

Optimaal gebruik van natuurlijk licht in de glastuinbouw

Agrotechnology & Food Innovations:

Silke Hemming
Dries Waaijenberg
Gerard Bot
Piet Sonneveld
Feije de Zwart

Plant Research International:

Tom Dueck
Chris van Dijk
Anja Dieleman

Praktijkonderzoek Plant & Omgeving:

Nollie Marissen
Ernst van Rijssel
Bert Houter

Colofon



Title	Maximaliseren gebruik van natuurlijk licht in de glastuinbouw
Author(s)	Silke Hemming, Dries Waaijenberg, Gerard Bot, Tom Dueck, Chris van Dijk, Anja Dieleman, Ernst van Rijssel, Bert Houter, Piet Sonneveld, Feye de Zwart en Nollie Marissen.
A&F number	Report nr. 100
ISBN-number	90-6757-767-0
Date of publication	Februari 2004
Confidentiality	No
Project code.	54.363.01

Agrotechnology and Food Innovations B.V.
P.O. Box 17
NL-6700 AA Wageningen
Tel: +31 317 475 024
E-mail: info.agrotechnologyandfood@wur.nl
Internet: www.agrotechnologyandfood.wur.nl

© 2004 Agrotechnology & Food Innovations B.V

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

De uitgever aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele fouten of onvolkomenheden.

*All right reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system of any nature, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publisher.
The publisher does not accept any liability for the inaccuracies in this report.*



The quality management system of Agrotechnology & Food Innovations B.V. is certified by SGS International Certification Services EESV according to ISO 9001:2000.

Abstract

Natuurlijk licht is een van de belangrijkste factoren met betrekking tot de groei en ontwikkeling van planten. Door het proces van fotosynthese maakt de plant bouwstoffen aan voor de groei vanuit de onderdelen licht, water en CO₂. In dit rapport wordt enerzijds de lichtbehoefte van gewassen besproken en anderzijds de technische mogelijkheden van omhullingsmaterialen en schermen om het licht in de kas te beïnvloeden. Het rapport beperkt zich tot het natuurlijke licht en laat dus het kunstlicht hier buiten beschouwing.

Na een inleiding in hoofdstuk 1 volgt in hoofdstuk 2 de beschrijving wat licht en globale straling is, wat de hoeveelheid straling is in verschillende seizoenen, uit welke lichtkleuren de globale straling is samengesteld en hoe de daglengte in Nederland varieert. In hoofdstuk 3 is beschreven wat de lichtbehoefte van planten voor de fotosynthese en de morfogenese is. Tevens is de lichtbehoefte van gewassen tijdens de opkweek van het uitgangsmateriaal en tijdens de productiefase onderzocht. Per gewasgroep (vruchtgroenten, bladgroenten, snijbloemen, potplanten) wordt aangegeven welke lichtintensiteit en welk spectrum nodig is, om een optimale gewasproductie te realiseren. In hoofdstuk 4 wordt geïventariseerd, welke kasomhullings- en schermmaterialen er zijn, welke optische eigenschappen relevant zijn om natuurlijk licht in de kas door te laten dringen en welke technische mogelijkheden er zijn om deze materiaaleigenschappen aan te passen. In dit hoofdstuk wordt gekeken hoe een bepaalde lichtbehoefte voor een gewasgroep gerealiseerd of geoptimaliseerd zou kunnen worden en wat daarvan de gevolgen voor het gewas zijn. Aangezien natuurlijk licht tevens invloed heeft op de warmtebalans in een kas wordt ook het effect van de verschillende lichtbestanddelen op de energiehuishouding van de kas besproken. De kernresultaten zijn in hoofdstuk 5, de synthese samengevat, onderverdeeld naar de behoeften van gewasgroepen.

Keywords: natuurlijk licht, lichtintensiteit, lichtspectrum, transmissie, emissie, tomaat, paprika, sla, chrysanthemum, roos, gerbera, potplanten, fotosynthese, morfogenese, kasomhullingsmateriaal, scherm, energiebesparing

Contents

ABSTRACT	3
1 INLEIDING	7
2 WAT IS LICHT?	8
2.1 Definities.....	8
2.2 Solaire straling.....	11
2.3 Globale straling	12
2.4 Daglengte.....	18
3 LICHTBEHOEFTE VAN GEWASSEN	20
3.1 Inleiding.....	20
3.2 Licht in relatie tot fotosynthese en groei	20
3.2.1 Pigmentvorming en lichtabsorptie	20
3.2.2 Fotosynthese	21
3.3 Licht in relatie tot fotomorfogenese.....	27
3.3.1 Rood/verrood receptoren(fytochromen).....	27
3.3.2 Blauwlicht receptoren (cryptochromen en fototropinen)	28
3.3.3 UV receptoren	30
3.4 Praktische betekenis van verschuivingen van lichtkleur.....	32
3.5 Gewasgroepen.....	34
3.5.1 Uitgangsmateriaal.....	34
3.5.2 Vruchtgroenten.....	36
3.5.2.1 De plant	36
3.5.2.2 Lichtbehoefte.....	36
3.5.2.3 De gangbare teeltwijze	38
3.5.3 Bladgroenten	41
3.5.3.1 De plant	41
3.5.3.2 Lichtbehoefte.....	41
3.5.3.3 De gangbare teeltwijze	42
3.5.4 Eénmalig oogstbare snijbloemen	44
3.5.4.1 De plant	44
3.5.4.2 Lichtbehoefte.....	44
3.5.4.3 De gangbare teeltwijze	45

3.5.5	Meermalig oogstbare snijbloemen	47
3.5.5.1	De plant	47
3.5.5.2	Lichtbehoefte.....	47
3.5.5.3	De gangbare teeltwijze	51
3.5.6	Potplanten.....	53
3.5.6.1	Algemeen	53
3.5.6.2	De Plant.....	54
3.5.6.3	Lichtbehoefte.....	55
3.5.6.4	De gangbare teeltwijze	60
4	MATERIAALEIGENSCHAPPEN KASOMHULLINGSMATERIALEN EN SCHERMEN	63
4.1	Welke materialen zijn er?.....	63
4.1.1	Glas.....	63
4.1.2	Kunststofplaten.....	65
4.1.3	Kunststoffolies	68
4.1.4	Schermen.....	70
4.1.4.1	Energiescherm.....	70
4.1.4.2	Zonweringsscherm	71
4.1.4.3	Verduisteringsscherm.....	72
4.1.4.4	Scherm om lichtuitstoot te voorkomen	72
4.1.4.5	Vochtscherm.....	73
4.1.4.6	Combi- of duoscherm.....	73
4.1.5	Bodemafdekfolies.....	74
4.1.6	Nieuwe transparante materialen	76
4.2	Welke optische eigenschappen zijn relevant en waarom?.....	79
4.2.1	PAR transmissie	80
4.2.1.1	Transmissie voor directe en diffuse straling	80
4.2.1.2	Diffusiteit	82
4.2.1.3	Invloed constructiedelen, gevels, oriëntatie kas, dakhelling en invalshoek van de zonnestraling.....	83
4.2.2	UV transmissie	86
4.2.3	NIR transmissie	87
4.2.4	FIR transmissie.....	87
4.2.5	Emissie	89
4.3	Welke mogelijkheden zijn er om materiaaleigenschappen aan te passen?.....	91
4.3.1	Verhoging van de transmissie	91
4.3.1.1	Oppervlakte-coatings	91
4.3.1.2	Oppervlakte structuur.....	92
4.3.2	Verandering van het stralingsspectrum	94
4.3.2.1	Absorptie	95
4.3.2.2	Reflectie	101

4.3.2.3	Fluorescentie	102
4.3.2.4	Interferentie	105
4.3.2.5	Emissie	107
4.3.2.6	Fotochromisme.....	108
4.3.2.7	Thermochromisme	110
4.3.2.8	Electrochromisme en gaschromisme.....	111
4.4	Wat is het effect op de energiehuishouding?	112
4.4.1	Verandering lichttransmissie.....	112
4.4.2	Verandering NIR transmissie	114
4.4.3	Verlaging emissiecoëfficiënt.....	115
4.4.4	Verlaging van de FIR-transmissie van folies	117
5	SYNTHESE	120
5.1	Algemene trends	120
5.1.1	Lichtintensiteit.....	120
5.1.2	Lichtverdeling	126
5.1.3	Lichtkleur	129
5.2	Gewasgroepen.....	133
5.2.1	Uitgangsmateriaal.....	133
5.2.2	Vruchtgroenten.....	133
5.2.3	Bladgroenten	133
5.2.4	Éénmalig oogstbare snijbloemen	134
5.2.5	Meermalig oogstbare snijbloemen	135
5.2.6	Potplanten.....	135
6	SAMENVATTING.....	137
7	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	143
8	LITERATUUR.....	144

1 Inleiding

Toekomstige kassystemen zijn duurzaam en combineren een kwalitatief hoogwaardige productie zonder, of met een zeer laag niveau van, fossiele brandstof. De benutting van zonlicht speelt een cruciale rol bij de transitie naar deze energiezuinige, duurzame glastuinbouw. Zonlicht is veruit de belangrijkste groeifactor voor het gewas en is tevens de belangrijkste energiebron voor de kas: een energiebron die tevens duurzaam is.

Voor een optimale productie van hoge kwaliteit is het essentieel dat het beschikbare licht zo goed mogelijk wordt benut als motor voor de gewasproductie. Om geen of slechts zeer weinig fossiele energie te gebruiken moet het zonlicht zo goed mogelijk worden benut als duurzame energiebron. Bij zowel de gewasproductie als bij zonne-energie benutting is niet alleen de lichtintensiteit maar ook het lightspectrum bepalend. In toekomstige duurzame kassystemen moeten voor een optimale lichtbenutting de verschillende deelaspecten zijn geoptimaliseerd. Dit is nog niet mogelijk bij de huidige kasomhullingsmaterialen, waarbij nauwelijks aandacht is geweest voor mogelijkheden van spectrale verschuivingen, zodat ontwikkeling van geschikte materialen nodig is om een echte doorbraak te kunnen forceren.

Voor de gewasproductie zijn zowel fotosynthese als gewasontwikkeling belangrijk. Voor de fotosynthese is vooral het lichtniveau in het fotosynthetisch actieve deel van het spectrum (PAR gebied, ca 400-700 nm) bepalend met hierin een spectrale verdeling volgens de gevoeligheidscurve van het gewas. Voor de gewasontwikkeling zijn vooral spectrale criteria belangrijk zoals bijvoorbeeld de verhouding rood-verrood en de hoeveelheid blauwlicht.

Voor de benutting van zonne-energie door het kassysteem is de totale energie-inhoud van het op het aardoppervlak invallende zonlicht van belang. Dit wordt ingestraald met een spectrum tussen ca 300 – 3.000 nm. Ongeveer de helft van deze zonne-energie wordt ingestraald in het PAR gebied. De eigen uitstraling van het omhullingsmateriaal treedt op in het thermisch infrarood tussen 3.000 en 100.000 nm en is belangrijk bij de warmteverliezen van het kassysteem.

Zodoende zijn de materiaaleigenschappen in dit spectrale gebied belangrijk voor de isolatiewaarde en daarmee voor de energiezuinigheid.

Door een kasomhulling en/of scherm wordt zonlicht altijd beïnvloed. Het in de kas vallende licht vermindert niet alleen het lichtniveau in zowel het PAR als het totale gebied maar ook de spectrale verdeling hiervan kan wijzigen. Voor de gewasproductie is daarbij dus de gevoeligheidscurve van het gewas van belang en de spectrale criteria voor een goede gewasontwikkeling. Voor de energietoetreding is globaal de verdeling volgens Planck van belang. De mate van beïnvloeding hangt af van de spectrale verdeling van de reflectie, absorptie en transmissie eigenschappen van het materiaal, niet alleen in het PAR gebied maar in het totale zonlichtspectrum. Bovendien zijn voor de energieverliezen door het dek de transmissie en absorptie (en dus emissie) in het thermische spectrum (3.000 – 100.000 nm) van belang.

Voor de transitie naar een duurzame energiezuinige kastuinbouw met optimale lichtbenutting moeten de volgende fundamentele vragen worden beantwoord: Wat is de lichtbehoefte per gewas ten aanzien van de maximale en minimale lichtintensiteit en het benodigde lightspectrum? Hoe kan deze lichtbehoefte tegemoet gekomen worden door technische veranderingen aan het kasomhullingsmateriaal en door aanpassingen van het teeltsysteem? Welke gevolgen heeft dit voor de energiehuishouding van de kas?

2 Wat is licht?

2.1 Definities

De zon geeft straling in de vorm van elektromagnetische golven af. Dit is de extraterrestrische solaire straling. Deze straling wordt door de atmosfeer van de aarde gefilterd en komt dan als globale straling aan op aarde. Deze globale straling omvat straling van de golflengtes 300-3.000 nm. Straling van 3.000-100.000 nm (3-100 μm) wordt niet direct geëmitteerd door de zon, maar is warmtestraling. Tabel 1 geeft een overzicht van de optische straling (CIE 106/5, 1993). De optische straling wordt gekarakteriseerd door de golflengte, die wordt aangegeven in nanometers (nm) of micrometers (μm), waarbij 1.000 nanometer gelijk is aan 1 micrometer.

Tabel 1 Indeling van de optische straling

Naam	Afkorting		Golflengte (nm)	Opmerking
Ultraviolette straling	UV	UV-C	< 280	bereikt aardoppervlak niet <300 nm bereikt aardoppervlak niet
		UV-B	280-315	
		UV-A	315-400	
Fotosynthetisch actieve straling	PAR	B (blauw)	400-500	
		G (groen)	500-600	
		R (rood)	600-700	
Nabij infrarode straling	NIR	FR (verrood)	700-800	
		NIR	800-3.000	
Verre infrarode straling	FIR		3.000 – 100.000	

Een deel van de globale straling is zichtbaar voor het menselijke oog, namelijk in het golflengtegebied van 380-780 nm. Dit wordt het zichtbare licht genoemd en stemt overeen met de kleuren blauw, groen, geel, oranje en rood.

De globale straling kan in verschillende grootheden worden uitgedrukt. Meteorologische data gebruiken vaak de energie-inhoud van de straling, uitgedrukt in W m^{-2} . De fotosynthese van planten is niet zo zeer gerelateerd aan de totale energie-inhoud van de straling maar aan het aantal fotonen. De energie-inhoud van een 400 nm-foton (blauw) is bijvoorbeeld 1,75 maal hoger dan die van een 700 nm-foton (rood), maar voor het fotosyntheseproces zijn beide fotonen gelijkwaardig. Bij het uitdrukken van de globale straling in energie-eenheden, W m^{-2} , wordt dus blauwe straling overgewaardeerd en rode straling ondergewaardeerd. Daarom wordt bij plantenfysiologische data meestal het aantal fotonen van de straling gebruikt, uitgedrukt in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (CIE 106/8, 1993).

De grootheden kunnen in elkaar worden omgerekend volgens Tabel 2. De omrekeningsfactor is sterk afhankelijk van het stralingspectrum van de lichtbron. In Tabel 2 zijn de omrekeningsfactoren voor natuurlijke globale straling aangegeven. De omrekeningsfactoren voor verschillende lampentypes kunnen sterk hiervan afwijken.

Tabel 2 Omrekeningsfactoren van verschillende grootheden uitgaande van natuurlijke straling

		<i>Omrekening in</i>			
		$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	W PAR m^{-2}	W m^{-2}	klux
<i>Omrekening van</i>	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	1	0,22	0,43	0,056
	W PAR m^{-2}	4,6	1	2	0,26
	W m^{-2}	2,3	0,5	1	0,13
	klux	18	4	8	1

PAR

Een gedeelte van het licht wordt door planten gebruikt voor de fotosynthese. Dit deel van 400-700 nm wordt daarom (in het Engels) photosynthetic active radiation (PAR) genoemd (CIE 106/8, 1993). Rode straling (600-700 nm) is het meest efficiënt voor de fotosynthese van planten, het draagt bij aan de chlorofylsynthese en speelt een rol in het fotoperiodisme en fotomorfogenese. Groene straling (500-600 nm) geeft de geringste fysiologische respons in de planten. Blauwe straling (400-500 nm) draagt eveneens bij aan de fotosynthese, dus aan de plantengroei, maar ook aan de fotomorfogenese (CIE 106/5, 1993).

UV

Het UV is het gedeelte van de globale straling met de hoogste energie. Het zogenaamde UV-B (300-315 nm) en het UV-A (315-400 nm) zijn verantwoordelijk voor de degradatie van bijvoorbeeld kunststoffen. Daarom is het nodig om kasfolies en kunststofplaten te beschermen tegen UV degradatie (veroudering) door het toevoegen van UV stabilisatoren aan het polymeer. UV straling heeft vooral invloed op de fotomorfogenese en kleuring van planten. Een klein gedeelte van de UV straling wordt ook gebruikt voor de fotosynthese en groei van planten (CIE 106/5, 1993).

NIR

Het nabije infrarood (NIR) met een golflengte van 700-3.000 nm is het deel van het zonnenspectrum dat nauwelijks gebruikt wordt door de planten; het wordt voornamelijk omgezet in warmte (voelbaar en latent) in de kas. Afhankelijk van de locatie en het seizoen kan dit een gunstig effect hebben op het kasklimaat of kan het juist het probleem van oververhitting introduceren. Het stralingsgedeelte van 700-800 nm wordt verrood genoemd en dit draagt bij aan de fotomorfogenese, vooral de stengelstrekking en het fotoperiodisme van planten (CIE 106/5, 1993).

FIR

Ver infrarode straling (FIR) met golflengtes van 3.000-100.000 nm is niet het gevolg van de directe zoninstraling, maar is warmtestraling, die door elk warm 'lichaam' wordt uitgezonden. Deze straling is van groot belang bij kassen, het veroorzaakt namelijk een deel van het broeikaseffect. De uitstraling van ver infrarode straling in een kas is isotropisch en heeft dezelfde spectrale samenstelling als een zwart lichaam. Hiervoor geldt de wet van Max Planck. Een zwart lichaam emitteert energie met een spectrale verdeling over de golflengtes afhankelijk van de temperatuur van het lichaam, zoals aangetoond in Figuur 1. Het maximum ligt bij 10 µm bij een temperatuur van 293K.

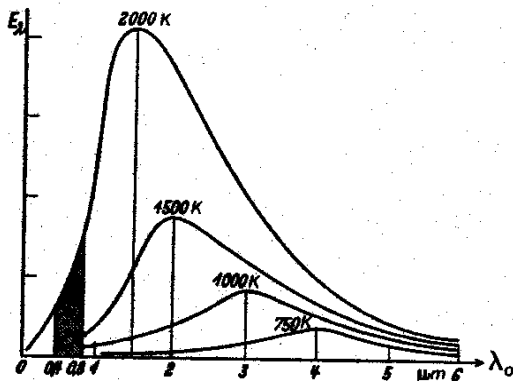
De gemiddelde energie-inhoud per golflengte W_λ is:

$$W_\lambda = \frac{c_1 * \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda * T}} - 1}$$

$$c_1 = 3,740 * 10^{-12} \text{ W cm}^{-2}$$

$$c_2 = 1,4385 \text{ cm} * \text{K}$$

$$T = 293 \text{ K}$$



Figuur 1 Energieverdeling in het spectrum van een zwart lichaam voor verschillende temperaturen

De totale doorgelaten warmtestraling van een kasomhullings- of schermmateriaal kan dus berekend worden als:

$$t = \frac{\int t_\lambda W_\lambda(T) d\lambda}{\int W_\lambda(T) d\lambda}$$

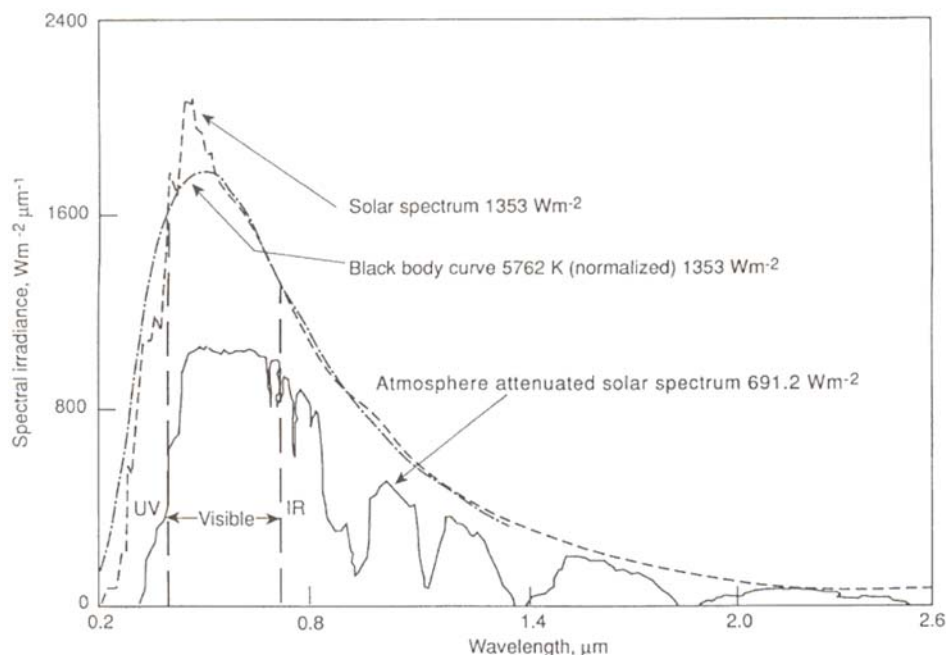
waarin t_λ de spectrale transmissie voor ver infrarode straling per golflengte is van een bepaald kasomhullings- of schermmateriaal.

2.2 Solaire straling

Voor planten is de door de zon geëmitteerde en op aarde aankomende straling, de kwantiteit, de kwaliteit en de verandering door astronomische en meteorologische effecten doorslaggevend. De van de zon geëmitteerde straling wordt extraterrestrische solaire straling genoemd. De solaire constante is $1367 \pm 7 \text{ W m}^{-2}$ (CIE 85, 1989). Voordat de solaire straling de aarde bereikt wordt deze door verschillende effecten in de atmosfeer van de aarde gereduceerd (CIE 85, 1989):

- Verstrooiing door luchtmoleculen (Rayleigh-verstrooiing).
- Verstrooiing en absorptie door stofdeeltjes en waterdruppels (Mie-verstrooiing). Deze verandert in het seizoen. De verstrooiing is maximaal op warme, troebele zomerdagen en minimaal op koude, heldere winterdagen. Het diffuse aandeel van de globale straling neemt toe met toenemende Mie-verstrooiing.
- Absorptie door ozon, waterdamp en andere atmosferische gassen. De belangrijkste UV absorbeerters zijn ozon, SO_2 en NO_2 . Straling met golflengtes beneden de 300 nm wordt door de ozonlaag volledig geabsorbeerd. Door waterdamp (723 nm) and zuurstof (688 nm en 762 nm) worden aanzienlijke delen van de rode (600-700 nm) en verrode straling (700-800 nm) geabsorbeerd. Door CO_2 worden delen van de warmtestraling ($>3.000 \text{ nm}$) geabsorbeerd.

In Figuur 2 is geschetst hoe voor normale atmosferische condities zonder bewolking de spectrale verdeling van de extraterrestrische solaire straling door de aardse atmosfeer wordt beïnvloed.

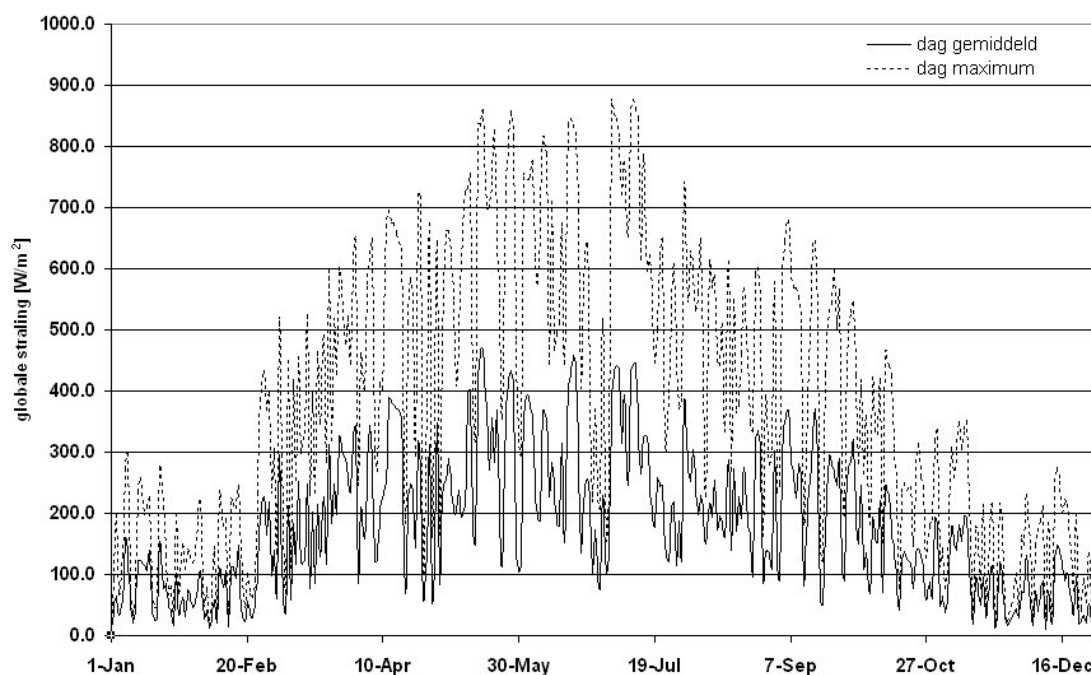


Figuur 2 Spectrale verdeling van extraterrestrische solaire straling en beïnvloeding door de aardse atmosfeer zonder bewolking.

2.3 Globale straling

Nadat de zonnestraling is gefilterd door de atmosfeer van de aarde blijft de zogenaamde globale straling over. Globale straling bestaat uit een direct en een diffuus stralingsaandeel. In Figuur 3 wordt een typisch verloop van de globale straling in Nederland weergegeven (SEL-jaar gebaseerd op gegevens van de KNMI). Volgens KNMI is de jaarlijkse stralingssom van de globale straling in Nederland gemiddeld over de jaren 1971-2000 $1.027.777 \text{ Wh m}^{-2} \text{ a}^{-1}$. De stralingssom is gemiddeld ca. $600 \text{ Wh m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($2770 \mu\text{mol m}^{-2}$) in de winter¹ en ca. $4500 \text{ Wh m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($20730 \mu\text{mol m}^{-2}$) in de zomer². De gemiddelde straling over de lichte uren is rond 270 W m^{-2} in de zomer ($1250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) en rond 70 W m^{-2} ($320 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) in de winter (Tabel 3). De gemiddelde maximale straling ligt rond twee keer hoger dan de gemiddelde straling tijdens de lichte uren, in de winter is dit zelfs drie keer hoger. Het absolute maximum ligt in de zomer bij rond 880 W m^{-2} ($4030 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) en in de winter rond 350 W m^{-2} ($1600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Rond 50% van de globale straling ligt in het PAR gebied en 50% in het NIR gebied van het spectrum.

De globale straling verandert door een aantal parameters, namelijk de zonnestand, de geografische breedte, het seizoen, het tijdstip van de dag en de mate van bewolking. CIE 85 (1989) geeft een overzicht van de intensiteit en de samenstelling van de globale straling afhankelijk van de verschillende parameters.



Figuur 3 Gemiddelde en maximale globale straling in Nederland volgens het SEL-jaar

Invloed bewolking en zonnestand

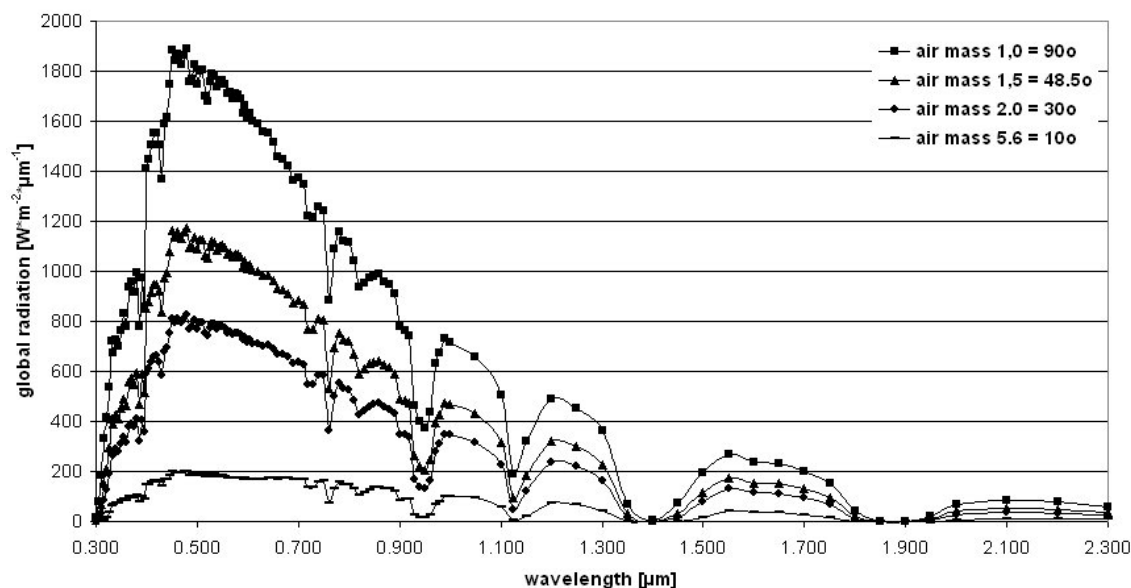
In Figuur 4 en Figuur 6 wordt de globale straling met en zonder bewolking en onder verschillende invalshoeken weergegeven in termen van energie-inhoud van de straling, in W m^{-2} .

¹ Winter: donkerste maanden, 6 november t/m 6 februari

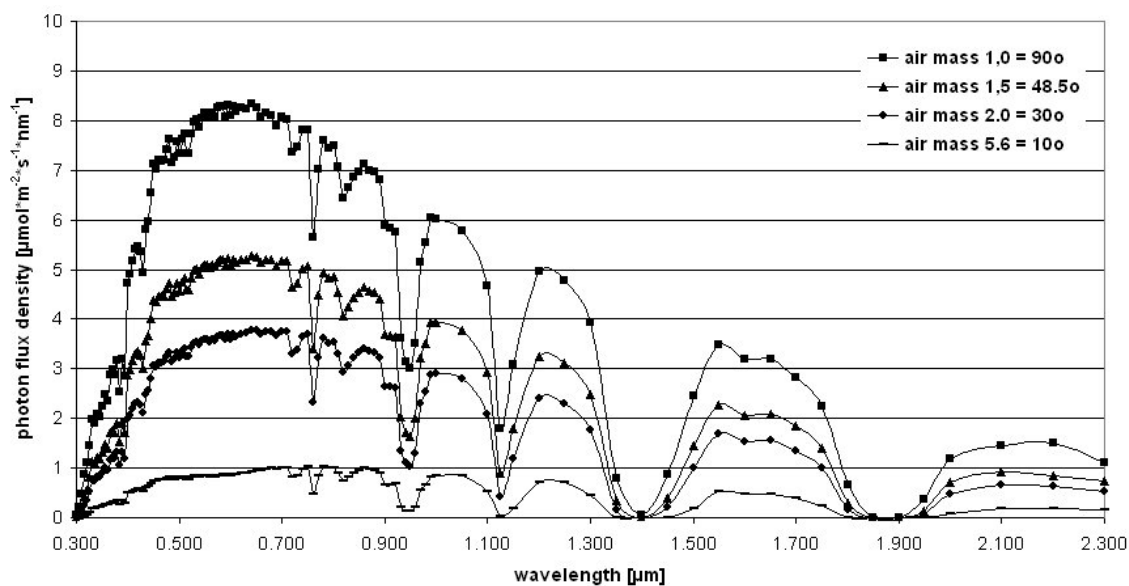
² Zomer: lichtste maanden, 6 mei t/m 6 augustus

Een “air mass” van 1,5 is ongeveer equivalent met een zomerdag in Nederland, een “air mass” van 5,6 is ongeveer equivalent met een winterdag in Nederland.

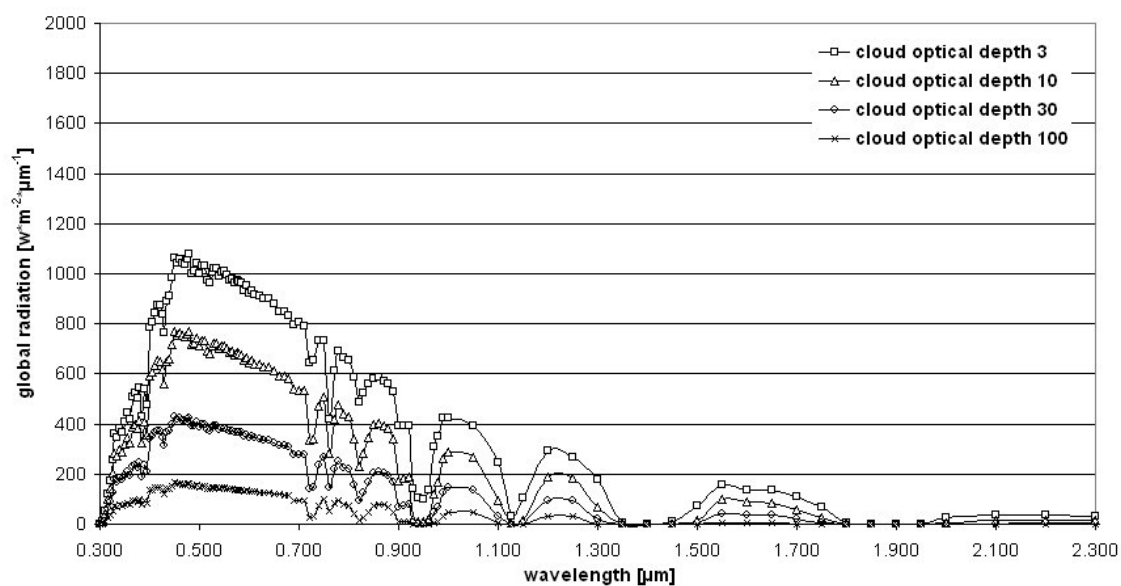
In Figuur 5 en Figuur 7 zijn dezelfde situaties weergegeven in het aantal fotonen, in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.



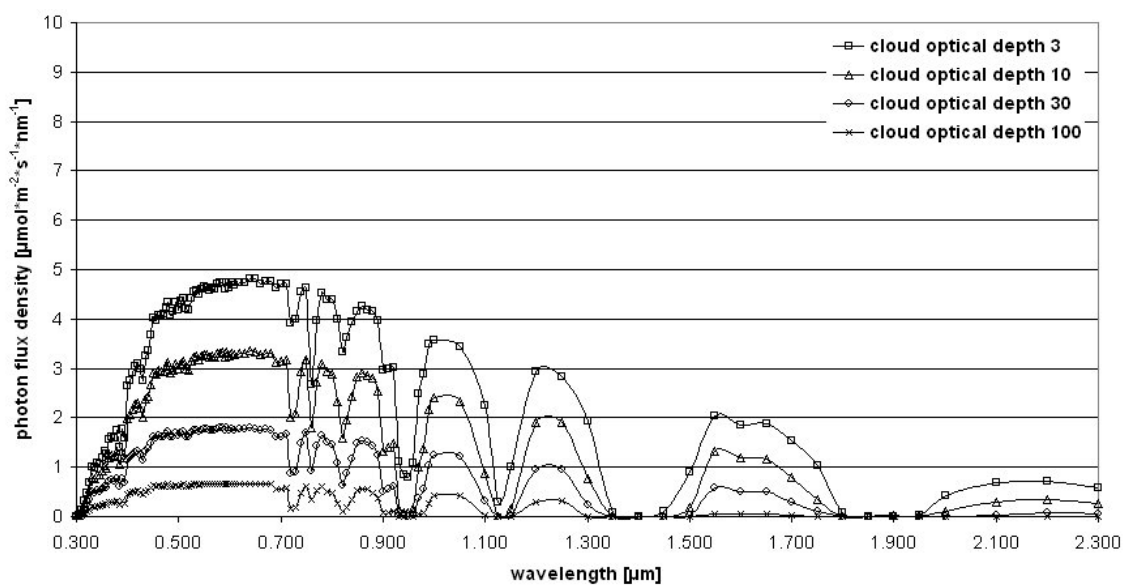
Figuur 4 Globale straling (energie-inhoud) als functie van de golflengte zonder bewolking bij verschillende zonnestanden tijdens het seizoen



Figuur 5 Globale straling (fotonen) als functie van de golflengte zonder bewolking bij verschillende zonnestanden tijdens het seizoen uitgedrukt in aantal fotonen



Figuur 6 Globale straling (energie-inhoud) als functie van de golflengte met verschillende bewolkingsgraden



Figuur 7 Globale straling als functie van de golflengte met verschillende bewolkingsgraden uitgedrukt in aantal fotonen

De spectrale verdeling van de globale straling varieert dus licht onder de verschillende omstandigheden.

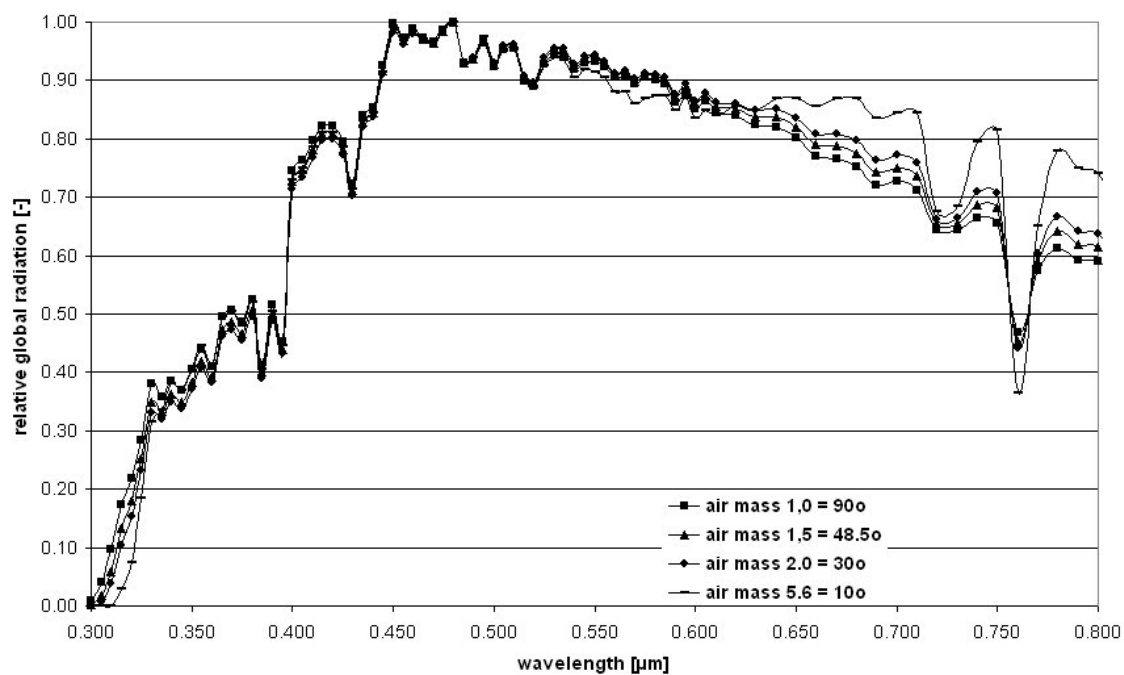
Door de ozonlaag in de atmosfeer wordt de straling beneden de 300 nm volledig geabsorbeerd. De dikte van deze ozonlaag neemt toe met toenemende geografische breedte, waardoor de UV straling daar afneemt. In de loop van het jaar neemt de UV stralingsintensiteit in de zomermaanden toe. Zo is het aandeel UV straling (300-400 nm) onder een hogere zonnestand tijdens de zomermaanden, absoluut en relatief gezien, hoger dan onder een lagere zonnestand tijdens de wintermaanden (Figuur 4, Figuur 5, Figuur 8). In Tabel 1 is het totaal aan UV straling (300-400 nm) aangegeven, hiervan maakt UV-B straling ca. 4-6% uit, de rest is UV-A straling. Met toenemende bewolking neemt het aandeel UV straling absoluut af (Figuur 6, Figuur 7), maar relatief gezien neemt het aandeel UV straling met een toenemende bewolking toe (Figuur 9). De UV straling varieert sterk, afhankelijk van het actuele ozongehalte van de lucht.

Anders dan bij de UV straling is het aandeel NIR straling (800 – 3.000 nm) relatief gezien bij een lagere zonnestand groter en bij een hogere zonnestand kleiner (Figuur 8). Het aandeel NIR straling neemt relatief gezien af met een toenemende bewolking (Figuur 9).

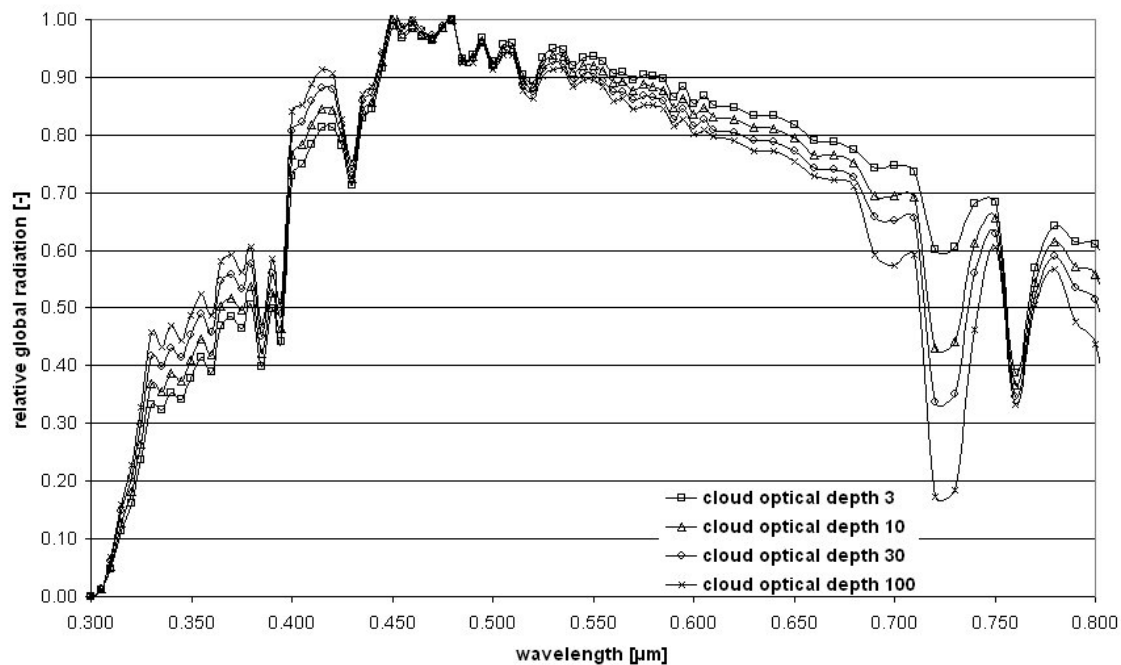
Door de Rayleigh-verstrooiing in de atmosfeer neemt het aandeel blauwe straling toe. Met een hogere zonnestand, dus in de zomermaanden, neemt de stralingsintensiteit van de blauwe straling toe (Figuur 8). Door toenemende bewolking neemt de diffuse straling en zo ook het aandeel blauwe straling toe (Figuur 9). Door toenemende Mie-verstrooiing door stofdeeltjes en waterdamp in de lucht, neemt het aandeel blauwe straling juist af. Aan het einde van de dag, in de schemering (zonnestand beneden de 10°), neemt de Rayleigh-verstrooiing toe en neemt relatief gezien ook het aandeel blauwe straling toe (Smith, 1982).

Een ander kengetal dat belangrijk is in de plantenfysiologie is de verhouding van rode tot verrode straling, R:FR. Hier worden twee verschillende definities in de literatuur gehanteerd, de brede R:FR verhouding en de smalle R:FR verhouding. De brede R:FR verhouding gaat uit van de verhouding van straling van de golflengtes van 600-700 nm ten opzichte van straling met de golflengtes van 700-800 nm (Mortensen en Strømme, 1987). De smalle R:FR verhouding gaat uit van de verhouding van straling van de golflengtes van 655-665 nm ten opzichte van straling met de golflengtes van 725-735 nm (Smith, 1982). In Tabel 3 wordt de smalle R:FR verhouding van de globale straling in de verschillende situaties aangegeven.

Door het seizoen heen is de R:FR verhouding bijna constant. Bewolking verandert de R:FR verhouding in positieve zin (Tabel 3). Aan het einde van de dag, in de schemering (zonnestand beneden de 10°), neemt de Rayleigh-verstrooiing toe en vindt stralingsbreking plaats, waardoor de verrode straling relatief gezien toeneemt. Dit is sterk afhankelijk van de bewolking dicht bij de horizon (Smith, 1982). Met beginnende schemering neemt de R:FR verhouding op heldere dagen van ca. 1,20 af tot 0,8-0,7 (Holmes en Smith, 1977). In metingen van Hoffmann (1999c) werden waarden van 0,93-1,09 vastgesteld (Figuur 10). De dagelijkse duur van de schemering is sterk afhankelijk van de zonnestand en dus van de geografische breedte en het seizoen (Smith, 1982).



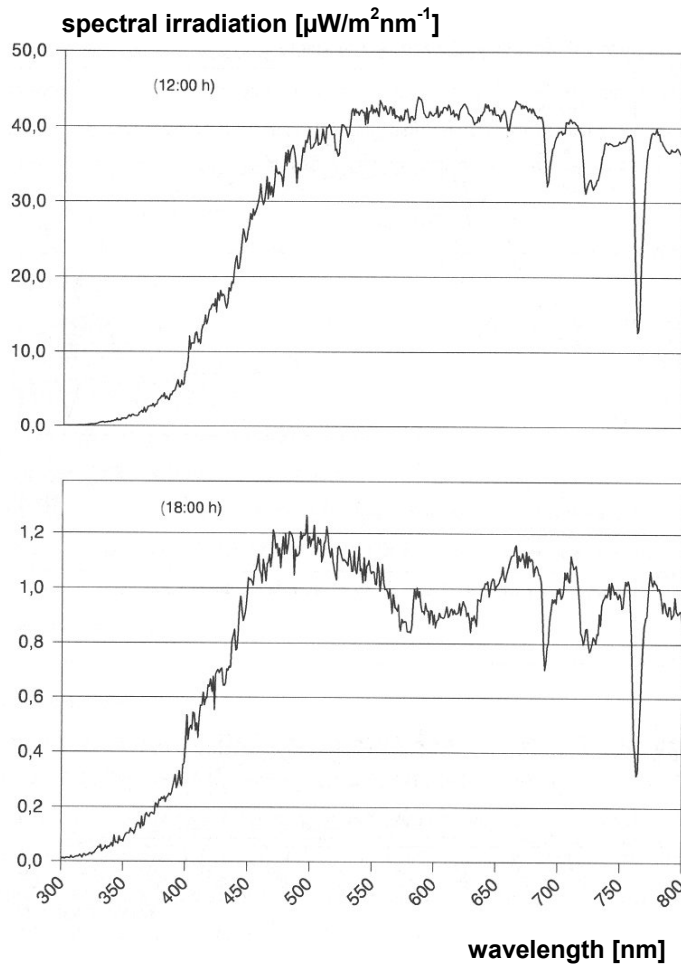
Figuur 8 Relatieve verdeling van de globale straling zonder bewolking bij verschillende zonnestanden tijdens het seizoen



Figuur 9 Relatieve verdeling van de globale straling met verschillende bewolgingsgraden

Tabel 3 Kengetallen van de gemiddelde globale straling over de dag met en zonder bewolking en verschillende zonnestanden tijdens het seizoen, gemiddelde waarden uitgedrukt in energie-inhoud of aantal fotonen

Heldere hemel					Bedekte hemel				
Air mass					Cloud optical depth				
	1,0	1,5	2,0	5,6		3	10	30	100
Zonnestand					Bewolkingsgraad				
	90°	48,5°	30°	10°		zeer licht	bewolkt	dicht	
						licht bewolkt		bewolkt	
						bewolkt			
Seizoen in NL									
	-	zomer	voorjaar	winter					
			& najaar						
Energie-inhoud in W m ⁻²									
PAR	491,9	307,7	217,5	52,9	PAR	281,2	199,5	108,5	41,0
B	169,0	104,2	72,9	17,8	B	95,5	69,4	38,8	15,0
R	150,2	95,4	68,4	17,1	R	87,1	60,4	32,1	11,9
UV	68,6	39,9	27,0	6,6	UV	35,8	27,7	16,6	6,8
R:FR	1,20	1,20	1,21	1,23	R:FR	1,29	1,66	1,97	3,30
Aantal fotonen in μmol m ⁻² s ⁻¹									
PAR	2253	1412	1000	244	PAR	1290	912	495	186
B	640	395	276	67	B	362	263	147	57
R	817	519	372	93	R	474	329	175	65
UV	208	121	82	20	UV	109	84	50	20
R:FR	1,08	1,09	1,09	1,11	R:FR	1,17	1,50	1,78	2,98

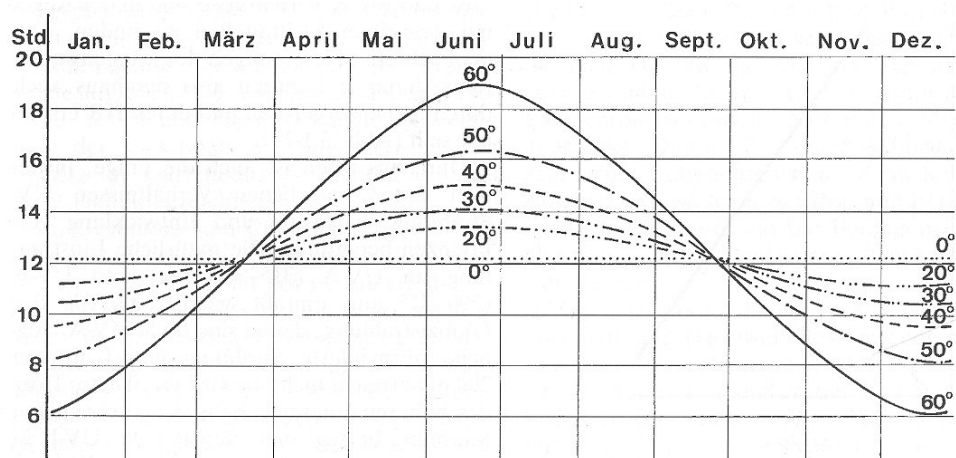


Figuur 10 Spectrale samenstelling globale straling overdag (12:00 h) en in de schemering (18:00 h)

2.4 Daglengte

Een belangrijke factor voor de planten is de daglengte, dus de duur waarin straling beschikbaar is voor de plant. De daglengte varieert afhankelijk van het seizoen en de geografische breedte. De daglengte inclusief schemering is dicht bij de evenaar (geografische breedte 0°) het hele jaar vrijwel constant, ongeveer 13 uur. In Oslo (geografische breedte 60°) bedraagt de daglengte meer dan 22 uur in de zomer en minder dan 8 uur in de winter (Figuur 11). Het verschil in geografische breedte in Nederland is klein, de meeste tuinbouwgebieden liggen hier op ongeveer 52° . De langste dag is rond 16,5 uur, de kortste dag minder dan 8 uur (Horn, 1996).

De daglengte is niet alleen belangrijk voor de hoeveelheid straling die de planten kunnen benutten voor de fotosynthese. Het is vooral belangrijk voor alle fotoperiodische processen in de plant. Fotoperiodisme wordt de reactie van planten op de relatieve lengte van dag en nachtfases in een 24 uur-cyclus genoemd. Hier speelt de daglengte een grote rol.



Figuur 11 Daglengte afhankelijk van de geografische breedte en het seizoen

Samenvatting hoofdstuk 2

- Globale straling bestaat uit een direct en diffuus stralingsaandeel.
- De globale straling verandert qua intensiteit en spectrum door een aantal parameters, de zonnestand, de geografische breedte, het seizoen, het tijdstip van de dag en de mate van bewolking.
- De stralingsintensiteit van de globale straling varieert in Nederland van gemiddeld 70 W m^{-2} ($320 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) in de winter tot 270 W m^{-2} ($1250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) in de zomer; de lichtsom is gemiddeld 4500 Wh/m^2 ($20730 \mu\text{mol m}^{-2}$) in de zomer en 600 Wh/m^2 ($2770 \mu\text{mol m}^{-2}$) in de winter.
- Het stralingsspectrum van de globale straling bestaat uit UV-B (300-315 nm), UV-A (315-400 nm), PAR (400-700 nm), NIR (700-3000 nm); straling boven de 3000 nm is warmtestraling (FIR).
- De daglengte varieert in Nederland van rond 8 uur in de winter tot 16.5 uur in de zomer; binnen de tuinbouwgebieden in Nederland zijn nauwelijks verschillen in daglengte

3 Lichtbehoefte van gewassen

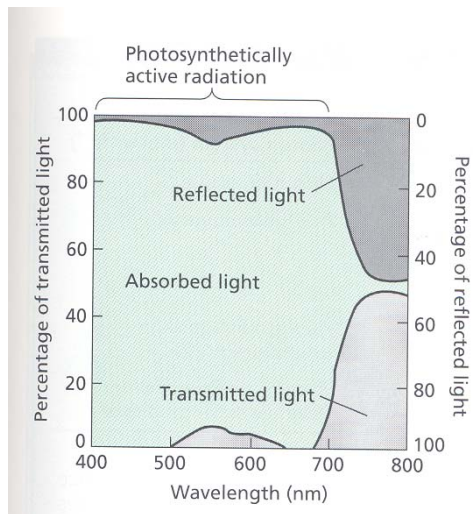
3.1 Inleiding

Natuurlijk licht is een belangrijke factor met betrekking tot de groei en ontwikkeling van planten. Licht dient als energiebron voor de omzetting van CO₂ in suikers en andere koolhydraten (fotosynthese). Naast energie levert licht ook informatie aan de plant over de standplaats, het tijdstip van de dag en het seizoen. Het initieert of remt processen met betrekking tot plantanatomie, bloei en vruchtzetting (fotomorfogenese). Deze door licht gestuurde processen zijn van belang voor het overleven van de plant. In dit hoofdstuk wordt dieper ingegaan op de invloed van licht op zowel de fotosynthese (hoofdstuk 3.2) als op de fotomorfogenese (hoofdstuk 3.3). Vervolgens wordt ingegaan op de praktische betekenis van verschuivingen in licht kleur (hoofdstuk 3.4) en de specifieke lichtbehoefte bij de productie van uitgangsmateriaal en eindproduct van enkele belangrijke gewasgroepen in de tuinbouw (hoofdstuk 3.5).

3.2 Licht in relatie tot fotosynthese en groei

3.2.1 Pigmentvorming en lichtabsorptie

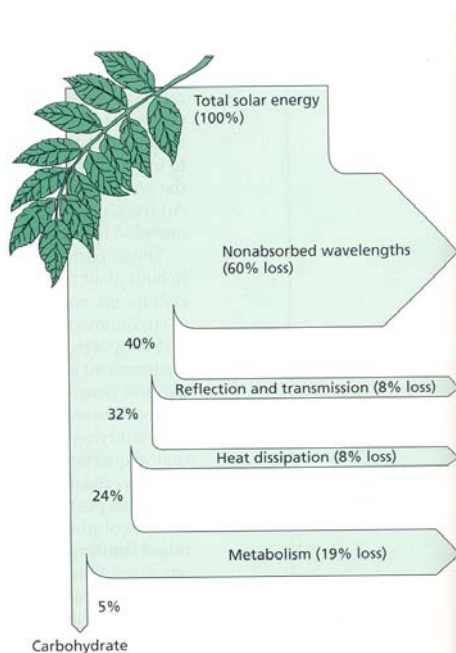
Zodra de planten licht ontvangen worden pigmenten gevormd die essentieel zijn voor de absorptie van lichtenergie. Chlorofyl (bladgroen) is het meest bekende pigment en zorgt voor de absorptie van lichtenergie. Van chlorofyl zijn twee vormen bekend, a en b, die voornamelijk straling absorberen in het rode (meer door chlorofyl a) en het blauwe (meer door chlorofyl b) deel van het spectrum. Naast chlorofyl bevat het blad ook andere pigmenten, o.a. β -caroteen met absorptiespectra in het blauw-groene deel van het spectrum. De lichtenergie die deze pigmenten absorberen wordt overgedragen aan chlorofyl en alsnog gebruikt voor de fotosynthese. Dat planten er groen uitzien is het gevolg van de reflectie en transmissie van (groen) licht in het golflengtegebied tussen 500 en 600 nm (Figuur 12).



