



Modellering ruimtelijke lichtverdeling in gewassen

Opbouw en toepassing van een 3D model voor kas en gewas

Pieter de Visser¹, Gerhard Buck-Sorlin^{1,2}

¹ Wageningen UR Glastuinbouw

² Wageningen UR Biometris



Referaat

Een 3D model voor lichtverdeling in kasgewassen is ontwikkeld om de meest efficiënte plaatsing van lampen (SONT, LED) te berekenen om hiermee op groeilicht en energie te kunnen besparen. Het onderzoek, in het kader van het programma Kas als Energiebron en gefinancierd door Productschap Tuinbouw en Ministerie van ELI, behelsde de bouw en test van het model, dat rekening houdt met lampposities en -eigenschappen, bladstanden en rijstructuur. De lichtabsorptie en gewasfotosynthese voor een ingevoerd lichtplan wordt gesimuleerd. In het rapport zijn een reeks kansrijke belichtingsscenario's doorgerekend voor een representatieve gewasstructuur voor tomaat en roos. Het resultaat bleek sterk afhankelijk van padbreedte en aantal bladeren, maar minder van bladvorm en bladhoek. De belichting wordt efficiënter bij gerichtere plantbelichting door aanpassing van de lampreflector, gebruik van tussenbelichting en schermreflectie. Het lichtverlies naar vloer en kasdek worden hiermee gereduceerd. Voor vragen uit de sector is het 3D model nu op verzoek inzetbaar.

Abstract

A 3D model for greenhouse crops is developed to calculate the most efficient lamp (HPS, LED) positions to reduce light use and energy consumption. In the research, done within the programme 'Kas als Energiebron', financed by the Product Board Horticulture and the Ministry of Economics, Agriculture and Innovation, the model was tested for lamp positions, properties of lamps, leaf angles and row structure on light distribution, absorption and photosynthesis. A selection of energy saving illumination strategies were simulated for the crops tomato and rose. The simulated light absorption and photosynthesis were strongly affected by path width and leaf numbers per plant, yet leaf form and leaf angles were less influential. In general, a more efficient illumination strategy is achieved if the light source is more focused on the crop by lamp reflectors, at interlighting (LEDs), and with a screen on top. On request, further simulations can be done.

© 2011 Wageningen, Wageningen UR Glastuinbouw.

Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Droevendaalsesteeg 1, 6708 PB Wageningen
: Postbus 644, 6700 AP Wageningen
Tel. : 0317 - 48 60 01
Fax : 0317 - 41 80 94
E-mail : glastuinbouw@wur.nl
Internet : www.glastuinbouw.wur.nl

Inhoudsopgave

	Samenvatting	5
1	Inleiding	7
	1.1 Doelstellingen	7
	1.2 Toepassing	7
	1.3 Relatie tot ander onderzoek	8
2	Aanpak	9
	2.1 Wensen uit de praktijk	9
	2.2 Moduleontwikkeling	9
	2.3 Modelgebruik t.b.v. de praktijk	10
3	Structuurmodel	11
	3.1 Inleiding	11
	3.2 Metingen	11
	3.3 Aanpak modellering	12
	3.4 Resultaat inbouw gewasstructuur in model	13
	3.5 Resultaat webcam opnamen bladstand	15
4	Lichtmodule	17
	4.1 Methode	17
	4.1.1 Basiskenmerken lichtmodel	17
	4.1.2 De Virtuele Kas	18
	4.1.3 Licht en gewas	18
	4.1.4 Lamplicht	18
	4.1.5 Validatie van lichtmodule	20
	4.2 Resultaten bouw lichtmodule	22
	4.2.1 De Virtuele Kas	22
	4.2.2 Simulatie lamplicht	22
	4.2.3 Lichtkleur en gewas	24
	4.2.4 Validatie	25
	4.3 Conclusies	26
5	Fotosynthesemodule	27
	5.1 Inleiding	27
	5.2 Methode	27
	5.3 Resultaten	28
6	Gevoeligheidsanalyse	29
	6.1 Methode	29
	6.2 Resultaten	30
7	Simulatie belichtingsstrategieën	33
	7.1 Methode	33
	7.2 Resultaten tomaat	34
	7.2.1 Scenario's	34
	7.2.2 Berekenen op verzoek: de LED proeven bij het Improvement Centre	38
	7.3 Resultaten Roos	39

8	Evaluatie model	43
9	Conclusies	45
10	Literatuur	47
Bijlage I	Notulen kick-off overleg	49
Bijlage II	Notulen tussentijds overleg klankbord	53
Bijlage III	Modelbeschrijving	55
Bijlage IV	Simulatie lichtabsorptie roos	57

Samenvatting

In de praktijk leven veel vragen over verdeling van licht in het gewas. Door een juiste plaatsing van de lampen, zowel SONT of LED, t.o.v. het gewas kan een efficiëntere verdeling van het licht over het gewas tot stand komen. Hiermee kan op groeilicht en energie bespaard worden. Deze benadering past in het door Productschap Tuinbouw en het ministerie EL&I gefinancierde programma “Kas als Energiebron” dat onderzoek doet t.b.v. de energietransitie van de glastuinbouw. Daarbij is de optimale benutting van (kunst)licht noodzakelijk om te komen tot een energiezuiniger teeltwijze onder rendabele omstandigheden. Naast kunstlicht betekent een verbeterde benutting van het natuurlijke licht door een gewijzigde rijstructuur óók een besparing op groeilicht.

In dit rapport wordt de opbouw en toepassing van een nieuw model beschreven dat de ruimtelijke verdeling van licht in een gewas berekent in relatie tot lamposities, lichtkwaliteit (SON-T, LED, etc.), bladstanden en rijstructuur. Dit type modellen is pas enkele jaren in ontwikkeling en biedt tal van toepassingen. Het model is gebruikt om een reeks kansrijke belichtingsscenario's door te rekenen.

Voor de modelstudies zijn representatieve structuren van de gewassen tomaat en roos gebruikt. De berekende lichtonderschepping en fotosynthese werden sterk beïnvloed door rijstructuur en aantal bladeren, maar in mindere mate door bladvorm en bladhoek. Deze representativiteit betekent dat de resultaten bruikbaar zijn voor het merendeel van de rozen- en tomatenteelt met vergelijkbare rijstructuur en aantal en oppervlak aan blad.

In het lichtmodel zijn de optische eigenschappen van alle objecten uit de kas verwerkt. Dit betreft de mate van reflectie, absorptie en transmissie van het licht door plantorganen, mat, kasvloer e.d. Ook betreft dit de lichteigenschappen van de lichtbronnen. Deze zijn in het model verwerkt door gebruikmaking van de specificaties van de lampen t.a.v. lichtverdeling, lichtsterkte en –spectrum. De ruimtelijke verdeling van het natuurlijke licht werd door middel van gangbare rekenregels in het model ingevoerd.

Door middel van webcam-beelden zijn duidelijke blad- en stengelbewegingen waargenomen in het tomatengewas waarvoor de modelberekeningen zijn gedaan. De lichtabsorptie in het model is echter nauwelijks beïnvloed voor deze mate van bewegingen die zich beperken tot bovenste bladeren. Wel vermindert de berekende lichtonderschepping indien alle bladeren in extreem steile hoeken staan.

Ten aanzien van de belichtingsscenario's laat het model zien dat een wijdere lichtverspreiding via reflectoren de absorptie van het SONT licht door het gewas door hogere reflectieverliezen licht vermindert, en een iets lager lichtniveau op de kasvloer realiseert. Het verschil tussen de veel gebruikte diep- en breedstralers is klein, wat mede komt door de beperkte verschillen in lichtspreiding tussen de gekozen reflectortypen.

Verlagen in hoogte van de SONT lampen verlaagt de lichtabsorptie en fotosynthese indien de lampen boven het pad hangen in vergelijking met plaatsing boven een plantrij, doordat meer licht op de kasvloer belandt.

Tussenbelichting met LEDs vergroot de lichtabsorptie t.o.v. bovenbelichting. Wel is absorptie door vruchten en stengels relatief hoger, wat op gewasniveau een verlaagde fotosynthese tot gevolg kan hebben t.o.v. bovenbelichting. Het model voorspelt een verhoogde lichtbenutting voor groei door tussenbelichting indien verondersteld wordt dat het blad zijn fotosynthesepotentieel behoudt en niet veroudert. Dit vereist echter nader onderzoek.

Voor een specifieke gewasstructuur kan een optimale stand en openingshoek van de lampen geadviseerd worden. De uitkomst hangt sterk samen met de mate waarin de lichtbanen tot verlies leiden naar vloer en kasdek.

Een lichthinderscherm vergroot volgens het model de lichtabsorptie door het gewas doordat er geen verlies van licht naar buiten plaats vindt.

T.a.v. de belichtingsscenario's genereert het model soms verrassende resultaten maar de meeste uitkomsten zijn in lijn met de verwachtingen. Desalniettemin biedt het 3D model nu los van de intuïtie en ervaring van belichtingsexperts een objectief instrument voor doorrekenen van lichtplannen en reactie van het gewas.

Het 3D model voor lichtverdeling en gewasstructuur is inzetbaar voor het oplossen van vele vraagstukken aangaande lamppositie, lampkleur en reflecterende en deels doorlatende objecten als kasdek, schermen en wanden, in interactie met een bepaalde gewasstructuur. Dergelijke oplossingen zijn op andere wijze behalve door uitgebreide, dure proeven niet te realiseren.

1 Inleiding

In de praktijk leven veel vragen over verdeling van licht in het gewas. Door een juiste plaatsing van de lampen t.o.v. het gewas kan een efficiëntere verdeling van het licht over het gewas tot stand komen. Hiermee kan op groeilicht en energie bespaard worden. Dit is ook mogelijk door andere lamptypen zoals LEDs te gebruiken, al of niet in combinatie met een bepaalde lamppositie. Een verbeterde benutting van het natuurlijke licht door een gewijzigde rijstructuur zal ook een besparing op groeilicht kunnen betekenen.

Metingen aan lichtverdeling binnen gewassen zijn complex en uiterst arbeidsintensief. Een betrouwbaar model dat de ruimtelijke verdeling van licht in een gewas kan berekenen in relatie tot lampposities, lichtkwaliteit (SON-T, LED, etc.), bladstanden en rijstructuur, zou een zeer welkom hulpmiddel zijn om de lichtverdeling in het gewas te simuleren. De standaard gewasgroeimodellen kunnen deze ruimtelijke verdeling van licht niet nabootsen. Recentelijk binnen o.a. Wageningen UR ontwikkelde virtuele plantmodellen bieden deze mogelijkheid wel. Deze modellen simuleren de groei en structuur van het gewas in afhankelijkheid van omgevingsinvloeden in 3 dimensies (3D) en creëren zo een zgn. 'virtuele plant' (zie o.a. Vos et al., 2007, 2010). Dergelijke modellen werken momenteel met natuurlijk licht, maar kunnen in principe uitgebreid worden met lamplicht. Voor benutting in de belichte kasteelt is aanpassing en parametrisatie van deze modellen voor enkele relevante kasgewassen noodzakelijk.

Dit project beoogt een "virtuele plant" model te ontwikkelen en toe te passen voor de simulatie van lichtverdeling en – absorptie van enkele belichtingsstrategieën in de belichte glastuinbouw. Er is gekozen voor twee economisch belangrijke gewassen die significant verschillen in 3D-gewasopbouw, te weten tomaat en roos en waarvan voldoende kennis is om het project goed uit te kunnen voeren. Het model zal na het onderzoek ook gebruikt kunnen worden voor andere gewassen doordat het veel generieke elementen bevat. Zo zijn doorslaggevende modelparameters als bladhoek, bladgrootte en lichtrespons, mits bekend, rechtstreeks te implementeren.

1.1 Doelstellingen

Het doel van dit onderzoek is om een modellentool te ontwikkelen dat ingezet kan worden om energiezuinigere belichtingsstrategieën in de tuinbouw te exploreren en kwantitatief te onderbouwen. Het model moet voor dergelijke toepassingen een virtuele, dat is een door de computer gegenereerde, 3D omgeving kunnen simuleren. Aangezien een dergelijk model voor de glastuinbouw slechts in rudimentaire vorm beschikbaar is, is het eerste doel in dit project het ontwikkelen van en het toepasbaar maken van een "virtuele plant" model binnen de 3D omgeving van de kas. De studie wordt gefocust op de gewassen tomaat en roos. Het model moet de lichtverdeling, absorptie, transmissie en reflectie in kas en gewas simuleren, en op grond van de geabsorbeerde straling de resulterende fotosynthese van het gewas berekenen. Er wordt uitgegaan van een statisch, dat wil zeggen een volgroeid, gewas dat een vaste 3D vorm bezit.

1.2 Toepassing

Een dergelijk "virtuele kas" model kan een directe bijdrage leveren aan de reductie van het energiegebruik in kassen door te exploreren welke verbetering in positie en kleur van de lampen een gelijkblijvende fotosynthese realiseert maar toch minder energieinput vraagt. Naast lamppositie kunnen ook andere ruimtelijke componenten die de lichtverdeling beïnvloeden modelmatig getest worden: reflectiewaarden van kaswanden, schermdoek e.d. of aanpassing van gewastructuur.

Het afgeronde model kan na het project vraaggestuurd ingezet worden als de praktijk een potentieel energiezuinige belichtingsstrategie doorgerekend wil zien worden, vóórdat zo'n strategie daadwerkelijk wordt uitgevoerd. Zo kan vooraf getoetst worden of de strategie wel effectief is, en wat eventuele aanpassingen moeten zijn. Het lijkt niet reëel het model zelf aan de sector aan te bieden. Relevante doelgroepen uit de praktijk zijn telers die groeilicht gebruiken en zoeken naar energiezuinige belichtingsstrategieën. Tevens zijn in dit kader voorlichters, adviseurs en leveranciers van lichtsystemen relevant.

Steeds meer teeltvragen betreffen de ruimtelijke 3D component van plant en omgeving, zoals de ontwikkeling van plantvorm op basis van lichtkleur en –intensiteit (fotomorfogenese), en van ruimtelijke variatie in temperatuur en vocht, en bijvoorbeeld de ruimtelijke verspreiding van ziekten en plagen. Het te ontwikkelen virtuele plant model kan hier in principe ook voor ingezet worden. Het voor dit project te leveren 3D model zal daarom zo gebouwd worden dat uitbreiding met verdere functionaliteit in de toekomst mogelijk is. Dit is wenselijk om een dergelijke modellentool zinvol in te zetten t.b.v. vragen uit de teeltpraktijk.

1.3 Relatie tot ander onderzoek

- Het onderzoek sluit aan op een aantal onderzoeksprojecten uitgevoerd in het kader van het programma Kas als Energiebron (KAE), gecoördineerd en gefinancierd door PT en Ministerie ELI. Zo betreft het onderzoek “Efficiëntie van groeilicht gedurende het etmaal” ook een rozengewas, waarbij inzicht in mogelijk negatieve feedback op de fotosynthese van lange belichtingsduren in dit project van belang is. Ook zeer bruikbaar zijn de bevindingen uit het onderzoeksproject “Verbetering van de lichtverdeling in het gewas” waar invloed van de rijstructuur op lichtdoordringing wordt bestudeerd, en enkele onderzoeksprojecten t.a.v. effect van lichtkwaliteit op lichtbenutting en energie-efficiëntie zoals “Diffuus Licht”, “Optimale lichtspectrum voor optimale assimilatiebelichting” en “Energiezuinige belichting met hoogfrequent geschakelde LEDs”.
- Voor roos is reeds een aanzet gemaakt tot een virtuele plant model in het kader van een STW-project getiteld “Virtual roses; a new tool to optimize plant architecture in glasshouse rose production systems”, in een samenwerkingsverband tussen Wageningen UR Glastuinbouw en leerstoelgroepen Gewas & Onkruidecologie en Tuinbouwproductieketens. Door aansluiting op die werkzaamheden met dit project is de verwachting dat op termijn van een jaar een toepassing m.b.t. belichtingsscenario’s mogelijk is.
- Het eerdergenoemde STW-onderzoek (virtual rose) naar de structuur van het rozengewas stelt het aanwezige virtuele plant model voor roos beschikbaar
- De gekozen modelleertechniek (eXtended L-system language (XL), een extensie van Java) wordt intensief gebruikt en verder ontwikkeld bij collega’s aan de universiteit van Göttingen. Dit maakt het mogelijk om voor uitbreiding van de mogelijkheden en ook voor eventuele knelpunten in de software daar om ondersteuning te vragen.
- Het promotieonderzoek van Vaia Sarlikioti betreft o.a. de ontwikkeling van een virtuele plant model voor tomaat. Haar model is met eenzelfde “formalisme” (zgn. L-systeem) geschreven maar draait met een ander lichtmodel. Haar aanpak van zowel de modellenbouw als de 3D metingen is van hulp bij het ontwikkelen van de software voor het hier gerapporteerde project.

2 Aanpak

2.1 Wensen uit de praktijk

Bij aanvang van het project is een bijeenkomst belegd met belanghebbende telers, leveranciers lampen (bijv Hortilux en Philips), een voorlichter en betrokken onderzoekers. Na de bijeenkomst is er een programma van eisen geformuleerd waaraan het simulatiemodel moet voldoen na afronding van het project. Op de bijeenkomst is eveneens vastgesteld welke belichtingsstrategieën relevant zijn voor modelmatige toetsing. Met strategieën is bedoeld: verschillende lamposities (boven, in of naast het gewas, omhoog, opzij of omlaag schijnend), lamptypen (SON-T, HP, LED) en aantal per m² kas. Ook is tijdens de bijeenkomst besproken op welke bedrijven de metingen aan gewasarchitectuur gedaan zullen worden. Na bovengenoemd overleg is het 3D gewasmodel stapsgewijs ontwikkeld, waarvan de aanpak is beschreven in §2.2. Met het ontwikkelde model zijn vervolgens belichtingsstrategieën doorgerekend, die gecommuniceerd zijn met de praktijk (aanpak vermeld in §2.3).

2.2 Moduleontwikkeling

Om tot een compleet model voor de virtuele kas te komen, is de modellenbouw per module stapsgewijs opgebouwd. De volgende modules konden worden onderscheiden:

- Structuurmodel
- Lichtverdeling
- Fotosynthese
- Scenariovarianten

De aanpak per module wordt hieronder kort toegelicht. Verderop in het rapport komen de modules uitgebreid aan bod.

Structuurmodel:

De voor een tomaten- en een rozen-gewas gemeten 3D-structuur is vevat in rekenregels waarmee virtueel het gewas in 3 dimensies wordt weergegeven. Een dergelijke structuur is bijzonder complex, maar uit onderzoek blijkt dat elk gewas in een specifiek patroon groeit en via een beperkt aantal rekenregels beschreven kan worden. Daarnaast zijn praktijkgewassen in een bepaalde vorm gehandhaafd, wat in veel gevallen de simulatie van de 3D vorm versimpelt. Met speciaal hiervoor geschikte software is de gewasstructuur in het model verwerkt.

Lichtverdeling:

Binnen het model is de module lichtverdeling ontwikkeld om de baan van alle lichtstralen (per golflengte) binnen kas en gewas te simuleren. Voor deze module zijn optische eigenschappen nodig van de bladeren op de diverse hoogten, zoals bepaald in het KAE-project "Fotosynthese-efficiëncie bij verschillende golflengten", en van vruchten en/of bloemen en kasmaterialen. Het spectrum van alle betrokken lampen (SON-T, HP, LED, etc.) zijn in het model ingevoerd. De vele lampen en hun lichtverspreidingspatroon worden in de virtuele 3D ruimte geplaatst en getest. Een validatie van het modelresultaat ten opzichte van lichtmetingen in een praktijkkas voor zowel tomaat (Improvement Centre, Bleiswijk) als roos (De Haaff, Wageningen) komt aan bod om uit te wijzen hoe realistisch het 3D model is.

Als toetsing van het model is een 3D grid van virtuele sensoren in het model geplaatst welke de verdeling van het lichtniveau in de 3D ruimte weergeven.

Fotosynthese:

De fotosynthese is gesimuleerd op basis van de omgevingsfactoren licht (niveau en kleur), temperatuur, CO₂ en luchtvochtigheid. De rekenwijze van een bestaand gewasgroeimodel (Intkam) is gebruikt en ingevoerd in het 3D gewasmodel. Ijking van de fotosynthesemodule is gedaan a.d.h.v. metingen uit dit project en uit het KAE-project "Fotosynthese-efficiëntie bij verschillende golf lengten". Bij toekomstige toepassingen kan het model dan per lichtkleur de fotosynthese berekenen. De fotosynthese-eigenschappen in het model zijn tevens afhankelijk gemaakt van de hoogte en orientatie van het blad binnen het gewas. Een gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd om aan te geven welke parameters in grote mate invloed hebben op de fotosynthese.

