

Diffuus Licht Roos

Ad Schapendonk en Kees Rappoldt

September 2011



Ministerie van Economische Zaken,
Landbouw en Innovatie



Effecten van diffuus licht in de rozenteelt

Onderzoeksrapport PT projectnummer 14090

Ad Schapendonk¹ en Kees Rappoldt²

¹Plant-Dynamics, Englaan 8, 6703 EW Wageningen, Nederland

²EcoCurves, Kamperfoelieweg 17, 9753 ER Haren, Nederland

E-mail: ad@plant-dynamics.nl

Plant-Dynamics

Wageningen, September 2011

REFERAAT

Ad Schapendonk en Kees Rappoldt, 2011. *Effecten van diffuus licht in de rozenteelt* ; *Onderzoeksrapport*, 40 blz. ; 23 ref.

Dit onderzoek werd gesubsidiëerd door het Productschap Tuinbouw en het ministerie van EL&I.

Keywords: Klimaat Roos, Diffuse straling, Fotosynthese efficiëntie, Stralingsbalans.

Dit rapport geeft een overzicht van de effecten van diffuus glas op de opbrengst van roos en de interacties met licht, CO₂, en RV. Diffuus glas voorkomt pieken in de horizontale lichtverdeling en verhoogt de gemiddelde lichtbenutting.

© 2011 Plant-Dynamics BV
Englaan 8, 6703 EW Wageningen, Nederland
e-mail:ad@plant-dynamics.nl

Voorplaat: “Diffuus kasdek bij Wageningen-UR in Bleiswijk en opnamen van een bezoek van de begeleidingscommissie aan het experiment in Bleiswijk”

Dit rapport is to stand gekomen in samenwerking met het Productschap Tuinbouw, het Ministerie van Landbouw, Economie en Innovatie, EcoCurves BV en Plant Dynamics BV ter stimulering van energiebesparende maatregelen in de tuinbouw. De resultaten mogen vrij gebruikt worden, mits de bronnen worden vermeld.

EcoCurves BV en Plant Dynamics BV zijn niet aansprakelijk voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de gegevens en de modelresultaten in dit rapport.

Inhoudsopgave

1	Samenvatting	4
2	Inleiding	6
3	Werkwijze	8
3.1	Kader van werkzaamheden	8
3.2	Doelstellingen	9
4	Scenario analyses	10
4.1	Interactief kasklimaatmodel Explorer	10
4.2	Onderdelen Explorer Modellen	11
4.3	Compensatie voor geheugeneffecten	12
5	Scenario analyses	14
5.1	Meer licht toelaten door minder schermen	19
5.2	Diffuus in relatie tot assimilatielicht	22
5.3	Wisselscenario experiment Bleiswijk	23
5.4	Verdamping	24
6	Lichtverdeling	26
7	Temperatuurverdeling	30
8	BIJLAGEN	33
8.1	Processen in Roos Explorer	33
8.2	Voorbeeld	34
8.3	Luchtvochtigheid	35
8.4	Plant balans	36
8.5	Source	37
	Bibliografie	37

Dankwoord

We bedanken de leden van de begeleidingscommissie; Edwin van der Knaap, Leo Oprel, Marc van der Drift, Richard van der Lans, Nieves Garcia, Andre van Marrewijk, Alex van der Heiden, Chiel van der Kooij en Matthijs Beelen voor het beschikbaar stellen van de klimaatdata en de discussies gedurende de voortgang van het project.

Samenvatting

Een diffuus kasdek geeft een betere horizontale lichtverdeling door het uitsmeren van hoge lichtpieken over een groter oppervlak. Er ontstaat een rustiger klimaat waardoor minder bijgestuurd hoeft te worden. Dit levert gelijkmatigheid over het etmaal. Bovendien is er een aanzienlijke toename in de ruimtelijke gelijkmatigheid, omdat licht en warmtestraling over een groter oppervlak worden uitgesmeerd.

Met het simulatiemodel Explorer Roos[®] werden scenario analyses verricht om daarmee kwantitatieve uitspraken te kunnen doen over de productie van de rozenrassen Red Naomi en Avalanche onder een diffuus kasdek. De weergegevens van de scenario analyses waren afkomstig van een experiment bij Wageningen-UR in Bleiswijk met als behandelingen, diffuus glas en helder glas. Deze gegevens en de gehanteerde sturing van het kasklimaat waren de basis voor de gepresenteerde berekeningen. Het betrof een afdeling met dubbel gecoat diffuus glas (72% haze factor) en een afdeling met helder glas. De totale licht-toetreding in beide afdelingen werd voor de berekeningen gelijk verondersteld. Het experiment werd uitgevoerd van oktober 2010 tot augustus 2011 met het ras Red Naomi. Naast berekeningen voor Red Naomi, zijn er ook voorspellingen gedaan voor het ras Avalanche.

In tegenstelling tot de meeste tuinbouwgewassen is roos een houtig gewas met opslag van reserves in stengel en wortel. Hierdoor ontstaan zogenaamde geheugeneffecten, waardoor momentane effecten pas weken later in een opbrengstverandering resulteren. Om die effecten uit te sluiten is een speciale rekenmethode gehanteerd: elke maand wordt in de simulaties 24 keer herhaald waardoor een periode van 2 jaar ontstaat, die met stappen van 5 minuten wordt doorgerekend, met daarin telkens een herhaalde maand als invoer. Er ontstaat dan een stabiel productieniveau, waarin alleen de effecten die betrekking hebben op die speciale maand worden berekend en waarin geen geheugeneffecten van het klimaat in voorgaande maanden meespelen.

De productietoename, als gevolg van een hogere fotosynthese (lichtbenutting), door dubbel gecoat diffuus glas is 6% voor Red Naomi en 7,2% voor Avalanche, op jaarbasis, met pieken van 10-15% in voor- en najaar en dalen van 0-4% in winter en zomer. De winst is vooral bij Red Naomi voor het grootste gedeelte toe te schrijven aan een toename van het *aantal* takken. Het *takgewicht* nam slechts met 0,4% toe. Bij Avalanche neemt het *takgewicht* meer toe (0,8%) dan bij Red Naomi. De verschillen tussen red Naomi en Avalanche zijn minder groot dan men zou mogen verwachten op basis van de sterk uiteenlopende raseigenschappen.

In aanvulling op de verbetering van de lichtbenutting door een hogere fotosynthese en verbeterde plantopbouw, manifesteert een diffuus glasdek zich door een gelijk-

matiger temperatuurverdeling aan de kop van het gewas. Hierdoor kan meer licht in de kas worden toegelaten (minder schermen). Dit voordeel van diffuus glas is op jaarbasis 1 tot 2%, bovenop het effect van de hogere fotosynthese, en wordt gerealiseerd door een lagere schermbehoefte (voorkomen van stress) in de zomermaanden. Dit voordeel als gevolg van de lagere schermbehoefte kan echter aanzienlijk oplopen als de temperatuurtolerantie van een bepaald ras scherpe grenzen stelt aan de maximaal te tolereren knoptemperatuur.

De algemene consensus over lichtdoordringing is dat diffuus glas zorgt voor zowel een betere horizontale spreiding als een betere lichtdoordringing in het gewas. De eerste bewering klopt, de tweede slechts gedeeltelijk, namelijk bij een lage zonnestand, bijvoorbeeld in februari. Als de zon hoog staat is de lichtdoordringing van direct licht juist groter dan die van diffuus licht. In juni wordt daardoor onder diffuus glas, in de bovenste gewaslagen, meer licht geabsorbeerd dan onder helder glas.

Diffuus glas geeft ook een toename van de verdamping. Voor Red Naomi is er op jaarbasis een toename in de totale verdamping van 5.75% voor de opgaande takken en 1.95% voor het uitgebogen blad. De getallen voor Avalanche zijn 6.7% en 2%. Dit heeft uiteraard consequenties voor de hoeveelheid vocht die afgevoerd moet worden. De verschillen zijn betrekkelijk gering en kunnen worden toegeschreven aan een hogere huidmondjesgeleidbaarheid onder diffuus glas. Dit is op zijn beurt weer het gevolg van een lager dampdrukdeficit van het blad vanwege een afname van de piektemperaturen bovenin het gewas.

De relatieve effecten van diffuus glas t.o.v. helder glas, worden groter naarmate de intensiteit van de assimilatiebelichting afneemt. Uit de berekeningen bleek dat het positieve effect van een diffuus kasdek 20% hoger is wanneer de intensiteit van de assimilatiebelichting wordt gehalveerd van $160 \mu\text{mol m}^{-2}$ naar $80 \mu\text{mol m}^{-2}$ PAR. Overigens heeft deze halvering enorme consequenties voor de totaalopbrengst. We berekenden dat deze halvering in assimilatiebelichting, een opbrengstderving zou geven die varieerde van 40% tot 60% in verschillende wintermaanden.

Inleiding

De verbeterde horizontale spreiding van de inkomende straling onder een diffuus kasdek heeft twee kenmerkende voordelen:

- Een gemiddeld hogere fotosynthese bovenin het gewas.
- Minder behoefte aan schermen vanwege de afvlakking van temperatuurpieken aan de kop van het gewas.

De fysische consequenties van diffuus licht en diverse opties om direct licht in diffuus om te zetten, zijn gedetailleerd beschreven in (Hemming *et al.*, 2005, 2004).

Aan de meeste verbeteringen hangt een prijskaartje. Zo ook bij diffuus glas, letterlijk en figuurlijk. Letterlijk vanwege de kosten van aanschaf en figuurlijk vanwege de kans op een lagere lichttransmissie als gevolg van het diffuus maken van het glas.

Aanschafkosten.

De aanschafprijs van diffuus glas moet worden gewogen tegen de te verwachten positieve effecten, zoals o.a. in deze studie zal worden gepresenteerd. Uitgaande van eerdere studies bij komkommer en tomaat is er in elk geval een verhoging van de opbrengsten te verwachten ((Hemming *et al.*, 2007; Staalduinen *et al.*, 2010)).

Eventuele vermindering van lichttransmissie.

Wanneer de positieve effecten van diffuus glas in ordegrootte enkele procenten bedragen, zoals uit eerder onderzoek met komkommer en tomaat bleek, dan is het aspect lichtvermindering van cruciaal belang. Uitgaand van de constatering dat 1% minder licht een opbrengstvermindering induceert van 1-4% (afhankelijk van het seizoen en het gewasstadium), dan dient de transmissie van diffuus glas minstens even hoog te zijn als de transmissie van niet gecoat helder glas (Challa & Schapendonk, 1983). Met behulp van coatings kan de transmissie van een kasdek met 6,8-7,4% worden vergroot (Hemming *et al.*, 2006, 2009), afhankelijk van het gebruikte procedé. Maar ook aan het coaten van glas hangt een prijskaartje.

Hoe de uiteindelijke effecten van lichttransmissie van het glas op de lichttransmissie van het kasdek uitpakken is lastig te bepalen omdat er allerlei interacties zijn met kasoriëntatie en hellingshoek van het kasdek. Een belangrijke factor is de kasoriëntatie. In de winter is een Oost-West oriëntatie en in de zomer een Noord-Zuid oriëntatie beter. In januari kan het verschil in transmissie van het kasdek door oriëntatie oplopen tot 23% (Hemming *et al.*, 2004). Het effect van de hellingshoek van het kasdek is kleiner. Daarnaast zijn kasconstructiedelen in de

nok en geïnstalleerde schermen factoren die het rendement van diffuus glas zullen beïnvloeden.

Omdat de te verwachten, aan een diffuus kasdek toe te schrijven, verschillen in productie klein zijn is het moeilijk om, enkel op experimentele basis, statistisch significante effecten te constateren en zijn we aangewezen op goed gevalideerde simulatiemodellen. Zeker bij een gewas als roos, waar de effecten van temperatuur en licht zeer afhankelijk zijn van het ras, zijn simulatiestudies noodzakelijk voor het ondersteunen en begrijpen van de (eveneens) onmisbare experimenten.

In dit onderzoek worden de effecten van diffuus glas op de productiviteit van roos (Red Naomi en Avalanche) berekend. Daarnaast worden de effecten kwantitatief toegewezen aan verschillende fysiologische en fysische deelprocessen.

Werkwijze

Het is van groot belang dat effecten van technische verbeteringen in de teelt, zoals hier diffuus glas, worden begrepen op het niveau van fysiologische processen. Met die kennis kan een betrouwbare opschaling worden gemaakt naar het productieniveau. (Schapendonk *et al.*, 2010a).

Uit eerder onderzoek is gebleken dat productiviteit van roos in relatie tot microklimaat sterk afhankelijk is van de raseigenschappen (Schapendonk *et al.*, 2009). De verschillen tussen de rassen zijn terug te voeren op aantoonbare verschillen in de fysiologische deelprocessen en gewasopbouw. Deze kennis is geïntegreerd om de verschillen in opbrengst te verklaren.