Figuur 12 Gegeneraliseerd overzicht van de hoeveelheid licht (%) dat door een blad wordt geabsorbeerd, gereflecteerd en doorgelaten (transmissie) als functie van de golflengte (Uit: Taiz & Zeiger, 1998a).

3.2.2 Fotosynthese

Zonnestraling bevat straling van verschillende golflengtes, van 300 tot 3000 nm. Van de totale hoeveelheid globale stralingsenergie die op een blad valt wordt maar een klein deel benut voor fotosynthese. Het merendeel wordt niet geabsorbeerd maar doorgelaten of gereflecteerd door het bladoppervlak (vooral straling met golflengte ≥ 700 nm). Een deel van straling tussen 400 en 700 nm, de zogenaamde fotosynthetisch actieve straling (PAR: *Photosynthetically Active Radiation*), wordt geabsorbeerd en verhoogt de temperatuur van de plant. De bladtemperatuur wordt ook beïnvloed door straling uit het NIR-deel van het spectrum (700 – 3.000 nm). Wanneer de temperatuur té hoog oploopt wordt warmte energie actief afgevoerd door de plant (heat dissipation). Indien onvoldoende warmte afgevoerd kan worden, kan het leiden tot schade door de productie van zuurstofradicalen. Een ander deel van de opgenomen energie wordt gebruikt voor metabolische activiteit (fysiologische processen zoals omvorming van suikers en ademhaling). Ook voor de fotosynthese wordt alleen straling met golflengtes tussen 400 tot 700 nm benut. In dit golflengte traject wordt afhankelijk van de golflengte 70-90% van de lichtenergie door de bladpigmenten geabsorbeerd. Een deel daarvan gaat verloren in de vorm van warmte en fluorescentie (Figuur 13).



Figuur 13 Verdeling van de op een blad vallende lichtenergie (Uit: Taiz & Zeiger, 1998a)

Geabsorbeerde lichtenergie wordt gebruikt voor de productie van suikers die voor de groei of ademhaling dienen. Voor de groei van het gewas worden suikers naar de groeipunten of vruchten getransporteerd (*sinks*) en daar verbruikt voor de vorming van nieuwe plantendelen of de uitgroei van de vruchten. Onder optimale omstandigheden (voldoende licht, temperatuur) is de behoefte aan suikers in de *sinks* groter dan het aanbod vanuit de bladeren (*source*) waardoor groei vrijwel geheel wordt bepaald door de hoeveelheid fotonen die het gewas ontvangt. In principe produceren alle bladeren suikers voor de groei, echter bladeren die ver van een actieve *sink* liggen kunnen als gevolg van onvoldoende afvoer verzadigd raken met suikers. Bij kortdurende ophoping van suikers worden deze omgezet in zetmeel, en bij langdurende ophoping daalt de assimilatiesnelheid. Onder condities met weinig licht, lage temperatuur of een verminderde aanvoer van assimilaten neemt de activiteit van een *sink* af en wordt de groeisnelheid geremd. Uiteindelijk kan dat resulteren in het afsterven van een groeipunt of vrucht (knopabortie of vruchtrui).

De absorptie van licht brengt niet alleen de productie van assimilaten op gang maar zorgt als gevolg van het vrijkomen van energie (dissipatie) ook voor het opwarmen van de plant. Bladeren reguleren hun temperatuur via het verdampen van water waarvoor de energie aan het blad wordt onttrokken. Indien dit proces optimaal verloopt, wijkt de temperatuur van een door licht beschenen blad dan ook weinig af van de luchttemperatuur in haar omgeving. Bij een beperkte huidmondjesopening kan dit verschil oplopen tot enkele graden boven of onder de luchttemperatuur. Naast het reguleren van de bladtemperatuur is verdamping essentieel voor de aanvoer van zowel mineralen uit de wortels als assimilaten uit de bladeren naar de groeiende delen. Blad dat nauwelijks licht ontvangt, en dus ook nauwelijks verdampt, veroudert snel en sterft af. Stimuleren van de verdamping van blad dat weinig licht ontvangt schijnt het vergelen en afvallen daarvan tegen te gaan (mededeling DLV).

Verloop lichtafhankelijke CO₂ opname gedurende de dag

Het niveau van de fotosynthese wordt voornamelijk bepaald door de heersende lichtintensiteit. In het algemeen volgt de fotosynthese het verloop van de lichtintensiteit gedurende de dag. Verder wordt de fotosynthese beïnvloed door de CO₂ concentratie in de lucht en, in mindere mate, door de temperatuur. Daarnaast is in een aantal studies 'hysteresis' beschreven, een fenomeen waarbij de reactie van de fotosynthese op licht in de ochtend een ander verloop heeft dan in de middag. De meest bekende vorm daarvan is de 'midday depression' of meer precies 'sluiting van de huidmondjes midden op de dag'. Wat de reden van de verlaagde fotosynthese in de middag is, is niet helemaal duidelijk. Er worden verschillende oorzaken genoemd in de literatuur: hoge temperaturen in de middag (Heath & Orchard, 1957), watertekort (Ito, 1971; Bodlaender et al., 1985; Kitano & Eguchi, 1993), overmaat aan licht (foto-inhibitie; Correia et al., 1990), assimilatenverzadiging (Ito, 1971) of een (onbekend) endogeen mechanisme (Chaumont et al., 1994). Over het algemeen wordt watertekort in de plant gezien als belangrijkste oorzaak. Daardoor sluiten huidmondjes en loopt de fotosynthese terug. Dit watertekort is niet altijd alleen te wijten aan een onvoldoende watervoorziening, maar ook aan een hete of droge lucht in de middag.

Voor een aantal tuinbouwgewassen is daarentegen beschreven dat de fotosynthese gedurende de dag geen hysteresis of 'middagdip' vertoont, maar uitsluitend een functie is van lichtintensiteit (en CO₂ concentratie) (tomaat, Heuvelink, 1996; tomat, komkommer, paprika, Nederhoff en Vegter, 1994; o.a. aubergine, Hand et al., 1992, 1993). Ook voor enkele niet-tuinbouwgewassen is dit beschreven (tarwe; Singh et al., 1993). De CO₂ toevoer van buiten naar het gewas kan beperkt worden door het kasdek, waardoor regelmatig gedurende de dag de CO₂ gehaltes dalen tot onder het buitenniveau. Dit wordt steeds meer ondervangen door CO₂ toediening tot minimaal 400 ppm.

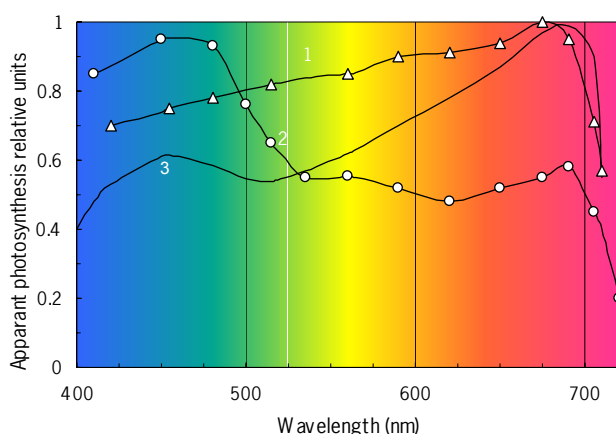
Actiespectra voor de fotosynthese

Theoretisch kunnen alle fotonen met golflengtes tussen 400 en 700 nm door een plant worden gebruikt voor de fotosynthese, maar de efficiëntie waarmee dit gebeurt is niet voor elk foton gelijk. Voor een aantal landbouwgewassen is de kwantumefficiëntie van licht met golflengten rond de 650 nm (roodlicht) hoger dan van licht met een golflengte rond de 450 nm (blauwlicht). Deze actiespectra zijn bepaald aan bladeren die zich in daglicht of kunstlicht hebben ontwikkeld (McCree, 1972). Echter de hoeveelheden chlorofyl en carotenoiden in een blad zijn afhankelijk van de lichtkwaliteit waarin het blad zich heeft kunnen ontwikkelen. In bladeren die zijn opgekweekt onder roodlicht worden meer chlorofyl en carotenoiden aangemaakt ('schaduw-type' chloroplasten) dan in bladeren opgekweekt onder blauwlicht ('zon-type' chloroplasten). Schaduw-type chloroplasten onderscheiden zich van het zon-type door het bezit van meer grana, een hoger gehalte aan chlorofyl en carotenoiden en een lagere zuurstof productie (Lichtenthaler et al., 1980; Barro et al., 1989; Bukhov et al., 1992).

Dit fenomeen zou kunnen verklaren waarom het actiespectrum voor de fotosynthese van blad (radijs) opgekweekt in of blauw (400-500 nm) of groen (500-600 nm) of rood (600-700 nm) licht, en dus optimaal is aangepast aan het betreffende deel van het spectrum, sterk afwijkt van het door McCree (1972) afgeleide actiespectrum (Figuur 14). Het actiespectrum blijkt afhankelijk te

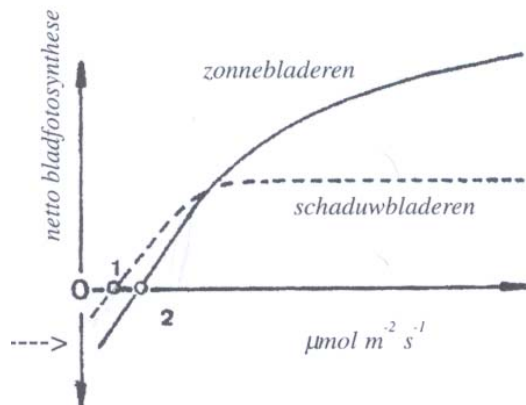
zijn van de lichtkwaliteit waaronder het blad is opgekweekt en van de lichtintensiteit waarbij de efficiëntie van de fotosynthese wordt bepaald. Het blad laat bij een lichtintensiteit van 50 W m^{-2} een hogere efficiëntie zien voor blauwlicht fotonen dan het actiespectrum van McCree. Onder een voor de fotosynthese lichtverzadigende intensiteit van 200 W m^{-2} vertoonde de planten zelfs een maximale kwantumefficiëntie voor blauwlicht fotonen (Tikhomirov et al., 1987).

Niet voor alle plantensoorten leidt de lichtkwaliteit waarbij de planten worden opgekweekt tot een verandering in het fotosynthetische actiespectrum (Tikhomirov et al., 1987; Mortensen & Strømme, 1987; McMahon et al., 1991; Siedlecka & Romanowska; 1993; Inada, 1977). Deze tegenstrijdige resultaten geven aan dat plantensoorten kunnen verschillen in de mate waarin zij zich kunnen aanpassen aan veranderingen in lichtkwaliteit. Voor niet-adaptieve soorten met een optimale kwantumefficiëntie in het rode deel van het spectrum betekent dit dat de hoogste fotosynthese en groeisnelheid wordt bereikt als een bepaalde hoeveelheid licht relatief veel rood bevat.



Figuur 14 Gegeneraliseerd actiespectrum voor de fotosynthese van 3 radijsbladeren, elk opgekweekt onder licht uit verschillende delen van het PAR gebied (400-500 nm, 500-600 nm of 600-700 nm) en een PAR niveau van 50 W m^{-2} (1, geen lichtverzadiging) of 200 W m^{-2} (2, lichtverzadiging). De lijn zonder symbolen (3) geeft het actiespectrum volgens McCree (1972) weer. (Uit: Tikhomirov et al., 1987)

Het verbruik van assimilaten door het blad is zo laag dat het lichtcompensatiepunt snel bereikt wordt en een positief netto fotosynthese wordt gerealiseerd. De opname van CO_2 is wel sterk afhankelijk van de adaptatie van het blad aan de heersende lichtomstandigheden en van de CO_2 concentratie in de lucht. Schaduwblad vertoont veel sneller een verzadigingseffect dan zonneblad en veel sneller bij een lage CO_2 concentratie dan bij een hoge CO_2 concentratie (Figuur 15). Een gewas met een zeer hoge *leaf-area-index* (LAI, het aantal eenheden bladoppervlak per eenheid grondoppervlak) heeft relatief veel blad onderin het gewas bij een relatief laag lichtniveau. Met een toenemende LAI zal de fotosynthese dus afnemen als de lichtintensiteit dieper in het gewas afneemt. Onder dergelijke omstandigheden kan het lichtcompensatiepunt op een zodanig laag niveau liggen dat een groot deel van de geproduceerde assimilaten direct nodig zijn voor de onderhoudsademhaling.



Figuur 15 Nettofotosynthese en donkerademhaling van schaduw- (1) en zonnebladeren (2) van *Solidago virgaurea*. De pijl geeft aan dat zonnebladeren meer suikers verbruiken voor de onderhoudsademhaling dan schaduwbladeren.

Relatie licht en productie (Light Use Efficiency)

In de tuinbouw wordt voor de relatie tussen licht en productie vaak de lichtregel 1% licht is 1% opbrengst gehanteerd, zonder dat daarbij onderscheid wordt gemaakt tussen verschillende gewassen of gewasgroepen. Een recente studie van Marcelis et al. (2004) waarin de lichtregel wordt geëvalueerd toont aan dat de effecten van lichtafname op de productie in de winter groter zijn dan in de zomer. Het bleek ook niet mogelijk een vuistregel vast te stellen, die geldig is onder alle omstandigheden. Op basis van de beschikbare literatuur worden wel vuistregels gegeven voor verschillende gewasgroepen (Tabel 4) waarbij opgemerkt moet worden dat deze in de winterperiode een onderschatting en in de zomerperiode een overschatting geven van effecten van licht op de productie.

Tabel 4 Afname van de productie bij 1% lichtafname voor verschillende gewassen (Uit: Marcelis et al., 2004)

Gewasgroep	Gewas	Afname productie bij 1% lichtafname
Vruchtgroenten	Tomaat	0,8-1%
	Paprika	0,8-1%
Bladgroenten	Sla	0,8%
Snijbloemen	Roos	0,8-1%
	Chrysant	0,6%
Potplanten	Ficus	0,65%

De netto fotosynthese, of wel de opgenomen hoeveelheden CO₂, is een momentopname en resulteert in groei van de plant. De groei, of wel de gewichttoename van de plant, kan in de tijd worden gemeten en weergegeven per eenheid ontvangen licht. Zoals de netto fotosynthese kan

worden uitgezet tegen de bijbehorende lichtintensiteit (Figuur 15) zo kan de groei worden uitgezet tegen de bijbehorende lichtsom.

Zodra een gewas het (zon)licht volledig onderschept ($LAI > 3$) kan bekeken worden hoe efficiënt een gewas omgaat met licht (Light Use Efficiency). Vanwege de grote verschillen in drogestof gehalte tussen gewassen en tussen de verschillende delen van de gewassen (blad, stengel bloem of vrucht) wordt hierbij gekeken naar de toename in drogestofgewicht. Omdat de lichtsom een cumulatie is van zowel lage als hoge lichtintensiteiten gedurende de groeiperiode worden verschillen in efficiëntie van de netto fotosynthese weggemiddeld. In de tijd blijkt de toename in drooggewicht van een gewas daardoor vaak lineair toe te nemen met de toename in ontvangen lichtsom. De verschillende bronnen komen tot steeds verschillende licht efficiëntie, zowel tussen gewassen alsook bij een zelfde gewas (Tabel 5).

Tabel 5 **Lichtefficiëntie van een aantal kasgewassen. Productie drogestof per mol PAR licht (1 MJ m^{-2} globale straling komt overeen met $4,6 \text{ mol m}^{-2}$).**

	Geoogste D.S. (% spruit productie)	D.S. (% geoogste product)	Geoogst D.S. (g mol ⁻¹ PAR licht)	Bron	Opmerking
Gemiddelde C3 planten			0,413	Gosse et al., 1986	
Vruchtgroenten					
Tomaat vrucht	67	5	0,674	Van den Berg, 2000	2,3 en 0,65 MJ m ⁻² in voor- resp. najaar
Tomaat vrucht	70	5	0,546	Heuvelink, 1996	
Komkommer vrucht	60	3,3	0,600	Nederhoff, 1994	
Paprika groen vrucht	60	10	0,324	Nederhoff, 1994	
Sla	100	5,7	1,065	De Pinheiro et al., 2000	
Sla	100	4,4	1,022	De Pinheiro et al., 2000	
Snijbloemen					
Roos (<i>Sonia</i>)	?	21	0,413	Kool en Koning,1996	Traditioneel teeltsysteem (1980), takken, winterhalfjaar
Roos (<i>Madelon</i>)	?	21	0,457	Kool en Koning, 1996	
Roos (<i>Madelon</i>)	?	21	0,472	Van Rijssel, 1995	
Roos (<i>Frico</i>)	?	21	0,587	Kool en Koning, 1996	
Chrysant	100	9	0,674	Buwalda, 1994	3,6 MJ m ⁻² d ⁻¹ 2,4 MJ m ⁻² d ⁻¹ 1,55 MJ m ⁻² d ⁻¹
Chrysant	100	9	0,717	Korsten, niet gepubl.	
Chrysant	100	?	0,772	Lee, 2002	
	100	?	0,933		
	100	?	1,161		
Gerbera (<i>Estelle</i>)	laag	?	0,341	Autio, 2000	bloemen
Gerbera (<i>Ximena</i>)	laag	?	0,285	Autio, 2000	bloemen
Potplanten					
Nephrolepis	100	13,7	0,690	Van Rijssel & Ploeger, 1997	Winterhalfjaar
Begonia	100	3,3	0,640	Van Rijssel & Ploeger, 1997	Winterhalfjaar
Saintpaulia	100	4,4	0,650	Van Rijssel & Ploeger, 1997	Winterhalfjaar

Uit de Tabel blijkt dat de enorme verschillen in drogestof gehalte tussen de gewassen niet leiden tot verschillen in lichtbenutting. Wel blijkt dat er verschillen bestaan zowel binnen als tussen gewassen, die mede bepaald worden doordat er bij een aantal gewassen slechts een deel van het gewas wordt geoogst.

Uit proeven die op verschillende seizoenen betrekking hebben of op beschaduwde behandelingen blijkt dat ook de gemiddelde lichtintensiteit in de gemeten periode invloed heeft op de gemeten lichtefficiëntie van het gewas. Dit laatste stemt overeen met het feit in Figuur 15 dat de fotosynthese efficiëntie afneemt met een toenemende intensiteit van de belichting.

3.3 Licht in relatie tot fotomorfogenese

Fotomorfogenese is het proces dat leidt tot de uiteindelijke vorm, kleur en bloei van de plant. Dit is voor een belangrijk deel genetisch vastgelegd maar wordt door licht gestuurd. De plaatsen waar fotomorfogenese plaatsvindt, zijn de aanlegpunten van bladeren en bloemen en groeiende weefsels (celstrekking) in b.v. de stengels. Voor de fotomorfogenese en bloei van planten zijn daglengte en spectrale verdeling van belang. Voor een aantal gewassen is het de daglengte die de bloei induceert of remt. Deze planten worden korte dag planten (KDP) of lange dag planten (LDP) genoemd en worden nader besproken in paragraaf 3.4.6 (bloeiende potplanten).

De spectrale samenstelling van het licht is van invloed op de morfologische ontwikkeling van de plant, en om dat te sturen hebben planten een aantal verwante groepen van fotoreceptoren ontwikkeld. Een van deze families bestaat uit de fytochromen (fytochromen A tot E), die licht waarnemen in het rode gebied (600-700 nm) en verrode gebied (700-750 nm). Een ander groep van fotoreceptoren absorbeert specifiek blauwlicht (390-500 nm) en/of UV-A (320-390 nm). Binnen de groep van blauwlicht receptoren worden de cryptochromen en fototropinen onderscheiden (Christie & Briggs, 2001).

3.3.1 Rood/verrood receptoren(fytochromen)

Fotobiologische experimenten hebben geleid tot de conclusie dat fytochroom bestaat in twee vormen: het inactieve Pr dat na absorptie van roodlicht wordt getransformeerd naar het actieve Pfr. Deze reactie is reversibel, wanneer het pigment verrood licht absorbeert verandert de Pfr vorm weer in de Pr vorm. Fytochroom kan verdeeld worden in twee groepen, een lichtstabiele en instabiele vorm. De lichtstabiele (Pr) vorm is verantwoordelijk voor de klassieke rood/verrood reversibele responsen, zoals de-etiolatie, celstrekking en de regulatie van bloei. De instabiele (Pfr) vorm speelt een belangrijke rol in kieming bij zeer lage lichtintensiteiten ($<5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en neemt verlenging van daglengte waar. De instabiele vorm is ook essentieel voor de-etiolering in licht met een verhoogd verrood gehalte, zoals voorkomt in lichtbeperkte omstandigheden (zoals onder een gesloten gewas), wat bijzonder is omdat het juist door verrood i.p.v. roodlicht geïnduceerd wordt.

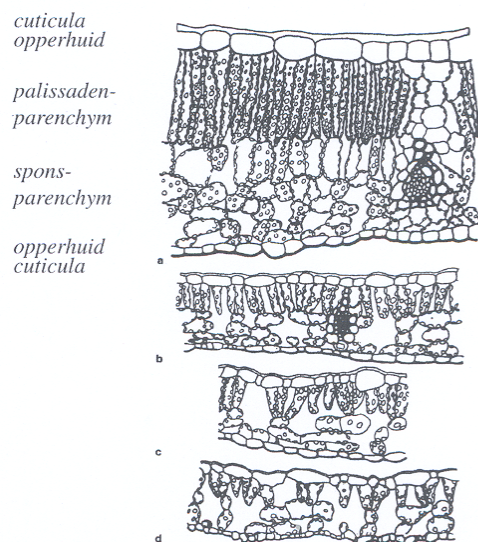
De rood/verrood (R/VR) verhouding is van invloed op de fytochroom respons van planten zoals stengelstrekking, bloemvorming, stomatale geleiding en de anatomie. Een afname van de R/VR verhouding (relatief meer verrood) stimuleert de stengelstrekking en remt de vorming van zij scheuten. Toename van de R/VR verhouding reduceert de bladdikte als gevolg van een dunnere mesofyllaag met kleinere en minder cellen (Schuerger et al., 1997). De mate van reactie is afhankelijk van de plantensoort en evolutionair bepaald (Smith, 1982). Licht waarin rood en blauw overheersen leiden tot verschuivingen in droge stofverdeling tussen blad en stengel en remmen de zij scheutvorming (Warrington & Mitchell, 1976).

3.3.2 Blauwlicht receptoren (cryptochromen en fototropinen)

Er zijn twee blauwlicht receptoren geïdentificeerd, cryptochromen en fototropinen. Binnen de cryptochromen worden twee pigmenten onderscheiden, waarvan één functioneert onder hoge lichtintensiteiten en vooral leidt tot remming van de hypocotyl- en/of stengelstrekking. Er is geen range van lichtintensiteiten of golflengtes bekend waarbinnen dit cryptochroom functioneert. Het tweede cryptochroom pigment functioneert onder lage licht intensiteiten ($<20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en stimuleert de bloei door remming van de werking van fytochroom B, het fytochroom dat de bloei normaal remt. Fototropine is een blauwlicht receptor waarvan de functie grotendeels onbekend is, maar gedacht wordt dat het een rol speelt in de calcium toevoer naar de celinhoud (cytosol).

Blauwlicht is belangrijk voor de vorming van chlorofyl, de ontwikkeling van de chloroplasten, de stomatale opening, de synthese van enzymen en de 24-uurs cyclus van de fotosynthese en fotomorfogenese. Een verhoogd aandeel van blauwlicht in natuurlijk licht heeft een remmend effect op de celstrekking waardoor de stengel korter en het blad dikker wordt. Omgekeerd heeft een afname van de hoeveelheid blauwlicht een toename van het bladoppervlak en de stengelstrekking tot gevolg wat kan leiden tot een hogere stralingsinterceptie en uiteindelijk tot een hogere opbrengst (cf. Schuerger et al., 1997; Dougher & Bugbee, 2001). De hoeveelheid blauwlicht kan niet voor alle plantensoorten ongelimiteerd worden teruggebracht, te weinig blauwlicht kan tot negatieve effecten op de plant ontwikkeling leiden. Zo vertonen slaplantjes bij gebrek aan blauwlicht een overmatige hypocotylstrekking (Thomas & Dickinson, 1979) terwijl sla opgekweekt in kunstlicht dat $3-7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ blauwlicht bevatte geen morfogenetische afwijkingen vertoonden (Dougher & Bugbee, 2001). Voor *Capsicum annuum* (peper) bleek een minimum hoeveelheid blauwlicht van $4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ voldoende voor een normale plantontwikkeling (Schuerger et al. (1997) terwijl voor *Chenopodium album* $0,1 \text{ nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ blauwlicht (446 nm) al voldoende was om de hypocotyl strekking te remmen (Holmes & Schafer, 1981). Anderzijds is door Wheeler et al. (1991) en Hoenecke et al. (1992) een blauwlichtbehoefte voor sla vermeld van 6% van PPF met een minimum van 15-30 en voor sojaboon $30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. De minimale blauwlicht behoefte varieert dus sterk per plantensoort en vertoont bovendien voor sommige soorten een interactie met de hoeveelheid fotosynthetisch actieve straling (Ritter et al., 1981). Een negental plantensoorten opgekweekt in de winterperiode onder kunstlicht in combinatie met natuurlijk licht vertoonden geen negatief effect op de groei en ontwikkeling. Natuurlijk licht bevat ook in de winterperiode kennelijk voldoende blauwlicht voor een normale ontwikkeling van de planten (Cathey & Campbell, 1979).

Dunnere, grotere bladeren zijn onder schaduwrijke condities een algemeen voorkomend fenomeen (Figuur 16) bij zowel dicotyle als monocotyle soorten. Het ontbreken van blauwlicht speelt hierbij een grotere rol dan de R/VR ratio (Schuerger et al., 1997). De zonnebladeren kenmerken zich door lange palissadenparenchymcellen met veel bladgroen en een dikke cuticula. Onder schaduwcondities worden de bladeren steeds losser en opener van structuur. De mate van respons zou het gevolg zijn van verschillen in morfologische aanleg. Planten met rechtopstaande bladeren en stengel zoals tarwe (en de meeste andere monocotylen) zouden minder gevoelig zijn voor blauwlicht terwijl planten met bladeren in het horizontale vlak zoals sojaboon en sla (en de meeste dicotylen) die direct worden blootgesteld juist gevoeliger zijn voor variaties in blauwlicht (Dougher & Bugbee, 2001).



Figuur 16 Zonne- (a) en schaduwbladeren (b-d) van Esdoorn. Het schaduwblad (b) komt uit het midden van de boom, (c) en (d) van de onderzijde (Uit: Salisbury & Ross, 1992)

3.3.3 UV receptoren

Blootstellingen aan UV-A, UV-B en blauwlicht vertonen interactieve effecten op een aantal biochemische en fysiologische processen in de plant (Brosche & Strid, 2003). Dit versterkt het vermoeden dat er verschillende receptoren zijn voor dit type straling. Deze zijn nog niet geïdentificeerd maar in planten zou een specifieke UV-B receptor aanwezig zijn (Brosche & Strid, 2003). Naast een specifieke receptor voor UV-B worden een aantal stoffen als intermediair voor UV-signallerings aangemerkt: calcium, kinases, fosfatases en de redox status van de cel tijdens blootstelling aan UV-straling.

Onder natuurlijke omstandigheden worden planten blootgesteld aan zowel UV-A (320-400nm) als UV-B (280-320). UV-C straling (<280nm) wordt volledig geabsorbeerd door de ozonlaag in de stratosfeer. Planten in kassen daarentegen worden alleen blootgesteld aan een deel van de UV-A straling omdat glas alleen golflengtes vanaf ca. 350 nm tot 3000 nm goed doorlaat.

In combinatie met blauwlicht speelt UV-A een rol bij de regulatie van een aantal morfologische processen zoals stengelstrekking, blad ontwikkeling en fototropisme. Op biochemisch niveau beïnvloedt UV-A de transcriptie van een aantal genen.

UV-B kan planten beïnvloeden op twee algemene manieren, door bij (niet gedefinieerde niveaus van) lage intensiteiten de productie van beschermende elementen in de plant te induceren, en, bij hogere (niet bekende) intensiteiten, door het veroorzaken van schadelijke effecten op planten. Planten beschikken bij voldoende hoge PAR niveaus over verschillende mechanismen om beschadigingen door UV straling te voorkomen zoals reflectie, DNA reparatiemechanismen en afvangen van radicalen (Rozema et al., 1997). Bescherming wordt ook geboden door de vorming van een aantal pigmenten zoals flavonoiden en anthocyanen, verhoogde niveaus van glutathione en ascorbaat, verhoogde activiteit van superoxide dismutase, glutathione reductase en peroxidase. Daarnaast vindt bij lagere intensiteiten van UV-B de accumulatie van alkaloiden, polyaminen plaats en worden dikkere waslagen gevormd. De synthese van flavonoiden in de bladeren heeft vooral een beschermend effect op het fotosynthese apparaat door het tegenhouden van de hoogenergetische UV straling (Tevini, 1993).

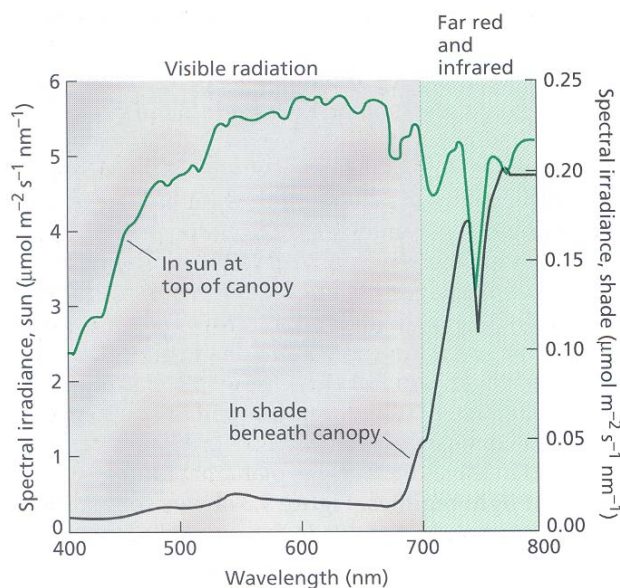
Schadelijke effecten ontstaan voornamelijk op biochemische niveau en worden veroorzaakt door remming van het fotosysteem (PSII), degradatie van eiwitten (ook PSII) en verzwakking van thylakoid membranen. Daarnaast resulteert een teveel aan UV-B in de reductie van enzymactiviteit (Rubisco) en een reductie van chlorofyl en carotenoiden gehalten (Tevini, 1993). Het vormen van beschermende pigmenten of herstel van schade gaat meestal ten koste van de groei, maar verhoging van de drogestof productie wordt ook gerapporteerd (Hoffmann, 1999). Een samenvatting van de belangrijkste effecten van de verschillende typen straling op planten staat in Tabel 6.

Tabel 6 **Overzicht van een stimulerend (↑) of remmend (↓) effect van straling uit verschillende delen van het spectrum op enkele fysiologische en morfologische processen in planten. Voor sommige processen wordt zowel een stimulerend als remmend effect gemeld (↕) of is geen informatie beschikbaar (-).**

Effect	Golflengtegebied (nm)				
	UV-B (280-315)	UV-A (315-380)	Blauw (400-500)	Rood (600-700)	Verrood (700-800)
Fysiologie					
Fotosynthese	↓	↑	↑	↑	-
Biomassa	↓	-	↓	-	↑
Synthese van:					
- Anthocyaan	↑	↑	↑	↑	↑
- Flavanoiden	↑	↑	-	-	-
- Ligninen/tanninen	↑	↑	-	-	-
Morfologie					
Strekkingsgroei	↓	↓	↓	↓	↑
Vertakking	↑	-	↑	↑	↓
Apicale dominantie	↓	-	-	↑	-
Bladoppervlak	↓	-	↓	↓	↑
Bladdikte	↑	-	↑	↑	↓
Bloei Korte Dag Planten	↓	-	↕	↓	↕
Bloei Lange Dag Planten	↓	-	↕	↑	↕
Kieming	↓	-	↕	↑	↓

3.4 Praktische betekenis van verschuivingen van lichtkleur

De spectrale samenstelling van het zonlicht dat het aardoppervlak bereikt is vrij constant, het wordt nauwelijks beïnvloed door bewolking of door de zonnestand. Alleen bij een invalshoek van minder dan 10 graden, zoals tijdens de ochtend- of avondschemering, zijn er lichte spectrale verschuivingen waarneembaar waarbij de relatieve hoeveelheden blauw en verrood straling iets toenemen (Hughes et al., 1984). De spectrale verschuiving treedt in veel sterkere mate op bij beschaduwing door planten uit de omgeving (Figuur 17). Dit is heel sterk als planten of plantendelen zich onder andere begroeiing ontwikkelen, doch ook waarneembaar bij planten die op enige afstand van hogere begroeiing tot ontwikkeling komen. Schaduw op afstand, bijvoorbeeld van bomen en dergelijke, treedt vooral aan het begin en einde van de dag op. De verschuivingen naar blauw, maar met name naar verrood kunnen, naast aanpassing in pigment- en chloroplastsamenstelling ook een aantal andere, met name morfologische veranderingen teweeg brengen. Of en hoe het aanpassingsvermogen van planten in de glastuinbouw benut kan worden verdient meer aandacht. In tegenstelling tot “vegetatieschaduw” heeft de schaduw van vaste objecten vrijwel geen invloed op de spectrale verdeling. In dergelijke gevallen is voornamelijk de hoeveelheid blauwlicht bepalend en speelt de hoeveelheid R/VR een ondergeschikte rol (Ritter, Wagner & Holmes, 1981).



Figuur 17 Spectrale verdeling van zonlicht boven en onderin een gewas. De totale straling boven het gewas bedroeg $1900 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en in de schaduw $18 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Uit: Taiz & Zeiger, 1998b)

Conclusies hoofdstuk 3.2 (fotosynthese):

- In de praktijk gaat men ervan uit dat ochtendzon belangrijker is dan avondzon. De achterliggende gedachte daarbij is dat de licht benuttingsefficiëntie 's ochtends groter zou zijn dan 's middags. Een mogelijkheid zou ook kunnen zijn dat niet de lichtbehoefte van de plant verandert in het verloop van de dag, maar de invloed van externe factoren op de fotosynthese capaciteit, vooral 's middags. De literatuur geeft hierover geen uitsluitsel, het verloop van de fotosynthese gedurende de dag is niet eenduidig beschreven. Dit zou een onderwerp voor nadere studie kunnen zijn.
- Algemeen geldt dat een hoge lichtdoorlatendheid van de kas de gewasontwikkeling en -productie bevordert. In de zomer kan het selectief wegvangen van lichtpieken nuttig zijn voor sommige gewassen.
- Er zijn verschillen in lichtefficiëntie tussen gewassen maar deze zijn beperkt, zeker wanneer alleen gekeken wordt naar de lichtefficiëntie in de winter.
- Bij een lagere lichtintensiteit neemt de efficiëntie van de lichtbenutting van het gewas toe.
- De meest optimale kwantumefficiëntie ligt voor sommige soorten in het rode of in het blauwe deel van het spectrum. Dit is afhankelijk van de lichtintensiteit en lichtkwaliteit, omdat het blad zich aanpast aan het aangeboden licht tijdens de ontwikkeling van het blad. De fotosynthese efficiëntie tijdens de eerste dagen van de productiefase is dan ook afhankelijk van de lichtomstandigheden tijdens de opkweek, waarna het gewas zich heeft aangepast aan de dan heersende lichtomstandigheden.
- Gedeeltelijke omvorming van blauw naar rood licht zou gunstig kunnen zijn voor de fotosynthese efficiëntie, maar onvoldoende bekend is wat de morfogenetische effecten daarvan zijn.
- In de praktijk wordt de daglengte bij een aantal daglengtegevoelige gewassen volledig gestuurd via (daglengte)belichting en verduistering.

Conclusies hoofdstuk 3.3 (fotomorfogenese):

- Veel plantensoorten hebben een minimale hoeveelheid blauwlicht nodig voor een normale plantontwikkeling. Deze behoefte verschilt per soort en varieert van 5-30 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. In Nederland wordt aan deze behoefte voldaan door natuurlijk licht, ook in de winter periode. Het selectief verminderen van een overmaat aan blauwlicht kan de bladontwikkeling van jonge planten positief beïnvloeden.
- De gewasstructuur (te beïnvloeden door plantafstand en teeltsysteem) is van belang i.v.m. de spectrale verschuivingen die optreden in een gewas. Onderin een gewas kan voor actieve groeipunten een tekort aan blauwlicht ontstaan.
- Het selectief wegschermen van rood licht, waardoor de rood/verrood verhouding afneemt, kan mogelijk worden toegepast om de vorming van zijscheuten en pluizen te verminderen. Dit effect kan mogelijk ook worden bereikt door het verlengen van de dag met verrood stuurlicht, bijvoorbeeld door een korte belichting met verrood aan einde van de natuurlijke dag of belichtingsperiode. Het verhogen van blauwlicht kan worden toegepast om de vorming van zijscheuten te stimuleren. De rol van UV straling zou per gewas nader moeten worden onderzocht.
- Bij het beïnvloeden van de lichtkwaliteit moet rekening gehouden worden met negatieve effecten op productie door vermindering van de totale lichthoeveelheid. De relatie van lichtkwaliteit en lichtkwantiteit is onvoldoende bekend.

3.5 Gewasgroepen

3.5.1 Uitgangsmateriaal

Zaad en stek dienen te beschikken over groeikracht voor een snelle, gelijkmatige en volledige kieming of beworteling. De moederplanten worden onder omstandigheden met een hoog lichtniveau geteeld om dit te bewerkstellingen, minimaal is $5 \text{ mol m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$, voor lichtbehoeftige gewassen $5\text{--}7 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Spaargaren, 2000). De meeste zaden zijn goed bewaar- en transporteerbaar zodat ze onder zomerse omstandigheden geteeld kunnen worden. Stek wordt vanuit zuidelijke landen ingevlogen of in de winter belicht om over groeikrchtig uitgangsmateriaal te kunnen beschikken. De moederplanten van daglengtegevoelige gewassen worden door middel van verduistering of belichting in het vegetatieve groeistadium gehouden. Het leverbare plantgoed moet beschikken over een hoog uitgangsgewicht, maar moet ook passen in het fust waarin het wordt getransporteerd en bestand zijn tegen de omstandigheden tijdens transport en uitplanten. Voor veel gewassen wordt dit bereikt door het plantgoed na de kiemings- of bewortelingsfase onder lichte omstandigheden tot de juiste omvang te laten uitgroeien. Een voldoende hoge lichtintensiteit en een ruime plantafstand is nodig om de stengelstrekking zoveel mogelijk te voorkomen. Een lichtsom van $4,6 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ is voor tomaat een veilig minimum (Bruggink, 1987).

Daglengtegevoelige gewassen worden ook in de bewortelings- en uitgroeifase met een daglengtebehandeling vegetatief gehouden.

Wanneer planten met meer roodlicht dan in het natuurlijke licht worden opgekweekt, dan worden er schaduwtype chloroplasten aangemaakt, chloroplasten met relatief veel chlorofyl (verhoging fotosynthese capaciteit) en carotenoiden (energie transfer naar chlorofyl en bescherming door warmte dissipatie). Dit in vergelijking tot planten die worden opgekweekt met veel blauwlicht (Lichtenthaler et al., 1980; Barro et al., 1989). In het algemeen kan gesteld worden dat er tijdens de opkweek behoefte is aan veel licht met relatief weinig verrood (strekking) en blauwlicht (klein blad) t.o.v. dat in natuurlijk licht.

De overgang van opkweekbedrijf naar productiebedrijf gaat samen met een sterke verandering in microklimaat rondom het materiaal. Direct na uitplanten is de bladmassa in een kas gering en valt veel licht op de ondergrond. Op dat moment is een snelle weggroei van het allergrootste belang. Wortelgroei en bladvorming zijn daarbij essentieel. Een snelle toename in bladoppervlak (betere lichtonderschepping) door hoge temperatuur en RV, is direct na het planten belangrijker dan een hoog lichtniveau.

In hoeverre het gewenste, zware plantmateriaal optimaal is afgestemd op een snelle, uniforme start op het productiebedrijf is slechts gedeeltelijk bekend. Voorts is nauwelijks bekend wat de tijdsduur en de omstandigheden zijn tussen oogst op het opkweekbedrijf en uitplanten op het productiebedrijf. Onduidelijk dus of de weggroei daardoor negatief kan worden beïnvloed.

Bij een lage LAI speelt de reflectie van licht en NIR-straling van de ondergrond een rol bij zowel de totale hoeveelheid licht die op het gewas terecht komt, als bij de opwarming van de kas. Een hoge reflectiewaarde van de ondergrond voor licht zorgt ervoor dat veel licht terug op het gewas valt. Hierdoor verbetert de lichtonderschepping van het gewas. Een hoge reflectiewaarde van de

ondergrond voor NIR-straling werkt in de zomer bij een hoge stralingsintensiteit positief, de kas wordt minder opgewarmd en de RV kan beter op peil blijven. Wit afdekfolie en een droge betonvloer hebben beide een hoge reflectiewaarde en worden zowel op opkweekbedrijven als op productiebedrijven toegepast. In de winter is juist een geringe reflectie maar een hoge absorptie van NIR-straling gewenst. Dit leidt tot een betere opwarming van de kas, het gasverbruik wordt gereduceerd.

De afstemming tussen het opkweek- en productiebedrijf verloopt vaak niet optimaal. Het afzetmoment van het opkweekbedrijf wordt ingepland en kan onder gunstige groeiomstandigheden worden vervroegd om transportschade te voorkomen. Verlating is vaak moeilijk. Ook op het productiebedrijf wordt de plantdatum ingepland doch vaak krap om de leegstand tot een minimum te beperken. Het komt dus geregeld voor dat jonge planten een aantal dagen onder minder optimale omstandigheden worden ‘opgeslagen’.

Mogelijkheden voor optimalisatie:
- Bij lage LAI (jong gewas) de ondergrond afdekken met materiaal dat zoveel mogelijk licht reflecteert zodat het gewas meer licht vangt. - Bij lage LAI (jong gewas) tijdens de zomer een bodemfolie gebruiken dat de NIR-straling sterk reflecteert zodat de kas minder warm wordt. Tijdens de winter een bodemfolie gebruiken dat de NIR-straling sterk absorbeert, zodat de kas opwarmt en het gasverbruik gereduceerd wordt. - Als in de zomer zonwering wordt toegepast, dan materialen gebruiken die relatief veel blauw wegfilteren (rode doeken), dit stimuleert de bladgrootte. - De rood/verrood verhouding verhogen om lengtegroei te remmen. Denk hierbij aan een kasdekmaterialen/schermdoeken die verrood licht uitfilteren of aan rood nabelichten aan het einde van de lichtperiode. Diffuus licht zorgt voor een betere lichtverdeling in het gewas en kan daardoor de rood/verrood verhouding in het gewas verhogen. Er zijn ook alternatieven om stengelstrekking te remmen zoals DIF, kouval en chemische middelen.

Witte vlekken
- Kijk naar de aansluiting van (licht)omstandigheden op het opkweekbedrijf op de omstandigheden op het productiebedrijf (oplossingssuggestie: lichtkleur of – intensiteit in of op het einde van de groeiperiode of aan afharderen) - Kijk naar het negatieve effect van transporteren en opslaan (omstandigheden met laag lichtniveau) van plantmateriaal en de mogelijke negatieve effecten daarvan tijdens de weggroei.

3.5.2 Vruchtgroenten

3.5.2.1 De plant

Tomaat (tomaat rond)

De tomaat komt van oorsprong uit de kustvlakten van westelijk Zuid-Amerika, van Equador tot Chili. Het gewas is in Mexico in gebruik genomen als cultuurgewas. Het is een gewas met een van nature liggende stengel die in de huidige teeltwijze wordt opgebonden. Het topmeristeem maakt steeds afwisselend drie bladeren en dan een bloemtros. De okselmeristemen van de bladeren lopen gemakkelijk uit tot volwaardige zijscheuten, scheuten die in de teelt in een jong stadium worden weggenomen (dieven). De bloemtros is een bloeiaar met 3-10 bloemen, waarvan alle bloemen kunnen zetten en uitgroeien tot volwaardige vruchten. Als de vruchten gaan kleuren stopt de vruchtgroei en wordt het blad direct boven deze tros weggenomen. De plant wordt belast met 7-10 trossen vruchten, vanaf knopstadium tot rijpe vrucht, over een lengte van 2-2,5m.

De teelt richt zich op een gelijkmatig verlopende productie in de tijd met een maximaal gewicht aan rijpe vruchten die individueel (ronde tomaat) of per tros van 4-6 (trostomaat) geoogst worden. De maximale productie wordt bereikt met een hoge belasting van de plant met uitgroeïende vruchten waarbij de vegetatieve groei net niet wordt beperkt.

Paprika

De paprika komt van oorsprong uit Brazilië en Midden Amerika en behoort evenals de tomaat tot de Solanaceae. Zij vormt van nature een struikvormige plant met licht verhoude stengels. In de teelt worden 2 opgebonden stengels per plant aangehouden en worden de zijscheuten op ca. 2 bladeren getopt. De plant vormt een overmaat aan bloemen waarvan slechts een deel tot zetting en uitgroeï overgaan. Onder gunstige omstandigheden groeien zoveel vruchten uit dat de vegetatieve groei wordt geremd en veel bloemen aborteren. De vruchten kunnen zowel onrijp (groen) als rijp (rood, oranje of geel) worden geoogst.

De teelt richt zich op een gelijkmatig verlopende productie in de tijd met een maximaal gewicht aan onrijpe of rijpe vruchten die individueel worden geoogst. Gelijkmatigheid van de productie in de tijd en het maximaliseren van de productie is helaas nog onbereikbaar.

3.5.2.2 Lichtbehoefte

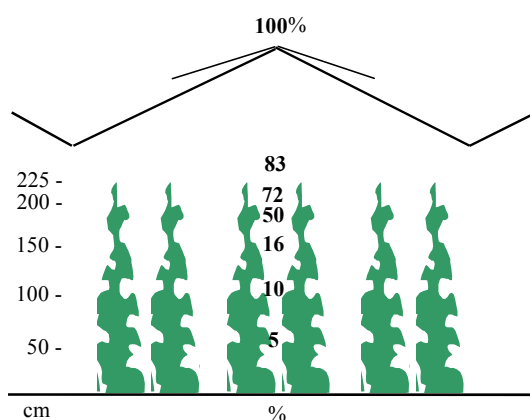
Tomaat

Tomaat is een zeer lichtbehoefte gewas, maximale productie pas boven $30 \text{ mol m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$, met een minimum van $8-10 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Spaargaren, 2000). De productie is ook midden in de zomer nog sterk afhankelijk van de beschikbare hoeveelheid licht. Bij de tomaat is het bladoppervlak bepalend voor de lichtonderschepping en de opname van CO_2 . De praktijk veronderstelt dat gedurende de dag 's-morgens meer CO_2 wordt opgenomen dan 's-middags (hoofdstuk 3.2.2). Het is nog niet geheel duidelijk waardoor dit verschil optreedt, maar suboptimale factoren zoals CO_2 en water beschikbaarheid i.r.t. relatieve luchtvochtigheid spelen hierbij wellicht een rol.

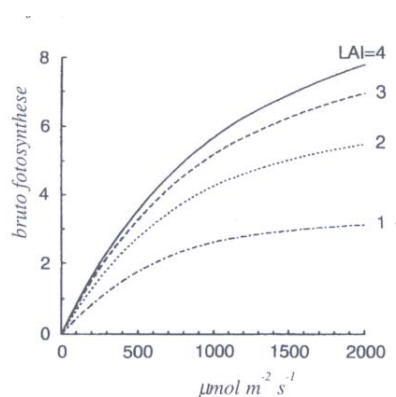
Bij een open (jong) gewas ($\text{LAI} < 0,5$) geldt hoe groter het bladoppervlak hoe meer licht er wordt opgevangen en hoe sterker de groei zal zijn. Lichtverzadiging van de fotosynthese vindt plaats bij

een intensiteit van circa $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figuur 19). De maximum fotosynthese is dan bereikt en meer licht betekent dan niet automatisch meer groei. Een hogere lichtintensiteit kan zelfs negatief werken (foto-inhibitie) en leiden tot gewasschade. In de winter, bij lage lichtintensiteiten, vormen planten dunnere bladeren waardoor met minder droge stof toch een groot bladoppervlak kan worden gevormd. Voor jonge planten is dit een voordeel doordat met elk nieuw blad de lichtonderschepping wordt verhoogd.

Bij een gesloten (ouder) gewas valt al het inkomende licht op de bladeren en slechts weinig licht bereikt de grond, Figuur 18. In een dergelijke situatie is de groei niet meer afhankelijk van het bladoppervlak maar van de lichthoeveelheid die de bladeren bereikt en meer licht leidt tot een hogere groeisnelheid. Dit is weergegeven in Figuur 19. Bij zomerse daglichtintensiteiten van $1600\text{-}1700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ wordt lichtverzadiging nog niet bereikt (Acock et al., 1978, Nederhoff & Vegter, 1994). De vruchtgroei wordt dan afhankelijk van de energie die nodig c.q. beschikbaar is voor het in standhouden van het gewas, verjonging en de lengtegroei. De rol hierbij van de lichtverdeling over het beschikbare bladpakket ofwel de lichtdoordringing in het gewas (bladgrootte, bladstand, plantafstand en teeltsysteem), is nog een punt van onderzoek.



Figuur 18 Schematische weergave van de lichtdoordringing in een kasgewas als percentage van het lichtniveau buiten (naar Nederhof, 1986).



Figuur 19 Bruto gewasfotosynthese ($\text{g CO}_2\text{m}^{-2}\text{uur}^{-1}$) van tomaat in relatie tot de lichtintensiteit bij verschillende LAI waarden (Gijzen, 1995).

De groei en productie van de tomaat worden gestimuleerd door een hogere lichtsom, meer licht en langere daglengten. Over de optimale daglengte bestaat bij tomaat geen duidelijkheid. In Canadees onderzoek wordt gezien dat bij daglengtes van meer dan 14 uur het effect van het licht op de groei en productie de laatste uren afneemt (Demers et al., 1998). Bij een hoog lichtniveau is het aantal vruchten per plant (de hoeveelheid *sinks*) bepalend voor de maximale fotosynthese. Bij te weinig vruchten (*sinks*) wordt de fotosynthese geremd door de beperkte afname van fotosynthese producten. Bij tomaat neemt het aantal bloemen per tros weliswaar toe met de beschikbare lichthoeveelheid en kunnen alle bloemen in principe uitgroeien tot oogstbare vruchten, doch dit kent grenzen. De beperking wordt opgeheven door een aantal zij scheuten aan te houden en daarmee de plantdichtheid en het aantal trossen per m² te vergroten. In de winter, tussen week 44 en week 5, ligt de lichthoeveelheid in Nederland beneden de minimum lichtbehoefte van tomaat van 8-10 mol m⁻² dag⁻¹. Het in stand houden van de plant en de vegetatieve groei vraagt onder die omstandigheden, ook bij de minimale temperatuur, relatief veel assimilaten zodat er dan weinig resteert voor vruchtgroei.

De verhouding blauw/rood licht heeft invloed op zowel de bladgrootte als op de afstand tussen de bladeren. Extra roodlicht geeft groter blad, doch dit heeft nauwelijks effect op de productiviteit van het gewas (waarnemingen PPO). In een gewas treden verschuivingen in de spectrale verdeling op als gevolg van onderlinge beschaduwning, selectieve transmissie en reflectie van het licht. Dieper in het gewas neemt de relatieve hoeveelheid verrood licht toe (Warrington & Mitchell, 1976), wat de stengelstrekking van zij scheuten stimuleert. De ontwikkeling van zij scheuten in (jonge) tomaten kan worden verminderd door een eind-van-de-dag verhoging van het gehalte verrood licht (Tucker, 1975), waardoor de planten minder gedieft hoeften te worden. Of een dergelijke nabelichting bij grotere planten ook effect heeft en het effect op de vruchtwikkeling van de tomatenplanten is niet onderzocht.

Paprika

Evenals de tomaat is de paprika een zeer lichtbehoefstig gewas. Ze wordt echter algemeen als een dagneutrale plant aangemerkt. Een daglengte langer dan 20 uur geeft ondanks meer licht geen hogere productie meer. Bij een daglengte van 16 uur geeft het gewas de grootste vruchten (Spaargaren, 2000).

3.5.2.3 De gangbare teeltwijze

Tomaat

Tomaten worden geteeld in venlo-kassen met een hoge pothoogte. De planten worden aan draden geteeld tot een lengte van vele meters, waarbij men de kop van de plant geregeld laat zakken om te zorgen dat ze rechtop kunnen blijven doorgroeien (hoge draad systeem). In het voorgaande systeem, tot ca. 1995, groeide de kop over de draad heen en kwam dan tussen de rijen omlaag hangen. Dit systeem bleek minder productief te zijn. De tomaat wordt in een één of tweerijen systeem geteeld, rijen die parallel lopen met de nokrichting van de kas. Het plantmateriaal wordt opgekweekt in steenwolblokken en in de kas uitgezet op in plastic verpakte steenwolstroken. De kasgrond wordt met loopfolie afgedekt. Alle gebruikte plastic is aan de

buitenzijde wit om het licht zo goed mogelijk te kunnen benutten en het substraat koel te houden.

Voor de afwatering wordt de kasgrond, of de goten met steenwol op afschot gelegd. Bij nieuwe bedrijven worden de goten opgehangen aan de kasconstructie om afwateringsproblemen bij zetting of verzakking van de ondergrond te voorkomen.

De nieuwe gewassen worden in de periode december tot februari geplant en groeien dan in principe door tot november. Soms wordt de groeiperiode gesplitst in een voorjaars- en een herfstteelt. De planten worden met één of twee scheuten per plant geteeld, zijdscheuten (dieven) worden verwijderd.

De kastemperatuur wordt geregeld via verwarmingsbuizen op ca. 10 cm boven de grond, een buis-railsysteem dat ook voor transport wordt benut. Een groeibuis hangt tussen het gewas om het microklimaat te beïnvloeden.

In de kas wordt CO₂ gedoseerd om de groei te bevorderen. Bij gesloten ramen wordt gedoseerd tot een niveau van ca. 1000 ppm, een niveau dat bij opening van de luchtramen geleidelijk wordt verlaagd naar het buitenniveau van ca. 400 ppm. Men streeft ernaar om gedurende de gehele dag via rookgassen te doseren. De daarbij vrijkomende warmte wordt opgeslagen in een buffer of afgevoerd naar de kas.

In de aanloopfase van de teelt, de periode van december tot februari, wordt soms een schermfolie gebruikt om de RV op peil te kunnen houden. In de zomer worden daksproeiers ingezet om de kastemperatuur te drukken.

Stuurlicht wordt in de tomatenteelt niet toegepast

De kwaliteit van de tomaat, de smaak, wordt sterk bepaald door de cultivarkeuze, maar ook door de totale zoutenconcentratie in de voedingsoplossing. De meest smaakvolle tomaten hebben een relatief hoog drogestof gehalte en produceren daarom ook minder kg m⁻² zodat kwaliteit betaald moet worden.

De grootte van de tomaten wordt sterk bepaald door de teelttemperatuur. Hiervoor houdt de praktijk een optimum aan van ca. 19°C, en een minimum van ca. 16°C. Deze minimum temperatuur is te hoog voor de beschikbare hoeveelheid licht in de winter, 2-4 mol m⁻² dag⁻¹, de vegetatieve groei gaat door zodat er weinig assimilaten overblijven voor de vruchtgroei.

Om de klanten wel jaarrond te kunnen gaan bedienen wordt sinds twee jaar geëxperimenteerd met assimilatiebelichting. Hierbij gaat het om een hoge, additionele belichtingsintensiteit van 120 μmol m⁻² s⁻¹ of meer, gedurende 12-18 uur per etmaal. Onder omstandigheden van een langere lichtperiode met een beperkte lichtsom lijkt het lastig om het juiste evenwicht te vinden tussen de vegetatieve en generatieve groei van het gewas, het gewas krijgt de neiging te vegetatief te worden.