2.3 Modelgebruik t.b.v. de praktijk

Scenario's:

Op basis van de wensen van een t.b.v. het project opgerichte gebruikersgroep zijn enkele relevante combinaties van lamptypen, lampposities en gewasstructuur doorgerekend. Deze belichtingsstrategieën staan vermeld in Hoofdstuk 7. Voor deze belichtingsstrategieën zijn in het lichtverdelingsmodel voor de kas bestaande of nauw op de praktijk aansluitende 3D-locaties van de lampen ingevoerd. Daarnaast zijn voor het 3D gewasmodel de varianten voor de gewasstructuur (rijstructuur/padbreedte in tomaat, type gewasmanagement in roos) geprogrammeerd. Vervolgens is de lichtverdeling en –absorptie binnen het gewas en de daaruit volgende bladfotosynthese per strategie berekend en geaggregeerd tot gewasniveau. De resultaten zijn samengevat in termen van lichtbenutting per combinatie van lamppositie, lampkleur en gewasstructuur en van globaal energieverbruik door de gekozen belichting.

Gebruik in de praktijk:

De modelaanpak is beschikbaar voor gebruik in de praktijk bij telers, lampenleveranciers en adviseurs. Er zijn naar wens mogelijkheden om nieuwe strategieën door te rekenen. Hoewel het GroIMP modelleer platform gratis beschikbaar is via internet, is het daarmee ontwikkelde 3D gewasmodel niet direct te downloaden. Voor gebruik van het gewasmodel is het raadzaam eerst contact met de makers op te nemen, omdat: (1) het model vrij complex is en begeleiding nodig is, (2) de gebruiker data moet aanleveren waarvoor overleg (wat & hoe) met de makers nodig is. Als deze zaken in overleg geregeld zijn, is het zelf draaien en wijzigen van scenario's relatief eenvoudig.

3 Structuurmodel

3.1 Inleiding

Voor simulatie van de gewasstructuur van de twee gekozen gewassen (roos en tomaat) is het interactief modellerplatform GroIMP (Kniemeyer, 2008) gebruikt. In GroIMP wordt de taal XL (eXtended L-systems, i.e. een extensie van Java en L-systemen) gebruikt om de rekenregels voor plantopbouw te produceren. Zie voor details de website www.grogra.de. Het gewasmodel voor roos was in rudimentaire vorm al aanwezig sinds 2007. Voor tomaat was geen GroIMP model voorradig en moest vanaf de basis worden opgebouwd. Na constructie van de modellen zijn de parameters gecalibreerd aan de hand van de hieronder gerapporteerde structuurmetingen. Het beoogde resultaat is een nauwgezette simulatie van de opgemeten gewasstructuur op het moment van de meting. Het model is dus statisch, en wordt als vaste structuur in de navolgende berekeningen gebruikt

3.2 Metingen

Gewasopbouw in 3D

Voor roos en tomaat werd elk een bedrijf geselecteerd met een gewas met een representatieve gewasstructuur. Aan deze gewassen werden de structuur en de 3D-positie van alle bovengrondse plantendelen handmatig gemeten m.b.v. gradenboog, waterpas en lineaal. Tweemaal werd met speciale apparatuur (Polhemus Fastrak digitizer) de plantstructuur van tomatenplanten bij het Improvement Centre gemeten.

De handmatig opgemeten gewasstructuur werd gebruikt om het 3D gewasmodel te parametriseren. Er werd ook een inschatting gemaakt van een mogelijke afwijking van deze structuur door op enkele andere bedrijven steekproeven te nemen van enkele snel en handmatig te bepalen essentiële structuurvariabelen, waarbij gekozen is voor bladhoek t.o.v. de horizontaal, de lengte van de bladeren en het aantal stengels per goot.

T.b.v. invoer in het structuurmodel zijn in 2008 en 2009 in totaal 6 gewasopstanden in 3D opgemeten (zie Tabel 3.1. voor details):

1. roos bij een rozenteler te Dongen. Dit betreft het ras Passion. Teelt is continue, dus op elk moment zijn er zowel opgroeiende als oogstbare rozen.
2. roos in de proef van Wageningen Universiteit, locatie Radix, Wageningen. Dit betreft het witbloemige ras Akito, waarbij de teelt synchroon is, i.e. knoppen lopen min of meer synchroon uit en de oogst vindt tegelijkertijd voor de hele afdeling plaats.
3. roos bij een bedrijf te Bleiswijk. Ras is Akito. Teelt is synchroon en mobiel, i.e. de planten bevinden zich op beweegbare goten die op het oogstmoment naar de oogstplek worden gerold.
4. tomaat op proeflocatie Bleiswijk van Wageningen UR Glastuinbouw.
5. tomaat bij het Improvement Centre te te Bleiswijk. Het betreft het ras Komeett. In de afdeling bestaan 3 secties, gescheiden door ondoorlatend scherm, waar SONT (2x) danwel SONT+LED (1x) belichting worden toegepast.
6. roos bij bedrijf Zuurbier te Heerhugowaard. Onderzocht ras is Akito.

Bladbeweging

Tevens werd de dagelijkse variatie van structuur (vooral bladstand) gedurende dagen met verschillend weerbeeld gemeten via camera's (webcams), aangevuld met handmatige metingen. Bij de gevoeligheidsanalyse werden deze variaties getoetst op hun uitwerking op de berekende lichtonderschepping en fotosynthese.

Hiervoor werden op 4 locaties m.b.v. webcams de wijzigingen van de bladstand gevolgd gedurende meerdere dagen:

1. tomaat op proeflocatie Bleiswijk van Wageningen UR Glastuinbouw, 29-aug-08 t/m 5 sept-08. Belicht.
2. roos op proeflocatie Bleiswijk van Wageningen UR Glastuinbouw, proef aan kasdek materiaal dat NIR-straling weg filtert (afd. 4.02) en tevens in de controle-afdeling (afd. 4.03), periode sept t/m nov-08. Inclusief SON-T belichting.
3. tomaat in potten, op proeflocatie Bleiswijk van Wageningen UR Glastuinbouw, periode 12-dec-08 tot heden. Inclusief SON-T belichting.
4. tomaat bij Improvement Centre, periode 12-dec-08 tot 19-dec-08 in SON-T belichte sectie, en van 19-dec-08 tot 26-jun-09 in sectie SON-T + LED (rood+blauw).

Tabel 3.1. Kenmerken van kas en teeltsysteem waarin gewasstructuur is gemeten.

	Roos, WUR Wageningen	Tomaat, WUR Bleiswijk	Rozenbedrijf Bleiswijk	Rozenbedrijf Dongen	Tomaat, IC Bleiswijk
Grootte afdeling (m ²)	144	144	35000	9240	936
Oriëntatie kap	Oost-west	Oost-west	-	-	Noord-zuid
Lampopstelling	2 x 3 m	2 x 4.5 m	7 per 16m tralie	4 per 8m tralie	2.5 x 6 m
Lamptype en W	SON-T (600W)	SON-T (600W)	-(1000W)	-(1000W)	SON-T (1000W)
Plantdatum	25 feb 2008	17 jan 2008	2.5 jaar oud	6 jun 2006	16 okt 2008
Datum opname 3D structuur	3 okt 2008	27 mrt 2008	10 jun 2008	4 jun 2008	27 jan 2009
Plantdichtheid (pl/m ²)	6.5	2.5	9.3	12	2.2
plantafstand binnen rij (m)	0.20	0.50	0.30	0.20	0.55
Onderlinge afstand dubbele rij (m)	0.25	0.50	0.70	1.20 (bedbreedte)	0.50 ca
Breedte tussen dubbele rijen (m)	1.30	1.05	n.v.t.	0.40 (padbreedte)	1.60
Overig	Synchrone teelt		Continue teelt, rolgoten	Continue teelt	

3.3 Aanpak modellering

Het 3D-gewasmodel zoals ontwikkeld in de taal XL bestaat in principe uit een serie tekens die per plant de opeenvolging van plantendelen aan een plantensteel beschrijven. Als de individuele planten binnen het gewas enigszins dezelfde opbouw hebben kan een representatieve, opgemeten plant als uitgangspunt worden genomen. Die plant wordt dan als basis voor alle planten gebruikt, maar met per plant een toegevoegde variatie, zoals gevonden in de structuurmetingen aan een set van planten in de betreffende kas, t.a.v. bijv. bladhoek en internodiën lengte.

Voor de simulaties zijn realistische gewasstructuren noodzakelijk en afgeleid uit 2 uitgebreide datasets (zie metingen), i.e. het tomatengewas in een teelt bij het Improvement Centre (IC) te Bleiswijk en het rozengebas van de Akito-proef bij WUR te Wageningen. Deze proeflocaties zijn gekozen om eventuele herhaling van metingen en oogsten mogelijk te maken, en omdat de klimaatdata en geometrische data van goede kwaliteit zijn.

3.4 Resultaat inbouw gewasstructuur in model

Roos

De structuur van het rozengewas (cv. 'Akito') te Wageningen is gebruikt t.b.v. modeltests en –gevoeligheid. De opname is gedaan 1 dag voordat alle stelen werden geoogst, waardoor het een homogeen gewas met bijna rijpe rozen betrof.

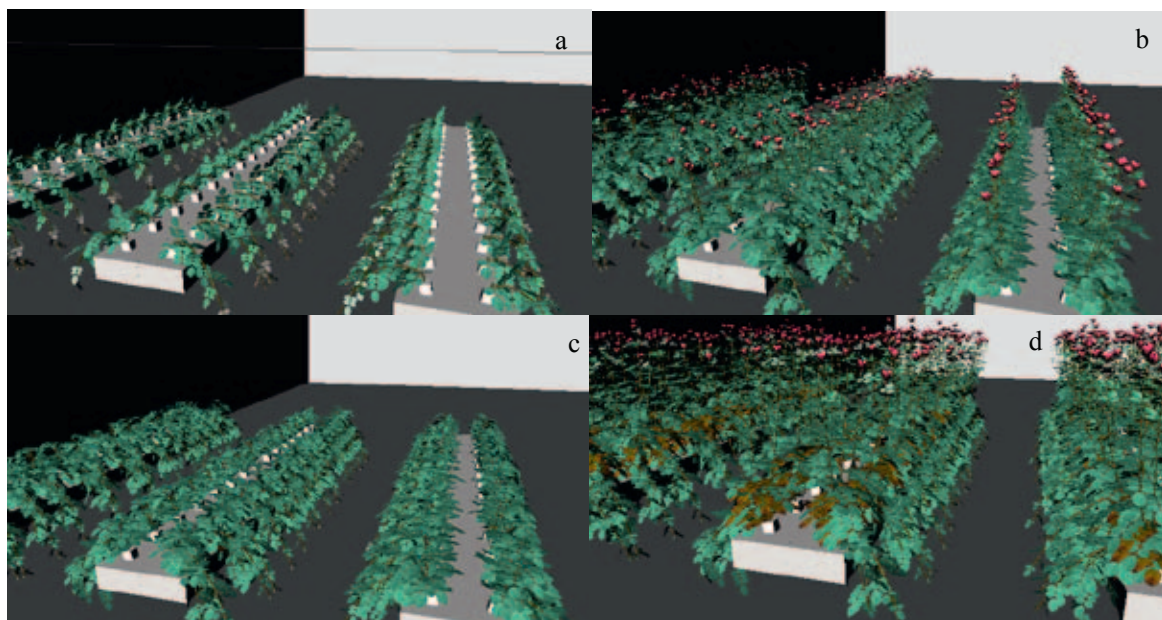
De algemene kenmerken van het gewas waren:

2 stelen per plant, steellengte 77 cm met ca. 1200 cm² blad, bloemgrootte 4.5 cm, 1 ingebogen tak per plant met 2860 cm² blad met 13.3 g drogestof biomassa.

De gemiddelde geometrische kenmerken voor zover in getallen uitdrukbaar:

Phyllotaxis (draaihoek tussen 2 opeenvolgende bladeren, zoals van bovenaf gezien) 135°, aantal zichtbare internodiën per steel is 18, aantal deelblaadjes 5 ± 2 , bladstand t.o.v. horizon $27^\circ \pm 24^\circ$.

Voor de simulatie van de structuuropbouw van het meer dan een jaar oude gewas, moet het model de opbouw van de voorgaande teeltfasen eerst doorlopen. Dit houdt de volgende fasen in: (a) een gewas met scheuten die afgebogen worden, (b) een eerste bloeifase voor alle planten tegelijk, (c) de dan volgende oogst van de opgaande bloeischeuten met behoud van een wat volgroeider gebogen bladpakket, (d) een tweede bloeifase met een reeds hoge LAI. Deze fasen zijn gevisualiseerd in Fig. 3.1



Figuur 3.1. De 4 fasen in de opbouw van het rozengewas zoals gebruikt in de verdere lichtsimulaties.

Tomaat.

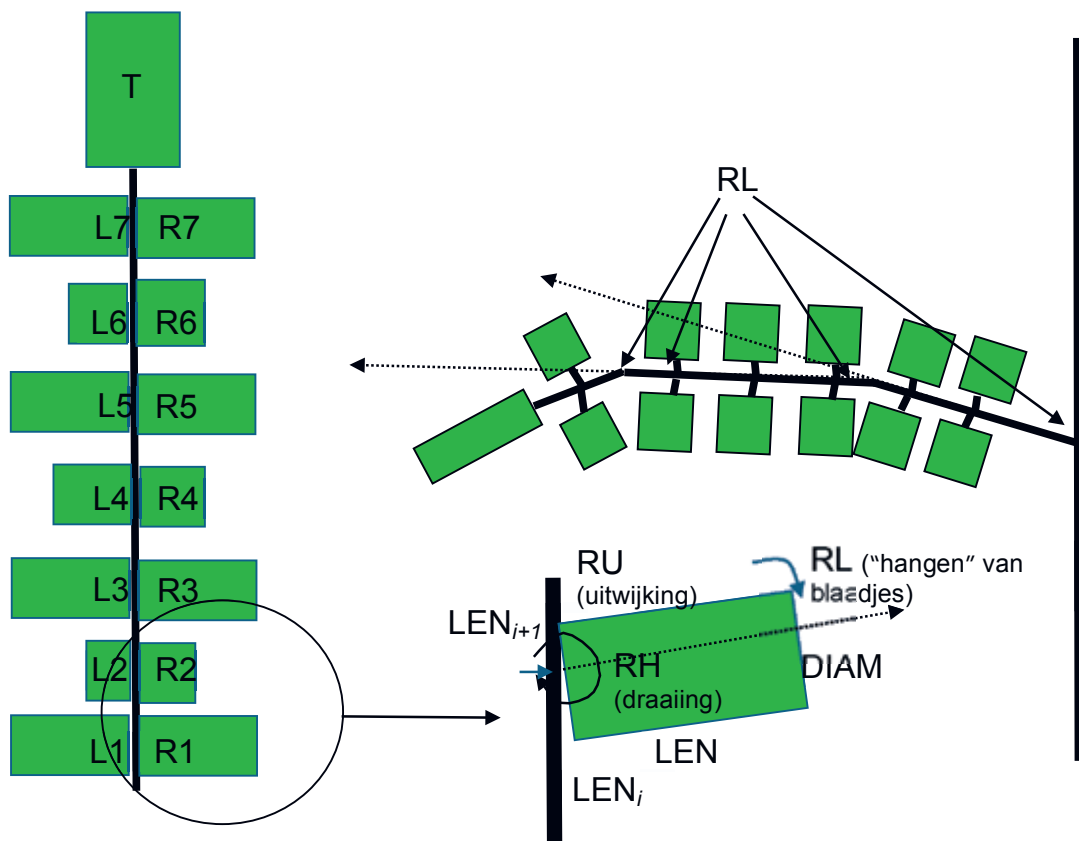
Algemene, gemiddelde plantkenmerken:

De planten waren ca. 4.5 m hoog, telden 28 internodiën, 7 trossen. Bij de helft van de planten ontsprong een extra steel bij het 8^{ste} internodium (vanaf de top geteld).

De gemiddelde geometrische kenmerken:

Phyllotaxis 185°, bladhoek deelblaadjes (zie Fig. 3.2) t.o.v. horizon 45°, bladlengte uitgegroeid blad was 43 cm.

Van het complexe tomatenblad is het gemiddelde aantal (15) deelbladeren gemodelleerd, waarbij elk deelblad bestaat uit een rechthoek (parallelogram). Hieronder is schematisch weergegeven hoe deze geometrie in het model verwerkt is:



Figuur 3.2. Schematische weergave van de opbouw van een samengesteld tomatenblad zoals gebruikt in het structuurmodel. RL, RU en RH zijn gemeten hoeken, LEN opgemeten steellengten.



Figuur 3.3. Modelvisualisatie van een deel van het tomatengewas.

3.5 Resultaat webcam opnamen bladstand

De webcam opnamen zijn verwerkt in filmpjes volgens het scr-format. De metingen bij roos laten zien dat de bladeren en stelen geen beweging vertonen, behalve het vlagblad dat bij sterke wisseling van lichtomstandigheden kort op en neer gaat. Verder is bij roos wel gevonden dat de opgroeiende scheuten wat draaien en elkaar verdringen tijdens de groei. Bij tomaat werd op vrijwel alle dagen een lichte opwaartse en vervolgens met een roterende beweging terug omlaag gevonden in vrijwel al het niet volgroeide blad. Er is nog geen koppeling gelegd met klimaatcondities. De waarnemingen aan tomaat komen overeen met de eerdere webcam-opnamen aan tomaat door Hortimax die op ad-hoc basis een webcam hadden geplaatst bij een afdeling van het Improvement Centre te Bleiswijk.

4 Lichtmodule

4.1 Methode

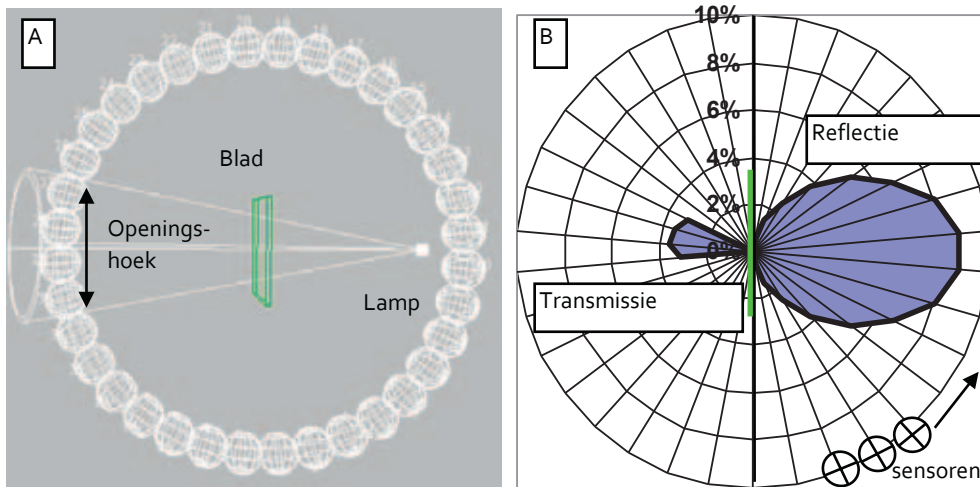
4.1.1 Basiskenmerken lichtmodel

Algemeen

In het software platform GrolMP wordt de “inverse path tracer” gebruikt om de lichtval in het gewas te simuleren. In elke simulatiestap wordt hiervoor m.b.v. een Monte Carlo steekproef een grote reeks lichtstralen op de 3D structuur afgevuurd, waarbij het aantal lichtstralen (bijv. 10.000.000) te verhogen is om een grotere accuratesse van de simulatie te bereiken. Een tweede optie in de Monte Carlo aanpak is het aantal te berekenen reflecties: standaard wordt de lichtstraal tot maximaal 10 reflecties gevolgd, maar het aantal kan desnoods verhoogd worden. Hierbij gaat dan de rekentijd niet significant meer omhoog, want de rekentijd is vooral afhankelijk van het aantal stralen en niet van het aantal reflecties.

Testen optische eigenschappen van objecten met deelmodel

Een virtuele laboratoriumopstelling is geconstrueerd om de transmissie en reflectie van modelobjecten te testen (Fig. 4.1). In een zwarte, lichtabsorberende doos van 1x1x1 m schijnt een puntlichtbron loodrecht op een proefvlak met de te testen textuur/shader. Het proefvlak staat exact in het midden van een cirkel met 36 ronde lichtsensoren. Bij 100% doorlatendheid danwel reflectie registreert de sensor direct achter resp. tegenover het proefvlak een lichtniveau van $1000 \mu\text{mol cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. Standaard bestaat het proefvlakje uit een parallellogram van 25x25 cm, maar indien voor de kas-simulatie vlakken met bepaalde dikte worden gebruikt testen we met een box van 25x25xdikte_object (cm).