3.1 Kader van werkzaamheden

Voor het bepalen van de effecten van diffuus glas op de productie van roos zijn scenario analyses verricht. De effecten zijn opgesplitst in twee rubrieken: 'voorkomen van schade' en 'toename van de groei efficiëntie'. De invoergegevens van de scenario analyses, die verricht zijn met Explorer Roos, zijn afkomstig van een experiment met diffuus glas van Wageningen-UR in Bleiswijk (oktober 2010- augustus 2011). De weergegevens en gehanteerde sturing van het kasklimaat van dat experiment zijn de basis voor de hier gepresenteerde berekeningen. Het betrof 2 afdelingen, een afdeling met dubbel gecoat diffuus glas (72% haze factor) en een afdeling met helder glas. De totale licht-toetreding in beide compartimenten werd voor de berekeningen gelijk verondersteld. De teelt werd uitgevoerd met het ras Red Naomi. De fysiologische eigenschappen en de eigenschappen van de gewasstructuur zijn ontleend aan eerder onderzoek, bekend als het Plantenpaspoort Roos (Schapendonk *et al.*, 2009). Om een beeld te krijgen van de raseffecten werden voor enkele scenario's aanvullende berekeningen verricht met de eigenschappen van het ras Avalanche.

Voor de berekeningen van het kasklimaat werd allereerst de maatvoering van alle kaselementen in kaart gebracht, evenals de fysische eigenschappen van de schermen, ramen en andere componenten van de kasinrichting. De parameters voor de fysische deelprocessen zoals warmtestraling en convectie zijn afkomstig uit eigen metingen (Schapendonk *et al.*, 2010c) of uit de literatuur (de Zwart, 1996; Stanghellini, 1987; Yin *et al.*, 2003; de la Faille *et al.*, 2009; de Zwart *et al.*, 2010).

Omdat 2011 een bijzonder weerpatroon liet zien, met een erg licht voorjaar en 13% minder licht in de zomer (in vergelijking met 2010), werden aanvullende berekenin-

gen verricht met weergegevens uit 2008 en 2009. De gesimuleerde regelingen voor assimilatielicht, scherm en buisverwarming waren in alle jaren gelijk.

3.2 Doelstellingen

Hoofdpijnen berekeningen:

1. Berekeningen van maandelijkse opbrengstverschillen voor Red Naomi en Avalanche voor helder- en diffuus glas. In deze studie is uitgegaan van 72% diffuus glas en geen verschil in transmissie tussen beide behandelingen.
2. Opdelen van opbrengstverschillen in termen van lichtverdeling en termen van temperatuurverdeling.
3. Toedelen van de opbrengstverschillen aan, enerzijds een verminderde behoefte om te schermen en anderzijds aan een toename in lichtbenutting.
4. Analyse van microklimaat. Wat zijn de consequenties voor lichtdoordringing, NIR verdeling, warmteverdeling en verdamping in verschillende lagen van het gewas.

Scenario analyses

4.1 Interactief kasklimaatmodel Explorer

De berekeningen werden verricht met een fysiologisch teeltmodel, dat dynamisch is gekoppeld aan een kasklimaatmodel. Aan dit samengestelde model wordt verder gerefereerd als "Explorer Roos". Interacties tussen gewas en kasklimaat worden op een realistische wijze en dynamisch berekend met terugkoppelingen tussen plant en kas. Het kasklimaatmodel binnen dit concept is vergelijkbaar met KASPRO (de Zwart, 1996). Aanvullend op het kasklimaatmodel, simuleert Explorer Roos op een realistische manier de dynamiek van plant/kas interacties en de gewasopbouw, inclusief scheutuitloop en takopbouw, met opties voor eigenschappen van verschillende rozenrassen. Daarbij worden ook stochastische effecten verdisconteerd, die het gevolg zijn van toevalligheden bij knopuitloop, gestuurd op sink/source verhouding, reservegehalte en apicale dominantie van individuele planten. Op die manier worden, naast opbrengst, ook realistische patronen van het geogoste takgewicht en de eventuele heterogene gewasstructuur (het ontstaan van eventuele open plekken) in de kas beschreven. De interactie met het microklimaat kan daardoor realistisch worden beschreven. Het model is voor de parameterisatie gekoppeld aan het Paspoort Roos (Schapendonk *et al.*, 2009).



Figuur 4.1. Overzicht van gewas op 28 september 2010

4.2 Onderdelen Explorer Modellen

Explorer Roos bestaat uit verschillende modules. De module voor het teeltmodel beschrijft groei en ontwikkeling van het gewas, gestuurd door temperatuur en het aanbod van assimilaten. Het teeltmodel bestaat uit submodules met diverse fysiologische processen en een module met het teeltmanagement zoals knipstrategie, inbuigen van takken etc.

De submodule voor fotosynthese beschrijft de verdamping en de productie van assimilaten door de bladeren, gebaseerd op [Farquhar *et al.* \(1980\)](#), [Leuning \(1995\)](#) en [Bernacchi *et al.* \(2001, 2003\)](#).

De module voor kasklimaat simuleert het actuele kasklimaat in tijdstappen van 5 minuten. De kas wordt daartoe verdeeld in een aantal compartimenten: het kasdek, de lucht tussen het schermpakket en kasdek, de verschillende schermen, enkele luchtlagen boven het gewas, een aantal gewaslagen, de lucht onder het gewas en enkele lagen in de grond. Tussen die compartimenten treedt transport van warmte op in allerlei vormen:

- Warmtegeleiding in de bodem en het glasdek,
- Transport van warmte en waterdamp door convectie (beweging van de lucht), inclusief het eventuele extra transport tengevolge van een onstabiel temperatuurprofiel (koude lucht boven warme lucht),
- De absorptie, reflectie en transmissie van PAR en NIR licht door kasdek, schermen, gewas en bodem,
- Verdamping,
- De warmtestraling geproduceerd en geabsorbeerd door het kasdek, de schermen, het gewas en de bodem,
- De warmte afgegeven door de verwarmingsbuizen en eventuele luchtbehandeling,
- De uitwisseling van warmte en waterdamp met de buitenlucht door ventilatie, het inblazen van lucht, e.d.

Het netto resultaat van al deze processen is een meetbaar klimaat op verschillende plekken in de kas, dat op zijn beurt weer bepalend is voor de fotosynthese en de groei van het gewas. De onderdelen van het explorer kasklimaatmodel zijn geschreven op basis van de literatuur op het gebied van licht en kasklimaat (bijvoorbeeld [Goudriaan, 1977](#); [Goudriaan & van Laar, 1994](#); [Monteith & Unsworth, 1990](#); [de Zwart, 1996](#); [Stanghellini, 1987](#); [Stanghellini & de Jong, 1995](#)) of op basis van de algemene literatuur over van fysische transportverschijnselen ([Bird *et al.*, 1960](#); ?; [Raithby & Hollands, 2000](#); [Incropera *et al.*, 2006](#)).

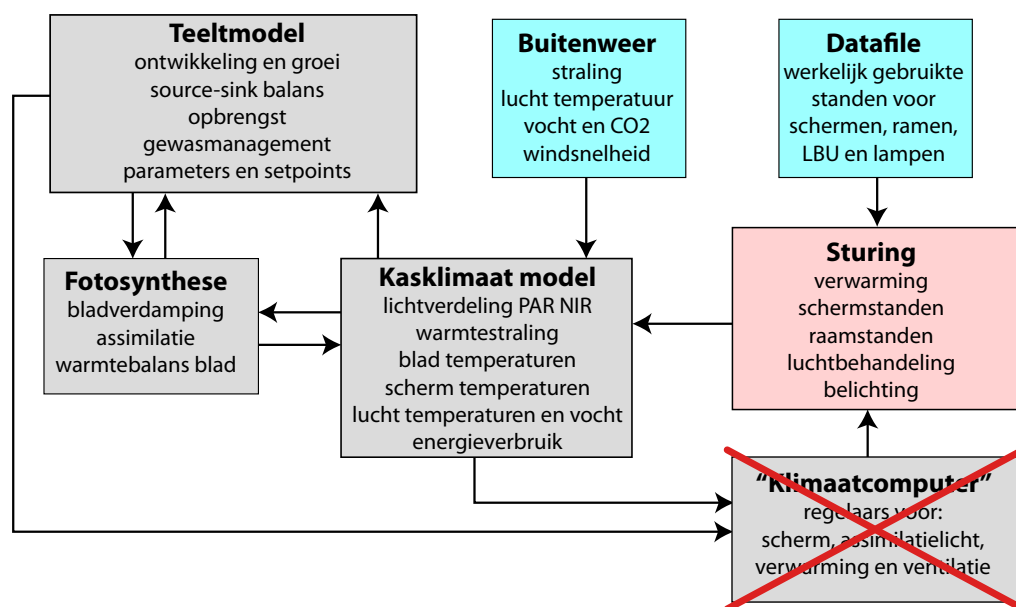
Het kasklimaat model kent twee groepen invoergegevens (Figuur 4.2). Allereerst de weerscondities zoals instraling, temperatuur, vochtgehalte van de lucht en de windsnelheid. De tweede groep invoergegevens betreft de verschillende buistemperaturen, schermstanden, raamstanden en de stand van de luchtbehandeling en eventuele assimilatiebelichting. Dit zijn stuurvariabelen waarmee het kasklimaat beïnvloed wordt. De kasklimaatmodule rekent uit wat er gebeurt bij de gemeten instellingen van die stuurvariabelen.

De berekeningen zijn uitgevoerd met gemeten vijf minutenwaarden van het kasklimaat. Omdat met name het proefjaar waarin de opbrengstbepalingen zijn verricht, i.e. het jaar 2011, gekenmerkt werd door sterk afwijkende lichtverdeling zijn aanvullende berekeningen gedaan voor 2008 en 2009 met dezelfde setpoints voor belichting

en schermstanden. Voor elke maand is een schatting gemaakt van de verwachte opbrengsten. Een beschrijving van de Explorer modellen is gegeven in [Schapendonk et al. \(2010a\)](#). De optie om eigen regelaars te gebruiken, is in deze studie niet gebruikt (Figuur 4.2). In plaats daarvan zijn de gemeten data in de input datafile gewijzigd, volgens het geplande scenario. De intensiteit van de assimilatiebelichting wordt daarbij bijvoorbeeld gehalveerd, om te bestuderen hoeveel het effect van diffuus glas daardoor wordt beïnvloed. Voor de berekeningen van scenario's van schermstanden werd wel een regeling gehanteerd. Daarbij gaat het scherm dicht boven een bepaalde temperatuur van de kop van het gewas, als alternatief voor de gemeten schermstanden. In die situatie is verder geen rekening gehouden met effecten van een eventuele aangepaste regeling van de temperatuur, als gevolg van de gewijzigde scherminstellingen. Dat zou de berekeningen aanzienlijk compliceren en we verwachten slechts marginale effecten op basis van eerdere verkenningen met schermregelingen.

4.3 Compensatie voor geheugeneffecten

In tegenstelling tot de meeste tuinbouwgewassen is roos een houtig gewas met opslag van reserves in stengel en wortel. Hierdoor ontstaan zogenaamde geheugeneffecten, waardoor momentane effecten pas weken later in een opbrengstverandering resulteren. Het duurt vaak een heel jaar voor geheugeneffecten geheel zijn uitgedempt. We hebben een methode gehanteerd die hiervoor compenseert. Elke maand wordt in de simulaties 24 keer herhaald waardoor een periode van 2 jaar ontstaat met weergegevens enkel van die betreffende maand. Een tijdreeks van 2 jaar, die met stappen van 5 minuten wordt doorgerekend. Er ontstaat dan een stabiel



Figuur 4.2. De modules van een Explorer kasklimaat model worden hier aangestuurd met de geregistreerde standen voor verwarming, ramen en luchtbehandeling uit een praktijkexperiment. Het resultaat is het doorrekenen van de proef, waarbij het gesimuleerde kasklimaat, het energiegebruik en de opbrengst in overeenstemming moeten zijn met de proefresultaten.

productieniveau, waarin alleen de effecten die betrekking hebben op die speciale maand worden berekend en waarin geen verstrengeling plaatsvindt met het klimaat in voorgaande of daarop volgende maanden. Deze methode heeft als klein nadeel dat de takproductie in de donkere maanden enigszins wordt onderschat omdat niet wordt geprofiteerd van suikerreserves, die in de zomermaanden en lichte najaarsmaanden in de wortel en de stengelbasis worden opgeslagen. Deze reserves zorgen er bij roos voor dat er een soort nivellering is tussen de opbrengsten in de winter en de zomer. Dit nadeel, in de gebruikte rekenprocedure, weegt echter niet op tegen het grote voordeel van de eliminatie van de storende geheugeneffecten, die de analyse anders aanzienlijk zouden verstoren.

