogd zou kunnen worden en de energiebehoefte verlaagd door aanpassing van de rijstructuur. Productieverhoging zou komen door verbetering van de lichtonderschepping en dus verbetering van de fotosynthese. Energiebesparing zou komen door verlaging van de LAI en daardoor verlaging van de verdamping. Verandering van de rijstructuur richt zich op alternatieve manieren van tussenplanten. De winst zou vooral te behalen zijn in de transitieperiodes. Een project is opgezet door Improvement Centre en WUR-glastuinbouw met financiering van PT en LNV.

Doel van dit project was te onderzoeken wat het effect is van de rijstructuur op de lichtverdeling en fotosynthese van een tomatengewas, en de effecten daarvan op de productie. Ook werd gekeken of de bladstand en de fotosynthesecapaciteit van de bladeren zich aanpassen aan wijzigende lichtverdeling. Tevens werd de hypothese getest of alternatieve vormen van tussenplanten zouden leiden tot lagere verdamping en dus tot energiebesparing. Verder is gekeken naar het effect op productie van twee substraten, namelijk kokosmatten type 'Profit' van Van der Knaap, en steenwolmat type 'Master Dry' van Grodan.

Proefopzet. De proef is uitgevoerd bij het Improvement Centre in Bleiswijk, in kasafdeling 11, van begin oktober 2006 tot eind oktober 2007. Geënte tomatenplanten (trostomaat, ras Aranca) werden op 11 oktober (week 41) geplant. De proef werd opgezet als 3 achtereenvolgende teelten. Teelt 1 werd geplant in week 41 en diende alleen om het systeem op te starten. Teelt 2 werd tussengeplant in week 5, en geteeld in de zomer. Teelt 3 werd geplant in week 36, en geteeld in de herfst. In teelt 2 en 3 werden drie varianten van tussenplanten toegepast, welke resulteerden in verschillende rijstructuren. De varianten zijn:

1. TR 'Traditioneel': de standaard manier van tussenplanten, als controle
2. PG 'Per Goot': alle planten in één goot worden verwijderd (dus planten tussen 2 paden verwijderd)
3. PP 'Per Pad': alle planten in één rij van een goot worden verwijderd, aan beide kanten van een pad

Metingen zijn verricht aan bladhoek, lichtonderschepping, fotosynthese, stomataire geleidbaarheid en verdamping.

Resultaten algemeen. Uit de hieronder beschreven resultaten van deze proef is niet duidelijk te concluderen of één van de drie rijstructuren beter is dan de andere twee. Er zijn geen verschillen of alleen kleine niet-systematische verschillen gevonden. Omdat de proef in enkelvoud lag is niet te zeggen of de kleine verschillen op toeval berusten.

Cummulatieve productie tot en met week 42 was niet verschillend. In week 11-13 liep TR een achterstand op in productie vanwege het tussenplanten. Dit liep op tot bijna 2,5 kg/m² achterstand in week 30. Pas na week 34 nam de productiesnelheid van PG en PP af en begon TR de achterstand in te halen. De producties van PG en PP gingen gelijk op. In week 42 was de cummulatieve productie van PP 2,8 % hoger dan die van TR en PG, maar in de telvakken met combinaties van rijstructuur en substraat had PP juist de laagste cummulatieve productie. Ook werd geen effect op gemiddeld vruchtgewicht gevonden. Substraattype (kokos of steenwol) bleek geen effect te hebben op de productie.

Bladhoekmetingen vonden geen duidelijke behandelingsverschillen. Topbladeren hadden aanvankelijk een hoek van -5 á +10 graden tov de horizon, maar na 4 weken was het in alle behandelingen ongeveer -20 graden geworden. Bladeren in het midden en onderin het gewas hadden een bladhoek tussen -15 en -30 graden. Deze data zijn verzameld om gebruikt te worden in simulatiestudies.

Lichtmetingen werden gedaan in twee transitieperiodes (februari/maart en juli/augustus). Samengevat waren de resultaten dat in de volgroeide fase of stabiele tussenfase er geen verschillen waren in lichtonderschepping. In de transitieperiodes was de lichtonderschepping van PP soms tijdelijk wat hoger dan van PG. TR had vaak een andere rijstructuur, en daarom was de lichtonderschepping niet altijd vergelijkbaar. Details waren als volgt:

Op 12/13 februari had in PP en PG de helft van de planten nog op oude hoogte en de andere helft was laag. De totale lichtonderschepping lag tussen 60 - 70 % voor daglicht en lamplicht, maw 30 - 40 % van het licht ging verloren vanwege het tussenplanten. PG en PP hadden ongeveer hetzelfde lichtonderscheppingsprofiel, hoewel de totale lichtonderschepping

iets hoger was voor PP dan voor PG. TR had een wat andere gewasopbouw en daardoor een ander lichtonderscheppingsprofiel. Behandelingsverschillen waren verwaarloosbaar. Op 30 maart was een transitie voltooid en alle stengels waren minimaal 260 cm hoog. De totale lichtonderschepping was ca 95 % en de lichtonderscheppingsprofielen waren nagenoeg gelijk. Onder lamplicht was de totale lichtonderschepping nog hoger en de profielen iets verschillend.

In Juli/augustus was er weer een transitieperiode. In behandeling TR veranderde niets aan de rijstructuur, en veranderde ook weinig aan de lichtonderschepping. Bij PG en PR werd het oude gewas langzaam naar beneden gelaten, waardoor de lichtonderschepping geleidelijk afnam. Vaak had PP een iets hogere lichtonderschepping dan PG, maar bij de laatste meting was de totale lichtonderschepping van PG en PP precies gelijk op 63 %.

Fotosynthese werd gemeten aan bladeren op twee hoogtes in het gewas bij een reeks van lichtintensiteit tot 1400 micromol/m²/s. Metingen vonden plaats tussen week 27 en 33. Verschillen in fotosynthesecapaciteit tussen de behandelingen waren nihil bij de bovenste bladeren, wat verklaard wordt met het feit dat deze bladeren nog niet aangepast waren aan bepaalde (licht)omstandigheden.

Bij TR zaten de onderste bladeren steeds in de schaduw, en door aanpassing aan lage lichtintensiteit hadden deze een lagere fotosynthesecapaciteit gekregen. Bij PG en PP was de fotosynthesecapaciteit van de onderste bladeren aanvankelijk ook laag, maar deze nam toe in de loop van de tijd. Dit is verklaarbaar vanwege het naar beneden laten zakken van de helft van de planten. Op de lagere hoogte kwamen toen bladeren te zitten die in feite topbladeren waren, die waren opgegroeid in het volle licht. Ze bleven in het licht, en konden zo hun hoge fotosynthesecapaciteit (deels) behouden. Tussen PG en PP bestond een klein verschil: in de onderste bladlaag had PG soms een wat hogere fotosynthesecapaciteit dan PP. De verklaring is dat PG soms een iets hogere lichtintensiteit (lagere lichtonderschepping) had op verschillende hoogtes in het gewas.

Stomataire geleidbaarheid is drie keer gemeten in week 27 tot 33 tegelijk met de fotosynthese metingen in het lichttraject 0 - 1400 micromol/m²/s. Ook hier werden geen duidelijke behandelingsverschillen gevonden, behalve dat in week 33 de bovenste bladeren van TR een uitzonderlijk hoge stomataire geleidbaarheid hadden. Dit is verklaarbaar, want bij TR stond een volgroeid gewas, terwijl bij PG en PP de helft van het gewas al heel laag was geworden. Echter in de onderste bladeren had TR de laagste stomataire geleidbaarheid.

Verdamping van bladeren werd bepaald met de fotosynthesesensor uit de stomataire geleidbaarheid en de luchtvochtigheid in het meetcuvet (steeds 80 %). De hypothese was dat behandeling PG en PP zouden leiden tot lagere gewasverdamping, wat energie zou besparen. In week 33 was de stomataire geleidbaarheid opvallend hoog in de bovenste bladeren van TR. De verdamping van deze bladeren bleek slechts iets hoger dan bij de andere behandelingen. Daarentegen was de verdamping van de laagste bladeren in TR juist relatief laag, waardoor de verdamping van het hele gewas in TR niet of nauwelijks hoger was dan die van PG of PP. Dit gold voor zowel lage als hoge lichtintensiteit. Omdat de verdamping van TR, PG en PP nauwelijks verschillend was, kan geconcludeerd worden dat PG en PP geen winst opleveren in de vorm van vermindering van de verdamping. In niet-transitie periodes waren de gewasstructuren vrijwel gelijk en werden geen verschillen in stomataire geleidbaarheid en verdamping gevonden.

Arbeidsbehoefte is wel verschillend tussen de behandelingen. TR vraagt meer arbeid tijdens tussenplanten en daarna voor aanbinden en indraaien, omdat dit moet gebeuren tussen de oude planten in. In PP en PG kan dit veel gemakkelijker gedaan worden. In PG en PP is er in deze periode minder arbeid, omdat een heel pad of hele goot tegelijk verwijderd wordt. PG vereist meer arbeid dan PP tijdens het oogsten, vanwege heen en weer moeten rijden in de pad en maar de helft oogsten.

Berekeningen met 3D model

Een 3D gewasmodel is geconstrueerd op basis van de aanwezige gewasstructuren. De toegepaste behandelingen werden qua lichtverdeling correct gesimuleerd. Vervolgens zijn verschillende andere rijstructuren doorgerekend die duidelijke effecten op de lichtonderschepping door het gewas lieten zien.

Geconcludeerd kan worden dat er geen voordelen zijn gevonden van tussenplanten 'Per Goot' (PG) of 'Per Pad' (PP) ten opzichte van de traditionele manier van tussenplanten (TR).

1 Inleiding

Rijstructuur

Bij vruchtgroenten als tomaat en paprika die in rijen worden geteeld heeft de rijstructuur en rijafstand invloed op de lichtonderschepping en daardoor op de fotosynthese en dus op de productie. In de projecten 'Optimale lichtomstandigheden bij de transitie naar een duurzame kastuinbouw' en 'Diffuus Licht' zijn de voordelen gebleken van beter lichtdoordringing in het gewas. In de praktijk is veel discussie gaande over te hanteren padbreedte om de lichtverdeling te optimaliseren. Ook zijn in de praktijk nieuwe manieren van tussenplanten ontwikkeld die tot doel hebben om de productie over een jaar te verbeteren middels betere lichtbenutting.

Productie en energie

In de huidige teeltwijze liggen de gewasrijen vrij dicht bij elkaar (meestal 1.50 - 1.60 m van hart tot hart), en daardoor valt veel licht op de toppen van de planten en dringt weinig licht door tot de lagere bladniveaus. Hierdoor is de fotosynthese in de lagere bladlagen gering. Wanneer dit continu het geval is, verouderen de onderste bladeren snel en gaat hun fotosynthesecapaciteit achteruit. Maar ondanks het lage lichtniveau is de verdamping in de onderste bladlagen van het gewas niet onaanzienlijk, en dit kost energie.

Verlaging van de LAI zal helpen om meer licht bij de onderste bladeren van het gewas te krijgen (zie bijvoorbeeld Heuvelink *et al.*, 2005). Dit zal de fotosynthese en fotosynthesecapaciteit van de onderste bladeren ten goede komen. Het zal ook de verdamping verlagen en daardoor energie besparen (Dueck *et al.*, 2005). Deze gewenste effecten kunnen mogelijk bereikt worden door aanpassingen van de rijstructuur.

Optimalisatie

Verbreiding van de paden of verminderen van de bladmassa heeft als risico dat de totale lichtabsorptie en dus fotosynthese van het gewas afneemt. Dit nadeel weegt niet op tegen de voordelen. Het is dus zaak om het optimum te vinden. Wellicht moet er onderscheid gemaakt worden tussen natuurlijk licht en assimilatiebelichting. De huidige discussies in de praktijk over padbreedte zijn geïnitieerd door belichtende telers).

Doelstellingen

Technische doelstellingen. De doelstelling van dit project is het verhogen van de productie, kwaliteit en energie-efficiëntie van een tomatenteelt door optimaliseren van de rijstructuur. Hiertoe is een proef uitgevoerd met verschillende rijstructuren verkregen door verschillende wijzen van tussenplanten of bijplanten.

Energiedoelstellingen. Een van de doelstellingen is energiebesparing. Dit zal worden bereikt door aanpassing van de rijstructuur, wat leidt tot minder blad en minder verdamping en daardoor energiebesparing.

Proefnemers

De proef vond plaats bij het Improvement Centre in Bleiswijk. Medewerkers van het IC zorgden voor de teelthandelingen, oogst- en plantwaarnemingen en initiële dataprocessing. De metingen aan licht, fotosynthese en bladhoeken, evenals dataverwerking en rapportage werden gedaan door medewerkers van WUR-glastuinbouw.

Substraattest

Behalve naar het effect van de rijstructuur werd ook gekeken naar het effect op productie van twee substraten, namelijk kokosmatten type 'Profit' van Van der Knaap, en steenwolmat type 'Master Dry' van Grodan. Zie Bijlage I voor ligging van de proefvelden van deze twee substraten.

2 Materiaal & methoden

2.1 Kas, gewas en teelt

Plant materiaal

Geënte tomatenplanten (trostomaat, ras Aranca) werden op 11 oktober 2006 (week 41) geplant. Ze waren gezaaid op 7 september 2006 en opgekweekt door plantenkweker de Merel in De Lier bij 18 °C dag en nacht en 500 ppm CO₂. De planten werden geleverd op duoblokken en werden geplant op goten met steenwol matten met een breedte van 20 cm (Grodan, type Expert). Voor aparte beoordeling waren er proefvakken met steenwolmatten (type 'Master Dry' van Grodan) en met kokossubstraat (type 'Profit' van Van Der Knaap). Zie indeling kasafdeling in Bijlage I.

Kas en plantsysteem

De proef is uitgevoerd in kasafdeling 11 van het Improvement Centre in Bleiswijk. De rijrichting is noordoost-zuidwest georiënteerd. De kasbreedte is 28.8 m (3 x 9.60 m) en lengte is 35 m (7 vakken van 5 m). Het bruto kasoppervlak is 1008 m² en het netto teeltoppervlak is 910 m². Poothoogte is 6,7 m. De lichttransmissie van de kassen is circa 62 %. Er is een energiescherm van SLS 10 Ultra Plus en een verduisteringsscherm van Revolux 95 %. Het SLS 10 Ultra Plus scherm laat 81 % van diffuus licht door en 88 % direct licht, en diffundeert het directe licht. Er zijn 3 vakken met elk 6 rijen, waarbij ieder vak dient als een behandelingseenheid. Zie kasindeling in Bijlage I.

Er werd geteeld in hangende goten (Formflex, 30 cm breed), opgesteld op 80 cm hoogte. De gewasdraad zat op 3.75 m hoogte, en werd verhoogd naar 4.6 m in week 11 (ca 9 maart). De rijafstand was 1,6 m en de afstand tussen de planten in een rij bedroeg 53 cm.

Teeltcondities

Temperatuur en luchtvochtigheid werden standaard geregeld. Belichting gebeurde met 1000 Watt lampen aan de tralie, met een lichtintensiteit van 131 μmol/m²/s¹ (ca 10.000 lux). Belichting werd na het planten langzaam gestart om een goede gewasopbouw te krijgen, en werd langzaam verhoogd naar behoefte van de plant, tot een maximum van 18 uur per etmaal. Toen het natuurlijk lichtniveau toenam werd de hoeveelheid assimilatiebelichting afgebouwd. CO₂ werd toegediend met behulp van zuivere CO₂ uit het OCAP net. De streefwaarde voor CO₂ was 1000 ppm bij gesloten luchtramen. Wanneer de ramen geopend werden werd het CO₂ setpoint verlaagd naar 400 ppm. Een Priva Integro klimaatcomputer registreerde elke 5 minuten de setpoints en gerealiseerde klimaatgegevens. Dataverwerking werd gedaan met Excel.