Figuur 4.1. Testopstelling BINNEN HET MODEL voor studie reflectie en transmissie van een blad. A, model setup met lichtbron, groen bladoppervlak en 36 sensors; B, Gesimuleerd lichtnivo per sensor als percentage van intensiteit loodrecht opvallend licht.

4.1.2 De Virtuele Kas

De gesimuleerde kas-gewas opstelling is als volgt:

Kas:

Kap, zijwanden en vloer van de kas worden beschreven als platte boxen met een dikte van 4 mm conform de gebruikte afdeling (in IC bijv. zijwanden van 7.7m hoog en 35m lang). Hun optische eigenschappen (kleur volgens RGB, i.e. red-green-blue verhouding), reflectie, transmissie, absorptie) zijn vastgelegd in een zogenaamde RGBA shader na calibratie op de gemeten waarden (in de database van WUR Glastuinbouw) in de virtuele testopstelling (zie Fig. 4.1). Op kasvloer aanwezige objecten zijn: steenwolmatten, steenwolblokjes en druppelaars (alleen bij roosmodel). Voor de steenwolmat is aangenomen dat de optische eigenschappen gelijk zijn aan die van wit plastic.

Gewas:

Het gesimuleerde gewas in het model is opgebouwd vanaf een steenwolmat (witte box). Afhankelijk van het doel van de simulatie kan een groeiend gewas (roos) of een statisch gewas in een bepaald ontwikkelstadium (tomaat, roos) worden berekend.

4.1.3 Licht en gewas

De optische eigenschappen van de blaadjes van roos en tomaat zijn gemeten met een Perkin-Elmer spectrograaf. Hiertoe werden blaadjes direct na de oogst (roos) of na transport in koelbox (tomaat) in de spectograaf doorgemeten op reflectie en transmissie m.b.v. een halfronde, sferische lichtmeter in het golflengtebereik 330 tot 800 nm in intervallen van 1 nm. De absorptie werd berekend als resultante van lichtdosering minus reflectie en transmissie. Bij roos onderscheidde we groen blad en roodgroen blad, bij tomaat bladeren die aan hoog danwel laag licht geadapteerd waren (voor details zie Snel *et al.*, 2011).

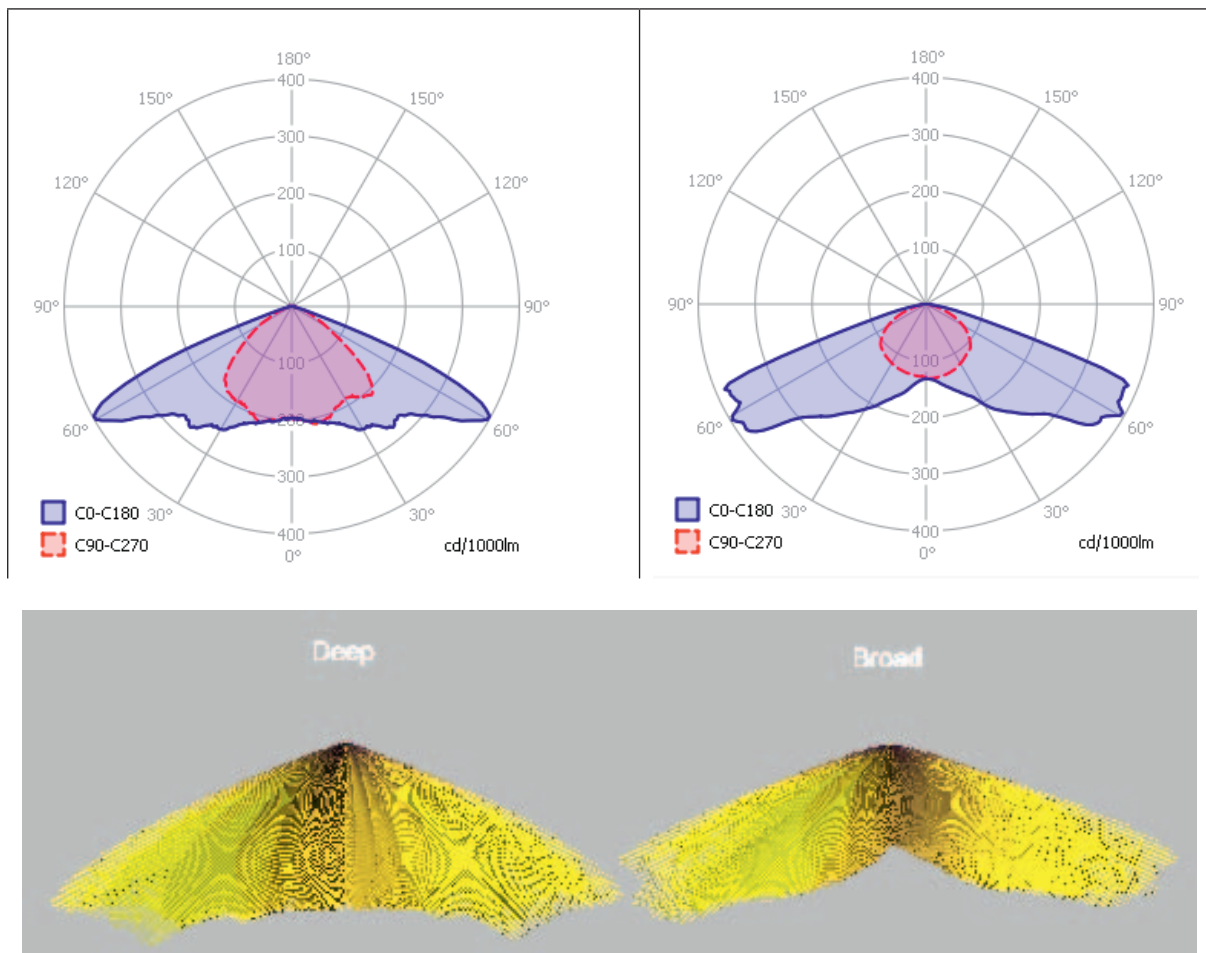
4.1.4 Lamplicht

Lamptypen

Er kunnen verschillende lamptypen gesimuleerd worden. Deze lampen variëren van zeer theoretische typen tot realistische, gecalibreerde exemplaren. De theoretische typen zijn puntlicht, spotlicht, oplichtend vlak. De realistische, bestaande lampen, zoals bv. een specifieke SON-T lamp, worden vanuit een spotlicht opgebouwd maar dan voorzien van een gemeten lichtverdelingspatroon. De voor dit project die zo geconstrueerde, bestaande lampen zijn:

1. SON-T, met diepstraler ("deep") reflector en HS2000 armatuur van Hortilux
2. SON-T met breedstraler ("broad") reflector en HS2000 armatuur
3. LEDs van Philips

De lichtdistributie van deze lampen is op basis van een zgn. LDT-bestand, verkregen van Hortilux, of een IES-bestand, verkregen van Philips, nagebootst. Hiervoor is in GroIMP een puntbron (= "spotlight") gebruikt, waaraan het LDT-lichtverdelingspatroon is gekoppeld. Deze lichtverdeling moet als projectie van licht op een bol rondom de lamp gezien worden. Het bevat de relatieve lichtniveau's in 36 intervallen van 10 booggraden in alle windrichtingen, en per graad t.o.v. azimuth (van vloer tot bovenaan hemel, i.e. in azimuth), en is als matrix opgegeven in de XL-code.



Figuur 4.2. Opgegeven en gesimuleerde lichtdistributie door de gebruikte SON-T lampen van Hortilux. Links, diepstraler; rechts, breedstraler.

Vervolgens is de lichtintensiteit van de lamp berekend door het vermogen in Watts te vermenigvuldigen met 0.35 (ca. één derde van vermogen wordt omgezet in zichtbare straling, vertaald in aantal $\mu\text{mol PAR}$, en dan te verdelen over de relatieve intensiteit per 10 booggraden en 10-graden “windrichting” interval. Vervolgens zijn tests met het model uitgevoerd t.a.v. de afname van het lichtniveau per cm^2 met afstand tot de lamp.

Lichtplan

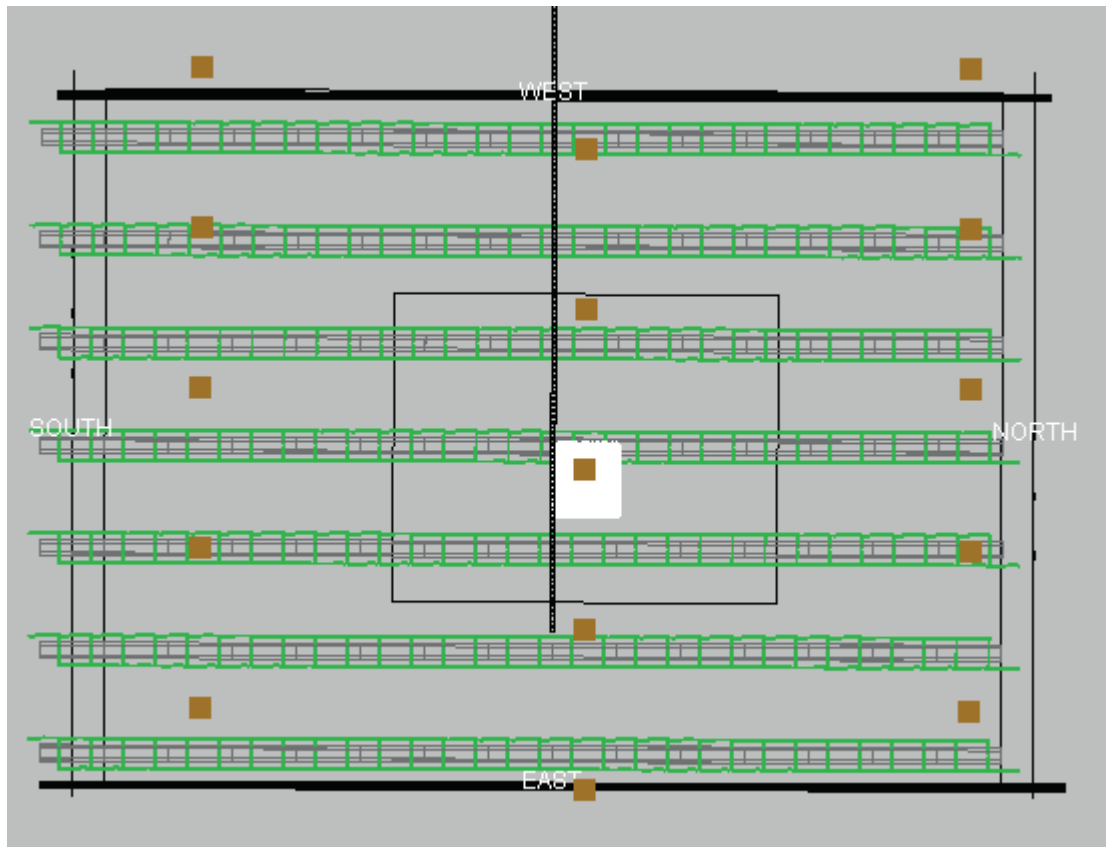
In elke gesimuleerde kas wordt de locatie van de lampen bepaald via het opgegeven lichtplan. Hierbij zijn de volgende lampkenmerken van belang:

Hoogte boven de vloer, lampverband (vierkant, driehoekig, e.d.), afstand tussen lampen in een rij en tussen rijen, lamporientatie.

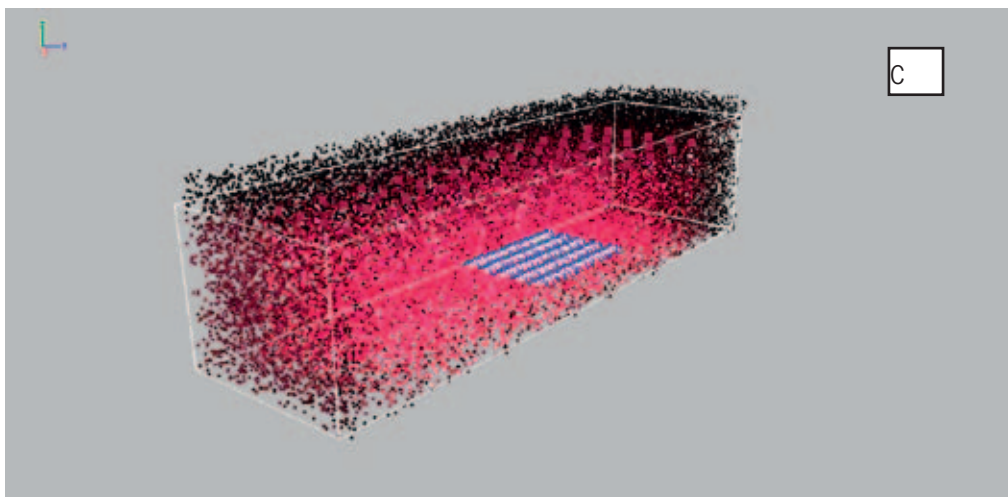
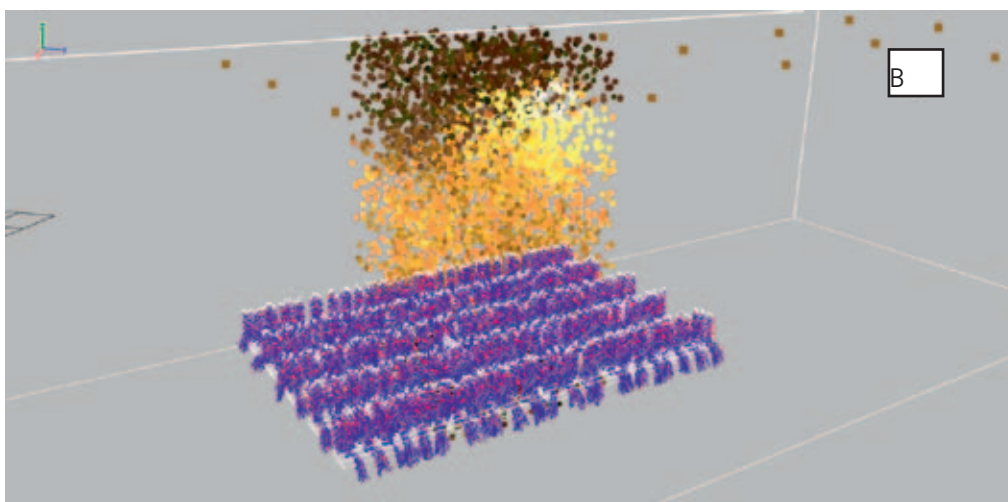
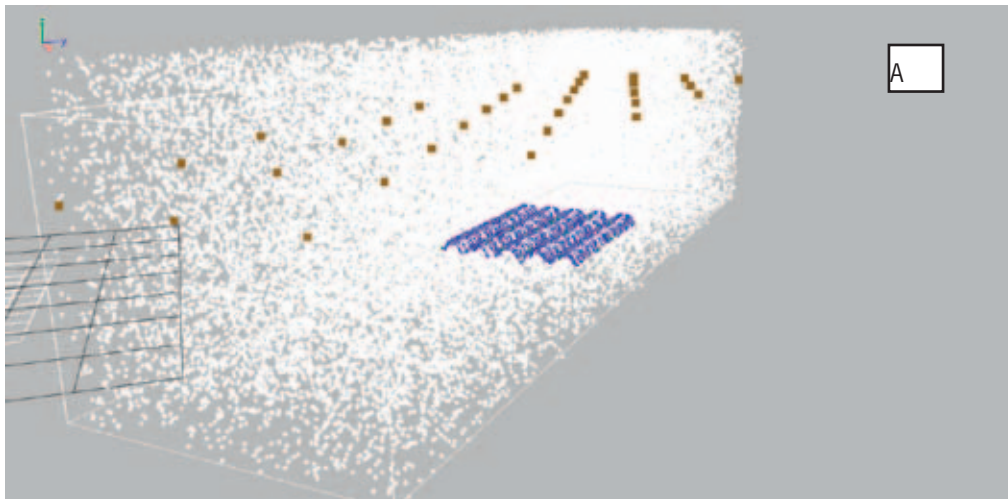
Indien voor de bewuste kas het lichtniveau is gemeten wordt dit benut om het gesimuleerde lichtniveau te verifiëren, en wordt het lampvermogen zo nodig bijgesteld. Bij het gemeten lichtniveau is het van belang onder welke omstandigheden (met/zonder gewas, overige lichtbronnen) en met welke sensoren (punt- of lijnsensor, kleurgevoeligheid) is gemeten.

4.1.5 Validatie van lichtmodule

De uitkomst van de lichtmodule werd geverifieerd voor (a) de kas- en gewasstructuur bij het tomatengewas bij het Improvement Centre d.d. 27 jan 2009, en voor (b) de structuur zoals gemeten bij Akito-roos bij WUR in Wageningen d.d. 2 okt 2008. Hierbij werden de metingen met de sunscan lichtmeter (tomaat) en de Licor spectrofotometer (roos) in het model met virtuele sensoren nagebootst (zie Fig. 4.4).



Figuur 4.3. Opstelling waarmee lichtverdeling binnen tomatengewas werd gesimuleerd voor de validatie en voor diverse scenario's. Bruine blokjes: SONT-lampen; lichtgroen: steenwolmat met groene plantstelen; witte blok in midden: een opeengepakte verzameling van ronde, doorzichtige lichtsensoren; rechthoek in midden kas: zwart, licht-absorberend vlak t.b.v. ijking; zwartomlijnde vlakken: kaswanden en kasdek.



Figuur 4.4. Weergave van het licht zoals waargenomen door virtuele sensoren, random in het model geplaatst. A – afbeelding van de sensoren zonder lichtberekening, B – een SONT-lamp wordt door de sensoren waargenomen, C – lichtverdeling van een gesimuleerde LED-belichting wordt weergegeven door de sensoren.

4.2 Resultaten bouw lichtmodule

4.2.1 De Virtuele Kas

De optische eigenschappen van alle objecten in de kas zijn m.b.v. de zogenaamde RGBA (Red Green Blue Alpha) shaders in het model vastgelegd. Deze shaders zijn geheel instelbaar qua kleur (rood, groen, blauw), reflectie en transparantie (Alpha channel) voor zowel diffuus als direct licht. De waarden voor rood, groen en blauw zijn bepaald a.d.h.v. spectrale metingen (voor blad en stelen) of opgelegd (100% rood voor rijpe tomaat en bloem roos). De overige objecten waren of zwart (druppelleiding), wit (scherm) of in grijs tint. Na vastlegging van de RGB-kleurwaarden is met de grijswaarde (0 = donker, 1 = licht) de PAR (totaal van R+G+B) geijkt. Hierbij zijn de volgende geijkte grjswaarden en daarmee berekende transmissie/reflectie t.a.v. PAR gerealiseerd:

Tabel 4.1. Grijswaarde en gesimuleerde transmissie en reflectie van PAR-licht van enkele kasobjecten.