Scenario analyses

In tabel 5.1 en 5.2 zien we de procentuele productietoename als gevolg van het diffuse kasdek voor de rassen Red Naomi en Avalanche. De schermregeling stuurt het scherm dicht boven 650 W m^{-2} en weer open beneden 400 W m^{-2} . Dit is de standaardregeling in het experiment in Bleiswijk. Later is daar vanaf geweken door in de diffuse kas bij hogere straling te schermen dan in de kas met helder kasdek. Die aanpassing is in de simulaties niet meegenomen. De gepresenteerde opbrengsten zijn beter vergelijkbaar omdat de gehanteerde regelingen in beide kascompartimenten gelijk zijn. De transmissie van het scherm is 67%. We hebben aangenomen dat de diffuse fractie van het daglicht bij een gesloten scherm 100% is. Met de gehanteerde setpoints voor schermen is de jaarlijkse productietoename door dubbel gecoat diffuus glas 6% voor Red Naomi en 7,2% voor Avalanche. De winst is vooral bij Red Naomi voor het grootste gedeelte toe te schrijven aan een toename van het *aantal* takken. Het *takgewicht* nam slechts met 0,4% toe. Bij Avalanche neemt het *takgewicht* meer toe (0,8%) dan bij Red Naomi maar ook voor Avalanche is de toename in het aantal takken de belangrijkste factor voor de productietoename. De gesimuleerde effecten op opbrengst liggen in dezelfde range als die voor komkommer (Hemming *et al.*, 2007).

Hoewel de spreiding over de jaren aanzienlijk is, blijkt diffuus licht het meeste effect te sorteren in de maanden waarin de verhouding tussen direct licht ten opzichte van diffuus licht, relatief hoog is en de zonnestand relatief laag (voorjaar en najaar). Bij een lage zonnestand wordt het meest geprofiteerd van de anti-reflectiecoating en bij een hoog aandeel direct licht heeft de omzetting naar diffuus licht natuurlijk de grootste impact met als resultaat dat de opbrengsttoename het hoogst is in de maanden maart april en mei. De effecten zijn het laagst in de winter, gevolgd door de zomer. De hoge procentuele opbrengstverhoging in december 2008 en januari 2009 (tabel 5.2) is te danken aan het extreem hoge aantal zonuren in die maanden (bijna 2 maal het langjarig gemiddelde).

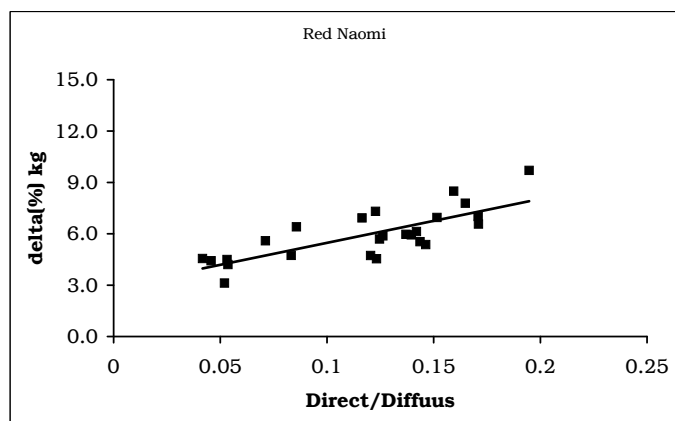
Tabel 5.1. Effect omzetting direct licht in diffuus licht bij Red Naomi.

maand	Takaantal per maand		Takgewicht (g)		Kg per maand		g vers/Mol(abs)				
	Dif	Contr	Dif	Contr	Dif	Contr	Dif	Contr			
apr-08	4.42	4.19	5.5	64.6	0.4	1.25	1.18	6.0	1.9	1.8	4.2
mei-08	5.09	4.83	5.4	66.7	1.1	1.49	1.40	6.6	1.90	1.80	5.3
jun-08	5.12	4.90	4.5	67.5	0.9	1.51	1.44	5.4	1.89	1.81	4.3
jul-08	4.80	4.62	4.0	66.5	0.5	1.39	1.33	4.5	1.91	1.84	3.4
aug-08	4.38	4.20	4.3	64.9	0.4	1.24	1.18	4.7	1.89	1.82	3.4
sep-08	3.85	3.65	5.5	63.9	0.4	1.07	1.01	5.9	1.77	1.70	4.1
okt-08	3.29	3.09	6.6	62.1	0.3	0.89	0.83	6.9	1.89	1.82	3.5
nov-08	2.58	2.48	4.0	58.6	0.2	0.66	0.63	4.2	1.90	1.88	1.4
dec-08	2.54	2.44	4.2	58.6	0.3	0.65	0.62	4.5	1.94	1.92	1.1
jan-09	2.60	2.45	6.1	59.4	0.3	0.67	0.63	6.4	1.93	1.89	1.9
feb-09	2.73	2.65	2.9	59.6	0.2	0.71	0.68	3.1	1.86	1.84	0.9
mrt-09	3.28	3.11	5.4	62.2	0.4	0.89	0.84	5.9	1.74	1.68	3.3
apr-09	4.20	3.91	7.3	65.3	0.5	1.19	1.11	7.8	1.71	1.61	6.0
mei-09	4.45	4.19	6.2	66.4	0.7	1.29	1.20	7.0	1.67	1.58	5.6
jun-09	4.68	4.45	5.2	66.3	0.9	1.35	1.27	6.1	1.67	1.59	4.8
okt-10	3.36	3.14	7.0	61.1	0.3	0.89	0.83	7.3	1.91	1.84	3.8
nov-10	2.63	2.48	6.1	57.7	-1.4	0.66	0.63	4.6	1.93	1.88	2.7
dec-10	2.50	2.41	3.9	57.5	0.5	0.63	0.60	4.4	1.94	1.91	1.7
jan-11	2.58	2.45	5.3	57.6	0.2	0.65	0.61	5.6	1.93	1.89	2.3
feb-11	2.90	2.78	4.4	59.9	0.4	0.76	0.72	4.7	1.91	1.88	2.0
mrt-11	3.78	3.51	7.7	64.6	0.7	1.06	0.98	8.5	1.82	1.73	5.2
apr-11	4.54	4.18	8.6	66.8	1.0	1.32	1.20	9.7	1.79	1.67	7.5
mei-11	4.84	4.57	5.9	68.2	1.1	1.43	1.34	7.0	1.80	1.71	5.7
jun-11	4.63	4.41	5.0	66.5	0.5	1.34	1.27	5.5	1.77	1.69	4.3
jul-11	4.36	4.16	4.8	65.1	0.8	1.23	1.17	5.7	1.73	1.66	4.3
Gemiddeld	3.77	3.59	5.05	63.2	0.39	1.05	0.99	6.07	1.84	1.78	3.66

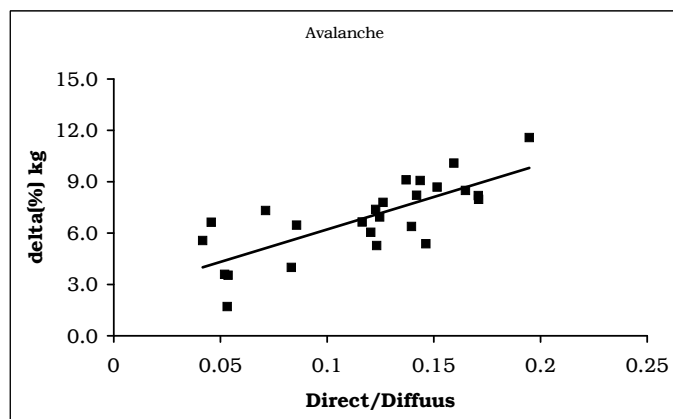
De verschillen tussen red Naomi en Avalanche zijn minder groot dan men zou mogen verwachten op basis van de sterk uiteenlopende raseigenschappen (Schapendonk *et al.*, 2009). Dit verrassende resultaat wordt bij nadere analyse veroorzaakt door de sterke terugkoppeling tussen de basisprocessen. In de rozenteelt werken deze terugkoppelingen dempend op de effecten van teeltmaatregelen en de invloed van individuele raseigenschappen. Hierdoor is de interpretatie van experimenten met roos bijzonder lastig. Zo zal Avalanche minder profiteren van gelijkmatiger warmteverdeling dan Red Naomi, omdat Avalanche zelf voldoende koelend vermogen heeft door het relatief grote verdampend oppervlak. Toch zien we dat Avalanche meer van een diffuus kasdek profiteert dan Red Naomi (figuur 5.2). Dit blijkt veroorzaakt te worden door de plantopbouw die bij Avalanche beter tot zijn recht komt qua productiviteit, in interactie met diffuus licht, dan bij Red Naomi. We zien dit ook terug in de lichtbenuttingsefficiënties (Tabel 5.1 en 5.2) die bij Red Naomi toeneemt met 3.66% en bij Avalanche met 4.45%. Hierbij dient aangetekend te worden dat de effecten van een te hoge straling op de bloemkwaliteit niet zijn meegewogen. Het is bekend dat Red Naomi gevoeliger is voor dit aspect dan Avalanche en dat kan de resultaten beïnvloeden. Om dit aspect goed te benaderen is meer kennis nodig over de specifieke effecten van hoge temperatuur op de bloemkwaliteit.

Het is overigens goed te zien dat de toename in meerproductie niet alleen is toe te schrijven aan een primair effect van een hogere lichtbenuttingsefficiëntie, maar ook aan een secundaire effect: de toename in lichtinterceptie. We noemen dit een secundair effect omdat het is terug te leiden op een snellere bladontwikkeling, die op zijn beurt weer werd mogelijk gemaakt door een hogere lichtbenuttingsefficiëntie.

Het relatieve belang van primair en secundaire effecten is af te leiden uit het verschil in procentuele productie toename en de procentuele lichtbenutting (g mol^{-1}) (Tabel 5.1 en 5.2). Een gedetailleerde analyse toont aan dat primaire effecten van lichtbenutting op bladbasis een groter gewicht in de schaal leggen dan de secundaire effecten van een toename in lichtinterceptie.



(a)



(b)

Figuur 5.1. Toename van de meerproductie als functie van een toename van de fractie direct licht in het daglicht (De assimilatiebelichting is hier niet in beschouwing genomen).

Wanneer de maandelijks procentuele productietoenames voor Red Naomi en Avalanche worden geplot als functie van de fractie direct licht (Figuur 5.2), is duidelijk te zien dat Avalanche meer profiteert dan Red Naomi, tenminste wat de lichtbenutting betreft. Het effect op bloemkwaliteit is hier buiten beschouwing gebleven. Ook is in deze tabel geen rekening gehouden de diffuse werking van het scherm.

5.1 Meer licht toelaten door minder schermen

In aanvulling op de verbetering van de lichtbenutting door fotosynthese en verbeterde plantopbouw, kenmerkt diffuse straling zich door een gelijkmatiger temperatuurverdeling aan de kop van het gewas. In een kas met een diffuus dek is schermen daardoor minder vaak nodig. Dit effect is nog niet meegewogen in de berekeningen in (Tabel 5.1 en 5.2). Daar werd zowel voor diffuus als helder glas op dezelfde drempelwaarden geschermd. Wanneer we dat uitgangspunt verlaten kunnen we nieuwe, winstgevendere grenzen opzoeken door minder te schermen. Hierdoor kan meer licht in de kas worden toegelaten. Er zijn natuurlijk veel scenario's te bedenken om dit te realiseren, maar een logische gedachtegang is het ontwerp van een regeling waarbij het scherm sluit bij een bepaalde maximumwaarde van de temperatuur aan de kop van het gewas. Dat is met de huidige kennis echter wel een probleem. Er is weliswaar bekend hoe de bladfotosynthese terugloopt bij hogere temperaturen, maar er is nog onvoldoende inzicht in de licht- dan wel temperatuur-drempel waarboven voor verschillende rozenrassen schade optreedt aan de bloem.

We hebben dit laatste probleem even geparkeerd tot er meer experimentele data zijn. Voorlopig zijn we er in deze studie van uitgegaan dat de kop van het gewas niet hoger mag worden dan 32°C. De bloemtemperatuur is bij directe straling 5°C hoger dan de temperatuur van de topbladeren. Door de hogere warmtecapaciteit van de bloem is de dynamiek van de temperatuurwisseling bij wisselende instraling sterk afgevlakt. Dit is in de scenarioberekeningen niet meegewogen. Het referentiepunt is de top van een verdampend gewas met een maximum temperatuur van 32°C. De bloemtemperatuur is dan ongeveer 37°C.