Voor het planten werden de matten volgedruppeld met EC 4.2 en pH 6.1. De planten zijn direct op het plantgat geplant. Na het planten zijn de matten 40 % ingeteerd om het gewas generatief te sturen. Na deze periode werd het vochtgehalte van de mat licht verhoogd. De planten kregen voedingsoplossing toegediend via druppelaars. De samenstelling van de voedingsoplossing werd zonedig aangepast adhv wekelijkse analyses uitgevoerd door het BLGG in Naaldwijk.

Teeltbegeleiding en gewasmanagement

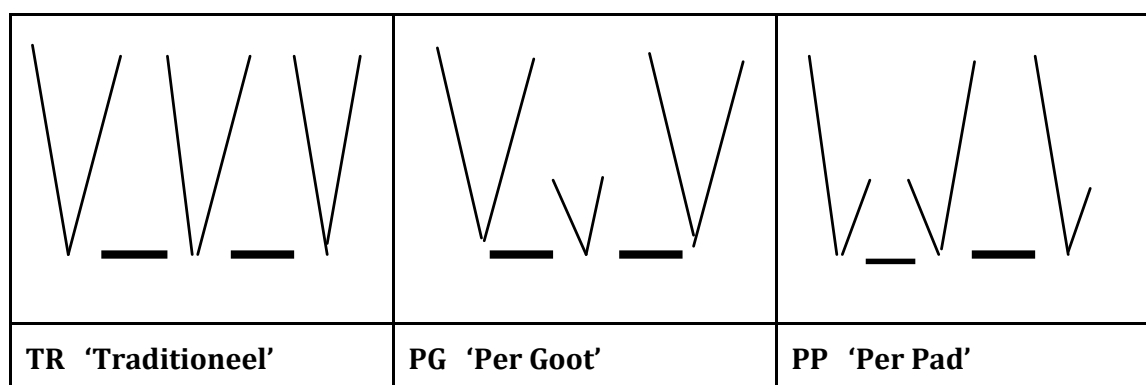
De tomaten werden geteeld conform de praktijk en onder begeleiding van teeltbegeleiders. Eén of meerdere teeltbegeleiders bezochten de proef wekelijks tot half maart 2007, daarna tweewekelijks. Hier werden de teelt, voortgang en resultaten besproken. Om virusvrij te telen zijn een aantal maatregelen genomen: de kasafdelingen werden alleen betreden door mensen die er moesten werken; het was verplicht jassen/pakken, handschoenen en schoenhoezen te dragen in de kasafdelingen. Tijdens het experiment werd het gewas regelmatig getest op het voorkomen van virussen.

Voor bestuiving werden hommels ingezet. De hommelmasten werden geopend tussen 10:00 uur en 14:00 uur. Alle trossen werden gesnoeid op 8 of 9 vruchten, afhankelijk van de rijpingsnelheid en vruchtgewicht. Blad onder de afrijpende trossen werd geplukt conform de praktijk.

2.2 Behandelingen - rijstructuren

Doel van dit project was te onderzoeken wat het effect is van de rijstructuur op de lichtverdeling en lichtbenutting (fotosynthese) van een tomatengewas, en de effecten daarvan op de productie. Tevens werd gekeken of de bladstand en de fotosynthesecapaciteit van de bladeren zich aanpassen aan wijzigende lichtverdeling. De proef werd opgezet als 3 achtereenvolgende teelten. Teelt 1 werd geplant in week 41 en diende alleen om het systeem op te starten. Teelt 2 werd tussengeplant in week 5, en geteeld in de zomer. Teelt 3 werd geplant in week 36, en geteeld in de herfst. In teelt 2 en 3 werden drie varianten van tussenplanten toegepast, welke resulteerden in verschillende rijstructuren. De varianten zijn:

1. TR 'Traditioneel': de standaard manier van tussenplanten, als controle
2. PG 'Per Goot': alle planten in één goot worden verwijderd (dus planten tussen 2 paden verwijderd)
3. PP 'Per Pad': alle planten in één rij van een goot worden verwijderd, aan beide kanten van een pad



Figuur 1. Vereenvoudigde weergave van de drie behandelingen (rijstructuren) in teelt 2 (zomerteelt) en teelt 3 (herfstteelt). Voor details zie Figuur 6.

TR (Traditioneel). Bij de traditionele manier van tussenplanten wordt op een bepaald moment de kop uit het gewas gehaald. Ook wordt wat extra blad verwijderd van dit oude gewas, zodat meer licht naar beneden kan doordringen. Men laat dit getopte gewas geleidelijk zakken terwijl het wordt afgeogst. Deze 'oude' planten hebben geen aangroei meer aan de bovenkant, en door het laten zakken komt de top van deze planten steeds lager te hangen. Op een bepaald moment worden tussen het oude gewas weer jonge plantjes geplant, die vervolgens opgroeien langs het oude gewas. Het duurt ongeveer 8 weken totdat het jonge en oude gewas op gelijk niveau gekomen zijn. Als het oude gewas leeg geogst is, wordt het weggehaald zodat het jonge gewas alle ruimte heeft. De stengeldichtheid was 2,1 en was steeds vergelijkbaar tussen de drie behandelingen. De data/weeknummers van tussenplanten en andere aanpassingen zijn vermeld in Tabel 1 en Figuur 5.

PG (Per Goot). In de praktijk wordt voor dit systeem één goot beplant en de tussenliggende goot aanvankelijk leeg gehouden. Voor dit experiment is een valse start gemaakt (zie hieronder). Dit hield in dat aanvankelijk alle goten werden beplant, maar na een aantal weken is van een teeltgoot de kop uit de planten gehaald bij tros 4. In de teeltgoot daarnaast zijn scheuten bijgemaakt om een gelijk aantal stengels per m² te behouden. Later zijn de oude (gekopte) planten verwijderd, en zijn op die goten jonge planten geplaatst. Dit wordt soms 'tussenplanten' genoemd, maar eigenlijk is 'bijplanten' een betere term.

PP (Per Pad). In de praktijk wordt bij deze methode een pad leeg gehouden terwijl in een ander pad geplant wordt met het dubbele aantal stengels, om het aantal stengels per m² gelijk te houden. In het lege pad worden later jonge planten geplant. In dit onderzoek werd een 'valse start' gemaakt (zie hieronder), nl dat in het begin alle goten werden beplant. Na een aantal weken zijn de planten omgehangen naar 1 gewasdraad, zodat er een vrij pad gecreëerd werd.

Valse start. Alle planten zijn op 11 oktober 2006 geplant (week 41) voor teelt 1. Heel de kas is geplant met 1 plantsysteem op alle goten. Na een aantal weken zijn de 3 rijstructuren aangebracht zoals boven beschreven. Daartoe moest bij systeem PG ('per goot') en PP ('per pad') het een en ander worden aangepast. Na deze aanpassingen werd de proef gestart. De proef betrof dus alleen teelt 2 en 3.

Tabel 1. geeft een verkort overzicht gegeven van de teeltmaatregelen die invloed hadden op de rijstructuur. Teelt 1 diende voor opstarten. De echte proef begon in week 5.

Tabel 1. Overzicht van de teeltmaatregelen per behandeling vanaf week 41 van 2006 t/m week 44 van 2007. Tussen haakjes staat het nummer van de teelt [1, 2 of 3]

Week nr	Behandeling		
	TR (Traditioneel)	PG (Per Goot)	PP (Per Pad)
41	Eerste planting [1]	Eerste planting [0+1]	Eerste planting [0+1]
45		Kop eruit [0]	Kop eruit [0]
50	Eerste oogst [1]	Eerst oogst [0+1]	Eerst oogst [0+1]
3		Gewas gesloopt [0]	Gewas gesloopt [0]
5	Tussenplanting [2]	Tussenplanting [2]	Tussenplanting [2]
11	Gewasdraad naar 4.6 m	Gewasdraad naar 4.6 m	Gewasdraad naar 4.6 m
12	Laatste oogst [1] Gewas gesloopt [1]		
14	Eerst oogst [2]	Eerst oogst [2]	Eerst oogst [2]
26		Kop eruit [1]	Kop eruit [1]
34	Kop eruit [2]		
35		Laatste oogst [1]	Laatste oogst [1]
36	Tussenplanting [3]	Kop eruit [2] Tussenplanting [3]	Kop eruit [2] Tussenplanting [3]
42	Laatste oogst [2]		
44		Laatste oogst [2]	Laatste oogst [2]



*Figuur 2a. (links): teeltsysteem Traditioneel (TR), gekopt; op de achtergrond de hoge planten van teeltsysteem PG
Figuur 2b. (rechts): laten zakken gebeurde op de standaard manier*



Figuur 3a. Teeltsysteem Per Pad (PP), kort na bijplanten



Figuur 3b. Teeltsysteem Per Goot (PG), kort na bijplanten



Figuur 3c. Teeltsysteem PP, laten zakken oude planten



Figuur 3d. Teeltsysteem PG



Figuur 3e. Teeltsysteem PP in transitiefase

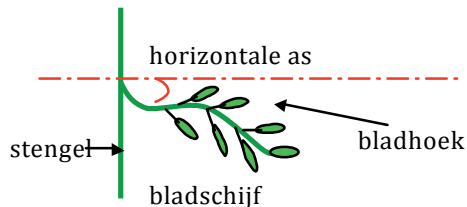


Figuur 3f. Teeltsysteem PG, na koppen tijdens afoogsten

2.3 Metingen

2.3.1 Bladhoekmetingen

Bladhoek dient als input variabele voor het radiosity model (een model om het effect van rijstructuur op de jaarrond productie te berekenen). Bladhoek is de hoek tussen de bladsteel en de horizontaal (zie Figuur 4). De bladhoeken zijn gemeten met de Polhemus Digitizer, op 5 dagen (11, 17, 24 en 31 juli en 7 augustus 2007) en op 3 hoogtes in het gewas.



Figuur 4. Schematische voorstelling van de bladhoek

2.3.2 Lichtmetingen

Inleiding

De belangrijkste reden om de rijstructuur te willen aanpassen is het verbeteren van productie door verbetering van de lichtonderschepping. Lichtmetingen worden gedaan om deze lichtonderschepping te kwantificeren. Deze worden ook ingevoerd in het radiosity model (zie boven).

Lichtmeettechniek

De lichtintensiteit in het gewas is gemeten met behulp van een line sensor met PAR sensoren aan de bovenzijde (SunScan Canopy Analysis System, Delta-T Devices Ltd, Cambridge, Verenigd Koninkrijk). De sensor was afgeplakt op een lengte van 80 cm, wat overeenkomt met de halve afstand tussen twee rijen (de hele afstand is 160 cm van hart tot hart). De lichtdoordringing in het gewas werd berekend als percentage van een referentiemeting, die boven het gewas was gelegen. Metingen zijn uitgevoerd in de drie rijstructuren (TR, PG en PP). De resultaten zijn uitgedrukt als lichtonderschepping ofwel als lichtinterceptie, beide in %, waarbij geldt:

$$\text{lichtonderschepping (\%)} = 100 \% - \text{lichtintensiteit (\%)}$$

Zowel lichtintensiteit als lichtonderschepping zijn 'relatief', namelijk is als percentage van de referentie lichtmeting boven het gewas.

De lichtmetingen werden uitgevoerd op verschillende momenten in de teelt, vooral tijdens de transitie van de rijstructuur, nl in midden februari en eind maart en opnieuw in juli-augustus. Er werden ook lichtmetingen verricht bij lamplicht onder een gesloten energiescherm (SLS 10 Ultra Plus). Dit laat 81 % van diffuus licht door en 88 % van direct licht, en diffundeert alle directe straling. Lichtmetingen bij lamplicht vonden plaats vóór maart, om te voorkomen dat het zonlicht een te grote rol ging spelen.

Meetlocaties

Er is licht gemeten in alle 3 de behandelingen, in 2 rijen op 2 plaatsen, gelegen in het midden van het behandelingsveld. De lichtmeter werd horizontaal gehouden op exacte hoogtes en meetlocaties: vanaf precies midden in het pad tot precies midden in de rij, en dan weer vanaf midden in de rij tot midden in het pad, en dit twee maal. In Figuur 6. zijn de posities van de lichtmetingen aangegeven met horizontale rode lijntjes. De metingen werden gemiddeld tot één waarde. Op ieder locatie is op 11 hoogtes gemeten: onderin op iedere 50 cm hoogte, en meer naar boven op iedere 25 cm hoogte, plus een nulmeting op de draad of op de tralie. De nulmeting (referentiemeting) is in 5-voud uitgevoerd; de andere metingen waren in enkelvoud. De verschillende meetdagen worden apart besproken.

2.3.3 Bladfotosynthesemetingen

Inleiding

Tijdens de transitie van teelt 1 naar teelt 2, en van teelt 2 naar teelt 3 veranderde de rijstructuur vanwege het koppen, laten zakken en afoogsten van het oude gewas en tegelijkertijd tussenplanten (bijplanten) van het jonge gewas. Zie schematische weergave in Figuur 6. Tijdens deze transitieperiodes zijn metingen gedaan om te zien of er veranderingen optreden in fotosynthese, fotosynthesecapaciteit en verdamping, mn onderin het gewas. Verondersteld wordt dat het blad onder in het gewas geacclimatiseerd was aan minder licht, en dat dit blad in de transitieperiode weer kon aanpassen aan de nieuwe (verbeterde) lichtomstandigheden onder in het gewas.

Bladfotosynthese gemeten bij het heersende lichtniveau geeft de actuele fotosynthese. Bladfotosynthese gemeten bij vaste hoge lichtniveaus is een maat voor de fotosynthesecapaciteit (de maximaal mogelijke fotosynthese). Bladfotosynthese gemeten bij een reeks van lichtniveaus geeft een lichtresponscurve.

Fotosynthese - lichtresponscurve

Lichtresponscurves zijn gemeten met een LiCor-6400. De netto fotosynthese is gemeten bij 8 verschillende lichtniveaus in de bladkamer (0, 90, 230, 465, 700, 930, 1160, 1400 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PAR) met 700 ppm CO_2 en relatieve luchtvochtigheid 80 % in de bladkamer. Hiermee werden veranderingen in fotosynthese en ook in stomataire geleidbaarheid en transpiratie in kaart gebracht bij de verschillende rijstructuren.

Lichtresponscurves zijn gemaakt tijdens drie intensieve meetcampagnes. Het tijdstip van meten was direct na het koppen en/of tussenplanten (dus bij het begin van inzakken), en wanneer het oude en tussengeplante gewas op gelijke hoogte kwamen (halverwege de transitie), en vervolgens ook toen het nieuwe gewas aan de draad was (tegen het einde van afoogsten). Het aantal gemaakte fotosynthesecurves bedraagt 108, namelijk voor 3 behandelingen x 3 meetcampagnes x 2 hoogtes in het gewas x 6 planten.

Fotosynthese en fotosynthesecapaciteit

De fotosynthesecapaciteit van individuele bladeren werd gemeten met een draagbare fotosynthesemeter (LCpro+, ADC, Hoddesdon, Verenigd Koninkrijk) met een bladkamer van 6.25 cm^2 . Actuele fotosynthese en fotosynthese capaciteit werden tegelijkertijd gemeten (met 2 ADCs) om een relatie tussen beide te kunnen vaststellen. Dit is gedaan op twee hoogtes in het oude gewas van de eerste teelt.