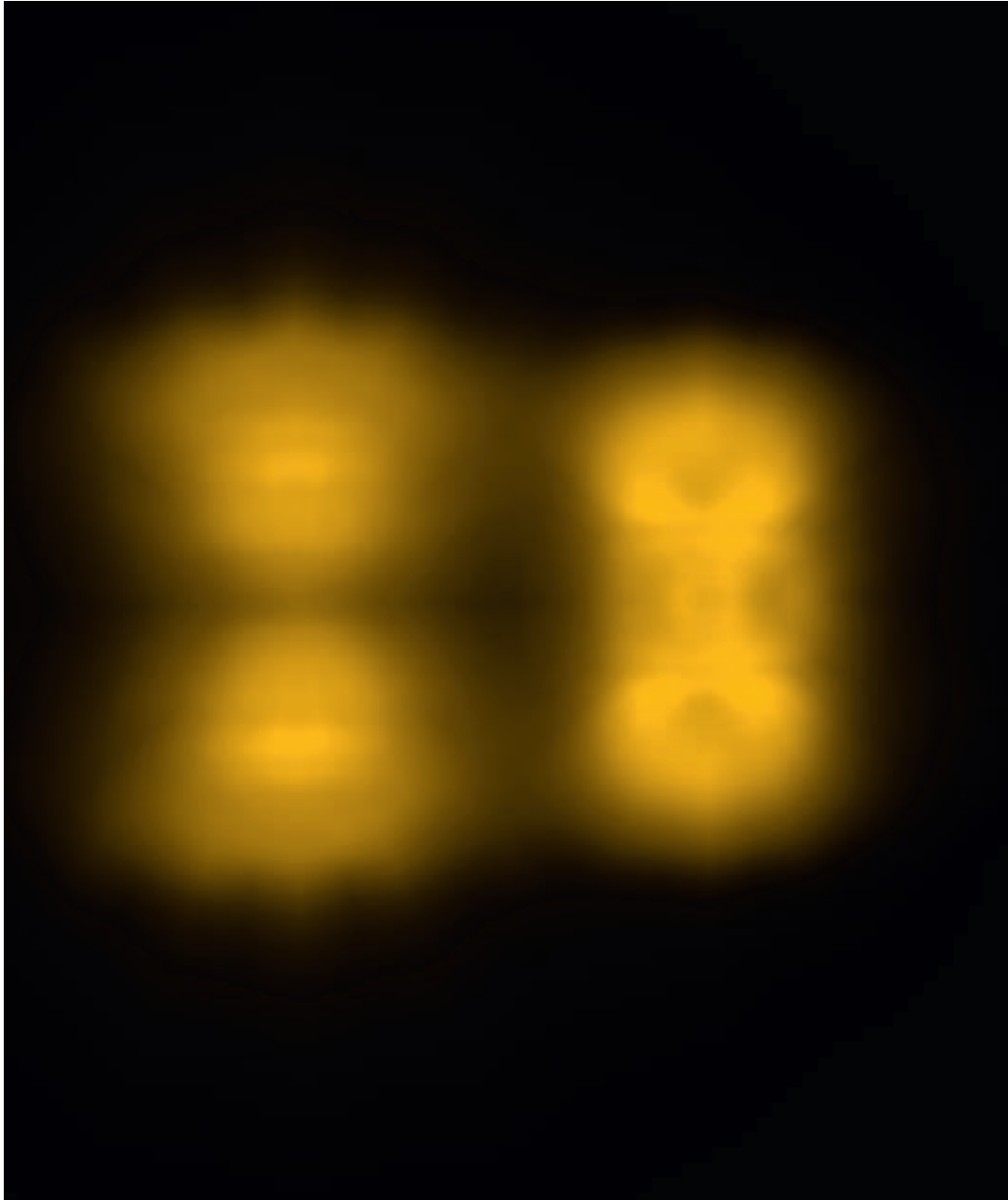
	Grijswaarde	Transmissie (%)	Reflectie (%)
Kasdek incl. constructie:	0.85	64.7	8.3
Zijwanden kas:	0.784	55.6	11.3
Betonnen kasvloer:	wit	0.0	40.0
Energiescherm	wit	0.0	40.0
Blad & vrucht tomaat:	0.22	3.3	8.4
Blad roos:	0.28	5.7	6.6

De overige objecten waren of vaalwit (substraatmatten) of zwart (druppelleiding, grond buiten kas) wat 40% reflectie (gelijk aan schermdoek) resp. 100% absorptie bewerkstelligde.

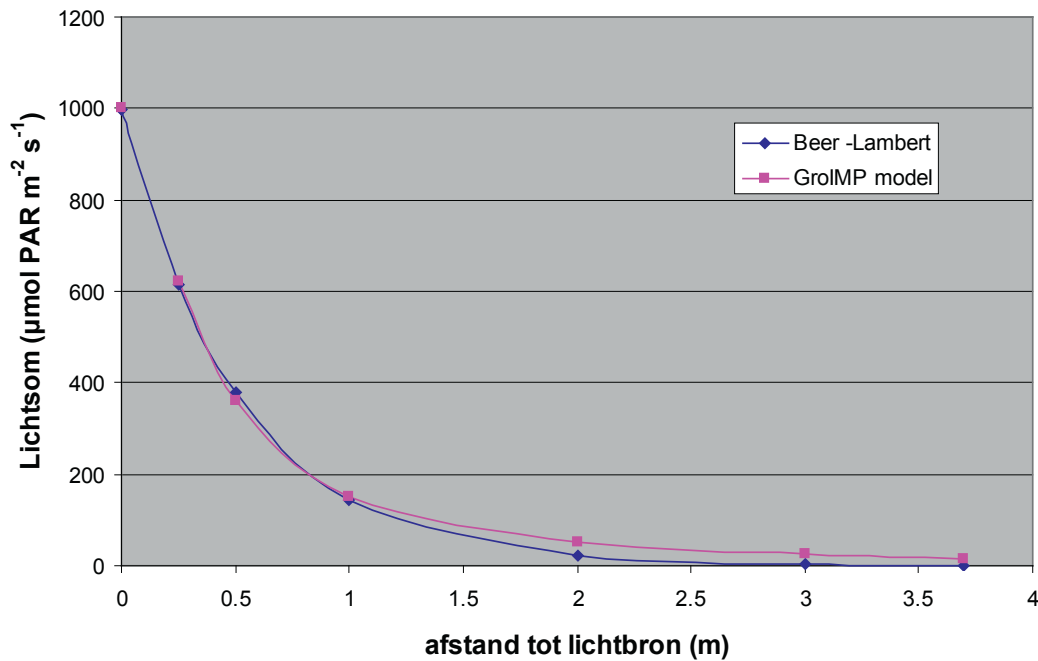
4.2.2 Simulatie lamplicht

Het patroon van het SON-T licht op de kasvloer heeft een ovale, bijna rechthoekige vorm (Fig. 4.5). Overeenkomst met het opgegeven stralingspatroon (Hortilux) wordt hiermee benaderd.

Naast de vorm is de afname van de belichtingssterkte met de afstand modelmatig getest met een eenvoudige opstelling, i.e. een SON-T lamp en een oneindig groot vierkant vlak met 100% absorptie als sensor. De resultaten laten een afname zien conform de wet van Lambert-Beer (Fig. 4.6).



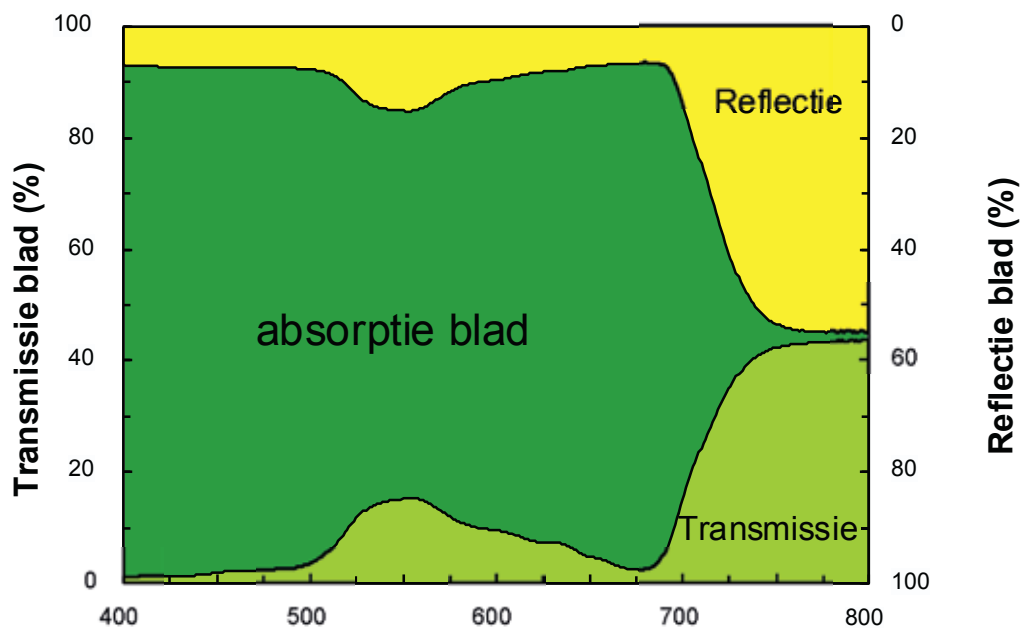
Figuur 4.5. Simulatie van lichtverdeling op vloeroppervlak door virtuele SON-T lampen (breedstraler, links, en diepstraler, rechts) op 4 m hoogte.



Figuur 4.6. Lichtsom als functie van afstand tot 1 SONT lichtbron volgens wet Lambert-Beer en lichtmodel.

4.2.3 Lichtkleur en gewas

De golflengte afhankelijke absorptie, reflectie en transmissie zijn voor intervallen van 30 nm afgeleid uit de metingen (Fig. 4.7, voor roos). Met behulp van de gemodelleerde testopstelling (Fig. 4.1) zijn de shaders per lichtkleur geijkt. Voor tomaat is het verloop van de optische eigenschappen als functie van de golflengte globaal hetzelfde als die voor roos in Fig. 4.7 (data niet getoond). Deze data zijn in getallenreeksen in het GrolMP 3D model gezet.



Figuur 4.7. Percentage absorptie, reflectie en transmissie van invallend licht, in afhankelijkheid van de golflengte, gemeten voor groen blad van roos 'Akito'. (Bron: J. Snel, WUR Glastuinbouw).

4.2.4 Validatie

Het 3D lichtmodel is geverifieerd voor vergelijking van meting en modelresultaat bij een tomaten- en een rozengewas. Bij de validatie zijn de volgende kenmerken als invoer gebruikt en dus niet berekend:

- geometrie van kas en lampopstelling
- lichtniveau direct boven het gewas
- 3D-structuur van het gewas
- optische eigenschappen blad

Tomatengewas bij Improvement Centre

Op 27 januari 2009 werd om 15.00 uur buiten de kas 114 W diffuus en 20 W direct zonlicht gemeten door de lichtmeter van het Improvement Centre. Deze input resulteerde binnen de kas in een PAR niveau van $170 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ op 4.8 m hoogte. Daarnaast droeg de PAR van de SONT-lampen nog $130 \mu\text{mol m}^{-2}$ bij. Het gesimuleerde verloop van het PAR-niveau met de diepte in het gewas is voor tomaat goed vergelijkbaar met de meting (Fig. 4.8).

Tevens is de horizontale variatie in lichtniveau vergeleken tussen model en meting. Het blijkt dat verloop en niveau tussen meting en simulatie redelijk kloppen (zie een gemeenschappelijke publicatie: Sarlikioti et al., 2011).

Rozengewas bij WUR-Wageningen

Bij roos is het gesimuleerde verloop van de PAR vergelijkbaar met de metingen (Fig. 4.9). De metingen gaven al aan dat er binnen het gebogen bladpakket weinig variatie in lichtniveau optrad, terwijl met de hoogte in de opgaande bloeischeuten het PAR-niveau geleidelijk toenam. De modelvoorspelling valt binnen de meetafwijking, behalve op grotere hoogte binnen de opgaande scheuten.

Simulatie van het verloop met gewasdiepte van een aantal lichtkleuren laat een naar verhouding minder sterke uitdoving van het groene licht zien in verhouding tot rood en blauw, en onder het gewas is de lichtkleur slechts groen. Dit komt overeen met de metingen (zie Snel et al., 2011).

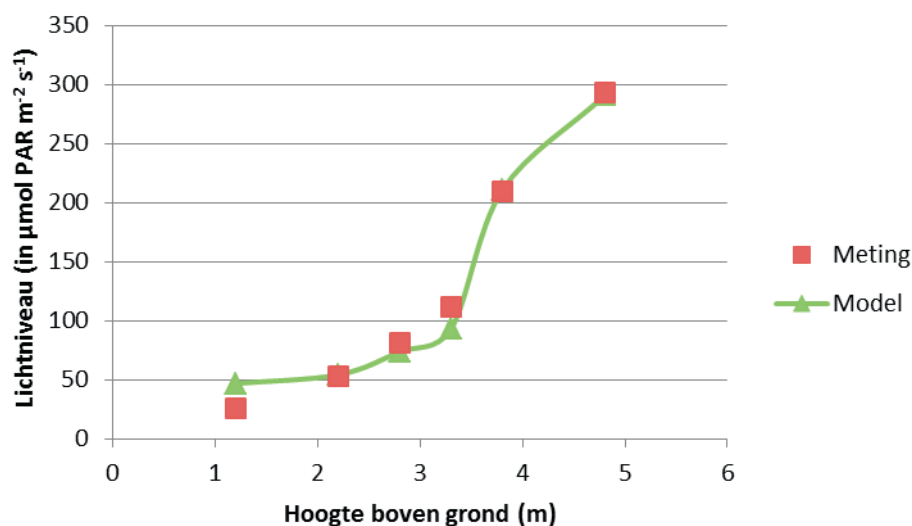
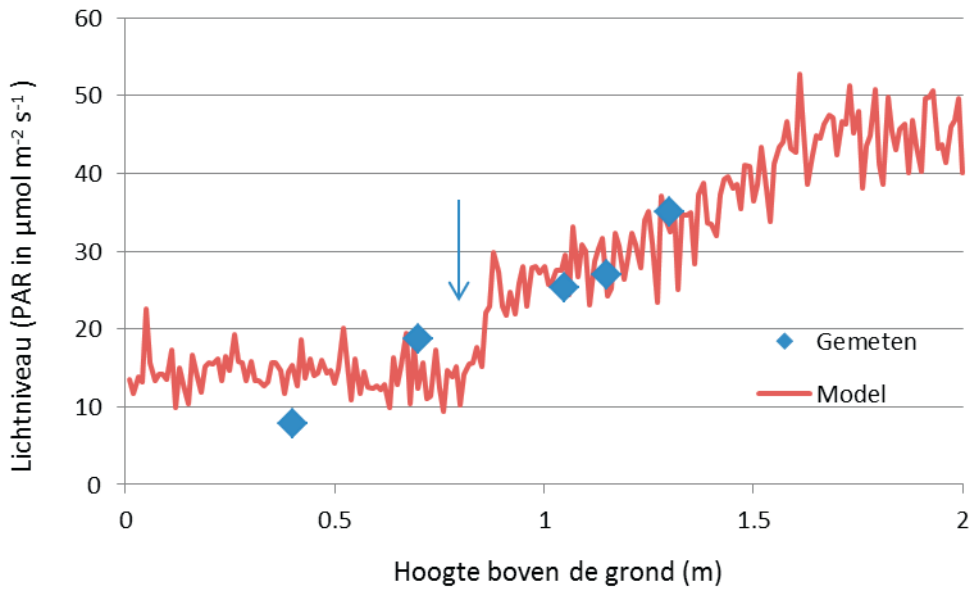


Fig. 4.8. Validatie van gesimuleerde PAR intensiteit (t.o.v. boven het gewas gemeten, i.e. $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) aan de metingen bij het tomatengewas bij het Improvement Centre, 27 jan 2009. De R^2 bedraagt 0.96



Figuur 4.9. Gemeten vs. gesimuleerde relatieve lichtniveaus in het rozen­gewas. Metingen zijn verricht met een Perkin_Elmer spectrometer voorzien van een ronde sensor op 2 oktober 2008 om ca. 14.00 uur bij diffuus licht, met de SONT lampen aan, op 5 hoogten in het gewas. De pijlen geven de positie van de steenwolmat (links) en de top van het gewas (zie rechterpijl) aan. Simulaties zijn gemiddelde waarden afkomstig van in totaal 10,000 random verdeelde virtuele sensoren, met een resolutie van 1 cm (50 sensoren cm^{-1}).

4.3 Conclusies

De lichtverdelingen in het tomaten- en rozen­gewas worden door het model correct nagebootst voor de gebruikte afdelingen (in het Improvement Centre en de kas bij WUR De Haaff respectievelijk). In beide gewassen overschat het model het lichtniveau onderin het gewas. Dit betreft vooral het diffuse zonlicht, want van het directe licht van SONT en zon resteert daar slechts ca. 4% van de input. Van belang is dat de validatie het modelonderdeel 'lichtverdeling' betrof: het structuurmodel werd hiermee niet gecheckt, want de gewasstructuur van de betreffende afdeling is als invoer gebruikt. Als we echter aannemen dat de gewasstructuur niet afweek van die bij andere bedrijven kan deze voor de sector worden gebruikt t.b.v. belichtingsberekeningen.

5 Fotosynthesemodule

5.1 Inleiding

De werking van fotosynthese bij planten is reeds decennia bekend, en deze kennis is al sinds een kleine 30 jaar in rekenmodellen vervat. Het gebruik van dergelijke rekenregels in 3D modellen voor planten is echter pas zeer recentelijk gestart. Voor kasgewassen was hiervoor tot op heden geen model voorradig.

Naast incorporatie van bestaande fotosynthese-rekenregels in het 3D-model, is in de hieronder gerapporteerde module ook een afhankelijkheid voor lichtkleur ingebouwd.

Wijziging of adaptatie van fotosynthese eigenschappen van blad of gewas als gevolg van een specifieke behandeling vallen buiten het bestek van dit onderzoek, net als de adaptatie aan een bepaalde lichtkleur door bijv. LEDs.

De samengebundelde modules lichtverdeling & fotosynthese in het virtuele plant model worden in een volgend hoofdstuk aan een gevoeligheidsanalyse onderworpen.

5.2 Methode

Metingen

De data t.a.v. de licht-respons curve voor tomaat zijn ontleend aan de metingen binnen het KAE-project Lichtverdeling (zie Dueck *et al.*, 2010a) aan dezelfde cultivar ('Komeet') in dezelfde kasafdeling, maar dan in de voorgaande teelt, in maart 2007.

De licht-respons curve is voor de 'Akito'-roos bepaald in oktober 2009 aan bladeren van verschillende leeftijd, samenhangend met de hoogte in het gewas. Het betrof de bladeren in het ingebogen bladpakket (licht-geadapteerd en schaduw-geadapteerd) en 3 hoogten in de opgaande scheut (onder, midden, top). De fotosynthese werd gemeten met een ADC-meter, per blad voor PAR-waarden van 0 tot 1200 μmol , bij 21 °C, en bij 3 CO₂-waarden van 400, 600 en 800 ppm.

Modelbouw

Als fotosynthesemodel in het 3D model is uitgegaan van het model van Kim & Lieth (2003) aangezien dit de respons van fotosynthese op licht, temperatuur, CO₂ en luchtvochtigheid adequaat en robuust berekend op basis van wetenschappelijk geaccepteerde rekenregels. De gemeten licht-respons curven zijn gebruikt om de waarden voor de fotosyntheseparameters van het Kim & Lieth model te berekenen. Dit geschiedde door via een calibratieschil om het fotosynthesemodel itererend (i.e. zeer vele reruns uitvoeren) het kleinste verschil tussen geobserveerde en gesimuleerde waarden voor de bruto fotosynthese te vinden door aanpassing van de parameterwaarden voor J_{max} , V_{cmax} , α en θ .

Het model is uitgebreid met gevoeligheid voor lichtkleur door de waarde voor α (kwantumefficiency oftewel electronenlevering per foton) niet voor PAR maar voor elk golflengte-interval apart in te voeren. Hiervoor is de zgn. McCree curve gebruikt zoals recentelijk gemeten voor het betreffende rozenras 'Akito' en tomatengewas (cv. Komeet) (Snel *et al.*, 2011).

Uit hetzelfde project is de lichtkleur-afhankelijke lichtabsorptie gebruikt (zie Fig. 4.7) door de bladobjecten in het model de gemeten absorptie-eigenschappen toe te kennen. Zo kunnen absorptie en kwantumefficiency elkaar versterken t.a.v. fotosynthese (bv. hoge absorptie EN hoge efficiency) of tegenwerken (bv. hoge absorptie en lage efficiency).

Uit de metingen bleek verder dat de bladeren op verschillende posities in het gewas verschillende maximale fotosynthesecapaciteit (J_{max}) hebben, en dat deze afhankelijk is van de bladrang van de opgaande scheuten. Een uitzondering vormt het ingebogen bladpakket, dat globaal is verdeeld in 2 klassen van fotosynthesecapaciteit, i.e. lage en hoge capaciteit voor oude en jonge bladeren respectievelijk.

5.3 Resultaten

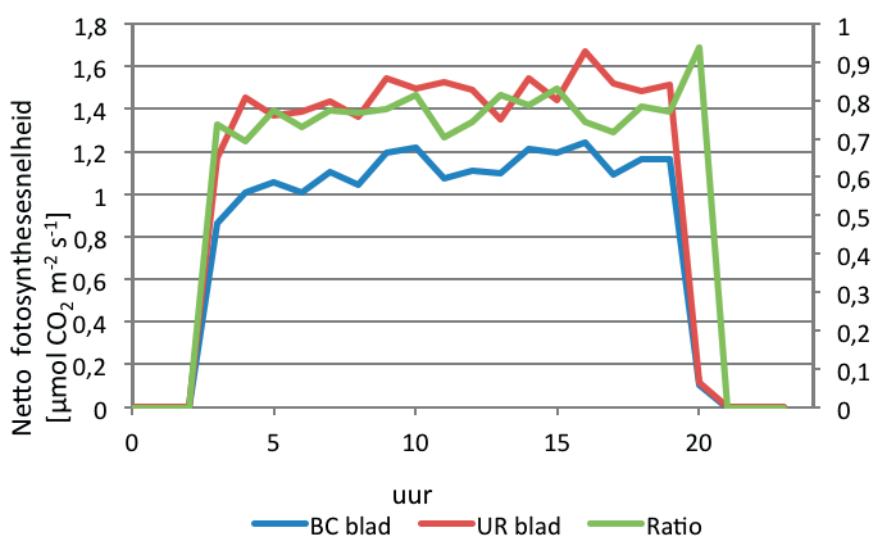
De gemeten lichtrespons voor roos laat zien dat boven $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PAR voor 400 en 600 ppm CO_2 er geen verdere verhoging door PAR van de fotosynthese optreedt (dus, CO_2 is limiterend), en voor 800 ppm slechts in lichte mate. In Tabel 5.1. zijn voor roos en tomaat de gecalibreerde waarden alsmede bladlocatie-afhankelijkheid van de J_{max} -waarde vermeld. Deze lokatie-afhankelijkheid is in het model verwerkt door aan elk blad per hoogte een andere "rang" toe te wijzen, en daar de voor die hoogte gemeten parameterwaarden aan te koppelen.