Paprika

De teeltwijze is grotendeels vergelijkbaar aan die van tomaat, hoewel bij paprika meer gebruik wordt gemaakt van schermfolie. Er worden twee tot drie scheuten per plant aangehouden. De zijdscheuten worden aanvankelijk op één later op twee bladeren getopt, waarbij er één, later twee vruchten per tak gevormd worden. Het verschil is dat de lengtegroei van de paprika veel minder is, tot ca. 3 m in een jaar, en het gewas daarom de draad niet bereikt.

Onder tot nog toe onbekende weersomstandigheden wordt de zetting en vruchtvorming op alle bedrijven tegelijk gestimuleerd. Er wordt vruchtdunning toegepast om te komen tot de gewenste vruchtgrootte. In de periode dat de vruchten uitgroeien en rijpen aborteren veel bloemen en jonge vruchten. Dit verschijnsel leidt tot een geregeld over- en onderaanbod op de afzetmarkt. In de periode van uitgroeï en rijping van de vruchten wordt het overschot aan assimilaten vastgelegd in een verhoogd drogestof gehalte in het blad en verhouten de stengels. Bij experimenten met bewegende lampen op ca. 1,20 m boven het gewas bleek dat hiermee de zetting en uitgroeï van vruchten kon worden gestimuleerd. Deze waarneming zorgt voor een verbreding van het experimenteren zowel door de praktijk als door onderzoekinstellingen.

De paprika is een vrucht die in verschillende rijpheidstadia kan worden geoogst en verhandeld. Men kan de vrucht groen, onrijp, oogsten of laten doorrijpen en gekleurde paprika's oogsten. In de praktijk specialiseert men zich meestal op één producttype.

Mogelijkheden voor optimalisatie:
- Versnelde opbouw van een hoog LAI direct na het planten door gebruik van schermfolie dat met name blauwlicht wegfiltert (lagere verhouding blauw/rood licht) - Verbeteren van de CO₂ voorziening in de zomerdag, o.a. door nog verdergaande temperatuurintegratie, dakkoeling en gesloten kas - Terugdringen van de hoeveelheid drogestof die wordt vastgelegd in blad en stengel. Werken dus aan: a. een vroege en goede zetting en aan een zo hoog mogelijk vruchtgewicht o.a. via plantdichtheid en teelttemperatuur - Remming van de zijscheut ontwikkeling (dieven) door EOD verroodlicht

Witte vlekken
- Kijken naar de momenten waarop de fotosynthese niet maximaal is en opsporen van de factoren die de fotosynthese beperken - Kijken naar het effect van de daglengte op het evenwicht tussen generatieve en vegetatieve groei - Kijken naar de rol van een diepere lichtdoordringing in het gewas op de productiviteit (balans vegetatieve/generatieve groei). In hoeverre is diffuus licht effectiever dan gericht zonlicht? In hoeverre is de oriëntatie van de rijen t.o.v. de zon (lichtdoordringing tot diep in het gewas) van invloed op ontwikkeling en productie? - Kijken naar de rol van licht bij het mechanisme achter de massale zetting en vruchtuïtgroeï bij paprika onder bepaalde weersomstandigheden

3.5.3 Bladgroenten

3.5.3.1 De plant

Sla

De plant vormt van nature een rozetvormige plant waarvan de stengel pas na bloei-inductie gaat strekken. Na vorming van een beperkt aantal vrij vlak uitgroeiende bladeren gaat de plant een lossere of vastere krop vormen. In de teelt worden jonge plantjes in vierkantverband uitgeplant op een zodanige afstand dat de te oogsten kroppen elkaar juist raken. Door veredeling is de plant pas in een laat stadium gevoelig voor bloei-inductie zodat stengelstrekking bij een normale teelt niet optreedt.

De teelt richt zich op een gewenst kropgewicht. Hierbij worden de oudste, vaak reeds afstervende kleinere bladeren niet mee gesneden. Als de onderste grotere bladeren de eerste tekenen van vergeling gaan vertonen wordt voortijdig geoogst.

Andijvie

Vormt eveneens een rozetvormige plant doch geen krop. Verder als sla, wel iets eerder gevoelig voor bloei-inductie.

3.5.3.2 Lichtbehoefte

Bladgroenten zoals sla moeten een stevige krop vormen waarbij het niet wenselijk is dat de hypocotyl overmatige strekking vertoont tijdens de kiemplant/zaailing fase als gevolg van een gebrek aan blauwlicht (Thomas & Dickinson, 1979). Sla opgekweekt in kunstlicht dat 3-7 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ blauwlicht bevatte vertoonden geen morfogenetische afwijkingen (Dougher & Bugbee, 2001). Natuurlijk licht bevat ook in de winterperiode voldoende blauwlicht voor een normale ontwikkeling van de planten (Cathey en Campbell, 1979).

Algemeen geldt voor bladgroenten dat hogere lichtintensiteiten gedurende de dag leiden tot een verhoogde fotosynthese en een hogere groeisnelheid. De biomassa productie kan nog gestimuleerd worden door de planten aan het begin en einde van de lichtperiode bloot te stellen aan lage hoeveelheden (50 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) blauw en roodlicht (Hanyu & Shoji, 2002).

De kwaliteit van de sla kan gestuurd worden d.m.v. de lichtkwaliteit. Meer roodlicht levert een groter bladoppervlak en meer blauwlicht een compactere, vaste krop (Mortensen & Strømme, 1987).

Enkele dagen met UV-B licht op het einde van de teelt kunnen bij sommige slasoorten nodig zijn voor een gewenste roodkleur (Rozema et al., 1997).

Blootstelling aan UV-A straling, de UV straling die in glazen kassen doordringt, heeft mogelijk een positief effect op de gezondheid van mens of dier doordat het de vorming van antioxidanten in planten stimuleert (Steinmetz & Potter, 1996).

UV-B straling kan nadelig zijn tijdens het kweken van bladgroenten. UV-B straling stimuleert de vorming van ligninen en tanninen die de verteerbaarheid van de plant verminderen, maar wel bescherming bieden tegen vraat (Rozema et al., 1997). UV-B straling wordt door glas en de meeste plastics geabsorbeerd, doch er zijn materialen die het doorlaten.

Bij een lage lichtsom per dag verandert de vorm van het blad. De bladeren worden relatief smal waardoor de kans op 'graterige' sla groot is. Deze sla is kwalitatief minder en brengt een lagere prijs op. Door de keuze van het ras kan men dit echter grotendeels voorkomen.

Bij weinig licht en hoge RV (vooral late herfst) in combinatie met een gemakkelijke beschikbaarheid aan water kan glazigheid in het blad ontstaan. Dit kan voorkomen worden door 's morgens de verdamping te stimuleren door een temperatuurstoot te geven, voorzichtig te zijn met water geven en een voldoende hoog voedingsniveau aan te houden.

In de winter is er te weinig licht voor goede groei. Bladgroenten stoppen een deel van hun assimilaten in de vacuole (in de vorm van organische zuren en suikers) om vocht aan te trekken voor uitgroei van de cellen. In de winter kan een deel van die assimilaten worden vervangen door nitraat. Hoewel er een grens is aan deze vervangbaarheid, kan die grens boven het aanvaardbaar geachte nitraatniveau voor de gezondheid van de consument komen te liggen.

Hoge lichtintensiteiten in de zomer kunnen leiden tot hoge (nacht)temperaturen en te hoge verdamping van de buitenste bladeren. Hierdoor ontstaat Ca- gebrek in de binnenste bladeren van de plant dat zich kan uiten als rand. Het dek krijten of gebruik van zomerscherm in combinatie met broezen kan rand helpen voorkomen. Er zijn ook grote rasverschillen aanwezig.

Onder omstandigheden met weinig licht kan de behoefte aan assimilaten groter zijn dan het aanbod. Bij een relatief hoge temperatuur worden assimilaten onttrokken aan het oudste blad, hetgeen leidt tot versneld afsterven. Het gele blad verwijderen kost veel arbeid en verlaagt het oogstgewicht. Het kan worden verminderd door een ruimere plantafstand, zorgen voor een sterke onderkant, niet te hoge temperaturen aan te houden en rassenkeuze.

Stuurlicht wordt niet toegepast bij bladgroenten.

3.5.3.3 De gangbare teeltwijze

Bladgroenten zoals sla worden niet op substraat maar in de volle grond geteeld. Er wordt volvelds geteeld, met eventueel een smal paadje in het midden van een kap of tralie voor het uitvoeren van bespuitingen. De voorschriften ten aanzien van minimaal kropgewicht en het te gebruiken fust legt duidelijke beperkingen op aan het te telen product. De plantafstand wordt wat aangepast aan het seizoen, maar is vooral afhankelijk van het gewichtssegment waarin de teler wil oogsten (licht, midden of zwaar segment). De plantdichtheid varieert van 12 tot circa 28 planten per m².

De verwarming van de kas is eenvoudig. Ongeveer 80% van de bedrijven heeft uitsluitend heteluchtkanonnen en/of heteluchtkachels. Het grootste gedeelte van de rookgassen blijft in de kas en zorgt voor verrijking met CO₂. Bij dreigende te hoge gehalten wordt er extra geventileerd. De oogst, schoonmaken en inpakken, vindt meestal in de kas plaats, maar er komen steeds meer grotere slabedrijven die werken met oogstbanden, waarbij het inpakken in de schuur plaats kan vinden.

Bij bladgroenten is lichtverdeling over het gewas niet relevant, planten staan naast elkaar in het gelid. Kleine sla plantjes vangen uiteraard minder licht dan oogstbare kroppen.

Mogelijkheden voor optimalisatie:
- Het bladoppervlak (kropgrootte/biomasse) kan worden vergroot door wegfilteren van blauwen en verrode straling of direct vanaf planten einde-van-de-dag roodlicht nabelichten. - Bij zonwering een scherm toepassen dat selectief blauw absorbeert om het bladoppervlak (kropgrootte/biomassa) te vergroten (verlaging van de blauw/rood verhouding) - In de laatste weken van de teelt geen blauwlicht meer wegschermen om vastere kroppen te krijgen - Kiezen voor lichtst mogelijke kassen, dit geeft in de winterperiode lagere nitraatniveaus - UV-A niet wegschermen, het geeft mogelijk positief effect op voedingswaarde van het product voor de consument

3.5.4 Eénmalig oogstbare snijbloemen

3.5.4.1 De plant

Chrysant

De chrysant komt oorspronkelijk uit Japan. Hij vormt van nature een aantal spruiten vanuit het ondergrondse deel van de (uitbloeiende) stengel. In het voorjaar groeien deze uit tot opgaande, enigszins verhoutte stengels waarvan het topmeristeem na de zomer een bloemknop vormt. Na knopvorming lopen de bovenste okselknoppen massaal uit. Ze vormen een paar bladeren en daarna een eindstandige knop, waarna ook de okselknoppen van de bladeren weer uitlopen en knoppen vormen.

De teelt gaat uit van gestekte, opgaande scheuten. In de teelt wordt gestreefd naar een maximaal aantal takken van een bepaald taggewicht. Om dit te bereiken wordt een plantafstand aangehouden die afhangt van de beschikbare lichthoeveelheid. Het tijdstip van bloei-inductie en de trosvorm wordt geheel bepaald door de daglengte die via verduistering en belichting wordt aangehouden.

Aster

De aster vormt van nature eerst een bladrozet van ca. 6 bladeren. Daarna groeit de stengel door als bij chrysant. Bloei-inductie vindt plaats onder kortedag omstandigheden, analoog aan de chrysant.

De teelt gaat uit van gestekte, opgaande scheuten. Dit is vergelijkbaar met chrysant

3.5.4.2 Lichtbehoefte

De snelheid van knopinductie van éénmalig oogstbare snijbloemen zoals chrysant (het aantal gevormde bladeren onder de knop) wordt zowel bepaald door de aangehouden daglengte als door de R/VR verhouding in het licht, zodat de trosvorm mede afhangt van de plantafstanden (“vegetatieschaduw”).

In chrysanten opgekweekt onder licht met relatief weinig blauw werd in bladeren en stengels een afname van de concentraties aan oplosbare suikers (sucrose, glucose en fructose) en zetmeel geconstateerd wat nadelig is met betrekking tot de houdbaarheid (Decoteau et al., 1993). Gezien de lange houdbaarheid van chrysanten is dit echter voor de teelt minder relevant.

Als de daglengte voldoende kort is om de bloei te induceren kan de bloei eventueel vertraagd worden door de planten bloot te stellen aan verrood licht aan het einde van de dag (Kadman-Zahavi & Ephrat, 1973).

In de winter kan stengel broosheid optreden, net als bij anjers wanneer die te weinig licht ontvangen hebben, waarschijnlijk door een tekort aan lignine vorming.

Onder lichtarme omstandigheden worden tijdens de korte-dag weinig knoppen aangelegd. Dit leidt tot een tekort aan *sinks* en de plant reageert daarop met een verhoging van het drogestof gehalte in de plant en een verlaagde efficiëntie van de fotosynthese. Het drogestof gehalte kan oplopen van ca. 10% normaal tot aan 15% (mededeling PPO, P. Korsten).

De fotosynthese efficiëntie neemt af bij toenemende lichtintensiteit. De lichtefficiëntie wordt echter mede bepaald door het spectrum waarmee de planten belicht worden en door het

lichtspectrum waaronder de planten zijn opgegroeid. Chrysant haalt een hogere fotosynthese onder SON-T lampen dan onder HQI-lampen, bij eenzelfde belichtingsintensiteit ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). De fotosynthese-efficiëntie is hoger bij planten die zijn opgegroeid onder daglicht dan onder lamplicht (in groeikamers). HQI-licht is daarbij weer beter dan SON-T licht (Waltz & Horn, 1997).

3.5.4.3 De gangbare teeltwijze

Chrysant en aster worden één op één geteeld: één stek levert één oogstbare tak. In blokjes bewortelde stekken worden in gaas op de vollegrond uitgezet. Het gaas wordt, naarmate het gewas hoger wordt, omhoog getrokken ter ondersteuning. Verwarming hangt boven en tussen het gewas. Steeds vaker wordt het steungaas geïntegreerd met de gewasverwarming tot een hijsverwarmingssysteem.

Watergift is 3 tot 5 keer per week, via berekening over het gewas heen. Vaak is het mogelijk om ‘voor de voet’ te oogsten, m.a.w. het hele vak wordt in één keer leeg geoogst.

Een uniforme lichtverdeling over het gewas is voorwaarde om voor de voet op een heel vak ineens te kunnen oogsten. De plantafstand wordt aangepast aan de beschikbare lichthoeveelheid per seizoen. De plantdichtheid is dusdanig dat het volgroeide blad van de takken elkaar raakt.

Chrysant is een korte-dag plant. In het begin van de teelt krijgen de planten een lange dag om ze vegetatief te houden. In de lange-dag fase wordt het aantal bladeren aangelegd dat nodig is voor uitgroei tot de gewenste taklengte. Bij gebruik van assimilatiebelichting wordt in de lange dag meestal rond de 20 uur belicht. Daarna wordt de daglengte verkort tot ca 11 uur waarbij knopvorming wordt geïnduceerd. Kort na het begin van de korte-dag fase, als de centrale knop is geïnduceerd, wordt enkele dagen lange dag gegeven voor bladvorming aan de zijscheuten, voordat ook die in de korte-dag tot knopinductie worden aangezet. Dit tussenlicht verlengt de teeltduur doch geeft beter gevormde, zwaardere takken

De korte-dag behandeling in de zomer wordt bereikt door het verduisteringsscherm in de vroege ochtend en latere avonduren te sluiten. De lichtperiode wordt daarmee ingeperkt tot een lengte van 11 uur. De lange-dag in de winter via lage intensiteitsbelichting, vaak gerealiseerd als nachtonderbreking. Hierbij zijn de planten het gevoeligst in het rode deel van het spectrum.

Een toenemend aantal bedrijven past in de winter assimilatiebelichting toe. In de lange-dag fase 20 uur per dag, in de korte-dag fase 11 uur per dag. Hiermee blijft het takgewicht en het productieniveau in de winter beter op peil. De gebruikte intensiteiten liggen tussen de 45 en 80 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. In de belichte teelt is het onderbreken van de korte dag, direct na aanleg van de hoofdknop, niet nodig. Bij het hogere lichtniveau worden de takken, trossen, reeds voldoende zwaar.

Mogelijkheden voor optimalisatie:
- Zorg met name in de LD-fase, voor voldoende licht voor een goede stengelkwaliteit - Zorg voor een goede lichtdoordringing in het gewas om een lage rood:verrood verhouding te voorkomen (zijscheuten met te veel blad)

Witte vlekken:
- Kijken naar de oorzaak van een verlaagde lichtefficiëntie van de plant in de fase van knopgroei (oplossing suggesties: tijdelijk verhogen teelttemperatuur of verlagen niveau assimilatielicht) - Kijken naar de mogelijkheden om alleen fase afhankelijk te belichten, zwaardere stelen door belichten van alleen LD-periode?

3.5.5 Meermalig oogstbare snijbloemen

3.5.5.1 De plant

Ros

De plant vormt van nature een meerjarige, verhoutte struik die continu doorgroeit, zolang de temperatuur boven ca. 10°C blijft. Nieuwe scheuten worden spontaan gevormd aan uitbloeiende takken, als regel korter en dunner dan de tak waarop ze uitgroeien. Elke scheut vormt een eindstandige knop of bloemtros, waarvan de bloemgrootte en het aantal knoppen cultivar afhankelijk variëren. De struik verjongt zichzelf met groeiachtige scheuten die spontaan vanuit de oudste delen van de struik ontstaan (grondscheuten), met name als de scheuten boven in de struik dun worden.

In de teelt wordt gestreefd naar een maximaal aantal takken met een vast gewicht, in combinatie met een goede lengte-dikte verhouding van de tak. De (te) lichte takken worden uitgebogen om uitgroei van nieuwe scheuten aan de basis te stimuleren en te zorgen dat de plant altijd over voldoende blad beschikt. De overige scheuten worden tot vrijwel op de basis geoogst zodra de knop het juiste rijpheidstadium heeft bereikt. Bij deze teeltwijze, het knotsysteem, produceert de plant meerdere jaren achtereenvolgend kwalitatief goede takken, waarbij het takgewicht via de temperatuur kan worden gestuurd.

Gerbera

De plant vormt scheuten met 3-5 bladeren en eindstandig 1-2 bloemknoppen. Na knopaanleg vormen de bovenste okselknoppen 1-2 nieuwe scheuten. Knoppen en nieuwe scheuten groeien gelijktijdig uit. Bij voldoende licht kunnen alle aangelegde knoppen uitgroeien. Bij onvoldoende licht blijft de ontwikkeling stilstaan, wat later kan leiden tot knopabortie. De bloeiwijze bestaat uit een hart met buisbloemen met daaromheen één of meer kransen van lintbloemen, dit geheel staat op een lange bladloze steel. De plant vormt een rozet van bladeren, waarvan de oudste afsterven, met langstelige oogstbare bloemen. De plant is enigszins daglengtegevoelig, ze vormt de meeste knoppen bij een daglengte < 11 uur. De daglengte heeft tevens invloed op de snelheid van bloemaanleg.

In de teelt wordt gestreefd naar een maximaal aantal bloemen met een vrij vaste bloemdiameter en een niet te korte steel. De bloemdiameter wordt met name bepaald door de lengte van de lintbloemen en nauwelijks door de grootte van het bloemhart.

3.5.5.2 Lichtbehoefte

Ros

Voor vele soorten snijbloemen die meerdere malen worden geoogst is een hoge lichtintensiteit en een lange lichtperiode gewenst. In de vroegere, staande teeltwijze van rozen trad nooit lichtverzaaiing op omdat het licht moeilijk tot onderin het gewas kon doordringen (“vegetatieschaduw”). Tegenwoordig worden de primaire stengels uitgebogen en met het oogsten van de bloeistelen kan het licht dieper in het gewas doordringen. Deze teeltwijze leidt tot een circa 30% hogere fotosyntheseactiviteit ten opzichte van de staande teeltwijze. De takken worden langer, de bloemen groter en de biomassa-productie neemt toe (Warner & Erwin, 2002).

Voor sommige cultivars van roos kan de productie (+14%) en de kwaliteit (takgewicht) worden gestimuleerd door de belichtingsperiode te verlengen tot 24 uur (assimilatielicht). De kwaliteitsverbetering was direct gerelateerd aan de verlenging van de lichtperiode (of de verhoging van de lichtsom) onafhankelijk van de spectrale verdeling. Bij belichting met meer blauw wordt er meer energie besteed aan lignine vorming en warmte dissipatie. De gewastemperatuur neemt toe en de ademhaling wordt gestimuleerd waarbij suikers worden verademd i.p.v. gebruikt voor de groei (Menard & Danserau, 1995).

Bij cv. 'Mercedes' had vermindering van de hoeveelheid blauwlicht geen effect op het aantal bloemen maar de stengelstrekking nam toe. Blootstelling aan verrood licht aan het einde van de lichtperiode stimuleerde de stengelstrekking maar reduceerde de bloemontwikkeling (reversibel door roodlicht). Verandering van de lichtkwaliteit (minder blauw of "end-of-day" VR) leidde tot meer biomassa gealloceerd naar de stengel ten koste van de bladontwikkeling. Aangezien de groei voor de verschillende lichtkwaliteiten nagenoeg gelijk was wordt het tot ontwikkeling komen van bloemen niet bepaald door de totale hoeveelheid assimilaten in de spruit. (Maas & Bakx, 1995). Meer blauwlicht leidt tot donker gekleurde bladeren, maar reduceert de concentratie van oplosbare suikers (sucrose, glucose en fructose) en zetmeel wat nadelig kan zijn voor de houdbaarheid (Rajapakse & Kelly, 1995). Ook UV-A stimuleert de pigmentvorming (beschermingsmechanisme door absorptie van straling) zonder dat daarbij effecten op de groei werden waargenomen (Helsper et al, 2003). De toename van pigmenten in het blad kan relevant zijn voor de esthetische kwaliteit van de roos en leiden tot een hogere economische waarde (Hoffmann, 1999).

Het beschikbare licht wordt bij roos deels door de opgaande takken en deels door de ingebogen takken opgevangen. Het ingebogen bladpakket krijgt dus minder licht wanneer er veel opgaande takken op het gewas staan. Het is niet precies bekend of, en hoeveel het ingebogen bladpakket nog bijdraagt aan de groei van de opgaande takken vanaf het moment dat ze enkele decimeters groot zijn. Uit kleine experimenten zijn aanwijzingen gevonden dat de opgaande takken zelfvoorzienend zijn in hun assimilaten zodra ze voldoende bladoppervlakte hebben. Ook is het ingebogen bladpakket dan waarschijnlijk zelfs een *sink* t.o.v. de opgaande takken (Garcia & van Telgen, niet gepubliceerd).

Er moeten zoveel mogelijk assimilaten naar de opgaande takken gaan, en slechts voldoende assimilaten naar het ingebogen bladpakket om dit in stand te houden. Uitgaande van een gewas dat op snee staat is er direct na het oogsten van de snee een geringe behoefte aan assimilaten in de hele plant. Toch is dit het moment dat het ingebogen pakket het meeste licht kan opvangen. Waarschijnlijk reageert de plant door de fotosynthese te remmen in de loop van de dag (*sink*-limitatie). Wanneer de nieuwe scheuten zich gaan ontwikkelen zullen deze als *sink* werken, en het bladpakket als source. Bij verdere ontwikkeling zou het ingebogen bladpakket als source moeten kunnen blijven functioneren. Of dit gebeurt, en waarom het eventueel niet gebeurt, is niet duidelijk: mogelijk is er te weinig licht wanneer er veel opgaande takken op het gewas staan om celonderhoud op peil te houden en ook nog assimilaten te exporteren. Bij komkommer is gevonden dat tussenbelichting het lage blad langer fotosynthetisch actief houdt, dan wanneer er alleen lampen boven de planten hangen, en bovenste delen van de plant de lage bladeren beschaduwen.

Wanneer een gewas niet op snee geteeld wordt, zijn er per plant vaak wel voldoende *sinks* aanwezig waar het bladpakket assimilaten aan kan leveren, maar die op hun beurt ook weer het bladpakket beschaduwen. Uitwisseling van assimilaten tussen scheuten vindt, voor zover bekend,

niet plaats. Nieuwe scheuten lopen pas uit na het snijden of inbuigen van aanwezige scheuten omdat de apicale dominantie dan is weggenomen.

Wanneer een rozengekas goed groeit is de lichtbenutting hoog: de fotosynthese capaciteit is niet gauw beperkend. Wanneer een gewas op snee net is geoogst zal de lichtbenutting voor fotosynthese waarschijnlijk afnemen in de loop van de dag, omdat er niet voldoende *sinks* zijn. Wanneer er weer veel scheuten op staan, zal de lichtbenutting toenemen.

In de winter is er te weinig licht om een juiste temperatuur-licht verhouding aan te houden. Bij rozen is de minimumtemperatuur ca 16° C; daaronder gaan de rozen in rust. Zelfs bij een teelttemperatuur van 16° C is er in Nederlandse kassen te weinig natuurlijk licht voor een goede productie en kwaliteit. Er worden minder takken gevormd door de lage temperatuur, en de takken zijn dunner dan gewenst.

Voor de lichtintensiteit zijn geen bovengrenzen aan te geven wat betreft de fotosynthese: lichtverzadigingscurves van rozen tonen aan dat onder Nederlandse omstandigheden, wanneer CO₂, water en voeding niet limiterend zijn, de fotosynthese nog niet op maximale capaciteit loopt. Jiao et al. (1991) noemt een verzadiging van de bladfotosynthese bij een lichtintensiteit van 500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. De gewasfotosynthese is verzadigd bij 1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ in de zomer en bij 750 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ in de winter (CO₂, water en temperatuur niet-limiterend). Een hoge lichtintensiteit kan wel bleke bloemen veroorzaken bij gele en lichtrode cultivars.

De ondergrens is uiteraard afhankelijk van de tijdsduur van deze laag-licht periode, en de dan heersende temperatuur. Wanneer een combinatie van hoge temperatuur met lage lichtintensiteiten te lang duurt kan de bloemknop in de oogstbare takken aborteren en 'gaan de dunnere takken loos'. In Nederlandse winters is niet voldoende daglicht om de gewenste takdikte in stand te houden. De takken worden dunner en er ontstaat steeds meer loos. Ook het blad is lichter van kleur en zachter.

De minimum-lichtintensiteit (praktijkervaring) voor een teelt bij 18 – 20 °C is ca. 60 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ gedurende 18 uur per dag. Dit komt neer op een lichtsom van ca 3,8 $\text{mol m}^{-2} \text{dag}^{-1}$. Bredmose (1997) noemt hogere lichtsommen: de drempelwaarde voor een goede productie is 12 tot 13 $\text{mol m}^{-2} \text{dag}$ en een verhoging van de lichtsom tot 18 à 21 $\text{mol m}^{-2} \text{dag}$ zal het percentage loze takken met de helft verminderen. Voor een optimale productie zijn lichtsommen van hoger dan 30 $\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ nodig.

De lichtkleur kan effect hebben op het uiterlijk en dus de kwaliteit van de rozen. Rozen onder een kunststof PMMA kasdek krijgen zeer donker blad, en rode cultivars krijgen last van zwarte verkleuring van de bloembladeren in de zomer. Dit is het gevolg van een grotere hoeveelheid UV-straling die door dit kasdek wordt doorgelaten. Er is een zekere hoeveelheid blauwlicht nodig voor een normale lengtegroei van het gewas. In totaal zal ongeveer 3 tot 7 $\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ nodig zijn. Tussen de 400 en 700 nm is de lichtkleur niet zo van belang voor het uiterlijk van de rozen, in het rood/verrood-gebied echter wel: de uitloop van okselknoppen wordt gestimuleerd door een hoge verhouding rood/verrood. Verrood remt dus de uitloop. De strekking van de tak wordt beïnvloed door de hoeveelheid verrood licht in het spectrum.

Het lichtcompensatiepunt is bij de rozen laag, wat wil zeggen dat relatief veel van de assimilaten kunnen worden gebruikt voor groei. Het lichtcompensatiepunt is de lichtintensiteit waarbij een plant evenveel CO₂ opneemt voor de fotosynthese als CO₂ produceert met de ademhaling. Dit

punt is o.a. temperatuurgevoelig; bij een hogere temperatuur zal het lichtcompensatiepunt bij een hogere lichtintensiteit liggen.

De biomassa productie van rozen zegt niet alles over de economische opbrengst: rozen worden per stuk en per lengte verkocht, en niet per kilogram. Daarom is het belangrijk het aantal stuks en de taklengte als uitgangspunt te nemen voor de productie. Er is echter wel een minimumwaarde voor de verhouding tussen aantal takken en takgewicht: te dunne takken en te kleine knoppen worden slecht betaald. Rozen worden dunner en knoppen kleiner wanneer de temperatuur/lichtverhouding hoger wordt.

Rozen zijn daglengteneutraal. Stuurlicht voor bloei-inductie is niet nodig.

Het ingebogen bladpakket van roos van een gewas waar een snee op staat krijgt nu weinig licht. Onbekend is of meer licht voor het ingebogen bladpakket in de periode dat er halfwas tot oogstbare opgaande takken op staan zal leiden tot verhoging van de productie en de kwaliteit van de geoogste takken.

Hogere lichtintensiteiten (bij relatief lagere temperaturen) leiden tot betere kwantiteit/kwaliteit verhouding: de takken worden dikker en de knoppen worden groter.

Gerbera

Gerbera een facultatieve korte dag plant, ze bloeit jaarrond maar legt onder korte dag omstandigheden sneller en dus meer knoppen aan dan onder lange dag. Door onderlinge concurrentie kan een deel van de aangelegde knoppen echter weer afsterven. Abortie kan optreden vanaf een heel jong stadium tot bij al relatief grote bloemknoppen, zgn winterbloemen, die niet voldoende uitgroeien. Dat gebeurt met name bij lage lichtsommen per dag.

De knopgrootte en het takgewicht worden sterk bepaald door de beschikbare lichthoeveelheid tijdens de aanleg van de knop. Uit recent onderzoek (lopend onderzoek R. Baas) blijkt dat het bloemgewicht bepaald wordt door de lichtsom in de week dat de bloemknop wordt aangelegd, circa 6 tot 8 weken vóór de oogst.

Het gewas krijgt in het huidige teeltsysteem zo egaal mogelijk licht. De groeiwijze van het gewas maakt dat tot de meest logische keuze: alle bladeren ondersteunen in principe de zich ontwikkelende bloemen. Het feit dat bloemen zonder blad worden geoogst houdt in dat het fotosynthetisch actieve deel van de plant intact blijft, dus de lichtbehoefte gelijk.

Het gewas verdraagt hoge lichtintensiteiten. Er wordt meestal geschermd boven $650\text{--}700\text{ W m}^{-2}$ buitenstraling (globale straling) bij een volgroeid gewas. Voor een jong gewas wordt boven de W m^{-2} geschermd, en de mate van schermen wordt afgebouwd met groei van de plant. Aangezien (een deel van) de planten vervangen worden in de zomer, en de meeste nieuwe planten in de kas worden gezet in week 24 tot 28, wordt er veel geschermd boven een jong gewas.

In de winter is er door de lage lichtintensiteiten een lagere productie en een slechtere kwaliteit (dunnere stelen, kleinere bloemen).

Een hoge lichtintensiteit kan leiden tot verkleuring van donkere bloemen. Een lage lichtintensiteit leidt tot bleke bloemen en niet-volggroeide ‘winterbloemen’. De onder- en bovengrens voor de lichtsommen zijn moeilijk aan te geven. Duidelijk is dat Gerbera wel in de winter blijft doorproduceren bij een lage licht/temperatuur verhouding, hoewel met kleinere bloemen en minder takken.

Gerbera is een kwalitatieve korte-dag plant (enkele cultivars uitgezonderd), met een optimum bij ca 11 uur daglengte. Een langere dag leidt echter niet tot volledig stoppen van de bloei, hetgeen blijkt uit doorgaande productie in de zomer. Er wordt niet geschermd om de dag te verkorten in de zomer (er gaat een onderzoek naar daglengte-effecten plaatsvinden in de zomer 2004).

De ondergrens voor de daglengte is ca 8 uur, de bovengrens is niet bekend, maar is waarschijnlijk afhankelijk van de lichtintensiteit. In Fins onderzoek (Autio, 2000) is gevonden dat bij gelijke lichtsommen per dag, maar bij langere daglengtes dan 12 uur (18 uur en 24 uur) het aantal bloemen afnam. Het geproduceerd drooggewicht aan bloemen was sterk afhankelijk van de lichtsom, en minder van de daglengte, dus bij een hogere lichtsom, met een langere dag worden er minder bloemen geproduceerd, met een hoger drooggewicht.

In onderzoek van van Os (1988/1989) is gevonden dat de minimale daglengte oploopt tot 16 uur bij een lichtintensiteit van $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, en dat bij $28 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ een daglengte van 12 uur optimaal is. Een lichtsterkte van $18 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ is te laag om dagverlenging te kunnen geven. Een minimum streefwaarde voor bloei en ontwikkeling wordt gesteld op 6 tot $8 \text{ mol m}^{-2} \text{dag}^{-1}$.

Het aantal geproduceerde stuks bloemen is het belangrijkste criterium voor economisch rendement, met een minimumgewicht per bloemtak.

Hoewel de optimale daglengte voor Gerbera bij ca 11 uur ligt wordt er in de winter geen dagverlenging toegepast, wanneer er geen assimilatiebelichting is geïnstalleerd.

3.5.5.3 De gangbare teeltwijze

Roos

Substraat: voornamelijk steenwol, ingeluierte matten, met daarop steenwolklokje met bewortelde plant. Gewasvorm: ingebogen bladpakket dat deels zijdelings naast substraat hangt, deels boven het naastgelegen substraat rust. Dit bladpakket dient als assimilatiebron (-bron) voor de opgaande oogstbare takken.

Scherming: energiescherm in veel bedrijven, zeker bij rode cultivars, om donkere verkleuring van de knop te voorkomen, wanneer de knoptemperatuur ‘s-nachts te ver daalt.

Belichting: assimilatiebelichting met steeds hogere intensiteiten, tussen de $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en $120 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Gebruikte lamptype is SON-T. Belicht wordt gedurende 18 à 20 uur per etmaal; een donkerperiode ’s avonds van 20 tot 24 uur is verplicht middels verordeningen om lichtuitstoot te verminderen. Telers van m.n. rode cultivars hebben ontheffingen om in de winter bij bepaalde minimumtemperaturen de gehele nacht door te belichten om knopverkleuring te voorkomen.

Een langere belichtingsduur, tot 24 uur, zorgt voor een hogere productie, maar voor verminderde naaogstkwaliteit (te hoge verdamping tijdens het vaasleven). Een donkerperiode van 4 uur wordt als minimum beschouwd om de naaogstproblemen te voorkomen. Om lichtuitstoot te verminderen worden zijschermen toegepast aan de binnen of buitenzijde van de kas. Soms

worden aanwezige bovenschermen, zonwerings- of energieschermen, gesloten als de belichting is aanschakeld. Een specifieke daglengtebelichting wordt bij roos (daglengteneutraal) niet toegepast. Teeltsysteem: meestal vaste bedden, iets verhoogd om werkhoogte beter te maken.

De substraatstroken worden in de lengterichting van het bed worden gelegd, met daarop 2, 3 of 4 rijenplanten. Mobiele teeltsystemen zijn in opkomst, waarbij de planten niet steeds op dezelfde plaats in de kas staan. Daarmee wordt de ruimtebenutting in de kas hoger, en kunnen de werkzaamheden op een vaste plaats gebeuren.

Kasinrichting: Wit gronddoek op de grond. Verwarmingssystemen deels boven het gewas, in de meeste gevallen ook een minimumbuis onder het gewas om verdamping te stimuleren. CO₂-darm onder het gewas. Er wordt in perioden dat er geen behoefte is aan warmte toch vaak 'gestookt', nl om CO₂ te produceren. CO₂ wordt toegepast tot een bepaalde raamkier tot een niveau van 800-1000 ppm. Bij grotere raamopening wordt het doseerniveau teruggebracht tot het buitenniveau van ca. 400 ppm zolang men de warmte in het verwarmingssysteem of in de buffer kwijt kan. Lampen meestal aan tralie, soms onder de goot.

Gerbera

De teelt vindt plaats op verschillende substraten: steenwol wordt het meest gebruikt (inclusief zogenaamde grow cubes en steenwolblok in pot). Vollegrondsteelt onder glas komt ook nog voor. Scherming: energiescherm in veel bedrijven. Scherming tegen hoge lichtintensiteiten wordt in de zomer toegepast, met doek dat 20% van het licht tegenhoudt, of d.m.v. krijten van het kasdek. Belichting: op 119 ha van de in totaal 242 ha (gegevens 2002) wordt assimilatiebelichting toegepast, met intensiteiten die liggen tussen de 36 en 96 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, waarbij 70% belicht met intensiteiten lager dan 60 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Een klein gedeelte hiervan is mobiele belichting.

Daglengtes van 10,5 tot 11 uur worden aangehouden. Een langere daglengte met deze intensiteiten leidt tot verlaging van de productie omdat Gerbera een facultatieve korte-dagplant is, d.w.z. de planten produceren de meeste bloemen bij een daglengte van ca 11 uur, maar houden niet volledig op met bloeien bij langere daglengtes (zie hoofdstuk stuurlicht).

Mogelijkheden voor optimalisatie:

- Streef naar de optimale verhouding lichtintensiteit/temperatuur
- Streef naar een betere CO₂-voorziening door de het ventileren te verminderen, denk aan dakkoeling, gesloten kas, wegschermen van NIR-straling
- Vermijden UV-B in verband met donkerverkleuring van rode rozen

Witte vlekken:

- Bij Gerbera zou de hoeveelheid geoogst product per mol licht verbeteren door een gunstige verdeling van de biomassa over vegetatieve delen (blad) en generatieve delen (bloemen). Kennis over de beïnvloeding hiervan via lichtkleur en/of daglengte/lichtsom is nodig
- Wat is het optimum tussen lichtsom en daglengte bij gerbera
- Kijk of nabelichten met verrood of wegschermen van blauw de taklengte in de zomer kan stimuleren

3.5.6 Potplanten

3.5.6.1 Algemeen

Potplanten kunnen op verschillende wijzen worden ingedeeld. Voor de doelstelling van dit rapport is een hoofdingeling naar lichtbehoefte de belangrijkste. Er zijn potplanten die oorspronkelijk afkomstig zijn uit de ondergroei van bossen en dus zijn aangepast aan lage lichtintensiteiten, en er zijn potplanten die oorspronkelijk onder hoge lichtintensiteiten groeiden. De range van door de potplanten benutbare lichtintensiteiten loopt daardoor van zeer hoog (30 mol m⁻² d⁻¹ of meer) tot laag (5 tot 10 mol m⁻² d⁻¹).

Vervolgens kunnen potplanten worden ingedeeld naar bloeiend en 'niet-bloeiend' (Tabel 7). Deze indeling is gemaakt naar het al dan niet bloeiend afgezet worden naar de consument want vrijwel alle planten kunnen tot bloei komen. Bloeiستuring bij bladplanten is daarom alleen van belang als die bewust 'uit de bloei' moeten worden gehouden om als bladplant te kunnen worden verkocht.

Voor uitgebreide beschrijvingen van lichtrecepten van potplanten wordt verwezen naar de Hortilux Lichtbrochure (Spaargaren, 2000). In het vervolg van dit hoofdstuk worden relevante zaken uit deze brochure genoemd.

Tabel 7 Voorbeelden van bloeiende en niet-bloeiende potplanten, ingedeeld naar lichtbehoefte en bloeirespons DN = dagneutraal, KDP = korte-dag plant, LDP = lange-dag plant

Lichtbehoefte	Bloeiend/niet-bloeiend	Voorbeeld-gewas	Daglengterepons voor bloei
Laag	Niet-bloeiend	Croton Dieffenbachia Hedera Nephrolepis	n.v.t. n.v.t. n.v.t. n.v.t.
	Bloeiend	Phalaenopsis Saintpaulia Spathiphyllum	DN DN DN
Hoog	Niet-bloeiend	Ficus Schefflera Yucca Codiaeum	n.v.t. n.v.t. n.v.t. n.v.t.
	Bloeiend	Cyclamen Fuchsia Kalanchoë Pothchrysant Poinsettia	DN LDP KDP KDP KDP

3.5.6.2 De Plant

Ficus

De ficus is een familie van bladplanten met vele soorten en komt wereldwijd voor in de tropen. Ficussen vormen een verzameling van lichtbehoefte planten met houtige, meestal vertakte stelen en groen blad. Er wordt een groot aantal cultivars geteeld, variërend in bladgrootte en vertakking. De bontbladige ficussen bestaan uit chimereën waarbij de buitenste bladlaag geen chlorofyl bevat en dus wit is. De grootbladige typen vertakken niet, okselknoppen lopen alleen uit na toppen van de plant. Kleinbladige typen vertakken gemakkelijk.

In de teelt wordt de hoofdstengel aangebonden aan een stok. De plant wordt, na oppotten met één of meerdere stekken per pot, een aantal keer wijder gezet en afgeleverd als de hoofdscheut ca. 10cm langer is dan de stok. De gewenste mate van vertakking wordt verkregen door de plantafstand die wordt aangehouden.

Croton

Croton is een bladplant en komt van oorsprong uit Indonesië, Polynesië en Maleisië. De croton is een schaduwplant met houtige, niet of weinig vertakte stengels en egaal- of bont-gekleurd blad. Croton omvat een groot aantal cultivars met enkelvoudige of samengesteld blad met een cultivar specifieke egale of bonte bladtekening in rode of gele tinten. Onder omstandigheden van weinig licht is het moeilijk om de gewenste kleurtekening te krijgen. Het achteraf beïnvloeden van de kleurtekening in het blad is nauwelijks mogelijk.

Kalanchoë

Het genus Kalanchoë bevat vele soorten bloeiende soorten, verspreid over de hele wereld voorkomend in gebieden met veel licht en droge omstandigheden. De thans meest geteelde soorten zijn afkomstig uit Madagaskar.

De commercieel geteelde Kalanchoë is een korte-dag plant die in de lange dag (>13 uur) een vegetatieve scheut met bladparen vormt. Na toppen lopen de okselknoppen uit en vormt zich een bossige plant. Onder korte-dag omstandigheden, < 10 uur daglengte, gaat de plant bloeien, waarbij zowel het top- als de zijmeristemen bloemtrossen aanleggen. De bloeirijkdom is afhankelijk van de lichtsom in de generatieve fase.

In de teelt wordt gestreefd naar een plantgrootte die is afgestemd op de potmaat waarin wordt geteeld en een rijke bloei van de plant. De plantgrootte wordt bepaald door het aantal stekken per pot, de lengte van de vegetatieve fase en het al dan niet toppen in de vegetatieve fase. De duur van de generatieve fase, en daarmee de lichtsom in deze fase, wordt enigszins door de temperatuur bepaald.

Spathiphyllum

Spathiphyllum omvat zowel bladplanten als bloeiende potplanten, afkomstig uit de vochtige tropische bosbodem van Zuid-Amerika. De planten hebben een gedrongen steel en maken scheuten die in de bladoksels bloemknoppen aanleggen.

Bij een bepaalde plantgrootte worden commercieel geteelde bloeiende planten behandeld met het plantenhormoon gibberelline om de bloei te induceren. De bloemen ontstaan aan het basale deel van de scheut. Bij een voldoende plantgrootte komen de planten vanzelf in bloei, dit is cultivaraafhankelijk. In de teelt wordt gestreefd naar een aantal scheuten per plant dat is afgestemd op de potmaat waarin wordt geteeld.

Fuchsia

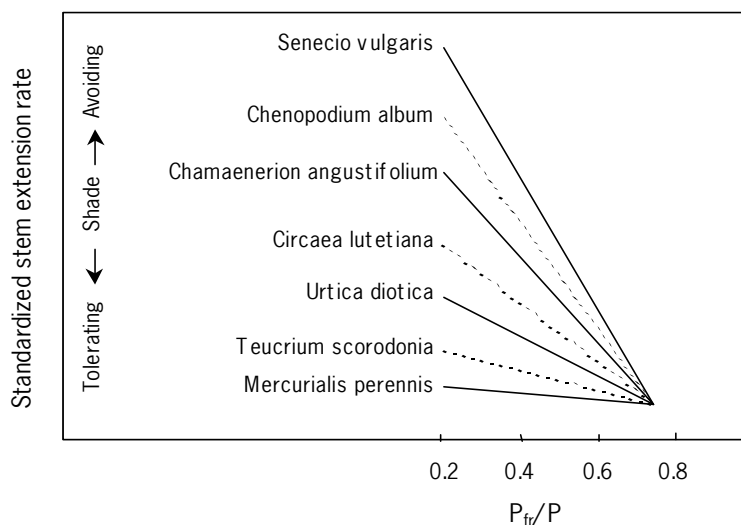
Fuchsia is een veelzijdige familie van bloeiende planten. De meeste oorspronkelijke *Fuchsia* soorten komen uit de bergwouden van Midden- en Zuid Amerika, enkele soorten uit Nieuw Zeeland en Tahiti. Ze groeien daar meestal bij matige tot hoge lichtomstandigheden. Vele kruisingen zijn gemaakt voor de huidige commerciële hybriden, zodat een verband tussen lichtbehoefte en de oorspronkelijke groeiplaats moeilijk te leggen is. Een aantal *Fuchsia*'s zijn LDP, andere hybriden zijn dagneutraal of facultatieve LDP. Bij de meeste commerciële *Fuchsia* x hybride cultivars blijft het topmeristeem vegetatief en worden bloemen en zijscheuten in de bladoksels gevormd.

3.5.6.3 Lichtbehoefte

Schaduwplanten

Veel potplanten komen oorspronkelijk uit het (sub-)tropisch regenwoud en zijn evolutionair aangepast aan schaduwrijke standplaatsen. Door de selectieve transmissie van blad heeft het licht op deze standplaatsen een lage tot zeer lage rood/verrood verhouding. Deze schaduwplanten reageren daarop met een relatief geringe stengelstrekking. Het verschil in respons op de rood/verrood verhouding tussen planten is voor een zevental verschillende typen plantensoorten weergegeven in Figuur 20.

Licht minnende plantensoorten zoals *Senecio vulgaris*, *Ficus benjamini* en *Chenopodium album* concurreren om het beschikbare licht door bij lage Rood/verrood ratio's veel assimilaten te gebruiken voor lengtegroei (stengelstrekking). Daarentegen reageren soorten als *Mercurialis perennis* en *Teucrium scorodonia*, die aangepast zijn aan het groeien in de schaduw van bomen waar altijd lage rood/verrood ratio's heersen, met veel minder stengelstrekking (Smith, 1982).



Figuur 20 Genormaliseerde verhouding tussen fytochroom foto-equilibrium (P_{fr}/P) en strekkingsgroei voor verschillende plantensoorten. Alle geteste soorten vertonen een lineair verband tussen de P_{fr}/P verhouding en strekkingsgroei maar de hellingshoek is veel groter voor licht minnende planten dan voor schaduwplanten (Uit: Smith, 1982).

Bij schaduwplanten is er eerder sprake van situaties met teveel licht, dan van lichtgebrek. Zo is de fotosynthese activiteit van *Spathiphyllum* hoger bij lagere lichtintensiteiten en worden meer, grotere en donkergroene bladeren gevormd (meer chlorofyl aanmaak) dan bij planten in het volle licht (beïnvloeding mate van bonte bladeren). De groeisnelheid en esthetische kwaliteit zijn hoger onder schaduwrijke condities (Fan-Yanping et al., 1998). Sommige cultivars komen bij lage lichtintensiteiten ook in een vroeg stadium in bloei, dit is cultivarspecifiek (Heemers & Oyaert, 2001; Heemers et al, 2000). Evenals bij de bloeiende potplanten is naar verhouding meer roodlicht in de spectrale verdeling van belang voor een meer gedrongen plantvorm. In de Nederlandse kasomstandigheden in de winter zijn de lichtomstandigheden toch nog vaak dusdanig laag dat ook bij schaduwplanten extra groei wordt waargenomen wanneer additioneel kunstlicht wordt gebruikt. Hieruit blijkt dat lichtere kassen in de winter ook voor schaduwplanten van nut kunnen zijn.

Bloeiïnductie van de meeste bloeiende schaduwplanten is temperatuurgestuurd. Daarbij is vaak wel een minimale lichthoeveelheid per dag nodig voor een goede bloemontwikkeling. Voor *Saintpaulia* is een minimale lichtsom van $2 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ nodig (Faust en Heins, 1994). Daaronder vindt geen bloemaanleg en –ontwikkeling plaats. Voor een goede groei en bloei worden minimum-lichtsommen van 4 tot $8 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ genoemd. Boven een lichtintensiteit van $250 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ neemt de kans op beschadiging van de bladeren toe. Planten die geteeld zijn onder lage lichtintensiteit worden al bij $200 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ geschermd (bijvoorbeeld in februari). De lichtreacties zijn zeer rasafhankelijk.

Voor *Phalaenopsis* wordt beschreven dat in de rustperiode de lichtbehoefte hoog is, maar in de groeiperiode wordt zwaar geschermd. Bloeiïnductie is een combinatie van lage temperatuur ($17 - 19 \text{ } ^\circ\text{C}$) en licht (tot $300 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

Spathiphyllum planten kunnen zich in de huiskamer bij lichtniveaus van 20 tot 30 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ handhaven. Echter tijdens de teelt is schermen tot lichtniveaus van 300 tot 500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ niet gebruikelijk. Teveel licht leidt wel tot verandering van bladkleur en bladstand.

Lichtminnende planten

De lichtbehoefte van niet-bloeiende lichtminnende planten zoals Ficus en Yucca is hoog: in de kas kan Ficus benjamina wel 750 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ verdragen, hetgeen alleen in juni en juli in Nederlandse kassen voorkomt. Veelal wordt een buitenwaarde van 600 W m^{-2} aangehouden om te gaan schermen. Bij bonte soorten wordt bij lagere waarden geschermd, om bladverbranding te voorkomen. Yucca kan in de kas lichtniveaus van 500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ verdragen.

Over de beïnvloeding van de groei door verandering van de lichtkwaliteit bij niet-bloeiende lichtminnende potplanten is niet veel bekend. Roodlicht bij de teelt van Yucca (door bijbelichting met hogedruk natriumlampen) bevordert de uitloop van okselknoppen, hetgeen kan leiden tot een gevuldere plant.

De bloei-inductie van bloeiende potplanten die hoge lichtniveaus verlangen wordt veelal gereguleerd met de daglengte.

Onderzoek naar bloei-inductie door daglengte heeft geleid tot de ontdekking van het fytochroom en de functie die dit pigment heeft bij het waarnemen van dag- en nachtlengte door de plant. Korte-dag planten (KDP) bloeien wanneer de lichtperiode korter is dan de kritische daglengte, voorbeelden hiervan zijn Kalanchoë, Primula, Bouganvillea en Begonia. Lange-dag planten (LDP) bloeien als de lichtperiode langer is dan de kritische daglengte zoals bijvoorbeeld jasmijn. Een groot aantal plantensoorten zijn dag-lengte neutraal (DNP), d.w.z. dat de bloei niet wordt beïnvloed door de daglengte zoals bijvoorbeeld Phalaenopsis, Saintpaulia en Spathiphyllum.

Experimenten met nachtonderbrekingen hebben aangetoond dat niet de licht- maar de donkerperiode bepalend is voor het al of niet gaan bloeien. Sommige gewassen zijn in staat onderscheid te maken tussen de nachtlengte in voor- of najaar door “waarneming” van zowel de nachtlengte als de temperatuur. Hierdoor wordt bijvoorbeeld voorkomen dat voorjaarsbloeiers niet in het najaar bloeien en omgekeerd. In Figuur 21 wordt de fotoperiodieke respons van KDP en LDP weergegeven. Er bestaan uitzonderingen op de bovenstaand beschreven indeling. Zo heeft één variëteit van suikerriet een zeer specifieke daglengte van 12-14 uur nodig om te gaan bloeien.

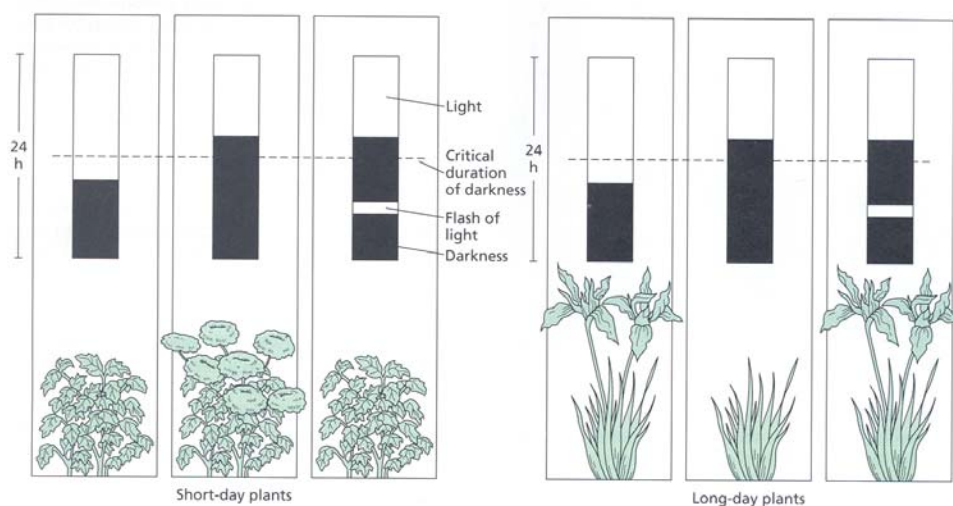
In de generatieve fase is licht bepalend, zowel voor het aantal tot bloei komende scheuten per plant, als voor het aantal bloemen per scheut (Kalanchoë). Voor Kalanchoë is niet bekend of er een absolute bovengrens is voor de lichtintensiteit die verdragen wordt. De lichtbehoefte voor Kalanchoë wordt ook wel ‘gemiddeld’ genoemd, met een optimum van ca 25 $\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ bij een daglengte van 11,5 uur.

Voor potchrysant (ook een KDP) is bekend dat bij een hoge lichtsom in de lange-dag fase de nacht soms toch nog te lang is om bloei-inductie tegen te houden. De kwaliteit van het aanbod is bij bloeiende potplanten sterk afhankelijk van de beschikbare lichthoeveelheid. De teeltduur is deels afhankelijk van de beschikbare lichthoeveelheid maar de bloeirijkdom is daar zelfs geheel van afhankelijk.

Toepassing van kunstlicht voor de bloei-inductie van LD-planten tijdens perioden met korte dagen door middel van dagverlenging of nachtonderbreking is minder goed mogelijk en vereist

ook een hogere lichtintensiteit. Dit duidt op een grote behoefte aan assimilaten voor de bloei die in de korte dagen geproduceerd kunnen worden. In tegenstelling tot het actiespectrum voor nachtonderbreking bij KD-planten vertoont dat voor nachtonderbreking en dagverlenging van LD-planten een optimum voor licht met een golflengte rond de 710 nm (Deitzer, 1984).

Verandering in de lichtkwaliteit biedt mogelijkheden om de plantvorm en kwaliteit te beïnvloeden. Lichtkwaliteit kan een groot effect hebben op de kleur van bladeren, stengels en bloemen van planten door het aanmaak van verschillende pigmenten.



Figuur 21 Daglengte in relatie tot bloei. Korte-dag (ofwel lange-nacht) planten gaan bloeien als de donkerperiode een kritische waarde overschrijdt. Bij een korte onderbreking van de donkerperiode komt de plant niet in bloei. Lange-dag (ofwel korte nacht) planten gaan bloeien als de donkerperiode korter is dan de kritische waarde. Bij sommige soorten kan de bloei gestimuleerd worden door een korte lichtonderbreking van de donkerperiode.

Anthocyaansynthese in de kroonblaadjes van petunia bloemen bijvoorbeeld, is afhankelijk van licht, waarbij blauwlicht effectiever is dan groen of roodlicht. Verrood alleen heeft geen effect (Weiss & Halevy, 1991). De toename van pigmenten in het blad kan relevant zijn voor de esthetische kwaliteit van de plant en leiden tot een hogere economische waarde (Hoffmann, 1999). Pigmenten kunnen negatieve effecten van b.v. verhoogde UV-A straling in roos en fuchsia voorkomen door die te absorberen (Helsper et al., 2003).