In de bladkamer van de ADC meter stroomde lucht met een constante snelheid langs het blad. Uit het verschil van de hoeveelheid CO_2 van de ingaande en uitgaande lucht wordt de netto fotosynthese berekend. De condities in de bladkamer werden ingesteld: CO_2 concentratie in de bladkamer op 700 ppm; temperatuur op 21 °C bij metingen in de winter en op 28° C bij metingen in de zomer. De relatieve luchtvochtigheid van de uitgaande lucht was circa 85 %. Voor fotosynthesecapaciteit werd met een externe lichtbron 465 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ op het blad gegeven. Er werd gemeten bovenin het gewas aan het topblaadje van het zesde samengestelde blad geteld vanaf de top. Dit is een bijna volgroeid blad, dat niet beschaduwd wordt door bovenliggende bladeren. Bij metingen op twee hoogtes werd gemeten aan blad 6 (hoog in het gewas) en blad 18/19 (onderin het gewas).

2.3.4 Productiewaarnemingen

Trossen werden geplukt wanneer de laatste vrucht van de tros was doorgekleurd. Normaal werd er 2 keer per week geoogst, en soms 2 keer per tien dagen, afhankelijk van de stand van het gewas. Het gemiddeld vruchtgewicht werd bepaald door vruchten te tellen en wegen.

2.4 Overzicht gewasaanpassingen en metingen

De proef omvatte veel aanpassingen aan de rijstructuur en veel metingen. In onderstaande tabel staat links de datum, en dan voor de drie behandelingen het weeknummer gevolgd door de aanpassing en/of meting in die week.

Tijdstippen van aanpassingen aan de rijstructuren en data van metingen

Behandeling: TR, traditioneel (tralie 1)

PG, Per Goot (tralie 2)

PP, Per Pad (tralie 3)

Datum	weeknummer		weeknummer		weeknummer	
2006						
8 okt	41	Eerste planting: 1,05 st/m ²	41	Eerste planting: 1,05 st/m ²	41	Eerste planting: 1,05 st/m ²
15 okt	42	2,1 st/m ²	42	2,1 st/m ²	42	2,1 st/m ²
22 okt	43		43		43	
29 okt	44		44		44	
5 nov	45		45	Helft goten gekopt ...	45	Helft goten gekopt ...
12 nov	46		46	... andere helft extra koppen	46	... andere helft extra koppen
19 nov	47		47	... 2,1 st/m ²	47	... 2,1 st/m ²
26 nov	48		48		48	
3 dec	49		49		49	
10 dec	50	Eerste oogst teelt 1	50	Eerste oogst teelt 1	50	Eerste oogst teelt 1
17 dec	51		51		51	
24 dec	52		52		52	
2007						
1 jan	1		1		1	
6 jan	2		2		2	
13 jan	3		3	Productie stopt, helft gewas gesloopt	3	Productie stopt, helft gewas gesloopt
20 jan	4		4		4	
27 jan	5	Tussenplanten teelt 2: 1,05 st/m ²	5	Tussenplanten teelt 2: 1,05 st/m ²	5	Tussenplanten teelt 2: 1,05 st/m ²
3 feb	6		6		6	
10 feb	LM 7	2,1 st/m ² (teelt 2). Gem. 4,2 st/m ²	LM 7	2,1 st/m ² (teelt 2). Gem. 4,2 st/m ²	LM 7	2,1 st/m ² (teelt 2). Gem. 4,2 st/m ²
17 feb	8	LM = Lichtmetingen 12 & 13 feb	8	LM = Lichtmetingen 12 & 13 feb	8	LM = Lichtmetingen 12 & 13 feb
24 feb	9		9		9	
2 mar	10		10		10	
9 mar	11	Draad verhoogd	11	Draad verhoogd	11	Draad verhoogd
16 mar	12	Laatste oogst & ruimen teelt 1	12		12	
23 mar	13		13		13	
30 mar	LM 14	Eerste oogst teelt 2	14	Eerste oogst teelt 2	14	Eerste oogst teelt 2
6 apr	15		15		15	
13 apr	16		16		16	
20 apr	17		17		17	
27 apr	18		18		18	
4 mei	19		19		19	
11 mei	20		20		20	
18 mei	21		21		21	
25 mei	22		22		22	
1 jun	23		23		23	
8 jun	24		24		24	
15 jun	25		25		25	
22 jun	26		26	Koppen teelt 2	26	Koppen teelt 2
29 jun	27	FT	27	FT	27	FT
6 jul	28	LM, BM	LM 28	LM, BM	LM 28	LM, BM
13 jul	29	LM, BM	LM 29	LM, BM	LM 29	LM, BM
20 jul	30	LM, BM, FT	LM 30	LM, BM, FT	LM 30	LM, BM, FT
27 jul	31	LM, BM	LM 31	LM, BM	LM 31	LM, BM
3 aug	32	LM, BM	LM 32	LM, BM	LM 32	LM, BM
10 aug	33	LM, FT	LM 33	LM, FT	LM 33	LM, FT
17 aug	LM 34	Koppen teelt 2	LM 34	LM	LM 34	LM
24 aug	35		35	Laatste oogst teelt 2	35	Laatste oogst teelt 2
31 aug	36	Tussenplanten teelt 3, 2,1 st/m ²	36	Tussenplanten teelt 3: 2,1 st/m ² & koppen teelt 2	36	Tussenplanten teelt 3: 2,1 st/m ² & koppen teelt 2
7 sep	37		37		37	
14 sep	38		38		38	
21 sep	39		39		39	
28 sep	40		40		40	
5 okt	41		41		41	
12 okt	42	Laatste oogst teelt 2	42		42	
19 okt	43		43		43	
26 okt	44		44	Laatste oogst teelt 3	44	Laatste oogst teelt 3

LM = Lichtmetingen (12 & 13 feb, en 2 juli tot 22 aug)

BM = bladhoekmeting (11 juli tot 4 aug)

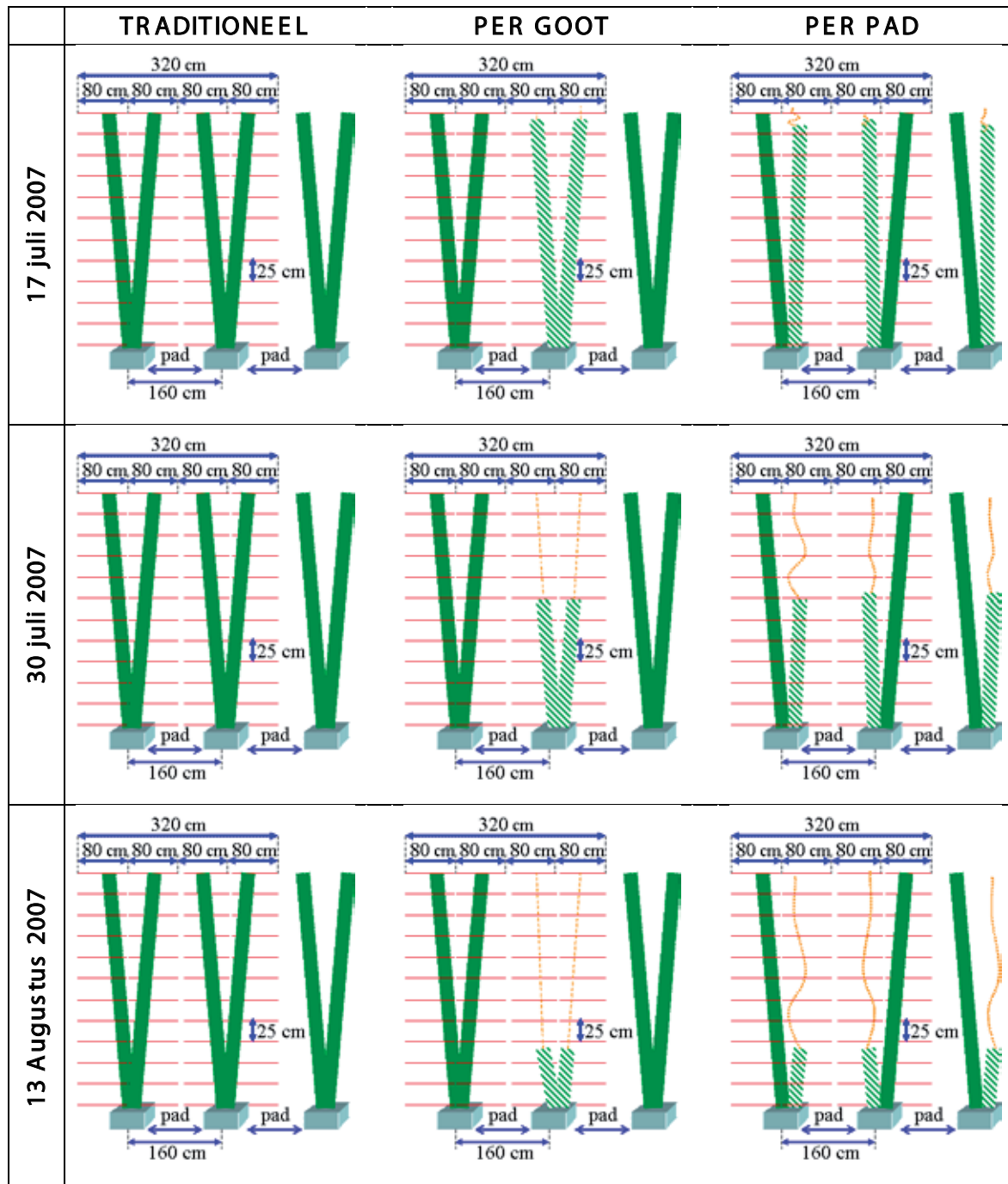
FT = fotosynthesemetingen (week 27, 30, 33)

Figuur 5. Tijdstippen van aanpassingen aan de rijstructuur en data van metingen in de drie behandelingen en drie achterevolgende teelten

3 Resultaten

3.1 Rijstructuren en stengelhoogtes

Alvorens resultaten van lichtmetingen en fotosynthese te presenteren volgt hier eerst een schematisch overzicht van de rijstructuren en hoogtes van de plantenstengels in juli-augustus. Zie ook schema in Figuur 5.

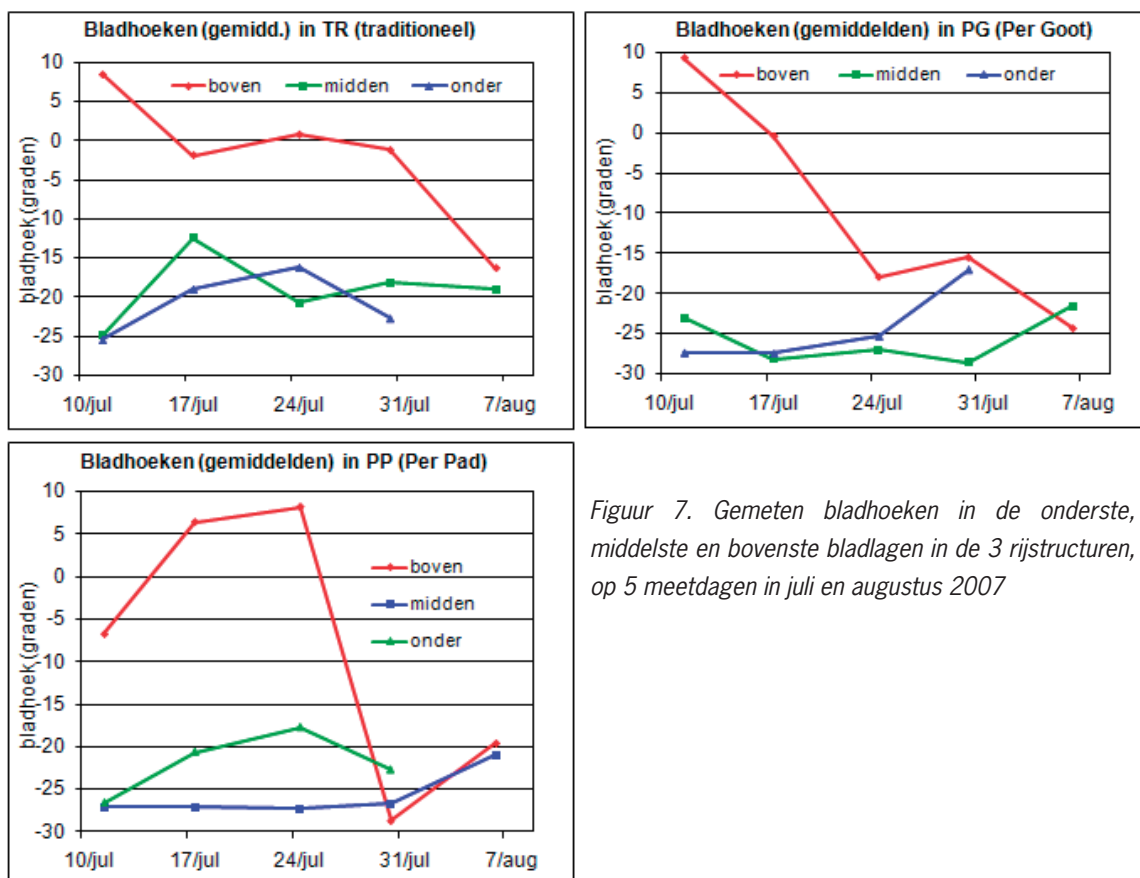


Figuur 6. Schets van de rijstructuren tijdens de lichtmetingen in juli-augustus. De rode horizontale lijntjes markeren de plaatsen waar lichtmeters werden gehouden

3.2 Bladhoek

De bladhoek werd regelmatig gemeten tijdens de transitieperiode in de 3 rijstructuren op 5 dagen (11, 17, 24 en 31 juli en 7 augustus 2007) gemeten in de tussengeplante planten (teelt 2). Deze waren toen 23 tot 27 weken oud en de planten in PG en PP waren pas gekopt. In behandeling TR was niets veranderd in de weken voorafgaand aan de bladhoekmetingen. Ieder punt in de grafiek (Figuur 7.) is een gemiddelde van minstens 38 waarnemingen.

Het bleek dat bij de middelste en onderste bladlagen de bladhoeken weinig veranderden tussen 11 juli en 7 augustus. De bladhoek was hier steeds tussen -30 en -15 graden met de horizon. In deze bladlagen is ook niet een gemeenschappelijke trend te zien in de drie de rijstructuren. De bovenste bladeren vertonen wel veranderingen in bladhoek. Bij TR ging de transitie geleidelijk, bij PG erg snel, en bij PP sprongsgewijs. De topbladeren hadden aanvankelijk een hoek tussen +10 en -5 graden, maar bij de laatste waarneming op 7 augustus is de bladhoek in alle bladlagen ongeveer -20 graden geworden. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de bladeren na een maand hun eindstand bereiken en dat dit -20 graden is.



Figuur 7. Gemeten bladhoeken in de onderste, middelste en bovenste bladlagen in de 3 rijstructuren, op 5 meetdagen in juli en augustus 2007



Figuur 8. Voorbeelden van bladhoeken; links horizontaal (ca 0 graden), rechts naar beneden gebogen (ca. -35 graden)

3.3 Resultaten lichtmetingen

De resultaten van de lichtmetingen worden gerapporteerd per meetsessie (februari, maart, juli-augustus 2007). De figuren geven lichtonderschepping in procenten. Dit is gelijk aan 100 % minus de relatieve lichtintensiteit. Hierbij is relatieve lichtintensiteit gelijk is aan de lichtintensiteit gemeten op een bepaalde hoogte als percentage van de referentie lichtmeting. Lichtmetingen werden gedaan over een breedte van 1,6 m. Dit omvatte een rij en een pad. Wanneer het gewas laag was, werden de metingen op grotere hoogtes gedaan boven het gewas (dus in het 'vrije licht'). Het meetresultaat was dan een hoge gemiddelde lichtintensiteit, en dus een lage lichtonderschepping.