Tabel 5.1. Gecalibreerde waarden van de parameters van het Kim & Lieth fotosynthesemodel voor PAR, bij 25°C . Afhankelijk van relatieve rang n van het blad kan voor elk blad de J_{max} worden berekend, bij roos: $J_{\text{max}_n} = 174.6 \cdot (n \cdot 3)^{0.417}$

	J_{max}	V_{cmax}	Alpha	Theta
ROOS:				
Opgaande scheut: Top	179	79	0.53	0.49
Opgaande scheut: Midden	127	54	0.46	0.82
Opgaande scheut: Onder	107	45	0.43	0.83
Ingebogen licht	102	45	0.50	0.77
Ingebogen schaduw	67	31	0.38	0.56
TOMAAT:				
Top	200	120	0.48	0.727
Midden	150	85	0.42	0.828
Onder	100	45	0.34	0.878

Per MJ inkomende straling wordt voor tomaat meer drogestofproductie berekend (ca. 2.5 g) dan voor roos (2.0 g). Hoewel de fotosynthesemodule is geparametriseerd om deze conversie-efficiëntie te halen, is deze controle achteraf van belang voor de juiste werking van het model. Deze productieniveaus zijn realistisch en dit betekent dat het model na de modelaanpassingen t.a.v. het gebruikte gewas en de lichtkleur-gevoeligheid voor het hele spectrum bij gebruik van SON-T lampen een realistische productie kan simuleren.

De gevoeligheid van de berekende fotosynthese voor gewasstructuur en voor het type belichting worden in hoofdstuk 6 behandeld.



Figuur 5.1. Gesimuleerde netto assimilatiesnelheid van blad van opgaande (UR) en gebogen takken (BC) gedurende 1 dag (2.10.2008). De rechter Y-as geeft de waarde van de ratio UR/BC aan.

6 Gevoeligheidsanalyse

6.1 Methode

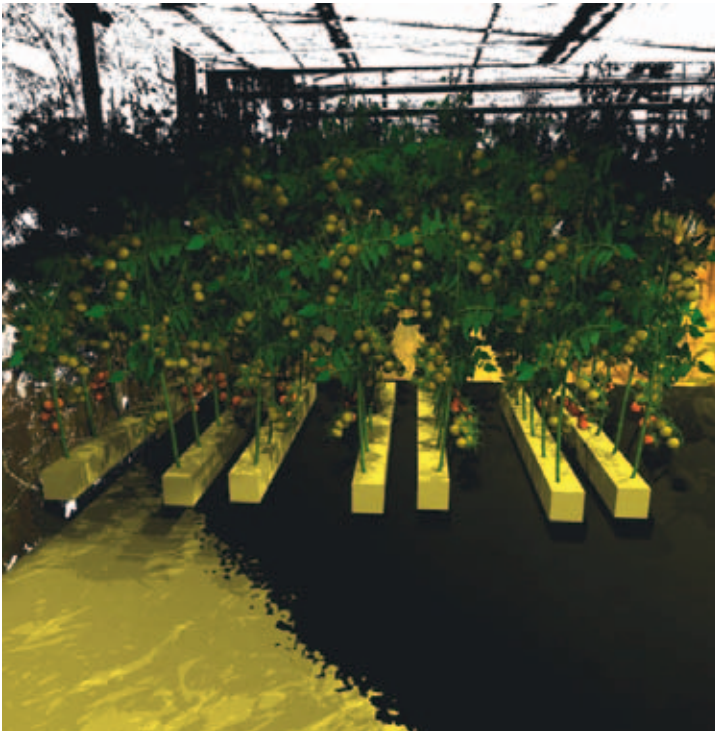
Het lichtmodel bevat veel parameters, die elk hun standaardafwijking kennen (o.a. lichtabsorptie door blad, bladstand). Daarnaast zijn enkele instellingen arbitrair en kunnen ook een andere waarde hebben (bijv. lamppositie, plantafstand, maar ook aantal reflecties in model). De modelgevoeligheid is getest door de meest belangrijk geachte parameterwaarden te variëren, om daarmee het aantal simulatieruns beperkt te houden. We hebben gekozen voor:

- aantal berekende reflecties/weerkaatsingen in model (5,7,9,...,19)
- aantal lichtstralen in Monte Carlo procedure (100.000....50.000.000) bij 10 reflecties
- lamppositie: boven plantrij en boven pad, op verschillende hoogten (3.3, 4.3, 5.3 en 6.3 m)
- lampkleur: per 50 nm interval in het PAR gebied getest
- kleine en grote spreiding in bladstand bij hetzelfde gemiddelde

De modelgevoeligheid voor deze variaties is getest t.a.v. 2 outputvariabelen: lichtinterceptie en drogestof productie van het gewas.

Gebruikte uitgangssituatie:

- Tomatengewas in het Improvement Centre d.d. 27 januari 2009, met 2.27 planten m²
- Elke 2^{de} plant heeft een extra stengel bij 8^{ste} internodium vanaf de top
- 24 planten op twee dubbele rijen en 2 randrijen zowel links als rechts
- Lichtval en drogestof productie bepaald aan de binnenste planten in de binnenste twee dubbele plantrijen (zie Fig. 4.3), i.e. aan 18 planten
- 1 SON-T lamp 600W op 6.3 cm hoogte boven de plantrij, met oranje licht (RGB 233-210-35), lichtverdelingsfunctie volgens LDT-data (zie §4.2.2)
- Lichtrespons curve volgens metingen in KAE-project Dueck *et al.* (2010a).



Figuur 6.1. Virtueel tomatengewas zoals gebruikt voor de gevoeligheidsanalyse. Lampen hingen boven de dubbele plantrijen.

6.2 Resultaten

Aantal reflecties gebruikt in ray tracer model:

Er is geen verband gevonden tussen aantal reflecties (van 5 t/m 19 en de gesimuleerde drogestofproductie: de productie van het gebruikte modelgewas is gemiddeld 9.8 g per tijdstap met een standaardafwijking 1.6 g. Deze afwijking van ca. 16% wordt veroorzaakt door het stochastische gedrag van de Monte Carlo ray tracer.

Aantal lichtstralen gebruikt in de Monte Carlo ray tracer

Opvoeren van het aantal stralen van 1 miljoen tot 50 miljoen heeft niet tot nauwelijks effect op de lichtonderschepping op plantniveau. Wel zijn er soms grote verschillen tussen de individuele blaadjes. Onder de 1 miljoen stralen ontvangen de onderste delen van het gewas geen straling meer en wordt de modeluitkomst onbetrouwbaar.

Lamppositie

Wijziging lamppositie heeft een duidelijk effect op de output. De lampposities worden verder behandeld in het hoofdstuk 7.

Lampkleur

Het wijzigen van het spectrum bij dezelfde totale PAR input heeft volgens het model een erg klein effect op de hoeveelheid geabsorbeerd licht. In een bijgevoegde publicatie (Paradiso *et al.*, 2011) is dit in detail gerapporteerd.

Tabel 6.1. Effect van hoek t.o.v. loodlijn (=standaard opstelling) op lichtabsorptie door 16 planten en licht onder gewas (gemiddeld van boven en beneden op een lichtsensor met zicht naar alle kanten). N.B.: lamphoogte is 2 m (tussen het gewas).

Hoek lamp t.o.v. loodlijn	Licht geabsorbeerd	Lichtniveau onder gewas
	$\mu\text{mol s}^{-1}$	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
22	1372	55
67	1890	30
90	1807	15

Lamphoek

Draaien van de lamp van zijn verticale stralingsrichting naar meer horizontale positie laat in het model een verhoogde lichtabsorptie zien (Tabel 6.1.). Daarnaast wordt de lichtintensiteit onder het gewas (logischerwijs) lager. De lampen zijn lager opgehangen (2 m hoogte) dan in de gebruikelijke opstelling (6.3 m boven de vloer), t.b.v. vergelijking met tussenbelichtingen in de praktijk.

Variatie van bladstand rond het gemiddelde

Standaard is er een variatie van de bladhoek van ± 20 graden t.o.v. de gemiddelde bladhoek. De variatie is in het model verhoogd naar 90 en 180 respectievelijk. Dit betekent dat het blad ook verticaal omhoog of omlaag kan staan. Verhoogde variatie verlaagt de absorptie doordat het blad vaker parallel aan de lichtstralen staat, en vermindert de fotosynthese en drogestofproductie doordat lichtabsorptie relatief vaker dieper in het gewas, bij ouder blad met lagere fotosynthesecapaciteit, plaatsvindt. Verhoging van de variatie verhoogt dus het lichtniveau onderin, ook op het pad (Tabel 6.2.).

Tabel 6.2. Gevoeligheid van modeloutput voor variatie in bladhoek

Variabele	Standaard (20°)	90°	180°
	variatie		
Drogestofproductie (g)	1.83	1.60	1.65
Absorptie gewas (%)	90.1	90.2	87.4
Ass. snelheid (g CO ₂ m ⁻² hr ⁻¹)	2.67	2.33	2.40
Lichtniveau op pad (μmol)	13.8	17.7	18.1

7 Simulatie belichtingsstrategieën

7.1 Methode

Tijdens de eerste maand van het project is op een 'kick-off' overleg met potentiële gebruikers van het 3D model reeds een verlanglijstje gemaakt van belichtingsscenario's die met het model berekend zouden kunnen worden. Halverwege het project zijn dezelfde betrokkenen nogmaals in overleg geweest en is een definitieve keuze van te berekenen scenario's gemaakt. Deze keuze betrof 6 aspecten, waarbinnen belichtingsscenario's werden geformuleerd:

1. **Plaatsing SON-T lampen:** horizontaal (hoogte blijft bv. 4 meter) of boven pad verticaal wijzigen. Daarbij steeds ook voor enkele lamphoeken (hart van lamp wijzigen van loodrecht naar x graden) die lamppositie doorrekenen.
2. **Schermdichttrekken**, en bijdrage reflectie lamplicht op fotosynthese doorrekenen. Dit geeft aanknopingspunten of door de verhoogde belichtingsefficiëntie het opgesteld vermogen omlaag kan? Er is een effect op de warmtebalans maar hierin voorziet het huidige project niet.
3. **verschillende LED-posities in tomaat**, zoals afstand tot gewasrij in horizontale vlak, hoogte, uitstralingshoek. Hierbij standaard 95% rood en 5% blauw. Doel is zoveel mogelijk lichtbenutting en zo min mogelijk verlies naar buiten. Hierbij worden bevindingen van de diverse LED-proeven betrokken .
4. **wijzigen padbreedte** bij SON-T belichte tomaat, van 1.60 naar 1.90 m, bij gelijke plantdichtheid en LAI.
5. **reflectortype:** SONT breedstralers versus SONT diepstralers.
6. **teeltmanagement roos:** 3 typen rozenteelt: (a) rolgoten met ingebogen takken aan 1 zijde, (b) bed met rechtopgaande roos en maar weinig ingebogen, (c) veel ingebogen blad. Simulatie van effect rozenarchitectuur op lichtinterceptie en fotosynthese

Gewenste output per scenario: (a) lichtverdeling en fotosyntheseverdeling van boven naar beneden in gewas en verdeling in horizontale vlak (dus je wilt eigenlijk de 3D verdeling), (b) lichtabsorptie van gewas per m², (c) fotosynthese gewas.

Randvoorwaarden

Om de computerberekeningen niet onacceptabel zwaar te maken (< 1 uur rekentijd per scenario) zijn de volgende beperkingen opgelegd:

- A. de grootte van het gewas wordt beperkt tot 7 dubbele plantrijen, waarbij elke rij 16 meter lang is.
- B. Slechts één element van het lampengrid wordt in het virtuele model geplaatst en representatief geacht voor bijbehorend kasoppervlak. Voor SONT is het grid 2.5 x 6m, dus 15 m² per lamp. De eventueel bijgeplaatste LEDs staan in een dichter grid (bv. 1.05 x 1.6m bij hybridebelichting bij IC) maar worden opgeschaald tot het equivalent van die 15 m².
- C. De te testen lamp(en) situeren zich midden in het plantverband, zodat al het benedenwaartse lamplicht het gewas raakt (i.e. 'infinite canopy approach') en niet buiten de 3D scene valt.
- D. Lichtonderschepping en fotosynthese wordt voor alle plantrijen berekend, waarbij de buitenste plantrijen waarschijnlijk al geen licht meer waarnemen omdat ze ver van de lichtbron(nen) verwijderd zijn.

Bovendien zijn er nog andere, meer vanzelfsprekende randvoorwaarden gesteld:

- E. De gewasstructuur is gelijk aan die van de validatieproeven (tomaat in IC, roos bij WUR-Radix) tenzij de gewasstructuur zelf in het scenario aan bod komt
- F. De optische eigenschappen zijn ook uit de validatie-set betrokken, dus reflectie en transmissie van blad, stengel, steenwolmat, vloer en scherm blijven constant.

De kasopstelling zoals gebruikt voor de validatie is ook voor scenarioberekeningen mogelijk maar impliceert dat er mogelijke randeffecten optreden t.a.v. grootte van het lampengrid en/of omringende plantrijen. Dan is een zorgvuldige test van een lichtverdeling niet volledig. De kasopstelling zou dan als volgt zijn (verder niet gebruikt):

- G. Het grid met lampen boven het gewas strekt zich qua oppervlak drie tot vier lamprijen verder uit dan het gewas, zodat voor de binnenste meetplanten zich een soort oneindig areaal aan lampen voordoet
- H. Lichtonderschepping en fotosynthese wordt alleen berekend voor de binnenste twee plantrijen (de "meetplanten"), die omgeven worden door 2 dubbele randrijen (oost-west) en 4 m restrij op beide kopse kanten (noord-zuid).

7.2 Resultaten tomaat

7.2.1 Scenario's

De belichtingsscenario's 1 t/m 3 voor SONT belichting in een tomatengewas leverden allen een kleine wijziging op in lichtabsorptie door het gewas (Tabel 7.1.), terwijl scenario's 3 en 4 een groter verschil met 'standaard' laten zien.

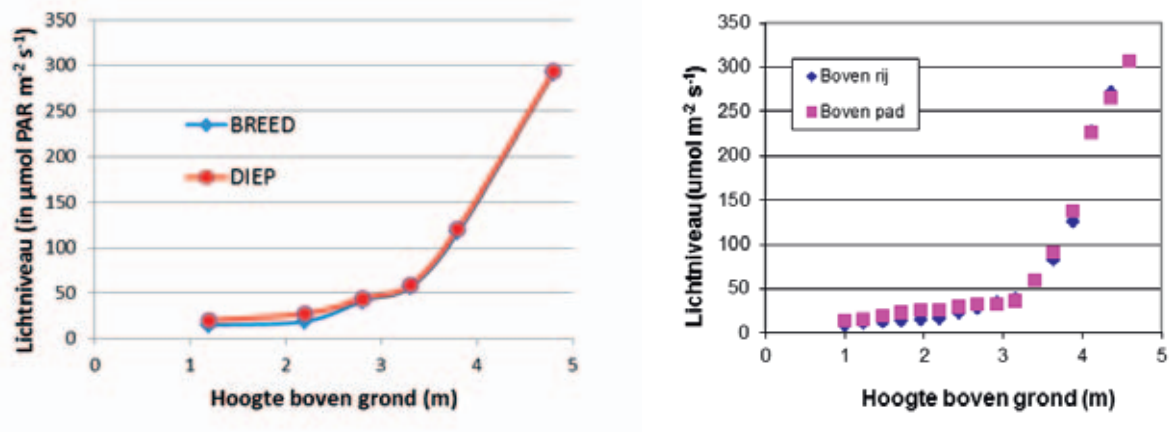
Tabel 7.1. Gesimuleerde lichtabsorptie en lichtdoordringing voor enkele scenario's bij tomaat.

Scenario	Lichtabsorptie	Licht onder gewas
	% van input	% van input
0. Standaard diepstraler [#]	87.5	4.5
1. Breedstraler	86.0	3.6
2. Lamphoogte 5.3m	87.8	5.1
3. Breder pad (2.0m), pd 1.83	80.0	9.0
4. Idem, pd als standaard	81.0	9.0

[#]standaard: 2 lampen op 6.3m, boven rij en pad, padbreedte 1.6 m, plantdichtheid (pd in planten m²) 2.27

De diepstralende reflector laat een iets hogere gewasabsorptie zien dan de breedstraler maar ook een hoger verlies naar de kasvloer. Het restant van de lichtinput verdwijnt naar het kasdek via gewasreflectie en dit is beduidend hoger voor breedstralers. Dit effect hangt ook enigszins af van de positie van de lamp: bij plaatsing van lampen boven het pad zal de diepstraler het pad relatief meer belichten dan de breedstraler, en is dus minder efficiënt. Gemiddeld over zowel pad als rij genomen berekent het model iets meer gewasabsorptie blijft de diepstraler z dan bij de breedstraler (Tabel 7.1.).

In Figuur 7.1. is te zien dat het lichtniveau hoog in het gewas niet lijkt te verschillen tussen de diepstraler en de breedstraler. Tabel 7.1. laat zien dat verlaging van de lamp tot hogere gewasabsorptie leidt, en een breder pad de absorptie juist verlaagt. Als een breder pad wordt gecombineerd met een kleinere plantafstand binnen de rij (om weer eenzelfde plantdichtheid per m² te krijgen als de standaard) dan is de lichtabsorptie nog steeds iets lager dan het standaard-scenario. Het gewas is toch meer 'open' door het breder pad dan normaal, met dito lichtverlies naar de bodem.

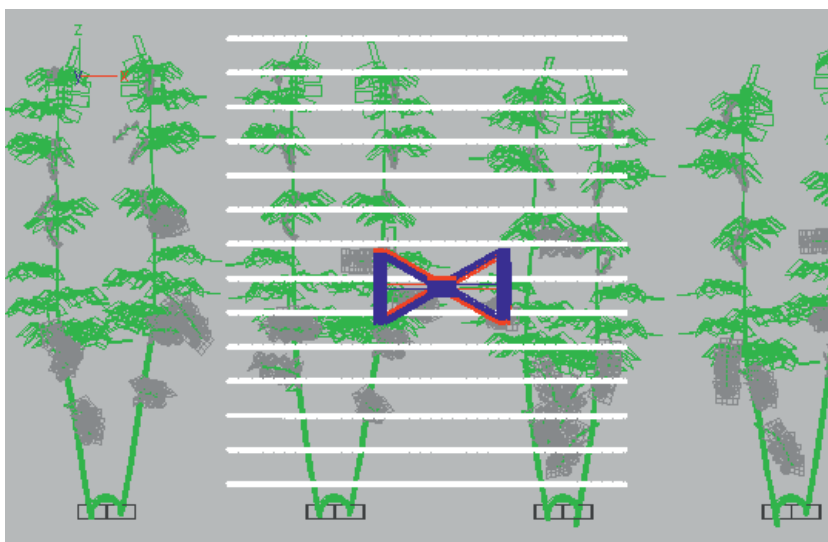


Figuur 7.1. Verloop lichtniveau (gemiddelde van een oppervlak van 6 x 3.2m, in PAR in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ voor twee reflectortypen (links) en voor twee lampposties (rechts).

Als de lamp boven het pad hangt, geeft verlaging van de lamp een slechts licht verhoogd gemiddeld lichtniveau in het gewas (Fig. 7.1), en iets minder fotosynthese per MJ PAR omdat de fotosynthesecapaciteit afneemt met de hoogte in het gewas en het licht tot die diepere locaties doordringt. Indien het blad zich aan het hoger lichtniveau aan zou passen (zie ook Tabel 7.4. voor LEDs), resteert alleen het effect van verminderde absorptie als teveel het pad en stengels c.q. vruchten worden belicht.