De morfologie van de plant wordt ook gestuurd door de lichtkwaliteit. Voor roos als potplant is een compacte plantvorm gewenst. De ontwikkeling van compacte planten kan gestuurd worden door het uitfilteren van een deel van het verrode licht (McMahon & Kelly, 1990). De planten werden compacter en kregen een hoger chlorofyl gehalte in de bladeren, zonder het aantal bloemknoppen per plant te beïnvloeden.

Twee voorbeelden van het effect van lichtkwaliteit en daglengte op LD-planten zijn fuchsia en petunia waaraan veel onderzoek is uitgevoerd. Bij Fuchsia wordt de bloei geïnduceerd door een aantal (ca. 4) korte nachten (< 12 uur). Wanneer de natuurlijke donkerperiode te lang is moet de

nacht worden onderbroken met kunstlicht. Bloeivervroeging kan verkregen worden door vanaf begin oktober de nacht gedurende twee uur te onderbreken met een intensiteit van 150 lux (lichtbron waarschijnlijk SL- of gloeilamp). Gebruik van assimilatiebelichting in de winterperiode overdag gaf bloeivervroeging. De temperatuur mag daarbij niet oplopen boven de 22 graden. Chemische middelen en DIF worden gebruikt voor groeiremming. Een kouval in de ochtend bleek niet altijd te werken. Strecking van de internodiën is verrood licht- afhankelijk: verrood bevordert de strekking.

Een gebrek aan blauwlicht (oranje filter) bleek bij fuchsia (minimaal 12 uur licht nodig voor bloei), tot strekking van de internodiën en langere stengels maar had geen effect op de totale biomassaproductie, de bladoppervlak en de hoeveelheid chlorofyl (Maas & van Hattum, 1998). Sommige LD-planten zoals petunia bloeien nog eerder als de daglengte (fotoperiode) niet alleen een kritische lengte overschrijdt, maar toeneemt (Piringer & Cathey, 1960). Petunia heeft een kritische daglengte van 10-13 uur en reageert op deze fotoperiode vanaf het zesde blad stadium. De bloei wordt mede beïnvloed (positief) door toenemende temperatuur en lichtintensiteit. Een behandeling van 4 uur verrood licht bleek de bloei ook te bevorderen.

Opkweek zonder verrood licht leverde kleinere (minder hoge) planten met meer vertakkingen ongeacht de lengte van de lichtperiode. Het ontbreken van verrood licht bevordert de bloei onder een lange natuurlijke lichtperiode maar niet bij een korte kunstmatige periode. Onderbreking van de donkerperiode met roodlicht remde de bloei bij een natuurlijke korte daglengte ongeacht de aanwezigheid van verrood, de lengte van de internodiën werd niet beïnvloed. De mogelijkheid van donkeronderbreking met roodlicht, waarbij lichtintensiteiten van 0,025-0,15 W m⁻² voldoende zijn (Cockshull, 1984), met iets verrood om de bloei van korte dag planten af te remmen is van belang voor de timing van de productie cyclus als er gebruik wordt gemaakt van spectrale filters voor het beïnvloeden van de groei (meer gedrongen planten met meer vertakkingen). Planten kunnen worden ingedeeld in hun reductie in stengelstrekking als gevolg van minder verrood (Tabel 8) Als spectrale filter worden gebruikt die verrood licht uitsluiten wordt bij sommige planten de bloei vertraagd. (BPI, 2004).

Tabel 8 Stengelstrekking en bloeivertraging onder verrood absorberende filters (BPI, 2004)

Plant	Reductie in planthoogte	Bloeivertraging
Eustoma	45%	?
Chrysanthemum	45%	?
Petunia	21%	18 dagen
Viola	21%	5 dagen
Begonia	21%	?
Salvia	14%	?
Nicotiana	14%	?
Poinsettia	14%	?
Anjer	13%	?
Alyssum	13%	?
Antirrhinum	13%	9 dagen

De relatie tussen licht en temperatuur is bij potplanten ook van belang voor de plantvorm. Gevuldheid wordt verkregen door een ruime plantafstand. Een andere invloedsfactor is een relatief hoog gehalte aan assimilaten in de plant wat de uitloop van zijstelen stimuleert. De gewenste kwaliteit wordt mede verkregen door de gemiddelde temperatuur af te stemmen op de beschikbare lichthoeveelheid. In de winter lukt dit in een aantal gevallen niet meer omdat de van oorsprong tropische plant de lage temperaturen, passend bij de lage lichthoeveelheden, niet verdraagt.

Telen van een product met de juiste bladstand, -kleur of bontheid is vaak belangrijker dan een hoog plantgewicht.

3.5.6.4 De gangbare teeltwijze

Potplanten worden op de grond of op tabletten geteeld. De keuze wordt bepaald door de arbeidsbehoefte van het gewas. Als regel worden de kleine potmaten op tabletten geteeld en de grotere op de grond. Bij een aantal teelten, zoals Kalanchoë en potchrysant wordt soms de laatste teeltfase op de grond geteeld. In de tabletteelt wordt vanwege de ruimte en lichtbenutting overgestapt op roltabletten. Vanwege de mogelijkheden tot mechanisatie stapt men in de tabletteelt steeds meer over naar transporttabletten en in de grondteelt naar betonvloeren. De verwarming wordt in de potplantenteelt waar mogelijk geïntegreerd in de tabletbodem of in de betonvloer. Bij warmtedoorlaatbare bodems wordt ook een buizensysteem onder de tabletten toegepast. De warmtebehoefte binnen deze groep is divers. Belangrijk is dat een deel van de (sub-)tropische gewassen beneden een bepaalde minimum temperatuur schade zal gaan vertonen. De temperatuur/licht verhouding kan dan zodanig komen te liggen dat in Nederlandse kassen zonder bijbelichting geen goede planten te telen zijn.

Een deel van de potplanten zijn schaduwplanten. Deze moeten op zonnige dagen in de zomer geschermd worden. De bladgrootte, bladstand, -kleur en bontheid wordt bepaald door de lichtintensiteit. Het gebruikte schermdoek bestaat uit aluminium bandjes of witte vezels. Gekleurd scherm wordt (nog) niet toegepast.

Een belangrijk deel van de bloeiende potplanten bestaat uit daglengtegevoelige gewassen. In Nederland varieert de daglengte aanzienlijk gedurende het jaar. Op de bedrijven is verduisteringsscherm en een belichtingsinstallatie aanwezig om de bloei-inductie te regelen. Voor KDP is het nodig in de zomer het licht weg te schermen. Voor LDP is het nodig in de winter bij te belichten tot de gewenste lengte van de lichtperiode.

Wanneer de natuurlijke donkerperiode zo lang is dat bij KDP bloei-inductie gaat optreden kan 'nachtonderbreking' worden toegepast om het gewas vegetatief te houden: gedurende enkele uren in de nacht wordt belicht. Nachtonderbreking kan volstaan met relatief lage lichtintensiteiten. Op veel potplantenbedrijven wordt zonwering toegepast, veelal met een beweegbare scherminstallatie. Dit is vooral van belang in de 1^e teeltfase na het oppotten en bij korte teelten. 's Zomers kan dit worden aangevuld met een krijtlaag op het glas.

In de teelt van bloeiende potplanten komt assimilatiebelichting steeds meer voor. Zonder belichting is het moeilijk om ook in de winter een bloeiende plant van voldoende kwaliteit te

produceren. CO₂-dosering is nog geen regel. Ook bij niet-bloeiende potplanten is er een minimale lichtbehoefte. Bij zeer lage lichtintensiteit vermindert de kleur en de bonthheid van het blad, het blad wordt groener. Bonthheid en bladkleur van de gehele plant zijn in enkele gevallen achteraf nog te verbeteren als de lichtintensiteit weer toeneemt. Meestal ligt de bonthheid en kleur van het blad na aanleg en uitgroei echter geheel vast.

Bloeiïnductie van daglengteneutrale planten wordt meestal door de temperatuur gestuurd.

De water- en voedselvoorziening vindt vaak plaats via een eb-vloed systeem of via druppelaars op de pot. Ook worden nog met folie afgedekte bevoeiingsmatten gebruikt, waarbij de afdekking een goede verspreiding van het water, overmatige verdamping en algengroei moet voorkomen.

Potplanten worden na het oppotten tegen elkaar aan gezet en gedurende de teelt naar behoefte wijder gezet. Voor een optimaal klimaat en een optimale lichtbenutting dienen de planten elkaar te raken. Specifiek voor potplanten is dat de LAI na oppotten en wijderzetten van het gewas relatief laag is. Het verhogen van de LAI, dus de lichtonderschepping, is dan belangrijker dan de lichthoeveelheid. Met name bij hoge lichtintensiteiten kan het kasklimaat suboptimaal worden (hoge temperatuur, lage RV) en leiden tot een verminderde lichtbenutting (fotosynthese stopt, huidmondjes sluiten, blad verkleurt).

Bij potplanten wordt de eindgrootte van de planten via de gekozen potmaat en de aangehouden plantafstanden geregeld.

Bij bloeiende potplanten is de plantgrootte en het plantgewicht wel belangrijk, maar vormt de vorm en bloeirijkdom het belangrijkste kwaliteitscriterium. Deze worden bepaald door het aantal bloeiende scheuten en het aantal bloemen per scheut. De bladstand, en bij grote planten als *Spathiphyllum* ook het aantal scheuten, wordt bepaald door de plantafstand en de lichtinval tussen de planten. Hierbij kan reflectie vanaf de ondergrond zowel positief als heel negatief werken, afhankelijk van de geteelde soort.

Bij groene en bonte potplanten is naast de plantgrootte en het plantgewicht vooral de vorm en gevuldheid alsook de bladstand en de bladkleur belangrijk. De vorm en gevuldheid wordt sterk bepaald door de plantafstand tijdens de teelt, de lichtinval tussen de planten. Hierbij kan reflectie vanaf de ondergrond zowel positief (extra licht geeft extra groei) als heel negatief werken (ongewenste reactie van bladgrootte ontwikkeling en bladstand), afhankelijk van de geteelde soort.

De planten moeten voor de bloei een, van de potmaat afhankelijke, hoeveelheid blad aanmaken om goed in bloei getrokken te kunnen worden. Bij kleinere planten als *Kalanchoë* is de vegetatieve fase vrij kort en moet er eerder groot dan veel blad worden gevormd, ook moeten er een aantal zijscheuten worden gevormd onderin de plant. Hierbij is de beschikbare lichthoeveelheid in verhouding tot de temperatuur belangrijk. Als de vegetatieve fase langer is, zoals bij *Spathiphyllum*, is alleen in het begin de aanmaak van groot blad belangrijk. Bij zijscheut vorming of vertakking in de vegetatieve fase, relevant bij *Spathiphyllum*, is licht van grote invloed, met name de beschikbare lichtsom in combinatie met de temperatuur; optimale temperatuur is 23 tot 24 °C bij *Spathiphyllum*. De bijbehorende minimale lichtsom waarbij een kwalitatief goed product wordt gevormd, is niet gekwantificeerd.

Bij potplanten wordt de eindgrootte van de planten via de gekozen potmaat en de aangehouden plantafstanden geregeld.

Om strekking tegen te gaan worden gewassen als Kalanchoë met chemische middelen geremd. In hoeverre dit ook met licht gerealiseerd kan worden is niet bekend. Wel wordt met een hogere nachttemperatuur t.o.v. de dagtemperatuur (negatieve DIF) de lengtegroei geremd.

Mogelijkheden voor optimalisatie:
--

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none">- lichte kassen en lichtafhankelijk schermen geeft bij schaduwplanten de mogelijkheid om in donkere uren meer licht bij de planten te krijgen dan bij vaste zonwering, zoals een krijtdek- fase-afhankelijk (LAI-afhankelijk) aanpassen van gewenst lichtniveau d.m.v. schermstrategie, een volgroeid gewas (LAI 2-4) kan een hogere lichtintensiteit benutten dan een jong gewas met een LAI<1.- tijdens het schermen alleen de zonbeschenen kant van de kap schermen, zodat alleen het directe zonlicht wordt weggeschermd, maar niet het diffuse licht- meer diffuus maken van het licht op gewasniveau biedt de mogelijkheid om pas bij een hoger lichtniveau te schermen- meer diffuus maken van het licht geeft een lagere rood/verrood verhouding onderin het gewas en daardoor een betere vertakking bij hoog opgaande potplanten- kwantiteit/kwaliteit verhouding verbeteren door licht-temperatuur verhouding in de gaten te houden bij tropische gewassen, grenzen zoeken- planten compacter houden door bij niet-bloeiende potplanten verrood licht weg te schermen en/of EOD roodlicht bij te belichten, hierbij opletten op bloeivertraging- planten compacter houden door meer blauwlicht, dit zorgt voor een betere vertakking van planten- bij sommige potplanten betere bloemenkleur door UV in de kas, rol van UV zou per gewas nader moeten worden onderzocht |
|--|

Witte vlekken:

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none">- Waar ligt het optimale lichtniveau om te gaan schermen, maximale fotosynthese? Hoeveel lager is dit, per gewas, dan het niveau waarop gewasschade ontstaat? In welke mate varieert dit met de LAI van het gewas?- In hoeverre wordt de netto gewasfotosynthese beïnvloed door de daglengte? Er zitten veel tropische gewassen tussen die gewend zijn aan een daglengte van 12 uur.- Bij welke gewassen kan de kritische daglengte worden beïnvloed door de lichtkleur of door de lichtkleur EOD? |
|--|

4 Materiaaleigenschappen kasomhullingsmaterialen en schermen

In de volgende stukken wordt de term “kasomhullingsmateriaal” gebruikt voor de omhulling van de kas, het kasdek en de gevels.

4.1 Welke materialen zijn er?

4.1.1 Glas

Glas is tot op heden in Nederland en Noord-West Europa veruit het meest gebruikte kasomhullingsmateriaal en de verwachting is dat dit voorlopig nog zo zal blijven (Bakker et al., 1998). In Tabel 9 zijn een aantal eigenschappen van een aantal glassoorten samengevat.

Blank glas

In de tuinbouw wordt meestal blank floatglas gebruikt met een dikte van 4 mm. Glas combineert een aantal gunstige materiaaleigenschappen, waarvan de belangrijkste zijn: een goede (chemische) stabiliteit en weersbestendigheid, een goede en stabiele lichtdoorlatendheid, de dampdichtheid, goede bevochtigingseigenschappen (waardoor condenswater goed afvloeit), de nauwelijks aanwezige doorlatendheid voor warmtestraling (verinfrarode straling), hard oppervlak (waardoor goed te reinigen) en de relatief lage prijs. Als nadelen zijn te noemen: de vrij hoge reflectieverliezen, de geringe isolatiewaarde (in enkelwandige uitvoering), de breekbaarheid (brosheid, waardoor glas gevoelig is voor onder andere hagelschade) en de geringe treksterkte.

Gehard glas

Om de breekbaarheid van glas deels te ondervangen wordt ook gehard glas in de tuinbouw toegepast. Door het harden van het glas wordt de sterkte aanzienlijk verhoogd. Als het glas toch breekt, valt het uitéén in kleine brokjes, waardoor het gevaar van vallende (grote) scherven niet meer voorkomt (vergelijkbaar met een autoruit). Dit is van belang voor de veiligheid van de bouwers van kassen. Ook ontstaat er (naar verwachting) minder schade aan het gewas en het interieur van de kas. Gehard glas kan in grotere ruitafmetingen toegepast worden, echter zijn de kosten van dit glas ca. tweemaal zo hoog als standaard glas met een nominale dikte van 4 mm.

Wit glas

In de laatste jaren is er ook wit glas voor de tuinbouw op de markt. Door een andere grondstofsamenstelling te kiezen voor het glas kan de lichtdoorlatendheid verhoogd worden. Door siliciumarm zand bij de productie te gebruiken wordt het glas wit in plaats van lichtgroen (net als bij pantserglas). Wit glas heeft een hogere lichtdoorlatendheid en is doorlatend voor UV straling (300-315 nm) (Figuur 29) en wordt door de fa. Vegla uit Aken (D) op de markt gebracht onder de naam ‘Planilux-Diamant’ (Heinrichs, 1998).

Tabel 9 Samenvatting van de materiaaleigenschappen van glas

Materiaal	PAR-transmissie direct	PAR-transmissie diffuus	Emissie coëfficiënt	K-waarde	Treksterkte	Levensduur	Prijs
	[%]	[%]	[%]	[W m ⁻² K ⁻¹]	[N mm ⁻¹]	[jaar]	[Euro m ⁻²]
Blank glas	89-91	82	86	5,8	40	25	5
Hortiplus	84	69	21	5,8	40	25	10
Gehard glas	89-91	82	86	5,8	-	25	10
Wit glas	90-92	84	86	5,8	40	25	10
Dubbelglas (luchtgevuld)	81-82		86	2,7	40	25	20

Dubbelglas

In het verleden (jaren tachtig met oliecrisis) is op beperkte schaal isolerend dubbelglas toegepast als omhullingsmateriaal voor kassen. Naast nadelen, zoals hoge kosten en een hoog eigen gewicht was hierbij het belangrijkste nadeel: het grote lichtverlies van ca. 10% vergeleken met enkelglas met een dikte van 4 mm (Landbouwschap, 1984). Uiteraard was het energieverbruik bij deze toepassing destijds maatgevend. Er zijn in principe drie soorten dubbelglas gebruikt voor kassen, namelijk met gekitte rand, met gesoldeerde rand en met dichtgesmolten glasrand. Dit laatste type glas, bekend onder de merknaam Sedo, heeft verder als kenmerk dat de spouwruimte tussen de glasruiten gevuld is met CO₂ in plaats van met gewone lucht. Hierdoor wordt de isolatiewaarde beter. Het is denkbaar dat recente technische ontwikkelingen nieuw perspectief bieden aan dubbelglas (hoofdstuk 4.3.1)

Hortiplus

Om het energieverbruik te verlagen is ook in het verleden het zogenaamde Hortiplus glas ontwikkeld. Hortiplus is glas met een “lage emissie” coating. Het warmteverlies door een kasdek is voornamelijk afhankelijk van de isolatiewaarde (k-waarde), de doorlatendheid voor infrarode warmtestraling (FIR, 3-100 µm) en de emissiecoëfficiënt (ε). De k-waarde van glas kan worden verlaagd door dubbelglas toe te passen. De doorlatendheid voor warmtestraling van glas is al laag, dus blijft het verlagen van de emissiecoëfficiënt om de warmtedoorgang door het kasdek te reduceren als optie over. Dit is mogelijk door op het materiaal een coating aan te brengen met een lage emissiecoëfficiënt (tin oxide) (Out, 1993). Een probleem bij deze coatings is echter dat de lichttransmissie voor loodrecht opvallend licht afneemt van 89% naar 84% (voor diffuus licht is dit respectievelijk van 83% naar 74%).

4.1.2 Kunststofplaten

In de afgelopen 20 jaar zijn een groot aantal transparante kunststofplaten op de markt gekomen, waarvan een deel geschikt is als kasomhullingsmateriaal. Een aantal van deze materialen is aanzienlijk verbeterd door toevoeging van verschillende additieven en coatings, met name om de lichtdoorlatendheid en de duurzaamheid te verbeteren en het condensgedrag op het oppervlak (antidrop). In tegenstelling tot glas kunnen de mechanische en optische eigenschappen van kunststoffen in principe naar wens worden aangepast.

Als niet-flexibele transparante kunststoffen worden de volgende materialen toegepast in tuinbouwkassen: PVC (polyvinylchloride), GRP (glasvezelgewapend polyester), PMMA (polymethylmethacrylaat) en PC (polycarbonaat); meestal in de vorm van vervormde kunststofplaten (Briassoulis et al., 1997). In Tabel 10 zijn een aantal kunststofmaterialen aangegeven met de verschijningsvorm, de gebruikte afkorting voor het materiaal en de gangbare merknamen voor deze platen.

Van de in Tabel 10 genoemde materialen en vormen van platen komen de vlakke enkelwandige platen slechts sporadisch voor. De reden hiervan is dat de sterkte en met name de stijfheid van deze vlakke platen vaak onvoldoende is, waardoor de platen in oneconomische diktes toegepast moeten worden of in kleine afmetingen. Om deze platen meer stijfheid te geven zijn de golfplaten of trapeziumvormige enkelwandige platen ontwikkeld. Deze komen voor in de materialen PMMA, PC, PVC en GRP. Om de isolatiewaarde van de kasomhulling te verbeteren zijn dubbelwandige platen ontwikkeld. Dit zijn meestal producten, die in een continue proces via een extrusiemachine met matrices gemaakt kunnen worden. Voor deze dubbelwandige platen worden momenteel uitsluitend de materialen PMMA (andere namen: acryl, perspex of plexiglas) en PC (polycarbonaat) gebruikt.

In Nederland worden voor kassen uit het oogpunt van energiebesparing meestal dubbelwandige platen toegepast als gekozen wordt voor kunststofplaten. Een andere naam voor deze dubbelwandige platen is de Duitse naam 'Stegdoppelplatte' (afgekort SDP), kanaalplaten of duoplatten. De interesse in de toepassing van dubbelwandige kunststofplaten neemt momenteel weer toe in Nederland voor met name de intensief gestookte sierteelt. Dit uit het oogpunt van energiebesparing.

Figuur 22 toont een aantal gebruikte vormen van transparante kunststofplaten.

Eigenschappen

De eigenschappen van een aantal kunststofplaatmaterialen zijn samengevat in Tabel 11.

Het materiaal PVC is in het verleden op beperkte schaal toegepast voor kassen, echter dit gaf grote problemen bij hagelbelasting (schade). Ook uit milieuoverwegingen is PVC geen geschikt materiaal. Van het materiaal GRP zijn platen in de vorm van golfplaten toegepast voor kassen. Deze platen hebben als nadelen, dat ze door de ruwheid van het oppervlak gemakkelijk vervuilen en dat zij ten gevolge van UV straling van de zon relatief snel verouderen.

Als dubbelwandige plaat heeft PMMA (in een plaatdikte van 16 mm) de hoogste lichtdoorlatendheid, namelijk ca. 89% voor loodrecht invallend licht, terwijl dit cijfer voor een vergelijkbare plaat van PC ca. 80% is. De investering van PMMA-platen is veel hoger dan bij glas (ca. Euro 18-21 per m²). De warmte-isolatie is aanzienlijk beter dan die van enkelglas, namelijk

$<3 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. De slagvastheid van PMMA is minder goed maar kan door additieven verbeterd worden. PMMA-platen hebben een ongunstig brandgedrag.

PC heeft als voordelen een goede materiaalsterkte, een hoge slagvastheid en een grotere brandveiligheid ten opzichte van PMMA. Door de hogere brekingsindex is de lichttransmissie wat lager dan die van PMMA. Kunststof kanaalplaten zijn tegenwoordig eveneens in diverse uitvoeringen verkrijgbaar. Naast de bekende dubbelwandige kanaalplaat zijn er systemen bekend van platen tot 7 lagen (PC).

Door toepassing van een door Agrotechnology & Food Innovations samen met General Electric Plastics ontwikkelde zigzag-vormige doorsnede, kan de lichttransmissie van het PC-materiaal aanzienlijk toenemen, waardoor er een interessant nieuw materiaal ontstaat voor kasbedekking (Waaijenbergh, 2002). Hierbij zijn enkelwandige en dubbelwandige platen ontwikkeld met een zigzagstructuur, waarbij een aanzienlijk deel van het gereflecteerde licht alsnog wordt ingevangen in de kas (hoofdstuk 4.3.1.2) De doorlatendheid voor diffuus licht van een dubbelwandige zigzag-plaat zonder coatings = 79% en met coating = 80%. De doorlatendheid voor loodrecht opvallend direct licht voor de enkelwandige zigzag-plaat zonder coatings = 87.4% en met coating = 90%. Gelijktijdig heeft de plaat een hoge isolatiewaarde van $2,3 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$.



Figuur 22 Verschillende uitvoeringsvormen van transparante kunststofplaten

Tabel 10 Overzicht mogelijke kunststofplaten voor kassen

Soort plaat	Materiaal	Merknaam
enkelwandige vlakke plaat	PMMA	plexiglas, perspex, kascoplex
	PC	makrolon, calibre, lexan
	PVC	ondex
enkelwandige golf-, trapezium- of zigzagvormige plaat	PMMA	plexiglas, vedril, vedrilser
	PC	makrolon, suntuf, lexan
	PVC	ondex
	GRP	
dubbelwandige vlakke plaat	PMMA	plexiglas, perspex, vedril, alltop, highlux, kascoplex, altuglas AL, optima
	PC	akyver, makrolon, thermoclear, lexan, polygal, casolith, macrolux, sunlite
dubbelwandige plaat met zigzagvorm	PC	lexan

Tabel 11 Samenvatting van de materiaaleigenschappen van kunststofplaten

Materiaal	PAR-transmissie direct [%]	PAR-transmissie diffuus [%]	IR transmissie (FIR) [%]	K-waarde [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$]	Treksterkte [N mm^{-2}]	Levensduur [jaar]	Prijs [Euro m^{-2}]
GRP	82*		5	5,8*	98	1	12,50*
PC	80 / 89*	61	0	3,5 / 5,6*	63	15	13-18
PMMA	89 / 92*	76	0	2,8 / 5,8*	68	15	20-25
PVC	68 / 80*		10	2,3 / 6,8*	46-55	10	7,50*
PC-zigzag dubbel	90	80	0	3,38	63	15	32
PC-zigzag enkel	94	88	0	5,6	63	15	?

* Enkelwandig (golf)plaatmateriaal

Opmerkingen: De aangegeven waarden kunnen soms verschillen per fabrikant.

4.1.3 Kunststoffolies

Kunststoffolies worden toegepast in een groot scala van gebieden, klimaten en voor diverse teelten. Dit vraagt om de ontwikkeling van specifieke folies, die afgestemd zijn op de eisen van het klimaat en de teelt. Deze eisen zijn een combinatie van eigenschappen, zoals lichtdoorlatendheid, warmtedoorlatendheid, sterkte, levensduur, anti-condens- en anti-stof gedrag (Elsner et al., 2000).

Polyethyleen (PE) is het meest toegepaste materiaal bij kasomhullingsfolies omdat het veel mogelijkheden biedt en niet-toxisch (giftig) is. Zonder toevoeging van UV additieven is de levensduur van deze PE-folies echter vaak minder dan één jaar. Om de levensduur te verlengen worden derhalve UV stabilisatoren aan het materiaal toegevoegd. Dit waren eerst UV absorberende nikkel-quencher bestanddelen en later UV absorbers op basis van benzofenone en stoffen die vrije radicalen maken, zogenaamde “Hindered Amine Light Stabilizer (HALS)” stoffen die tevens de bestendigheid tegen de inwerking van pesticiden vergroten (Lelli en Gugumus, 1996 en Ashudah, 1997). Naast PE en de daarvan afgeleide folies, zoals EVA en PE-IR worden andere materialen als kasomhullingsmateriaal gebruikt, zoals met name in Japan PVC. Op beperkte schaal worden meer duurzame folies (membranen) voor kassen gebruikt, zoals etheentetrafluoretheen (ETFE), polyester (PET) en polyvinylidifluoride (PVDF).

Eigenschappen

Door de samenstelling en het toevoegen van additieven is het mogelijk om de eigenschappen van kunststoffolies sterk te beïnvloeden. Zo kan een folie bijvoorbeeld wel of niet doorlatend gemaakt worden voor UV straling. Dit is van belang bij bepaalde teelten, waarbij UV straling nodig is voor de plantontwikkeling (hoofdstuk 4.2.2).

Verder kan een folie helder of diffuus (melkachtig) uitgevoerd worden. Met een diffuse uitvoering zorgt de folie ervoor dat het licht meer diffuus gespreid in de kas komt, waardoor er minder kans is op het verbranden van het gewas bij intensieve zonnestraling (Verlode en Waaijenberg, 1999). Bij gelijke lichtdoorlatendheid verdient het altijd aanbeveling om een diffuse folie toe te passen (ook in West-Europa). Door toevoeging van pigmenten kunnen de folies voorzien worden van een kleur, waardoor de spectrale verdeling van het licht beïnvloed wordt (hoofdstuk 4.3.2).

Polyethyleen verschilt met glas op een belangrijk punt: het heeft van huis uit niet dezelfde thermische IR absorptie als glas (broeikaseffect). Daarom is het noodzakelijk om additieven (minerale vulstoffen) of vinylacetaat (VA) toe te voegen. (Verlode et al., 1995). Door blokkering van de warmtestraling vanuit het gewas naar de hemel door het kasdek, zal het gewas minder afkoelen gedurende koude nachten (hoofdstuk 4.2.4).

Veel kunststoffolies zijn hydrofoob waardoor water in druppels op het folieoppervlak condenseert. Dit is een ongewenst effect, omdat hierdoor zowel de lichtreflectie als het warmteverlies toenemen. Tevens kan dit resulteren in de vorming van grote waterdruppels die op het gewas kunnen vallen, waardoor er locale schade kan ontstaan (Gbioreczyk, 2002). Hiervoor kunnen additieven aan de folie toegevoegd worden, die een beter condensgedrag op het

oppervlak van de folie bevorderen (het zgn. anticondens, antidrop of antifog effect) en ook additieven, die het afstoten van stof (antidust) bevorderen (en dus een snelle vervuiling tegengaan). De levensduur van de anti-condenslagen is echter nog gering (enkele maanden tot een jaar).

Er is een tendens om verschillende materialen te lamineren via coëxtrusie om zo te komen tot optimale eigenschappen. Door de stoffen zoveel mogelijk te concentreren in de middenlaag en deze te beschermen met de anders samengestelde buitenlagen wordt de emissie van deze stoffen tegengegaan, waardoor de werkingsduur verlengd wordt (Verlodt en Waaijenberg, 1999).

In Tabel 12 wordt een opsomming gegeven van de mogelijke transparante kunststoffolies voor kassen met hun belangrijkste materiaaleigenschappen.

Tabel 12 Samenvatting van de materiaaleigenschappen van kunststoffolies

Materiaal	PAR-transmissie direct [%]	PAR-transmissie diffuus [%]	IR transmissie (FIR) [%]	Treksterkte [N mm⁻²]	Levensduur [jaar]	Prijs [Euro m⁻²]
PE	89-91	81	40-60	20	1-5	0,50-0,80
PE-IR	89-91	81	20-40	20	4-5	0,60-0,80
EVA	90-91	82	20-40	26	4-5	0,70-0,90
PVC	87-91		10-15	38	1-2	0,70
PVDF	93-94	85	5-15	30	12	10
ETFE	93-94	88	15-20	45	15-20	10-12
PET	89		40-60	16	4-10	1
TPU	91		5	66	10	6

Opmerking: De aangegeven waarden kunnen soms verschillen per fabrikant.

Een recente ontwikkeling op kunststofgebied is de introductie van een aantal hoogtransparante folies. Dit zijn fluoropolymeren, zoals ETFE (etheentetrafluoretheen) en PVDF (polyvinylidendifluoride), alsmede TPU (polyurethaan) of PET (polyester) folies. Naast een zeer goede lichttransmissie van 90 – 95% (PAR) worden deze folies gekenmerkt door een zeer goede stabiliteit, waardoor de levensduur op meer dan 10 jaar aangehouden moet worden. De prijs van deze materialen is echter nog relatief hoog. De mechanische eigenschappen van deze materialen zijn niet altijd even goed, zo heeft TPU te veel rek en zijn PVDF en PET te scheurgevoelig. Bij de meeste materialen is de transmissie voor warmtestraling laag. Vooral ETFE heeft veel gunstige eigenschappen en is daarom mede door de eerder genoemde goede lichttransmissie en lange levensduur veelbelovend als toekomstig bedekkingsmateriaal voor kassen.

4.1.4 Schermen

4.1.4.1 Energiescherm

Het effect van energieschermen is het verlagen van het warmteverlies uit de kas. Met schermen wordt zowel de warmteoverdracht via ventilatie als de warmteoverdracht via warmtestraling en convectie verlaagd.

Materialen die vaak als energiescherm worden gebruikt zijn zogenoemde bandjesschermen en transparante folieschermen aan één stuk. Bandjesschermen zijn opgebouwd uit foliestroken van een lichtdoorlatend materiaal (meestal gemaakt van polyester) uit gealuminiseerd folie of uit een combinatie van deze materiaalsoorten (Figuur 23).

Folieschermen zijn soms vast en soms beweegbaar; bandjesschermen zijn, bijzondere gevallen daargelaten, altijd beweegbaar. Beweegbare folieschermen en lichtdoorlatende bandjesschermen kunnen ingezet worden als de omstandigheden dat toelaten. Het warmteverlies en daarmee het energiegebruik van de kas gaat dan omlaag, terwijl het lichtverlies beperkt blijft.

Afhankelijk van het type energiedoek kan, volgens opgave van de fabrikanten, tussen 45% en ruim 70% momentaan worden bespaard op energiegebruik bij gesloten scherm. In de praktijk zal de energiebesparing over een jaar genomen lager uitvallen, omdat het energiebesparingseffect door een groot aantal factoren wordt bepaald (bijv. openen en sluiten van scherm, en/of luchtramen voor o.a. vochtbeheersing). Door gebruik van beweegbare schermen in een kas, waarbij gezorgd wordt voor een goede kierafdichting, kan met modern energiedoek bij gebruik tijdens de nacht, op jaarbasis 20% tot 25% energie worden bespaard. Dit percentage is sterk afhankelijk van het type materiaal, de transmissie voor warmtestraling van het materiaal, de missiewaarde van het materiaal, de vochtdoorlatendheid van het materiaal, de afdichting van het scherm, de teelt en de setpoints voor de klimaatregeling.



Figuur 23 Voorbeeld van een dubbel scherm voor energiebesparing (onder) en zonwering (boven) (Foto Svensson)

Bandjesschermen en in hogere mate folieschermen laten maar een deel van het opvallende zonlicht door. Volgens fabrikantengegevens ligt het zonweringspercentage van de materialen tussen 10% en ruim 90% (PBG, 2000).

4.1.4.2 Zonweringsscherm

De functie van een zonnenscherm is het niveau van de zoninstraling overdag te verminderen. Dat wordt bereikt met schermdoeken die het zonlicht beperkt doorlaten, absorberen of reflecteren. Een schermtype dat veel als zonweringsscherm wordt toegepast, is het bandjesscherm met gealuminiseerde kunststoffolie bandjes en daartussen open stroken. De mate van zonwering van dit type scherm wordt bepaald door de materiaaleigenschappen van de gealuminiseerde bandjes en door de oppervlakteverhouding tussen bandjes en open stroken. Meer open stroken betekent minder zonwering en minder energiebesparing, als dit scherm gelijktijdig in de nacht als energiescherm wordt gebruikt.

Bandjesschermen met een kleur zijn uit oogpunt van zonwering minder effectief dan die met aluminium. Gekleurde schermen laten meer licht door en een deel van de invallende straling wordt geabsorbeerd. Gealuminiseerde schermen reflecteren de invallende straling, zodat de energie buiten wordt gehouden en de kas minder wordt opgewarmd.

De effecten van het gebruik van zonneschermen met een open structuur zijn: een lagere gewas- en kasluchttemperatuur en een verlaagde verdamping.

Zonweringsschermen zijn te koop met een zonweringspercentage tussen 40% en 85%. Met een zonnenscherm kan in de gesloten situatie tussen 20% en 35% momentaan aan energie worden bespaard, maar op jaarbasis ligt de energiebesparing lager (PBG, 2000).

Door de toepassing van gekleurde schermmaterialen, bijvoorbeeld rood, geel, grijs en blauw wordt de spectrale verdeling van het licht in de kas verschoven, waardoor bijvoorbeeld de vegetatieve ontwikkeling van planten beïnvloed wordt (Figuur 24).



Figuur 24 Het gebruik van gekleurde schermmaterialen of netten om de spectrale verdeling van het licht te beïnvloeden (foto: documentatie fa. Polysack, Israël)

4.1.4.3 Verduisteringsscherm

Door manipulatie van de daglengte kunnen bepaalde planten tot knopvorming worden aanzet ook in periodes van het jaar dat dit van nature niet gebeurt. Bij een kortedag-plant als de chrysant worden 's zomers verduisteringsschermen en 's winters verlichting met een lage intensiteit gebruikt om dit gewas jaarrond te kunnen produceren. Het doel van schermen om de daglengte te verkorten is dan ook het verhinderen dat licht van buiten in de kas doordringt.

Schermdoeken die voor dit doel gebruikt worden zijn: bandjesschermen, (dikke) folies en geweven kunststoffolie bandjes. De uitvoering is vaak wit of gealuminiseerd aan de dekszijde om invallend licht te reflecteren en zwart aan de gewaskant.

Het gebruik van schermen om de daglichtperiode te verkorten gedurende de periode met natuurlijke lange dagen brengt op dagen met hoge buitentemperaturen en veel instraling problemen met zich mee; de kasluchttemperatuur loopt hoog op, zelfs met volledig geopende luchtramen.

Verduisteringsschermen zijn uitstekend geschikt om energie te besparen en zijn lichtdicht. Met een verduisteringsscherm kan momentaan tussen de 40% en 80% energie worden bespaard.

Door gebruikmaking van beweegbare schermen in een kas, waarbij is gezorgd voor een goede kierafdichting, kan met een verduisteringsscherm (enkel) bij gebruik tijdens de “donkere” uren en de cyclische perioden, op jaarbasis 20% tot 30% energie worden bespaard (PBG, 2000).

4.1.4.4 Scherm om lichtuitstoot te voorkomen

Gebruik van assimilatiebelichting en stuurlicht tijdens donkere uren valt niet meer weg te denken uit de Nederlandse glastuinbouw. Om overlast en onnodige verstoring van het natuurlijke evenwicht te beperken en zomogelijk te voorkomen, worden schermen toegepast om het licht in de kas te houden (Figuur 25). Deze schermen laten geen of vrijwel geen licht door. Schermen om lichtuitstoot tegen te gaan bestaan vaak uit geweven kunststoffolie bandjes of een breisel met kunststoffolie bandjes (bandjesscherm).



Figuur 25 Voorbeeld van een lichtweringscherm bij rozenteelt (foto Svensson)

Veel schermmaterialen die bedoeld zijn om lichtuitstoot van assimilatielampen tegen te gaan, zijn aan één zijde (gewaszijde) voorzien van een wit oppervlak dat licht reflecteert. Schermen om lichtuitstoot tegen te gaan zijn ook geschikt om energie te besparen.

Schermen om lichtuitstoot tegen te gaan, zijn vrijwel lichtdicht. Met dit type scherm kan volgens de fabrikanten tussen 40% en 70% energie worden bespaard. Door gebruik van beweegbare schermen in een kas, waarbij is gezorgd voor een goede kierafdichting, kan met een verduisteringsscherm bij gebruik tijdens de “donkere” uren, op jaarbasis 20% tot 25% energie worden bespaard (PBG, 2000).

4.1.4.5 Vochtscherm

Als het buiten koud is werkt het kasdek als een soort condensor die waterdamp afvoert: de waterdamp uit de kas condenseert tegen het koude dek en wordt in de vorm van condenswater via gootjes afgevoerd. Veel tuinders planten hun gewas in de koudste periode van het jaar en de jonge planten met weinig bladeren verdampen dan weinig. Het gecombineerde effect van een lage waterdampproductie door de planten en een grote vochtafvoer via condensatie aan het dek, leidt met name bij jonge paprika- en komkommerplanten tot een onwenselijke droge atmosfeer in de kas. Door toepassing van een vast of beweegbaar foliescherm wordt de vochtafvoer via het dek aanzienlijk gereduceerd en ontstaat een beter klimaat voor de jonge planten. Het voordeel van een vast scherm is dat het relatief goedkoop is en dat het nadat het verwijderd is, geen licht meer wegneemt. Met een beweegbaar scherm kan het klimaat beter worden geregeld; een nadeel is dat het scherm ook als het geopend is (als pakket) licht wegneemt.

Eisen die aan vochtschermen worden gesteld zijn: zo hoog mogelijke lichtdoorlatendheid en zo gering mogelijke vochtdoorlatendheid. Transparante folies voldoen goed aan de gestelde eisen. Ook materiaal bestaande uit een weefsel van kunststofolie-bandjes wordt als vochtscherm gebruikt.

Vochtschermen zijn te verkrijgen met een zonweringspercentage tussen 15% en 30%. Met een gesloten vochtscherm kan ca. 35% momentaan aan energie worden bespaard. De energiebesparing over een langere periode is lager, waarbij het aantal uren dat geschermd wordt van groot belang is (PBG, 2000).

4.1.4.6 Combi- of duoscherm

Het is mogelijk schermdoek eigenschappen te geven die het geschikt maken om dit te gebruiken als energie- en als zonweringscherm. Veel combischermen bestaan uit een combinatie van heldere en gealuminiseerde kunststoffolie bandjes. De verhouding tussen de twee soorten bandjes bepaalt de mate van zonwering en energiebesparing.

Combi- of duoschermen zijn te verkrijgen met een zonweringspercentage tussen 25% en 85%. Met een combi- of duoscherm kan volgens opgave van de fabrikanten tussen 45% en 70% momentaan aan energie worden bespaard. Met beweegbare schermen en een goede kierafdichting kan met een duo- of combischerm bij gebruik tijdens de nacht, op jaarbasis 20% tot 25% energie worden bespaard (PBG, 2000).

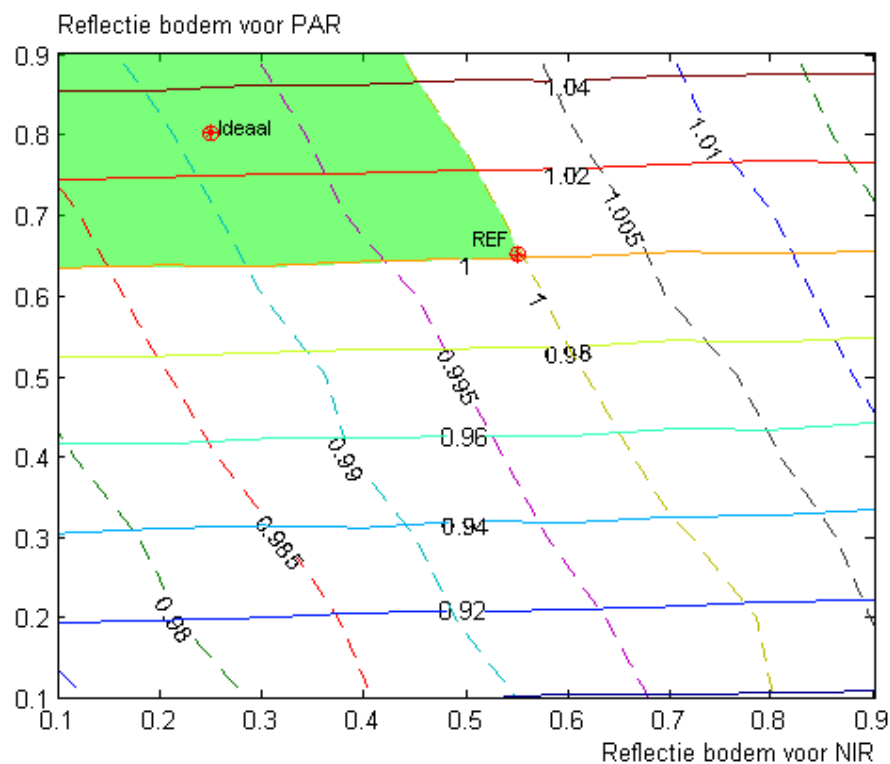
4.1.5 Bodemafdekfolies

Bodemafdekfolies zijn loopfolies in de kas, welke in verschillende kleuren op de markt zijn. Gebruikelijk zijn witte of zwart witte folies, maar ook alle andere kleuren zijn denkbaar. De folies hebben als taak om PAR en / of NIR straling zo veel mogelijk te reflecteren. Reflectie van PAR straling terug in het gewas leidt tot een hogere opbrengst. In sierteelten leidt een hoge reflectie van PAR straling tot meer productie en soms tot meer gedrongen planten. Heeft de folie een hoge absorptie voor NIR straling, dan blijft deze energie in de kas en daalt het gasverbruik. Een NIR absorberende folie heeft dus een energiebesparend effect.

Effect bodemafdekking

Door Mohammadkhani en Sonneveld (2003) is een studie uitgevoerd naar de effecten van de eigenschappen van bodemafdekfolies. Zij hebben met behulp van het simulatiemodel voor kasklimaat KASPRO (Zwart, 1996) berekeningen uitgevoerd om het effect van de eigenschappen van de bodemafdekfolie op de gewasproductie en het gasverbruik te bepalen.

Als standaard afdekfolie wordt in de praktijk meestal een witte PE-folie gebruikt. De gemeten reflectie daarvan is na een half jaar gebruik voor PAR 65% en voor NIR 55%. Deze eigenschappen zijn gebruikt in een referentieberekening met het gewas tomaat. Vervolgens zijn berekeningen uitgevoerd voor alle combinaties van de reflectiecoëfficiënten voor NIR en PAR tussen 0,1 en 0,9.



Figuur 26 Iso-productie-indexlijnen (getrokken) en iso-energiegebruiksindexlijnen (onderbroken) als functie van de waarden van de reflectie voor NIR en PAR door bodemafdekfolies. De positie van de referentiefolie en van een “ideale” folie zijn gemarkeerd (Φ). (Mohammadkhani en Sonneveld, 2003)

In Figuur 26 zijn contourplots van de index van de gewasproductie en de index van het energiegebruik weergegeven. Op de assen zijn de reflectiecoëfficiënten van de afdekfolie op de bodem voor NIR (x-as) en PAR (y-as) uitgezet. De getrokken lijnen zijn lijnen van gelijke gewasproductie en de gestreepte lijnen zijn lijnen van gelijk energiegebruik. Waar de isoproductielijn met de index 1 de iso-energielijn met index 1 snijdt, heeft de bodem de eigenschappen van de referentie.

Om minder energie te gebruiken dan in de referentie, moeten de eigenschappen van de afdekfolie links van de iso-energielijn met index 1 liggen. Om meer productie te krijgen dan in de referentie, moeten de eigenschappen boven de isoproductielijn met index 1 liggen. Dit betekent dat de gewenste eigenschappen van de afdekfolie moeten liggen in het groene gebied.

Wat opvalt, is dat de gevoeligheid voor de reflectie van PAR en NIR van het gasverbruik veel kleiner is dan de gevoeligheid van de gewasproductie. Dit kan men zien door hetzij een horizontale lijn hetzij een verticale lijn in de grafiek te trekken en de verandering van de energie-index of productie-index te beschouwen. Er is een licht stijgende trend van het energiegebruik met toenemende reflectie. De stijgende trend kan worden begrepen uit de lagere absorptie van zonne-energie door de bodem en daarmee door de kas als geheel.

Zoals men kan verwachten is de gevoeligheid van de gewasproductie voor de reflectie van NIR gering (nauwelijks verandering van de productie-index langs een horizontale lijn). Hier is een licht dalende trend te zien bij toenemende reflectie. Deze kan worden verklaard uit het feit dat de absorptie door het gewas van NIR wat toeneemt en de donker-respiratie van het gewas toeneemt via (in geringe mate) verhoogde gewastemperatuur, maar hierdoor kan de fotosynthese net zo goed ook toenemen. In dat geval is het effect gelijk aan nul.

De gevoeligheid van de gewasproductie voor de reflectie van PAR is daarentegen veel groter. Uit Figuur 26 kan men afleiden dat verlaging van de reflectiecoëfficiënt van de bodemafdekfolie weliswaar leidt tot een verlaagd energiegebruik, maar dat voorkomen moet worden dat de reflectie van PAR afneemt omdat dat relatief sterker doorwerkt in verlaagde productie. Juist verhoging van de reflectie voor PAR lijkt interessant, omdat het tot productieverhoging leidt. Dat zou dan wel gepaard gaan met een hoger energiegebruik, maar dat is ten opzichte van de productietoename gering, zodat de energie-efficiëntie zal verbeteren. Bovendien lijkt het erop dat het hogere gebruik, door een wat lagere reflectie voor NIR te realiseren, gecompenseerd zou kunnen worden. In Figuur 26 zijn ook de eigenschappen van de referentiefolie en een “ideale” folie aangegeven.

4.1.6 Nieuwe transparante materialen

Nanoschuim

Zowel glas als kunststof dekmaterialen voor kassen hebben een slechte thermische isolatiewaarde. In het algemeen zijn er materialen met structuren die de thermische isolatie verhogen, zoals kunststofschuim of een kunststof honingraatstructuur. Helaas hebben deze materialen een (zeer) lage lichttransmissiewaarde. Een uitzondering hierop zijn zgn. aërogels of nanoschuimen.

Aërogels zijn zeer poreuze materialen waarvan de materiaaldeeltjes en de poriegrootte kleiner (10-20 nm) zijn dan de golflengte van zichtbaar licht. Hoewel het materiaal reeds in 1930 ontdekt is door Kistler (Duer en Svendsen, 1998) vindt er momenteel een herontdekking plaats doordat het materiaal een unieke combinatie heeft van eigenschappen, waaronder een zeer goede warmte-isolatie, een goede lichttransmissie en een gering eigen gewicht (Nordgaard en Beckman, 1992). Tevens zijn er recent een aantal nieuwe recepten en productiemethoden ontwikkeld op het Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) waardoor deze materialen op commerciële basis te produceren zijn. De monolitische silica aërogels en recent bij LLNL ontwikkelde organische aërogels hebben de beste isolerende eigenschappen. Volgens Nordgaard en Beckman (1992) en Lampert (1987) hebben deze materialen een transmissie van 80 tot 90% (bij een dikte van 10 cm). De warmtedoorlaatcoëfficiënt is volgens Büttner et al. (1988) ca. $1,2 - 2,0 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Een recent onderzoek door Duer en Svendsen (1998) geeft aan dat de optische kwaliteit van de monolitische silica aërogels de laatste vijf jaar nog verbeterd is. Hij vond voor een silica aërogel een lichttransmissiewaarde van 92% voor loodrechte inval. Deze waarde is hoger dan de lichttransmissie van enkelglas. Het materiaal is in het algemeen minder helder dan glas doordat vooral licht van kleinere golflengtes (blauw) verstrooid wordt door verontreinigingen en kristalfouten in het materiaal. Door gebruik van extra zuivere grondstoffen en door de productie in 'clean rooms' te laten plaatsvinden, kan de lichtverstrooiing verder naar het ultraviolette deel van het spectrum verschuiven waardoor de lichttransmissie toeneemt.

De genoemde organische aërogels zijn ontwikkeld op basis van melamine ($\text{C}_3\text{N}_6\text{H}_6$) of resourcinol ($\text{C}_6\text{O}_2\text{H}_6$). Pekela (1995) en van Zuylen (1995) ontdekten dat er gels ontstaan wanneer deze stoffen polymeriseren in een formaline/water mengsel. Melamine levert doorzichtige aërogels op, terwijl uit resourcinol een rode gel ontstaat die vrijwel alle warmte-isolators overtreft. Door de grotere lichtverstrooiing is het laatstgenoemde materiaal voor kasomhullingsmaterialen minder geschikt. De genoemde polymeren en het productieproces zijn in verhouding nog vrij kostbaar. Ontwikkeling van aërogels of nanoschuimen op basis van eenvoudige polymeren zoals PC, PMMA of PVC kan leiden tot een sterke toename van het aantal toepassingen, omdat het materiaal dan tegen een redelijke prijs is te produceren (ca. Euro 12,50 per m^2). De unieke materiaaleigenschappen van met name de combinatie van goede warmte-isolatie en lichttransmissie maken toepassing als kasomhullingsmaterialen mogelijk.

Het gebruik van nanoschuimen wordt pas interessant wanneer deze tegen redelijke prijs te produceren zijn. Voor de toepassing in kassen zal het noodzakelijk zijn om het silica aërogel aan binnen- en buitenzijde te omhullen met een dampdicht bedekkingsmateriaal, omdat het materiaal door de poreuze structuur zeer hygroscopisch is en water de silica aërogels vernietigt. Ook zijn deze silica aërogels slecht bestand tegen een trekbelasting. Aërogels op basis van kunststof zijn echter minder bros en indien hydrofoob gemaakt ook beter vochtbestendig. Aërogels zijn in het

algemeen redelijk goed bestand tegen drukkrachten waardoor het goed mogelijk is een sandwichconstructie te maken met deze materialen.

COC

De verwachting is dat de ontwikkeling van nieuwe materialen nog niet ten einde is. PEEK (polyaryletherketon) is een nieuwe kunststof die bestand is tegen grote mechanische belastingen. Door de ontwikkeling van nieuwe (metaal) katalysatoren komen nu series nieuwe polymeren beschikbaar onder de naam metallocenen. Vogt (1995) beschrijft een door Hoechst en Mitsui gefabriceerd co-polymeer met een bijzonder hoge helderheid. Het materiaal wordt nu door Ticona op de markt gebracht onder de handelsnaam Topas en door Nippon Zeon Co onder de naam Zeonex. Deze materialen kunnen onder de naam COC (cycloolefincopolymeer) worden samengevat. Het materiaal is nu nog te duur en nog niet optimaal gestabiliseerd voor UV straling, waardoor kasomhullingstoepassingen nog in de verre toekomst liggen. De verwachting is wel dat de prijs van deze kunststoffen in de toekomst sterk zal dalen en dat de materialen voor UV licht te stabiliseren zullen zijn.

Samenvatting hoofdstuk 4.1

- Glas is het meest gebruikte kasomhullingsmateriaal in Nederland (95-98% van de 10.500 ha kassen). Blank glas is het meest gebruikelijk, speciale soorten zijn wit glas, Hortiplus en gehard glas. De lichtdoorlatendheid is 89-92% bij loodrecht lichtinval en 80-84% bij diffuus lichtinval. Blank glas laat straling vanaf 320 nm door, wit glas laat ook een gedeelte van de UV-B straling door.
- Kunststofplaten worden op ca. 10-12% van de nieuwbouwkassen (40- 45 ha per jaar) toegepast. PC kanaalplaten zijn het meest gebruikelijk naast PMMA kanaalplaten. De lichtdoorlatendheid van PC ligt rond de 80% voor direct stralingsinval (61% diffuus), de lichtdoorlatendheid van PMMA ligt rond de 89% direct (76% diffuus). PC laat geen straling beneden de 400 nm door, PMMA is transparant voor UV-B straling. De eigenschappen van kunststofmaterialen kunnen door allerlei technieken worden aangepast. Een nieuwe ontwikkeling is de zig-zag plaat.
- Kunststoffolies kunnen zeer verschillende eigenschappen hebben. Er bestaan goedkope traditionele folies van PE, EVA of PVC, maar ook duurzame materialen met een levensduur vergelijkbaar met die van glas zoals ETFE. De lichttransmissie is in het eerste geval vergelijkbaar met glas in het tweede ligt deze rond de 93-94% direct (88% diffuus). De spectrale doorlatendheid van folies kan door verschillende technieken veranderd worden.
- Schermmaterialen bestaan voor verschillende doelstellingen: energiebesparing, zonwering, verduistering, tegen lichtuitstoot of combinaties ervan. Materialen zijn bandjesschermen, transparante folieschermen of weefsels. De mate van energiebesparing is afhankelijk van het type materiaal, de transmissie voor warmtestraling van het materiaal, de emissiewaarde van het materiaal, de vochtdoorlatendheid van het materiaal, de afdichting van het scherm, de teelt en de setpoints voor de klimaatregeling. Materiaaleigenschappen kunnen evenwel als bij folies worden aangepast.
- Bodemafdekfolies hebben het doel om PAR en NIR zo veel mogelijk te reflecteren, dit heeft invloed op de gewasproductie en het energieverbruik. Bij een hogere PAR reflectie stijgt de gewasproductie (10% meer reflectie geeft 2% meer productie bij tomaat). Bij een geringere NIR reflectie (hogere absorptie) daalt het energieverbruik (10% minder reflectie betekent 2% minder energie).
- Ook volkomen nieuwe materialen zijn in ontwikkeling zoals nanoschuim en COC. Deze combineren een goede lichttransmissie met een hoge isolatiewaarde, maar zijn naar verwachting pas over lange termijn beschikbaar.

4.2 Welke optische eigenschappen zijn relevant en waarom?

Alle binnenkomende straling in de kas moet eerst het kasomhullingsmateriaal en eventueel het schermmateriaal passeren. Onder de optische eigenschappen van een materiaal worden die eigenschappen verstaan die van invloed zijn op het gedrag van elektromagnetische golven die op het materiaal vallen. Het gaat hier om twee zaken: wat gebeurt er met de globale straling die van buiten op het materiaal valt en wat gebeurt er met de warmtestraling die van binnen naar het materiaal en die van het materiaal naar de hemel wordt gestraald.