Lichtonderschepping is uitgezet tegen de afstand vanaf de draad (voor februari en maart) of tegen de afstand vanaf de top van de planten (voor juli-augustus). Links in de grafiek staat altijd de lichtmetingen bovenin het gewas, en rechts de metingen onderin het gewas. In februari heeft de x-as heeft aanvankelijk een lengte van 300 cm, en vanaf eind maart een lengte van 400 cm, omdat de gewasdraad werd verhoogd van 375 cm naar 460 in week 11.

3.3.1 Lichtmetingen in februari

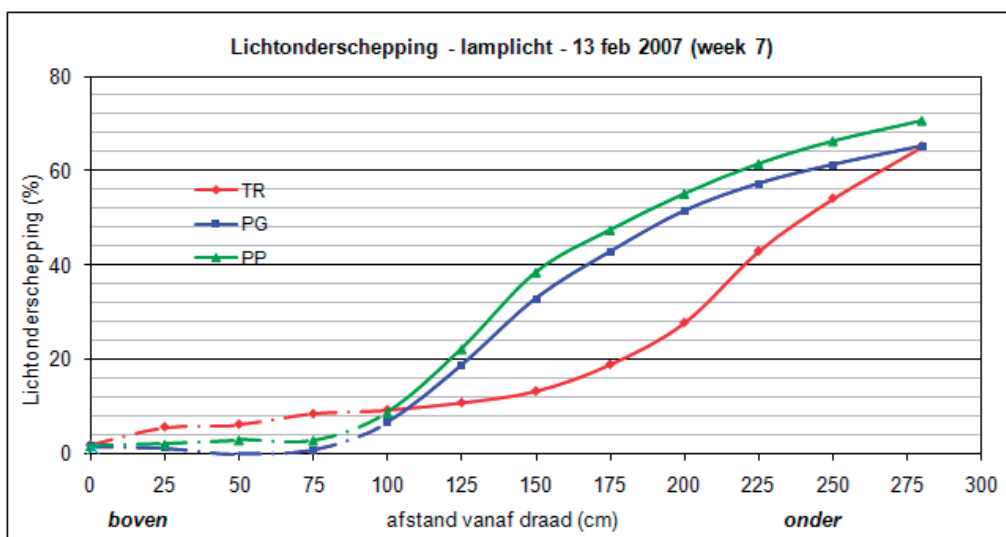
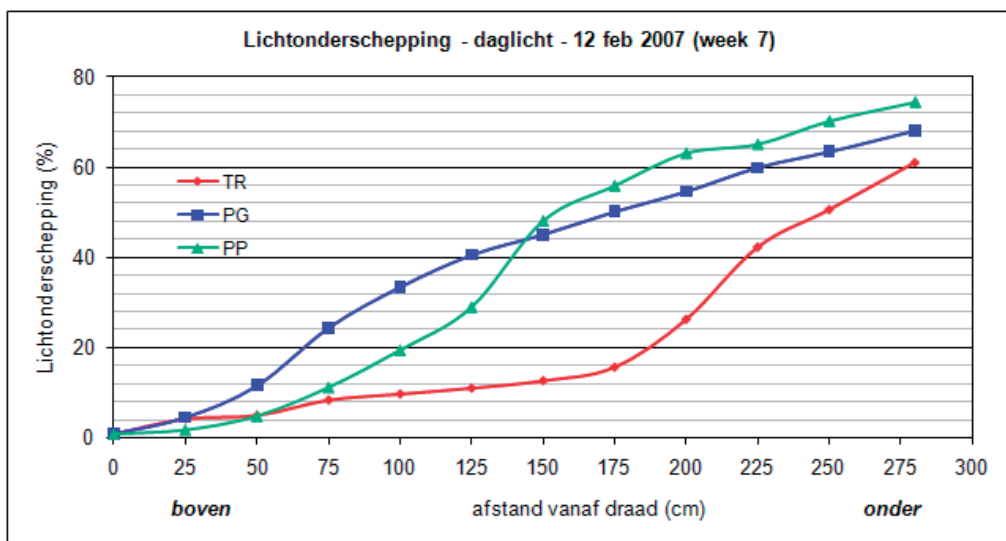
De lichtmetingen van 12 en 13 februari zijn uitgevoerd ca 2 weken na het tussenplanten/bijplanten van teelt 2. De draad hing op 375 cm. Onder de goot zat 80 cm ruimte, zodat er 295 cm zat tussen teeltgoot en draad. Het gewas bestond uit 'oude' planten van teelt 1, en 'jonge' planten van teelt 2 (zie overzicht in Figuur 5.). Hieronder in Tabel 2 staan de hoogte en de afstand tot de draad van de rechter en de linker plantstengel in een plantrij. Dit is voor de verschillende behandelingen (rijstructuren).

Tabel 2. Hoogte van het gewas en locaties van lichtmetingen op 12 en 13 februari 2007

Behandeling	Rij	Locaties	Linker stengel		Rechter stengel	
			hoogte vanaf mat	afstand tot draad	hoogte vanaf mat	afstand tot draad
TR	2	1-4	95	200	95	200
TR	3	5-8	95	200	95	200
PG	8	9-12	265	30	265	30
PG	9	13-16	105	190	105	190
PP	14	17-20	105	190	270	25
PP	15	21-24	195	100	95	200

Uit Tabel 2 volgt dat bij TR de gewashoogte ca 95 cm was. Dit waren de oude planten die getopt waren en naar beneden gelaten, en ook de jonge planten die opgroeiden. Er was nog 200 cm afstand tot de draad. In PG waren de oude planten nog ca 265 cm hoog en kwamen tot 30 cm vanaf de draad, terwijl de jongen planten een hoogte hadden van 105 cm, met nog 190 cm afstand tot de draad. In PP waren de oude planten al wat gezakt: de hoogte van de oude planten was 195, en 100 cm tot de draad, terwijl de jonge planten 105 cm hoog waren met 190 cm tot de draad.

Figuur 9a. toont de resultaten van de lichtmetingen op 12 & 13 februari voor natuurlijk licht. In TR vindt tussen 0 en 200 cm vanaf de draad weinig lichtuitdoving plaats, omdat daar geen blad zit (want de planten zijn maar 95 cm hoog). Ter hoogte van de top van de plant (dwz 200 cm van de draad) begint de lichtonderschepping en loopt dan snel op. In natuurlijk licht en lamplicht werd hetzelfde patroon gevonden. In PG is de helft van de planten 265 cm hoog, en zit 30 cm van de draad. Op die hoogte begint de lichtonderschepping, en neemt dan gestaag toe. In PP is een deel van de planten 195 cm hoog, dus de toppen zitten 95 cm van de draad. Daar begint de lichtonderschepping en neemt dan toe. Lichtonderschepping onder daglicht (Figuur 9a.) is anders dan onder lamplicht (Figuur 9b.). Het verschil wordt verklaard doordat lampen een 'lichtkegel' hebben. Daarom zijn de bovenste 100 cm onder de draad niet relevant, en zijn ze in Figuur 9b. gestippeld. De totale lichtonderschepping (op 275 cm van de draad) is iets hoger voor PP dan voor PG (onder daglicht en lamplicht). TR had nog iets lagere lichtonderschepping dan PG, onder daglicht, maar niet onder lamplicht. De totale lichtonderschepping was 61 - 74 % onder daglicht en 65 - 70 % onder lamplicht. Maw 25-39 % van het licht ging verloren, omdat net tussengeplant was.



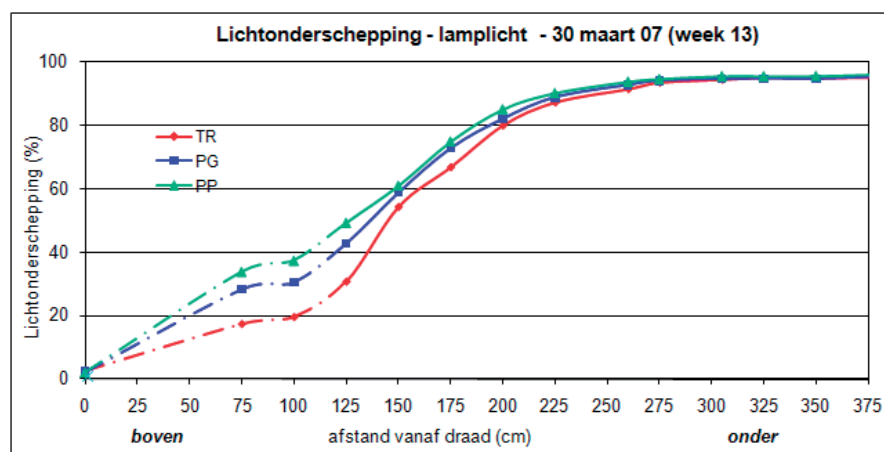
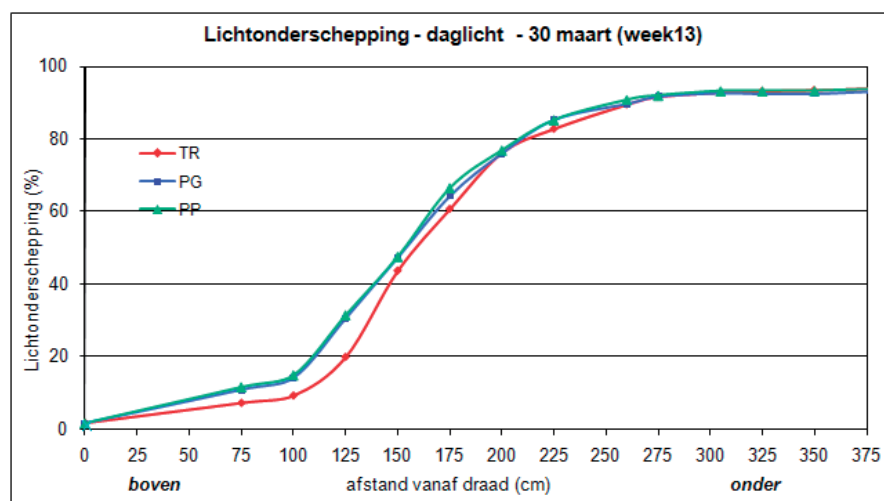
Figuur 9. Lichtmetingen in week 7 (12 & 13 februari 2007) in de 3 rijstructuren, (a) in daglicht met lampen uit en scherm open, en (b) onder lamplicht met lampen aan en scherm dicht

3.3.2 Lichtmetingen in maart

Eind maart was de transitie ongeveer voltooid. De planten van teelt 2 waren veel groter dan in februari, en de planten van teelt 1 waren verdwenen. Ook was juist twee weken daarvoor de draad verhoogd van 375 naar 460 cm hoogte. Met de teeltgoot nog steeds op 80 cm hoogte, was de afstand tussen de teeltgoot en de draad dus ca 380 cm. De lichtmetingen in maart zijn op dezelfde wijze gedaan als die in midden februari. Eerst volgen hier de planthoogtes (Tabel 3.).

Tabel 3. Hoogte van het gewas en locaties van lichtmetingen op 30 maart 2007

	Rij	Locatie	Linker stengel		Rechter stengel	
			hoogte vanaf mat	afstand tot draad	hoogte vanaf mat	afstand tot draad
TR	2	1-4	280	100	280	100
TR	3	5-8	280	100	280	100
PG	8	9-12	295	85	295	85
PG	9	13-16	280	100	280	100
PP	14	17-20	260	120	300	80
PP	15	21-24	300	80	260	120



Figuur 10. Lichtmetingen in week 13 (30 maart 2007) in de 3 rijstructuren, (a) in daglicht met lampen uit en scherm dicht (lichtdoorlatend!), en (b) in lamplicht met lampen aan en scherm dicht

De lichtonderschepping begon op het punt waar de top van het gewas zat: op ca 280 cm boven de teeltgoot, ofwel 100 cm onder de draad (zie Figuur 9a.). Daarna steeg die gestaag tot boven 95 % op 270 cm afstand van de draad (dit is dus onderin het gewas). Van 250 tot 380 cm vanaf de draad blijft het percentage lichtonderschepping constant, op 95 %. Daar zit geen blad, zodat niet meer licht onderschept wordt. De mat zit op 380 cm vanaf de draad.

Bij de metingen onder lamplicht moet opgemerkt worden dat de bovenste metingen gedaan zijn buiten de 'lichtkegel' van de lampen (zie vorige paragraaf). Daarom zijn deze stukken van de curves gestippeld. Er is een verschil in lichtonderschepping in de top van de plant: de lijnen van PG en PP lopen wat hoger dan die van TR (bij daglicht 5 % en bij lamplicht ca 10 %). Dit verschil wordt steeds kleiner tussen 100 en 200 cm van de draad, en is verdwenen onderaan het bladpakket. De totale lichtonderschepping was ca 95 % in alle behandelingen, en onder lamplicht zelfs nog meer. Dat wil zeggen dat slechts een paar procent van het licht niet werd benut. Dit geldt voor alle drie de rijstructuren.

3.3.3 Lichtmetingen in juli en augustus

Juli/augustus was er weer een transitieperiode. De lichtmetingen werden uitgevoerd in het gewas van teelt 2, dat toen volledig volgroeid was. In PG en PP waren de koppen eruit gehaald in week 26, ca 2 weken voor de eerste lichtmeting van 2 juli. Het oude gewas liet men langzaam naar beneden zakken. Zie de rijstructuren ten tijde van deze lichtmetingen in Figuur 6.

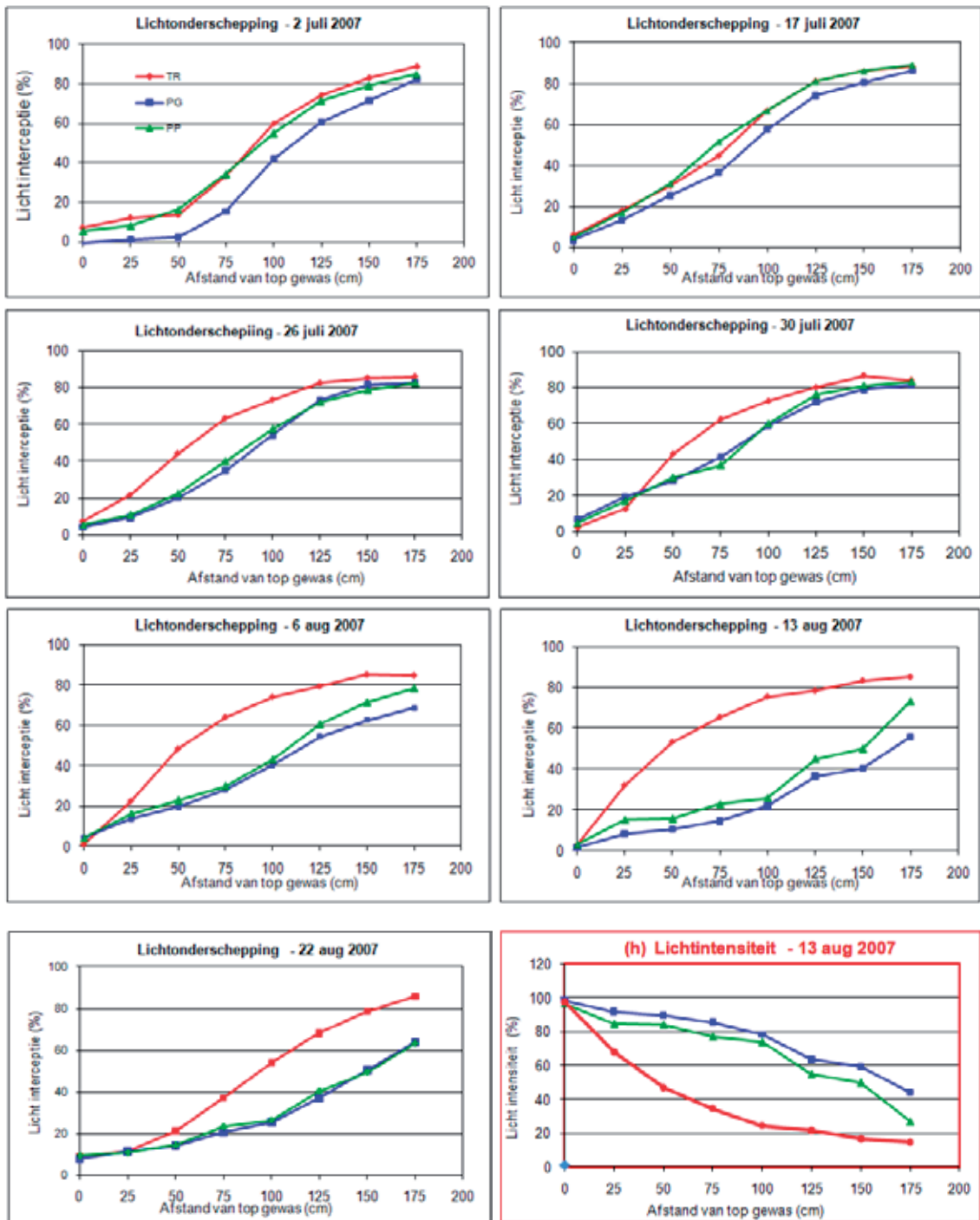
De resultaten van de lichtmetingen van juli-augustus zijn weergegeven in Figuur 11. De eerste 7 grafieken zijn lichtonderschepping en de laatste is relatieve lichtintensiteit, alle in % van de referentie lichtmeting boven het gewas. Hierbij geldt: $\text{Lichtintensiteit (\%)} = 100 \% - \text{lichtonderschepping (\%)}$. In deze reeks metingen is de plaats van de lichtmetingen aangegeven in cm vanaf de kop van het gewas (en niet in cm vanaf de draad).