Hoe groot zijn de voordelen van diffuus glas wanneer we de beperking van schade loskoppelen van de eerder behandelde toename in lichtbenutting? Om dat te bepalen hebben we een virtueel experiment uitgevoerd met Explorer Roos waarbij de maandelijks producties zijn uitgerekend met dezelfde dataset die werd gebruikt voor de berekeningen in tabel 5.1. In plaats van een regeling waarbij het scherm wordt gebruikt boven 650 en een bandbreedte voor openen van 400 W m⁻² (zoals in tabel 5.1), wordt het scherm (67% transmissie) in deze simulatie dichtgetrokken als de bovenste bladlaag (of een deel ervan) een drempelwaarde van 32°C overschrijdt. Dit kan uiteraard experimenteel niet worden getest maar het kan wel worden gesimuleerd in de virtuele kas. Op die manier verkrijgen we inzicht in de maximaal haalbare toegevoegde waarde van diffuus glas bij een optimale schermregeling, dat wil zeggen een regeling waarbij een maximum temperatuur aan de kop van het gewas (= positie van de bloem) wordt getolereerd. Wanneer we een scenario met een vaste schermregeling vergelijken met een dynamische schermregeling, dan zien we dat de opbrengsten bij een dynamische schermregeling hoger zijn (5.3). Dit is het geval omdat er in dat geval regeling alleen licht wordt weggeschermd bij temperatuurstress, terwijl bij een vaste drempel er geen andere voorwaarde wordt gesteld dan de overschrijding van een bepaald niveau van de buitenstraling. Het scherm is dan vaker dicht.

Optimaal schermen leidt dus tot hogere opbrengsten, maar het positieve effect van een diffuus kasdek wordt daardoor minder. Dat is logisch omdat bij een vaste

drempel zowel meerwaarde vanwege de toename in lichtbenutting als vanwege vermijden van stress wordt gerealiseerd, terwijl er bij een optimale schermregeling alleen nog extra winst wordt behaald vanwege de toename in lichtbenutting. Met andere woorden: een deel van het positieve effect van diffuus glas kan ook worden gerealiseerd door een verbeterde schermregeling toe te passen. Helaas is een dergelijke regeling in de praktijk moeilijk te realiseren vanwege de sterk fluctuerende intensiteiten van het directe licht.

Het procentuele effect van diffuus glas op de lichtbenutting, als aparte factor, is overigens hoger bij een optimaal schermgebruik dan bij een regeling op een vast stralingssetpoint, vanwege een grotere fractie direct licht die wordt omgezet in diffuus. Er wordt dan namelijk minder licht diffuus gemaakt door het scherm.

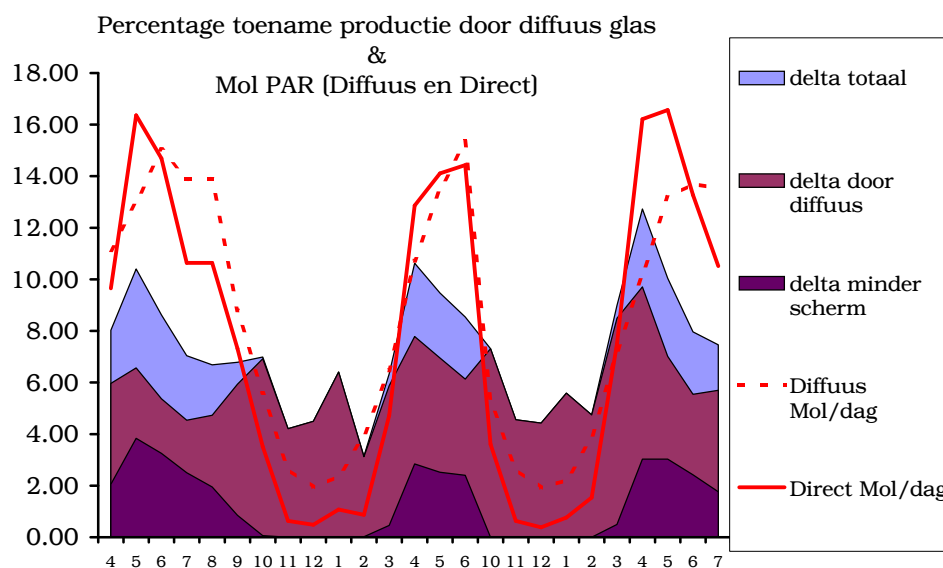
Wanneer we de genoemde effecten apart analyseren zien we dat de gesommeerde voordelen van diffuus glas jaarbasis 7 tot 8% bedragen, waarvan het grootste gedeelte (6%) wordt behaald door een hogere fotosynthese in voor en najaar en een klein gedeelte (1-2% op jaarbasis) vanwege een lagere schermbehoefte in de zomermaanden. Het voordeel als gevolg van de lagere schermbehoefte kan echter aanzienlijk oplopen als de temperatuurtolerantie van de bloemknop scherpe grenzen stelt aan de maximaal te tolereren toptemperatuur.

Tabel 5.3. Toegevoegde waarde van diffuus kasdek, gedifferentieerd naar het effect van diffuus licht op de lichtonderschepping plus lichtbenutting (eerste kolom) en het effect van meer licht toelaten door een verminderde schermbehoefte (tweede kolom). In dat geval liep het scherm (transmissie 67%) dicht als de berekende toptemperatuur van het gewas, of een deel ervan, door directe licht een hogere temperatuur bereikte dan 32°C.

	$\Delta(\%)$ dif	$\Delta(\%)$ minder scherm	$\Delta(\%)$ Totaal
apr-08	5.97	2.06	8.02
mei-08	6.57	3.83	10.40
jun-08	5.37	3.25	8.62
jul-08	4.54	2.50	7.04
aug-08	4.73	1.95	6.68
sep-08	5.94	0.85	6.78
okt-08	6.92	0.06	6.99
nov-08	4.21	0.00	4.21
dec-08	4.50	0.00	4.50
jan-09	6.40	0.00	6.40
feb-09	3.12	0.02	3.14
mrt-09	5.88	0.46	6.34
apr-09	7.79	2.84	10.63
mei-09	6.95	2.52	9.47
jun-09	6.13	2.40	8.54
okt-10	7.31	0.00	7.31
nov-10	4.56	0.00	4.56
dec-10	4.42	0.00	4.42
jan-11	5.59	0.00	5.59
feb-11	4.74	0.00	4.74
mrt-11	8.49	0.50	8.99
apr-11	9.70	3.03	12.73
mei-11	7.01	3.03	10.04
jun-11	5.54	2.42	7.96
jul-11	5.70	1.76	7.46
Totaal	6.07	1.70	7.77

De meerwaarde van diffuus licht, bovenop het vermijden van een te hoge kooptemperatuur, is vooral in het voorjaar en het najaar te zien en wordt dan veroorzaakt door een betere horizontale verdeling van het licht (figuur 6.3). Door de betere spreiding worden lichtpieken gedempt waardoor de fotosynthese uit de verzadigingszone blijft en relatief donkere vlakken op andere plekken juist meer licht ontvangen. De reden voor het selectief grote voordeel, in het vroege voorjaar en najaar, is de hoge verhouding tussen de hoeveelheid direct licht en diffuus licht in die periodes (figuur 6.2). Deze constatering druist enigszins tegen de intuïtie in. Men zou een hogere verhouding direct/diffuus verwachten in de zomer, dan in de late winter. Wanneer er echter sprake is van een helder voorjaar, en dat komt vaak voor, dan is er vanwege de gemiddeld lage lichtintensiteit, al snel een omslag van meer direct naar meer diffuus licht. Vanwege de hoge gemiddelde lichtintensiteiten in de zomer zal zo'n omslagpunt in juni veel minder vaak optreden. De kans op een hoger rendement van de omzetting van directe lichtcomponenten in diffuse lichtcomponenten is daardoor groter in het vroege voorjaar dan in juni.

In Figuur 5.2 zijn de resultaten van Tabel 5.3 nog eens grafisch weergegeven.



Figuur 5.2. Procentuele toename in geoogst vergewicht voor verschillende maanden. De maanden op de x-as corresponderen met die in de tabellen. De grafiek laat de totale procentuele toename zien als gevolg van een diffuus kasdek en de opsplitsing voor een verminderde schermbehoefte en het effect van een betere benutting van het geabsorbeerde licht. De lijnen presenteren de lichtintensiteiten van de directe en diffuse fracties, gesimuleerd aan de kop van het gewas voor een helder kasdek.

5.2 Diffuus in relatie tot assimilatielicht

De meerwaarde van een diffuus kasdek is uiteraard relatief en wordt, zoals eerder al betoogd, mede bepaald door de structuur van de kas en de schermregeling. Ook de intensiteit van de assimilatiebelichting heeft invloed. Dat is logisch omdat een verhoging van de assimilatiebelichting een toename in productie geeft die onafhankelijk is van de behandeling (diffuus kasdek versus helder kasdek). In Tabel 5.4 zijn de resultaten van twee belichting scenario's voor de teelt van Red Naomi gepresenteerd. Het standaard scenario is een belichtingsintensiteit van $160 \mu\text{mol m}^{-2}$ en het alternatieve scenario is een belichtingsintensiteit van $80 \mu\text{mol m}^{-2}$. De belichtingsduur was voor beide behandelingen hetzelfde in overeenkomst met de gerealiseerde belichtingstijd in het experiment.

Tabel 5.4. Effect van assimilatiebelichting op de meerwaarde van een diffuus kasdek.

	kg m ⁻² maand ⁻¹		delta(%)	
	160 $\mu\text{mol m}^{-2}$	80 $\mu\text{mol m}^{-2}$	160 $\mu\text{mol m}^{-2}$	80 $\mu\text{mol m}^{-2}$
apr-08	1.25	1.02	6.0	7.8
mei-08	1.49	1.31	6.6	8.3
jun-08	1.51	1.34	5.4	6.7
jul-08	1.39	1.18	4.5	5.0
aug-08	1.24	1.02	4.7	6.0
sep-08	1.07	0.83	5.9	7.9
okt-08	0.89	0.60	6.9	7.6
nov-08	0.66	0.35	4.2	5.8
dec-08	0.65	0.33	4.5	7.2
jan-09	0.67	0.36	6.4	9.8
feb-09	0.71	0.41	3.1	3.0
mrt-09	0.89	0.62	5.9	9.4
apr-09	1.19	1.00	7.8	9.8
mei-09	1.29	1.11	7.0	7.6
jun-09	1.35	1.19	6.1	6.9
okt-10	0.89	0.59	7.3	10.5
nov-10	0.66	0.34	4.6	0.7
dec-10	0.63	0.31	4.4	5.1
jan-11	0.65	0.33	5.6	4.8
feb-11	0.76	0.43	4.7	5.1
mrt-11	1.06	0.80	8.5	10.9
apr-11	1.32	1.11	9.7	10.5
mei-11	1.43	1.26	7.0	7.8
jun-11	1.34	1.15	5.5	7.7
jul-11	1.23	1.03	5.7	6.3
Totaal	1.05	0.80	5.92	7.13

We zien dat een halvering van de assimilatiebelichting in de wintermaanden een opbrengstderving geeft van 40% tot 60% (vergelijk de eerste en de tweede kolom). In werkelijkheid zal de opbrengstderving wat kleiner zijn dan berekend omdat in de winter geprofiteerd wordt van assimilaten die in de zomer zijn opgeslagen. Dit wordt echter vanwege de eerder verklaarde manier van berekenen niet meegewogen. Anderzijds is de opbrengstderving in werkelijkheid in het vroege voorjaar juist weer wat groter, omdat het gewas met weinig assimilatiebelichting uitgeput de winter uit zal komen en vervolgens nauwelijks kan herstellen bij laag assimilatielicht. Uit experimenten hebben we eerder geconcludeerd dat de meerwaarde van

assimilatiebelichting in de winter pas tot uitdrukking komt in het volgende voorjaar (Schapendonk *et al.*, 2010b) door de opslag van reserves.

Tabel 5.4 laat zien dat het positieve effect van een diffuus kasdek 20% hoger is wanneer de intensiteit van de assimilatiebelichting wordt gehalveerd van $160 \mu\text{mol m}^{-2}$ naar $80 \mu\text{mol m}^{-2}$ PAR.

5.3 Wisselscenario experiment Bleiswijk

Een cruciaal punt dat blijvend aandacht verdient is de eventuele vermindering van lichtdoorlatendheid van een diffuus kasdek. In het experiment in Bleiswijk werd PAR aan de kop van de plant in beide behandelingen gemeten. In tabel 5.5 zijn de opbrengsteffecten berekend, die toegeschreven mogen worden aan de lagere lichtintensiteit in het diffuse compartiment van oktober tot februari, dan wel juist een hogere lichtintensiteit in het diffuse compartiment van maart tot juli. De hogere lichtsom vanaf maart wordt veroorzaakt door een hogere drempeling van het scherm (750 W m^{-2} in plaats van 600 W m^{-2}) in de diffuus behandeling, waardoor er meer licht werd toegelaten.

Alle andere regelingen en instellingen zijn verder exact gelijk gebleven in de simulaties. Het verschil in opbrengst is dus toe te wijzen aan het verschil in de gemeten lichtintensiteit aan de kop van het gewas.