De optische eigenschappen van een materiaal worden gekenmerkt door de transmissie, de reflectie en de absorptie. Deze drie eigenschappen geven respectievelijk aan welk gedeelte van de opvallende straling wordt doorgelaten, gereflecteerd of geabsorbeerd. De som van deze drie waarden is gelijk aan 1 voor een bepaald golflengtegebied. Omdat we geïnteresseerd zijn in de effectieve transmissie, reflectie en absorptie voor een golflengtegebied (b.v. PAR, NIR) moeten integraties plaatsvinden van zowel de invallende straling als de doorgelaten straling. Als in dit golflengtegebied een gevoeligheidscurve geldt moet deze bij de integratie in rekening worden gebracht.

Zodoende volgt de effectieve transmissie τ_{eff} voor loodrecht invallend zonlicht uit de verhouding van de doorgelaten en de ingestraalde energie. Deze worden berekend uit de spectrale transmissie τ_{λ} voor loodrecht invallend licht en de spectrale stralingsintensiteit S_{λ} van het loodrecht invallende zonlicht volgens:

$$\tau_{\text{eff}} = \frac{\int \tau_{\lambda} S_{\lambda} d\lambda}{\int S_{\lambda} d\lambda}$$

De integratie is tussen de golflengtes van het betreffende golflengtegebied.

Voor de transmissie voor loodrecht invallende PAR straling τ_{PAR} moet rekening worden gehouden met de PAR gevoeligheidscurve die aangeeft welk deel c_{λ} van de straling bij een bepaalde golflengte relevant is voor de gewasgroei. Zodoende wordt dan:

$$\tau_{\text{PAR}} = \frac{\int \tau_{\lambda} c_{\lambda} S_{\lambda} d\lambda}{\int c_{\lambda} S_{\lambda} d\lambda}$$

De reflectie en absorptie over een golflengtegebied voor loodrecht invallende straling worden op een vergelijkbare manier berekend uit de spectrale waarden door integratie over het betreffende golflengtegebied. Naast de transmissie, reflectie en absorptie voor loodrecht invallende straling zijn deze ook relevant voor diffuus invallende straling. Zodoende moet voor de transmissie voor diffuse straling ook geïntegreerd worden over alle invalshoeken.

Een andere eigenschap die veel wordt gebruikt, is de emissiecoëfficiënt. Deze geeft aan hoeveel straling het materiaal zelf afgeeft vergeleken met een ideaal ‘zwart lichaam’ bij dezelfde temperatuur. Voor elk materiaal geldt dat voor dezelfde golflengte de absorptie gelijk is aan de emissie. Omdat we in de praktijk te maken hebben met temperaturen tussen min 10 °C en plus 40 °C, worden bij zichtbaar licht meestal de termen transmissie, reflectie en absorptie gebruikt en

bij warmtestraling de term emissie. Ook hier geldt dat de emissiecoëfficiënt spectraal bepaald is. Zodat de effectieve waarde volgt uit integratie over het golflengtegebied. Zij is evenwel al gebaseerd op een oppervlak als diffuse straler.

4.2.1 PAR transmissie

4.2.1.1 Transmissie voor directe en diffuse straling

Er moet onderscheid worden gemaakt tussen diffuse en directe straling. Het directe aandeel van de globale straling is de zonnestraling welke direct vanaf de zon het aardoppervlak bereikt zonder gereflecteerd te worden. Deze straling valt dus in met de invalshoek die door de stand van de zon wordt bepaald. Op heldere dagen is het grootste aandeel van de straling directe straling. Ook dan wordt een deel verstrooid door de atmosfeer en dat deel bereikt het aardoppervlak als diffuse straling. Op bewolkte dagen is het grootste aandeel van de straling diffuus (hoofdstuk 2.3)

Zowel directe als diffuse straling vallen op de buitenkant van de kas. Een helder transparant kasomhullingsmateriaal laat het grootste gedeelte van het invallende licht door. Afhankelijk van de invalshoek treden reflectieverliezen op. Bij loodrecht invallend licht zijn deze reflectieverliezen ca. 8% en 2-4% van de straling wordt geabsorbeerd. Het resultaat is een lichttransmissie voor loodrecht licht van ca. 90%. Bij een invalshoek groter dan 45 graden nemen de reflectieverliezen snel toe, de transmissie neemt snel af (Figuur 27). Zodoende is de reflectie voor direct zonlicht in de winter zeer hoog en de transmissie zeer laag (Zabeltitz, 1986). De daggemiddelde transmissie voor direct zonlicht kan zodoende in de winter uitkomen op slechts ca 35 - 40% bij een nokrichting noord-zuid. De lichttransmissie kan ook aanzienlijk verlaagd worden door een verhoogde absorptie in het geval van verontreinigingen van het kasomhullingsmateriaal, dit kan de lichttransmissie van een materiaal meer dan 10% reduceren.

Lichtinval vanuit alle hoeken van de hemelbol, zoals optreedt bij bewolkt weer, wordt diffuus invallend licht genoemd. Hierbij is de hemelbol over het algemeen niet homogeen verlicht maar neemt de intensiteit af naar de horizon.

In West-Europese landen is de doorlatendheid voor diffuus licht bepalend voor de plantengroei, omdat gedurende het grootste deel van het jaar er bewolking is. In het winterseizoen is 75% van de invallende stralingssom diffuus. De transmissie van een kasomhullingsmateriaal voor diffuus invallend licht is ca. 10% lager dan die voor direct invallend licht, omdat de lichttransmissie bij toenemende invalshoeken afneemt.

Bij direct zonlicht zijn de lichtverschillen tussen plekken met en zonder slagschaduw in de kas zeer groot. Zonder slagschaduw wordt er in de kas nog ca. 86% van de lichtintensiteit buiten gemeten. Op plaatsen met slagschaduw valt dit terug tot ca. 40%, enigszins afhankelijk van de breedte van de schaduwbaan. De oppervlakte van de slagschaduw en de plaatsen in de kas waar ze voorkomt varieert met de stand van de zon. Een structureel lager lichtniveau op sommige plekken zal altijd tot uiting komen in een afwijkende productie of productkwaliteit. Zodra in of onder het dek het invallend licht diffuus verdeeld wordt gaat de uniformiteit in gemeten lichtintensiteit op plantniveau omhoog.

Bij diffuus licht, dus bij bewolkt weer, zijn de lichtverschillen relatief klein. Onder de goten en onder de spanten, c.q. tralies, wordt de laagste intensiteit gemeten, onder de nok tussen de spanten de hoogste. Het verschil dat wordt gemeten is afhankelijk van de hoogte van de kas en de breedte van de aanwezige constructiedelen.

PAR transmissie ombulling

In principe is de lichttransmissie van een kasomhullingsmateriaal afhankelijk van het type materiaal. Glas heeft een doorlatendheid van 89-91% voor loodrecht invallend licht, polymeren zoals ETFE of PVDF hebben een loodrechte doorlatendheid van 93-94%. Een traditionele kanaalplaat van PC heeft een loodrechte transmissie van 80%, een kanaalplaat van PMMA een loodrechte transmissie van rond de 89%. In Tabel 13 worden de doorlatendheden van verschillende gebruikelijke kasomhullingsmaterialen voor loodrechte PAR straling aangegeven, terwijl in Tabel 14 de doorlatendheden van verschillende gebruikelijke kasomhullingsmaterialen voor diffuse PAR straling zijn aangegeven. Deze is voor glas 82%, voor een traditionele PE- of EVA-folie rond de 81-82%, maar voor nieuwe materialen zoals ETFE is deze transmissie 88%. Een traditionele kanaalplaat van PC heeft een transmissie van 61% voor diffuus invallende straling en een kanaalplaat van PMMA een transmissie van rond de 76%.

Tabel 13 Doorlatendheid voor loodrechte PAR straling van verschillende kasomhullingsmaterialen

Materiaal	Dikte	Transmissie
Glas	4 mm	89-91%
PE folie	200 µm	89-91%
PE-IR folie	200 µm	89-91%
PE-Antidrop folie	200 µm	89-90%
EVA folie	180 µm	90-91%
PVC folie	200 µm	87-91%
ETFE folie	100 µm	93-95%
PVDF folie	100 µm	93-94%
PC plaat	12 mm	80%
PMMA plaat	16 mm	89%
PC zigzagplaat (dubbel)	25 mm	88%

Tabel 14 Doorlatendheid voor diffuse PAR straling van verschillende kasomhullingsmaterialen

Materiaal	Dikte	Transmissie
Glas	4 mm	82%
PE folie	200 µm	81%
EVA folie	180 µm	82%
ETFE folie	100 µm	88%
PVDF folie	100 µm	85%
PC plaat	12 mm	61%
PMMA plaat	16 mm	76%
PC zigzagplaat (dubbel)	25 mm	79%

PAR transmissie scherm

Als een scherm als schaduw scherm moet functioneren is vooral de PAR transmissie van belang. De PAR transmissie wordt door een schaduwdoek verlaagd. Bij voorkeur is de absorptiefactor in dat geval zo laag mogelijk, omdat alle geabsorbeerde straling in warmte wordt omgezet, die via ventilatie weer uit de kas moet verdwijnen.

Als een scherm primair als verduisteringsscherm moet functioneren, moet de PAR transmissie kleiner dan 0,001 zijn, ook ver-rode straling moet buiten gehouden worden.

Bij schermen die als energiescherm moeten functioneren zijn de optische eigenschappen in het zichtbare licht niet in eerste instantie van belang. Zou het veel voorkomen dat een dergelijk scherm gebruikt moet worden gedurende de dagperiode, dan is het gewenst dat de PAR transmissie zo hoog mogelijk is. In dat geval kan geen gealuminiseerd materiaal worden gebruikt, omdat daarvan de transmissie klein is.

Een geopende scherminstallatie vormt een opmerkelijk brede lichtdichte baan. Globaal treden er verschillen op in lichtintensiteit van ca. 10%. Deze verschillen veranderen echter niet van plaats.

In een kas met een gesloten scherm in de lichtverdeling vrijwel egaal. Dit geldt voor alle schermmaterialen die zorgen voor diffuse straling onder het scherm.

4.2.1.2 Diffusiteit

Een ander belangrijk aspect is de mate van lichtverstrooiing door het kasomhullingsmateriaal. Dit wordt de diffusiteit van een materiaal oftewel de 'Haze' genoemd. De Haze is sterk afhankelijk van de oppervlaktestructuur of de aanwezigheid van bepaalde pigmenten. De diffusiteit van een kasomhullingsmateriaal is belangrijk voor de plantengroei. De bladtemperatuur in direct zonlicht daalt met toenemende diffusiteit, daardoor kunnen directe verbrandingsverschijnselen op bladeren en bloemen voorkomen worden. Daarnaast wordt het licht in de kas beter verspreid, slagschaduw ontstaat niet, het lichtniveau in de kas is meer uniform en het licht kan dieper in het gewas doordringen.

De Haze van kasomhullingsmaterialen varieert sterk, veel folies hebben een Haze van 25-30%. Bij een Haze van meer dan 50% worden de materialen diffuus genoemd.

4.2.1.3 Invloed constructiedelen, gevels, oriëntatie kas, dakhelling en invalshoek van de zonnestraling

Oriëntatie kas

De oriëntatie van de kas speelt ook een rol, namelijk indien de nok van de kas in oost-west richting gesitueerd wordt geeft dit de hoogste lichtdoorlatendheid in de wintermaanden (Tabel 15). Over het hele jaar genomen is de nokoriëntatie noord-zuid iets gunstiger (Elsner et al, 2000).

Tabel 15 Invloed van de oriëntatie van de kas op de lichtsom in Wh m⁻² d⁻¹

Week nummer	Oriëntatie van de kas	
	Oost-West	Noord-Zuid
2 (januari)	379	293
4 (januari)	426	322
6 (februari)	578	530
10 (maart)	1243	1226
14 (april)	1955	2104
20 (juni)	2720	2969
Totale jaar	588000	609000

Dakhelling

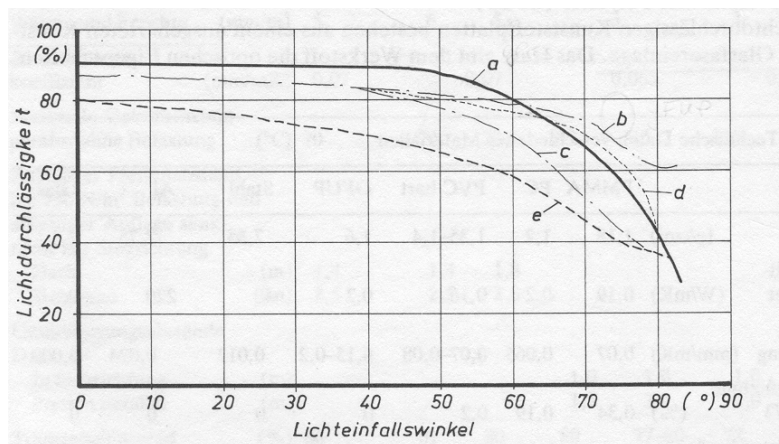
Uit onderzoek van Stoffers (1968) blijkt dat de invloed van de dakhelling van een kas met vlakke (glas)platen op zowel de ideaal diffuse straling als op de directe zonnestraling slechts gering is, zelfs in de wintermaanden bij lage zonnestand. De invloed van de oriëntatie is in dit geval belangrijker. In Tabel 16 zijn aangegeven de lichtdoorlatendheden bij drie verschillende dakhellingen bij schoon glas en zonder constructiedelen (theoretisch gedacht) bij diffuus licht en bij directe zonnestraling. De doorlatendheden zijn berekend voor de data 2 en 29 januari van 9.00 tot 15.00 uur. Globaal geeft een wijziging van de dakhelling van 10° gemiddeld een verbetering van de lichtdoorlatendheid van 1% bij zowel diffuse als directe straling.

Tabel 16 Invloed van de dakhelling op de transmissie van de kas (zonder constructiedelen) bij drie verschillende dakhellingen bij diffuus en direct stralingsinval

Oriëntatie Kas	Dakhelling in graden	Gemiddelde doorlatendheid in%		
		Diffuse straling	Directe straling op 2 januari	Directe straling op 29 januari
N-Z	20	85	60	65
	30	86	64	69
	40	87	65	69
O-W	20		75	73
	30		76	75
	40		74	74

Invalshoek straling op materiaal

De afhankelijkheid van de lichtdoorlatendheid van de invalshoek van de zonnestraling op een kasomhullingsmateriaal blijkt ook uit Figuur 27, waarbij op de verticale as de lichtdoorlatendheid is af te lezen en op de horizontale as de afwijking van de hoek loodrecht op het vlak in graden. Golfplaten hebben bij een lage zonnestand een hogere lichttransmissie dan enkel glas. In Figuur 27 is ook duidelijk het verschil tussen golfplaten b en c te zien, waarbij de golfrichting van materiaal b is aangebracht loodrecht op de invalshoek van het licht en die van materiaal c evenwijdig aan de lichtinvalshoek.



Figuur 27 Invloed van de invalshoek van de zonnestraling op de transmissie van verschillende kasdekmaterialen (horizontale as: afwijking van de hoek loodrecht op het vlak).

a = enkelglas,

b = glasvezelversterkte polyester golfplaten (golven loodrecht op de lichtinvalshoek),

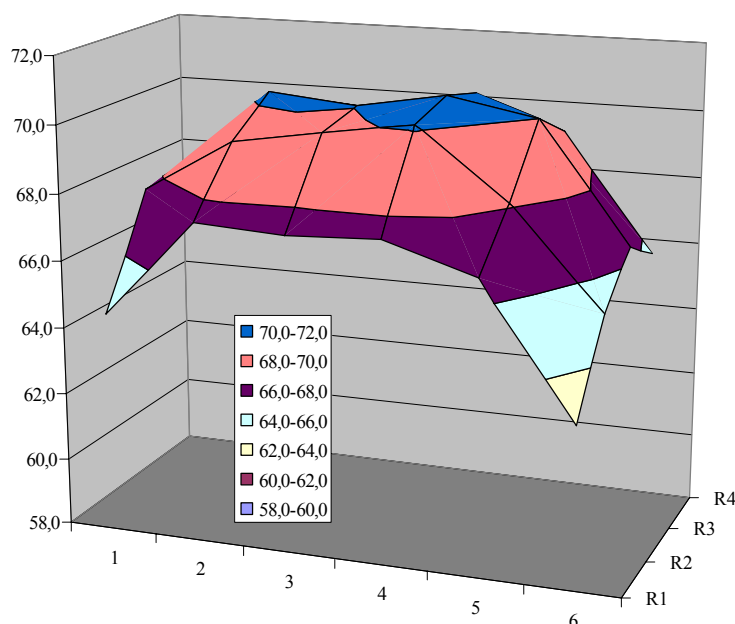
c = idem als b, echter hier golven evenwijdig aan de lichtinvalshoek,

d = PVC-plaat met trapeziumvormige doorsnede,

e = combinatie van noppenfolie en glas.

Constructiedelen

Bij direct zonlicht ontstaan lichtverschillen tussen plekken met en zonder slagschaduw. Zonder slagschaduw wordt er in de kas ca. 86% gemeten van de lichtintensiteit buiten. Op plaatsen met slagschaduw valt dit terug tot ca. 40%, enigszins afhankelijk van de breedte van de schaduwbaan. De oppervlakte van de slagschaduw en de plaatsen in de kas waar ze voorkomt varieert met de stand van de zon.



Figuur 28 Lichtverdeling in een vak tussen vier poten van een breedkapper,% buitenlicht bij bewolkt weer (PPO, eigen metingen)

Bij diffuus licht, bewolkt weer, zijn de lichtverschillen relatief klein. Onder de goten en onder de spanten, c.q. tralies, wordt de laagste intensiteit gemeten, onder de nok tussen de spanten de hoogste (Figuur 28). Het verschil dat wordt gemeten is afhankelijk van de hoogte van de kas en de breedte van de aanwezige constructiedelen. Een geopende scherminstallatie, indien aanwezig, vormt een opmerkelijk brede lichtdichte baan. Globaal treden er verschillen op in lichtintensiteit van -5% tot $+3\%$ (Figuur 28). Deze verschillen veranderen echter niet van plaats.

In een kas met een gesloten scherm in de lichtverdeling ook vrij egaal. Dit geldt voor alle schermmaterialen die zorgen voor diffuse straling onder het scherm.

Gevels

Langs buitengevels ontvangen de gewassen vaak meer licht dan midden in de kas. Het licht dat via de gevel de kas invalt wordt in mindere mate geabsorbeerd door constructiedelen en, afhankelijk van de lichtinval, minder of juist sterker gereflecteerd. In concentratiegebieden waar de kassen dicht op elkaar staan, en elkaar beschaduwen, kan het voordeel omslaan in een nadeel, zie effect tussengevels.

Langs tussengevels gaat licht verloren door absorptie van constructiedelen en glas. De reflectie van het licht tegen het glas zorgt, bij ongelijke belichting van de twee kanten, voor ongelijkheid. Langs de sterker belichte kant van de gevel kan de reflectie het lichtverlies opheffen of zelfs overtreffen. De minder belichte zijde ondervindt het negatieve effect van de lichtonderschepping in versterkte mate.

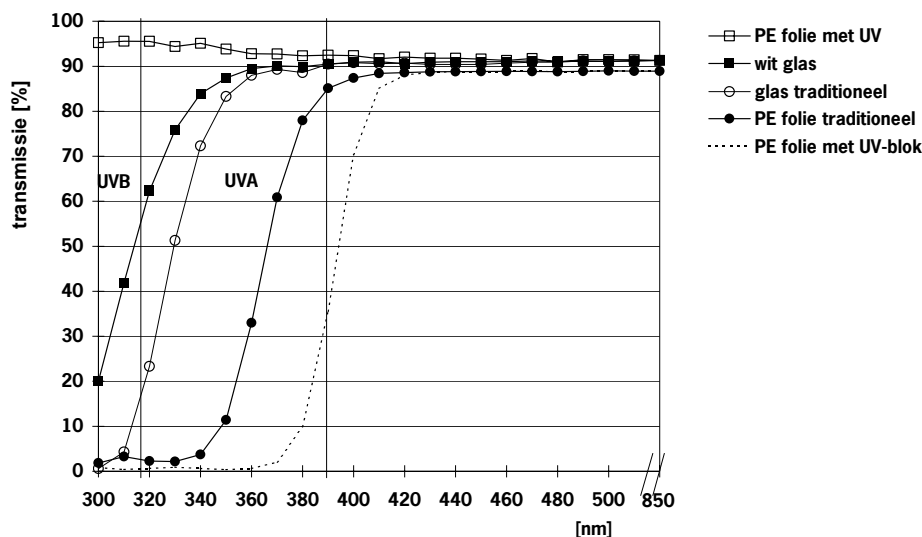
Lichtdicht maken van de gevels wordt in de praktijk reeds toegepast op bedrijven die assimilatiebelichting toepassen en de gevels met vaste witte schermfolies afspannen tot boven de lampen ter voorkoming van lichtuitstraling.

Effect lichtverdeling op sturing naar gewenst product (uniformiteit)

Een structureel lager lichtniveau op sommige plekken zal altijd tot uiting komen in een afwijkende productie of productkwaliteit. Naarmate de eisen ten aanzien van uniformiteit groter worden zal dit een toenemend ongewenst effect zijn

4.2.2 UV transmissie

De ultraviolette straling is het aandeel van de globale straling met korte golflengtes en dus een hoog energiegehalte. Algemeen worden twee UV golflengtebanden onderscheiden: UV-A (315-400 nm) en UV-B (280-315 nm). Traditioneel tuinbouwglas laat bijna geen UV-B straling door, alleen een groot gedeelte van de UV-A straling (vanaf 315 nm). Recent is er speciaal witglas op de markt gebracht, dit laat wel een gedeelte van de UV-B straling door. Figuur 29 geeft een overzicht van de UV doorlatendheid van een aantal kasomhullingsmaterialen. De meeste kasfolies zijn niet doorlatend voor UV-B straling, ze laten maar een klein gedeelte van de UV-A (boven de 360 nm) door. Er bestaan ook folies en platen, die alle UV-B en UV-A straling (beneden de 400 nm) eruit filteren. ETFE, PVDF en PMMA-platen laten zowel UV-B als ook UV-A straling door. Platen van PC laten helemaal geen UV-B en UV-A straling door.



Figuur 29 UV transmissie van verschillende kasomhullingsmaterialen

4.2.3 NIR transmissie

Het grootste gedeelte van de NIR straling (700-3.000 nm) in de globale straling is niet nodig voor de plantenfotosynthese. Het wordt geabsorbeerd door het gewas, de bodem, de kasconstructie en de kasinrichting en omgezet in warmtestraling. Een gedeelte wordt ook gereflecteerd. Het aandeel absorptie en reflectie binnen de kas is afhankelijk van de eigenschappen en de hoogte van het gewas, het reflectievermogen van de bodem en de constructiedelen. Afhankelijk van de optische eigenschappen van het kasomhullingsmateriaal, wordt de gereflecteerde NIR straling weer naar buiten gelaten. De opgenomen straling in de kas wordt, afhankelijk van de oppervlakte temperatuur, omgezet in warmtestraling (FIR straling), die wel of niet door het kasdek wordt doorgelaten naar buiten (dit wordt verder besproken in hoofdstuk 4.2.4).

In gebieden met een hoge intensiteit van de zonnestraling zijn hoge temperaturen in de kas de beperkende factor voor de gewasproductie in de zomermaanden. Dat is de reden waarom in Zuid-Europese landen de gewasproductie in de kas vooral in de wintermaanden plaatsvindt. Voor deze gebieden zou het zinvol zijn om kasomhullingsmaterialen te ontwikkelen met een hoge reflectie van de NIR straling. Hierdoor komt er minder energie in de kas binnen, waardoor de opwarming minder wordt. Ook voor West-Europese landen kunnen dit soort ontwikkelingen bijdragen aan het meer gesloten houden van kassen in de zomermaanden. Aan de andere kant wil men in de wintermaanden zo veel mogelijk energie binnenhalen om een deel van de verwarmingsbehoefte te dekken. Een variabel schermmateriaal met NIR reflectie, wat in de zomermaanden ook overdag dicht wordt getrokken, kan hier een oplossing bieden.

4.2.4 FIR transmissie

De transmissie van een kasomhullings- of schermmateriaal voor langgolelige warmtestraling (FIR straling) heeft een grote invloed op de energiehuishouding van een kas. De in de kas komende globale straling wordt door in de kas aanwezige planten, bodem, kasconstructie en kasinrichting geabsorbeerd en gedeeltelijk gereflecteerd. Geabsorbeerde straling zorgt voor het opwarmen van deze delen. Een warm lichaam geeft deze warmte weer af o.a. in de vorm van warmtestraling, die volgens Stefan-Boltzmann afhankelijk is van de oppervlaktetemperatuur. Als een kasomhullings- of schermmateriaal niet doorlatend is voor warmtestraling, absorbeert deze de warmtestraling. Het kasdek zal zelf weer warmtestraling naar de hemel emitteren. Het resulterende warmteverlies is echter lager dan bij een FIR doorlatend dek. De doorlatendheid van een kasomhullings- of schermmateriaal voor warmtestraling heeft dus direct invloed op de energiebehoefte. Als een kasomhullingsmateriaal doorlatend is voor warmtestraling, kan in koude, heldere nachten in een onverwarmede kas de kasluchttemperatuur zelfs beneden de buitentemperatuur dalen, ook kan stralingsvorst aan het gewas ontstaan, omdat er een directe stralingsuitwisseling tussen relatief warm gewas en de koude hemel plaatsvindt.

Glas en natte materialen zijn nauwelijks of niet doorlatend voor FIR straling. De FIR transmissie hangt af van het type en de dikte van het materiaal. Met toenemende dikte neemt de FIR transmissie af. Basis PE-folies (droog) hebben een hoge FIR transmissie, welke door het toevoegen van speciale IR absorberende pigmenten verlaagd kan worden. In EVA-folies zorgt vinylacetaat (VA) voor de FIR absorptie. PMMA en PC zijn niet doorlatend voor warmtestraling.

Als de FIR doorlatendheid van materialen kleiner dan 20% is, worden deze materialen “thermisch” genoemd.

Voor de energieschermen spelen zowel de FIR reflectie als transmissie een grote rol. Om de warmtestraling zo veel mogelijk te blokkeren is het nodig dat de FIR transmissie zo klein mogelijk is. Vervolgens zal naarmate de FIR reflectie hoger is het warmteverlies van het gewas via warmtestraling lager zijn. Bij een gegeven transmissie neemt de emissie af bij toenemende reflectie (hoofdstuk 4.2.4 en 4.2.5).

Tabel 17 geeft de doorlatendheid voor langgolelige warmtestraling van verschillende kasomhullings- en schermmaterialen weer.

Tabel 17 Doorlatendheid voor langgolelige warmtestraling (FIR straling) van verschillende kasomhullings- en schermmaterialen

Materiaal	Dikte	Transmissie voor warmtestraling
Glas	4 mm	0%
PE folie	200 µm	40-60%
PE-IR folie	200 µm	20-40%
EVA folie	180 µm	20-40%
ETFE folie	100 µm	15-20%
PC plaat	12 mm	0%
PMMA plaat	16 mm	0%
Gebreid polyester wit	140 g m ⁻²	22%
Gebreid polyester wit	150 g m ⁻²	11%
Gebreid polyester zwart		5%
Polyester weefsel wit		12%
Polyester weefsel zwart		12%
Polyester weefsel transparant		ca. 50%
Polyester weefsel gealuminiseerd		3%
Zwart folie		0%

4.2.5 Emissie

De emissiecoëfficiënt van een kasomhullings- of schermmateriaal heeft bij een droog materiaal ook grote invloed op de energiehuishouding van de kas. Zij geeft aan hoeveel straling door het oppervlak wordt geëmitteerd ten opzichte van een zwarte straler (emissiecoëfficiënt= 1) met dezelfde oppervlaktetemperatuur. De emissiecoëfficiënt is gelijk aan de absorptiecoëfficiënt van het materiaal in hetzelfde golflengtegebied, dus bij dezelfde oppervlaktetemperatuur. Door absorptie van warmtestraling vanuit andere oppervlakken warmt het materiaal op, ook wordt warmtestraling afgegeven afhankelijk van zowel de oppervlaktetemperatuur als de emissiecoëfficiënt van het materiaal. Een uniform materiaal heeft aan beide kanten dezelfde emissiecoëfficiënt, materialen met een verschillende boven- en onderkant variëren in emissiecoëfficiënt. Een nat kasomhullings- of schermmateriaal, veroorzaakt door condensatie of regen, heeft altijd een emissiecoëfficiënt van >0,8. In Tabel 18 worden de emissiecoëfficiënten van verschillende kasomhullings- en schermmaterialen weergegeven voor het FIR golflengtegebied.

Tabel 18 Emissiecoëfficiënten van verschillende kasomhullings- en schermmaterialen (FIR straling)

Materiaal	Dikte	Emissiecoëfficiënt
Glas	4 mm	0,8
Hortiplus	4 mm	0,3
PE folie	200 µm	ca. 0,4
PE-IR folie	200 µm	ca. 0,7
EVA folie	180 µm	ca. 0,6
ETFE folie	100 µm	0,78
PC plaat	12 mm	0,83
PMMA plaat	16 mm	0,84
Gebreid polyester wit	140 g m ⁻²	63%
Gebreid polyester wit	150g m ⁻²	74%
Gebreid polyester zwart		75%
Polyester weefsel wit		78%
Polyester weefsel zwart		80%
Polyester weefsel transparant		50%
Polyester weefsel		0,6-0,7%
Zwart folie		0%

Samenvatting hoofdstuk 4.2

- Globale straling bestaat uit een direct en een diffuus stralingsaandeel. Omdat gedurende de winter ca. 75% van de globale straling diffuus is door bewolking, is naast de PAR transmissie voor direct invallend licht tevens de PAR transmissie voor diffuus invallend licht van belang. Afhankelijk van de invalshoeken treden reflectieverliezen op. Ook de dakhelling van de kas en de oriëntatie van kas is hierbij van belang.
- De lichtverstrooiing of haze van de kasomhullingsmaterialen is een maat voor de helderheid van het materiaal. Meer diffuus licht in de kas bevordert de lichtbenutting in een hoog gewas. Over de lichtverstrooiing van kasdek- en schermmaterialen is echter nog weinig bekend.
- De UV transmissie is afhankelijk van het type materiaal. Blank glas laat geen UV-B straling door, alleen grote gedeelten van de UV-A straling vanaf 320 nm. De meeste folies zijn niet doorlatend voor UV-B, ze laten maar een klein gedeelte van de UV-A straling boven de 360 nm door. Er bestaan ook folies en platen, die alle UV-B en UV-A straling (beneden de 400 nm) eruit filteren, zoals ETFE-folie en PMMA-platen. Anderen laten helemaal geen UV-B en UV-A straling door, zoals PC.
- De NIR straling is niet nodig voor de plantenfotosynthese maar draagt indirect bij aan de opwarming van de kas. Dit is een ongewenst effect in de zomer, maar zorgt in de winter voor een energiebesparend effect. Een variabel scherm met NIR reflectie kan hier mogelijk een oplossing bieden.
- De FIR transmissie (doorlatendheid voor langgolvlige warmtestraling) is afhankelijk van het type materiaal en de materiaaldikte. Glas, PMMA en PC zijn niet doorlatend voor FIR, ETFE in geringe mate en bij PE en EVA is dit afhankelijk van de samenstelling van de folies. Met toenemende FIR transmissie van het kasomhullings- of schermmateriaal stijgt het energieverbruik van de kas.
- De emissiecoëfficiënt van het materiaaloppervlak is ook belangrijk voor het energieverbruik van de kas. De emissiecoëfficiënt van glas, PMMA, PC is hoog. Door een lage emissiecoating kan deze verlaagd worden, het energieverbruik neemt dan af. De emissiecoëfficiënt van folie is lager en bij een droog materiaal dus gunstiger voor het energieverbruik.

4.3 Welke mogelijkheden zijn er om materiaaleigenschappen aan te passen?

4.3.1 Verhoging van de transmissie

4.3.1.1 Oppervlakte-coatings

Bij transparante materialen zal altijd een deel van het licht aan een grensvlak lucht / kasomhullingsmateriaal reflecteren. De lichtreflectie treedt op door de plotselinge verandering van de brekingsindices van lucht en het kasomhullingsmateriaal. Bij zowel lichtinval als bij lichtuitval treden reflectieverliezen op, die afhankelijk zijn van de invalshoek. Bij de ontwikkeling van een transparant kasomhullingsmateriaal moet er naar gestreefd worden om de reflectie zo klein mogelijk te houden.

Voor de beïnvloeding van de reflecties bij glas en kunststof plaatmaterialen kan gedacht worden aan het aanbrengen van oppervlakte-coatings, bij kunststof folies is dit lastiger, gezien het productieproces van deze folies en de geringe massa hiervan. Er zijn twee coating-methoden bekend om reflectievermindering te bereiken, namelijk op basis van interferentie-coatings en op basis van brekingsindexverlaging.

Coating met interferentielagen

Bij de eerste methode wordt gebruik gemaakt van interferentie van het licht in de opgebrachte coating(s). Door een coating met een laagdikte van een kwart van de golflengte (kwart lambda laag genoemd) oftewel $d = \lambda / (4n)$ (met d de laagdikte, λ de golflengte van het licht en n de brekingsindex) en een brekingsindex van $n_c = n$ te kiezen, ontstaat uitdoving van de gereflecteerde lichtgolf waardoor de reflectie afneemt en dus de transmissie toeneemt. Het probleem is dat de optimale uitdoving optreedt voor één golflengte en één invalshoek. Deze methode wordt vaak toegepast bij lenzen van fotoapparatuur, waarbij een groot aantal interferentielagen zorgt voor een werking over het gehele zichtbare gebied en waardoor de lenzen veelal een blauwe kleur hebben. Voor fotolenzen geldt dat de invalshoek bij normale brandpuntsafstanden binnen redelijke grenzen vrijwel loodrecht is. Voor kasomhullingsmaterialen zou door goede keuze van aantal lagen, materialen en diktes de transmissie voor het gewenste golflengtegebied kunnen worden geoptimaliseerd. Er is een fabrikant geweest die claimde een tweezijdig vierlaags gecoat tuinbouwglas op de markt te kunnen brengen met een lichttransmissie loodrecht van 96%, maar dit is helaas niet haalbaar gebleken.

Coating met lage brekingsindex

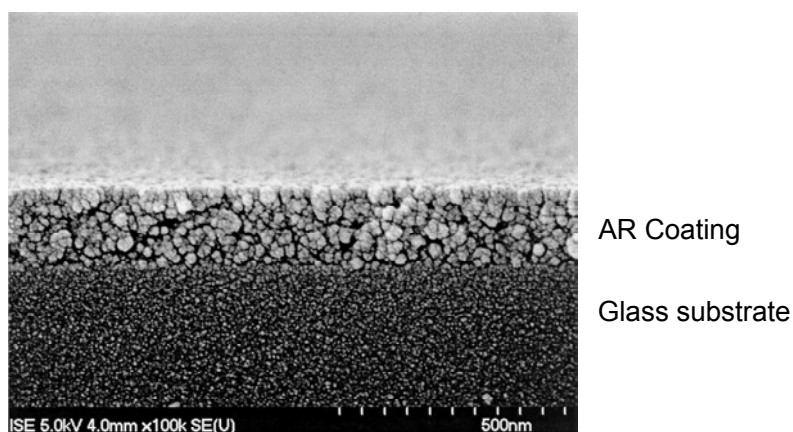
Een tweede methode is het aanbrengen van één of meerdere coating(s) met een lagere brekingsindex waardoor de reflectie afneemt. Omdat de reflectie sterk afhankelijk is van het brekingsindexverschil tussen beide media is het theoretisch mogelijk om met een groot aantal coatinglagen, waarbij de brekingsindex in iedere laag toeneemt tot de waarde van het kasomhullingsmateriaal zelf bereikt is, de reflecties op te heffen in een breed golflengtegebied. In

de praktijk blijken er echter geen materialen beschikbaar te zijn met een brekingsindex tussen 1,0 en 1,3 zodat deze opzet niet mogelijk is. Mede om financiële redenen wordt in de praktijk vaak één coatinglaag aangebracht met een brekingsindex van 1,3. Bepaalde kunststof coatings of anorganische materialen zoals fluorides hebben de gewenste lagere brekingsindex. Volgens Out en Breuer (1995) is met één coatinglaag van MgF_2 op glas een transmissieverhoging voor diffuus licht mogelijk van 84% naar 89%.

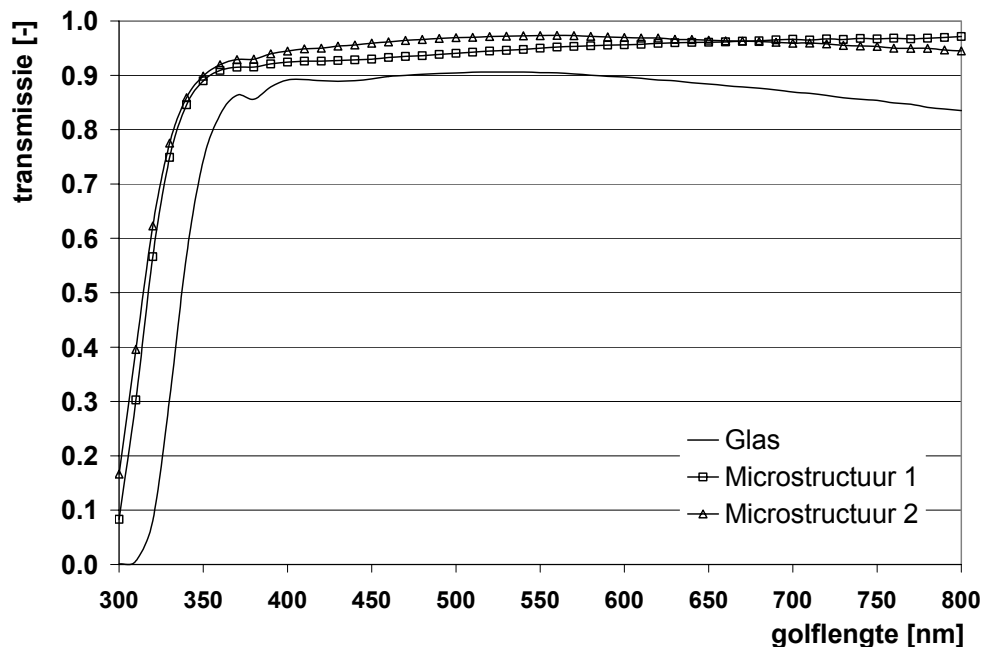
4.3.1.2 Oppervlakte structuur

Microstructuur

Met behulp van een microstructuur op het materiaal kan de reflectie aanzienlijk verminderen. Oppervlaktestructuren die kleiner zijn dan de golflengte van het licht hebben nauwelijks invloed op de breking van het licht en resulteren in een geleidelijke overgang van de brekingsindex aan het grensvlak, waardoor de lichtverliezen door reflecties aan een glasplaat verminderen van ca. 8% naar 1% (Kursawe en Hofmann, 2000). In de kastuinbouw en bij zonnecollectoren kunnen de materialen met verminderde reflectie ingezet worden om meer zonne-energie te winnen. Door een microstructuur op glas aan te brengen kan de transmissie voor loodrecht invallend licht van 89% tot 95-96% verhoogd worden (Figuur 31), voor diffuus licht is dit van 89 tot 93%. Door de firma Flaberg GmbH in Fürth (D) zal verdere productie opgestart worden (Sonneveld, 2003). Microstructuur coatings kunnen zowel aangebracht worden op gehard glas als op gewoon glas (afhankelijk van het fabricageproces).



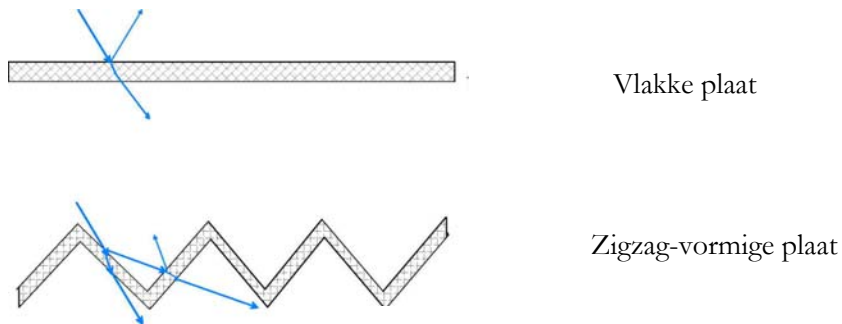
Figuur 30 Microscoopopname van een microstructuur coatinglaag



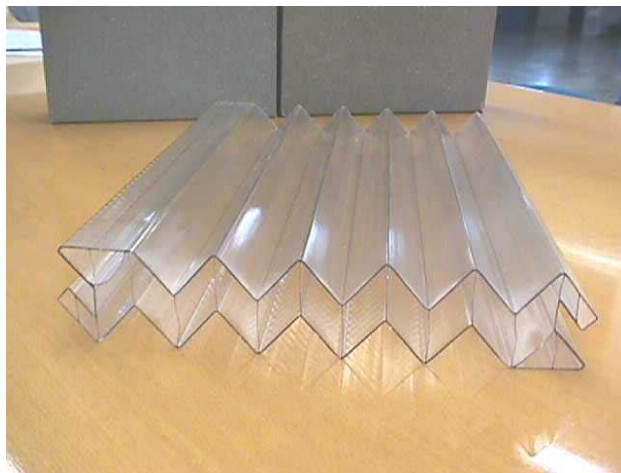
Figuur 31 Transmissie van verschillende ruiten met een microstructuur coating (Sonneveld, 2003)

Zigzag-structuur

De markt vraagt om relatief goedkope materialen met goede lichttransmissie, hoge warmte-isolatie en lange levensduur. De toepassing van coatings en dubbellaagse glasdekken met luchtsponw zijn dan opties. Echter, ook andere materialen kunnen hierbij worden beschouwd, zoals harde en flexibele kunststoffen. Harde kunststoffen hebben ten opzichte van glas het voordeel dat ze in vele gewenste vormen zijn te produceren. Dit maakt het bijvoorbeeld mogelijk de lichttransmissie te verbeteren door gebruik te maken van een (eventueel dubbellaags) zigzag-gevormd materiaal (Sonneveld, 2002). Onderzoek uitgevoerd door A&F (voorheen IMAG) samen met General Electric Plastics heeft aangetoond dat het technisch mogelijk is om een dubbelwandige, geëxtrudeerde kunststofplaat in zigzag-vorm te maken, die ongeveer dezelfde doorlatendheid voor diffuus licht heeft als enkelglas van 4 mm en waarmee gelijktijdig een energiebesparing op jaarbasis behaald kan worden van ca. 20% (Figuur 33). Dit wordt bereikt door de betere isolatiewaarde van deze plaat. Het principe van de lichtreflectie en -transmissie bij een vlakke plaat en een zigzag-constructie is weergegeven in Figuur 32. De productiewijze maakt het aan het materiaal toevoegen van pigmenten en coatings mogelijk, waardoor optimalisatie van transmissie, reflectie en absorptie van licht, warmte-isolatie, condensgedrag en de krasbestendigheid kan worden bereikt bij dit soort platen.



Figuur 32 Het principe van de transmissie en reflectie van een lichtstraal, die een vlakke plaat treft (boven) en een zigzag-vormige plaat (onder)



Figuur 33 PC-zigzag plaat, dubbelwandig met zijdelingse klikverbinding

4.3.2 Verandering van het stralingsspectrum

Alle binnenkomende straling in de kas wordt gefilterd door het omhullingsmateriaal, al dan niet in combinatie met een schermmateriaal. Een deel van de straling wordt geabsorbeerd en gereflecteerd door de omhulling en een deel wordt doorgelaten in de kas (transmissie) en bereikt de planten. Een omhullingsmateriaal met spectraalselectieve eigenschappen kan gebruikt worden om de morfologie en fysiologie van de planten te beïnvloeden. De spectraalselectiviteit kan bereikt worden met verschillende fysische principes: absorptie, reflectie, fluorescentie, interferentie, fotochromisme of thermochromisme (Hoffmann en Waaijenberg, 2001). Het integreren van verschillende pigmenten in transparante kunststoffen of het toevoegen van een coating op het materiaaloppervlak, om de gewenste selectiviteit te bereiken, kan resulteren in een verandering van de optische eigenschappen van materialen. Zodoende moeten dus altijd alle relevante optische eigenschappen in combinatie worden beoordeeld. De genoemde principes met de hiervoor geschikte materialen worden hieronder meer in detail beschreven.

4.3.2.1 Absorptie

Absorptie is een fysisch proces waarbij een gedeelte van de straling als het ware ‘ingeslikt’ wordt. Als de straling het materiaal passeert, wordt daarbij de intensiteit gereduceerd en wordt de geabsorbeerde energie omgezet in warmte (Meyer, 1969). In fotoselectieve omhullingen gebaseerd op het principe van spectraal selectieve absorptie wordt de globale straling in het ultraviolet (UV), het zichtbare (PAR) en het nabije infrarood (NIR) selectief geabsorbeerd. Uiteraard wordt complementair de globale straling ook selectief gereflecteerd.

Het UV deel van de globale straling draagt bij aan de afbraak van de polymeer-structuur (veroudering). Daarom worden speciale additieven toegevoegd gedurende het productieproces, die de levensduur van het materiaal verlengen. Niet gestabiliseerde kunststoffen (zonder additieven) worden binnen enkele maanden afgebroken door het UV licht en zijn dus niet geschikt als omhullingsmateriaal. PE-folies met UV absorbers zijn veel meer geschikt. In het algemeen zijn deze dus niet meer transparant voor UV-B straling. Sommige kunststoffolies filteren ook de UV-A straling eruit en worden dan ‘UV-bloc’ kunststoffolies genoemd. Verschillende pigmenten veroorzaken de selectieve absorptie in kasfolies of –platen. Materialen met absorptie pigmenten, die werken in het UV gebied laten het hele zichtbare licht door en zijn daarom transparant. Ze hebben normaal een hoge PAR doorlatendheid.

Materialen met absorptie pigmenten, die in het zichtbare gebied werken, tonen de doorgelaten kleur, terwijl de andere kleur wordt geabsorbeerd. De PAR transmissie wordt verlaagd door de aanwezige hoeveelheid pigment in het polymeer (Daponte, 1997). Het hoofddoel van deze materialen is schaduw geven. Er zijn vele gekleurde kunststof omhullingsmaterialen op de markt in paars, blauw, groen, rood, enz. Soms worden deze materialen, in het bijzonder degenen die het verrood absorberen, ook gebruikt voor fotomorfogenese (Hoffmann, 1999a).

Naast absorptie pigmenten in het UV of zichtbare gebied van het spectrum zijn er ook materialen die absorberen of reflecteren in het nabije infrarood gebied (NIR, 700-3.000 nm). Het hoofddoel van deze materialen is koeling. Sinds vele jaren werken wetenschappers en bedrijven aan omhullingsmaterialen om de binnentemperatuur significant omlaag te brengen. Echter er zijn nog geen kunststoffolies met NIR absorberende of reflecterende pigmenten commercieel beschikbaar. Er zijn een aantal prototypen van verschillende producenten, welke op dit moment in de internationale tuinbouwpraktijk getest worden.

Materialen met absorptie van rode en ver-rode straling

Met speciale filters is het mogelijk om bepaalde golflengtes uit de globale straling te filteren. In het zogenaamde ‘vloeibaar-dak’ systeem worden vloeistoffen gebruikt die de spectrale samenstelling van de natuurlijke straling veranderen. Deze vloeistoffen worden door de spouwruimte van dubbellaagse platen op een kasdek gepompt. Nadat in de eerste proeven delen van de infrarood straling uitgefilterd werden om temperatureffecten te bereiken (bijv. Morris et al., 1958; Canham, 1962) werden later delen van het zichtbare licht uitgefilterd voor specifiek onderzoek van de plantmorfologie.

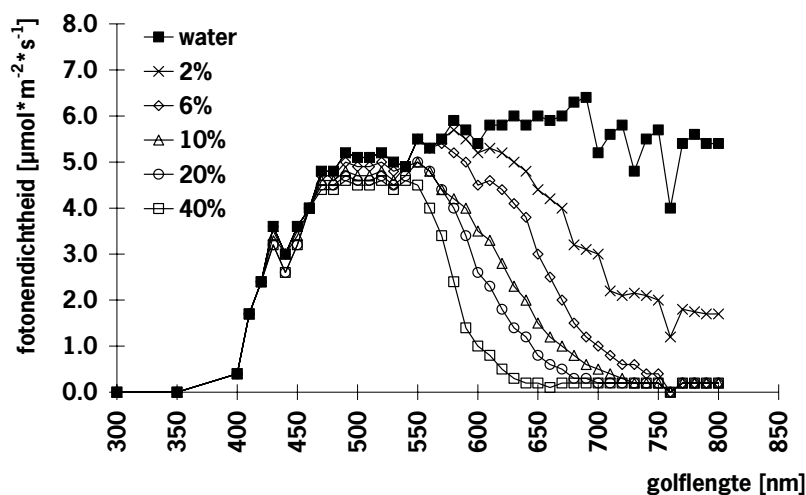
Pettersen (1984) werkte met een CuSO_4 -oplossing in het 'vloeibare-dak' systeem. Door de concentratie te wijzigen absorbeert deze blauwkleurige oplossing meer verrood straling, maar ook meer rode straling (Figuur 34). Als gevolg hiervan neemt de R:FR-verhouding (rood-verrood verhouding) toe met toenemende concentratie tot aan een 10% CuSO_4 -oplossing en neemt dan weer af. Tegelijkertijd neemt de verhouding van blauwe tot rode straling (B:R) af evenals blauw tot verrood (B:FR) (Tabel 19) en de doorlatendheid voor PAR. Het schaduwgevend effect bij een 6% CuSO_4 -oplossing is 34% en deze stijgt tot 58% bij een 40% CuSO_4 -oplossing (Rajapakse et al., 1992). Naast CuSO_4 werden andere stoffen gebruikt, die de complementaire kleur absorberen volgens hun eigen kleur en aldus de spectrale verdeling van de straling wijzigen (Tabel 20). Mortensen en Strømme (1987) beschreven de constructie van het 'vloeibare-dak' met verschillende kleurstoffen. De auteurs benadrukken dat reeds kleine wijzigingen van de R:FR verhouding tot dezelfde effecten leiden als grote wijzigingen van de B:R verhouding (Mortensen et al., 1987).

Tabel 19 Verhouding R:FR (rood-verrood), B:R (blauw-rood) en B:FR (blauw-verrood) van CuSO_4 oplossingen met verschillende concentraties in water (Rajapakse et al., 1992)

CuSO_4 concentratie [%]	rood:verrood		blauw:rood	blauw:verrood
	smal 655-665 nm: 725-735 nm	breed 600-700 nm: 700-800 nm	400-500 nm: 600-700 nm	400-500 nm: 700-800 nm
0	1,1	1,1	0,7	0,9
2	1,9	2,1	1,0	2,0
4	2,8	3,3	1,2	4,1
6	4,0	5,2	1,4	7,7
8	4,7	6,4	1,7	11,6
10	4,7	6,7	2,1	14,0
15	3,5	6,0	3,2	19,1
20	1,7	3,0	3,8	14,0
30	1,3	2,8	7,7	18,6
40	1,1	2,0	11,4	20,9

Tabel 20 Spectrale absorptie van verschillende kleurstoffen opgelost in water of geïntegreerd in een polymeer (0 geen absorptie; + geringe absorptie; ++ gemiddelde absorptie; +++ hoge absorptie; ↑ toenemende verhouding ; ↓ afnemende verhouding)

kleurstof	absorptie			Verandering verhouding	
	blauw	rood	verrood	blauw:rood	rood/verrood
neutraal, water	0	0	0	0	0
blauw-verrood, CuSO ₄	0	+	+++	↑↑	↑↑↑
Blauw	0	+++	0	↑↑	↓↓↓
Groen	+	+	0	↓	↓
Geel	+++	0	0	↓↓↓	0
Oranje	++	0	0	↓↓	0
Rood	+	0	0	↓	0



Figuur 34 Absorptie van CuSO₄-oplossingen met verschillende concentraties en water (Rajapakse et al., 1992)

Gekleurde folies

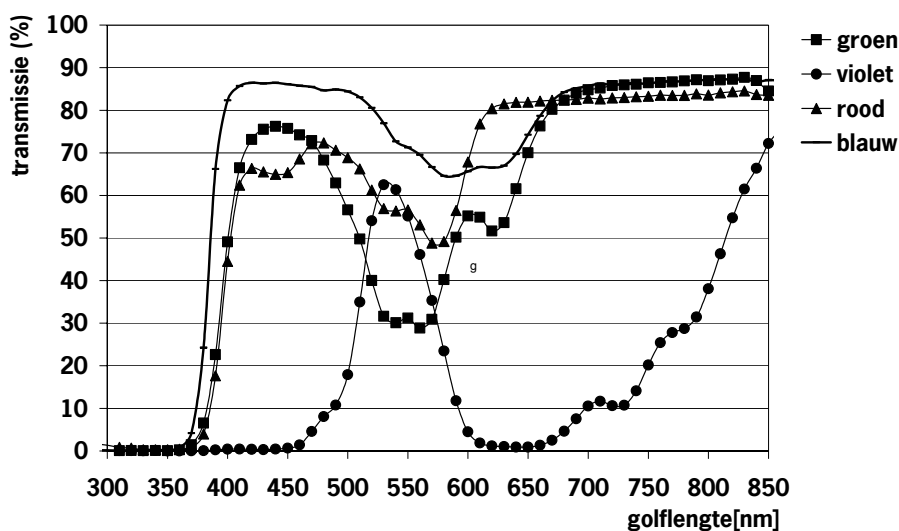
De eerste pogingen om gekleurde filters in de vorm van kunststof folie te gebruiken werden gedaan door Israëlische wetenschappers in de zestiger jaren. Kadman-Zahavi et al. (1976) gebruikte gekleurd celluloid. Niet alleen de betrokkenheid van phytochroom maar ook de deelname van een B/UV-A fotoreceptor wordt vergelijkbaar geacht aan de onderzoeken met CuSO₄ (Khattak en Pearson, 1997; Oyaert et al., 1997). Thans zijn er echter veel verschillende gekleurde kunststoffolies beschikbaar op de markt (Figuur 35). Een verscheidenheid aan

producten is getest door Hoffmann (1999b), maar alleen verrood absorberende prototypes waren in staat om de stengellengte significant te reduceren.

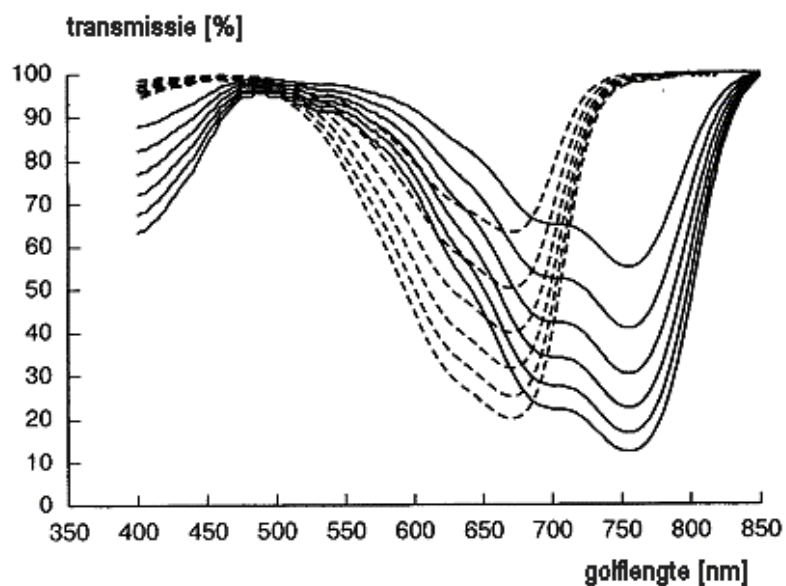
Met de ontwikkeling van fotoselectieve kasomhullingen of schaduwmaterialen, die de R:FR verhouding verhogen, kunnen tuinders en sierteeltproducenten de kosten reduceren van groeiregulerende chemicaliën, het gezondheidsrisico van het personeel en consumenten verkleinen en ook een vermindering van de milieuvervuiling bevorderen (Rajapakse et al., 2000). De eerste kunststoffolie prototypes met een specifieke verandering van de R:FR verhouding zijn geproduceerd door Mitsui Chemicals. Een kleurstof met een maximum absorptie bij 670 nm (rood) of een kleurstof met een maximum absorptie bij 755 nm (verrood) is opgenomen in een polymeer (PMMA of PET) (Figuur 36). Onder deze kunststoffolies veranderde de R:FR verhouding respectievelijk naar 0,5 of 1,5. De totale lichtdoorlatendheid van deze folies is afhankelijk van de pigmentconcentratie.