De lichtcurves vertonen een duidelijke samenhang met de rijstructuren en gewashoogtes. In behandeling TR veranderde er niets aan de rijstructuur (zie Figuur 6., linker kolom), en veranderde dus ook weinig aan de lichtonderschepping (zie de rode lijn in 11). Wel werd de lijn geleidelijk 'boller', dwz dat de lichtonderschepping in de bovenste 150 cm toenam doordat het bladoppervlak toenam.

Bij PG en PR nam de lichtonderschepping in augustus af, en werd vanaf boven minder. Dit viel samen met het geleidelijk laten zakken van de helft van het gewas (zie Figuur 6., midden en rechter kolom). Lichtmetingen werden gedaan over de volle 1.60 m, en wanneer het gewas zakte werd de lichtmeting dus gedeeltelijk boven het gewas in het vrije licht uitgevoerd. Er was geen schaduw van bovenliggende bladlagen, alleen schaduw van de buurplanten.

In het begin (2 juli) en tegen het einde (13 augustus) waren PG en PP iets verschillend, en wel dat PP iets meer licht onderschepte dan PG. Op 22 augustus waren PG en PP weer precies gelijk.

De totale lichtonderschepping lag in juli boven 80 %. Maar op 13 augustus was het gedaald tot 73 % in PP en 56 % in PG, en op 22 augustus was het 63 % in beide. Deze afname kwam doordat de helft van het gewas vrijwel verdwenen was om plaats te maken voor een nieuwe tussenplanting. Direct na de laatste lichtmeting werd teelt 2 geruimd en teelt 3 tussengeplant.



Figuur 11a-g. Lichtmetingen tussen 2 juli (week 27) en 22 augustus (week 34) in de 3 rijstructuren in daglicht. Op de x-as staat afstand vanaf de top van het gewas (niet afstand vanaf de draad), en op de y-as staat lichtinterceptie in % van de referentiemeting. Het oude gewas was getopt in week 26 (eind juni)

Opmerking: Figuur 11h. is de lichtintensiteit in het gewas op de verschillende hoogtes gemeten op 13 augustus. Zie vergelijking met lichtonderschepping op 13 augustus in de grafiek erboven. Lichtintensiteit = 100 % - lichtonderschepping.

3.3.4 Lichtonderschepping - discussie en conclusie

Lichtonderschepping in transitieperiodes

Tabel 4. geeft een overzicht van de totale lichtonderschepping in de rijstructuren zoals gevonden op alle meetdagen. Week 7 (12/13 februari) was midden in de transitieperiode. Teelt 2 was 2 weken tevoren tussengeplant en het oude gewas was aan het zakken. De totale lichtonderschepping lag tussen 60 en 75 % in alle behandelingen, dus 25 - 40 % van het licht ging verloren.

Week 27-34 (van 2 juli tot 22 augustus) was weer een transitieperiode. In PG en PP waren kort ervoor de planten van teelt 2 gekopt, en de helft van de oude planten werd langzaam naar beneden gelaten, om plaats te maken voor een tussenplanting (plantdatum week 36). In PG en PP liep de lichtonderschepping geleidelijk terug: in PG van ca 83 % naar 64 % en in PP van 85 % naar 63 %. Dit is in dezelfde grootte orde als de totale lichtonderschepping in week 7 (68 %). In week 27-34 veranderde er niets in TR, en daar bleef de totale lichtonderschepping redelijk constant op ongeveer 89-86 %.

In PG werd eenmalig een lichtonderschepping van 55 % gemeten; dit is afwijkend en kan berusten op een meetfout.

Niet-transitie periode

In week 13 (30 maart) waren de gewassen volgroeid en meer dan 280 cm hoog. De totale lichtonderschepping was toen meer dan 93 % in alle behandelingen, en onder lamplicht zelffotosynthese iets hoger. Slechts een paar procent van het licht ging verloren, en verbetering is nauwelijks mogelijk.

Eind augustus was weliswaar ongeveer het einde van een transitieperiode, maar toen waren de gewassen in PG en PP maar voor de helft aanwezig als volgroeide gewassen. De lichtonderschepping was daarom slechts 63 %.

Tabel 4. Totale lichtonderschepping (door het hele gewas) in alle 3 de rijstructuren in alle meetsessies in de verschillende meetperiodes

week	lichtbron	fase	TR	PG	PP	beste	PP - PG
7	daglicht	transitie	61.2	68.1	74.4	PP	6.3
7	lamplicht	transitie	65.1	65.1	70.6	PP	5.5
13	daglicht	hoog	94.1	93.1	93.8	TR	0.7
13	lamplicht	hoog	95.3	95.4	96.2	gelijk	0.8
27	daglicht	transitie	89.0	82.5	85.0	TR	2.5
29	daglicht	transitie	88.5	86.4	89.1	PP	2.6
30	daglicht	transitie	85.7	82.3	82.6	TR	0.3
31	daglicht	transitie	86.6	81.4	83.2	TR	1.8
32	daglicht	transitie	84.9	68.5	78.1	TR	9.6
33	daglicht	transitie	85.1	55.7 ?	73.0	TR	17.4 ?
34	daglicht	transitie	85.7	63.7	63.1	TR	-0.7

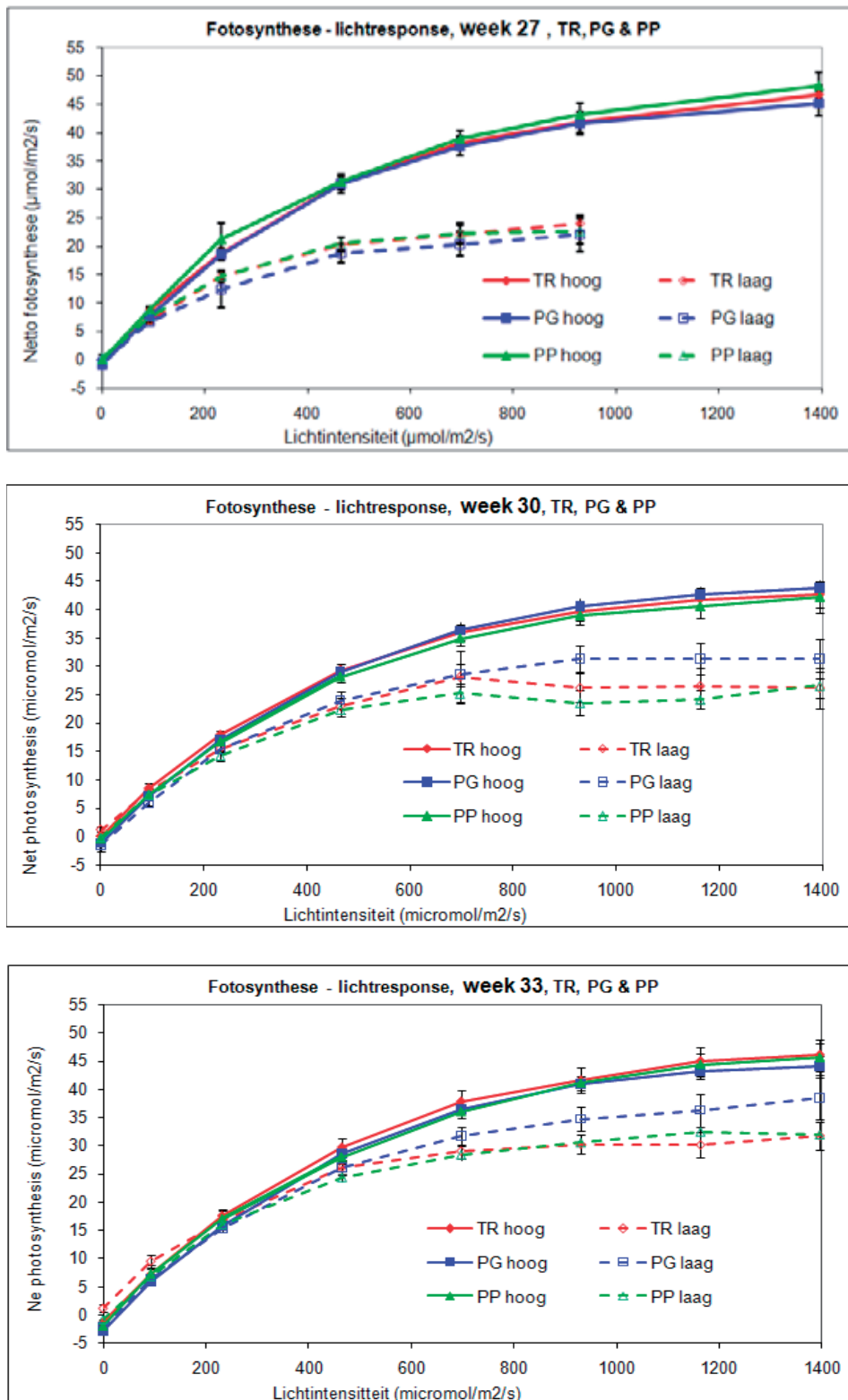
Vergelijking rijstructuurbehandelingen

Behalve in week 7, had TR bijna altijd de hoogste lichtonderschepping (zie Tabel 4.). In TR waren geen aanpassingen aan de rijstructuur gemaakt, terwijl in PP en PG de planten waren gekopt. In de laatste kolom van Tabel 4 worden de twee alternatieve rijstructuren (PG en PP) vergeleken, en het verschil in lichtonderschepping tussen PP en PG wordt gegeven in procenten (zie laatste kolom). Het verschil was rond 6 % in week 7, en later meestal een paar procenten. Verder was er een afwijkende meting in week 33.

Samengevat was in de transitieperiodes de lichtonderschepping het hoogste bij TR, en had PP iets hogere lichtonderschepping dan PG, terwijl in het volgroeide gewas er geen duidelijke verschillen waren.

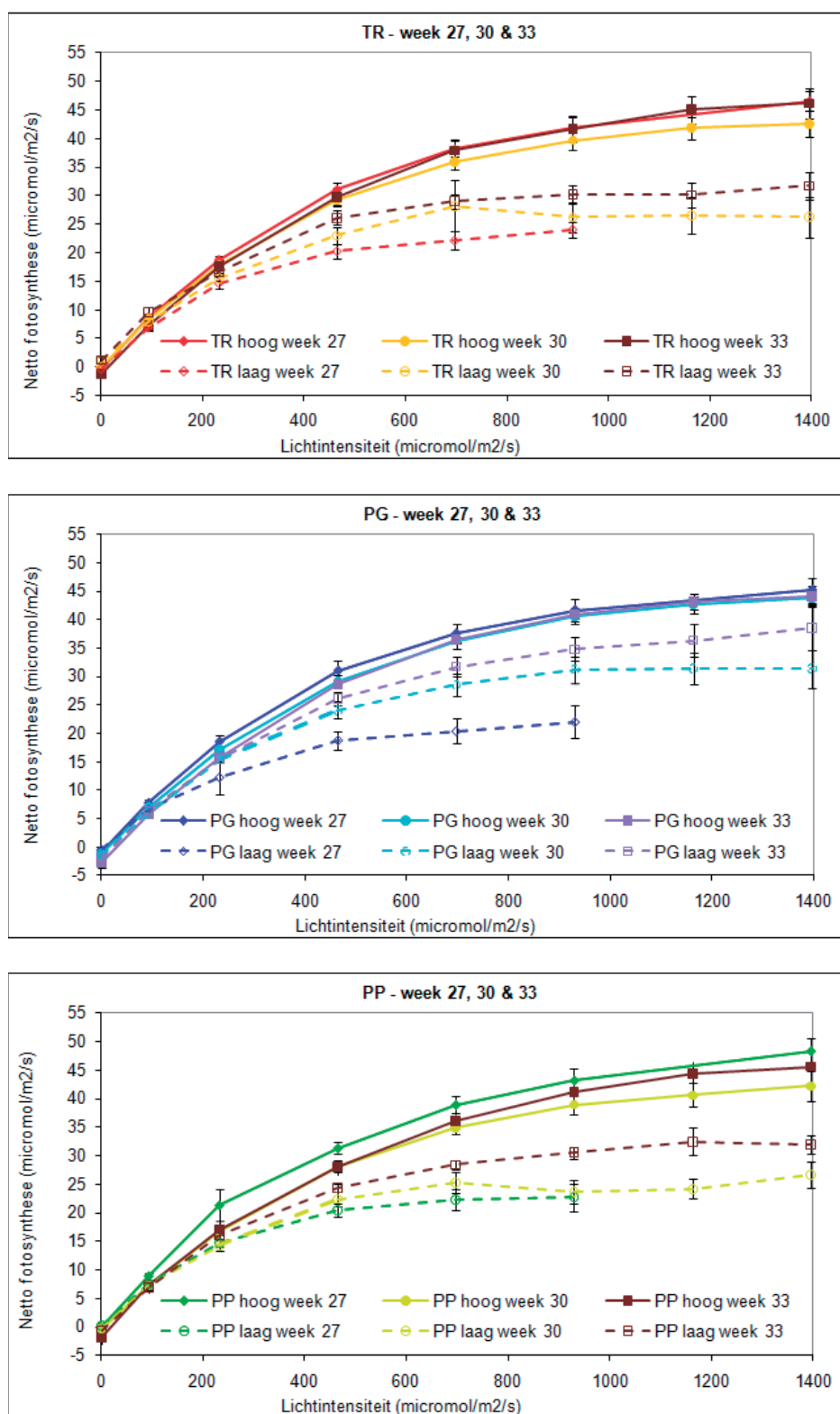
3.4 Bladfotosynthese

3.4.1 Lichtresponsecurve



Figuur 12. Lichtresponsecurves in week 27-28, 30 en 33, in drie behandelingen en twee hoogtes in het gewas: 'hoog' = zesde samengestelde blad geteld vanaf de top; 'laag' = blad 18 of 19 vanaf de top. Omstandigheden: (a) Week 27/28, (b) week 30, (c) week 33. Omstandigheden: $\text{CO}_2 = 700 \text{ ppm}$, temperatuur = 27-28 °C, $n=5$ of 6

3.4.2 Bladfotosynthese – lichtresponse – ontwikkeling in de tijd



Figuur 13. Fotosynthese - lichtresponsecurves op twee hoogtes in het gewas. Zelfde data als in Figuur 12., maar geplot per behandeling. (a) Traditionele rijstructuur (TR); (b) rijstructuur Per Goot (PG); (c) rijstructuur Per Pad (PP)

3.4.3 Bladfotosynthese - bespreking van de resultaten

Bladfotosynthese werd gemeten in alle drie de behandelingen, op twee hoogtes, en verspreid in de tijd (week 27/28, 30 en 33), onder gelijke omstandigheden: $\text{CO}_2 = 700$ ppm, temperatuur = 27-28 °C. Licht werd aan het blad toegediend door de lichtbron in de fotosynthesemeter over een traject 0 – 1400 micromol/m²/s.