Tabel 7.2. Effect lamphoogte op lichtabsorptie gewas (% van inkomend lamplicht) en op fotosynthese per eenheid licht (g MJ⁻¹ PAR). Lamp is geplaatst boven het pad.

SONT		
Lamphoogte	Absorptie	Fotosynthese
6.3	87.5	3.80
5.3	87.8	2.90
4.3	85.4	1.55
3.3	76.3	1.76
LED:		
Hoogte - stralingsrichting		
6.3m – neerwaarts	89.6	3.68
3.5m – zijwaarts	93.4	2.68



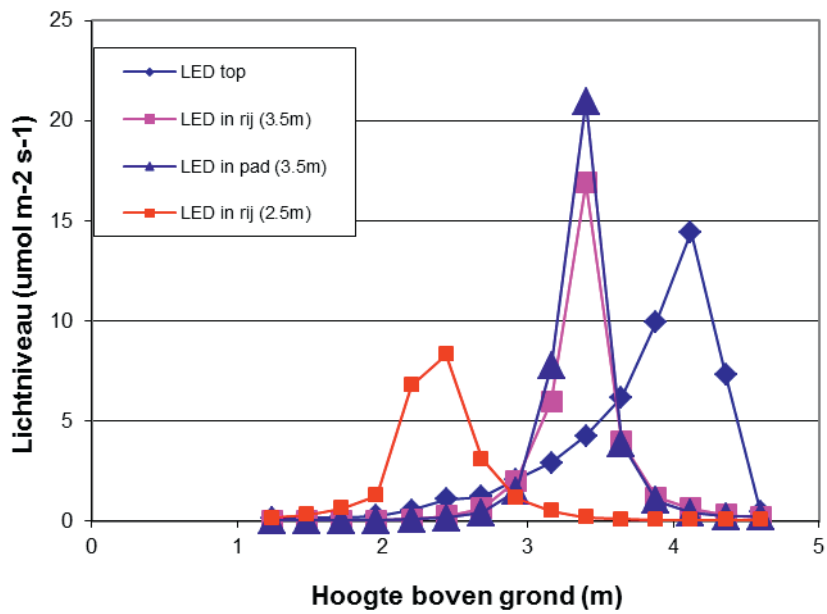
Figuur 7.2. LEDs zoals in model geplaatst op een specifieke hoogte (hier 2.5m boven de vloer, in het pad). De witte lijnen geven de lijnvormige lichtsensoren aan.

In het model zijn strengen met blauw-rode LEDs geplaatst (zie Fig. 7.2) op 1 van 3 mogelijke hoogten (2.5, 3.5 en 6.3 m, zie ook Tabel 7.3.) en doorgerkend t.a.v. lichtniveau in de kas (zie Fig. 7.3) en gewasabsorptie (Tabellen 7.2 en 7.3). LED belichting geeft bij zijwaartse belichtingsrichting gemiddeld meer lichtabsorptie dan bij SONT-belichting boven het gewas (Tabel 7.2. en 7.3)). Hoe lager in het gewas hoe meer de LEDs de vruchten en stengels belichten, hetgeen een significant deel van de lichtabsorptie is.

LEDs boven het gewas kennen eenzelfde nadeel als SONT qua reflectie naar het dak van de kas, dat ca. 10% van het invallende licht vertegenwoordigt.

Tabel 7.3. Verdeling van absorptie over plantorganen bij verschillende LED posities (% van inkomend licht)

Hoogte - stralingsrichting	Boven pad	Boven plantrij
6.3m – neerwaarts		
Blad	88.1	89.0
Vruchten	0.4	0.7
Stengels	0.1	0.9
TOTAAL	89.6	90.6
3.5m – zijwaarts		
Blad	91.0	93.2
Vruchten	0.8	0.1
Stengels	1.6	0.9
TOTAAL	93.4	94.2
2.5m – zijwaarts		
Blad	86.0	86.1
Vruchten	6.2	3.5
Stengels	6.5	4.7
TOTAAL	98.7	94.2



Figuur 7.3. Verdeling van gemiddeld lichtniveau op diverse hoogte boven de kasvloer bij 3 hoogten van LED-positie. De LED boven het gewas zijn naar beneden gericht, de LEDs op 2.5 en 3.5m hoogte zijwaarts.

7.2.2 Berekenen op verzoek: de LED proeven bij het Improvement Centre

Naast de genoemde, afgesproken scenario's, waren er vanuit de sector nog twee aanvullende scenario's gevraagd om door te rekenen. Het betrof simulatie van uitgevoerde belichtingsproeven in het IC, namelijk (A) de hybride belichting in 2009 met zowel SONT als LEDs (van Lemnis) als bovenbelichting, en (B) de HNT-proef met SONT bovenbelichting en LED tussenbelichting met 2 strengen afkomstig van Philips. Naast doorrekenen van de bestaande situatie met als output een modelschatting van lichtabsorptie en fotosynthese, was er het verzoek om een mogelijk gunstiger lampopstelling door te rekenen. Hieronder volgt bespreking van het resultaat.

In scenario A, i.e. de hybride SONT+LED bovenbelichting, waren de LED modules recht boven de gewasrijen gepositioneerd wat de lage absorptie op vloer en substraat verklaart. Daarentegen wordt door het model een aanzienlijke reflectie naar het kasdek berekend (Tabel 7.4.) in vergelijking tot de 100% SONT-belichting zoals gebruikt in de validatie (Tabel 7.1.). In een mogelijk alternatief hebben we de lichtbundel uit de LEDs meer gefocust zodat de lichtkegel per LED 2x smaller werd. Dit leidde volgens het model tot een 10% hogere gewasabsorptie, maar ook tot iets meer licht op de vloer. Dit laatste komt waarschijnlijk door (a) het hogere lichtniveau binnen de kegel als deze een deel van de vloer beschijnt, en (b) het licht meer naar beneden is gericht en al reflecterend relatief meer de vloer bereikt.

Tabel 7.4. Uitgevoerde hybride belichting (scenario A, zie tekst) en voorgesteld alternatief.

SONT+LED bovenbelichting	Modelresultaat		
Scenario:	A	Alternatief	Alternatief+scherm
Lichtverdeling (% van input):	78.8	87.7	93.5
Lichtabsorptie gewas	2.8	6.3	6.7
Licht op vloer en matten	18.0	5.7	4.0
Reflectie naar kasdek			
Gewasgroei ($\text{mg s}^{-1} \text{m}^{-2}$)	5.59	6.29	6.68
Lichtbenutting (g DS MJ ⁻¹ PAR)	4.71	4.53	4.53

In scenario B, SONT bovenbelichting en LED tussenbelichting, is er significant meer lichtabsorptie door het gewas (Tabel 7.5.) dan bij voorgaand scenario A. Zoals al uit voorgaande LED-scenario's bleek (Tabel 7.2.) is de plaatsing binnen de gewasrij gunstig voor het terugdringen van lichtverliezen naar kasdek en grond. Dit terugdringen is bij de ophanging met 70 cm tussen de LED-stringen gunstiger dan bij 35 cm afstand (Tabel 7.4.) omdat de hoogste string hoger in de bladmassa zit, maar het verschil tussen de 2 varianten is uitermate klein. Doordat bij 70 cm string-afstand de bovenste rij LEDs het blad meer belichten (en stengels en vruchten minder) berekent het model meer fotosynthese en groei dan bij 35 cm afstand.

Indien de fotosynthesecapaciteit, o.a. J_{max} , bij toenemende bladleeftijd niet verlaagt, zal het licht onderin het gewas beter benut worden en leidt tot meer fotosynthese en groei (Tabel 7.5, laatste kolom). Dit is wellicht het geval indien de LED-belichting deze normaal optredende veroudering tegen gaat (zie o.a. Trouwborst et al., 2010).

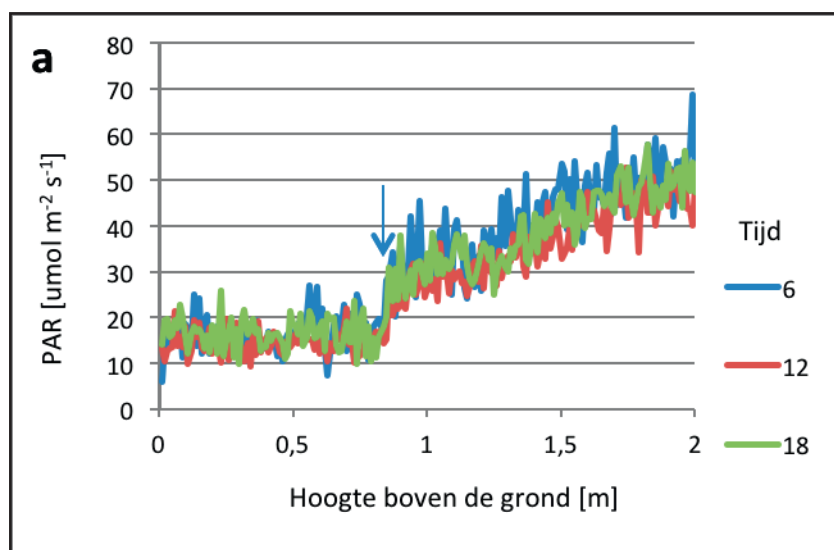
Tabel 7.5. Gesimuleerde lichtverdeling en –benutting van de LED-proef bij HNT tomaat bij het Improvement Centre. Bovenbelichting met SONT en de LED-stringen binnen de gewasrij, met onderlinge verticale afstand van respectievelijk 35 en 70 cm. Daarnaast het scenario met niet afnemende fotosynthesecapaciteit met bladleeftijd.

SONT+ tussenbelichting LED	Modelresultaat		
	B 35 cm	B 70 cm	B 70 cm
Scenario:			Constante fotosynthese
Lichtverdeling (% van input):			
Lichtabsorptie gewas	87.7	87.9	87.9
Licht op vloer en matten	5.9	5.7	5.7
Reflectie naar kasdek	6.2	5.4	5.4
Gewasgroei ($\text{mg s}^{-1} \text{m}^{-2}$)	4.78	4.95	6.33
Lichtbenutting (g DS MJ ⁻¹)	3.93	4.03	5.16

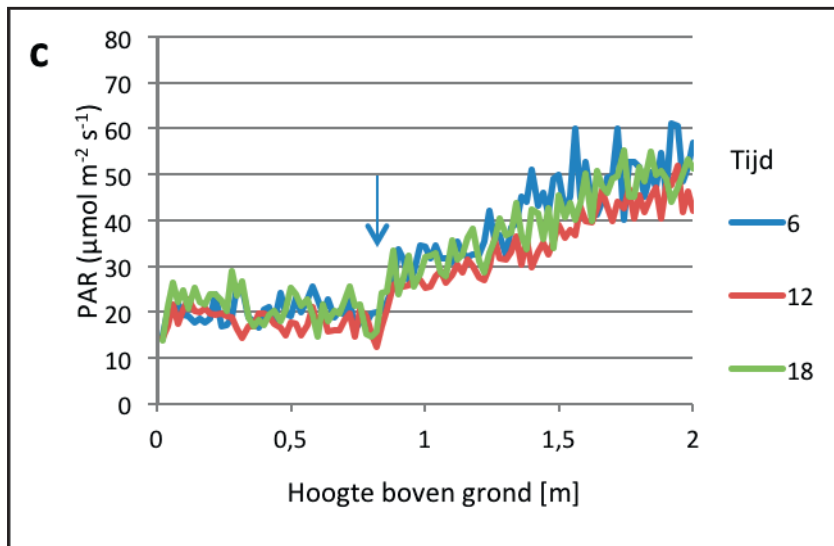
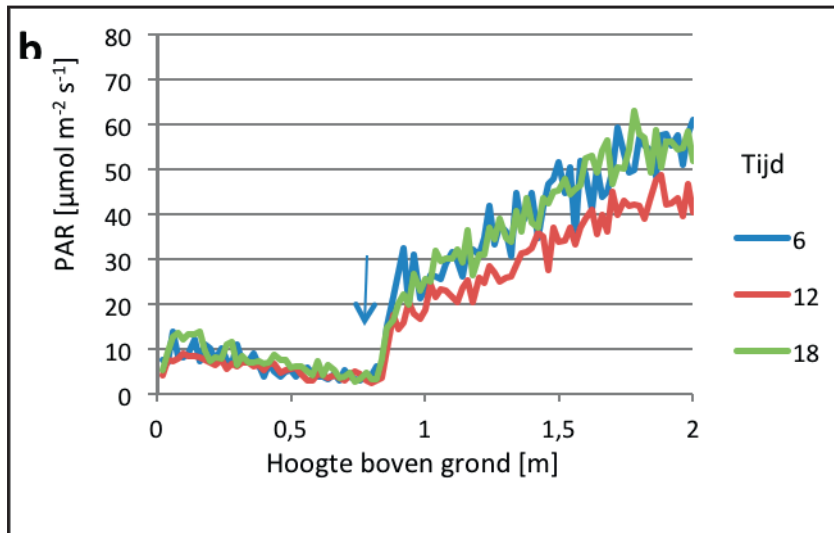
7.3 Resultaten Roos

Voor roos zijn de effecten van de 3 scenario's op lichtverdeling en fotosynthese van het totale gewas berekend. De lichtverdeling is vooral in het gebogen bladpakket beïnvloed: het aaneensluiten van de plantrijen met dus weglaten van een pad geeft een meer dan 2x lager lichtniveau binnen het gebogen bladpakket (scenario b in Fig. 7.4) en dito verlaagde gewasfotosynthese (Fig. 7.5). Het weghalen van 50% van het blad van het gebogen bladpakket geeft een lichte stijging van het lichtniveau maar dus geen verdubbeling (scenario c in Fig. 7.4). De gewasfotosynthese per m^2 kas van dit bladpakket is slechts 1 tot 2 eenheden ($\text{umol CO}_2 \text{ m}^{-1} \text{ kas s}^{-1}$) lager dan standaard 'a' (Fig. 7.5). Dit scenario c zou dus een lichtefficiënte optie voor telers kunnen zijn aangezien de lichtabsorptie en fotosynthese per eenheid kasoppervlak bijna net zo hoog is als bij een verdubbeld oppervlak van gebogen bladpakket, terwijl de onderhoudsademhaling i.v.m. verminderde biomassa duidelijk lager zal zijn. *Dit kan het productiepotentieel aanzienlijk verhogen aangezien op donkere dagen, bij een gangbare hoeveelheid biomassa, de ademhaling de meeste fotosynthese suikers verbruikt (pers.comm. P. de Visser: volgens berekeningen Intkam-model roos).*

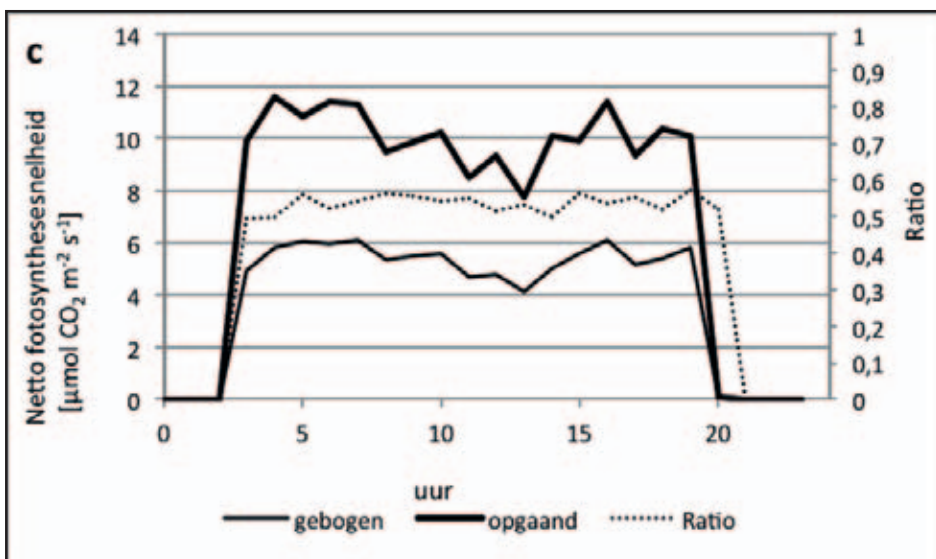
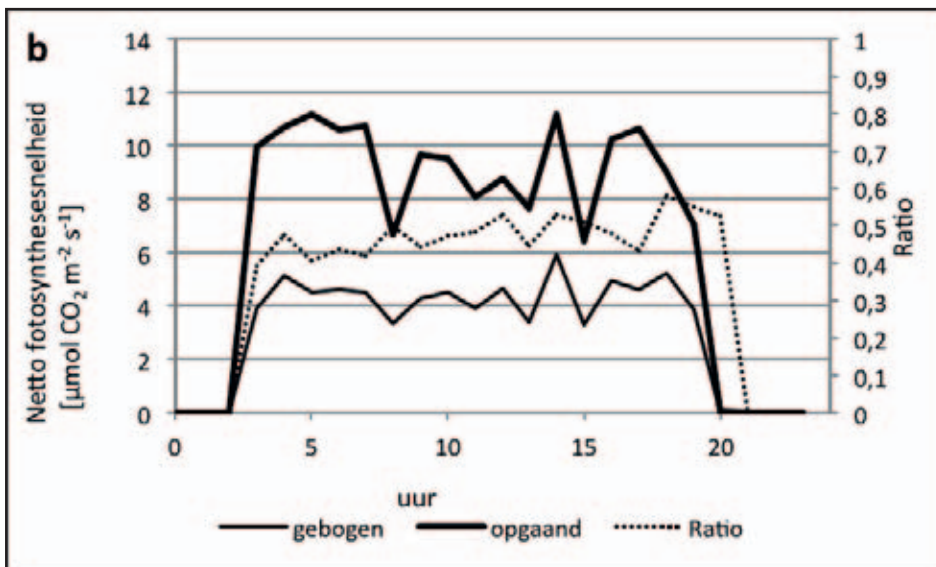
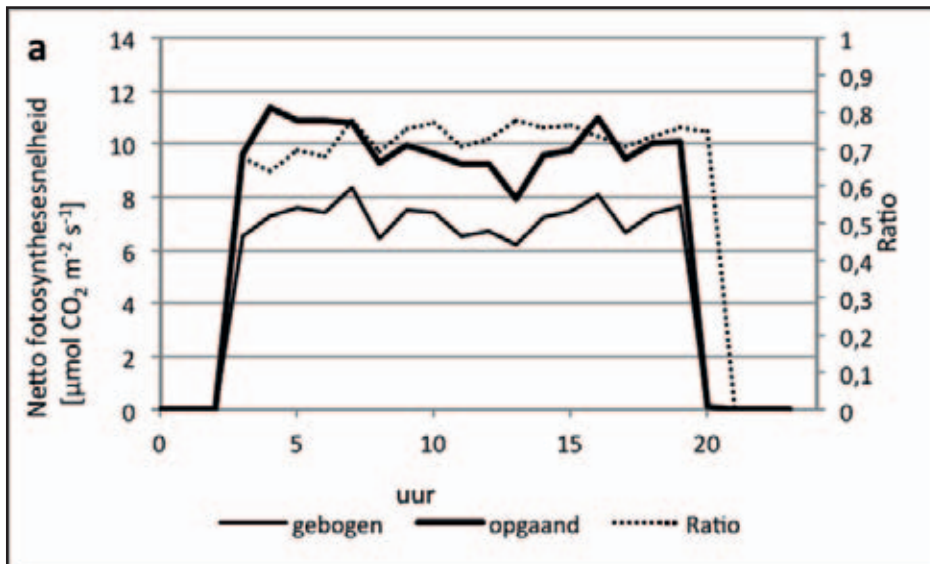
Overigens vertoonde het berekende dagverloop van de fotosynthese (Fig. 7.5) een lichte daling tussen 9 en 15 uur als gevolg van gesimuleerd uitgaan van de SONT lampen, terwijl het niveau van het natuurlijk licht betrekkelijk laag bleef.



Figuur 7.4. (a) Lichtniveau op verschillende hoogten, op 3 tijdstippen op de dag (6:00, 12:00, en 18:00 uur) zoals berekend met random verspreide sensoren binnen het gesimuleerde roosgewas, voor 3 gewasstructuren: a) controle (padbreedte 1.2 m, LAI gebogen bladpakket $3 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$).



Vervolg van Figuur 7.4. (vorige pagina): Lichtniveau op verschillende hoogten, op 3 tijdstippen op de dag (6:00, 12:00, en 18:00 uur) zoals berekend met random verspreide sensoren binnen het gesimuleerde roosgewas, voor 3 gewasstructuren: b) verkleind padbreedte (0.6 m), gebogen takken groeien in elkaar. c) verkleinde LAI van gebogen bladpakket (ca. $1.5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$) met standaard padbreedte (1.6m). De pijlen geven de positie van de mat weer.