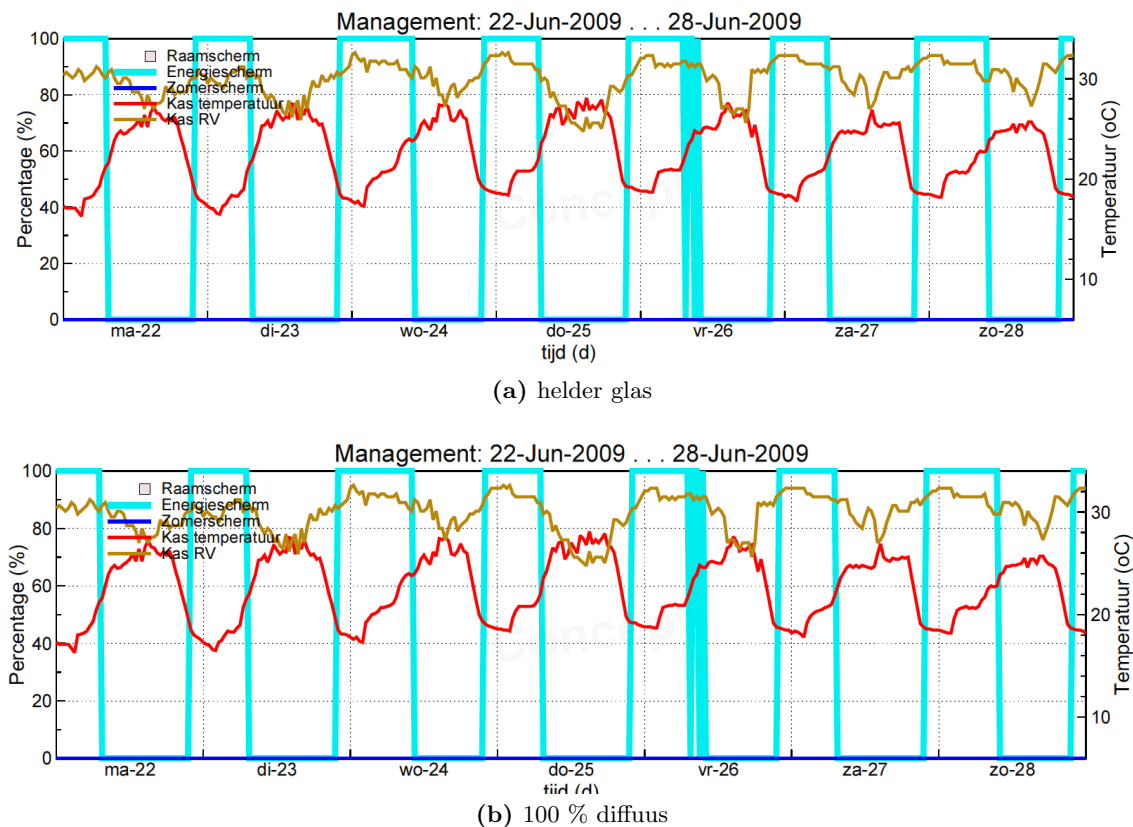
Tot maart 2011 is er een lagere lichtsom onder het diffuse dek. Later is er een hogere lichtsom vanwege de hogere drempeling van het scherm (750 W m^{-2} in plaats van 600 W m^{-2}), waardoor er meer licht werd toegelaten.

Tabel 5.5. Verandering in opbrengst in de diffuus-behandeling, welke zijn toe te schrijven aan verschillen in lichtintensiteit in de behandelingen, aan de kop van de plant. Het relatieve verschil in lichtintensiteit in de diffuus behandeling t.o.v. de direct-licht behandeling is weergegeven in de laatste kolom.

	delta opbrengst (%)	delta licht (%)
okt-10	-3.62	-3.60
nov-10	-5.19	-4.66
dec-10	-0.78	-0.73
jan-11	-1.61	-0.61
feb-11	-1.15	-1.02
mrt-11	2.87	0.93
apr-11	7.78	11.46
mei-11	4.63	4.01
jun-11	4.46	5.22
jul-11	4.28	5.07

De berekende opbrengsteffecten van de lichtintensiteitsverschillen tussen de behandelingen zijn groot. Er dient hier wel de kanttekening geplaatst te worden, dat de berekeningen zijn gebaseerd op twee vaste PAR meters aan de top van het gewas. Om definitieve uitspraken te kunnen doen zijn meer metingen in het horizontale vlak, aan de kop van het gewas, nodig.

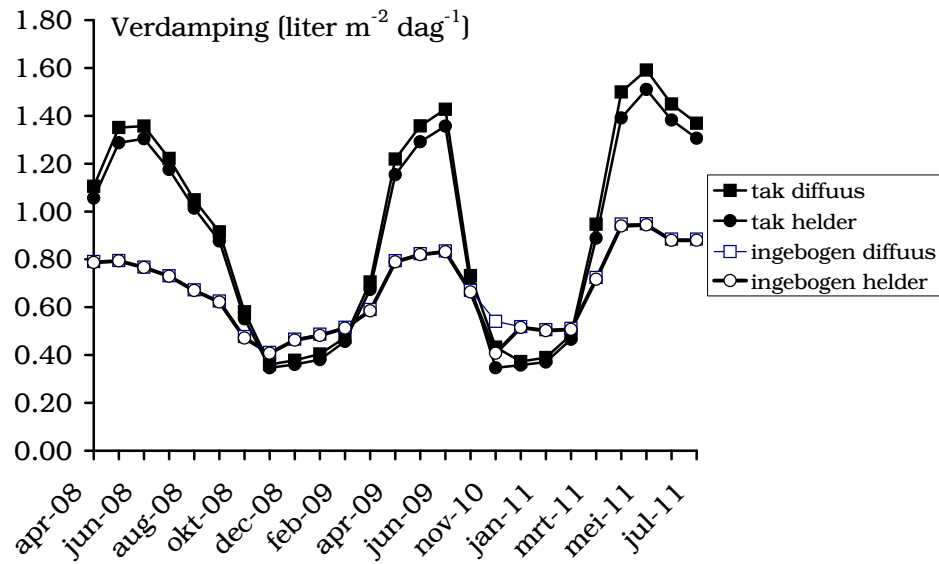
5.4 Verdamping



Figuur 5.3. Kastemperatuur (rode lijn) en RV bruine lijn, gedurende een week in juni voor helder glas (a) en diffuus glas (b). Er is geen significant effect op RV en luchttemperatuur.

In figuur 5.3 is te zien dat de effecten van diffuus licht op de totale temperatuur en vochthuishouding niet groot zijn. Dit is verrassend omdat een kas met diffuus licht vaak koeler aanvoelt. Maar fysisch gezien is het logisch omdat de totale energie in-voer niet verandert door het omzetten van de directe lichtcomponent in een diffuse component, tenzij er een toename is van lichtreflectie aan het kasdek of een selectieve absorptie van NIR. De enige reden waarom er een verandering in de globale kastemperatuur en RV zou optreden, is een verandering in de afvoer van de warmte en met name door een verschuiving van convectieve afvoer naar latente afvoer via de verdamping. Dit is wel deels aan de hand. De verdamping neemt toe wanneer direct licht wordt omgezet in diffuus licht. Uit de simulaties blijkt dat een rozen-gewas meer verdampt onder een diffuus dek dan onder een helder glasdek (Figuur 5.4). Voor Red Naomi is er op jaarbasis een toename in de totale verdamping van 5.75% voor de opgaande takken en 1.95% voor het uitgebogen blad. De getallen voor Avalanche zijn 6.7% en 2%. Dit heeft uiteraard consequenties voor de hoeveelheid vocht die afgevoerd moet worden. De verschillen zijn betrekkelijk gering en kunnen worden toegeschreven aan een hogere huidmondjesgeleidbaarheid. Dit is op zijn beurt weer het gevolg van een lager dampdrukdeficit van het blad vanwege een afname van de piektemperaturen bovenin het gewas. Er is ook een significante

toename van de assimilatiesnelheid als gevolg van een gunstiger temperatuur van de bovenste bladlagen.



Figuur 5.4. Gesimuleerde verdamping onder een diffuus en een helder kasdek voor de opgaande takken en het ingebogen blad

Lichtverdeling

De algemene consensus over lichtdoordringing is dat diffuus licht een betere spreiding laat zien, zowel in het horizontale als in het verticale vlak. De eerste bewering klopt, de tweede gedeeltelijk, namelijk en wel uitsluitend bij een lage zonnestand. Wanneer de zon echter hoog aan de hemel staat, dan is de lichtdoordringing van directe straling juist groter dan bij diffuse straling.

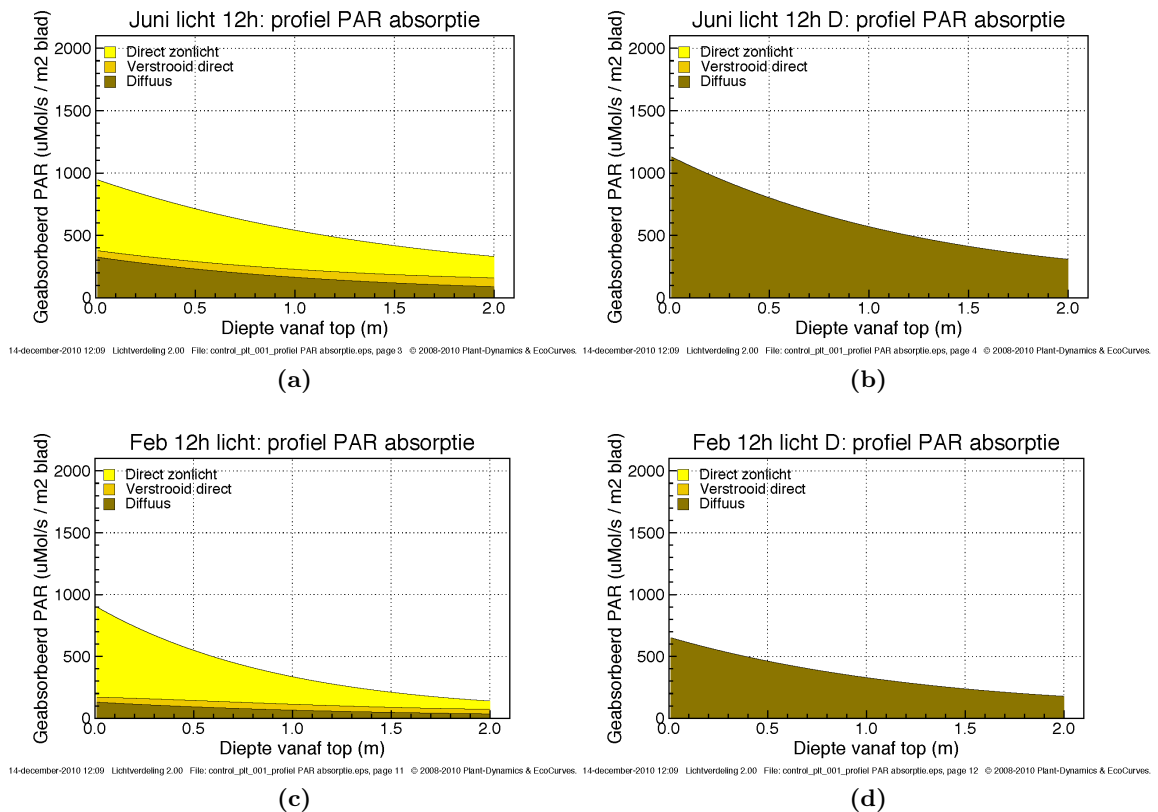
In figuur 6.1 staan de getallen voor simulaties om 12:00 uur 's middags op een zonnige dag in februari (relatief lage zonnestand) en een zonnige dag in juni (relatief hoge zonnestand). In februari is de *fractie diffuus* die op de kasbodem terecht (19%) komt veel groter dan de *fractie direct* die op de bodem terecht (9.5%) komt. De lichtdoordringing van diffuus is dan dus beter dan die van direct. In juni is de fractie direct (uiteraard) hetzelfde gebleven maar de fractie direct die op de bodem terecht komt is toegenomen tot 27,5%. Het is duidelijk dat lichtverdeling zich niet

Resultaten		Resultaten	
Waarde	Omschrijving met eenheid	Waarde	Omschrijving met eenheid
422.55	Straling W/m2	732.85	Straling W/m2
6.4036	Diffuse fraction Reflected PAR (%)	6.4036	Diffuse fraction Reflected PAR (%)
74.326	Diffuse PAR -> Crop (%)	74.326	Diffuse PAR -> Crop (%)
19.271	Diffuse PAR -> Floor (%)	19.271	Diffuse PAR -> Floor (%)
6.1186	Direct fraction Reflected PAR (%)	5.9856	Direct fraction Reflected PAR (%)
84.415	Direct PAR -> Crop (%)	66.546	Direct PAR -> Crop (%)
9.4661	Direct PAR -> Floor (%)	27.469	Direct PAR -> Floor (%)
43.826	Diffuse fraction Reflected NIR (%)	43.826	Diffuse fraction Reflected NIR (%)
35.049	Diffuse NIR -> Crop (%)	35.049	Diffuse NIR -> Crop (%)
21.124	Diffuse NIR -> Floor (%)	21.124	Diffuse NIR -> Floor (%)
42.669	Direct fraction Reflected NIR (%)	41.819	Direct fraction Reflected NIR (%)
42.374	Direct NIR -> Crop (%)	33.169	Direct NIR -> Crop (%)
14.958	Direct NIR -> Floor (%)	25.012	Direct NIR -> Floor (%)
23.937	Gewas fotosynthese (uMol/m2/s)	34.369	Gewas fotosynthese (uMol/m2/s)

(a)

(b)

Figuur 6.1. Tabel overzicht van lichtfracties voor een kas met rozengekas met een LAI van 3. De tabellen zijn momentopnames voor een zonnige dag in februari (a) en een zonnige dag in juni (b).