De lichtresponsecurves in Figuur 12. en Figuur 13. tonen de bladfotosynthese uitgezet tegen lichtintensiteit. De gevonden curves volgen het verwachte patroon (verzadigingscurve), hoewel de meeste lijnen geen lichtverzadiging bereiken. Dit betekent dat de fotosynthese nog hoger had kunnen zijn indien meer dan 1400 micromol/m²/s PAR was gegeven.

Lichtverzadiging is wel duidelijk aanwezig in week 30 bij de drie curves gemeten onderin het gewas (Figuur 12b.). Door adaptatie aan langdurig verblijf in de schaduw hadden deze onderste bladeren een lagere fotosynthese-capaciteit gekregen. Hun lichtverzadigingsniveau lag bij ca 1000 micromol/m²/s en hun fotosynthesecapaciteit bij 27 - 31 micromol/m²/s. In week 33 was het verzadigingsniveau van alle drie de curves van de lager gelegen bladeren verschoven naar hogere lichtintensiteit, en de fotosynthesecapaciteit was toegenomen tot 32 - 39 micromol/m²/s. De toename was het grootst bij PG, en veel minder bij TR en PP.

De verklaring ligt in de verandering van rijstructuren (Figuur 6.). Bij TR zaten de onderste bladeren in de schaduw, en dit bleef zo van week 27 tot week 34. Door aanpassing aan lage lichtintensiteit hadden de onderste bladeren van TR een lagere fotosynthesecapaciteit gekregen. Niet duidelijk is waarom deze toenam in de tijd.

Bij PG en PP is de toename van de fotosynthesecapaciteit van de onderste bladlagen verklaarbaar met het naar beneden laten zakken van een deel van de planten. In week 33 (10-17 augustus) is de helft van de planten in PG en PP 'gezakt'. Door het laten zakken kwamen bij deze planten de topbladeren op lagere hoogte te zitten. Dus de fotosynthesemetingen op lagere hoogtes zijn voor de helft gedaan aan bladeren die waren opgegroeid in het volle licht en zaten nog in het licht. Deze hadden een redelijk hoge fotosynthesecapaciteit behouden. Dit verklaart dat de fotosynthesemetingen van de bovenste en onderste bladeren in de loop van de transitieperiode dicht bij elkaar kwamen te liggen.

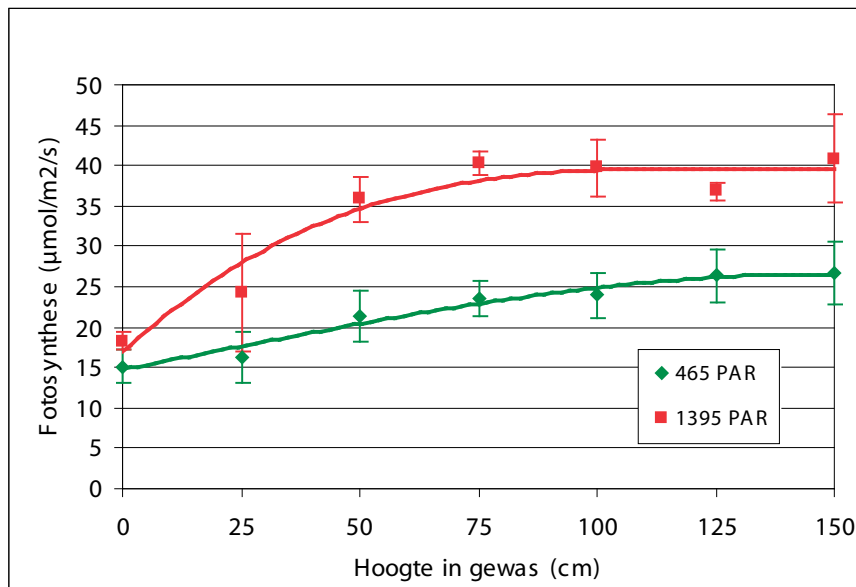
Verschillen tussen de behandelingen zijn nihil bij de bovenste bladeren. De verklaring is dat al deze bladeren weinig last van schaduw van omringende planten hadden. Ze zijn daarom niet aangepast aan lagere lichtomstandigheden.

Bij de onderste bladeren is er in week 27-28 geen verschil tussen de behandelingen. Dit is verklaarbaar doordat er nog geen verschil in rijstructuur was (zie Figuur 6. op 17 juli).

In week 30 en 33 tekende zich een klein verschil af bij de onderste bladeren, nl dat PG een iets hogere fotosynthese had dan TR en PP. Dit werd veroorzaakt door de lichtintensiteit. De onderste bladeren van TR zaten steeds in de schaduw, dus aanpassing aan laag licht was te verwachten. Het (kleine) verschil tussen PG en PP in fotosynthesecapaciteit van de onderste bladeren kwam wellicht doordat bij PG de lage planten het minst direct beschaduwd werden. Ze moesten het minst aanpassen aan lage lichtintensiteit, en behielden dus een hogere fotosynthesecapaciteit.

Deze verklaringen worden gesteund door de lichtmetingen (zie Figuur 11.). Bij TR werd het licht al bovenin het gewas onderschept. Hierdoor nam de lichtintensiteit snel af van boven naar beneden (zie Figuur 11h.), zodat de lager gelegen bladeren zich aanpasten en een lage fotosynthesecapaciteit kregen. PG had een iets lagere lichtonderschepping en lichtverdeling, wat wil zeggen een iets hogere lichtintensiteit op de verschillende hoogtes. Wellicht hierdoor had PG een wat hogere fotosynthesecapaciteit in de onderste bladlaag, vooral in week 33.

3.4.4 Relatie actuele fotosynthese en –capaciteit

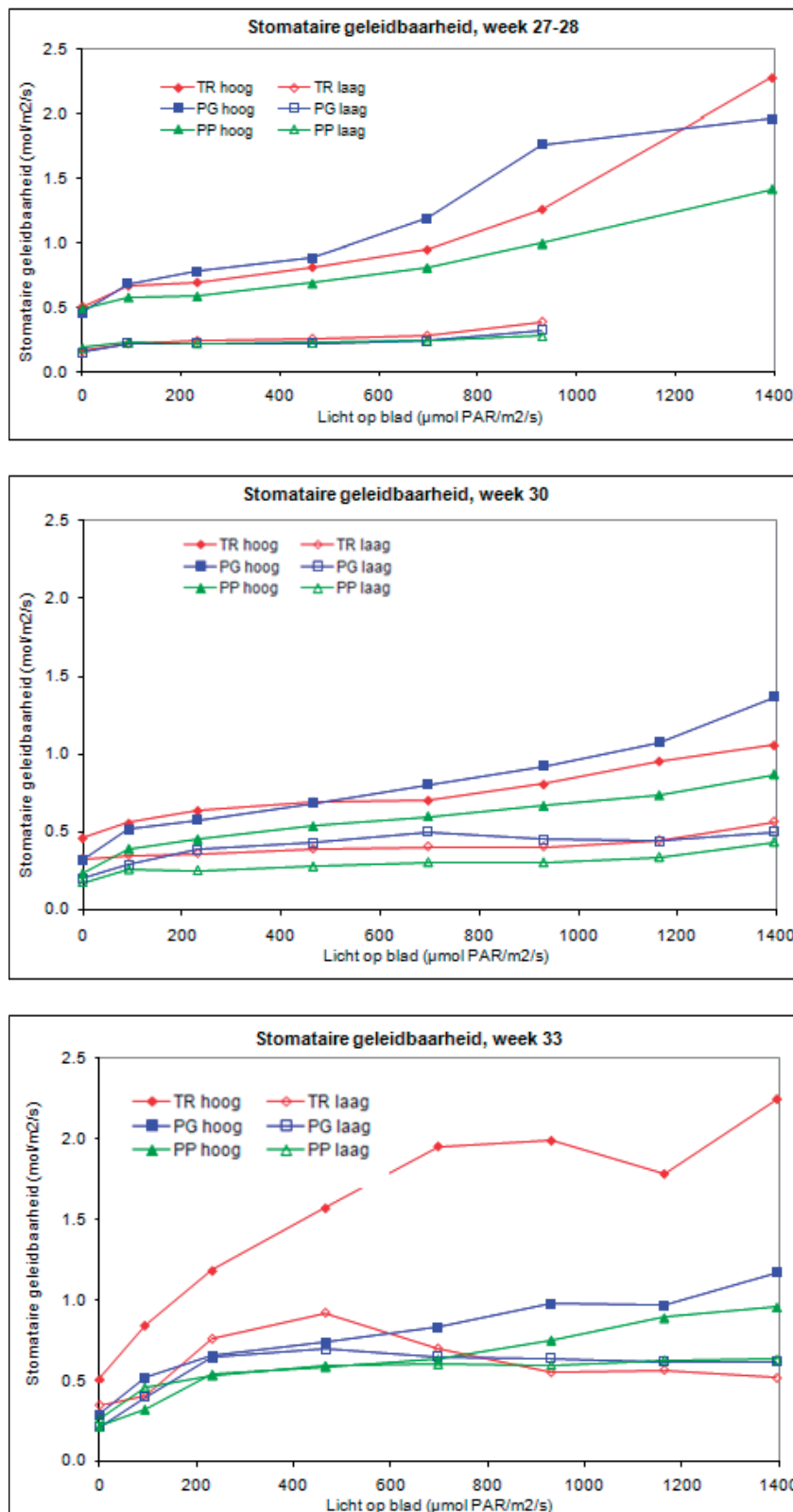


Figuur 14. Fotosynthese op verschillende hoogtes in het gewas bij 465 en 1395 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. $n = 4$ resp. 2

In verband met de fotosynthesemetingen rees de vraag wat de relatie was tussen actuele fotosynthese en fotosynthesecapaciteit. Dit kan aangetoond worden door fotosynthese metingen te doen bij een gangbare ('actuele') lichtintensiteit (bv 465 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$), en ook bij een heel hoge lichtintensiteit (bv 1400 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$). Dit laatste geeft het fotosynthesevermogen van de bladeren.

Deze metingen zijn gedaan op een zevental hoogtes in het gewas, met herhaling(en), en de resultaten zijn geplot in Figuur 14. De bovenste lijn is de fotosynthesecapaciteit, en de onderste lijn de actuele fotosynthese bij 465 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Onderin het gewas (links in de grafiek) is de fotosynthesecapaciteit ongeveer de helft van die hoger in het gewas. Dit komt doordat de bladeren onderin geadapted zijn aan lage lichtintensiteit, waardoor ze de heel hoge lichtintensiteit niet kunnen benutten. Dus fotosynthese is wel mogelijk maar niet afhankelijk van de hoeveelheid licht. Hoger in het gewas zijn de bladeren jonger en geadapted aan hogere lichtintensiteit. De fotosynthesecapaciteit stijgt met toenemende hoogte (tot ca 1 m). In dit onderste deel van het gewas lijkt de fotosynthesecapaciteit een lichtafhankelijk karakter te hebben, omdat het sneller stijgt bij een lichtintensiteit van 1395 dan bij 465 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$.

3.5 Stomataire geleidbaarheid en bladverdamping



Figuur 15. Stomataire geleidbaarheid gemeten in de drie behandelingen en op twee hoogtes in het gewas in drie periodes: (a) week 27-28, (b) week 30 en (c) week 33. Omstandigheden: CO₂ 700 ppm, temperatuur 27-28 °C, relatieve luchtvochtigheid 80 %. n=5 of 6

Stomataire geleidbaarheid – bespreking resultaten

De stomataire geleidbaarheid werd bepaald door het fotosyntheseapparaat (LiCor 6400). De metingen zijn gedaan in alle drie de behandelingen, op twee hoogtes, over lichttraject 0 – 1400 micromol/m²/s en verspreid in de tijd (week 27/28, 30 en 33). Zie omstandigheden bij de fotosynthesemetingen.

Verschillen tussen de behandelingen bestonden alleen in de bovenste bladeren. In week 27 en 30 hadden PG en TR de hoogste stomataire geleidbaarheid. In week 33 had alleen TR een opvallend hoge de stomataire geleidbaarheid.

De stomataire geleidbaarheid boven in het gewas was aanvankelijk veel hoger dan onderin, maar het daalde van week tot week. In de laatste week waren alle curven (behalve TR-hoog) tamelijk vlak en ongeveer samenvallend. Dit betekent dat er weinig verschil zat tussen de behandeling, tussen de meetplaatsen en tussen verschillende lichtniveaus.

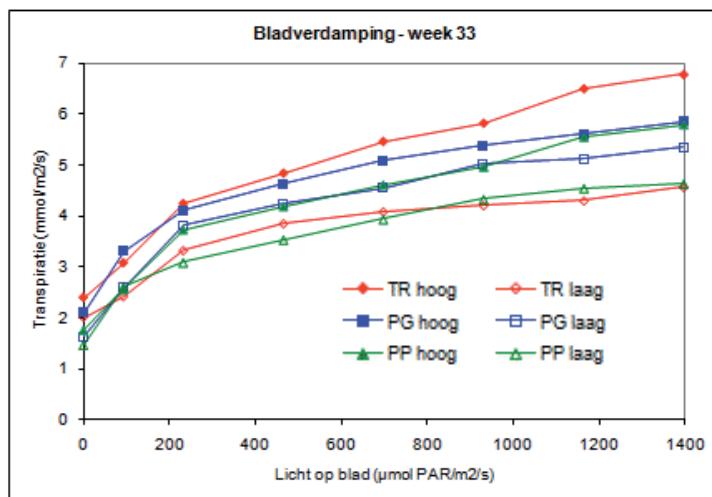
De uitzonderlijk hoge stomataire geleidbaarheid van de bovenste bladeren van TR (2 tot 4 keer zo hoog als van PG en PP) is verklaarbaar vanwege de gewasstructuur. Bij TR stond een volgroeid gewas, terwijl bij PG en PP de helft van het gewas heel laag was geworden. De stomataire geleidbaarheid van de onderste bladeren van TR was echter de laagste van allemaal.