Het eerste commerciële product met een specifieke wijziging van de R:FR verhouding werd ontwikkeld door BPI Agri (Visqueen) samen met de Universiteit van Reading (BPI Agri, 2004). Zij ontwikkelden kleurstoffen gebaseerd op phthalocyanine derivaten, die een gelijke spectrale transmissie hebben als de kleurstoffen ontwikkeld door Mitsui Chemicals (Figuur 37). De absorptie karakteristieken van phthalocyanines laten een selectieve filtering van noodzakelijke golflengten toe, voor opwekking van één van de twee phytochrome vormen. De kunststoffolie wordt gebruikt als een scherm binnen een glazen kas. Het wordt aanbevolen om deze ieder jaar te vervangen als gevolg van de duurzaamheid van de pigmenten.

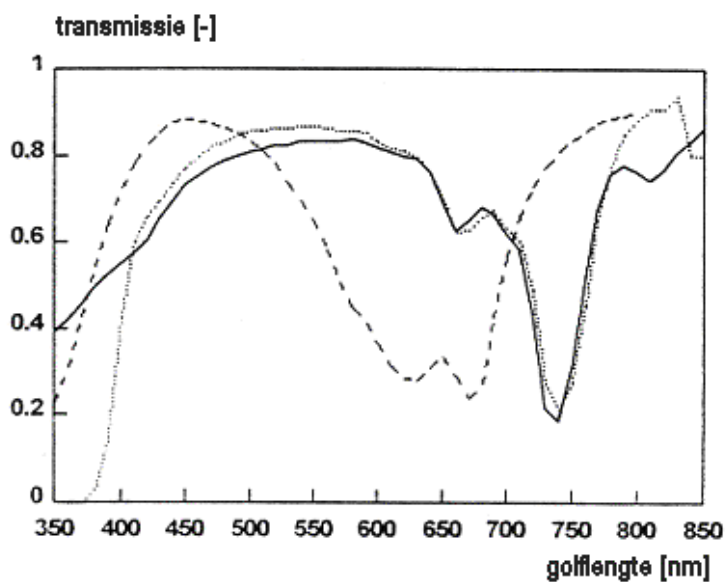
A&F (voorheen IMAG) werkte ook aan verbeteringen van verrood absorberende filters. Zij vond twee pigmenten die de lichtdoorlatendheid verbeteren en ook de transmissie in het UV gebied. De absorptie in verrood is vergelijkbaar met de Japanse en Engelse filters (Figuur 38).



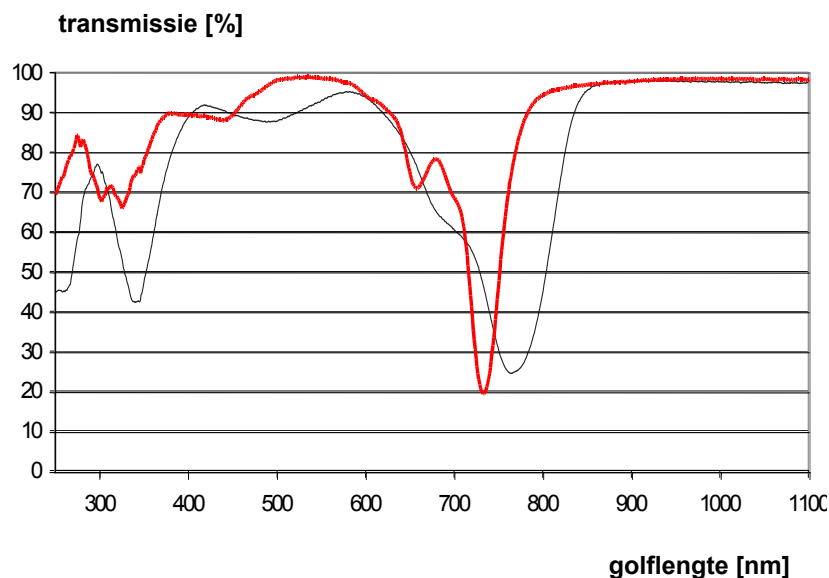
Figuur 35 Transmissie van verschillende gekleurde kunststoffolies, die absorberende pigmenten in het zichtbare gebied bevatten (Hoffmann, 1999c)



Figuur 36 Transmissie van een kleurstof (Mitsui Chemicals) met verschillende concentraties van 5 tot 17,5 mg/l in 2,5 mg/l stappen, opgelost in tolueen
verrood-absorberende kleurstof (—) en rood-absorberende kleurstof (- - -)
(Murakami et al., 1997)



Figuur 37 Transmissie van verschillende phthalocyanines (BPI Agri)
verrood-absorberende kleurstoffen Zn phthalocyanine (—), Cu phthalocyanine (····) en
rood-absorberende kleurstof (- - -) (Haeringen et al., 1998)



Figuur 38 Transmissie van verschillende verrood absorberende pigmenten in olie gevonden door Agrotechnology & Food Innovations

Materialen met absorptie van ultraviolette straling

Onlangs is er specifieke aandacht gegeven aan het gebruik van speciale UV absorberende pigmenten in kunststoffolies. UV-B doorlatende folies reduceren de stengelstrekking van sommige planten. Het gebruik van UV-B transparante materialen zal minder effect hebben in de zomer tijdens een hoge PAR straling en hoge buitentemperaturen (Hoffmann, 1999b). Het gebruik van chemische groeibevorderaars kan gereduceerd worden in combinatie met nieuwe klimaatregel-strategieën. Echter het gebruik van deze chemicaliën kan niet vervangen worden door UV-B transparante materialen voor de productie van planten met een intensieve lengtegroei (Hoffmann, 1999b). In het algemeen is het effect van UV-B straling op de bloei gering.

Naast de reductie van planthoogte dragen UV-B transparante omhullingsmaterialen bij aan het harden van planten. Als jonge planten gekweekt zijn onder een UV-B transparant omhullingsmateriaal kan vermeden worden dat directe zonbestraling in een latere buitencultuur schade geeft.

Ook is het mogelijk om meer intensieve bloemkleuren te verkrijgen als UV-B transparante omhullingsmaterialen worden gebruikt. Verder kan UV-B straling kleuren van bladeren veroorzaken. Tot nu toe is er zeer weinig praktijkgericht onderzoek naar het samengaan van kleuren en smaak uitgevoerd. Het is wel bekend dat de productie van flavonoiden gestimuleerd kan worden door kunstmatige UV bestraling, waardoor de smaak van verschillende kruiden en groenten verbetert. Aan de andere kant heeft UV-B straling een negatief effect op rozen, namelijk het ontstaan van het zgn. 'petal blackening'. Dit kan voorkomen worden door zgn. UV-bloc materialen toe te passen als omhulling (Raviv et al., 1988; Zieslin en Havelly, 1969).

Als de verhouding blauwe straling en UV-B straling laag is, kan een verhoogde infectie (bijv. botrytis) verwacht worden (Raviv en Reuveni, 1998; Reuveni et al., 1994). Daarom filteren de zgn. anti-botrytis kunststoffolies alle UV straling eruit <380 nm. Doordat de oriëntatie van insecten verbeterd wordt door UV straling is een toename van ziektes te verwachten, die veroorzaakt worden door bijv. trips en witte vlieg onder UV transparante materialen. Een toenemende tweedelijns schade veroorzaakt door meer virusoverdracht kan waargenomen worden. Aan de andere kant is een UV transparant materiaal voordelig voor de bestuiving van sommige planten, aangezien ook hommels UV straling nodig hebben voor oriëntatie (Benoit, 1998).

Commerciële materialen met en zonder UV blokkerende pigmenten zijn op de markt verkrijgbaar.

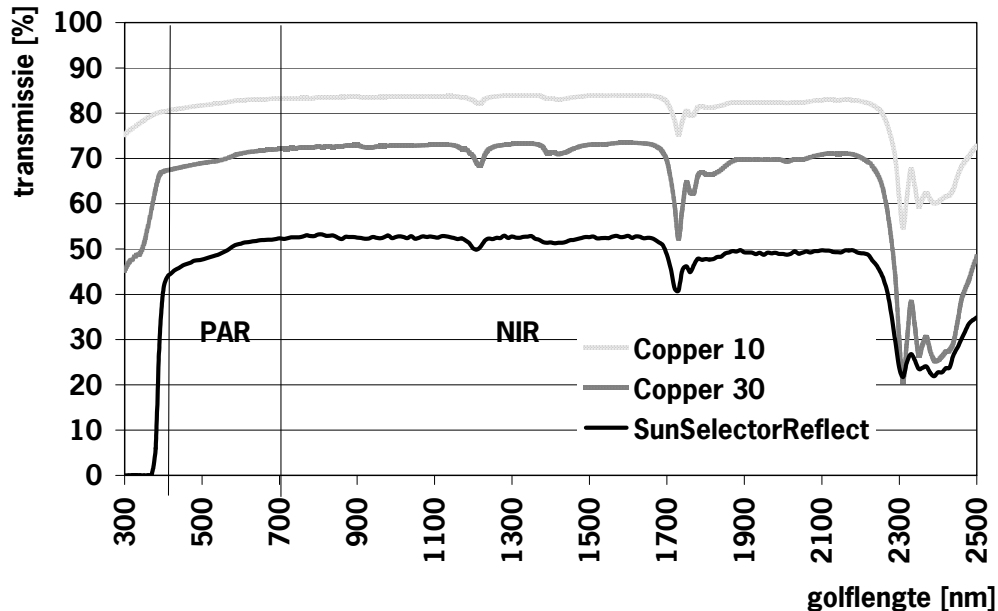
4.3.2.2 Reflectie

Om een schaduweffect te bereiken in kassen zijn er omhullings- of schermmaterialen beschikbaar die reflecterende oppervlaktes bevatten. Transparante kasomhullingsmaterialen bevatten fijn verdeelde metaaldeeltjes in het polymeer. Afhankelijk van het type metaal (bijvoorbeeld koper of aluminium) worden delen van de zonnestraling gereflecteerd (Daponte, 1997). De lichtdoorlatendheid van deze materialen wordt hierdoor gereduceerd. De meeste reflecterende materialen zijn niet selectief in het zichtbare gebied; zij reduceren de totale PAR straling en hebben aldus een schaduwgevend effect (Figuur 39). Dit soort folies kunnen worden gebruikt in gebieden met hoge instraling.

Er zijn ook folieprototypen met een selectieve reflectie in het NIR gebied. Deze hebben een positieve invloed op het kasklimaat zonder de plantengroei te veel te beïnvloeden (hoofdstuk 4.2.3).

Schermen

Schermmaterialen hebben juist de taak om straling te reflecteren. Schaduwschermen doen dit in het PAR gebied, energieschermen doen dit hoofdzakelijk in het FIR gebied. Een schermmateriaal met een selectieve reflectie in het NIR gebied maar juist een hoge PAR transmissie zou een mogelijkheid bieden om tijdens de zomermaanden ongewenste straling buiten de kas te houden.



Figuur 39 Transmissie van verschillende commerciële reflectie folies (Sun Selector Reflect van Ginegar, Israël en Copper 10 en 30 van Werra Plastic, Duitsland)

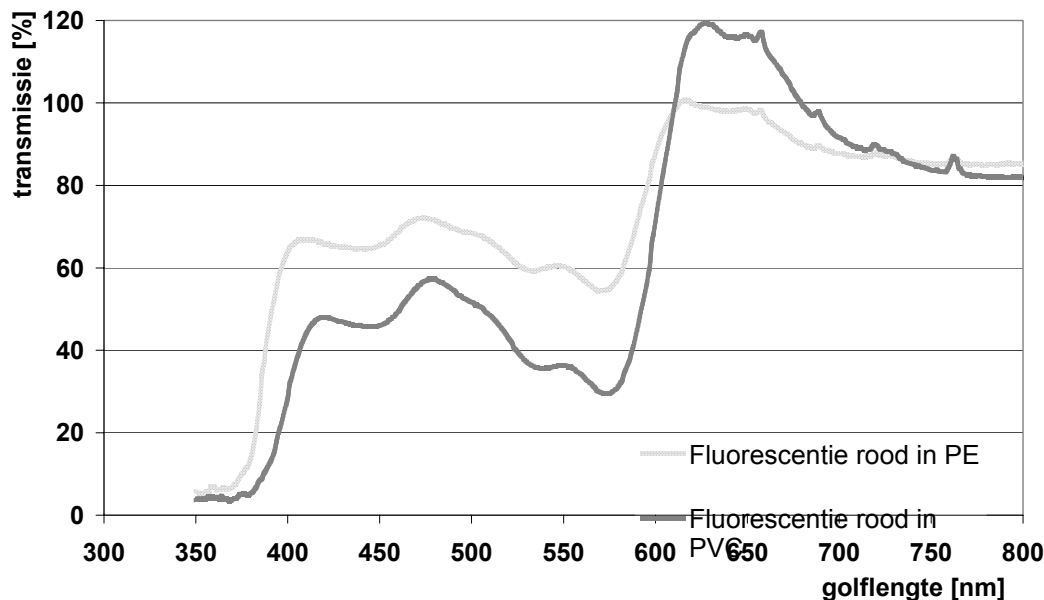
4.3.2.3 Fluorescentie

Fluorescentie is het glanzen van vaste materialen, vloeistoffen en gassen na bestraling. De opvallende stralingsenergie brengt de elektronen van de moleculen in het polymeer op een hoger energieniveau, die daarna terugvallen naar het uitgangsniveau, terwijl de karakteristieke fluorescerende straling geëmitteerd wordt. De emissie vindt plaats bij langere golflengtes dan de absorptie volgens de wet van Stokes (Meyer, 1969).

In kasomhullingsmaterialen worden fluorescerende pigmenten gecombineerd met absorptie pigmenten. Er zijn tuinbouwfolies op de markt met absorptie in het groene gebied en emissie in het rode gebied. Deze folies zien er rood uit. Verder zijn er materialen die in het UV gebied werken en emitteren in het zichtbare gebied. Het fluorescerende effect is afhankelijk van de hoeveelheid pigmenten in het polymeer. De duurzaamheid van fluorescerende pigmenten hangt af van de gebruikte soort polymeer en de stralingsintensiteit, soms is dit slechts 6-12 maanden. Fluorescerende materialen verlagen de PAR transmissie als zij absorberen in het zichtbare gebied van het spectrum.

In het verleden werden andere strategieën ontwikkeld in Israël om de R:FR verhouding te wijzigen. Sommige fluorescerende pigmenten absorberen delen van de groene straling en stralen dit weer uit in de vorm van rode straling met een langere golflengte, dergelijke fluorescerende pigmenten zijn toegepast in PVC kunststoffolies (Zarka en Zarka, 1985). De Hebrew University van Jeruzalem testte het gebruik van PE kunststoffolie in samenwerking met Ginegar, de fluorescerende eigenschap verdween echter al na 6-8 maanden (Shoshany, 1991). Zowel Pearson et al. (1995) als Kittas en Baille (1998) stellen dat de transmissie van PAR gereduceerd wordt ten

opzichte van standaard PE folies (Figuur 40). Men moet zich daarom afvragen of dergelijke materialen van nut zijn in gebieden met lage lichtintensiteit.



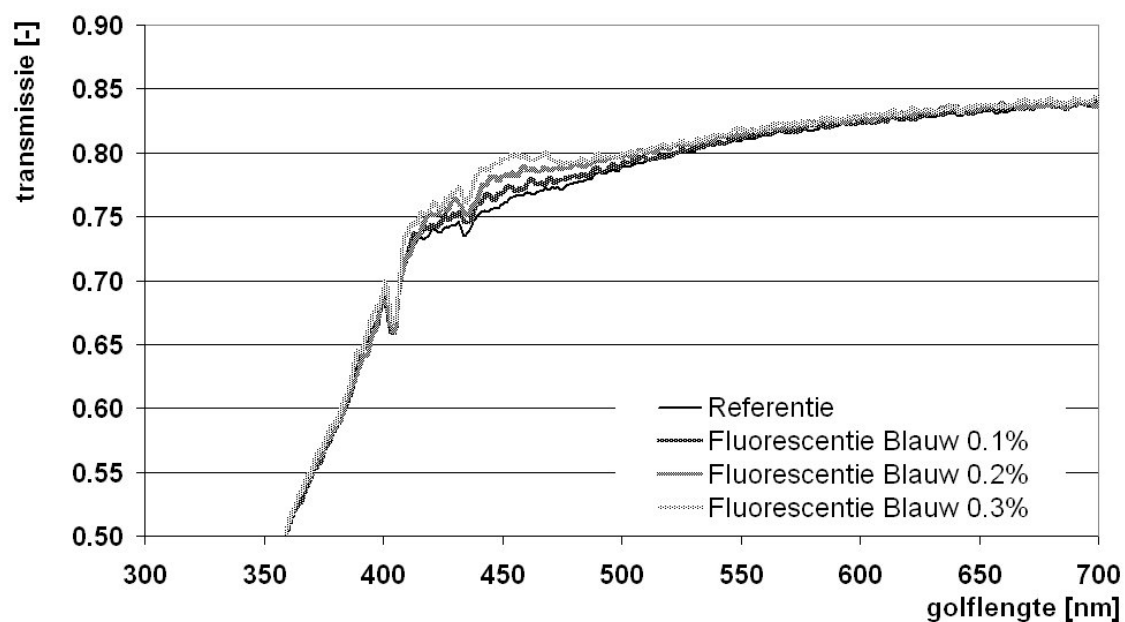
Figuur 40 Transmissie van fluorescerende materialen met absorptie in het zichtbare gebied, fluorescerende pigmenten in PE en PVC (Hoffmann, 1999c)

Sommige fluorescerende pigmenten absorberen ook ultraviolette straling en emitteren dit in de vorm van zichtbaar licht. Op deze wijze zal het aandeel PAR straling toenemen. Er zijn pigmenten, die UV straling absorberen en weer emitteren in het blauwe (Figuur 41) of rode gebied (Figuur 42). De toename van PAR straling is in hoge mate afhankelijk van de concentratie van het pigment in het polymeer (Figuur 41) en de hoeveelheid UV in de zonnestraling. De toename ligt in de orde van 1-2%. Sommige producten verhogen de R:FR verhouding maar verhogen niet de totale PAR transmissie (Figuur 42).

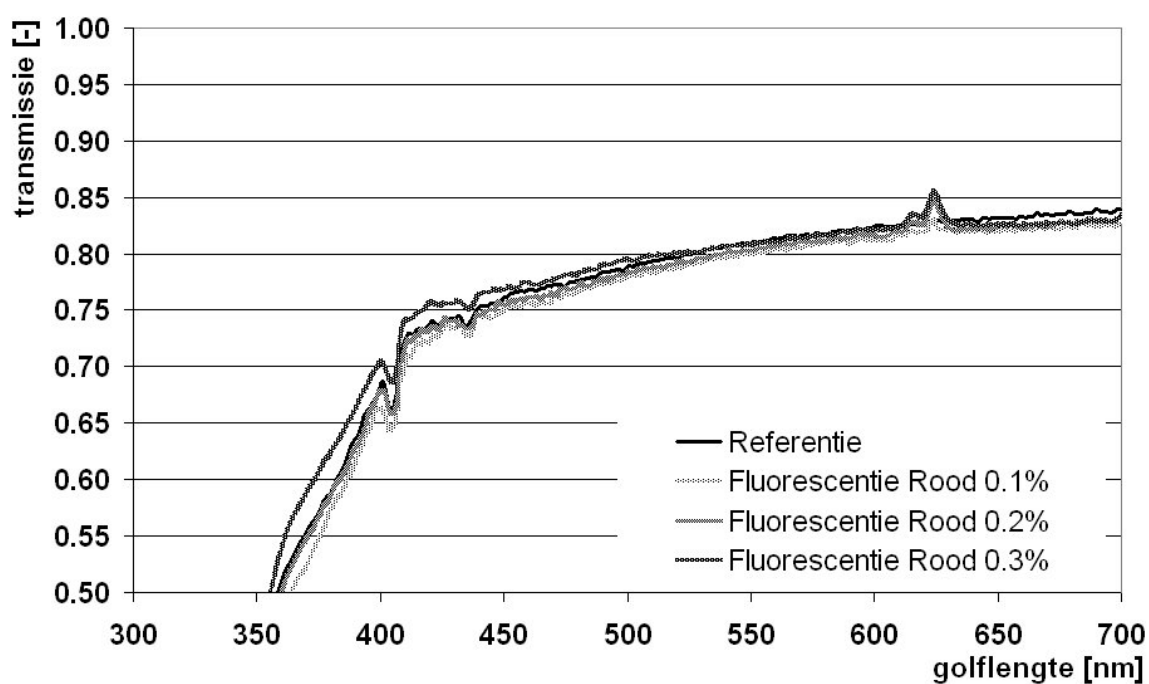
In het verleden zijn positieve effecten van folies met UV fluorescentie pigmenten op de opbrengst en biomassaproductie van verschillende groenten vastgesteld. Hier is nader onderzoek nodig.

Er is ook een nieuw materiaal van CIBA, het fluorescerend Smartlight. In het project “Haalbaarheid fluorescerend energiescherm” is dit materiaal nader onderzocht (Hemming et al., 2004). Het materiaal zet een gedeelte van de ultraviolette en blauwe straling om naar rode straling. De doorlatendheid van blauwlicht is onder dit materiaal gereduceerd, het aandeel roodlicht is verhoogd (Figuur 43).

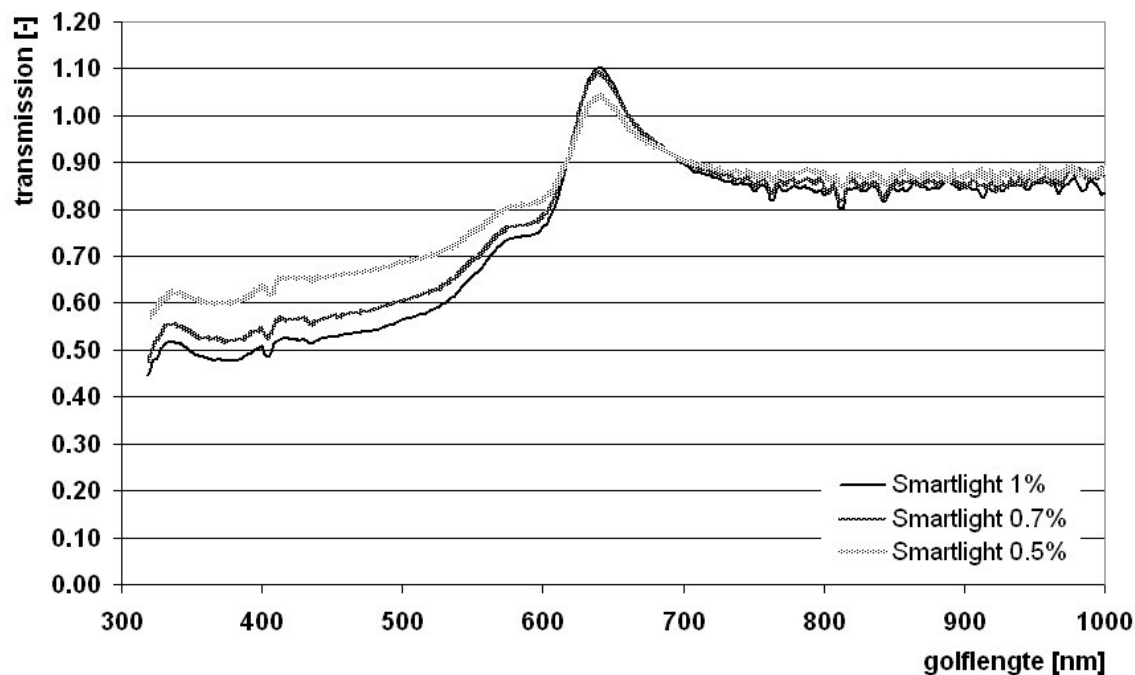
Verscheidende producenten hebben al pigmenten op de markt, maar commerciële tuinbouwfolies ontbreken nog. De leeftijd van de folies is sterk afhankelijk van de stabiliteit van het pigment zelf en het polymeer.



Figuur 41 Transmissie van blauw fluorescerende materialen met absorptie in het ultraviolette gebied in verschillende concentraties



Figuur 42 Transmissie van rood fluorescerende materialen met absorptie in het ultraviolette gebied in verschillende concentraties



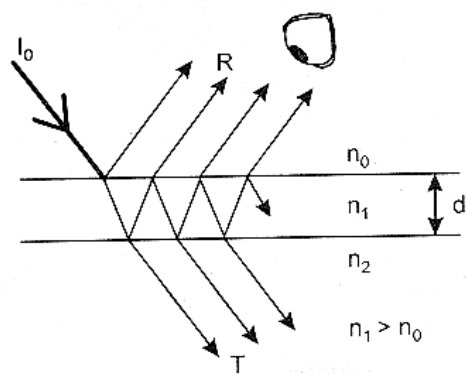
Figuur 43 Transmissie van een fluorescerend scherm (Smartlight) met absorptie in het ultraviolette en blauwe gebied in verschillende concentraties (Hemming et al., 2004).

4.3.2.4 Interferentie

Interferentie pigmenten bestaan uit verscheidene lagen dunne folies boven elkaar, die allemaal verschillende brekingsindices hebben. Door de verschillende brekingsindexen treedt er een zogenaamde interferentie van de gereflecteerde straling op. De opvallende lichtstraal wordt opgeschoven naar een langere golflengte. Als een lichtstraal een erg dunne laag materiaal treft met een dikte ongeveer gelijk aan de golflengte van het zichtbare licht, wordt de opvallende lichtstraal gesplitst in verschillende stralen door reflectie bij het bovenste en onderste grensvlak. Figuur 44 toont het interferentie principe. Het opnieuw samenvoegen van de individuele stralen vanaf iedere zijde van de folie leidt tot minimum en maximum intensiteiten voor bepaalde golflengtes. Het oog neemt deze intensiteitsverschillen waar als kleuren (Daponte, 1997).

Interferentie pigmenten, die gebruikt worden voor tuinbouwtoepassingen bestaan uit dunne mica deeltjes, die gecoat zijn met een dun laagje TiO_2 . Zij reflecteren selectief delen van het opvallende licht en laten de rest door. De kleur van deze pigmenten wordt hoofdzakelijk bepaald door de dikte van de TiO_2 -coating. Verder wordt het interferentie-effect ook beïnvloed door de invalshoek van de straling. Normaal veroorzaakt het pigment de hoogste lichtdoorlatendheid als de straling loodrecht valt op het pigmentoppervlak, want dan treedt er geen reflectie op. Aannemende dat de absorptie van het pigment gelijk aan nul is, zal al het licht doorgelaten worden (Daponte, 1997). Daarom is de PAR doorlatendheid van deze materialen afhankelijk van de invalshoek van de globale straling. Aangezien deze hoek aan veranderingen onderhevig is, varieert de PAR transmissie. Interferentie pigmenten in het polymeer zijn stabiel. Ze worden

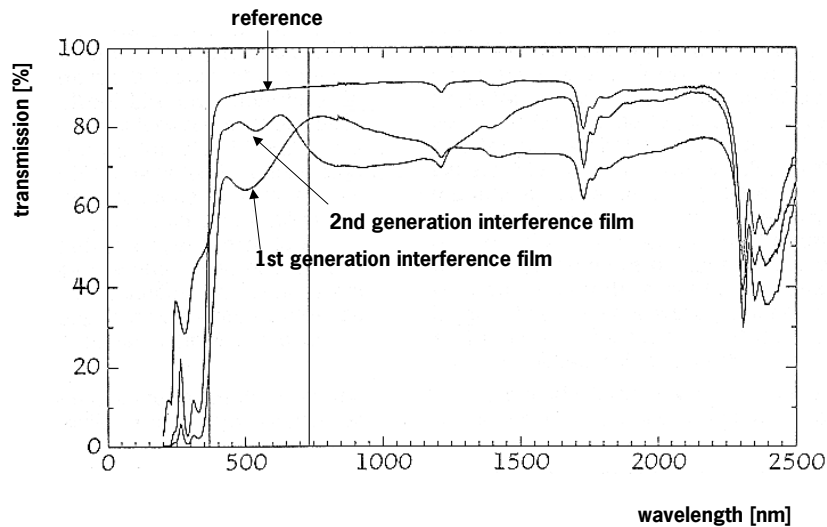
hoofdzakelijk gebruikt voor klimaatscontrole, doordat zij (delen van) de NIR straling (dus warmte) selectief reflecteren worden (Figuur 45 en Figuur 46). Interferentie filters zijn ontwikkeld en gepatenteerd door Merck, Darmstadt en Hyplast, België.



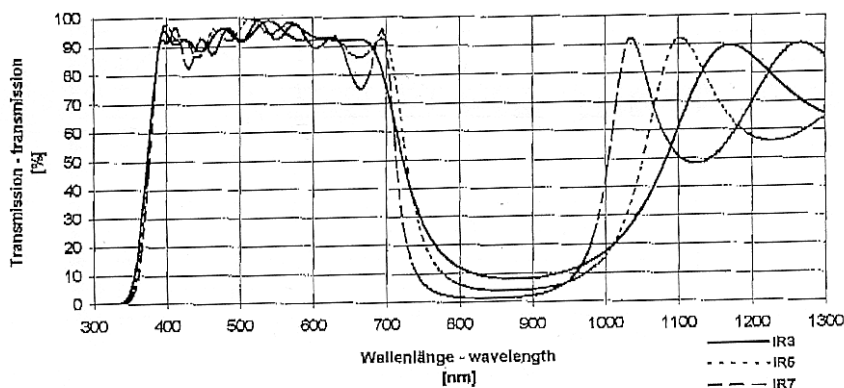
Figuur 44 Interferentie principe (Daponte, 1995)

Er zijn commerciële kunststoffolieproducten die groen-gele interferentie pigmenten bevatten, die delen van het zichtbare licht van het spectrum reflecteren en daardoor een schaduw effect geven, ze geven echter een diffuus karakter aan de folie (Verlode et al., 1995). Nieuwe generaties van interferentie kunststoffolies werken meer in het NIR, hierbij is de reductie van het PAR veel minder (Figuur 45). Deze folies geven een significante reductie van de binnentemperatuur in de kas, in het bijzonder gedurende de warmste perioden van de dag (Verlode en Verschaeren, 1997). In 1995 zijn ook prototypen met groen-gele, paarse en groene interferenties getest. Deze waren in staat om de planthoogte iets te reduceren (Daponte, 1995), maar hadden slechts een lage transmissie voor PAR.

Er is glas met een interferentie coating op de markt, dat de NIR straling reflecteert. Dit glas wordt gebruikt als warmteschild voor (kantoor)gebouwen. Interferentiepigmenten in folies zijn minder effectief (Figuur 45) dan dit glas. De totale lichtdoorlatendheid is ook gereduceerd, zodat toepassing slechts bij hoge lichtintensiteiten interessant is.



Figuur 45 Transmissie van verschillende kunststoffolies met interferentie (Verlode en Verschaeren, 1997)



Figuur 46 Transmissie van glas met interferentie -coatings (Prinz Optics, 1999)

4.3.2.5 Emissie

Het warmteverlies van een kasbedekking is voornamelijk afhankelijk van twee materiaaleigenschappen. Ten eerste is dit de doorlatendheid van het materiaal voor warmtestraling en als tweede de emissiecoëfficiënt voor deze straling in het golflengtegebied van 3-100 μm . Een verlaging van de emissiecoëfficiënt is mogelijk door op het materiaal een coating aan te brengen met een lage emissiewaarde. Enige nu bekende materialen op dit gebied zijn tin oxide (Out en Breuer, 1995; Chopra et al., 1983 en Lampert, 1981) en verschillende metaallagen zoals goud en zilver (Chopra et al., 1983 en Lampert, 1981, 1983 en 1987). Een probleem bij de eerstgenoemde coating is dat de lichttransmissie voor loodrecht opvallend afneemt van 89% naar 84% (respectievelijk van 83% naar 74% voor diffuus licht) (Out en Breuer, 1995). Door het aanbrengen van een tweede antireflectie-coating kan voor het kortgolfige gebied dit nadelig effect ongedaan gemaakt worden (transmissie neemt toe tot 87%; voor diffuus opvallend licht is dit

81%)(Out en Breuer, 1995). Een merknaam voor dit glas met een emissie-coating van tinoxide is Hortiplus (hoofdstuk 4.1.1).

Het aanbrengen van coatings met een lage emissiecoëfficiënt op folies is technisch moeilijk.

4.3.2.6 Fotochromisme

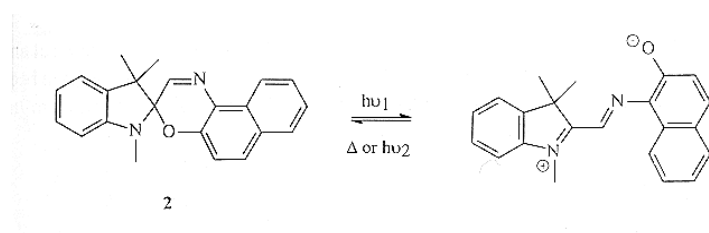
Speciale materialen bevatten fotochromatische pigmenten, die donkerder worden of van kleur veranderen onder invloed van straling in een specifieke golflengte. Als de straling wordt weggenomen komen ze terug in hun oorspronkelijke staat (Lozano-González et al., 1996).

Fotochromisme kan gedefinieerd worden als een omkeerbare verandering van de chemische status, veroorzaakt door elektromagnetische straling (in één of beide richtingen) tussen twee toestanden die een verschillende lichtabsorptie in verschillende golflengtegebieden hebben. De actieve straling is in het algemeen in het UV gebied (300-400 nm). De omgekeerde reactie kan gebeuren door een thermisch mechanisme in sommige systemen of de fotochemisch teweggebrachte vormen zijn thermisch stabiel in andere. In zulke systemen is de omgekeerde reactie hoofdzakelijk fotochemisch.

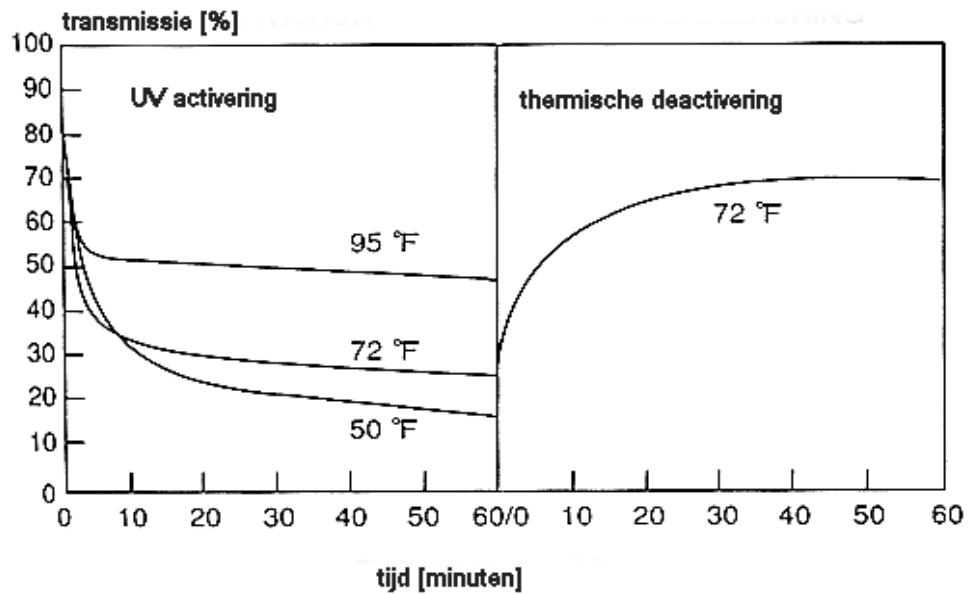
Spirooxazines hebben uitstekende fotochromische eigenschappen en worden daarom vaak gebruikt voor variabele transmissiematerialen zoals fotochromatische lenzen (Figuur 47). Ze zijn resistent voor UV veroudering ook onder constante bestraling (Crano en Guglielmetti, 1999).

Fotochromatische materialen worden bijvoorbeeld voor zonnebrillen gebruikt. De eerste fotochromatische lenzen hadden een lichttransmissie van 80% voor loodrecht opvallend licht (Figuur 48), welke gereduceerd werd tot 48% (35°C) of 14% (10°C) als ze geactiveerd werden (Figuur 49). Huidige fotochromatische pigmenten hebben een hogere lichttransmissie, een snellere reactie en zijn minder afhankelijk van de temperatuur (Crano en Guglielmetti, 1999).

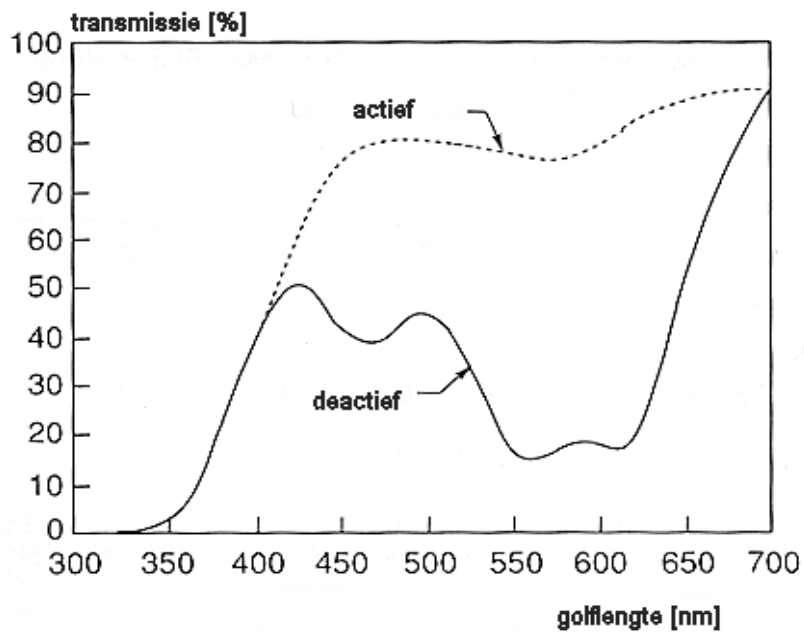
De eerste Japanse prototypen zijn beschikbaar voor kasomhullingsmaterialen (Lozano-González et al., 1996) met een positief effect op de plantengroei.



Figuur 47 Schema van een fotochromatisch pigment (Crano en Guglielmetti, 1999)



Figuur 48 Transmissie van Transitions® lenzen in geactiveerde en gedeactiveerde toestand (Crano en Guglielmetti, 1999)

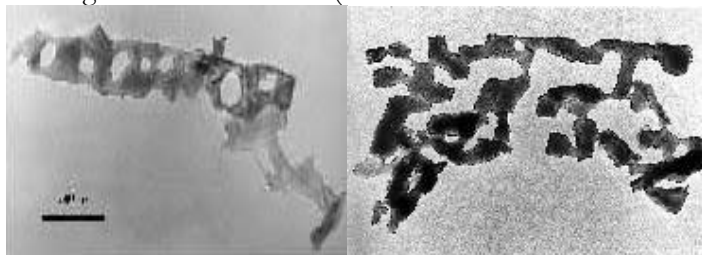


Figuur 49 Fotochromatische reactie van Transitions® lenzen (Crano en Guglielmetti, 1999)

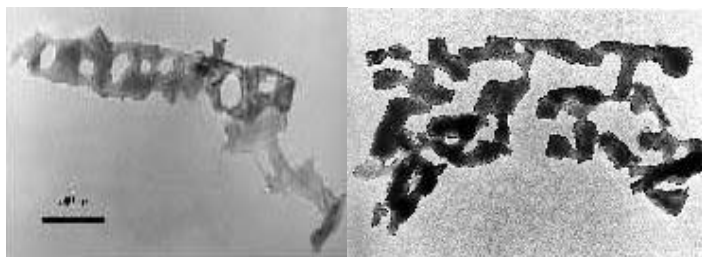
4.3.2.7 Thermochromisme

Als materialen van kleur veranderen over een gedefinieerd temperatuurbereik worden ze thermochromatisch genoemd. Thermochromatische materialen worden geproduceerd op basis van vloeibare kristal thermografie. De basis is een vloeibaar kristal in een thermodynamische fase tussen de pure vaste en de pure vloeibare fase. Dit bestaat in sommige organische samenstellingen onder bepaalde condities. Bij temperaturen onder de grenstemperatuur zal het thermochromatische vloeibare kristal in vaste vorm en transparant zijn. Als het op de grenstemperatuur zit en het wordt bestraald met wit licht (380-780 nm) dan zal dit resulteren in reflectie van een unieke golflengte van zichtbaar licht; het oog zal een speciale kleur herkennen. Als de temperatuur verder omhoog gaat door de materiaal-bandbreedte (temperatuur) heen zal de gereflecteerde kleur van het materiaal veranderen. Hierbij zal het materiaal uiteindelijk de pure vloeibare staat bereiken en zal dan terugkeren tot transparant. Dit fenomeen is reversibel. Er zijn pigmenten die in een breed temperatuurgebied actief zijn van 10°C tot 120°C en in bandbreedtes van 1°C tot 20°C (Farina, 1998; Parsley, 1991).

Er zijn thermochromatische ruiten commercieel verkrijgbaar welke uit een polymeer-water oplossing tussen twee dunne plasticfolies bestaat. Als de temperatuur afneemt, trekt zich het polymeer samen in deeltjes kleiner dan de golflengte van het licht, licht wordt doorgelaten, de lichttransmissie is ca. 90%. Als de temperatuur toeneemt tot 75°C strekt zich het polymeer weer in deeltjes groter dan de golflengte van het licht, licht wordt gereflecteerd, de lichttransmissie wordt gereduceerd tot 20% (



Figuur 50) (Suntek, 1998). Tot nu toe worden deze materialen alleen voor lichtkoepels gebruikt en zijn ze voor tuinbouwtoepassingen te duur.



Figuur 50 Werkingwijze van thermochromatische pigmenten, rechts: licht wordt gereflecteerd, links: licht wordt doorgelaten (MMI Laboratory, 2001)

4.3.2.8 Electrochromisme en gaschromisme

Electrochromische vensters bevatten evenals de gaschromische vensters een wolframoxidefolie die met elektrische pulsen actief geschakeld kan worden tussen een heldere en een ondoorzichtige toestand. Het venster bestaat verder uit een transparante tegen-elektrode en een vaste stof-elektrolyt (Granqvist et al., 1998). De transmissie van deze vensters is maximaal 80% over het lichtspectrum en de minimale transmissie is 10 - 20%. Omdat het systeem kan werken met elektrische pulsen is er voor het omschakelen tussen de verschillende toestanden weinig energie nodig. Momenteel worden elektrochrome systemen door Flaberg-Pilkington op de markt gebracht. De maximale lichttransmissie van deze systemen is echter nog laag (ca. 50% voor dubbelglassystemen) en de kosten zijn hoog (ca. Euro 500,- per m²).

Gaschromische vensters kunnen actief geschakeld worden tussen een helder en een gekleurde toestand door sterk verdund zuurstof of waterstofgas naar het oppervlak te leiden. Op het oppervlak zijn een wolframoxidefolie en een dunne katalysator coating aanwezig. Deze technologie is recent ontwikkeld door Georg et al. (1992) van het Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. De lichttransmissie van deze vensters vermindert bij verhoogde H₂-gas concentraties van maximaal 60% naar ca. 10%. Omdat er een ingewikkeld gastoe- en afvoersysteem nodig is en de maximale lichttransmissie (momenteel 60%) te laag is, zijn deze vensters naar verwachting niet binnen korte termijn toepasbaar in kassen.

Samenvatting hoofdstuk 4.3

- **Stralingsintensiteit en stralingsspectrum kunnen worden gevarieerd door de transmissie, absorptie of reflectie van materialen te veranderen.**
- **De totale lichttransmissie van kasomhullingsmaterialen kan worden verhoogd door speciale oppervlakte-coatings (interferentiecoatings of coatings met een lage brekingsindex). Deze techniek kan worden toegepast op glas en kunststofplaten. Een andere mogelijkheid is het veranderen van de oppervlaktestructuur (microstructuur of macrostructuur). De microstructuur van glas, platen en folies kan theoretisch worden veranderd. Een verandering van de macrostructuur lijkt momenteel alleen mogelijk bij platen (zig-zag).**
- **Het stralingsspectrum van glas kan worden gevarieerd door oppervlakte coatings. Deze techniek is echter beperkt en duur. Het spectrum van kunststofplaten kan worden gevarieerd door coatings en het toevoegen van additieven. De spectrale doorlatendheid van folies en schermmaterialen is goed varieerbaar door het toevoegen van additieven.**
- **Door fluorescentie kunnen bepaalde golflengtes worden verschoven naar andere golflengtes. Dit kan zelfs leiden tot een hogere PAR transmissie.**
- **Nieuwe technieken zoals fotochromisme, thermochromisme, electrochromisme en gaschromisme staan in de kinderschoenen en bieden misschien op lange termijn een optie.**

4.4 Wat is het effect op de energiehuishouding?

In de vorige paragrafen is een groot aantal methoden genoemd waarmee de optische eigenschappen van kasomhullingsmaterialen beïnvloed kunnen worden. Al deze eigenschappen beogen de lichttransmissie te verbeteren, of om juist stukken van het stralingsspectrum te blokkeren. In deze paragraaf wordt een kwantitatief overzicht gegeven van de effecten van deze wijzigingen op een drietal kengetallen van het kasklimaat, namelijk het productieniveau, de warmtebehoefte en de koelbehoefte. De koelbehoefte wordt alleen berekend voor situaties waarbij aan een gesloten kas is gerekend.

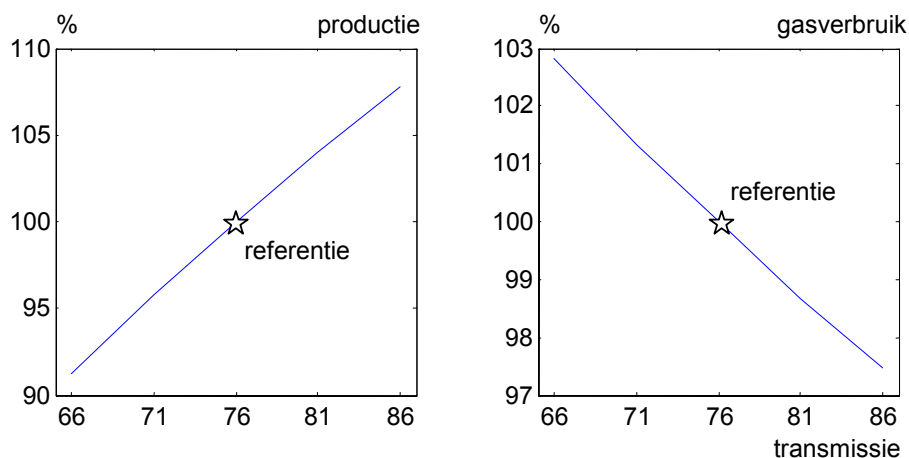
De effecten zijn berekend met behulp van een simulatiemodel. In alle berekeningen heeft het kasklimaat, zoals dat in een tomatenteelt wordt gehanteerd, als uitgangspunt gediend. Alle effecten zijn berekend voor een standaard en voor een gesloten kas, alhoewel deze laatste kas zeker niet als gemeengoed kan worden gesteld.

In de berekeningen voor de gesloten kas is uitgegaan van een koelinstallatie die in werking treedt zodra de temperatuur boven de 'ventilatielijn' uit komt. De ontvochtiging vindt evenwel in alle gevallen met buitenlucht plaats.

De berekeningen zijn uitgevoerd als varianten ten opzichte van een standaard, enkelglas kasdek. In deze referentiesituatie heeft de totale kas op gewasniveau een diffuse lichttransmissie van 76%. De absorptie van straling in het glas bedraagt 4%. De doorlatendheid is in de standardsituatie niet spectraal selectief, wat betekent dat het doorgelaten licht gemiddeld voor 50% uit PAR en voor 50% uit NIR bestaat. In de volgende grafieken is voor een betere leesbaarheid de y-as uitgegroot, daarom is de schaal van de y-as telkens verschillend.

4.4.1 Verandering lichttransmissie

In de eerste serie berekeningen is het effect van de overall transmissie berekend. Uitgaande van een standaard transmissie van 76% is een variatie aangebracht van -5, -10, 5 en 10%-punten. De resultaten voor een standaardkas worden getoond in Figuur 51 en die voor een gesloten kas in Figuur 52.



Figuur 51 Effect van lichttransmissie op productieniveau en gasverbruik bij een standaard tomatenkas.

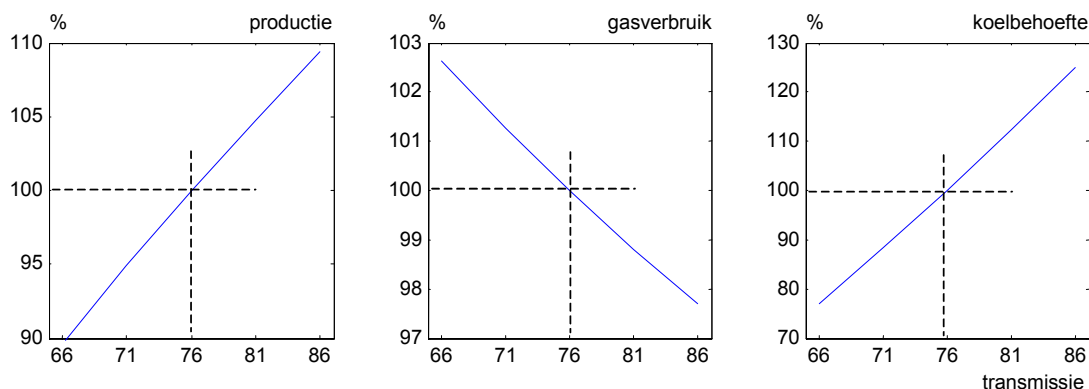
Figuur 51 toont een sterk effect van de lichttransmissie op de productie en een kleiner effect op het gasverbruik. De verlaging van het gasverbruik bij een hogere lichttransmissie komt doordat er in geval er meer licht in de kas komt ook de toevoer van zonne-energie toeneemt. Het effect is echter zwak omdat een groot deel van het gasverbruik 's nachts plaatsvindt, en dus geen invloed ondervindt van een andere lichttransmissie.

In het effect van de toename van de productie met de toename van de lichttransmissie lijkt de 1% regel bewezen te worden. Het moet echter wel gezegd worden dat een toename van de lichttransmissie van 76% naar 86% tien procentpunten is, maar in lichtintensiteit een toename van 13% is. Deze figuur laat dus zowel bij een verhoging als bij een verlaging van de lichttransmissie een iets kleiner effect dan de veel gebruikte 1% regel zien. Bij verhoging geeft de grafiek aan dat 1% verhoging van de lichthoeveelheid leidt tot 0,6% productietoename. Het effect bij verlaging is iets sterker, namelijk 0,7% productieverlaging per procent verlaging van de hoeveelheid licht die de kas binnentreedt.

Het feit dat de relatie tussen lichthoeveelheid en productie in deze grafieken wat zwakker lijkt dan de 1%-regel komt onder andere door de invloed van de lichtdoorlatendheid van de kas op het CO₂-regime. Een verandering van de lichttransmissie heeft namelijk ook een effect op de warmtevraag (zie het gasverbruikseffect in Figuur 51) en het ventilatiedebiet (meer ventilatiebehoefte). Beide effecten leiden ertoe dat in een kas met een hoge lichtdoorlatendheid in de zomer een wat lagere CO₂-concentratie zal optreden. Een kas met een lagere lichtdoorlatendheid zal in de zomer een wat hogere CO₂-concentratie te zien geven.

Hierdoor wordt de potentiële verandering van de productie bij een veranderde lichthoeveelheid in de kas enigszins gedempt.

In een gesloten kas is er (nagenoeg) geen effect van de lichttransmissie op de gemiddelde CO₂-concentratie. In Figuur 52 zien we dan ook een sterkere relatie tussen productie en lichttransmissie (bijna 0,8% per% verandering van de lichthoeveelheid). Uitgedrukt in procentpunten ten opzichte van de standaard toont zich hier zelfs een 1 op 1 verband.



Figuur 52 Effect van lichttransmissie op productieniveau, gasverbruik en koellast bij een gesloten kas.

Het effect van een andere lichtdoorlatendheid op het gasverbruik is voor een gesloten kas niet verschillend ten opzichte van dit effect bij een standaard kas.

Het effect op de benodigde koel-energie is groot. Dit komt doordat bij hoge lichtdoorlatendheid de koelinstallatie harder moet werken, maar ook meer uren maakt.

4.4.2 Verandering NIR transmissie

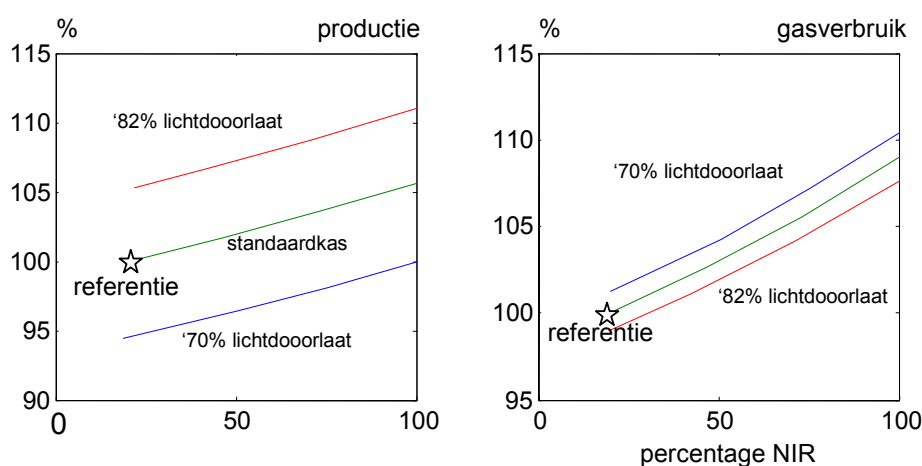
In de ontwikkeling van gesloten kassen is de grote koelbehoefte in de zomer een belangrijk probleem. De kas moet worden uitgerust met volumineuze luchtbehandelingssystemen en gebruikt veel elektriciteit voor de circulatie van grote luchthoeveelheden.

Voor gewone kassen leidt het grote warmteoverschot in de zomer tot grote CO₂ verliezen door de grote ventilatiebehoefte.

Gezien het feit dat de helft van het zonlicht uit nabij infrarode straling (NIR) bestaat, en het feit dat deze straling niet bijdraagt aan de productie, zou het interessant kunnen zijn het NIR in het kasdek te reflecteren door middel van een spectraal selectieve reflectie-coating.

In deze paragraaf is nagegaan in welke mate productie, gasverbruik en koelbehoefte veranderen, wanneer wordt verondersteld dat het kasdek het NIR in oplopende mate reflecteert (tot 100%).

De resultaten voor een standaardkas staan afgebeeld in Figuur 53 en de effecten voor een gesloten kas in Figuur 54.



Figuur 53 Effect van de mate van NIR-reflectie op productieniveau, energievraag en koellast bij een standaardkas. De berekeningen zijn gemaakt bij de standaard lichtdoorlatendheid (76%), een kas met een hoge lichtdoorlatendheid (82%) en een lage lichtdoorlatendheid (70%).