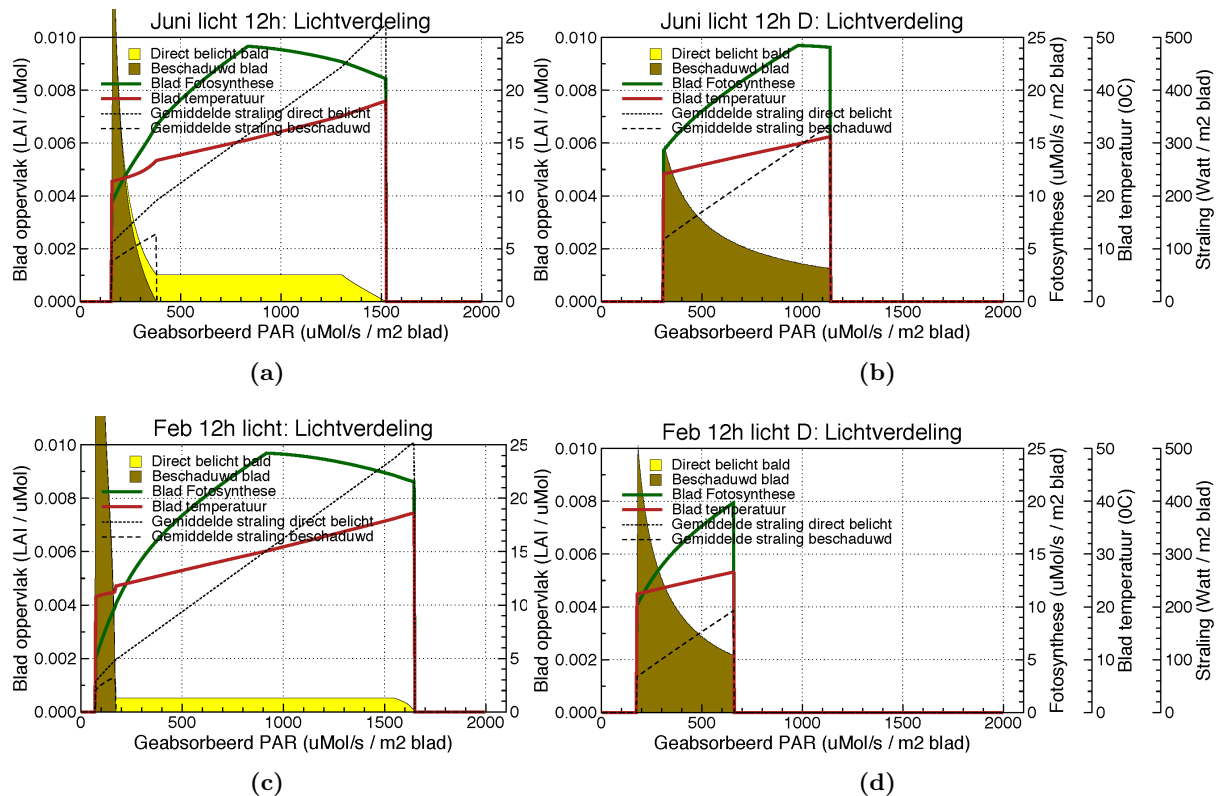


Figuur 6.2. Analyse van lichtverdeling in een rozenkas met een jong gewas ($LAI=2$) in juni (a,b) en februari (c,d). De gekleurde vlakken zijn afspiegelingen van de gewogen gemiddelde hoeveelheden geabsorbeerde straling op de aangegeven hoogte. De vlakken laten de bijdragen zien van diffuus licht, direct licht en licht dat in tweede instantie door het gewas of schermen is gereflecteerd en als diffuus kan worden beschouwd. (x-as)

met een eenvoudige vuistregel laat beschrijven.

In figuur 6.2 zijn op twee heldere dagen in februari en juni de *geabsorbeerde* verschillende lichtfracties gesimuleerd voor een helder kasdek (a,c) en een diffuus kasdek (b,d). In juni wordt er onder diffuus glas meer licht geabsorbeerd in de bovenste gewaslagen dan onder helder glas en in februari is dat precies omgekeerd. Het feit dat een gewas in februari meer profijt heeft van diffuus glas dan in juni, wordt dus niet veroorzaakt door een hogere totale absorptie van het aangeboden licht maar doordat er *relatief* meer directe straling wordt omgezet in het vroege voorjaar dan in juni. Daar komt nog een tweede reden bij en dat is het verschil in de intensiteiten van het diffuus gemaakte licht in juni en februari. In februari is de intensiteit van het diffuus gemaakte licht vrijwel altijd beneden het lichtverzadigingsniveau van de fotosynthese. In juni ligt de intensiteit, zelfs van het diffuus gemaakte licht meer in het verzadigde gebied (vergelijk Figuur 6.3b en Figuur 6.3d).

De berekeningen in figuur 6.3 zijn gemaakt voor dezelfde condities als die in figuur 6.2. De geabsorbeerde hoeveelheid licht is nu op de X-as is geprojecteerd. De laaglicht absorptie bestaat vrijwel geheel uit diffuus licht en de hooglicht absorptie uit direct licht (figuur 6.3a en figuur 6.3c). We zien vanaf $500 \mu\text{mol m}^{-2}$ een afbuiging van de fotosynthese en vanaf $800 - 1500 \mu\text{mol m}^{-2}$ zelfs een afname (groene lijnen).



Figuur 6.3. Analyse van lichtverdeling in een rozenkas met een jong gewas (LAI=2). De gele en bruine vlakken zijn de gewogen gemiddelde bladoppervlakten, gerelateerd aan de op de x-as weergegeven, geabsorbeerde deel van de lichtintensiteit (x-as). De rode lijn is de bladtemperatuur bij de betreffende straling en de groene lijn de fotosynthese. De stippellijnen zijn de gemiddelde straling voor diffuus en direct licht bij de gegeven hoeveelheid geabsorbeerd licht

Dit betekent dat de lichtbenuttings efficiëntie afneemt vanaf $400 \mu\text{mol m}^{-2}$ en dat er boven $800 \mu\text{mol m}^{-2}$ een netto reductie als gevolg van een hoge bladtemperatuur en/of een hoog dampdruk deficit. De omzetting van direct in diffuus licht resulteert daarin, dat er nauwelijks nog blad is dat meer dan $1100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ absorbeert (figuur 6.3b) in juni en $650 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ in februari (figuur 6.3d). Hiermee is het effect van het omzetten van direct licht in diffuus licht en het effect van seizoen in een oogopslag te zien:

- Omzetting direct diffuus heeft in juni vooral effect door de bladtemperatuur beneden de 30°C te houden. Vergelijk de rode lijnen in figuur 6.3a en figuur 6.3c. In februari treedt dit ook op maar het relevante bladoppervlak dat die hoge temperatuur bereikt is veel kleiner.
- De toename in efficiëntie als gevolg van de omzetting van direct licht in diffuus licht is in februari veel groter dan in juni. In juni kan ook met diffuus licht nog een groot gedeelte van het blad lichtverzadigd zijn. In februari is dat veel minder het geval. De fotosynthese efficiëntie bij roos begint af te nemen boven een lichtniveau van $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Wanneer we 6.3b en figuur 6.3d vergelijken zien we dat in juni minder dan 25% van het oppervlak een

intensiteit beneden $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ absorbeert, terwijl dat in februari meer dan 75% is. De toename in fotosynthese efficiëntie is dus veel groter. Daar komt nog bij dat we eerder constateerden dat gemiddeld over de dag de fractie direct licht op een zonnige dag in februari, hoger is dan in juni. Beide factoren zorgen ervoor dat het effect van diffuus glas in vroeg voorjaar en najaar groter is dan in de zomer, onder voorbehoud van de eerder genoemde mogelijk grotere schade effecten van hoge bladtemperatuur.

Temperatuurverdeling

Bij warmtetransport door luchtstroming wordt in het algemeen onderscheid gemaakt tussen vrije en gedwongen convectie. Het is in dit project de bedoeling om de effecten van diffuus glas ook te begrijpen in termen van hoeveelheden warmte, instraling, verticale temperatuurverschillen en gemeten luchtsnelheden. Het gewas is daarbij een belangrijke factor en 30 tot 60% van de warmte wordt als latente warmte in de vorm van verdamping gedissipeerd.

Daarnaast is het gewas een zeer belangrijke factor bij het bepalen van de richting van luchtstromen. Een dicht bladpakket kan gesloten pockets construeren waarbinnen andere wetmatigheden gelden dan bij een jong open gewas. Naarmate het gewas dichter is zal de warmte hoger in de kas zitten en zal bovendien het 'gewone' convectieve transport in het gewas kleiner zijn. De absorptie van straling leidt tot de productie van waterdamp door gewastranspiratie en tot de productie van voelbare warmte die afgevoerd moeten worden.

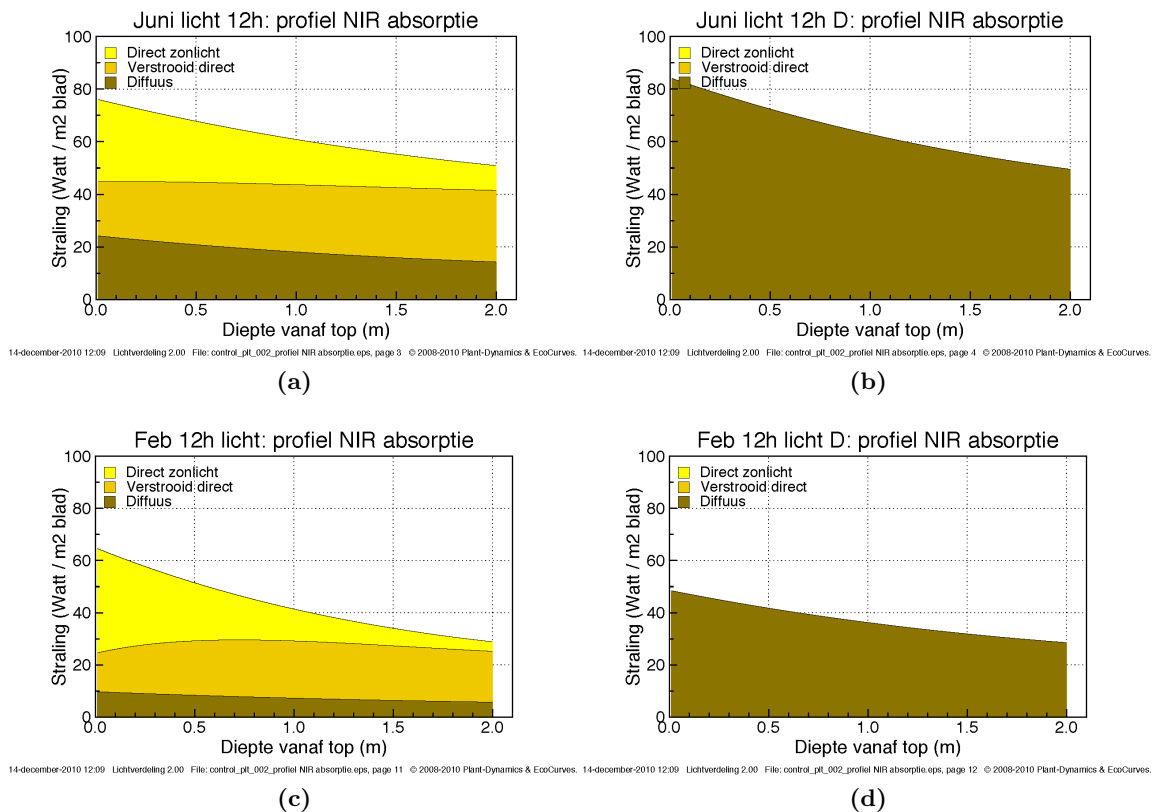
Het verschil in temperatuur tussen de bovenste en onderste delen van het gewas wordt sterk beïnvloed door de efficiëntie waarmee warmte en waterdamp tussen de gewaslagen wordt getransporteerd. Dat transport wordt bepaald door de dichtheid van het gewas, de lokale windsnelheid en een parameter voor menging, de zogenaamde 'relative turbulence intensity; α '. [Goudriaan \(1977\)](#) heeft de basis geleverd voor de theorie die in het klimaatmodel is geïmplementeerd.

PAR en NIR zijn, ook in de winter, de drijvende warmtekrachten. Vaak wordt vergeten dat slechts 2-3% van het PAR wordt gebruikt voor fotosynthese en dat de resterende 97-98% wordt omgezet in warmte.