Verdamping

De hypothese was dat behandeling PG en PP zouden leiden tot lagere gewasverdamping, wat energie zou besparen. Omgekeerde betekent dit dat TR een hogere verdamping zou hebben dan PG en PP. De verdamping van bladeren werd bepaald door de LiCor-6400 uit de stomataire geleidbaarheid en luchtvochtigheid in het meetcuvet (steeds 80 %). De stomataire geleidbaarheid was het meest interessant in week 33, omdat TR daar uitkwam op een veel hogere waarde dan PG en PP. Voor week 33 is de bladverdamping uitgezet voor de verschillende lichtintensiteiten voor de drie behandelingen en twee hoogtes (zie Figuur 16.). Hieruit blijkt dat TR de hoogste bladverdamping heeft in de hoge bladlagen, maar de laagste verdamping in de lage bladlagen (samen met PP). Dit komt vooral tot uiting bij heel hoge lichtintensiteit van 1200 micromol/m²/s en hoger.

Bij lichtintensiteit 232 micromol/m²/s zijn de verschillen erg klein. Verdamping van de hoogste bladeren is iets hoger voor TR (4,2 mmol/m²/s voor TR, en 4,1 en 3,7 voor PG en PP), maar verdamping van de laagste bladeren is juist relatief laag voor TR (3,3 voor TR, en 3,8 en 3,1 voor PG en PP). De verdamping van het hele gewas zal daarmee niet tot nauwelijks hoger zijn dan die van PG of PP. Ook boven 1200 micromol/m²/s wordt de hoge verdamping van de bovenste bladeren van TR ongeveer gecompenseerd door de geringere verdamping van de lage bladeren van TR (in vergelijking met PG en PP). De verdamping van TR, PG en PP is dus nauwelijks verschillend. Hieruit kan geconcludeerd worden dat PG en PP geen winst opleveren in de vorm van vermindering van de verdamping.

Figuur 13. is alleen gemaakt voor week 33. Uit Figuur 13. blijkt dat de stomataire geleidbaarheid in week 27 en 30 nog minder verschillend was, en dus de verdamping ook amper verschillend kon zijn geweest. In de niet-transitie periodes zijn de gewasstructuren gelijk en is dus ook geen verschil in verdamping te verwachten.



Figuur 16. Bladverdamping gemeten met de LiCor-6400 tijdens de fotosynthese metingen

3.6 Productie

De belangrijkste onderzoekfactor in deze proef was de rijstructuur, en de tweede was substraattype. In proefvakken werd een vergelijking gemaakt tussen kokosmatten type 'Profit' van Van der Knaap, en steenwolmat type 'Master Dry' van Grodan. Zie bijlage I voor proefveld lay-out. Productieresultaten zijn weergegeven in Figuur 17. en Tabel 5.

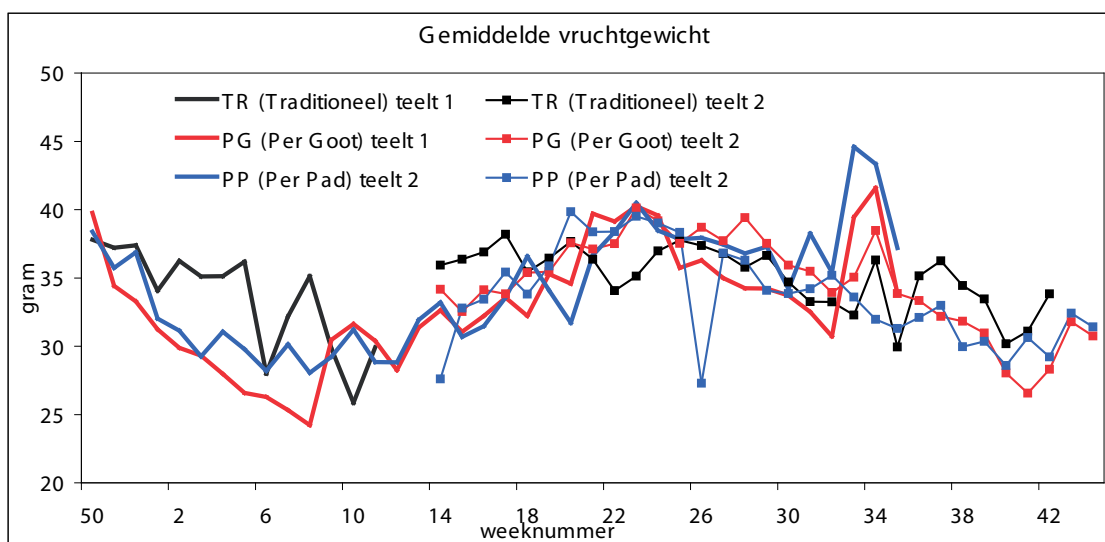
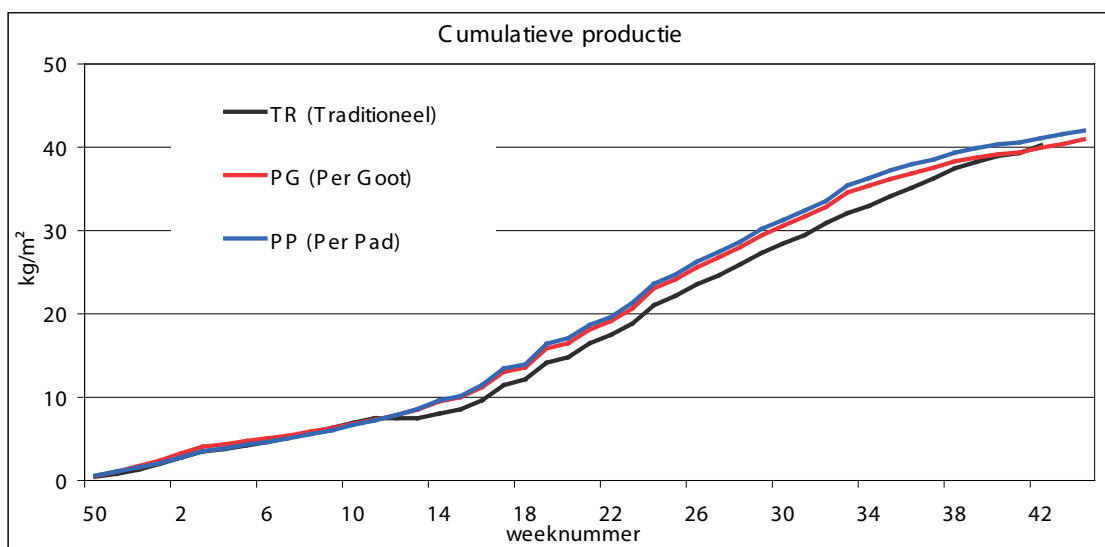
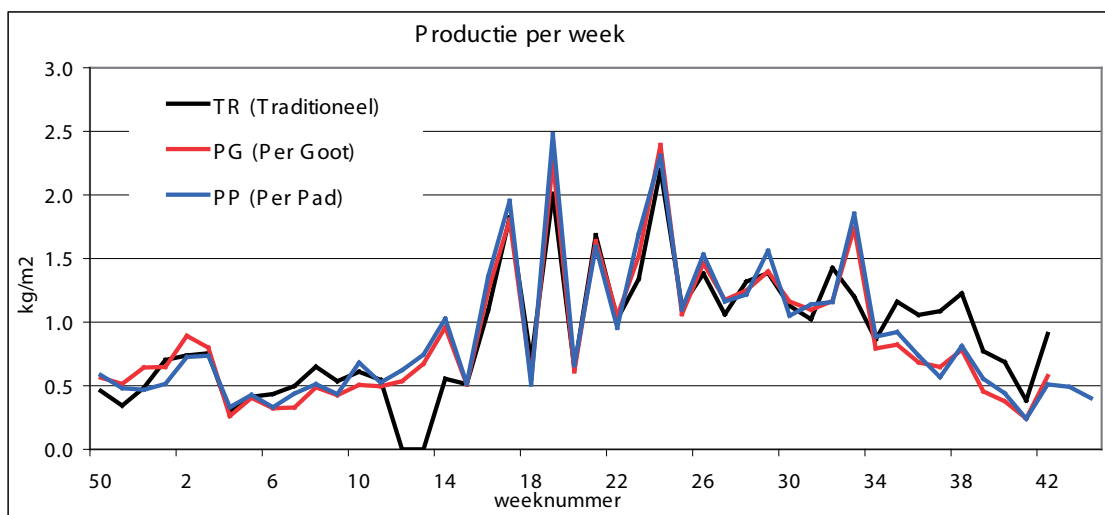
Rijstructuren

De grafieken in Figuur 17. (met productie uit de paden t/m week 42) laten zien dat tot week 12 de productiesnelheid en de totale productie niet veel verschilden tussen de 3 de rijstructuren. In week 12 en 13 was er tijdelijk geen productie in TR vanwege het tussenplanten. Dit veroorzaakte bij TR een achterstand van 1,5 kg/m² en later 2 – 2,5 kg/m², die lange tijd bleef bestaan. Na week 34 nam de productiesnelheid van PG en PP af, terwijl die van TR op peil bleef, waardoor TR zijn achterstand inliep. De productiesnelheid van PG was eerst hoger maar daarna in periodes vaak iets lager dan van PP, variërend van 10 tot 100 gr/m²/week (zie Figuur 17a.). Hierdoor kwam de cumulatieve productie van PG geleidelijk aan onder die van PP. In week 42 eindigden de 3 lijnen met een verschil van 2,8 % tussen de laagste (TR) en de hoogste (PP), maar TR zat op een stijgende lijn. Dit verschil is kleiner dan wat redelijkerwijs meetbaar is op de schaal van een kasproef. Maar er is geen aantoonbaar verschil in cumulatieve productie tot week 42.

Tabel 5. toont de productie uit de telvakken t/m week 41 (van week 42 zijn geen data per substraat beschikbaar). In deze tabel is een 'index' gegeven voor de productie uitgedrukt in procenten van het overall-gemiddelde (onderste regel). De spreiding in deze productieresultaten is groter dan in de productiedata uit de paden. PP op steenwol presteerde goed, maar PP op kokos deed het slecht. Hiervoor kan geen oorzakelijke verklaring worden gegeven. Het slechte resultaat in dit ene vak brengt het gemiddelde van PP omlaag tot 97 % van het overall gemiddelde (zie Tabel 5.). De productie in de telvakken varieerde van 92 % tot 105 % van het gemiddelde, en was gemiddeld het laagste bij PP en het hoogste in PG. Daarentegen was de productie in de paden (zie hierboven) het hoogste in PP met een verschil van minder dan 3 % (zie Figuur 17). De conclusie is dat er geen duidelijk effect was van rijstructuur op de productie.

Tabel 5. Cumulatieve productie in de verschillende rijstructuurbehandelingen en substraattypes bepaald in de telvakken t/m week 41. De index is de productie uitgedrukt in procenten van het overall-gemiddelde (onderste regel)

1 ^e factor	2 ^e factor	cum. Productie	index %	rangorde
TR	steenwol	38.2	98	TR: steenwol laagst
TR	kokos	39.7	102	TR: kokos hoogst
TR	gemiddeld	38.9	100	
PG	steenwol	39.2	101	PG: steenwol laagst
PG	kokos	41.0	105	PG: kokos hoogst
PG	gemiddeld	40.1	103	
PP	steenwol	39.9	103	PP: steenwol hoogst
PP	kokos	35.9	92	PP: kokos erg laag
PP	gemiddeld	37.9	97	
steenwol	TR	38.2	98	steenwol: TR laagst
steenwol	PG	39.2	101	
steenwol	PP	39.9	103	steenwol: PP hoogst
steenwol	gemiddeld	39.1	101	
kokos	TR	39.7	102	
kokos	PG	41.0	105	kokos: PG hoogst
kokos	PP	35.9	92	kokos: PP erg laag
kokos	gemiddeld	38.9	100	
TR	gemiddeld	38.9	100	
PG	gemiddeld	40.1	103	
PP	gemiddeld	37.9	97	
gemiddeld	gemiddeld	39.0	100	



Figuur 17. Productie in de 3 behandelingen (rijstructuren) bepaald in de paden. (a) productie per week; (b) cumulatieve productie; (c) gemiddeld vruchtgewicht; de lijnen met markers voor tomaten uit teelt 2

Substraatype

Tussen de twee substraattypen bestond iha weinig verschil, behalve dat binnen PP de productie op kokos erg laag was, en dat binnen TR en PG kokos juist meer productie gaf dan steenwol. Gemiddeld over de drie rijstructuur-behandelingen, bestond er nauwelijks verschil tussen kokos en steenwol, met cumulatieve productie respectievelijk 39,1 en 38,9 kg/m² (dit is t/m week 41). Er zou sprake kunnen zijn van interactie tussen rijstructuur en substraat, maar dit kan niet onderbouwd worden met data of statistiek. De conclusie is dat in deze proef geen duidelijk effect van substraatype is gevonden.

Gemiddelde vruchtgewicht

Het gemiddelde vruchtgewicht is weergegeven in Figuur 17c. en Tabel 6. Het gemiddeld vruchtgewicht volgt in grote lijnen de lichtcurve, maar met na-ijling. Vanaf week 14 kwamen er ook tomaten bij van de tussenplantingen; deze zijn aangegeven door de lijnen met markers. Het gemiddeld vruchtgewicht varieerde van ca 33 tot 35 gram, een verschil van 7 %. Het gemiddeld vruchtgewicht wordt beïnvloed door het aantal vruchten in een tros, en dit hangt mede af van vruchtsnoei. Alle trossen werden gesnoeid op 8 of 9 vruchten, afhankelijk van de rijpingssnelheid en vruchtgewicht. Er zijn geen duidelijke behandelingseffecten.

Tabel 6. Gemiddeld vruchtgewicht

TR	Teelt 1	Week 50-11	33,6
TR	Teelt 2	Week 14-42	35,1
PG	Teelt 1	Week 50-35	33,1
PG	Teelt 2	Week 14-42	34,9
PP	Teelt 1	Week 50-35	34,4
PP	Teelt 2	Week 14-42	33,8
Gemiddeld			34,1

Conclusie

Er is geen duidelijk effect te zien van rijstructuur of substraatype op de productie of gemiddeld vruchtgewicht. In behandeling TR ontstond ten tijde van het tussenplanten een achterstand in productie tov van PG en PP. Deze achterstand werd later ingehaald door een iets hogere productie in het naseizoen.

4 Simulatie in 3D van de lichtverdeling

4.1 Inleiding

De lichtverdeling in het tomatengewas is gesimuleerd met behulp van een 3D model voor gewasstructuur en lichtverdeling. Een dergelijk model biedt de mogelijkheid om de lichtverdeling te berekenen voor andere gewasstructuren dan die in de proeven gebruikt zijn, i.e. om scenario's van bepaalde plantverbanden te testen op hun invloed op lichtbenutting en lichtdoordringing in het gewas. In dit onderzoek is het gebruik van het 3D model in 4 fasen onderverdeeld: (1) meten van de 3D gewasstructuur van de plantbehandelingen van het huidige experiment te Bleiswijk, (2) calibreren van het 3D gewasmodel m.b.v. de gemeten waarden, (3) calibreren van de lichtverdelingsmodule, (4) validatie- en scenario-berekeningen. De methode en de resultaten van de 4 fasen worden hieronder achtereenvolgens beschreven.

4.2 Methodes

Metten van de 3D gewasstructuur

De 3D gewasstructuur van de 3 gewasstructuurbehandeling (zie Hoofdstuk 2.2) is op 13/14 maart, 21 maart, 17 juli, 23 juli en 13 augustus in 2007 gemeten. Hiervoor werden aantallen bladeren, bladlengte, bladhoek t.o.v. het horizontale vlak, lengte van de stengelinternodiën en het aantal trossen met de hand opgemeten. Als aanvulling zijn op 17 juli 2 planten met 3D opname apparatuur (Fastrak Polhemus digitizer) vastgelegd m.b.t. de 3D geometrie met als kleinste detail de deelblaadjes van het tomatenblad. Deze gemeten gedetailleerde 3D gewasstructuur is ingevoerd in het model.