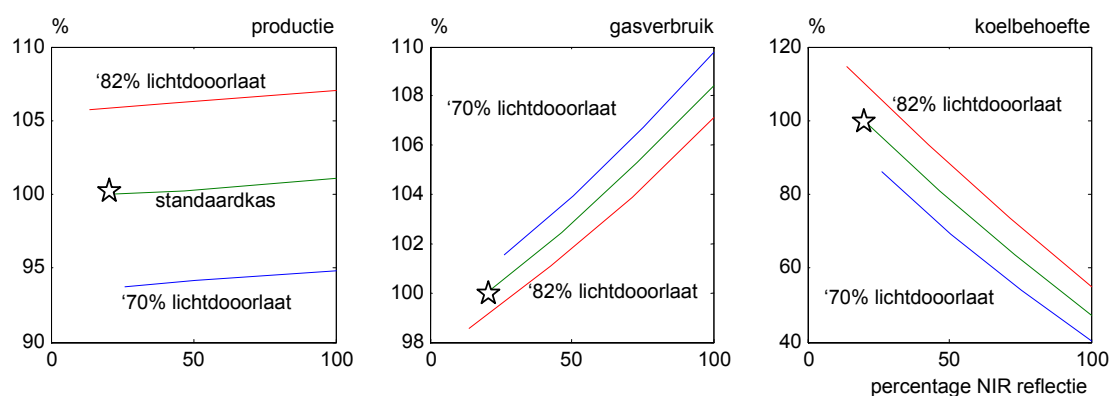
Figuur 53 laat zien dat bij standaardkassen de algemene teneur van het effect van toenemende reflectie van NIR is dat de productie oploopt (5% productieverhoging ten opzichte van standaard bij volledige reflectie van het NIR). Dit effect is onafhankelijk van het feit of de algemene lichttransmissie hoog of laag is. Het productieverhogende effect van de reflectie van NIR komt voor het grootste deel voort uit het verminderde CO₂-verlies. Een klein deel van de productietoename moet worden toegeschreven aan een wat lagere onderhoudsademhaling in een kas met een lagere warmtelast.

Een verhoogde reflectie van NIR leidt echter eveneens tot een toename van het gasverbruik (8% bij een volledige reflectie van NIR). Dit komt doordat in de koude periode van het jaar de toetreding van NIR een welkome bijdrage levert aan de warmte-input.

Een mogelijkheid om alleen het positieve effect van een NIR-reflecterende coating te benutten en het nadelige effect te elimineren is het gebruik van een NIR-reflecterende coating op een beweegbaar scherm. Dit kan dan worden gesloten als de kas gekoeld moet worden en in andere gevallen kan het open worden gehouden.

In Figuur 54 is het effect van een NIR-reflecterende coating op productie, gasverbruik en koelbehoefte in een gesloten kas weergegeven. In een gesloten kas is er geen relatie tussen koelbehoefte en CO₂-regime waardoor het productie effect van een verhoogde NIR-reflectie zeer klein is (1%). Het effect op het gasverbruik is vergelijkbaar met het effect van een verhoogde NIR-reflectie op het gasverbruik van een standaard kas.

Het effect van een verhoogde NIR-reflectie op de koelbehoefte is zeer groot. Volledige reflectie verlaagt de koellast met 50%, wat geheel overeenkomstig de verwachting is, aangezien in dat geval de stralingsbelasting van de kas halveert.

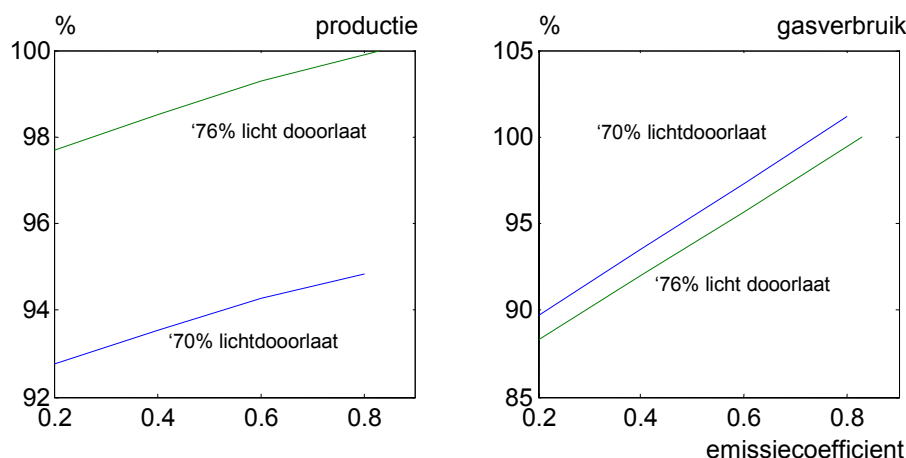


Figuur 54 Effect van de mate van NIR-reflectie op productieniveau, gasverbruik en koellast in een gesloten kas. De berekeningen zijn gemaakt bij de standaard lichtdoorlatendheid (76% diffuus), een kas met een hoge lichtdoorlatendheid (82% diffuus) en een lage lichtdoorlatendheid (70% diffuus)

4.4.3 Verlaging emissiecoëfficiënt

Bij gebruik van de gebruikelijke kasomhullingsmaterialen wordt het warmteverlies van het kasdek voor ongeveer de helft bepaald door stralingsverlies in het ver infrarode gebied (FIR). Dit stralingsverlies wordt de uitstraling naar de hemel genoemd (engels: sky). De materiaaleigenschap die verantwoordelijk is voor deze langgolvlige stralingsuitwisseling is de emissiecoëfficiënt van het dekmateriaal. Een gebruikelijk glazen dek heeft een emissiecoëfficiënt van 0,83. Verlaging van deze coëfficiënt vermindert de uitstraling en bespaart dus energie. In deze paragraaf wordt dit effect door middel van een aantal simulatieberekeningen gekwantificeerd. Daarbij wordt uitsluitend de emissiecoëfficiënt van de bovenzijde beïnvloed, omdat een verlaging van de emissiecoëfficiënt van de onderzijde vrijwel geen effect sorteert. Dit laatste komt doordat een vochtfilm op een oppervlak de emissiecoëfficiënt op 1 brengt. Condens, wat in het stookseizoen eigenlijk altijd aan de onderkant van het kasdek aanwezig is, doet het effect van een verlaagde

emissiecoëfficiënt dus teniet. Figuur 55 toont het effect van een verlaagde emissiecoëfficiënt in een standaard kas.

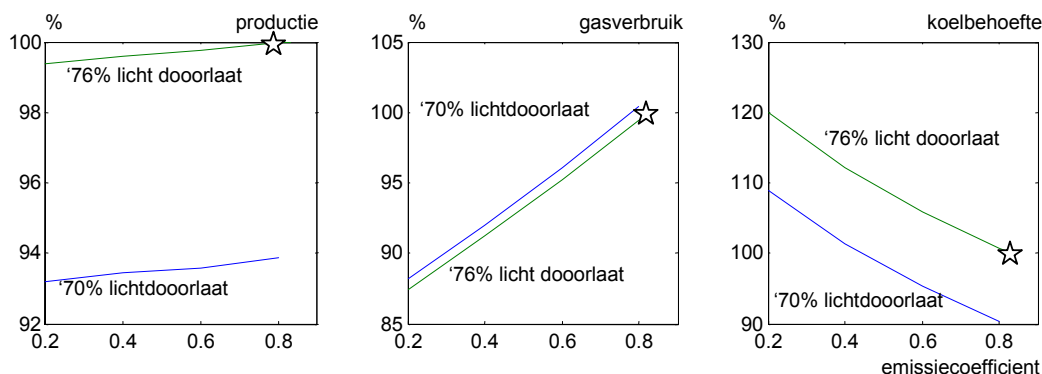


Figuur 55 Effect van de verkleining van de emissiecoëfficiënt voor warmtestraling op productie en gasverbruik voor een standaard kas. Er is een variant voor een kas met een gebruikelijke lichtdoorlatendheid (76%) en een kas met een lagere doorlatendheid (70%) doorgerekend. In alle berekeningen is alleen de emissiecoëfficiënt aan de bovenzijde aangepast.

Het effect van de emissiecoëfficiënt op de productie is weer een afgeleid effect. Het hoofdeffect van een lagere emissiecoëfficiënt is namelijk een kleiner warmteverlies. Dit komt sterk tot uitdrukking in de verlaging van het gasverbruik (ruim 10% verlaging bij een emissiecoëfficiënt naar 0,20), maar zal ook tot een groter ventilatiedebiet leiden. Beide gevolgen leiden tot een lagere CO₂-concentratie, en daarmee tot een lagere productie.

Vaak zal een verlaging van de emissiecoëfficiënt gepaard gaan met een verlaging van de totale lichtdoorlatendheid (zoals bij gecoat glas Hortiplus). De nadelige effecten van de coating op de productie werken dan dubbelop.

In Figuur 56 is het effect van een verlaagde emissiecoëfficiënt voor een gesloten kas getoond. Bij de gesloten kas is het effect van een lage emissiecoëfficiënt op de productie erg klein. Hier speelt namelijk alleen de toegenomen onderhoudsademhaling van het gemiddeld wat warmere gewas. Uiteraard is ook bij de gesloten kas het effect van de coating op het gasverbruik groot. Het afgenomen warmteverlies heeft echter ook hier weer als keerzijde dat de koelbehoefte van de gesloten kas oploopt met de verbeterde isolatiegraad.

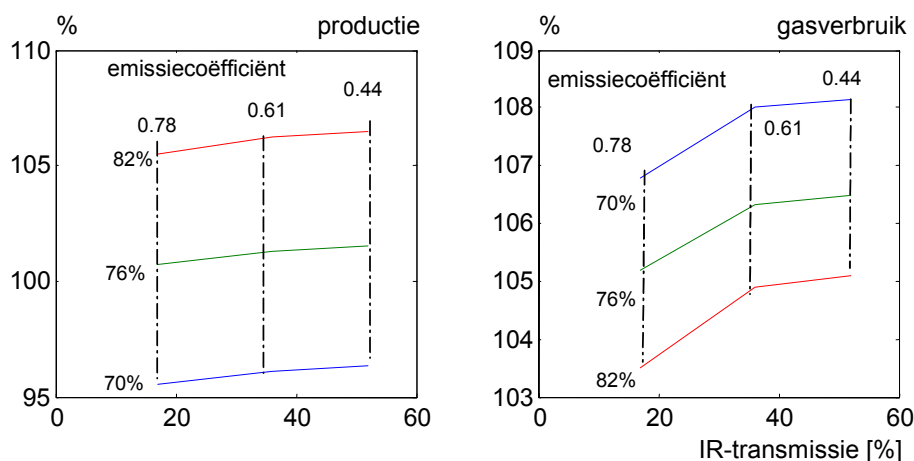


Figuur 56 Effect van de verkleining van de emissiecoëfficiënt voor warmtestraling op productie, gasverbruik en koellast voor een gesloten kas. Er is een variant voor een kas met een gebruikelijke lichtdoorlatendheid (76%) en een kas met een lagere doorlatendheid (70%) doorgerekend. De emissiecoëfficiënt verlagende behandeling is alleen aan de bovenzijde toegepast.

4.4.4 Verlaging van de FIR-transmissie van folies

Een groot verschil tussen de gangbare foliematerialen en glas is het feit dat folies, wanneer de binnenkant droog is, in meer of mindere mate transparant zijn voor FIR (ver infrarood). Dit betekent dat de langgolvlige stralingsuitwisseling van alles wat zich in de kas bevindt dan niet alleen met het kasdek plaatsvindt, maar ook met de veel koudere hemel.

Om deze transmissie van FIR te beperken kunnen additieven aan het foliemateriaal worden toegevoegd. Deze additieven beïnvloeden echter ook de emissiecoëfficiënt van de folie. Daarom is er bij berekeningen aan veranderde transmissie eigenschappen van een folie altijd ook sprake van een veranderde emissiecoëfficiënt.



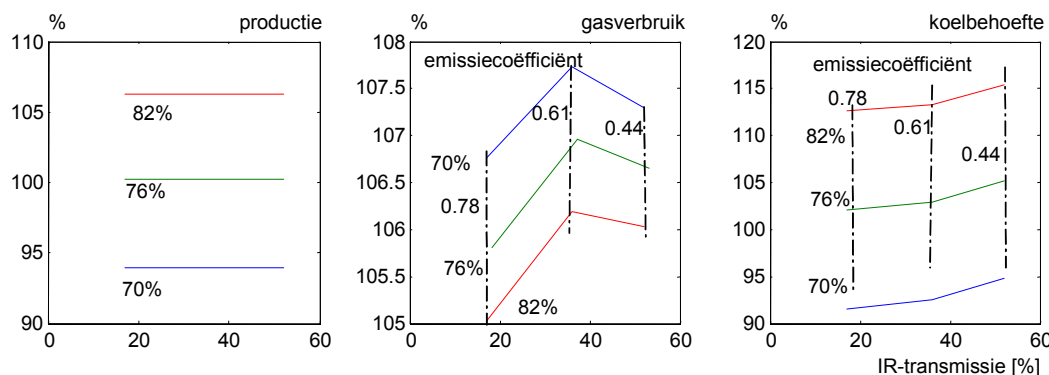
Figuur 57 Effect van de verkleining van de FIR transmissiecoëfficiënt op de productie en op het gasverbruik in een standaard kas. De emissiecoëfficiënt van de verschillende folies staat bovenin de grafiek aangegeven. Alle effecten zijn relatief ten opzichte van een standaard glazen kas (100%). Een glazen kas heeft een FIR-transmissie 0 en een emissiecoëfficiënt 0,83. De effecten zijn berekend bij een zichtbare lichttransmissie van 70%, 76% (standaard) en 82%.

In Figuur 57 wordt het effect van de FIR-transmissie bij een standaard kas getoond. De figuur laat zien dat de berekende effecten van een verandering van de FIR-transmissie gering zijn. De licht toenemende productie bij een verhoging van de FIR-transmissie heeft te maken met de toename van het gasverbruik (meer CO₂) en mogelijk een toename van de warmte-uitstraling (dus minder ventilatie).

Het gasverbruik van foliekassen ligt 5 tot 6% hoger dan bij een vergelijkbare glazen kas. Als de foliekas een hogere lichtdoorlatendheid heeft wordt een deel van het grotere warmteverlies gecompenseerd door een grotere warmtetoevoer uit zonnestraling. Is de doorlatendheid van de folie kleiner dan die van glas dan stapelen de negatieve effecten zich op.

Een geringe FIR-transmissie is bij folies belangrijker dan een lage emissiecoating. Het toch geringe effect van de FIR-doorlatendheid van de folies wordt veroorzaakt door het feit dat gedurende de nacht en op koude dagen de binnenkant van het kasdek vrijwel altijd nat zal zijn door condens. In die gevallen blokkeert de condenslaag de FIR-transmissie en zijn alle folies voor wat betreft de FIR-transmissie gelijk. Ook de emissiecoëfficiënt van de folies zal in dat geval richting 1 gaan lopen.

De verschillen tussen de folies komen dus alleen tot uitdrukking tijdens perioden dat het kasdek droog is. Dit betekent dat verschillen vooral overdag en tijdens minder koude dagen kunnen optreden, waardoor de energieverbruiksverschillen sterk gedempt zullen worden.



Figuur 58 Effect van de verkleining van de FIR transmissiecoëfficiënt op productie, gasverbruik en koelbehoefte in een gesloten kas. De emissiecoëfficiënt van de verschillende folies staat bovenin de grafiek aangegeven. Alle effecten zijn relatief ten opzichte van een standaard glazen kas (100%). Deze heeft een FIR-transmissie 0 een emissiecoëfficiënt 0,83 en een lichtdoorlatendheid van 76%. De effecten zijn berekend voor folies met een zichtbaar licht-transmissie van 70%, 76% (vergelijkbaar met glas) en 82%.

In Figuur 58 is het effect van de FIR-transmissie van folies op de drie kentallen van een gesloten kas weergegeven. Doordat er bij een gesloten kas nauwelijks een relatie bestaat tussen CO₂-regime en ventilatiebehoefte heeft de FIR-transmissie geen effect op de productie. Het gasverbruiks-effect lijkt nogal af te wijken ten opzichte van dat bij een standaardkas, maar dit heeft vooral te maken met de schaalverdeling van de y-as. Bij de gesloten kas steeg het gasverbruik bij één toename van de FIR-doorlatendheid van 40 naar 60% met 0,2%-punten en bij de gesloten kas daalt het verbruik met 0,2%-punten.

In feite kan geconcludeerd worden dat pas bij een verlaging van de FIR-transmissie naar waarden onder de 20% enige energiebesparing gerealiseerd kan worden.

Het effect van de FIR-transmissie op de koelbehoefte is eveneens gering. De geringe stijging van de koelbehoefte bij een toename van de FIR-transmissie duidt er op dat het effect van de afnemende emissiecoëfficiënt op het warmte-overschot in de zomer groter is dan het effect van een toenemende FIR-transmissie.

Samenvatting hoofdstuk 4.4

- **Het verhogen van de PAR straling met 10% leidt in een standaard tomatenkas tot een productiestijging van ca. 8% en een reductie van het gasverbruik van ca. 2.5%. In een gesloten kas wordt de koellast met ca. 25% verhoogd.**
- **Het uitfilteren van alle NIR straling leidt in een standaard tomatenkas tot een productiestijging van ca. 5% en een verhoging van het gasverbruik van ca. 8%. In een gesloten kas blijft de productie nagenoeg gelijk maar wordt de koelbehoefte met 50% gereduceerd.**
- **Glas, PMMA en PC zijn niet doorlatend voor warmtestraling (FIR). Bij dit soort kasdekmaterialen leidt de reductie van de emissiecoëfficiënt in een standaard tomatenkas tot een productieverlies van ca. 2% en een reductie van het gasverbruik van ca. 10%. In een gesloten kas blijft de productie nagenoeg gelijk en wordt de koelbehoefte met ca. 20% verhoogd.**
- **Bij kunststoffolies worden additiven toegevoegd om de doorlatendheid voor warmtestraling (FIR) te reduceren. Hierdoor verandert ook de emissiecoëfficiënt. In totaal is het gasverbruik ook bij folies met een lage FIR-transmissie altijd licht hoger dan bij glas, PMMA of PC. In een standaard tomatenkas leidt een verlaging van de FIR-transmissie naar 20% tot een productieverlies van ca. 2% en een reductie van het gasverbruik van ca. 8%. In een gesloten kas blijft de productie gelijk en veranderen gasverbruik en koelbehoefte nauwelijks.**
- **De overall-effecten van een aangepast kasdek materiaal (vernadering van meerdere materiaaleigenschappen) voor een bepaald gewas jaarrond moeten verder worden onderzocht.**

5 Synthese

In hoofdstuk 3 is de lichtbehoefte van gewassen tijdens de opkweek van het uitgangsmateriaal en tijdens de productiefase onderzocht. Per gewasgroep (vruchtgroenten, bladgroenten, snijbloemen, potplanten) is aangegeven welke lichtintensiteit en welk spectrum nodig is, om een optimale gewasproductie te realiseren. In hoofdstuk 4 werd geïnventariseerd, welke kasomhullings- en schermmaterialen er zijn, welke optische eigenschappen relevant zijn om natuurlijk licht in de kas door te laten dringen en indien gewenst gericht te veranderen. Tevens is een overzicht gegeven van de technische mogelijkheden die er zijn om materiaaleigenschappen aan te passen. In dit hoofdstuk wordt nu gekeken hoe een bepaalde lichtbehoefte voor een gewasgroep gerealiseerd of geoptimaliseerd zou kunnen worden en wat daarvan de gevolgen voor het gewas en de energiehuishouding van de kas zullen zijn. Ook wordt aangegeven waarop verder onderzoek in dit veld gericht zou moeten worden.

5.1 Algemene trends

5.1.1 Lichtintensiteit.

Behoefte vanuit de plant

Zonlicht is een van de belangrijkste factoren met betrekking tot de groei en ontwikkeling van planten. Door het proces van fotosynthese maakt de plant bouwstoffen voor de groei vanuit licht, water en CO₂. In het algemeen geldt dat meer licht leidt tot een betere groei, een hogere productie en een betere kwaliteit. Dit omdat water en CO₂ voor tuinbouwgewassen onder glas minder beperkend zijn dan licht. In Nederland is in de zomerperiode licht niet de belangrijkste beperkende factor, maar in de winterperiode wel omdat de hoeveelheid natuurlijk licht in kas veel lager is. Met de natuurlijke lichtcondities in Nederland kunnen maar enkele soorten worden geteeld zonder bijbelichting. Al neemt de efficiëntie van de lichtbenutting van het gewas toe bij een lagere lichtintensiteit, de verschillen in lichtefficiëntie tussen gewassen zijn beperkt in de winter.

Voor alle planten is een lichtintensiteit aan te geven die minimaal nodig is voor vegetatieve groei. Daarnaast is er vaak een hogere intensiteit nodig om niet alleen te groeien, maar ook nog bloemen en vruchten te produceren. De lichtbehoefte is niet voor alle planten gelijk: er zijn lichtminnende planten en schaduwplanten. Voor verschillende gewassen is bekend bij welke minimale lichtintensiteit ze nog geteeld kunnen worden: van 8 tot 10 mol m⁻² d⁻¹ voor tomaat, de groei en productie neemt daarboven toe tot ca 30 mol m⁻² dag⁻¹, tot 2 mol m⁻² d⁻¹ voor Saintpaulia, met een toename tot 4 tot 8 mol m⁻² dag⁻¹. Voor enkele lichtminnende gewassen, vooral vruchtgroenten en enkele bloeiende potplanten, is er in de winter, vooral bij bewolkt weer, te weinig natuurlijk licht om goed te produceren. Voor alle gewassen geldt: hoe meer licht in de winter de kas binnenkomt, hoe beter de groei en productie is.

Voor schaduwplanten is de hoeveelheid natuurlijk licht in de zomer ruim voldoende. Soms moet er zelfs geschermd worden om de intensiteit van straling te beperken. Bij Saintpaulia en Dracaena wordt boven 250 respectievelijk 400 μmol m⁻² s⁻¹ (in de kas) geschermd in om bladschade te voorkomen. Bij diffuus kasdek kan waarschijnlijk bij hogere lichtintensiteiten worden geschermd.

Natuurlijke lichtintensiteit

Natuurlijke straling buiten de kas (gemiddelde stralingssom, waarvan gemiddeld 76% in de kas komt)

Donkerste maanden (6-11 t/m 6-2):	2.8 mol m ⁻² d ⁻¹
Lichtste maanden (6-5 t/m 6-8):	20.7 mol m ⁻² d ⁻¹

Lichtbehoefte gewassen

Vruchtgroenten (tomaat): 8-10 mol m⁻² d⁻¹ (minimum), 50 mol m⁻² d⁻¹ (lichtverzadiging)
Snijbloemen (roos): 3.8 mol m⁻² d⁻¹ (minimum), >30 mol m⁻² d⁻¹ (optimaal)
Potplanten (Saintpaulia): 2-8 mol m⁻² d⁻¹ (minimum), 200 μmol m⁻² s⁻¹ (drempelwaarde waarboven wordt geschermd)

→ *Lichtbehoefte van de meeste gewassen in winter is hoger dan gemiddelde natuurlijke stralingssom*

→ *Lichtbehoefte bij sommige schaduwplanten in de zomer meestal lager dan natuurlijke straling*

→ Verbetering: Lichtintensiteit in kas in winter zo hoog mogelijk, lichtreductie zo nodig in de zomer

In het algemeen kan gesteld worden dat meer licht in de kas een positief effect heeft op de groei en productie en een reductie in het gasverbruik als gevolg heeft. Echter, een verhoging van de productie gaat niet altijd gepaard met een betere kwaliteit. Voor alle gewasgroepen wordt de productie verhoogd door meer licht in de kas. Voordelen worden vooral gerealiseerd in de (winter)maanden met het minste licht. Voor chrysant wordt de kwaliteit sterk verbeterd, maar voor de vruchtgroenten wordt de kwaliteit niet, of zelfs negatief beïnvloed. Dit omdat de sterke schommelingen in het kasklimaat de kans op condens en schimmelziekten vergroot.

Effect hogere lichtintensiteit op productie, kwaliteit en gasverbruik

De gevolgen van meer licht in de kas op enkele gewasgroepen zijn gegeven in kwalitatieve zin en gelden op jaarbasis. (+) betekent een toename, (-) betekent minder kwaliteit/gasverbruik, en (?) betekent onbekend.

	Productie	Kwaliteit	Gasverbruik
Vruchtgroenten (tomaat, komkommer)	+	-	-
Bladgroenten (sla)	+	?	-
Snijbloemen éénmalig oogstbaar (chrysant)	+	++	-
Snijbloemen meermalig oogstbaar (roos)	+	+	-
Potplanten (ficus, spathiphyllum)	+	+	-

^{*} Gebaseerd op Dueck et al. (2004)

In de praktijk gaat men ervan uit dat ochtendzon belangrijker is dan avondzon. De achterliggende gedachte daarbij is dat de licht benuttingsefficiëntie 's ochtends groter zou zijn dan 's middags. Het is evenwel nog steeds niet helemaal duidelijk of dit vooral moet worden toegeschreven aan interne, plantfysiologische factoren, of dat externe factoren (lage luchtvochtigheid, hoge temperatuur, CO₂-beperkingen) de geringere fotosynthese efficiëntie bepalen.

De plantengroei is echter niet alleen afhankelijk van de fotosynthese, en dus de lichtintensiteit: de temperatuur speelt ook een grote rol. In het kader van deze verkenning is vooral de licht/temperatuur verhouding van belang. In Nederlandse kassen is deze verhouding vaak (te) laag. Minder stoken in de winter is echter soms niet wenselijk omdat bij lagere temperaturen fysiologische processen geremd worden wat de groei vertraagt, wat vooral goed waarneembaar is bij een aantal (subtropische) gewassen. Slechts enkele gewassen kunnen dus met de natuurlijke lichtniveaus in de kas in de winter worden geteeld, tenzij de hoeveelheid PAR licht kan worden verhoogd. In de zomer stijgt de temperatuur in de kas waardoor het gewas meer moet verdampen om de plant te koelen. Wanneer de opnamecapaciteit van water tekort schiet leidt dit tot het sluiten van de huidmondjes en reductie van de fotosynthese. Zelfs bij optimale CO₂- en vochtvoorziening kan de optimumtemperatuur voor de fotosynthese lager zijn dan de zomertemperaturen in de kas. Deze optimumtemperatuur is gewasspecifiek. Om warmte en vocht af te voeren wordt er gelucht, waardoor verhoging van het CO₂-gehalte in de kas nauwelijks meer mogelijk is. Ook dit leidt tot reductie van de fotosynthese. Als de overvloedige warmte op een andere manier buiten de kas gehouden kan worden of afgevoerd kan worden zal dit de fotosynthese positief beïnvloeden. Het uitfilteren van NIR-straling zou het tijdstip kunnen uitstellen waarop gelucht moet worden waardoor de CO₂ beter benut kan worden.

Verbeterde lichtcondities in de kas

In winter lichtintensiteit in de kas te laag ten opzichte van temperatuur

→ *Licht-Temperatuur verhouding te laag*

→ *Reductie temperatuur niet altijd wenselijk, fysiologische processen geremd*

→ **Verbetering: Lichtintensiteit in kas in winter zo hoog mogelijk of als mogelijk de temperatuur omlaag**

In zomer temperatuur in de kas te hoog

→ *Licht-Temperatuur verhouding te laag*

→ *Verdamping plant stijgt, aanvoer water beperkt, huidmondjes sluiten, CO₂ opname en fotosynthese beperkt*

→ **Verbetering: Temperatuur in kas in zomer aanpassen aan lichtniveau**

Perspectieven voor verbetering Licht - Temperatuur verhouding door aanpassing kas

Als gekeken wordt naar de lichtbehoefte van een plant of gewas en naar het efficiënt gebruik maken van de beschikbare hoeveelheid licht, moet onderscheid worden gemaakt tussen perioden met (te) veel licht en perioden met (te) weinig licht. Algemeen kan gesteld worden dat zowel meer licht (lichtsom PAR) in de winter als minder warmte in de zomer (minder NIR) voor alle gewasgroepen positief zou werken.

In perioden met weinig licht zoals in de winter is de lage hoeveelheid natuurlijk licht beperkend voor de fotosynthese, plantontwikkeling, opbrengst en kwaliteit (4.2.1). Een hogere lichttransmissie van een kas kan tot 5-10% meer licht in de kas leiden. Huidige kasdekmaterialen hebben een lichttransmissie van gemiddeld 90%, deze zou met nieuwe materialen verhoogd kunnen worden tot 95%. De totale lichttransmissie van een kas inclusief de constructiedelen is op gewasniveau gemiddeld 76%. Door verbeteringen aan de kas zelf zou additioneel rond 5% meer lichtwinst geboekt kunnen worden, zodat in totaal de lichttransmissie van een kas met 5-10% wordt verhoogd. Een 5% hogere lichttransmissie leidt tot een 4-5% hogere productie bij tomaat. Bijkomend voordeel is een ca. 1,5% lager gasverbruik in een standaard tomatenkas (4.4.1). Er ontstaat echter voor sommige gewassen een hoger lichtoverschot in de zomer. In een gesloten kas neemt de koelbehoefte in zomer met ca. 10% toe. Afhankelijk van de lichtbehoeftes van het gewas kan het lichtoverschot in de zomer op vrij eenvoudige wijze worden weggeschermd (4.1.4.2).

Om meer natuurlijk licht in de winter te realiseren kan gedacht worden aan het gebruik van wit glas (4.1.1) met een ca. 1-2% hogere lichtdoorlatendheid dan blank glas. Dit glas laat echter ook een gedeelte van de UV-B straling door wat niet voor alle gewassen voordelig is. Door het verminderen van de reflectie op het kasdek dringt meer natuurlijk licht door in de kas. Dit kan via kasomhullingsmaterialen (bijvoorbeeld glas) met reflectieverminderende oppervlaktecoatings (4.3.1.1), met een veranderde micro-oppervlaktestructuur of met een zigzag structuur van het dekmateriaal (4.3.1.2). Er wordt verwacht dat antireflectie-coatings op middellange termijn ingang in de tuinbouw zullen vinden. Materialen met een veranderde oppervlaktestructuur zijn recent ontwikkeld en zullen binnenkort bij tuinder worden toegepast. Een andere optie is het toepassen van “nieuwe” materialen zoals ETFE-membraan (4.1.3) met een hoge lichtdoorlatendheid en goede mechanische eigenschappen. Hier worden de hogere investeringskosten gerechtvaardigd door de naar verwachting hogere opbrengsten. Bovendien kan de lichttransmissie verhoogd worden door het toepassen van fluorescentie coatings op glas of additieven in folie (4.3.2.3). Het omzetten van UV straling in PAR straling (blauw of rood) biedt mogelijkheden. Echter geven de huidige fluorescerende pigmenten hooguit 1-3% meer PAR.

Op langere termijn moet vooral aandacht worden gegeven aan nieuw te ontwikkelen materialen, zoals nanoschuim, welke gelijktijdig een hogere lichttransmissie en een hoge isolatiewaarde realiseren (4.1.6).

Additioneel leiden aanpassingen aan de kasconstructie zelf en de vaste installaties tot een hogere lichttransmissie van de kas.

Gevolgen verbeterde lichtcondities in de kas

*Maatregel: Verhoging PAR-transmissie kas (met 5%)**

Traditionele kas:

Gevolgen energieverbruik: -1.5% gasverbruik jaarrond (enkel kasdek)
tot -20% gasverbruik (geïsoleerd kasdek)

Gevolgen gewasproductie: +4-5% productie jaarrond

Gesloten kas:

Gevolgen energieverbruik: -1.5% gasverbruik jaarrond (enkel kasdek),
tot -30% (geïsoleerd kasdek),
+10% koelbehoefte in de zomer

Gevolgen gewasproductie: +5% productie jaarrond

* Berekeningen uitgevoerd voor het voorbeeldgewas tomaat met KASPRO (gasverbruik) en INTKAM (productie)

Om minder warmte de kas binnen te krijgen en gelijktijdig veel licht, zijn kasomhullingsmaterialen wenselijk die alleen PAR straling doorlaten, maar de NIR straling er specifiek uithalen (4.2.3). Dit kan door absorptie (4.3.2.1), reflectie (4.3.2.2) of interferentie (4.3.2.4) in het NIR gebied. Op dit moment zijn dergelijke materialen evenwel nog niet beschikbaar. NIR-reflecterende pigmenten werken effectiever dan NIR-absorberende pigmenten, omdat in het laatste geval de absorptie leidt tot een opwarming van het materiaal, waardoor de kas meer opgewarmd wordt dan wanneer de NIR straling gereflecteerd wordt.

Een interferentie-coating op glas haalt het merendeel van de NIR straling eruit. Glas met een NIR-interferentie-coating bestaat al voor andere toepassingen, maar is nog niet getest in de tuinbouwpraktijk. Voor kunststoffen zijn zowel NIR-reflecterende als ook NIR-absorberende pigmenten beschikbaar. Huidige pigmenten kunnen gedeeltes van de NIR straling uitfilteren, vaak is dit verbonden met een reductie van de PAR straling.

Ook thermochromatische materialen (4.3.2.7) zullen op langere termijn een oplossing kunnen bieden als het werkingsmechanisme op de tuinbouwomstandigheden wordt afgestemd.

Een laatste mogelijkheid is weelicht het gebruik van een dakbevoeiingssysteem met NIR absorberende additieven in de versproiede vloeistof. Dit biedt tevens de mogelijkheid om de geabsorbeerde warmte af te voeren en op te slaan om in tijden met een warmtetekort weer te gebruiken.

Kasomhullingsmaterialen welke NIR filteren doen dit jaarrond en dus niet alleen in de zomer maar ook in de winter. In de zomer is dit een gewenst effect, maar in de winter wil men juist warmte binnenhalen om het gasverbruik zo laag mogelijk te houden. Het volledige uitfilteren van NIR jaarrond verlaagt de behoefte aan koeling in een gesloten kas in de zomer met 50%.

Gelijktijdig gaat de warmtevraag in de winter echter met 8% omhoog. In een standaard tomatenkas wordt in dit geval de productie door de verlaagde warmtebelasting in de zomer met 5% verhoogd. In een geloten kas heeft de vermindering van de NIR-doorlaat nauwelijks effect op de productie.

Het toepassen van een NIR-reflecterend scherm of NIR-absorberende dakbevoeiingssystemen biedt de voordelen in de zomer zonder de nadelen in de winter. Het is echter niet bekend in welke mate temperatuur en productie worden beïnvloed. Het zou moeten worden onderzocht

wat de beste methode is voor het uitfilteren van NIR. Zowel permanente als ook tijdelijke maatregelen moeten worden onderzocht. Ook toepassingen voor delen van de kas zijn voorstelbaar. Effecten op het kasklimaat, energieverbruik en gewasproductie zijn belangrijk.

Gevolgen verlaagde warmtebelasting in de kas

Maatregel: Reductie NIR-straling in kas (met 100%)^{}*

Traditionele kas:

Gevolgen energieverbruik: +8% gasverbruik jaarrond

Gevolgen gewasproductie: +5% productie jaarrond

Gesloten kas:

Gevolgen energieverbruik: +8% gasverbruik jaarrond, -50% koelbehoefte in de zomer

Gevolgen gewasproductie: +1% productie jaarrond

^{*} Berekeningen uitgevoerd voor het voorbeeldgewas tomaat met KASPRO

Kennisleemtes (witte vlekken)

- (Licht)omstandigheden op het opkweekbedrijf moeten beter aansluiten op de omstandigheden op het productiebedrijf om (groeitijd) verlies te voorkomen. Mogelijk zou de teeltduur hierdoor met 1-2 weken verkort worden.
- De kosteffectiviteit van meer licht voor planten tijdens transport en opslaan (omstandigheden met laag lichtniveau) is onvoldoende bekend.
- In theorie, gegeven optimale condities, is fotosynthese afhankelijk van het licht. Vooral midden op de dag blijkt deze afhankelijkheid echter vaak niet eenduidig. Redenen daarvoor, en de achtergrond van de waargenomen verschillen tussen gewassen zijn in onvoldoende bekend.
- Het blijkt dat lichtefficiëntie van de plant lager is in de fase van knopgroei. Hoe groot is de invloed ervan op de generatieve productie en is het mogelijk de lichtefficiëntie te verhogen?
- Wordt de netto gewasfotosynthese beïnvloed door de daglengte, voor planten die van oorsprong uit tropische regionen komen en dus niet aangepast kunnen zijn aan de lange zomerse dagen in Nederland.
- Is er een lichtniveau aan te geven voor minder lichtminnende gewassen waarop gewasschade ontstaat, zodat geschermd kan worden om schade te voorkomen? Er zijn aanwijzingen dat dit afhankelijk is van plantensoort en van de LAI?

Toekomstbeeld

- Een schakelbare, intelligente kasomhulling, welke het lichtniveau (automatisch) aanpast aan de gewasbehoefte: maximale lichtdoorlatendheid in stralingsarme perioden (ochtend, avond, winter), minder lichtdoorlatendheid in stralingsrijke perioden (middag, zomer).
- Het is wenselijk dat deze geavanceerde kasomhulling in stralingsarme perioden (winter) het PAR-licht in de kas zelfs op een hoger niveau brengt dan de natuurlijke straling buiten om de

gewasproductie te maximeren en gelijktijdig een zeer hoge isolatiewaarde heeft om het gasverbruik te reduceren.

- Het is verder wenselijk dat deze geavanceerde kasomhulling in perioden met voldoende licht, maar met teveel warmte in de kas, NIR wegfiltert, het licht diffuus maakt en eventueel bepaalde delen van het spectrum wegschermt.

5.1.2 Lichtverdeling.

Behoefte vanuit de plant

Voor een jong gewas is er in het algemeen vaak te weinig bladoppervlakte om al het licht te onderscheppen. Het deel van het licht dat niet door blad wordt geabsorbeerd, wordt grotendeels omgezet in warmte en gaat voor de groei verloren. Maatregelen die ervoor zorgen dat meer licht terug in het gewas reflecteert bieden hier een verbetering.

Voor vruchtgroenten als tomaat en paprika met een hoog opgaande gewasstructuur wordt het meeste licht door de bovenste bladeren van het gewas opgevangen en bij hoge lichtintensiteiten niet volledig benut voor de fotosynthese. Dieper in het gewas neemt de hoeveelheid licht snel af waardoor de fotosynthesecapaciteit in de onderliggende bladeren niet volledig wordt gebruikt. Wanneer de hoge absorptie in bovenste bladlagen verschoven kan worden naar de onderste bladlagen wordt de efficiëntie van de fotosynthese van de totale plant verhoogd. Een kwantitatieve onderbouwing van deze hypothese ontbreekt nog. Onbekend is of het ook leidt tot netto productietoename: het in stand houden van fotosynthetisch actief blad onderin het gewas is niet 'gratis' voor de plant. Maatregelen die zorgen voor meer licht onderin het gewas kunnen worden gezocht in het teeltsysteem (met name plantverband), in het kasdek (meer diffuus licht) of in assimilatiebelichting (reflectoren, LEDs).

Een verdere behoefte vanuit de teelt is een gelijkmatige horizontale verdeling van het licht over het gewas zodat het gewas uniform groeit.

Verbeterde lichtverdeling in de kas

Planten met lage LAI (jonge planten):

→ *te weinig bladoppervlakte om al het licht te onderscheppen, lichtbenutting niet optimaal*

→ *Lichtreflectie richting het gewas zo hoog mogelijk*

Planten met hoge LAI:

→ *licht door de bovenste bladeren onderschept, onderste bladeren fotosynthese laag*

→ *Lichtverdeling in gewas van boven naar beneden brengen*

→ ***Verbetering: Lichtintensiteit (onder) in het gewas zo hoog mogelijk***

Perspectieven voor verbetering van de lichtverdeling (onder) in het gewas

In een jong gewas met een lage LAI is de bladoppervlakte en de lichtonderschepping laag. Invallend licht wordt maar gedeeltelijk door de bladeren geabsorbeerd, de rest komt op de bodemafdekfolie terecht. Als de bodemafdekfolie (4.1.5) het binnenvallende licht zoveel mogelijk reflecteert, komt het licht terug in het gewas en zal de lichtonderschepping door de bladeren verhoogd worden. De lichtreflectie van bodemfolies is sterk verschillend. Witte bodemfolies reflecteren ca. 65% van het PAR-licht terug in het gewas. Gekleurde folies zullen altijd minder PAR-licht reflecteren. Hierover zijn maar weinig gegevens beschikbaar. Gealuminiseerde folies zullen theoretisch meer PAR-licht moeten reflecteren. Door een bodemfolie te gebruiken met een PAR-reflectie van 100% zal de productie van tomaat met 4.5% op jaarbasis toenemen, het gasverbruik is nagenoeg constant (+0.4%). Voor veel andere (hoogopgaande) gewassen zal ook gelden dat de productie hierdoor toeneemt. Onbekend is echter met welk percentage. De absorptie of reflectie van NIR-straling van de bodemafdekfolie is bepalend voor de temperatuur in de kas. Bij een jong gewas is tijdens de zomer het gebruik van een bodemfolie dat de NIR-straling sterk reflecteert positief om de opwarming van de kas te reduceren. Gangbare witte bodemafdekfolies reflecteren ca. 55% van de NIR-straling. Tijdens de winter zorgt het gebruik van een bodemfolie dat de NIR-straling sterk absorbeert (minder reflecteert) voor een grotere opwarming van de bodem, en daarmee een reductie van het gasverbruik. Als de NIR-absorptie van een bodemafdekfolie tot 100% verhoogd wordt (de NIR-reflectie dus tot 0% gereduceerd wordt), vermindert het gasverbruik met ca. 1.8%, de gewasproductie blijft nagenoeg gelijk (+0.5%). In de praktijk zal dus het gebruik van verschillende folies in de winter en de zomersituatie een oplossing kunnen bieden.

Gevolgen verbeterde lichtverdeling voor de plant

Maatregel: Verhoging PAR-reflectie bodemfolie (tot 100%)^{}*

Gevolgen energieverbruik: +0.4% gasverbruik jaarrond

Gevolgen gewasproductie: +4.5% productie jaarrond

Maatregel: Verhoging NIR-absorptie bodemfolie (tot 100%)^{}*

Gevolgen energieverbruik: -1.5% gasverbruik jaarrond

Gevolgen gewasproductie: +0.5% productie jaarrond

^{*} Berekeningen uitgevoerd voor het voorbeeldgewas tomaat met KASPRO, zie Mohammadkhani en Sonneveld (2003)

Vrijwel alle gewassen met een hoge LAI (>3) raken in de zomer nooit met licht verzadigd. Maatregelen die ervoor zorgen meer licht onderin het gewas te krijgen bieden dus zicht op een verbetering van de lichtbenutting. Kasomhullingsmaterialen met diffuse eigenschappen hebben voordelen ten opzichte van materialen, welke het invallende licht niet diffuus verspreiden (4.2.1.2), zodat de binnenkomende straling dieper in het gewas kan komen en slagschaduw vermeden wordt.

Traditioneel tuinbouwglas werd vroeger in een gestructureerde uitvoering toegepast (het zogenaamde 'gehamerde glas'). Dit is echter niet meer het geval, omdat dit glas andere nadelen

met zich mee bracht, zoals een slechtere bestendigheid tegen hagel. Tegenwoordig zijn nieuwe methodes beschikbaar om glas meer diffuse eigenschappen te geven. Het al omschreven glas met antireflectie-coating is beschikbaar in een heldere en diffuse uitvoering met een goede lichtdoorlatendheid. Verder zijn er folies (4.1.3) met sterk diffuse eigenschappen op de markt met een gelijktijdig goede lichtdoorlatendheid. Ook kunststofplaten (4.1.2) zijn vaak in een diffuse uitvoering verkrijgbaar, echter is bij deze platen de totale lichtdoorlatendheid aanzienlijk lager dan bij heldere platen. Dit is afhankelijk van het lichtverspreidende pigment dat toegevoegd wordt in de platen. 10% meer diffuus licht in PC kan tot een lichtverlies van ca. 2% leiden. Echte melkkleurige platen met een hoge lichtverspreiding hebben een 30% geringere lichtdoorlatendheid.

Het is niet bekend hoeveel van het diffuus binnenvallende licht dieper in het gewas kan dringen. Ook is niet bekend wat de effecten van meer licht dieper in het gewas zijn op de totale opbrengst van het gewas. Een kwantitatieve onderbouwing ontbreekt. Onderzoek naar diffuse kasdekmaterialen moet hierop antwoord geven.

Een andere methode om meer licht in het gewas te brengen is het gebruik van kunstlicht eventueel samen met speciale reflectoren die licht gericht in het gewas leiden.

Gevolgen verbeterde lichtverdeling voor de plant

Maatregel: Verhoging diffuse straling in kas (met 100%)

Gevolgen energieverbruik: ~0% gasverbruik als andere materiaaleigenschappen gelijk

Gevolgen gewasproductie: ?% verhoging productie

Kennisleemtes (witte vlekken)

- Onderin het gewas kost het onderhoud energie, mogelijk meer energie dan de bladeren in de onderste lagen zelf produceren. Het is niet bekend hoe rendabel het zou zijn om licht onderin het gewas te brengen: Hoeveel licht is nodig om in het onderhoud te voorzien, en hoeveel is nodig om het te overtreffen waardoor er netto winst (assimilaten) geproduceerd en benut kunnen worden voor groei en productie? Welke kosten in aanpassingen zijn ervoor nodig?
- Wat is het effect van de lichtsom (daglengte en intensiteit) op het evenwicht tussen generatieve en vegetatieve groei? Hoe is het te sturen t.b.v. generatieve groei (vruchten)?
- De rol van licht bij het mechanisme achter de massale (vluchtgewijze) zetting en vruchtuigroei bij paprika onder bepaalde weersomstandigheden is nog onbekend.
- Hoe groot is het effect van een diepere lichtdoordringing in het gewas op de productiviteit (balans vegetatieve/generatieve groei)? Is diffuus licht effectiever hiervoor dan gericht zonlicht? Hoe groot is het invloed van de oriëntatie van de kas, en van de rijen in de kas t.o.v. de zon (lichtdoordringing tot diep in het gewas) op de ontwikkeling en productie, vooral van vruchtgroenten en snijbloemen?
- Is het mogelijk om zwaardere stelen bij snijbloemen te bereiken door het gewas alleen te belichten in de LD-periode (fase afhankelijk belichten)?

Toekomstbeeld

- Een kas met een uniforme horizontale en optimale verticale lichtverdeling. Het in de kas binnenkomende PAR-licht wordt diffuus verspreidt en middels reflectievlakken op de bodem (bodemfolie), tussen het gewas (reflectoren), aan de binnenkant van de kasomhulling en kasconstructie naar het gewas gebracht waar het nodig is.
- Hierbij is ook de denken aan de kasomhulling als eenzijdig doorlatende spiegel, die van de buitenkant alle gewenste straling naar binnen doorlaat en aan de binnenkant door een alle gewenste straling terug reflecteert in het gewas.
- Bovendien zou licht dat ‘elders geoogst’ is door middel van fibers e.d. in de juiste intensiteit en de juiste golflengtes naar het gewas gebracht kunnen worden waar het op dat moment het hardste nodig is.

5.1.3 Lichtkleur

Behoeft vanuit de plant

Planten gebruiken licht niet alleen om te groeien, maar halen ook informatie uit licht b.v. over de tijd van het jaar, de tijd van de dag, de standplaats en de omringende vegetatie. Deze informatie wordt gebruikt om sneller te gaan groeien (strekken) of juist compacter te groeien, het tijdstip van bloei te bepalen, of de plantvorm aan te passen aan het licht (grote, dunne of kleine dikke bladeren)

Natuurlijk licht heeft een tamelijk constante spectrale verdeling waaraan planten zich evolutionair hebben aangepast. Alleen wanneer de zon laag aan de horizon staat, wordt de verhouding rood/verrood licht lager. Ook onderin een gewas neemt de verhouding rood/verrood licht af. Dit kan de vorm van sommige gewassen beïnvloeden. De meest optimale kwantumefficiëntie ligt voor sommige soorten in het rode of in het blauwe deel van het spectrum. Dit is afhankelijk van de lichtintensiteit en lichtkwaliteit, omdat het blad zich aanpast aan het aangeboden licht tijdens de ontwikkeling van het blad. De fotosynthese efficiëntie tijdens de eerste dagen van de productiefase is dan ook afhankelijk van de lichtomstandigheden tijdens de opkweek. Na deze dagen heeft het gewas zich aangepast aan de dan heersende lichtomstandigheden.

Door de lichtkleur wordt niet alleen de fotosynthese beïnvloed maar vooral de fotomorfogenese. Wanneer er in verhouding weinig rood licht is ten opzichte van verrood licht, gaan planten strekken en vormen grotere dunnere bladeren. Als het aandeel verrode straling wordt gereduceerd groeien planten juist compacter, ze strekken minder, vertakken meer en vormen kleinere dikkere bladeren. Als verrood licht ontbreekt, komen sommige planten niet tot bloei. Dit lijkt vooral het geval bij schaduwplanten, zoals Saintpaulia, welke aan in de natuurlijke omgeving zijn aangepast aan lage lichtintensiteiten met veel verrood licht.

Ook de hoeveelheid blauw licht heeft effect op de vorm van de plant. Bij te weinig blauw strekken planten, en krijgen ze grotere, dunnere bladeren. Veel plantensoorten hebben een minimale hoeveelheid blauwlicht nodig voor een normale plantontwikkeling. Deze behoefte

verschilt per soort en varieert van 5-30 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ voor sla en pepers tot 30 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ voor sojaboon. In Nederland zit er van nature voldoende blauw in het natuurlijke licht voor planten (ook in de kas), maar door de hoeveelheid blauwlicht te beïnvloeden kan de plantvorm gestuurd worden. Gedeeltelijke omvorming van blauw naar rood licht zou gunstig kunnen zijn voor de fotosynthese efficiëntie, maar onvoldoende bekend is wat de morfogenetische effecten daarvan zijn. Als het aandeel blauwe straling wordt verhoogd leidt dit tot een grotere vertakking van de plant en kleinere dikkere bladeren. Dit is een gewenst effect voor veel potplanten, maar een ongewenst effect voor vruchtgroenten.

Bovendien is de synthese van kleurstoffen in de plant afhankelijk van het lichtspectrum. Dit werkt bij de diverse gewassen verschillend. Afhankelijk van de plantsoort wordt de synthese van anthocyanen door UV, blauw, rood of verrood gestimuleerd. Dit is belangrijk voor alle planten waar de kwaliteit mede door de bloemenkleur wordt beïnvloed. Vooral lichtminnende planten, zoals chrysant of perkplanten, welke in hun natuurlijke omgeving zijn aangepast aan hoge lichtintensiteiten vormen door lage lichtintensiteiten of weinig UV straling fletse bloemkleuren. Hier ontbreekt echter veel duidelijke informatie per plantsoort. Ook zijn er grote verschillen tussen cultivars.

Aanpassingen in de spectrale verdeling van natuurlijk licht ten behoeve van sturing van de fotomorfogenese van tuinbouwgewassen wordt nagenoeg niet toegepast. In de huidige praktijk wordt meestal kunstlicht gebruikt om fotomorfogenetische veranderingen in gewassen te realiseren. Het selectief wegschermen van rood licht, waardoor de rood/verrood verhouding afneemt, kan mogelijk worden toegepast om de vorming van zijscheuten en pluizen te verminderen. Dit effect kan mogelijk ook worden bereikt door het verlengen van de dag met verrood stuurlicht, bijvoorbeeld door een korte belichting met verrood aan einde van de natuurlijke dag of belichtingsperiode. Het verhogen van blauwlicht kan worden toegepast om de vorming van zijscheuten te stimuleren. De rol van UV straling is onvoldoende bekend en zou per gewas nader moeten worden onderzocht. Op grond van de nu voorliggende studie lijken er zeker perspectieven te zijn voor sturing van de fotomorfogenese door middel van aanpassingen van de natuurlijke lichtkleur. Algemeen geldende regels zijn echter niet te geven vanwege het feit dat verschillende gewassen en cultivars specifieke reacties vertonen op verschillende spectrale verdelingen. In de regel zijn vaak slechts lage lichtintensiteiten of kleine verschuivingen in lichtkleur nodig om fotomorfogenetische processen in gang te zetten. Een kwantitatieve onderbouwing ontbreekt echter. Bij het beïnvloeden van de lichtkwaliteit moet rekening gehouden worden met negatieve effecten op productie door vermindering van de totale lichtevoelheid. De relatie van lichtkwaliteit en lichtkwantiteit is onvoldoende bekend.

Verandering van de lichtkleur in de kas

- *Meer Blauw*: plant korter, meer vertakking, kleinere en dikkere bladeren
Minder Blauw: plant langer, grotere maar dunnere bladeren
- *Meer Verrood*: plant langer, meer strekking, grotere dunnere bladeren
Minder Verrood: plant korter, meer vertakking, kleinere en dikkere bladeren, bloeien vertraagd
- *Meer UV-B*: fotosynthese gereduceerd, plant korter, meer vertakking, kleinere en dikkere bladeren, anthocyaansynthese verhoogd
- Meer rood is niet hetzelfde als minder verrood. De verhouding rood:verrood is vooral van belang en effecten zijn soortspecifiek

Perspectieven voor aanpassingen lichtkleur door kasomhulling en schermen

Tijdens de opkweek van het uitgangsmateriaal of in een jong gewas moeten de planten in korte tijd grote bladmassa ontwikkelen. Dit kan worden bereikt door weinig blauw licht (voor een groter blad) t.o.v. dat in natuurlijk licht. Tijdens de opkweek van het plantenuitgangsmateriaal is het verder wenselijk dat de stengelstrekking zo klein mogelijk is. Dit kan worden bereikt door licht met relatief weinig verrood (voor een geringe strekking). Bij de productie van sommige potplanten is een grote vertakking en geringe stengelstrekking gewenst. Dit kan worden bereikt door het aandeel blauwe en rode straling te verhogen en het aandeel verrode straling te verminderen. Bij bloeiende planten moet er dan wél rekening worden gehouden met een eventuele vertraagde bloei.

Een verrood absorberende folie, zoals beschreven onder 4.3.2.1 (fig. 36, fig. 37 en fig.38) filtert tot 70% van het verrood en afhankelijk van de concentratie pigment in de folie tot 20% van het blauw licht eruit. Echter wordt gelijktijdig het aandeel totaal PAR gereduceerd zonder dat het effect ervan op de productie en bedrijfseconomie bekend is. Deze folies worden in Engeland in glazen kassen als scherm gebruikt. De folies worden gebruikt voor het telen van sierplanten om versterkte stengelstrekking te voorkomen. Vooral *Eustoma* en *Chrysanthemum* reageren met een 30% reductie van de stengelstrekking. Afhankelijk van het gewas wat eronder geteeld wordt, moet met een vertraging van de bloei worden gerekend. Vooral *Petunia* reageert met een sterke bloeivertraging tot 18 dagen. Vertraging van de bloei is echter geen probleem voor het kweken van uitgangsmateriaal. Kleurspecifieke absorptie of reflectie leidt niet alleen tot verschuivingen maar ook tot vermindering van de totale lichtinput. Een vermindering van de totale lichtinput resulteert in de winter mogelijk in verminderde productie. Het is niet bekend of het voordeel van spectrale verschuiving opweegt tegen het nadeel van minder licht. Dit moet ook gezien worden in het licht van seizoensverschillen.

Andere materialen zoals de fluorescerende schermfolie beschreven onder 4.3.2.3 (fig. 43) zet een gedeelte van de blauwe straling om naar rood licht. Dit materiaal reduceert het aandeel blauwe straling met 24% en verhoogt het aandeel rode straling met ca. 7,5% ten opzichte van blank glas. De totale PAR-transmissie is afhankelijk van de pigmentconcentratie ca. 8,5% verlaagd ten opzichte van blank glas. Het is niet bekend of het voordeel van spectrale verschuiving opweegt tegen het nadeel van minder licht. Dit moet blijken uit experimenten op (semi-)praktijkschaal.

Materialen die het spectrum veranderen kunnen op verschillende manieren worden ingezet, als kasdek materiaal of als (beweegbaar) schermmateriaal. Een schermmateriaal wordt in de nacht als energiescherm gebruikt en ook overdag dicht getrokken als energiebesparing en / of een wijziging van de lichtkleur gewenst is. Hierdoor wordt in feite een dubbel kasdek gecreëerd, waardoor het gasverbruik afhankelijk van de schermstrategie wordt verlaagd. Hier moet echter rekening worden gehouden met extra lichtverlies door de tweede laag als het scherm ook overdag dicht is. Bij planten die tijdelijk behoefte hebben aan lichtreductie kan het schermmateriaal in de zomer als zonwering worden toegepast.