De NIR verdeling heeft een ander patroon dan de PAR verdeling (Figuur 7.1). Door de lagere extinctie coëfficiënt dringt NIR licht veel dieper door in het gewas dan PAR. In tegenstelling tot PAR is de de lichtdoordringing van de directe component in juni kleiner dan die van de diffuse component. Het grootste gedeelte van de directe NIR component wordt al door het gewas zelf verstrooid en mag vervolgens als diffuus beschouwd worden. Onderin het gewas is deze fractie groter dan de diffuse en directe fracties samen, zeker bij een relatief laag staande zon.

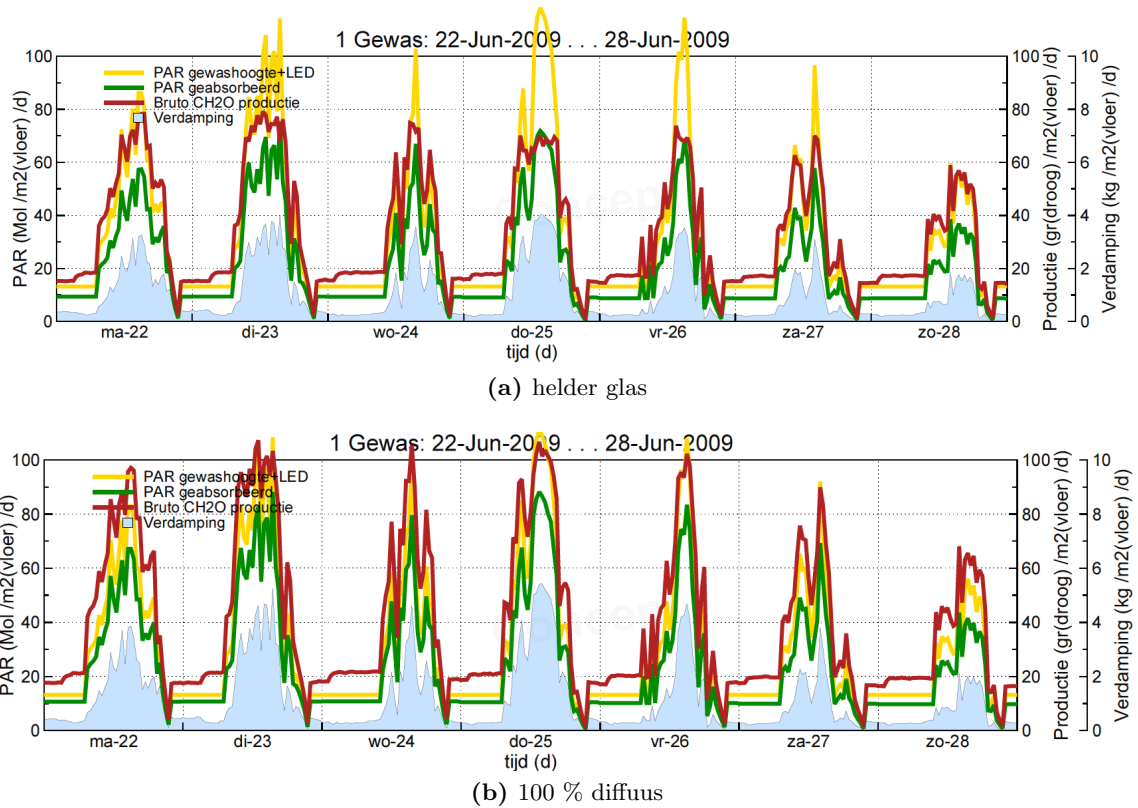
Omzetten van de directe NIR fractie in diffuus heeft evenals bij PAR tot gevolg dat de absorptie in de top toeneemt in juni maar afneemt in februari. Dit volgt volledig uit de strooiing als gevolg van verschillen in de zonnestand.

Temperatuur en vochtgradiënten hebben gevolgen voor fysiologische processen en dus voor de groei en ontwikkeling van planten. De mate waarin de gradiënten invloed hebben op de productiviteit is afhankelijk van de grootte en de richting.



Figuur 7.1. Analyse van lichtverdeling in een rozenkas met een jong gewas (LAI=2) in juni en februari. De vlakken zijn de gewogen gemiddelde hoeveelheden geabsorbeerde straling op een bepaalde hoogte voor diffuus en direct licht en licht dat in tweede instantie door het gewas of schermen is gereflecteerd en als diffuus kan worden beschouwd. (x-as

Temperatuurafhankelijke processen bij roos zijn de knopuitloop (Vries *et al.*, 1986) onderin het gewas en bovenin de strekking, de fotosynthese en de verdamping.



Figuur 7.2. PAR op gewashoogte (gele lijnen), geabsorbeerde PAR (groene lijnen), bruto assimilatiesnelheid (bruine lijnen) en verdamping (blauwe vlakken) voor helder glas (a) en diffuus glas(b).

BIJLAGEN

8.1 Processen in Roos Explorer

Om de dynamiek van knippen en scheutvorming te kunnen beschrijven rekent de Explorer Roos met individuele planten. De modeluitkomsten zijn dus het gemiddelde of de som van wat bijvoorbeeld 100 planten (in het model) doen. Wat de planten met elkaar delen is het kasklimaat en de verticale lichtverdeling in 10 gewaslagen. Heeft een plant op een bepaald moment alleen kleine takken, bijvoorbeeld, dan worden die beschaduwd door de erboven liggende bladlagen van de andere planten.

De complexiteit van de productie van rozen wordt vooral gekenmerkt door het feit dat met het verwijderen van het geogste product tevens een deel van de productiemachine (de bladeren) wordt verwijderd. Dat gebeurt in het model ook. Worden van een bepaalde plant opgaande takken gesneden dan gaan er knoppen uitlopen die aanvankelijk gevoed worden vanuit het ingebogen blad (via de reserves). Naarmate de nieuwe takken hoger komen en meer blad hebben groeien ze in steeds sterkere mate op eigen kracht verder totdat ze, bij het bereiken van een bepaald ontwikkelingsstadium, worden geogst.

Het door de bladeren onderschepte licht levert de assimilaten voor verdere groei. De fotosynthese is verschillend voor de bladeren van jonge, groeiende takken en voor de relatief oude bladeren van uitgebogen takken. Als de vraag naar assimilaten voor lengtegroei en bladgroei groter is dan het aanbod wordt de groei gereduceerd.

Het gewasmanagement oefent invloed uit op het gewas door het verwijderen of uitbuigen van takken. Ook in het model hebben de “management parameters” een grote invloed op de productie en op het gewicht van de geogste takken.

Het onderdrukken van de scheutvorming door staande takken geeft gemakkelijk aanleiding tot oscillaties in de productie (“flushes”) die in de praktijk ook worden waargenomen. De invloed van het gewasmanagement op de productie en op de oscillaties is een intrigerend onderwerp dat met Roos Explorer bestudeerd kan worden.

Over dit alles heen ligt het kasklimaat dat via CO_2 , temperatuur, RV en assimilatielicht invloed uitoefent op de fotosynthese, de groei en de ontwikkeling van de takken. Er kan gerekend worden met gemeten kasklimaat om een voorbij seizoen of een proef “door te rekenen”. Gemeten kasklimaat is echter bezwaarlijk als er bijvoorbeeld anders belicht en geschermd wordt in de berekeningen, een maatregel die invloed heeft op het kasklimaat. Ten behoeve van dit soort effecten is de Ex-

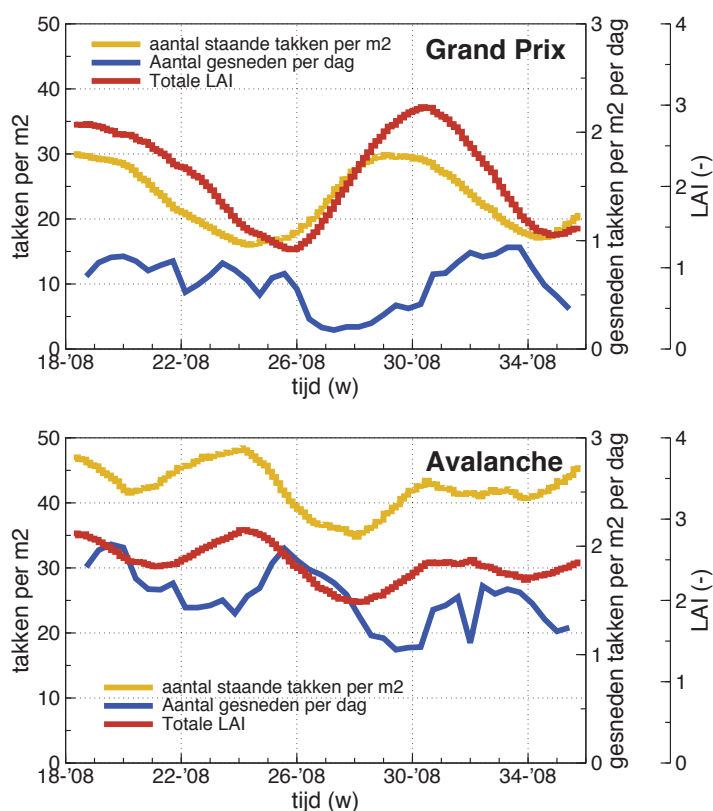
plorer Roos ook gekoppeld met een model voor kasklimaat. Daarmee wordt dan (in dit voorbeeld) de interactie met het gewasklimaat (RV, temperatuur, licht) in rekening gebracht.

8.2 Voorbeeld

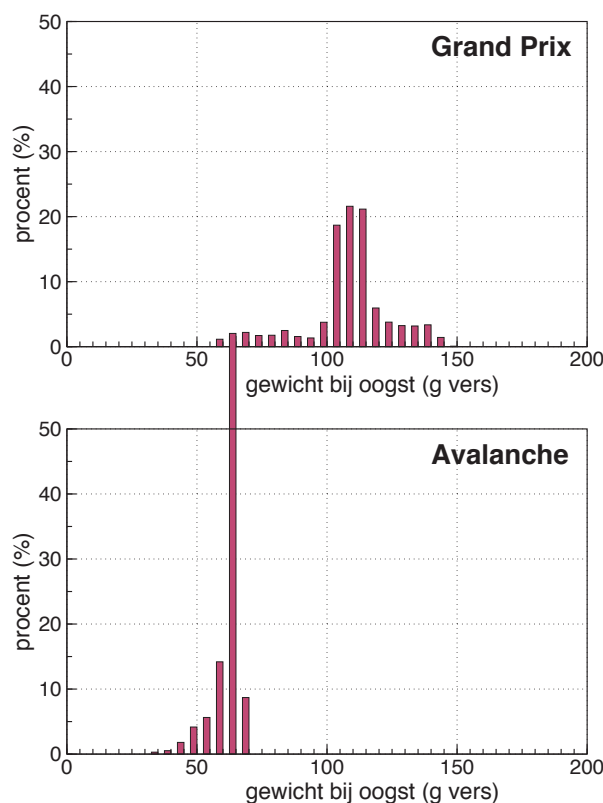
Bij wijze van voorbeeld is een simulatie gedaan voor Grand Prix en Avalanche voor de periode april t/m juli van 2008. In Figuur 8.1 is te zien dat de schommelingen voor Avalanche heftiger zijn dan voor Grand Prix. Dat komt door de grotere rol van de apicale dominantie bij Avalanche.

In Figuur 8.2 worden de gewichten van de geogste takken weergegeven als grootteklassen met een bijbehorend percentage. De gewichtsverdeling wordt dus gesimuleerd door Explorer Roos op basis van gegevens over de normale takontwikkeling. De spreiding hangt zal dan onder andere afhangen van de heftigheid van de flushes.

De opbrengst als versgewicht voor de gesimuleerde periode (april t/m juli) voor Grand Prix 7.9 kg met een gemiddeld takgewicht van 107 g. Voor Avalanche was de totale opbrengst 11.2 kg met een gesimuleerd takgewicht van gemiddeld 60 g. Dat zijn hoge opbrengsten. Het betreft echter het seizoen met het meeste licht en het betreft een eerste schatting van de modelparameters. Naar aanleiding van



Figuur 8.1. Simulatie voor Grand Prix (boven) en Avalanche (onder). De horizontale as geeft weeknummer en jaar. De drie curven in elke grafiek zijn het aantal staande takken, het aantal geogst per dag en de LAI. De gewichten van de geogste takken worden gegeven in Figuur 8.2.



Figuur 8.2. Simulatie voor Grand Prix (boven) en Avalanche (onder). Gewicht van de geogste takken weergegeven als percentages in gewichtsklassen van 0–5 g, 5–10 g, 10–15 g, 15–20 g, etc.

de gedetailleerde uitwerking in de andere hoofdstukken van dit verslag kunnen de parameterwaarden nog verbeterd worden.