Calibratie van het 3D gewasmodel

Het 3D model is ontwikkeld op basis van L-systeem grammatica m.b.v. het softwarepakket L-studio (University of Calgary, <http://www.cpsc.ucalgary.ca/Research/bmv>). Dit pakket kan de 3D plantvorm simuleren op basis van de vorming, ontwikkeling en vorm van elk afzonderlijk orgaan. Tevens is simulatie van een set van planten in gewasverband mogelijk.

De posities van de planten en hun afmetingen en orgaanposities zijn invoer in het model. De vorm van de plant en grootte en stand van de bladeren vertoont veel variatie. Deze waarden zijn als gemiddelde in het model verwerkt, en voorzien van een variabele waarde die maximaal gelijk is aan de standaardafwijking van die behandeling. Hiervoor werd een 'random generator' gebruikt. Hierbij werd ook onderscheid gemaakt tussen de twee planttypen, i.e. wel of niet getopt. Tevens zijn enkele verbanden van bladstand met hoogte in de plant en tijdstip van de dag bepaald t.b.v. mogelijke toepassing in het 3D model.

Calibratie van de lichtverdelingsmodule

De lichtmodule bestaat uit het "nested radiosity" model van Chelle en Andrieu (1998). Dit model heeft als input nodig: positie, golfhoogte en lichtsterkte van de aanwezige lichtbronnen, 3D vorm van het gewas, en optische eigenschappen (reflectie-, absorptie- en transmissiecoëfficiënt) van de plantorganen en het aanwezige grondoppervlak. De optische eigenschappen zijn bepaald aan verse bladeren, voor PAR, met behulp van een Perkin-Elmer spectrometer. Het gemeten niveau van het diffuse PAR licht boven het gewas is invoer in het model. Voor modellering van dit diffuse licht wordt een set van lichtbronnen in de hemisfeer geplaatst, die qua positie en relatieve sterkte gebaseerd zijn op de richtlijnen van het UOC (Uniform Overcast sky Committee) handboek (zie Evers *et al.*, 2007).

Validatie- en scenario-berekeningen

Na calibratie is de uitkomst van het model gevalideerd door het gesimuleerde en gemeten lichtniveau op diverse hoogten in het gewas voor de standaard teelt en voor de 2 alternatieve teeltstrategieën te vergelijken voor de maanden juli en augustus 2007.

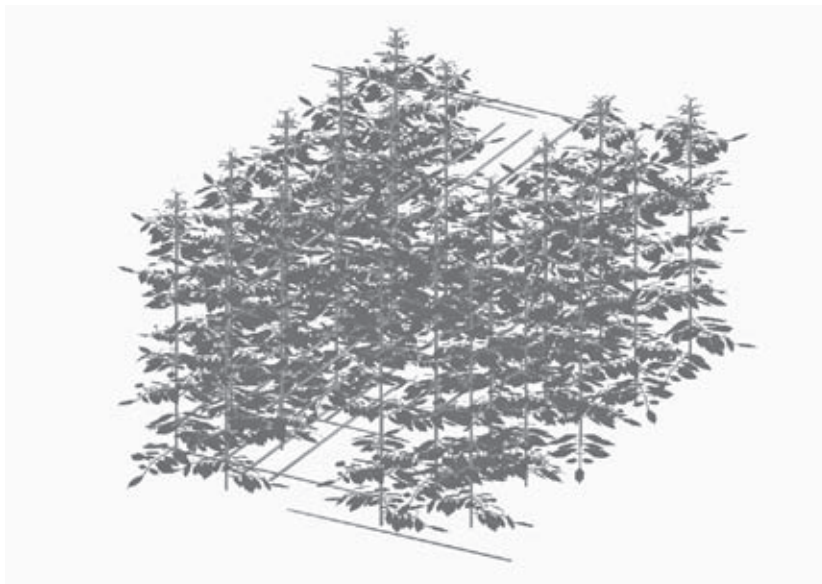
Hierna zijn op verzoek van het Improvement Centre de volgende scenario's doorgerekend met het gecombineerde gewaslichtverdelingsmodel op hun effect op de lichtverdeling en lichtonderschepping:

- Breedte van padruimte 1.4m i.p.v. 1.1m (totale pad+rij blijft 1.6m, dus rij "dikt in")
- Rij-oriëntatie Oost-West i.p.v. de aanwezige Noord-Zuid

4.3 Resultaten

Calibratie gewasmodule

De gemeten structuur is ingevoerd in het 3D gewasmodel: het tomatengewas telde op 17 juli 2007 in totaal 27 phytomeren (stengelinternodiën) met blad of tros (zie Figuur 18). In de 2 alternatieve teeltstrategieën werden de planten toen getopt en zakte dit aantal van 27 naar 17 op 30 juli tot 7 op 13 augustus doordat wel steeds trossen werden geoogst en blad geplukt maar er geen nieuwe phytomeren meer werden aangelegd. Deze behandelingen zijn correct ingevoerd in de gemodelleerde gewasstructuur.



Figuur 18. Weergave van het 3D model dat dubbele plantrijen simuleert tot op het detail van deelblaadjes van tomaat. De lijnen geven de lijnvormige, virtuele lichtsensoren weer. Afbeelding uit Sarlikioti et al. (subm)

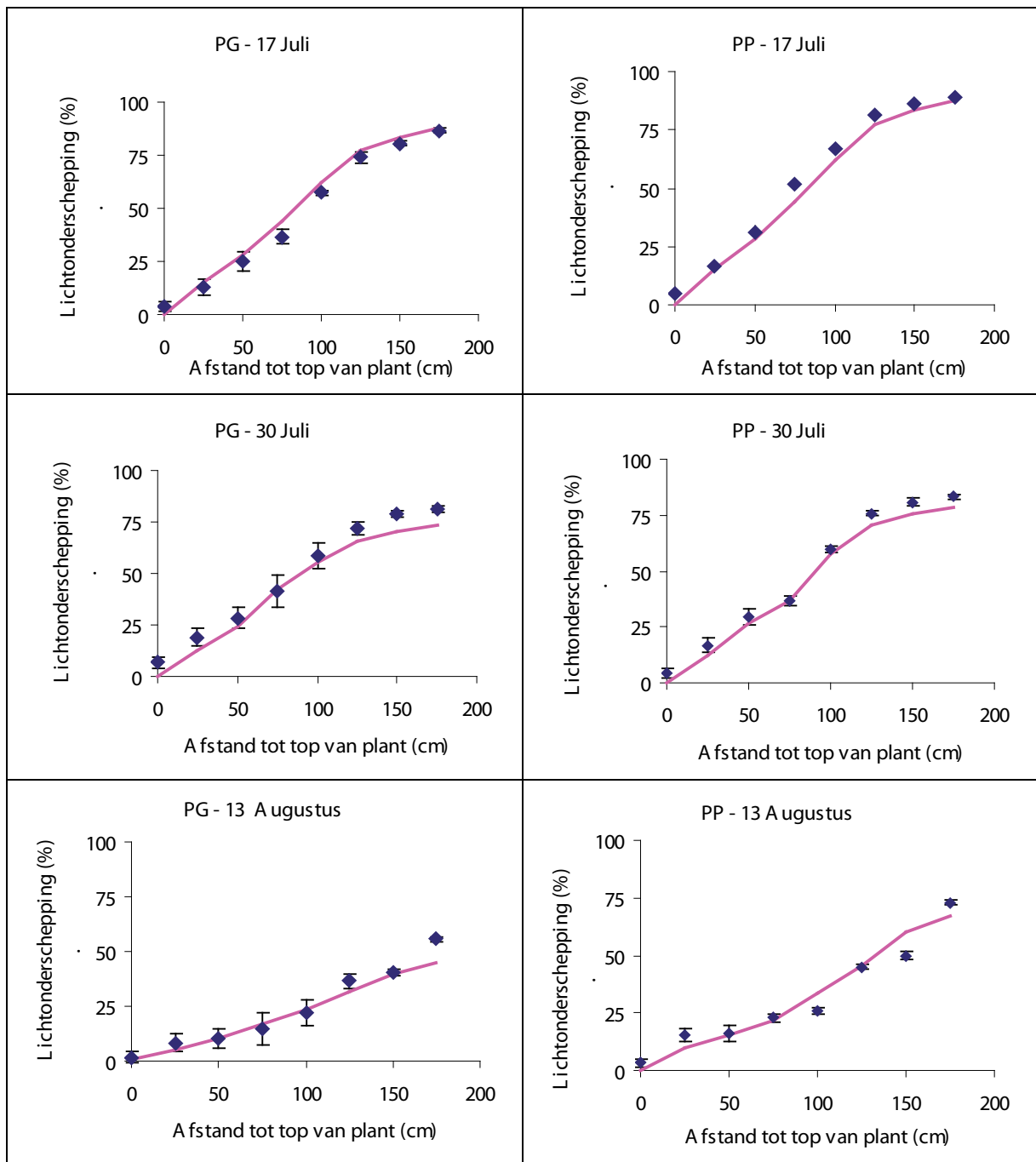
Calibratie lichtmodule

De standaard behandeling is gebruikt om het lichtmodel te calibreren (=ijken). Na nauwgezette controle van de structuur en bladstand van alle deelblaadjes is een correcte simulatie van de lichtgradiënt gerealiseerd: het gewas absorbeert in totaal gemiddeld 88 % van het opvallende zonlicht in de uitgangssituatie (zie ook de curven op 17 juli in Figuur 2.): de startdag van de behandeling (17 juli), rekening houdend met zowel een fractie direct als diffuus zonlicht.

Validatie lichtmodel

De resultaten van het lichtmodel zijn gecheckt (=validatie) door simulatie van de verschillende gewasbehandelingen. Deze behandelingen leidden tot een steeds lager aantal bladeren in de getopte planten en een uit de metingen blijkende verminderde lichtonderschepping. Dit effect op de lichtgradiënt en de lichtonderschepping werd correct gesimuleerd (zie Figuur 19).

De simulatie start met een gelijke situatie voor behandelingen PG en PP, en in het model is deze startsituatie gelijk aan de standaard "TR" behandeling. De metingen daarentegen zijn iets verschillend tussen PG en PP op 17 juli, omdat het om verschillende plots gaat met (altijd) een licht verschil door natuurlijke variatie. Vervolgens geeft het model op 30 juli een kleine onderschatting van de lichtonderschepping, hetgeen mogelijk veroorzaakt is doordat het aantal gemodelleerde phytomeren voor die datum is geschat via interpolatie tussen de meetdagen 17 juli en 13 augustus.



Figuur 19. Meting en simulatie van het percentage onderschept diffuus PAR licht van boven naar beneden in het toma-tengewas. Boven: startsituatie (gelijk voor alle teeltstrategieën) en tevens de situatie zoals die gehandhaafd bleef in de standaard behandeling (TR). PG = per goot; PP = per pad

Scenarioberekeningen

Het verbreden van de padruimte, waarbij de ruimte voor de planten wordt ingedikt, geeft in het model een verminderde lichtonderschepping en dito meer licht op de kasvloer (zie Tabel 1.). Dit effect wordt vooral door het directe licht, en dus minder door het diffuse licht, veroorzaakt.

Het wijzigen in het model van de oriëntatie van de rijen van noord-zuid naar oost-west heeft een verhoogde lichtonderschepping tot gevolg (Tabel 1.). Ook dit effect is merendeels veroorzaakt door de directe licht component: onderschepping is efficiënter als de lichtbaan zo loodrecht mogelijk op de rij gericht is. Daarbij is het effect in de zomer groter dan in de winter. De effecten van de rijrichting waren overigens nog sterker bovenin het gewas, op 75 cm onder de top (zie Sarlikioti *et al.*, subm).

Tabel 7. Effect van diverse scenario's met betrekking tot gewasstructuur op de lichtabsorptie door het gewas, als percentage van de lichtinput direct boven het gewas

Scenario	Geabsorbeerd licht (% van input)
0. Standaard#, alleen diffuus licht	81
1. Idem, maar wijder pad (1.4m) en dichtere rij	65
2. Direct+diffuus licht 21 dec	71
3. Idem, rijen O-W	74
4. Direct+diffuus licht 21 jun	80
5. Idem, O-W	85

Standaard: Diffuus licht 27 januari, breedte in pad 1.1m, breedte planrij 0.5m, plantdichtheid 2.27 planten m², rijrichting N-Z

N.B. scenario's 0+1 en 2 t/m 5 zijn vanwege verschil in lichtbron alleen onderling vergelijkbaar

4.4 Conclusies

Het 3D model simuleert de lichtverdeling in de uitgangssituatie alsmede het effect van gewasbehandelingen op correcte wijze. De aanzienlijk opener gewasstructuur in de behandelingen veroorzaakte hogere lichtintensiteiten onderin het gewas. Over het effect hiervan op fotosynthese en groei kon in het bestek van dit onderzoek geen modelberekening gedaan worden.

De modelberekening van de scenario's laat met name voor vergroting van ruimte voor het pad een daling van de lichtonderschepping door het gewas zien. De effecten van rijrichting op de lichtonderschepping zijn volgens het model beperkt (maximaal 5 % verschil door wijziging van noord-zuid naar oost-west).

5 Conclusie

De eindconclusie van dit onderzoek is dat er geen voordelen zijn gevonden van tussenplanten 'Per Goot' (PG) of 'Per Pad' (PP) ten opzichte van de traditionele manier van tussenplanten (TR).

6 Literatuur

Chelle, M. and Andrieu, B., 1998.

The nested radiosity model for the distribution of light within plant canopies. *Ecological Modelling* 111: 75-91.

Dueck, T.A.; Marcelis, L.F.M., 2005.

Bladplukken bij paprika mogelijk rendabel. *Groenten + fruit* 2005 (28). - p. 16 - 17.

Evers, J.B.; Vos, J.; Chelle, M.; Andrieu, B.; Fournier, C.; Struik, P.C., 2007.

Simulating the effects of localized red:far-red ratio on tillering in spring wheat (*Triticum aestivum*) using a three dimensional virtual plant model. *New Phytologist* 176 (2), 325-336.

Sarlikioti, V., De Visser, P.H.B. en Marcelis, L.F.M., 2010.

Exploring the spatial distribution of light interception and photosynthesis of canopies by means of a functional-structural model (submitted)

Bijlage I - Kasindeling

Kasindeling

AFDELING 11 - IMPROVEMENT CENTRE IN BLEISWIJK - 8 OKT 07 - 26 OKT 07

Proefvak	Substraat	Telvak	Padnummer		Behandeling			
			1	2				
(611007) Buiten de proef 11.07	Steenwol		1101	1	Oost	Traditioneel		
				2	West			
711001			711101		1102		1	Oost
							2	West
711002			711102		1103		1	Oost
							2	West
	711102		1104	1	Oost			
				2	West			
	Kokos		1105	1	Oost			
				2	West			
			1106		1		Oost	
					2		West	
711003			711103		1107	1	Oost	
						2	West	
611003	611103		1108	1	Oost			
				2	West			
	611103		1109	1	Oost			
				2	West			
611004	611104		1110	1	Oost			
				2	West			
711004	711104		1111	1	Oost			
				2	West			
	711104		1112	1	Oost			
				2	West			
	Steenwol		1113	1	Oost			
				2	West			
611005			611105		1114	1	Oost	
						2	West	
711005			711105		1115	1	Oost	
						2	West	
	711105		1116	1	Oost			
				2	West			
611006	611106		1117	1	Oost			
				2	West			
711006	711106		1118	1	Oost			
				2	West			

Figuur I-1. Schematische indeling van kasafdeling 11 van het Improvement Centre in Bleiswijk, met de ligging van de proefvakken voor TR, PG en PP en de vakken voor substraattypen steenwol of kokos