Figuur 7.5. Fotosynthesesnelheid (in $\mu\text{mol CO}_2 \text{ s}^{-1} \text{ m}^2 \text{ kas}$) voor gebogen en opgaande rozenscheuten voor de 3 scenario's. De ratio is gelijk aan fotosynthese opgaand/gebogen.

8 Evaluatie model

Representativiteit van de gebruikte gewasarchitectuur

Het gebruikte tomatengewas is representatief voor een Nederlandse tomatenteelt t.a.v. aanwezige plantdichtheid, bladoppervlak en hoogte. Het buitenste blad was wel licht beschadigd, vermoedelijk door de oogstkarren, maar het verschil met andere teelten is m.b.t. de bladopbouw gering (<10%, zie §3.1). Andere teelten zullen qua lichtverdeling verschillen in evenredigheid met de bladoppervlakteverdeling, indien we veronderstellen dat de optische eigenschappen en bladhoeken maar weinig zullen verschillen

Het gebruikte rozegewas had een synchrone bloei en dit komt in de praktijk nauwelijks voor. In dat licht is gekozen voor een teeltmoment dat het meest vergelijkbaar is met een gangbare continue teelt, namelijk de week vóór de oogst, dus het moment dat de opgaande scheuten al vrij lang waren en bijna oogstrijp. Dit heeft weinig invloed op het resultaat van de roos-scenario's want die betreffen manipulatie van het gebogen bladpakket. Het gebogen pakket van ons modelgewas was wel strak en netjes gesnoeid en dat genereert iets meer licht op het pad dan in de praktijk. T.b.v. de scenario's leek het ons niet nodig dit aan te passen.

Bepaling optische eigenschappen van objecten

Er is afgestapt van de oorspronkelijk voor GroIMP vastgestelde procedure om de de textuurgegevens van digitaal fotomateriaal van de objecten als "shader" in te voeren, waarmee dan de optische eigenschappen (reflectie, transmissie, absorptie) door de foto bepaald worden. Deze methode wordt meestal in 3D visualisatie (animaties, film) gebruikt, maar voor kwantitatieve bepaling van de baan en de intensiteit van het licht bleek die methode onvoldoende nauwkeurig en niet reproduceerbaar. De methode is vervangen door het gebruik van een door ons geijkte RGB (Red, Green en Blue) shader, waarbij alle aspecten worden getuned in een virtuele testopstelling (zie Fig. 4.1) zodat de meetwaarde bereikt wordt.

Betrouwbaarheid gesimuleerde lichtverdeling

Voor de verticale lichtverdeling onder SONT lampen komt de simulatie bij tomaat goed overeen met de metingen. Een typisch S-vormige lichtgradient wordt gesimuleerd. Ook voor een jonger gewas zal het gesimuleerde patroon van absorptie en transmissie correct zijn want dit is vergelijkbaar met het bovenste gedeelte van het oudere gewas (er zal wel een gering verschil tussen jong en oud gewas zijn als gevolg van verschil in lamphoogte, zie Hfst. 7).

Dit betekent dat scenario's voor SONT opstellingen een valide modeluitkomst geven.

De verticale lichtverdeling wordt beïnvloed door de de fractie diffuus licht. Dit licht geeft in het model meer lichtdoordringing dan het lamplicht van puntbronnen en dan het directe zonlicht. Hoewel voor de gebruikte rekendag (27 jan) de gemeten verhouding SONT/diffuus/direct zonlicht is aangehouden, is het wenselijk om het effect van verschillende diffuus/direct ratios nog eens te testen m.b.v. nieuwe meetsessies en bijbehorende simulaties. Dit is niet zozeer nodig voor lampbelichtingsstudies maar eerder voor onderzoek aan diffuus kasdek en lichtverstrooiing door schaduwdoek. Dit valt buiten het bestek van het huidige onderzoek.

Betrouwbaarheid gesimuleerde fotosynthese

Het 3D model bevat een bekend en bewezen deelmodel voor de fotosynthese. De uitkomsten van het fotosynthesemodel op bladniveau corresponderen met metingen, en het aangenomen verloop van J_{max} en overige parameterwaarden met diepte in gewas is conform eerdere metingen. Om de fotosynthese voor een andere teelt te berekenen raden we wel aan om dan eerst enkele fotosyntheseparameters van die teelt te bepalen met gasuitwisselingsmetingen, i.v.m. verschillen in ras en teeltcondities. T.a.v. de relatieve verschillen in fotosynthese tussen de belichtingsscenario's nemen we wel aan dat die verschillen extrapolbaar zijn naar een andere teelt.

Invloed gewijzigde belichtingsstrategie op fotosynthese

Tijdens het maken van de berekeningen was er onvoldoende bekend over de aanpassing van de fotosynthese-eigenschappen van een blad aan een gewijzigd lichtklimaat. Er is zeker adaptatie maar hoe snel en bij welk lichtniveau en -kleur is niet voldoende kwantitatief bekend. Om die reden is voor 2 situaties t.a.v. fotosynthese gekozen: (1) geen aanpassing, (2) volledige aanpassing tot 'lichtblad' met dezelfde eigenschappen als hoog gesitueerde, uitgegroeide bladeren. Deze situatie kwam bijvoorbeeld voor bij komkommerbladeren die ondanks hun ouderdom nog veel zonlicht of

LED-licht (Trouwborst *et al.*, 2010) ontvingen.

Het model is er in voorzien om mogelijke adaptatie van fotosynthese mee te nemen.

Simulatie van lichtweg en fotosynthese bij verschillende golflengte

In samenwerking met overige projecten (Snel *et al.* 2011, Paradiso *et al.* 2011) zijn de fotosynthese-eigenschappen per golflengte (10 to 50 nm intervallen) in het Intkam-model verwerkt (zie Bijlage 4). De verschillen op gewasniveau in absorptie en fotosynthese tussen de golflengten binnen het PAR-gebied waren vrij klein (Paradiso *et al.*, 2011) en hebben ons doen besluiten deze golflengte-afhankelijkheid momenteel niet in het 3D model mee te nemen. Wel zijn de optische eigenschappen kleurafhankelijk.

Bladbeweging en bladkrulling

Middels webcamsbeelden zijn er blad- en stengelbewegingen bij tomaat waargenomen met bladhoekverschillen tot 20 graden. Modeltests met variaties in bladhoek bovenin het gewas gaven geen verschillen in totale gewasabsorptie te zien. Om die reden is de bladbeweging niet ingevoerd in het model. Overigens zijn de belichtingsscenario's onderling, bij een gefixeerde gewastructuur (i.e. 'mock-up') vergeleken en dit is valide indien de bladhoek niet meer dan bovengenoemde 20 graden wijzigt tussen scenario's. Bladkrulling komt soms voor bij tussenbelichting, maar is niet in de studie meegenomen wegens gebrekkige kennis wanneer en in welke mate het optreedt. Indien meer over bekend, dan kunnen de rekenregels daar vrij eenvoudig voor worden aangepast.

9 Conclusies

Algemeen

In het gebruikte 3D model is het mogelijk gebleken om representatieve structuren van de gewassen tomaat en roos te genereren. De lichtonderschepping voor de twee uitgangssituaties werd gesimuleerd conform de metingen. De modeluitkomsten zijn getest op hun gevoeligheid voor de gebruikte uitgangssituatie, en deze gevoeligheid bleek sterk beïnvloed te worden door de rijstructuur en aantal bladeren, maar in mindere mate door bladvorm en bladhoek. De gemodelleerde gewassen blijken representatief voor de gemiddelde Nederlandse teeltsituatie, waardoor de resultaten bruikbaar zijn voor het merendeel van de rozen- en tomatenteelt met vergelijkbare rijstructuur en aantal en oppervlak aan blad.

In het lichtmodel zijn de optische eigenschappen van alle objecten uit de kas succesvol verwerkt. Dit betreft de mate van reflectie, absorptie en transmissie van het licht door plantorganen, mat, kasvloer e.d. Ook betreft dit de lichteigenschappen van de lichtbronnen. Deze zijn in het model verwerkt door gebruikmaking van de specificaties van de lampen t.a.v. lichtverdeling, lichtsterkte en –spectrum. De ruimtelijke verdeling van het natuurlijke licht werd door middel van gangbare rekenregels in het model ingevoerd.

Bladbeweging

Er is duidelijk blad- en stengelbeweging waargenomen in het bovenste gedeelte van het tomatengewas waarvoor de modelberekeningen zijn gedaan. Volgens het model hebben die bewegingen op die plek echter geen invloed op de mate van lichtabsorptie op gewasniveau. Wel toont het model dat voor het theoretische geval dat alle bladeren in extreme hoeken staan, de lichtonderschepping vermindert.

Effect van belichtingsstrategie op lichtbenutting en lichtabsorptie door gewas

Een ruimere lichtverspreiding via reflectoren genereert een beperkt verlaagde absorptie van het SONT licht door het gewas en een iets lager lichtniveau in het gewas, en idem op de kasvloer als de lamp boven de plantrij i.p.v. boven het pad hangt. Diepstralers boven het pad verliezen relatief meer licht aan belichting van het pad dan breedstralers. Het verschil tussen de veel gebruikte diep- en breedstralers is volgens het model echter klein. Evenwel was de uittredehoek van het licht tussen de hier gebruikte reflectoren beperkt: ca. 10 booggraden. Er zijn grotere verschillen in reflectoren beschikbaar op de markt waaraan desgewenst gerekend kan worden.

Verlagen van de ophanghoogte van de SONT lampen verlaagt de lichtabsorptie en fotosynthese indien de lampen boven het pad hangen, doordat meer licht op de kasvloer belandt. Volgens het model is hybride belichting minder efficiënt indien de LEDs niet tussen het gewas maar net als de SONT boven het gewas geplaatst worden, doordat verstrooiing van het LED-licht tot lichtverlies leidt.

Tussenbelichting met LEDs vergroot de lichtabsorptie t.o.v. bovenbelichting. Wel is absorptie door vruchten en stengels relatief hoger, wat op gewasniveau een verlaagde fotosynthese tot gevolg kan hebben t.o.v. bovenbelichting. Indien de fotosynthesecapaciteit van lager blad niet verminderd t.o.v. hoger blad, heeft een LED-tussenbelichting extra meerwaarde t.o.v. bovenbelichting naast de reeds positieve gevolgen t.a.v. lichtabsorptie.

Een lichthinderscherm vergroot volgens het model de lichtabsorptie door het gewas doordat er geen verlies van licht naar buiten plaats vindt. Evenwel heeft dit een verhoogde warmteontwikkeling tot gevolg indien SONT-lampen worden gebruikt. Vervanging van SONT door LEDs zal dit probleem verminderen.

Nut van gebruik 3D modellering voor toetsen belichtingstrategieën

Het 3D model voor lichtverdeling en gewasstructuur is inzetbaar voor het oplossen van vele vraagstukken aangaande lamppositie, lampkleur en reflecterende oppervlakken als schermen en wanden, in interactie met een bepaalde gewasstructuur. Dergelijke oplossingen zijn op andere wijze behalve door uitgebreide, dure proeven niet te realiseren. De modellenbouw kent zeker een tijdrovende fase van meten en ijken, maar daarna zijn vele toepassingen mogelijk.

T.a.v. de belichtingsscenario's genereert het model soms verrassende resultaten (bv. LED-belichting van trossen i.p.v. blad) maar meestal vaak logische, verwachte uitkomsten. Evenwel biedt het 3D model nu los van de intuïtie en ervaring van belichtingsexperts een objectief instrument voor doorrekenen van lichtplannen en lichtbenutting door het gewas.

Een aantal relevante plantaspecten konden binnen het kader van dit project niet beantwoord worden. Zo was te weinig bekend over adaptatie van de fotosynthese aan verplaatste lichtbronnen en lichtkleuren. Evenzeer was niet genoeg bekend over de effecten van stralingswarmte op sinksterkte en groei, evenals over de soms "wijkende" reactie van de bladstand op bepaalde belichtingsniveau's en -richtingen. Hierover wordt inmiddels in recente experimenten aandacht besteed, waarna die fysiologische kennis zonodig in het model verwerkt kan worden.

10 Literatuur

- Buck-Sorlin, G.H., Hemmerling, R. Vos, J., de Visser, P.H.B., 2010.
Modeling of spatial light distribution in the greenhouse: description of the model. In Li, B., Jaeger, M., Guo, Y., Proceedings of the Third International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications - PMA09. Beijing, China: IEEE, 79-86.
- Dueck, T., Janse, J., Schapendonk, A., Kempkes, F., Eveleens, B., Scheffer, K., Pot, S., Trouwborst, G., Nederhoff, E. en Marcelis, L., 2010a.
Lichtbenutting van tomaat onder LED en SON-T belichting. Rapport 1040, Wageningen UR Glastuinbouw.
- Dueck, T., Nederhoff, E., Nieboer, S., Scheffer, K., Steenhuizen, J., Chizhmak, S., Uenk, D., Sarlikioti, V., De Visser, P., 2010b.
Verbetering van de lichtonderschepping in een tomatengewas door aanpassing van de rijstructuur. Rapport 1029, Wageningen UR Glastuinbouw.
- Hovi-Pekkanen, T., Tahvonen, R., 2008.
Effects of interlighting on yield and external fruit quality in year-round cultivated cucumber. *Scientia Hort.* 761, 183-191.
- Kniemeyer, O. 2008.
Design and Implementation of a Graph Grammar Based Language for Functional-Structural Plant Modelling. Doctoral dissertation, University of Technology at Cottbus, Fakultät für Mathematik, Naturwissenschaften und Informatik.
- Kniemeyer, O., Buck-Sorlin, G., Kurth, W., 2007.
GrolMP as a platform for functional-structural modeling of plants. In: "Functional-Structural Plant Modelling in Crop production", Eds. J. Vos et al., Wageningen UR Frontis Series, Vol. 22., pp. 43-52.
- Kim, S-H., Lieth, J.H., 2003.
A Coupled Model of Photosynthesis, Stomatal Conductance and Transpiration for a Rose Leaf (*Rosa hybrida* L.). *Annals of Botany* 91: 771-781.
- Lieth, J.H., Pasian, C.C., 1990.
A model for net photosynthesis of rose leaves as a function of photosynthetically active radiation, leaf temperature and leaf age. *J. Am. Hort. Sci.* 115, 486-491.
- Paradiso, R., Meinen, E., Snel, J., Visser, P.H.B. de, Ieperen, W. van, Hogewoning, S.W., Marcelis, L.F.M., 2011.
Spectral dependence of Photosynthesis and Light Absorbance in Single Leaves and Canopy in *Rosa* hybrid. *Scientia Horticulturae* 127, 548-554
- Trouwborst, G., Oosterkamp, J., Hogewoning, S.W., Harbinson, J., van Ieperen, W., 2010.
The responses of light interception, photosynthesis and fruit yield of cucumber to LED-lighting within the canopy. *Physiologia Plantarum* 138, 289-300.
- Saltelli, A., Chan, K., Scott, E.M., 2000.
Sensitivity analysis. Wiley, Chichester.
- Sarlikioti, V., de Visser, P.H.B., Marcelis, L.F.M., 2011.
Exploring the spatial distribution of light interception and photosynthesis of canopies by means of a functional-structural plant model. *Ann.Bot.* 107, 875-883.
- Snel, J., Meinen, E., Bruins, M., Marcelis, L. 2011,
Fotosynthese-efficiëntie bij verschillende golf lengten. PT-rapport (in voorbereiding).
- Vos, J., J.B. Evers, G.H. Buck-Sorlin, B. Andrieu, M. Chelle, and P.H.B. de Visser, 2010.
Functional-structural plant modelling: a new versatile tool in crop science. *Journal of Experimental Botany*, doi:10.1093/jxb/erp345
- Vos, J., Marcelis, L.F.M., Visser, P.H.B. de, Struik, P.C., Evers, J.B., 2007.
Functional-Structural Plant Modelling in Crop Production", Wageningen UR frontis Series, Vol. 22., 269p.
- Visser, P.H.B. de, Sarlikioti, V., Buck-Sorlin, G.H., 2010.
A 3D greenhouse model to determine the optimal lighting strategy and crop structure for light capture and photosynthesis in tomato. 6th International Workshop on Functional-Structural Plant Models. Davis, USA, 80-82.

Bijlage I Notulen kick-off overleg

Datum: 20 maart 2008

Locatie: Wageningen UR Glastuinbouw

Aanwezig: Peter Klapwijk (GreenQ), Sjaak Vergeer (Hortilux), Egon Janssen (TNO), Anton Albers (TNO), Leo Oprel (LNV), Tom Dueck (WUR), Gerhard Buck-Sorlin (WUR), Pieter de Visser (WUR)

Afwezig met kennisgeving: Esther van Echthelt (Philips), Peter vd Stok (Philips), Dennis Medema (PT), Leo Marcelis (WUR) en Jan Janse (WUR)

1. Opening

Iedereen meldt kort zijn/haar achtergrond

2. Inleiding

Pieter de Visser licht doel en aanpak van het PT/LNV-project toe dat een looptijd heeft van feb-2008 t/m maart 2009.

3. Expertise rondje

Expertise en te onderzoeken belichtingsstrategie worden door de uitgenodigde deskundigen toegelicht, en zijn samengevat in onderstaande tabel:

Persoon	Expertise/mogelijke bijdrage	Strategie
Egon Jansen (TNO)	- Lichttransmissie door kasdek als functie van invalshoek, spectrale samenstelling en optische eigenschappen - Ray tracing simulatie	Gebruik positie SON-T en reflectoreigenschappen voor optimalisatie lichtverdeling
Anton Albers	LED verlichting, golflengte- en energie-aspecten, warmteafgifte	o.a. toepassing LED's t.b.v. reductie warmteafgifte
Sjaak Vergeer (Hortilux)	Lampeigenschappen, zowel spectraal als qua reflectie en lichtverdeling	- Eerst SON-T HPI 400 volt op lichtverdeling en onderschepping door gewas toetsen, dan pas andere typen - 'vierkante' lichtverdeling is uitdaging voor leverancier
Peter Klapwijk (GreenQ)	Gewasmanagement en -structuur, o.a. tomaat, architect van teeltstrategieën, veel belangstelling voor licht	- Simpel beginnen met SON-T, en bijv. horizontaal verplaatsen t.o.v. rij en effect meten/simuleren/toetsen model - pas in later stadium zonnebaan, lichtkleur en LEDs
Leo Oprel (LNV)	Energiegebruik in glastuinbouw, beleid	Eerst SON-T zonder stoorvariabelen, dan ook daglicht, NIR en diffuus; vol gewas (LAI 4), LED eventueel
Dick vd Sar (Phytocare)	Rozenteelt: belichting, gewasstructuur, lengtegroei, kasopstelling, lichtdosering vs. groei, rassenkeuze	- Hoeveel licht is nodig, wanneer teveel, en welke kleur - interacties met transpiratie en voeding - Raskeuze afh. van wens (meer scheuten danwel zwaardere scheuten)

Dit expertise-rondje leidde al tot een levendige, brede discussie. Notities van deze discussie en die bij agendapunt 5 zijn hier samengevoegd bij punt 5.

Welke expertise en strategie wordt gekozen hangt nu af van de aanpak die gevolgd gaat worden. Die aanpak komt bij punt 7 aan bod.

4. Presentatie model

Gerhard Buck-Sorlin licht de gekozen modelaanpak toe.

5. Wensen t.a.v. model

Bij dit agendapunt alsmede bij punt 3 zijn door iedereen veel aspecten genoemd die verband houden met de lichtbenutting door het gewas. We kunnen de punten grofweg als volgt verdelen, zonder te claimen dat de lijst compleet is:

Direct vs. diffuus licht

Momenteel vindt onderzoek plaats naar effect op groei van diffuus versus direct licht. De vraag is of meer diffuus licht leidt tot een hogere lichtbenutting en waarom. Ook in dit lamplicht-project is simulatie van diffuus licht nodig als natuurlijke lichtbron op donkere of bewolkte dagen: het model moet dus in staat zijn het sterk 'gescatterde' diffuse licht te simuleren.

Lichtintensiteit

Boven 500 W zonlicht wordt de plantreactie minder voorspelbaar doordat verhitting, fotoinhibitie en andere stressprocessen een rol gaan spelen: in onderzoek beperken tot winterhalfjaar met lage lichtniveau's.

Plant adapteert aan lichtniveau, let dus bij verplaatsen van lichtbron op gewasaanpassing.

Dynamiek van wisseling van seizoenen speelt een rol, en bij roos is daarbij de dynamiek van assimilatenreserves van belang.