8.3 Luchtvochtigheid

VPD_l in relatie tot RV in de kas 0.8 kPa komt overeen met: 25°C blad en 75 % RV kas 30°C blad en 80 % RV kas

1.5 kPa komt overeen met: 25°C blad en 55 % RV kas 30°C blad en 65 % RV kas

Luchtvochtigheid is een van de belangrijkste klimaat factoren in de kas. Bij alle temperaturen kan waterdamp door condensatie overgaan in vloeibaar water en door verdamping weer in waterdamp. Voor verdamping van waterdamp is veel energie nodig, die bij condensatie weer vrijkomt. De overgang van waterdamp naar water en omgekeerd heeft grote invloed op de energiehuishouding in de kas. Inzicht in het begrip luchtvochtigheid en alles wat daarmee samenhangt, is dus van essentieel belang voor een goed kasklimaat. De luchtvochtigheid is afhankelijk van de hoeveelheid waterdamp die in de lucht zit. Om een beeld te krijgen moet men rekening houden met de volgende factoren: absolute luchtvochtigheid, relatieve luchtvochtigheid (RV), dampdruk, dampdruk deficit, dauwpunt.

Is de hoeveelheid waterdamp (g m^{-3}) die de lucht maximaal kan opnemen. Omrekeningen van absolute luchtvochtigheid naar relatieve luchtvochtigheid kan alleen

als de temperatuur bekend is. Bijvoorbeeld 15 g m^{-3} bij 17.5°C is gelijk aan 100% RV, terwijl bij 25°C het gelijk is aan 65% RV.

De relatieve luchtvochtigheid is de verhouding tussen de hoeveelheid waterdamp die in de lucht zit en de hoeveelheid die de lucht bij dezelfde temperatuur maximaal kan opnemen. De RV wordt uitgedrukt in procenten. Bijvoorbeeld bij 20°C kan de lucht 17.3 g m^{-3} waterdamp bevatten. Als er nu maar 13 g m^{-3} inzit bij 20°C is er een RV van 75

Veranderingen in de RV zijn afhankelijk van twee factoren: de temperatuur en het vochtgehalte. Bij een gelijk vochtgehalte daalt de RV als de temperatuur stijgt. Omgekeerd stijgt de RV als de temperatuur daalt. Als de luchttemperatuur gelijk blijft maar het vochtgehalte veranderd wijzigt ook de RV.

Dampdruk ontstaat door botsingen van waterdamp moleculen. De druk die de moleculen uitoefen hangt af van de massa en de gemiddelde snelheid (is temperatuur) van de moleculen. Alle gassen die zich in de lucht bevinden maken samen de luchtdruk. Dampdruk van water ligt normaal ergens tussen de 1 en 5 kPa. Het waterdamp druk deficit is het verschil tussen de maximale waterdamp druk en de actuele waterdamp druk. De VPD_l ligt normaal tussen de 0.1 kPa (hoge luchtvochtigheid) en de 3 kPa (lage luchtvochtigheid). Een lage VPD_l betekent een hoge luchtvochtigheid en omgekeerd. Hoe hoger de VPD_l hoe droger de lucht en hoe meer de plant moet verdampen.

8.4 Plant balans

De productie van roos wordt bepaald door de assimilatie van het hele gewas (source) waarbij de aanleg van nieuwe sinks (groeicapaciteit van nieuwe scheuten en bloemen) soms volgend is en soms leidend. Het is moeilijk om sink en source te scheiden vanwege de terugkoppelingen die er zijn. Zo zal een hoge fotosynthese een verhoogd niveau van assimilaten in de plant induceren, die vervolgens de cytokinine productie stimuleert. Het verhoogde cytokinine gehalte bevordert op zijn beurt de scheut uitgroei (Vries & Dubois, 1988; Ohkawa, 1984). Voor een optimale productie dient de assimilatenbron (source) in balans te zijn met processen die de assimilaten verbruiken (sink). Sink processen hebben te maken met de benutting van suikers, zoals de vorming van nieuwe scheuten, bladeren, bloemen en de uitgroei van bloemen. Sink en source processen zijn als twee armen van een balans die in evenwicht moeten zijn om een optimale productie te realiseren. In vrijwel alle situaties wordt de productie van rozen direct bepaald door de fotosynthese en benutting van opgeslagen reserves of indirect via de stimulans van die reserves op de knopuitloop (feed-forward regeling). Dat is ook de reden dat hoge CO_2 doseringen en een hoge intensiteit van de assimilatiebelichting rendabel zijn. Deze maatregelen zijn namelijk puur gericht op een hoge fotosynthese.

Er zijn situaties dat de sinksterkte belangrijker is dan de source, bijvoorbeeld wanneer in een teelt een hele snede tegelijkertijd wordt geoogst. Dan worden in korte tijd alle groeiende delen weggehaald en dan is de snelheid waarmee nieuwe sinks worden gevormd van groot belang. Helaas zien we bij het leegknippen van een gewas ook de fotosynthese activiteit van het ingebogen blad afnemen door een negatieve terugkoppeling van een (tijdelijk) gebrek aan sinks en dat kan negatieve consequenties hebben voor de latere uitgroei van nieuwe scheuten.

8.5 Source

Fotosynthese en verdamping zijn gevoelig voor temperatuur. Voor de bladfotosynthese geldt dat het temperatuuroptimum hoger wordt, zowel bij een hogere lichtintensiteit als bij een hogere CO₂ concentraties in de kas (Schapendonk & Brouwer, 1985). Uit de metingen bleek dat de fotosynthese een vrij vlak optimum heeft voor de bladtemperatuur tussen 20°C en 28°C. Boven 28°C nam de fotosynthese af.

Studies van huidmondjesgeleidbaarheid (gs) zijn gecompliceerd en vereisen veel waarnemingen. Uit eerder metingen bleek dat de effecten van temperatuurgradiënten vooral effect hadden op de huidmondjesgeleidbaarheid en nauwelijks op de fotosynthese processen in de bladgroenkorrels.

De verdamping is evenredig met het dampdrukdeficit van het blad vermenigvuldigd met de openingstoestand van de huidmondjes. Beide factoren worden beïnvloed door de temperatuur en met name de bladtemperatuur. Zo ontstaat een complexe interactie tussen beide factoren. De verdamping wordt het meest geremd bij onderdoor koelen. Verwarmen van onderaf heeft betrekkelijk weinig effect op de verdamping vanwege de relatief lage geleidbaarheid van de huidmondjes onderin het gewas. De hogere bladtemperatuur heeft wel als gevolg dat bij onderdoor verwarmen de kans op bladnat kleiner is dan bij bovendoor verwarmen.

Referenties

- Bernacchi, C. J., Pimentel, C., Long, S. P., 2003. *In vivo* temperature response functions of parameters required to model RuBP-limited photosynthesis. *Plant, Cell and environment* 26, 1419–1430.
- Bernacchi, C. J., Singaas, E. L., Pimentel, C., Portis, A. R., Long, S. P., 2001. Improved temperature response functions for models of rubisco-limited photosynthesis. *Plant, Cell and environment* 24, 253–259.
- Bird, R. B., Stewart, W. E., Lightfoot, E. N., 1960. *Transport phenomena*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Challa, H., Schapendonk, A. H. C. M., 1983. Quantification of light reduction in greenhouses on yield. *Acta Horticulturae* 148, 501–510.
- de la Faille, L. B., Campen, J., Oversloot, H., 2009. U-waarde kas met scherm. meetprotocol voor schermdoeken. Technical report, TNO Bouw en Ondergrond, Delft, the Netherlands. TNO rapport 034-DTM-2009-04659.
- de Zwart, H., Stanghellini, C., van der Knaap, L., 2010. Hoog isolerende en lichtdoorlatende schermconfiguraties. Technical report, Wageningen-UR, Wageningen, the Netherlands. PT project 13733.
- de Zwart, H. F., 1996. Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model. Ph.D. thesis, Institute of Agricultural and Environmental Engineering, Agricultural University Wageningen, The Netherlands.
- Farquhar, G. D., Gaemmerer, S. V., Berry, J. A., 1980. A biochemical-model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of c-3 species. *Planta* 149, 78–90.
- Goudriaan, J., 1977. *Crop micrometeorology: a simulation study*. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen. PhD thesis Agricultural University Wageningen.
- Goudriaan, J., van Laar, H. H., 1994. *Modelling potential crop growth processes. Textbook with exercises. Current Issues in Production Ecology, Volume 2*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Hemming, S., Dueck, T., Marissen, N., Jongschaap, R., Kempkes, F., van de Braak, N., 2005. Diffuus licht-het effect van lichtverstrooiende kasdekmaterialen op kasklimaat, lichtdoordringing en gewasgroei. Wageningen UR A&F rapport 557, 98.
- Hemming, S., Jongschaap, R., Janse, J., Dueck, T., 2007. Effecten van diffuus licht op komkommer. Resultaten van een teelt experiment. *Nota* 446.

- Hemming, S., Kempkes, F., Mahammadkhani, V., Stanghellini, C., Swinkels, G., Holterman, H., 2006. Anti-reflectie-coating voor tuinbouwglas: eerste praktijkervaringen. Wageningen UR, Glastuinbouw.
- Hemming, S., Kempkes, F., Mohammadkhani, V., 2009. New glass coatings for high insulating greenhouses without light losses-energy saving, crop production and economic potentials. In: International Symposium on High Technology for Greenhouse Systems: GreenSys2009 893, pp. 217–226.
- Hemming, S., Waaijenberg, D., Bot, G., Sonneveld, P., de Zwart, F., Dueck, T., van Dijk, C., Dieleman, A., Marissen, N., van Rijssel, E., *et al.*, 2004. Optimaal gebruik van natuurlijk licht in de glastuinbouw. Wageningen UR, report .
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., Levine, A. S., 2006. Fundamentals of heat and mass transfer. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 6th edition.
- Leuning, R., 1995. A critical appraisal of a combined stomatal-photosynthesis model for C₃ plants. *Plant, Cell and environment* 18, 339–255.
- Monteith, J. L., Unsworth, M. H., 1990. Principles of environmental physics. Arnold, London.
- Ohkawa, K., 1984. Effects of benzyladenine on bud break of roses. *Scientia Horticulturae* 24, 379–383.
- Raithby, G. D., Hollands, K., 2000. Natural convection. In: Kreith, F. (Ed.) *The CRC handbook of thermal engineering*, pp. 3.15–3.26. CRC Press, Boca Raton.
- Schapendonk, A., c.s. Pot, Rappoldt, C., 2009. Plantenpaspoort roos. sleutel voor optimale productie. In: Schapendonk, A. (Ed.) In: *Verslagen van onderzoek Productschap Tuinbouw*, projectnummer 13040, pp. 1–109. Productschap Tuinbouw, Louis Pasteurlaan, Zoetermeer, Nederland.
- Schapendonk, A., c.s. Pot, Rappoldt, C., 2010a. Luchttemperatuur-gradient roos. fysiologie en scenario analyse. In: Schapendonk, A. (Ed.) In: *Verslagen van onderzoek Productschap Tuinbouw*, projectnummer LNV 1802344, p. 42. Productschap Tuinbouw, Louis Pasteurlaan, Zoetermeer, Nederland.
- Schapendonk, A., Pot, S., Rappoldt, K., 2010b. Temperatuur-gradiënt Roos, deel 2: Fysiologie en Scenario analyse. Technical report, Plant-Dynamics, Wageningen. Onderzoeksrapport PT projectnummer LNV 1802344.
- Schapendonk, A. H. C. M., Brouwer, P., 1985. Environmental effects on photosynthesis. simulated and experimental results from a study on a 'tomato-minicrop'. *Acta Hort* 174, 269–276.
- Schapendonk, A. H. C. M., Pot, C. S., Trouwborst, G., Rappoldt, C., 2010c. Optimale hybride belichting bij tomaat, perspectieven voor het nieuwe telen. Technical report, Plant-Dynamics, Wageningen. Onderzoeksrapport PT projectnummer 14092.
- Staalduinen, J., Hemming, S., Dueck, T., 2010. Onderzoek en praktijk: diffuus glas geeft forse meerproductie (interview met silke hemming en tom dueck). *Onder Glas* 7, 5–7.
- Stanghellini, C., 1987. Transpiration of greenhouse crops: an aid to climate management. Agricultural University Wageningen, Wageningen. PhD thesis.

- Stanghellini, C., de Jong, T., 1995. A model of humidity and its applications in a greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology* 76, 129–148.
- Vries, D. D., Dubois, L. A., 1988. The effect of bap and iba on sprouting and adventitious root formation of ‘Amanda’ rose single-node softwood cuttings. *Scientia Horticulturae* 34, 115–121.
- Vries, D. D., Dubois, L. A., Smeets, L., 1986. The effect of temperature on axillary bud-break of hybrid tea-rose seedlings. *Scientia Horticulturae* 28, 281–287.
- Yin, X., Goudriaan, J., Lantinga, E. A., Vos, J., Spiertz, H. J., 2003. A flexible sigmoid function of determinate growth. *Annals of Botany* 91, 361–371.