Lichtkleur

Het spectrum van het aangeboden licht heeft invloed op tal van processen, die deels bekend zijn. Respons van fotosynthese op lichtkleur wordt in een gelieerd PT-project (Efficientie van fotosynthese bij verschillende golflengten) bepaald voor roos en tomaat. Die informatie is direct bruikbaar in dit project, indien het spectrum van de zon bij diverse zonnestanden en kasdekmaterialen en van de gekozen lamptypen bekend is. Dit is technisch mogelijk met de hulp van partijen als TNO en Hortilux. Er is ook een sterke invloed van lichtkleur (rood/verrood, blauw, etc.) op plantontwikkeling, valt buiten bestek van dit project.

Bladkleur

Hoe donkerder het gewas, hoe warmer het wordt en kans op productieverlies en stress neemt toe. Een donkerder kleur en een veranderde pigmentsamenstelling beïnvloeden zowel deze warmteopbouw als absorptie van fotosynthese-relevante straling.

Bladbeweging

De bladstand varieert (soms) gedurende de dag, zoals o.a. door Priva is waargenomen met een camera bij roos en tomaat. Het blad richt zich mogelijk naar het licht (zie ook "Lichthoek" hieronder), maar ook turgor en dag/nacht-ritme spelen een rol. De bladbeweging zal gesimuleerd moeten worden bij de gekozen scenario's i.v.m. effect op lichtopvang.

Lichthoek en verloop in de tijd

Een bepaalde bladhoek zou een optimale lichtbenutting kunnen zijn gelet op de baan van het zonlicht, zie o.a. publicatie Marcelis. Door het verloop van de zonnestand is een simulatie van vóór zonsopgang tot na zonsondergang nodig. De hoek waarmee het assimilatielicht op het blad valt is uiteraard ook van groot belang, evenals de wijze waarop dit gereflecteerd wordt (spiegelend ("specular") of verstrooid).

Warmteprocessen

Licht verwarmt het gewas en dit resulteert in gewasverdamping en afkoeling. Deze lichtenergie wordt dus niet via fotosynthese in biomassa omgezet. Verwarming en afkoeling zijn van meerdere factoren dan alleen instraling afhankelijk, om dit in het project mee te nemen wordt door de aanwezigen dan ook niet geadviseerd. Is wel een toekomstig aandachtspunt bij roos, die nogal gevoelig is voor warmtestress.

Het voorgestelde model kan in theorie dergelijke warmteprocessen simuleren, maar ijking en praktijktoepassing is nog niet haalbaar door gebrek aan kennis over luchtsnelheid en ruimtelijke verdeling van temperatuur en dampdrukdeficiet.

6. Belichtingsstrategieën

Advies is om voor meting en simulatie te beginnen met een eenvoudige lampenopstelling.

- een combinatie van SON-T lampen (400W) en een fors gewas (bv. LAI \geq 3)
- Horizontaal verschuiven van de lamp dwars op de planrij (tomaat) zodat getest wordt of het licht meer doordringt en benut wordt. Bij een jong, klein gewas maakt dat niet veel uit, bij grote planten met veel zelfbeschaduwing wel.
- variëren van padbreedte en –orientatie bij tomat
- Voor roos moet in overleg met Dick vd Sar en een of meer rozentelers nog een relevante te simuleren belichtingsstrategie opgesteld wordt.

Verdere uitwerking van de strategie moet wachten op de vorderingen met de modellering. Het opbouwen van het model kan het beste uitgewerkt worden in een **stappenplan**: een plan van ca. 15 stappen om te komen tot een volwaardig model. Idealiter bevat het model alle huidige, voor dit onderwerp relevante kennis, en kan het daarmee een realistische uitspraak doen over de lichtbenutting bij een in de praktijk uitvoerbaar belichtingsscenario.

7. Afspraken/vervolg

- Pieter de Visser maakt i.s.m. direct betrokkenen (Gerhard, Tom e.a.) een stappenplan en legt dat voor aan de hier aanwezigen. Focussen op noodzakelijke input en verwachte output.
- Peter Klapwijk stelt zijn kas beschikbaar voor meten van de 3D-structuur van een tomatengewas, en kan indien nodig contact opnemen met Priva voor opnieuw installeren van een camera voor bladbeweging
- Meting 3D-structuur tomat wordt uitgevoerd bij een WUR-proef in Bleiswijk indien goed representatief. Indien niet, dan naar Improvement Centre
- Pieter stuurt Sjaak Vergeer (Hortilux) een verzoek om data over spectrum en lichtverdeling van enkele lamptypen, waaronder de 400W HPI SON-T lamp. Sjaak Vergeer zal antwoorden welke info beschikbaar is, incl. evt. kosten
- Pieter stuurt Egon Jansen ook een verzoek om informatie over lichttransmissie en lichtkleur via het kasdek
- In overleg met Dick vd Sar wordt een rozenteelt gekozen voor 3D-metingen. Ras: voorkeur gaat uit naar één van de rassen die in aanpalende projecten worden gebruikt (PT-project "Efficientie fotosynthese": Passion, STW-project: Akito).

Bijlage II Notulen tussentijds overleg klankbord

Overleg project Simulatie ruimtelijke lichtverdeling

13 februari 2009, Bleiswijk

Aanwezig:

Esther van Echtelt (Philips), Marco Brok (Hortilux), Sjaak Vergeer (Hortilux), Marc Grootsholten (IC, Improvement Centre), Dick van der Sar (Phytocare), Gerhard Buck-Sorlin (Wageningen Universiteit), Pieter de Visser (WUR Glastuinbouw)

1. Powerpoint presentatie voortgang

Opmerkingen/discussie n.a.v. de sheets:

- *sheet "opstelling kale goten in de kas"*: let op dat zowel bodem als plastic van goot vuil worden en dus in loop van tijd wijzigen in optische eigenschappen
- *sheet spectrum gemeten bij IC*: grafiek is inderdaad van kale, ongeijkte meting, en het spectrum van de LED is (door overbelichting) te breed want zij hebben slechts 2 kleuren met slechts een kleine kleur-spreiding. Ook het SON-T- en het daglicht-spectrum zijn hierin vermengd. Onderin het gewas (onderste curve in grafiek = 150 cm onder top van de plant) wordt alleen nog zeer lage intensiteit van vooral groen licht gemeten, sensor zat vrijwel onder 1 blad.
- *spectrum gemeten bij Akito-roos te Wageningen*: geen kleurwijziging met diepte in gewas, wat vooral komt doordat we in het pad hebben gemeten en niet binnen de planten.
- *Absorptiespectrum roos*: kan ook infrarood meegenomen worden? Want dat wordt door HPS-lampen veel meer afgegeven dan door LED, en heeft effect op de groei en plantstress (zie onder bij SON-T)
- *3D simulatie roos*: blaadjes lijken wat te klein: Gerhard gaat na of de data kloppen
- *Lichtabsorptie bij 2 lampposities*: interessant dat bij lamp boven pad er meer absorptie door gewas is. Bij Hortilux was hierover altijd veel discussie.
- *Effect lampkleur op absorptie*: logisch dat roze meer en geel minder absorbeert (want laat in absorptiespectrum minder dan wel meer reflectie/transmissie zien dan bijv. groen), maar de PAR flux zou niet mogen wijzigen. Komen we op terug met uitgebreider berekeningen
- *Lichtprojectie SON-T lamp*: lijkt wel een realistisch beeld te geven van de ietwat vierkante spreiding van het licht
- *Sheet met scenario's*: zie onder

Opmerkingen t.a.v. het voortgangsverslag:

- Figuur 8. (Effect aantal stralen in model op uitkomst, hier voor lichtbenutting en drogestofproductie): wel vreemd dat er een piek in productie rond de 600.000 stralen zit. We verwachten hooguit een lichte, geleidelijke toename bij hoger aantal 'geschoten' lichtstralen omdat dan er dan een hogere kans is dat meer blad licht opvangt. We gaan dit verder testen.
- Fig. 10 (Effect lichtkleur lamp op absorptie PAR): je zou de gewasproductie hierbij kunnen uitrekenen met een vuistregel: per MJ geabsorbeerde PAR ongeveer 16 g versproductie, oftewel 3.5 g vers per mol PAR (voor sterk groeiende Avalanche roos), in het winterseizoen.
- Tabel 3. (gevoeligheid voor bladhoek): aardig om de bladstand uit de webcam in te voeren en gevoeligheid model te testen. Komt nog na analyse webcam-afbeeldingen.
- Bij resultaten (6.2): niet per MJ maar per Foto of mol straling de groeirespons en productie weergeven, want energie-inhoud van licht wisselt met golflengte. De gebruikte eenheden (watt, lumen, lux, joule, mol, etc.) zullen in verslagfase zo duidelijk mogelijk worden gedefinieerd en gebruikt.

2. Uitgelichte discussieonderwerpen:

SON-T:

Sjaak: HPS lampen genereren veel infrarood licht wat je niet meet in range 300-800 nm. Dit infrarood licht kan fotosynthese en groei stimuleren, en dat ontbreekt dus bij LED belichting.

Grid van lampen moet in model, want ook lampen ver weg dragen bij aan fotosynthese. Vraag is of we voor simulatie de runs per lamp optellen, of alles in één keer uitrekenen, met risico dat computer het niet aan kan. Gerhard gaat dit na.

LED-thema:

Pieter: IR kunnen we modelleren qua lichtweg en absorptie, maar een warmtebalans van de bladeren is te complex voor simulatie.

Esther: lichtverlies van LEDs valt reuze mee. Marco: het oog ziet veel LED-kleur buiten het gewas, maar dit is qua intensiteit erg laag en bijna verwaarloosbaar m.b.t. fotosynthese.

Allen: we zien niets in simulatie van groene LED's. Verder onderzoek moet eerst maar eens aangeven of groene LED's eventuele stress (door eenzijdige LED-kleuren) kunnen verminderen.

Tussenlicht kan evt gewas terplekke actiever houden, dus relatief oude blad draagt dan nog bij aan fotosynthese en groei. Pad en goot zullen in loop seizoen vervuilen, en dus minder licht reflecteren. Rekening mee houden in model.

Roos:

Rolgoten Olieman zijn eerder uitzondering dan gangbaar in rozenteelt. Dus ook een simulatie doen met zo gangbaar mogelijke gewasstructuur, dit is rechtopgaand gewas in bed, met vrij weinig ingebogen takken. Is dit ook zo bij teler te Dongen? Zie Aktie.

3. Scenario's voor modelberekening:

1. Plaatsing SON-T lampen horizontaal (hoogte blijft bv. 4 meter) of boven pad verticaal wijzigen. Daarbij steeds ook voor enkele lamphoeken (hart van lamp wijzigen van loodrecht naar x graden) die lamppositie doorrekenen.
2. Scherm dichttrekken, en bijdrage reflectie lamplicht op fotosynthese doorrekenen. Kan door verhoogde belichtingsefficiëntie het opgesteld vermogen omlaag? Wat is het effect op warmtebalans.
3. verschillende LED-posities in tomaat, zoals afstand tot gewasrij, hoogte, uitstralingshoek. Hierbij standaard 0.5m LED-wand en evt. 1m wand, en 95% rood en 5% blauw. Doel is zoveel mogelijk lichtbenutting en zo min mogelijk verlies naar buiten. Hierbij worden bevindingen voor LED bij komkommer betrokken (via W. van Ieperen)
4. wijzigen padbreedte bij SON-T belichte tomaat, van 1.60 naar 1.90 m.
5. breedstralers versus diepstralers.
6. 3 typen rozenteelt: (a) rolgoten met ingebogen takken aan 1 zijde, (b) bed met rechtopgaande roos en maar weinig ingebogen bladpakket (= Zuurbier), (c) veel ingebogen blad (=Akito bij WUR). Simulatie effect op lichtinterceptie en fotosynthese

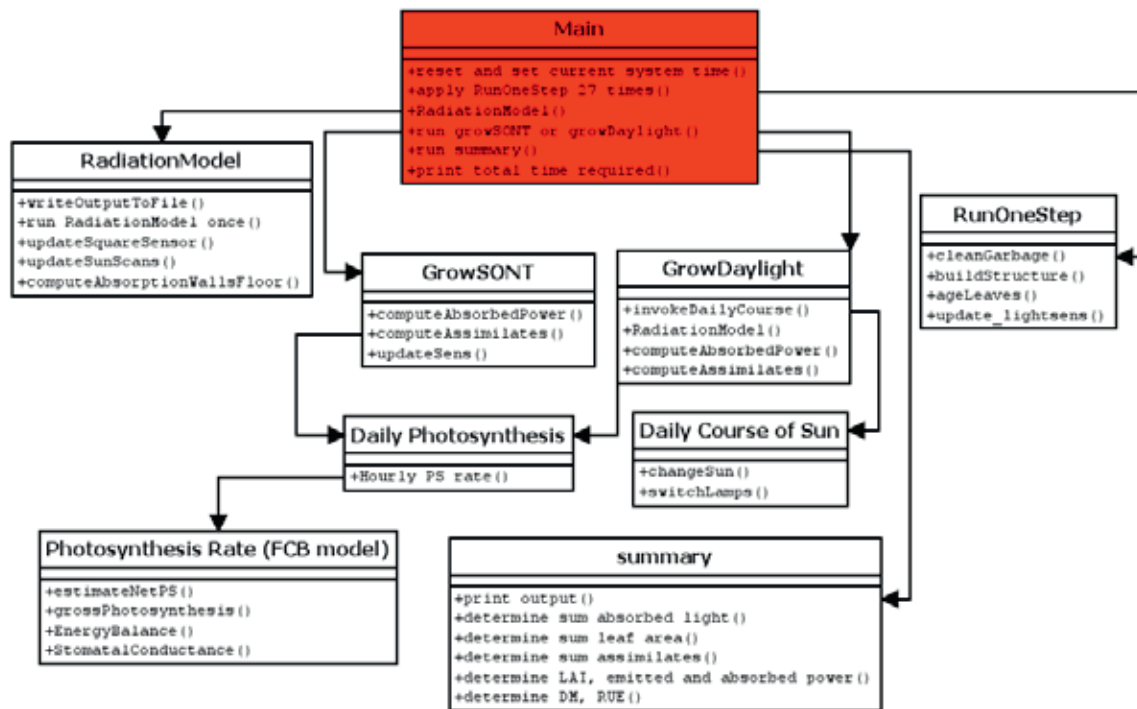
4. Actiepunten:

- Pieter stuurt ongewijzigde powerpoint naar iedereen, en voortgangsverslag ook naar Marc Grootcholten
- Pieter overlegt met Wim van Ieperen over evt door hem in te brengen kennis
- 3D gewasstructuur: blaadjes roos lijken te klein, Gerhard checkt dit.
- Gerhard checkt ook waarom de gevoeligheid voor aantal stralen in ray tracer model een patroon laat zien (zie Fig.8)
- Gerhard checkt of we in één keer een volledig grid van lampen kunnen simuleren, of dat voor elke lamp apart een run moet plaatsvinden i.v.m. de vele CPU-tijd
- Esther probeert ons (WUR glastuinbouw) data te sturen m.b.t. lichtverdeling van LED's zoals gebruikt in komkommerproef Wim v. Ieperen. Format: liefst LDT-file, anders als platte (ascii) tekstfile.
- Pieter vraagt bij Lemnis of ze spectrum, lichtverspreiding en intensiteit van LED's van afd. 11 van Improvement Centre kunnen opsturen
- Dick beoordeelt a.d.h.v. foto's of rozenteler Dongen een representatief gewas heeft, zodat we dat in 3D model kunnen zetten oor scenario-berekeningen

Bijlage III Modelbeschrijving

In the following the structure and the different elements of the model will be explained briefly, as far as they are relevant for using the model and interpreting the simulation results.

At the example of the tomato model, fig z shows a simplified diagram with the different methods that can either be invoked directly by the user or which are invoked by other methods. The rose model is built up analogously, only that in addition it also allows interactive manipulation of the crop and dynamics of organ growth, whereas the tomato model is only static.



Figur z. Simplified scheme of the tomato model, showing the main methods invoked during a typical model run.

The initial setup of the model is the virtual greenhouse described above, equipped with light sensors inside and outside, and two external light sources emitting direct and diffuse light, as a function of latitude, day of the year, and hour of day. In addition, 6 rows of 16 slabs each, with two plants per slab, are placed. In every model run (module Main in Fig. z), first the canopy is built up. It consists of 192 plants with 27 phytomers each, including internodes, leaves or flowering, fruiting (immature and mature) trusses, based on measured topological, geometrical and morphological data and observations. Once the 3D virtual plants are in place, the distribution of light as a function of the position, power and nature of the virtual light source(s) and of the geometry of the simulated canopy and greenhouse is computed. For this, a great number of virtual light rays (numbers of rays and number of reflections are fixed by the user) are casted randomly from the light sources (lamps or direct and diffuse daylight, or both) to the simulated structure and the light sensors. Certain simulated structures (namely leaves, internodes and immature fruits) invoke the photosynthesis rate model to compute local photosynthesis on the basis of locally intercepted PAR which is integrated to daily assimilation with another routine. If needed, the daily course of light levels can be modelled by simulating the course (position and power) of the virtual sun, and by switching the assimilation lamps on or off according to a predefined scheme (off during certain hours of the night, on the rest of the time, but only if daylight levels are below a threshold level). A summary method writes output to different files: total light absorbed by the canopy (separated into leaves, fruits, and stems), total leaf area and LAI, daily amount of assimilates and dry matter, as well as the light level perceived by the virtual sunscan sensors (the latter giving a 3D distribution of light). Simulations of light distribution can also be carried out with an empty greenhouse, i.e. without the canopy. In addition, numerous test routines have been written (not shown in Figure z), which help to calibrate or reparameterize the different submodels (mainly photosynthesis) of this model.

Usually the model runs are done on a Windows console, i.e. without visualisation, to save computation time, as the time-critical process is the reading and display of the numerous geometrical objects. In this mode, the run times are reasonably fast, i.e. 4 minutes for 10 million rays, 12 minutes for 20 million rays, or 74 minutes for 1 billion rays. As has been shown earlier, the higher the number of rays chosen, the less variable and the more reliable the measured light interception per leaf becomes.

Bijlage IV Simulatie lichtabsorptie roos

Hieronder de samenvatting (abstract) van een detailstudie van hetzelfde roosgewas als in bovengenoemd rapport. De studie door Paradiso *et al.* (2011) in *Scientia Horticulturae* betreft lichtabsorptie en fotosynthese door gewas bij verschillende golflengten, gemeten en deels gesimuleerd met het (niet 3D) model Intkam.

Roberta Paradiso, Esther Meinen, Jan F. H. Snel, Pieter de Visser, Wim van Ieperen, Sander W. Hogewoning en Leo F. M. Marcelis:

Spectral dependence of Photosynthesis and Light Absorptance in Single Leaves and Canopy in *Rosa hybrida*
Scientia Horticulturae 127, 548-554

Abstract

Little is known about the effects of leaf pigmentation (related to leaf ontogeny), on the spectral dependence of photosynthesis and most observations have been limited so far to single leaves. This study aimed to investigate photosynthesis and the related optical properties of two types of rose leaves, young reddish leaves and middle age green leaves, and to quantify the spectral dependence of photosynthesis at the canopy level.

Photosynthesis was measured with CO₂/H₂O gas analyzer on intact leaves of *Rosa hybrida* at narrow band light of 18 wavelengths. Subsequently, the optical properties (transmittance, absorptance and reflectance) were measured with spectrophotometer. A mechanistic crop model was used for up scaling measurements at the single leaf level to the crop level (crop with LAI = 3).

The green and the reddish leaves had similar total PAR absorptance, even though absorptance around 550 nm was slightly lower in the green leaves. The maxima of photosynthesis efficiency were at 640-680 nm for quantum yield (per absorbed light unit) and at 660-680 nm for action spectrum (per incident light unit), regardless the colour of the leaf blade. In the range 500-580 nm, both the quantum yield and the action spectrum were lower in reddish than in green leaves. Differences in optical properties and photosynthetic behaviour were related to the higher content of anthocyanins in red leaves.

The spectral dependence of light absorption and photosynthesis at the canopy level differed distinctly from that at leaf level. The spectral differences in absorption at the leaf level almost disappeared at the canopy level. Consequently, while the action spectrum of green light (520-570 nm) was only 67% of that of red light (680 nm) at the leaf level, it increased to 79% at the crop level.

Young reddish leaves had higher absorptance but lower action spectrum and quantum yield at green light. Spectral differences in photosynthesis at the canopy level are much smaller than at the leaf level. Our short term measurements suggest that optimizing spectral output of LED lamps may increase photosynthesis up to 12% for a canopy with green leaves and up to 17% for a canopy with reddish leaves when compared to the spectrum of HPS lamps.

Key words: action spectrum, spectral quantum yield, transmittance, reflectance, wavelength, anthocyanins.