Gevolgen verbeterde lichtkleur voor de plant

Maatregel: Verandering lichtkleur in kas

- Gevolgen energieverbruik: ~0% gasverbruik bij toepassing als kasdek materiaal
-15% gasverbruik bij toepassing als scherm die ook overdag zo veel mogelijk wordt gesloten ten opzichte van een kas met een energiescherm die alleen in de nacht wordt gesloten
- Gevolgen gewasproductie: ?% verhoging productie
?% verhoging op de productiewaarde

Kennisleemtes (witte vlekken)

- Wat is het totale effect van een veranderde lichtkleur en gelijktijdig minder licht per gewas? Wegen de voordelen van een veranderde lichtkleur op tegen het nadeel van minder licht?
- Het lijkt mogelijk de taklengte van snijbloemen zoals gerbera te bevorderen door nabelichten met verrood licht in de zomer. In hoeverre kan de taklengte gestimuleerd worden, en hoeveel (minimaal) verrood licht is daarbij nodig? Kan de taklengte ook gestimuleerd worden door wegschermen van blauw licht?
- Bij welke gewassen kan de kritische daglengte worden beïnvloed door de lichtkleur, of door de lichtkleur EOD, teneinde de bloei te beïnvloeden?
- Bij Gerbera zou de hoeveelheid geoogst product per mol licht verbeteren door aanpassing van de vegetatief/generatief biomassa verdeling. Kennis over de beïnvloeding hiervan via lichtkleur, daglengte en/of lichtsom ontbreekt.

Toekomstbeeld

- Een beweegbaar scherm of schakelbaar kasdek waarmee de lichtkleur in de kas veranderd wordt naar behoefte voor de morfologie van de plant in een bepaald ontwikkelingsstadium, maar tevens aangepast aan de PAR-behoefte van de plant.

5.2 Gewasgroepen

5.2.1 Uitgangsmateriaal

Het doel tijdens het opkweken van het uitgangsmateriaal is om in korte tijd korte, vitale planten te produceren. Tijdens de opkweek van het uitgangsmateriaal moeten de plantjes in korte tijd grote bladmassa ontwikkelen en moet gelijktijdig de stengelstrekking zo klein mogelijk zijn. Dit kan worden bereikt door veel licht met relatief weinig verrood (voor een geringe strekking) en blauw licht (voor een groter blad) t.o.v. dat in natuurlijk licht. Een snelle toename in bladoppervlak (betere lichtonderschepping) door hoge temperatuur en RV, is direct na het planten belangrijker dan een hoog lichtniveau. De lichtbehoefte tijdens het kweken van uitgangsmateriaal kan als volgt worden samengevat:

- *veel PAR licht*
- *weinig verrood en weinig blauw*

5.2.2 Vruchtgroenten

Vruchtgroenten raken in Nederland ook in de zomer nooit met licht verzadigd. Meer licht, ook onderin het gewas, zal de fotosynthese verhogen. Meer verrood licht aan het einde van de dag remt de zijscheut ontwikkeling. Dit kan worden bereikt door belichting met verrood licht. Dit kan niet met natuurlijk licht worden bereikt, omdat de intensiteit van de natuurlijke straling aan het eind van de dag te laag is. Effecten van belichting worden hier niet verder omschreven. Vruchtgroenten hebben de volgende lichtbehoeftes;

- *veel PAR licht*
- *diepe lichtdoordringing in het gewas*
- *vermindering NIR-straling in de zomer*
- *meer verrood aan het eind van de dag*

5.2.3 Bladgroenten

Bij bladgroenten is een hoge luchtvochtigheid in de eerste helft van de teelt een belangrijkere invloedsfactor dan een hoge lichtsom voor een snelle groei. In de tweede helft van de teelt is een hoge lichtsom belangrijk voor een snelle groei en een hoge opbrengst. Het uitfilteren van UV-B straling is voordelig voor de meeste bladgroenten. Zonder UV worden namelijk grotere bladeren gevormd. Voor sommige gewassen (zoals 'Lollo Rosso') is UV-B straling echter noodzakelijk, omdat zonder UV-B niet de typische gewassenmerken (rode kleur) kunnen worden gevormd. UV-A straling mag door het kasdek niet worden geabsorbeerd omdat deze mogelijk een positief effect heeft op de gezondheid van de mens. Bladgroenten hebben dus de volgende lichtbehoeftes:

- *veel PAR licht vooral tijdens de laatste productiefase*
- *weinig verrood en weinig blaauw*
- *geen UV-B nodig (uitgezonderd roodkleurende cultivars), wel UV-A nodig*

Om de optimale combinatie te realiseren kan er aan gedacht worden om het gewas in de eerste periode onder een dubbel kasomhullingsmateriaal, zoals kunststofplaten (4.1.2) of dubbele kunststoffolies (4.1.3), te laten groeien en het gewas in de tweede periode naar een ander kascompartiment met een enkellaags kasomhullingsmateriaal te verplaatsen. Een vereiste is dan een mobiele teelt. Dit is extra belangrijk voor gewassen met een geringe energiebehoefte zoals bladgroenten. Het lage totaal verbruik, dat ook nog eens in een beperkte periode optreedt, zijn de gaskosten namelijk relatief hoog.

Een andere mogelijkheid is het overdag sluiten van een transparant scherm in de eerste periode van de productie, zoals reeds toegepast bij paprika en tomaat.

Voor welke gewassen UV-B of UV-A wel of niet voordelig is weinig bekend. Sommige kunststoffolies (4.1.3) en PC platen (4.1.2) laten in het geheel geen UV door en kunnen zo een optie zijn. Tuinbouwglas laat alleen maar UV-A straling door. Andere materialen zoals PMMA platen (4.1.2) en ETFE folie (4.1.3) laten alle UV-B straling door. De UV-doorlatendheid van folies kan gericht aangepast worden door het toevoegen van UV-absorberende pigmenten.

5.2.4 Éénmalig oogstbare snijbloemen

Éénmalig oogstbare snijbloemen, zoals chrysanthen, stellen geen bijzondere eisen aan het licht. Vooral tijdens de winterperiode is veel PAR licht en eventueel diffuus licht belangrijk voor bepaalde soorten voor de juiste kleur van de bloemen. Bij gebrek aan licht gaat de kleurintensiteit achteruit en dit gaat ten koste van de bloemkwaliteit en worden minder knoppen aangelegd. Kasomhullingsmaterialen met een hoge lichtdoorlatendheid zijn dus belangrijk. Een uniforme lichtverdeling over het gewas is een voorwaarde om een heel vak ineens te kunnen oogsten (4.2.1.3). Ook een goede lichtdoordringing in het gewas is belangrijk om een lage rood/verrood verhouding te voorkomen. Kasdekmaterialen welke het licht diffuus maken bieden hier mogelijk een uitkomst. Éénmalig oogstbare snijbloemen hebben dus de volgende lichtbehoeftes:

- *veel PAR licht vooral tijdens de winter*
- *eventueel diffuus licht*

5.2.5 Meermalig oogstbare snijbloemen

Meermalig oogstbare snijbloemen, zoals roos en gerbera, hebben een hoge lichtbehoefte. Er zijn indicaties dat deze lichtbehoefte bij roos faseafhankelijk is. Of echter een variatie in de lichtintensiteit tijdens verschillende productiefases leidt tot een hogere opbrengst is niet verder bekend. Verder zijn er indicaties dat korte-dag condities bij de facultatieve korte-dag-plant Gerbera leidt tot meer bloemen met een lager takgewicht. Echter is niet bekend wat de optimale verhouding tussen lichtintensiteit (lichtsom per dag), lichtkleur en daglengte is.

Kasomhullingsmaterialen zoals glas, PC platen en de meeste PE en EVA folies laten geen UV-B straling door. Donkerrode rozen kunnen dus niet onder PMMA, ETFE of witglas worden geteeld omdat deze materialen juist wel UV-B straling doorlaten en dit kan tot schade aan de bloemen leiden. De volgende lichtbehoeftes zijn vast te stellen:

- *veel PAR licht in de winter*
- *minder NIR-straling in de zomer*
- *geen UV-B straling voor donkerrode rozen, wel UV-A straling voor betere kleuring*

5.2.6 Potplanten

De groep potplanten is een zeer diverse groep. Er zijn potplanten oorspronkelijk afkomstig uit de ondergroei van bossen en dus aangepast aan lage lichtintensiteiten en er zijn potplanten die oorspronkelijk onder hoge lichtintensiteiten groeiden. Benutbare lichtintensiteiten zijn dus erg verschillend. Schaduwplanten raken eerder lichtverzadigd dan lichtminnende planten. Boven een bepaalde lichtintensiteit zal moeten worden geschermd. Voor alle potplanten is in de winter de lage lichtintensiteit vaak de beperkende groeifactor. Daarom wordt in deze perioden afhankelijk van het gewas wel kunstmatig belicht.

Er kan verder onderscheid worden gemaakt naar bloeiende en niet-bloeiende potplanten en naar dagneutrale, korte-dag en lange-dag planten.

Bij potplanten wordt de eindgrootte van de planten via de gekozen potmaat en de aangehouden plantafstanden geregeld. Bij bloeiende potplanten is de plantgrootte en het plantgewicht wel belangrijk, maar vormt de vorm en bloeirijkdom het belangrijkste kwaliteitscriterium. Deze worden bepaald door het aantal bloeiende scheuten en het aantal bloemen per scheut. Bij groene en bonte potplanten zijn naast de plantgrootte en het plantgewicht vooral de vorm en gevuldheid als ook de bladstand en de bladkleur belangrijk. Deze worden sterk bepaald door de plantafstand tijdens de teelt en de lichtinval tussen de planten.

Potplanten worden soms met chemische remmiddelen compact gehouden. Korte compacte planten kunnen ook worden geteeld door aan het einde van de dag met rood licht te belichten. Lage intensiteiten zijn daarbij voldoende. Omdat het daarbij gaat om kunstlicht, worden deze effecten hier niet verder omschreven. Er zijn ook andere alternatieven om stengelstrekking te remmen zoals negatieve DIF (hogere nacht- dan dagtemperatuur) en kouval.

Lichte kassen zijn voor een hoge lichtdoorlatendheid in de winter belangrijk. Het is noodzakelijk om lichtafhankelijk te schermen. Dit is bij gewassen met een hoge lichtbehoefte pas bij hogere lichtintensiteiten nodig vergeleken met gewassen met een lagere lichtbehoefte. Diffuus licht zorgt voor een betere tolerantie van het gewas voor hogere lichtintensiteiten bij een betere

fotosynthese efficiëntie. Het licht dringt dieper in het gewas door en zorgt zo voor een betere vertakking bij hoogopgaande potplanten.

Reflectie van de ondergrond is vooral bij hoge gewassen met een grote lichtbehoefte, zoals Ficus voordelig. Bij andere gewassen is dit nadelig omdat dit een ongewenste reactie van bladgrootte ontwikkeling en bladstand kan veroorzaken.

In het algemeen is een compacte potplant wenselijk. Dit kan worden bereikt door het uitfilteren van verrood of het belichten met rood aan het einde van de dag. Bij bloeiende potplanten kan door het uitfilteren van verrood echter een bloeivertraging optreden.

- *veel PAR licht in de winter*
- *lichtafhankelijk schermen naar plantbehoefte*
- *diffuus licht*
- *Uitfilteren van verrood (uitgezonderd bij bloeiende potplanten)*

Samenvatting gewenste veranderingen qua lichtintensiteit, lichtverdeling en lichtkleur

De gewenste verandering qua lichtintensiteit, lichtverdeling en lichtkleur voor verschillende gewasgroepen zijn gegeven in kwalitatieve zin. (↑) betekent meer dan van nature aanwezig (↓) betekent minder dan van nature aanwezig, (o) betekend ongeveer gelijk aan van nature aanwezige straling, (-) betekent niet wenselijk.

	<i>PAR winter</i>	<i>PAR zomer</i>	<i>UV-B</i>	<i>UV-A</i>	<i>Blauw</i>	<i>Rood</i>	<i>Verrood</i>	<i>NIR zomer</i>	<i>diffuus licht</i>
Uitgangsmateriaal (jonge planten)	↑	o			↓	↑	↓	↓	↑
Vruchtgroenten (tomaat)	↑	↑		↓	↓	↑	↑ EOD	↓	↑
Bladgroenten (groene cultivaars sla)	↑	↑		↑	↓	↑ EOD	↓	↓	↑
Bladgroenten (rode cultivars sla)	↑	↑	↑	↑	↓	↑ EOD	↓	↓	↑
Snijbloemen éénmalig oogstbaar (chrysant)	↑	o						↓	↑
Snijbloemen meermalig oogstbaar (roos)	↑	o	-	↑				↓	↑
Potplanten schaduwplant (groen: Hedera, Varen) (bloei: Phalaenopsis, Saintpaulia)	o	↓	-					↓	↑
Potplanten lichtminnend (groen: Ficus, Palm) (bloei: Chrysant, Kalanchoë)	↑	↓			↑		↓	↓	↑
	↑	↓		↑	↑			↓	↑

6 Samenvatting

Wat is licht?
- Globale straling bestaat uit een direct en diffuus stralingsaandeel. - De globale straling verandert qua intensiteit en spectrum door een aantal parameters, de zonnestand, de geografische breedte, het seizoen, het tijdstip van de dag en de mate van bewolking. - De stralingsintensiteit van de globale straling varieert in Nederland van gemiddeld 70 W m^{-2} ($320 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) in de winter tot 270 W m^{-2} ($1250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) in de zomer; de lichtsom is gemiddeld 4500 Wh/m^2 ($20730 \mu\text{mol m}^{-2}$) in de zomer en 600 Wh/m^2 ($2770 \mu\text{mol m}^{-2}$) in de winter. - Het stralingsspectrum van de globale straling bestaat uit UV-B (300-315 nm), UV-A (315-400 nm), PAR (400-700 nm), NIR (700-3000 nm); straling boven de 3000 nm is warmtestraling (FIR). - De daglengte varieert in Nederland van rond 8 uur in de winter tot 16.5 uur in de zomer; binnen de tuinbouwgebieden in Nederland zijn nauwelijks verschillen in daglengte
Licht in relatie tot fotosynthese
- Er zijn verschillen in lichtefficiëntie tussen gewassen maar deze zijn beperkt, zeker wanneer alleen gekeken wordt naar de lichtefficiëntie in de winter. - Bij een lagere lichtintensiteit neemt de efficiëntie van de lichtbenutting van het gewas toe. - Algemeen geldt dat een hoge lichtdoorlatendheid van de kas de gewasontwikkeling en -productie bevordert. In de zomer kan het selectief wegvangen van lichtpieken nuttig zijn voor sommige gewassen. - De meest optimale kwantumefficiëntie ligt voor sommige soorten in het rode of in het blauwe deel van het spectrum. Dit is afhankelijk van de lichtintensiteit en lichtkwaliteit, omdat het blad zich aanpast aan het aangeboden licht tijdens de ontwikkeling van het blad. De fotosynthese efficiëntie tijdens de eerste dagen van de productiefase is dan ook afhankelijk van de lichtomstandigheden tijdens de opkweek, waarna het gewas zich heeft aangepast aan de dan heersende lichtomstandigheden. - Gedeeltelijke omvorming van blauw naar rood licht zou gunstig kunnen zijn voor de fotosynthese efficiëntie, maar onvoldoende bekend is wat de morfofenetische effecten daarvan zijn. - In de praktijk gaat men ervan uit dat ochtendzon belangrijker is dan avondzon. De achterliggende gedachte daarbij is dat de licht benuttingsefficiëntie 's ochtends groter zou zijn dan 's middags. Een mogelijkheid zou ook kunnen zijn dat niet de lichtbehoefte van de plant verandert in het verloop van de dag, maar de invloed van externe factoren op de fotosynthese capaciteit, vooral 's middags. De literatuur geeft hierover geen uitsluitel, het verloop van de fotosynthese gedurende de dag is niet eenduidig beschreven. Dit zou een onderwerp voor nadere studie kunnen zijn. - In de praktijk wordt de daglengte bij een aantal daglengtegevoelige gewassen volledig gestuurd via (daglengte)belichting en verduistering.

Licht in relatie tot fotomorfogenese
- Veel plantensoorten hebben een minimale hoeveelheid blauwlicht nodig voor een normale plantontwikkeling. Deze behoefte verschilt per soort en varieert van 5-30 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. In Nederland wordt aan deze behoefte voldaan door natuurlijk licht, ook in de winter periode. Het selectief verminderen van een overmaat aan blauwlicht kan de bladontwikkeling van jonge planten positief beïnvloeden. - De gewasstructuur (te beïnvloeden door plantafstand en teeltsysteem) is van belang i.v.m. de spectrale verschuivingen die optreden in een gewas. Onderin een gewas kan voor actieve groeipunten een tekort aan blauwlicht ontstaan. - Het selectief wegschermen van rood licht, waardoor de rood/verrood verhouding afneemt, kan mogelijk worden toegepast om de vorming van zijscheuten en pluizen te verminderen. Dit effect kan mogelijk ook worden bereikt door het verlengen van de dag met verrood stuurlicht, bijvoorbeeld door een korte belichting met verrood aan einde van de natuurlijke dag of belichtingsperiode. Het verhogen van blauwlicht kan worden toegepast om de vorming van zijscheuten te stimuleren. De rol van UV straling zou per gewas nader moeten worden onderzocht. - Bij het beïnvloeden van de lichtkwaliteit moet rekening gehouden worden met negatieve effecten op productie door vermindering van de totale lichthoeveelheid. De relatie van lichtkwaliteit en lichtkwantiteit is onvoldoende bekend.
Optimalisatie uitgangsmateriaal
- Bij lage LAI (jong gewas) de ondergrond afdekken met materiaal dat zoveel mogelijk licht reflecteert zodat het gewas meer licht vangt. - Bij lage LAI (jong gewas) tijdens de zomer een bodemfolie gebruiken dat de NIR-straling sterk reflecteert zodat de kas minder warm wordt. Tijdens de winter een bodemfolie gebruiken dat de NIR-straling sterk absorbeert, zodat de kas opwarmt en het gasverbruik gereduceerd wordt. - Als in de zomer zonwering wordt toegepast, dan materialen gebruiken die relatief veel blauw wegfilteren (rode doeken), dit stimuleert de bladgrootte. - De rood/verrood verhouding verhogen om lengtegroei te remmen. Denk hierbij aan een kasdekmaterialen/schermdoeken die verrood licht uitfilteren of aan rood nabelichten aan het einde van de lichtperiode. Diffuus licht zorgt voor een betere lichtverdeling in het gewas en kan daardoor de rood/verrood verhouding in het gewas verhogen. Er zijn ook alternatieven om stengelstrekking te remmen zoals DIF, kouval en chemische middelen.
Optimalisatie vruchtgroenten
- Versnelde opbouw van een hoog LAI direct na het planten door gebruik van schermfolie dat met name blauwlicht wegfiltert (lagere verhouding blauw/rood licht) - Verbeteren van de CO₂ voorziening in de zomerdag, o.a. door nog verdergaande temperatuurintegratie, dakkoeling en gesloten kas - Terugdringen van de hoeveelheid drogestof die wordt vastgelegd in blad en stengel. Werken dus aan: a. een vroege en goede zetting en aan een zo hoog mogelijk vruchtgewicht o.a. via plantdichtheid en teelttemperatuur - Remming van de zijscheut ontwikkeling (dieven) door EOD verroodlicht

Optimalisatie bladgroenten
- Het bladoppervlak (kropgrootte/biomasse) kan worden vergroot door wegfilteren van blauwen en verrode straling of direct vanaf planten einde-van-de-dag roodlicht nabelichten. - Bij zonwering een scherm toepassen dat selectief blauw absorbeert om het bladoppervlak (kropgrootte/biomassa) te vergroten (verlaging van de blauw/rood verhouding) - In de laatste weken van de teelt geen blauwlicht meer wegschermen om vastere kroppen te krijgen - Kiezen voor lichtst mogelijke kassen, dit geeft in de winterperiode lagere nitraatniveaus - UV-A niet wegschermen, het geeft mogelijk positief effect op voedingswaarde van het product voor de consument
Optimalisatie éénmalig oogstbare snijbloemen
- Zorg met name in de LD-fase, voor voldoende licht voor een goede stengelkwaliteit - Zorg voor een goede lichtdoordringing in het gewas om een lage rood:verrood verhouding te voorkomen (zijscheuten met te veel blad)
Optimalisatie meermalig oogstbare snijbloemen
- Streef naar de optimale verhouding lichtintensiteit/temperatuur - Streef naar een betere CO₂-voorziening door de het ventileren te verminderen, denk aan dakkoeling, gesloten kas, wegschermen van NIR-straling - Vermijden UV-B in verband met donkerverkleuring van rode rozen
Optimalisatie potplanten
- lichte kassen en lichtafhankelijk schermen geeft bij schaduwplanten de mogelijkheid om in donkere uren meer licht bij de planten te krijgen dan bij vaste zonwering, zoals een krijtdek - fase-afhankelijk (LAI-afhankelijk) aanpassen van gewenst lichtniveau d.m.v. schermstrategie, een volgroeid gewas (LAI 2-4) kan een hogere lichtintensiteit benutten dan een jong gewas met een LAI<1. - tijdens het schermen alleen de zonbeschenen kant van de kap schermen, zodat alleen het directe zonlicht wordt weggeschermd, maar niet het diffuse licht - meer diffuus maken van het licht op gewasniveau biedt de mogelijkheid om pas bij een hoger lichtniveau te schermen - meer diffuus maken van het licht geeft een lagere rood/verrood verhouding onderin het gewas en daardoor een betere vertakking bij hoog opgaande potplanten - kwantiteit/kwaliteit verhouding verbeteren door licht-temperatuur verhouding in de gaten te houden bij tropische gewassen, grenzen zoeken - planten compacter houden door bij niet-bloeiende potplanten verrood licht weg te schermen en/of EOD roodlicht bij te belichten, hierbij opletten op bloeivertraging - planten compacter houden door meer blauwlicht, dit zorgt voor een betere vertakking van planten - bij sommige potplanten betere bloemenkleur door UV in de kas, rol van UV zou per gewas nader moeten worden onderzocht

Welke kasdekmaterialen zijn er?

- Glas is het meest gebruikte kasomhullingsmateriaal in Nederland (95-98% van de 10.500 ha kassen). Blank glas is het meest gebruikelijk, speciale soorten zijn wit glas, Hortiplus en gehard glas. De lichtdoorlatendheid is 89-92% bij loodrecht lichtinval en 80-84% bij diffuus lichtinval. Blank glas laat straling vanaf 320 nm door, wit glas laat ook een gedeelte van de UV-B straling door.
- Kunststofplaten worden op ca. 10-12% van de nieuwbouwkassen (40- 45 ha per jaar) toegepast. PC kanaalplaten zijn het meest gebruikelijk naast PMMA kanaalplaten. De lichtdoorlatendheid van PC ligt rond de 80% voor direct stralingsinval (61% diffuus), de lichtdoorlatendheid van PMMA ligt rond de 89% direct (76% diffuus). PC laat geen straling beneden de 400 nm door, PMMA is transparant voor UV-B straling. De eigenschappen van kunststofmaterialen kunnen door allerlei technieken worden aangepast. Een nieuwe ontwikkeling is de zig-zag plaat.
- Kunststoffolies kunnen zeer verschillende eigenschappen hebben. Er bestaan goedkope traditionele folies van PE, EVA of PVC, maar ook duurzame materialen met een levensduur vergelijkbaar met die van glas zoals ETFE. De lichttransmissie is in het eerste geval vergelijkbaar met glas in het tweede ligt deze rond de 93-94% direct (88% diffuus). De spectrale doorlatendheid van folies kan door verschillende technieken veranderd worden.
- Schermmaterialen bestaan voor verschillende doelstellingen: energiebesparing, zonwering, verduistering, tegen lichtuitstoot of combinaties ervan. Materialen zijn bandjesschermen, transparante folieschermen of weefsels. De mate van energiebesparing is afhankelijk van het type materiaal, de transmissie voor warmtestraling van het materiaal, de emissiewaarde van het materiaal, de vochtdoorlatendheid van het materiaal, de afdichting van het scherm, de teelt en de setpoints voor de klimaatregeling. Materiaaleigenschappen kunnen evenwel als bij folies worden aangepast.
- Bodemafdekfolies hebben het doel om PAR en NIR zo veel mogelijk te reflecteren, dit heeft invloed op de gewasproductie en het energieverbruik. Bij een hogere PAR reflectie stijgt de gewasproductie (10% meer reflectie geeft 2% meer productie bij tomaat). Bij een geringere NIR reflectie (hogere absorptie) daalt het energieverbruik (10% minder reflectie betekent 2% minder energie).
- Ook volkomen nieuwe materialen zijn in ontwikkeling zoals nanoschuim en COC. Deze combineren een goede lichttransmissie met een hoge isolatiewaarde, maar zijn naar verwachting pas over lange termijn beschikbaar.

Welke materiaaleigenschappen zijn relevant en waarom?

- Globale straling bestaat uit een direct en een diffuus stralingsaandeel. Omdat gedurende de winter ca. 75% van de globale straling diffuus is door bewolking, is naast de PAR transmissie voor direct invallend licht tevens de PAR transmissie voor diffuus invallend licht van belang. Afhankelijk van de invalshoeken treden reflectieverliezen op. Ook de dakhelling van de kas en de oriëntatie van kas is hierbij van belang.
- De lichtverstrooiing of haze van de kasomhullingsmaterialen is een maat voor de helderheid van het materiaal. Meer diffuus licht in de kas bevordert de lichtbenutting in een hoog gewas. Over de lichtverstrooiing van kasdek- en schermmaterialen is echter nog weinig bekend.
- De UV transmissie is afhankelijk van het type materiaal. Blank glas laat geen UV-B straling door, alleen grote gedeelten van de UV-A straling vanaf 320 nm. De meeste folies zijn niet

doorlatend voor UV-B, ze laten maar een klein gedeelte van de UV-A straling boven de 360 nm door. Er bestaan ook folies en platen, die alle UV-B en UV-A straling (beneden de 400 nm) eruit filteren, zoals ETFE-folie en PMMA-platen. Anderen laten helemaal geen UV-B en UV-A straling door, zoals PC.

- De NIR straling is niet nodig voor de plantenfotosynthese maar draagt indirect bij aan de opwarming van de kas. Dit is een ongewenst effect in de zomer, maar zorgt in de winter voor een energiebesparend effect. Een variabel scherm met NIR reflectie kan hier mogelijk een oplossing bieden. De totale energieeffecten moeten nader worden onderzocht.
- De FIR transmissie (doorlatendheid voor langgolvlige warmtestraling) is afhankelijk van het type materiaal en de materiaaldikte. Glas, PMMA en PC zijn niet doorlatend voor FIR, ETFE in geringe mate en bij PE en EVA is dit afhankelijk van de samenstelling van de folies. Met toenemende FIR transmissie van het kasomhullings- of schermmateriaal stijgt het energieverbruik van de kas.
- De emissiecoëfficiënt van het materiaaloppervlak is ook belangrijk voor het energieverbruik van de kas. De emissiecoëfficiënt van glas, PMMA, PC is hoog. Door een lage emissiecoating kan deze verlaagd worden, het energieverbruik neemt dan af. De emissiecoëfficiënt van folie is lager en bij een droog materiaal dus gunstiger voor het energieverbruik.

Welke mogelijkheden zijn er om materiaaleigenschappen aan te passen?

- Stralingsintensiteit en stralingsspectrum kunnen worden gevarieerd door de transmissie, absorptie of reflectie van materialen te veranderen.
- De totale lichttransmissie van kasomhullingsmaterialen kan worden verhoogd door speciale oppervlakte-coatings (interferentiecoatings of coatings met een lage brekingsindex). Deze techniek kan worden toegepast op glas en kunststofplaten. Een andere mogelijkheid is het veranderen van de oppervlaktestructuur (microstructuur of macrostructuur). De microstructuur van glas, platen en folies kan theoretisch worden veranderd. Een verandering van de macrostructuur lijkt momenteel alleen mogelijk bij platen (zig-zag).
- Het stralingsspectrum van glas kan worden gevarieerd door oppervlakte coatings. Deze techniek is echter beperkt en duur. Het spectrum van kunststofplaten kan worden gevarieerd door coatings en het toevoegen van additieven. De spectrale doorlatendheid van folies en schermmaterialen is goed varieerbaar door het toevoegen van additieven.
- Door fluorescentie kunnen bepaalde golflengtes worden verschoven naar andere golflengtes. Dit kan zelfs leiden tot een hogere PAR transmissie.
- Nieuwe technieken zoals fotochromisme, thermochromisme, electrochromisme en gashromisme staan in de kinderschoenen en bieden misschien op lange termijn een optie.

Wat is het effect op de energiehuishouding?

- Het verhogen van de PAR straling met 10% leidt in een standaard tomatenkas tot een productiestijging van ca. 8% en een reductie van het gasverbruik van ca. 2.5%. In een gesloten kas wordt de koellast met ca. 25% verhoogd.
- Het uitfilteren van alle NIR straling leidt in een standaard tomatenkas tot een productiestijging van ca. 5% en een verhoging van het gasverbruik van ca. 8%. In een gesloten kas blijft de productie nagenoeg gelijk maar wordt de koelbehoefte met 50% gereduceerd.
- Glas, PMMA en PC zijn niet doorlatend voor warmtestraling (FIR). Bij dit soort kasdekmaterialen leidt de reductie van de emissiecoëfficiënt in een standaard tomatenkas tot een productieverlies van ca. 2% en een reductie van het gasverbruik van ca. 10%. In een

gesloten kas blijft de productie nagenoeg gelijk en wordt de koelbehoefte met ca. 20% verhoogd.

- Bij kunststoffolies worden additiven toegevoegd om de doorlatendheid voor warmtestraling (FIR) te reduceren. Hierdoor verandert ook de emissiecoëfficiënt. In totaal is het gasverbruik ook bij folies met een lage FIR-transmissie altijd licht hoger dan bij glas, PMMA of PC. In een standaard tomatenkas leidt een verlaging van de FIR-transmissie naar 20% tot een productieverlies van ca. 2% en een reductie van het gasverbruik van ca. 8%. In een gesloten kas blijft de productie gelijk en veranderen gasverbruik en koelbehoefte nauwelijks.
- De overall-effecten van een aangepast kasdek materiaal (vernadering van meerdere materiaaleigenschappen) voor een bepaald gewas jaarrond moeten verder worden onderzocht.

7 Conclusies en aanbevelingen

8 Literatuur

- Acock B., Charles-Edwards D.A., Fitter D.J., Hand D.W., Ludwig L.J., Wilson J.W., en Withers A.C. 1978. The contribution of leaves of different levels within a tomato crop canopy to photosynthesis: an experimental examination of two canopy models. *J. Exp. Bot.* **29**: 815-827.
- Ashudah Y. 1997. Improving the properties of polyethylene films for agricultural uses, *Plasticulture*, **115**:3.
- Autio J. 2000. Supplementary lighting regimes strongly affect the quantity of gerbera flower yield. *Acta Horticulturae* **515**: 91-98
- Bakker J.C., Duffhues W.F.S., Kool E., Zwart H.F. en van de Braak N.J. 1998. Kas van de Toekomst. Eindrapportage IMAG-DLO, PBG, TNO, ECOFYS, ECN, september 1998, 181 pp.
- Barro F., De La Haba P., Malsonado J.M. & Fontes A.G. 1989. Effect of light quality on growth, contents of carbohydrates, protein and pigments and nitrate reductase activity in soybean plants. *J. Plant Physiol.* **134**: 586-591.
- Benoit F. 1998. Neue Foliengeneration für den Gartenbau. *Monatsschrift* **3**: 242-243.
- Berg G.A. van den 2000. Belichting bij tomaten. *Groente en Fruit* **31**: 15
- Bodlaender K.B.A., Waart M. van de en Marinus J. 1985. Effects of drought on water use, photosynthesis and transpiration of potatoes. 2. Drought, photosynthesis and transpiration. *Proceedings international seminar Wageningen*.
- BPI Agri 2004: Productinformation. BPI Agri, PO Box 343, Yarm Road, Stockton-on-Tees, Cleveland TS18 3GE, UK. <http://www.bpiagri.com>
- Bredmose N.B. 1997. Chronology of three physiological development phases of single-stemmed rose (*Rosa hybrida* L.) plants in response to increment in light quantum integral. *Sci. Hort.* **69**:107-115.
- Bredmose N.B. 1997. Year-round supplementary lighting at twelve photosynthetic photon flux densities for cut roses. *Acta Horticulturae* **418**: 59 – 64
- Briassoullis D., Waaijenberg D., Gratraud J. en Elsner B. von 1997, Mechanical properties of covering materials for greenhouses: Part 1: General Overview, *Journal of Agricultural Engineering Research* **67**: 81-96
- Brosche M. en Strid Å. 2003. Molecular events following perception of ultraviolet-B radiation by plants. *Physiol. Plant.* **117**:1-10.
- Bruggink G.T. 1987. Influence of light on the growth of young tomato, cucumber and sweet pepper plants in the greenhouse: calculation the effect of differences in light integral. *Scientia Horticulturae* **31**: 175-183
- Bukhov N.G., Drozdova I.S., Bondar V.V. en Mokronosov A.T. 1992. Blue, red and blue plus red light control chlorophyll content and CO₂ gas exchange in barley leaves: quantitative description of the effects of light quality and fluence rate. *Physiol. Plant.* **85**: 632-638.

- Büttner D., Caps R., Heineman U., Hümmer E., Kadur A. en Fricke J. 1988. Thermal loss coefficients of low-density silica aërogels tiles, *Solar Energie*, **40**: 13.
- Buwalda F. 1994. Teelt van jaarrondchrysant op een recirculerend eb-/vloedsysteem, productiecijfers 1990-1993. PBG Rapport **176**.
- Canham A. E. 1962. Shading glasshouses with liquid films. British Electrical and Allied Industries Research Association Report **W/T40**.
- Cathey H.M. en Campbell L.E. 1979. Relative efficiency of high- and low-pressure sodium and incandescent filament lamps used to supplement natural winter light in greenhouses. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* **104**: 812-825.
- Chaumont M., Morot-Gaudry J.F. en Foyer C.H. 1994. Seasonal and diurnal changes in photosynthesis and carbon partitioning in *Vitis vinifera* leaves in vines with and without fruit. *Journal of Experimental Botany* **45**: 1235-1243.
- Chopra K.L., Major S. en Pandya D.K. 1983. Transparant conductors-A status review, *Thin Solid Films*, **102**:1.
- Christie J.M. en Briggs W.R. 2001. Blue light sensing in higher plants. *J. Biol. Chem.* **276**:11457-11460.
- CIE 106/5 1993. Collection in Photobiology and Photochemistry, Commission Internationale de l'éclairage (CIE), ISBN 3900734461, pp. 29.
- CIE 106/8 1993. Terminology for photosynthetically active radiation for plants, Commission Internationale de l'éclairage (CIE), 42-46.
- CIE 85 1989. Solar spectral irradiance, Commission Internationale de l'éclairage (CIE), ISBN 3900734224, pp. 48.
- Cockshull K. E., Graves C.J. en Cave R.J. 1992. The influence of shading on yield of glasshouse tomatoes. *J. Hort. Sci.* **67**:11-24.
- Cockshull K.E. 1984. The photoperiodic induction of flowering in short-day plants. In: *Light and the Flowering Process*. (D. Vince-Prue, B. Thomas & K.E. Cockshull, eds.). Academic Press, London, 33-49.
- Correia M.J., Chaves M.M.C. en Pereira J.S. 1990. Afternoon depression in photosynthesis in grapevine leaves – evidence for a high light stress effect. *Journal of Experimental Botany* **41**: 417-426.
- Coulson K.L., 1975. Solar and terrestrial radiation, Ac. Press, N.Y., pp. 322.
- Crano J.C. en Guglielmetti R.J. 1999. Organic Photochromic and Thermochromic Compounds 1: Main Photochromic Families. Plenum Press, New York – London.
- Cranqvist C.G., Azens A., Hjelm A., Kullman L., Niklasson G.A., Ronnow D., Stromme Mattsson M., Veszelei M. en Vaivars G. 1998. Recent advances in electrochromics for smart windows applications, *Solar Energie*, **63**: 199.

- Daponte T. 1995. Neue Gewächshausfolien - nicht nur zur Klimakontrolle. KTBL-Arbeitspapier 220: Kunststoffe und nachwachsende Rohstoffe II. Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup, 67-87.
- Daponte T. 1997. Recent advances in photoselective films with interference effects. In: Plant Production in Closed Ecosystems: 123-138 (Editors: Goto, E., Kurata, K., Hayashi, M. and Sase, S.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht – Boston – London.
- Decoteau D.R., Hatt H.A., Kelly J.W., McMahon M.J., Rajapakse N., Young R.E. en Pollock R.K. 1993. Applications of photomorphogenesis research to horticultural systems. Hort Sci. **28**: 974-1063.
- Deitzer G.T. 1984. Photoperiodic induction in long-day plants. – In: Light and the flowering process. D. Vince-Prue, B. Thomas and K.e. Cockshull (eds), **51** – 63 Academic press, London. ISBN 0-12-721960-9.
- Demers D.A., Dorais M., Wien C.H., Gosselin A.. 1998. Effects of supplemental light duration on greenhouse tomato plants and fruit yields. Sci. Hort. **74**: 295 – 306.
- Dougher T.A.O. en Bugbee B. 2001. Differences in the response of wheat, soybean and lettuce to reduced blue radiation. Photochemistry and Photobiology **73**: 199-207.
- Dueck T., Elings A., Kempkes F., Knies P., Van de Braak N., Garcia N., Heij G., Janse J., Kaarsemaker R., Korsten P., Maaswinkel R., Ruijs M. 2004. De Energiebalans in Kengetallen (concepteindrapport).
- Duer K. en Svendsen S. 1998. Monolithic silica aerogel in superinsulating glazings, Solar Energie, **63**: 259.
- Elsner B. von, Briassoulis D., Waaijenberg D., Mistriotis A., von Zabeltitz Chr., Gratraud J., Russo G. en Suay-Cortes R.. 2000. Review of structural and funtional characteristics of greenhouses in European Union countries: Part 1, Design requirements, Journal of Agricultural Engineering Research **75**: 1-16.
- Fan-YanPing, Yu-Rangcai en Guo-ZhiHua 1998. Effects of shading on the growth and photosynthetic chracteristics in *Spathiphyllum* palls. Acta Hort. Sinica **25**: 270-273.
- Farina D.J. 1998. Building a low-cost thermal imaging system. Sensors Magazine **15** (7): 12-16.
- Faust J.E. en Heins R.D. 1994. Modelling inflorescence development of the African violet (*Saintpaulia ionantha* Wendl.). J. Amer. Soc. Hort. Sci. **119**:727-734.
- Gbiorczyk. K., Sonneveld P.J., Bot G.P.A. en von Elsner B. 2002. The effect of roof inclination on the condensation behaviour of plastic films used as greenhouse covering materials, Paper no. S16-O-28, XXVIth International Horticultural Congress and Exhibition (ISHS), Toronto, Canada, 11-17 Augustus, 2002, will be published in Acta Horticulturae.
- Georg G., Graf W., Scheiger D., Wittver W., Nitz P. and Wilson H.R., Solar Energie, **49** (1992) 387
- Gijzen H. 1995. In: Greenhouse Climate Control. p.29. Wageningen.
- Gosse G. 1986. Production de matière sèche et rayonnement solaire intercepté pas une couvert végétal. Agronomie **6**:47-56.

- Haeringen C. J. van, West J. S., Davis F. J., Gilbert A., Hadley P., Pearson S., Wheldon A. E. en Henbest R.G.C. 1998. The Development of Solid Spectral Filters for the Regulation of Plant Growth. *Photochemistry and Photobiology* **67** (4):407-413.
- Hand D.W., Clark G., Hannah M.A., Thornley J.H.M. en Warren Wilson J. 1992. Measuring the canopy net photosynthesis of glasshouse crops. *Journal of Experimental Botany* **43**: 375-381.
- Hand D.W., Warren Wilson J. en Acock B. 1993. Effects of light and CO₂ on net photosynthesis rates of stands of aubergine and *Amaranthus*. *Annals of Botany* **71**: 209-216.
- Hanyu H. en Shoji K. 2002. Acceleration of growth in spinach by short-term exposure to red and blue light at the beginning and at the end of the daily dark period. *Acta Hort. (ISHS)* **580**:145-150.
- Heath O.V.S. en Orchard B. 1957. Temperature effects on the minimum intercellular space carbon dioxide concentration. *Nature* **180**: 180-181.
- Heemers L. en Oyaert E. 2001. Lichtreductie tijdens zomerteelt *Spathiphyllum*. *Verbondsnieuws* **45**: 28-29.
- Heemers L., Oyaert E., Volckaert E. en Debergh P.C. 2000. Flower initiation of *Spathiphyllum* in relation to climatical circumstances in different seasons. *Proc. 6th PhD Symposium* 65: 129-133, Gent, Belgium.
- Heinrichs G. 1998. Gemeinsam stark mit dem 'Climax'- Gewächshaus, *Deutscher Gartenbau* (27), p. 24-26.
- Helsper J.P.F.G., de Vos R.C.H., Maas F.M., Jonker H.H., van den Broeck H.C., Jordi W., Pot C.S., Keizer L. C. P. en Schapendonk A.H.C.M.. 2003. Response of selected antioxidants and pigments in tissues of *Rosa hybrida* and *Fuchsia hybrida* to supplemental UV-A exposure. *Physiologia Plantarum* **117**: 171-178.
- Hemming S., Dieleman A., van Os E., Hemming J., Swinkels G.J., Breuer J. en Slangen J. 2003. Effect of fluorescent films on production and quality of strawberry fruits, *IMAG Nota* **V 2003-65**:33.
- Hemming S., Van de Braak N., Kempkes F., Marcelis L. en Elings A.. 2004. Haalbaarheidstudie Fluorescerend Energiescherm. *Rapport 070*, Agrotechnologie & Food Innovations, Wageningen.
- Heuvelink E. 1996. Tomato growth and yield: quantitative analysis and synthesis. Ph.D. Thesis, Landbouwniversiteit, Wageningen.
- Heuvelink E. 1996. Tomato growth and yield: quantitative analysis and synthesis. Thesis LUW
- Hoenecke M.E., Bula R.J. en Tibbits T.W. 1992. Importance of 'blue' photon levels for lettuce seedlings grown under red-light-emitting diodes. *Hort. Sci.* **27**:427-430.
- Hoffmann S. 1999. The effect of UV-radiation on colours of leaves and flowers of ornamental plants. *Gartenbauwissenschaft* **64**: 88-93.

- Hoffmann S. en Waaijenberg D. 2001. Tropical and subtropical greenhouses: a challenge for new plastic films, Proceedings International Symposium on design and environmental control of tropical and subtropical greenhouses, Taichung, Taiwan, 15-18 april 2001, pp. 8.
- Hoffmann S. 1999a. The effect on Photoselective Cladding Materials on the Growth of Ornamental Plants I. Review. *Gartenbauwissenschaft* **64** (3): 100-105.
- Hoffmann S. 1999b. Die Wirkung von photoselktiven Bedachungsmaterialien auf das Wachstum von Zierpflanzen. II. Wirkung des UV-Bereichs auf das Streckungswachstum. *Gartenbauwissenschaft* **64** (4), 183-189.
- Hoffmann S. 1999c. Zur Wirkung von photoselktiven Bedachungsmaterialien auf Zierpflanzen. *Gartenbautechnische Informationen Heft* **46**, Institut für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft ITG.
- Holmes en Smith 1977. The function of phytochrome in the natural environment – I. Characterisation of daylight for studies in photomorphogenesis and photoperiodism, *Photochemistry and Plantbiology* **25**, 533-538.
- Holmes M.G. en Schafer E. 1981. Action spectra for changes in the "high irradiance reaction" in hypocotyls of *Sinapis alba* L. *Planta* **153**:267-272.
- Horn W. 1996: Zierpflanzenbau (cultivation of ornamental plants), Blackwell Wissenschafts-Verlag Berlin-Wien, pp. 662.
- Hughes J.E., Morgan D.C., Lambton P.A., Black C.R. en Smith H., 1984. Photoperiodic time signals during twilight. *Plant Cell Env.* **7**: 269-277.
- Inada K. 1977. Effects of leaf colour and the light quality applied to leaf-developing period on the photosynthetic response spectra in crop plants. *Japan. Jour. Crop Sci.* **46**: 37-44.
- Ito T. 1971. Photosynthetic activity of vegetable plants and its horticultural significance. II. The time course of photosynthesis in tomato plants as influenced by some external and internal factors, especially by water and starch contents in the leaf. *Journal of the Japanese society for horticultural science* **40**: 41-47.
- Jiao J., Tsujita M.J. en Grodzinski B. 1991. Influence of temperature on net CO₂ exchange in roses. *Can. J. Plant Sci.* **71**:235-243.
- Jiao J., Tsujita M.J., Grodzinski B., 1991. Influence of radiation and CO₂ enrichment on whole plant net CO₂ exchange in roses. *Can.J.Plant Sci.* **71**: 245-252.
- Kadman-Zahavi A. en Ephrat E. 1973. Effect of red and far-red illuminations at the end of short days and interactions with night-break illuminations of *Chrysanthemum morifolium* plants. *Plant Cell Physio.* **14**: 409-411.
- Kadman-Zahavi A., Alvarez-Vega E. en Ephrat E. 1976. Development of plants in filtered sunlight. II. Effects of spectral composition, light intensity, daylength and red and far-red irradiations of long- and short-day grasses. *Israel Journal of Botany* **25**, 11-23.
- Khattak A. M. en Pearson S. 1997. The effects of light quality and temperature on the growth and development of chrysanthemums cvs. 'Bright Golden Anne' and 'Snowdon'. *Acta Horticulturae* **435**, 113-121.

- Kitano M. en Eguchi H.. 1993. Dynamic analysis of water relations and leaf growth in cucumber plants under midday water deficit. *Biotronics* **22**: 73-85.
- Kittas, C. en Baille A. 1998: Determination of the Spectral Properties of Several Greenhouse Cover Materials and Evaluation of Specific Parameters Related to Plant Response. *Journal of Agricultural Engineering Research* **71**, 193-202.
- Kool M.T.N. en Koning J.C.M. 1996. Analysis of rose crop production. *Acta Horticulturae* **424** 79-86.
- Kursawe M. en Hofmann T.A. 2000. High transmission coating on glass for solar applications, *Proceedings 3rd Int. Conference on Coatings on Glass (3rd ICCG)*, Oct. 29 - Nov. 2, 2000, p. 681.
- Lampert C.M. 1987. Advanced optical materials for energy efficiency and solar conversion, *Solar & Wind Technology*, **4**:347.
- Lampert C.M. 1981. Heat mirror coatings for energy conserving windows, *Solar Energy Materials*, **6**:1.
- Lampert C.M. 1983. Solar optical materials for innovative window design, *Int. J. of Energy Research*, **7**:359.
- Landbouwschap 1984. Kwaliteit van kassen, verslag van een onderzoek naar de kwaliteit en de toepassingsmogelijkheden van kasomhullingsmaterialen, Landbouwschap, Den Haag, pp.32.
- Lee J.H. 2002. Effects of planting date and plant density on cro growth of cut chrysanthemum. *J. of Horticultural Science and Biotechnology* **77**:238-247.
- Lelli N. en Gugumus F. 1996. New developments in agrofilms stabilisation, *Plasticulture*, **111** (3):3-16.
- Lichtenthaler H.K., Buschmann C. en Ramsdorf U. 1980. The importance of blue light for the development of sun-type chloroplasts. - In: *The blue light syndrome*. H. Senger (ed.). Springer Verlag, Berlin, 485-494.
- Lozano-González 1996: Growing lettuces in greenhouses clad with polychromatic films. *Plasticulture* **110** (2): 15-22.
- Maas F.M. en Bakx E.J. 1995. Effects of light on growth and flowering of *Rosa hybrida* 'Mercedes'. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* **20**: 571-576.
- Maas F.M. en Van Hattum J. 1998. Thermomorphogenic and photomorphogenic control of stem elongation in *Fuchsia* is not mediated by changes in responsiveness to gibberellins. *J Plant Growth Regulation* **17**: 39-45.
- Marcelis L., Broekhuijsen G., Meinen E., Nijs L. en Raaphorst M. 2004. Lichtregel in de Tuinbouw. 1% licht = 1% productie? Nota PRI, Wageningen, in press.
- McCree K.J. 1972. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agric. Meteorol.* **9**: 191-216.

- McMahon M.J. en Kelly J.W. 1990. Influence of spectral filters on height, leaf chlorophyll, and flowering of Rosa X hybrida 'Meirutra'. J. Environ. Hort. **8**:209-211.
- McMahon M.J., Kelly J.W., Decoteau D.R., Young R.E. en Pollock R.K. 1991. Growth of Dedranthema x grandiflorum (Ramat.) Kitamura under various spectral filters. J. Amer. Soc. Hort. Sci. **116**: 950-954.
- Menard C. en Danserau B. 1995. Differential responses of rose cultivars to light source and nitrogen fertilization. Scientia Horticulturae **64**: 117-132.
- Meyer 1969: Meyers Lexikon der Technik und der exakten Naturwissenschaften.
Bibliographisches Institut, Mannheim, Wien, Zürich
- MMI Laboratories 2001, <http://www.univ-tln.fr/Recherche/unites/l2mi/fred/vo2.htm>
- Mohammadkhani V., Sonneveld P.J. 2003. Haalbaarheidsstudie energiebesparend bodemafdekfolie. A&F-rapport 2003-**. In druk.
- Morris L.G., Trickett E.S., Vanstone F.H. en Wells D.A.. 1958. The limitation of maximum temperature in a greenhouse by use of a water film on the roof. Journal of Agricultural Engineering Research **3**, 121-130.
- Mortensen L.M. en Strømme E. 1987. Effects of light quality on some greenhouse crops. Scientia Horticulturae **33**, 27-36.
- Mortensen L.M. en Moe R. 1992. Effects of selective screening of the daylight spectrum, and of twilight on plant growth in greenhouses. Acta Horticulturae **305**, 103-115.
- Mortensen L.M., Strømme E., Sebesta Z. and Wenner D. 1987. Growth chambers with control of light quality. Norwegian Journal of Agricultural Science **1**, 1-5.
- Mortensen L.M. en Strømme E. 1987. Effects of light quality on some greenhouse crops Sci. Hort. **33**: 27-36.
- Murakami K., Cui H., Kiyota M., Aiga I. and Yamane T. 1997. Control of plant growth by covering materials for greenhouses which alter the spectral distribution of transmitted light. Acta Horticulturae **435**, 123-139.
- Nederhof E.M. 1986. Licht in de kas ook in de zomer belangrijk. In: *Licht in de kas*. E.M. Nederhof (ed.) Informatiereeks no. **90**, Proefstation voor Tuinbouw onder Glas, Naaldwijk. Pp. 41-43.
- Nederhoff E.M. 1994. Effects of CO₂ concentration on photosynthesis, transpiration and production of greenhouse fruit vegetable crops. Ph.D. Thesis, Landbouwniversiteit, Wageningen.
- Nederhoff E.M. en Vegter J.G. 1994. Photosynthesis of stands of tomato, cucumber and sweet pepper measured in greenhouses under various CO₂-concentrations. Ann. Bot. **73**: 353-361.
- Nordgaard A. en Beckman W.A.. 1992. Modeling of flat-plate collectors based on monolithic silica aerogel, Solar Energie, **49**:387.

- Os P. van, De Koster R. en Van der Wurff A.A.M. 1989. Betere produktieverbetering Berbera door assimilatiebelichting. Vakblad voor de Bloemisterij **40**:26-29.
- Out P.G. en Breuer J.J.G. 1995. Effect van gecoat glas op de lichttransmissie en het energieverbruik van tuinbouwkassen, Rapport **95-1**, maart 95, IMAG-DLO Wageningen.
- Out P.G. 1993. Betere isolatie en toch veel licht, Groenten en Fruit / Glasgroenten (**2**), p. 26-27
- Oyaert E., Debergh P.C. en Volckaert E. 1997. Growth inhibition of *Coleus* under coloured plastic films. Acta Horticulturae **435**, 141-147.
- Parsley M. 1991. Hallcrest Handbook of Thermochromic Liquid Crystal Technology. Hallcrest Inc., Glenview, IL.
- PBG 2000. Schermen in de glastuinbouw, Energie- en teeltaspecten, Proefstation voor Bloemisterij en Glasgroente, Aalsmeer-Naaldwijk, 2^e druk, pp. 128.
- Pearson S., Wheldon A.E. en Hadley P. 1995. Radiation transmission and fluorescence of nine greenhouse cladding materials. Journal of Agricultural Engineering Research **62**, 61-70.
- Pekela R.W. 1995. New organic aerogels based upon a phenolic-furfural reaction, J. Non-Cryst. Solid **188** (1995), p. 34-40.
- Pettersen A.H. 1984. Veksthus med strålingsabsorberende overflate. Gartneryrket **74**, 349
- Pinheiro Henriques A.R., de Marcelis L.F.M. 2000. Regulation of growth at steady-state nitrogen in Lettuce: interactive effects of nitrogen and irradiance. Annals of Botany **86**(6) 1073-1080.
- Piringer A.A. en Cathey H.M. 1960. Effect of photoperiod, kind of supplemental light and temperature on the growth and flowering of petunia plants. Proc. Am. Soc. Hortic. Sci. **76**:649-660.
- Prinz Optics 1999. Productinformation "Heat Reflection Filters", Prinz Optics GmbH, 55442 Stromberg, Germany.
- Rajapakse N.C., Young R.E. en Oi R. 2000. Growth responses of chrysanthemum and bell pepper transplants to photoselective plastic films. Scientia Horticulturae **84**, 215-225.
- Rajapakse N.C., Pollock R.K., McMahon M.J., Kelly J.W. en Young R. E. 1992. Interpretation of light quality measurements and plant response in spectral filter research. HortScience , 1208-1211.
- Rajapakse N.C. en Kelly J.W. 1995. Spectral filters and growing season influence growth and carbohydrate status of chrysanthemum. J. Amer. Soc. Hort. **120**:78-83.
- Raviv M. en Reuveni R. 1998. Fungal photomorphogenesis: A basis for the control of foliar diseases using photoselective covering materials for greenhouses. HortScience **33**, 925-929.
- Raviv M., Schayer R. en Shor Y. 1988. Ultra-Violet radiation effect on blackening of rose petals. Applied Agricultural Research **3**, 302-304.
- Reuveni R., Raviv M., Bar R., Ben Efraim Y., Assenheim D. en Schnitzer M. 1994. Development of photoselective PE films for control of foliar pathogens in greenhouse-grown crops. Plasticulture **102**, 7-16.

- Rijssel E. en Ploeger C. van 1997. Economisch perspectief van assimilatiebelichting bij potplanten. PBG Rapport **42**.
- Rijssel E. van 1995. Optimaal belichten. PBG Rapport **8**.
- Ritter A., Wagner E. en Holmes M.G. 1981. Light quantity and quality interactions in the control of elongation growth in light-grown *Chenopodium rubrum* L. seedlings. *Planta* **153**: 556-560.
- Rozema J., van de Staaij J., Björn L.O. en Caldwell M. 1997. UV-B as an environmental factor in plant life: stress and regulation. *Trends in Ecology and Evolution* **12**: 22-48.
- Salisbury F.B. en Ross C.W. 1992. *Plant Physiology*. Wadsworth Publ. Co. Belmont, Calif.
- Schuerger A.C., Brown C.S. en Stryjewski E.C. 1997. Anatomical features of pepper plants (*Capsicum annuum* L.) grown under red light-emitting diodes supplemented with blue or far-red light. *Ann. Bot.* **79**: 273-282.
- Shoshany H. 1991. Morphogenetische Signale durch Gewächshausfolien, die zu Ertragssteigerungen führen. KTBL-Arbeitspapier: Einsatz von Kunststoffen bei umweltschonenden Kulturverfahren
- Siedlecka M. en Romanowska E. 1993. Effect of abscisic acid and blue radiation on photosynthesis and growth of pea plants. *Photosynth.* **28**: 583-587.
- Singh D.P., Kumar A., Singh P. en Sharma H.C. 1993. Diurnal patterns of wheat canopy photosynthesis, evapotranspiration and water use efficiency at different phases of growth in the field. *Photosynthetica* **28**: 143-149.
- Smith H. 1982. Light quality, photoperception and plant strategy. *Ann. Rev. Plant Physiol.* **33**: 481-518.
- Sonneveld P.J. en Waaijenberg D., 2003. Nieuwe coating zorgt voor meer licht in de kas, Vakblad voor de Bloemisterij, no. **15**, p. 42-43.
- Sonneveld P.J., Swinkels G.L.A.M. en Waaijenberg D. 2002. Greenhouse design for the future, which combines high insulation roof material with high light transmittance, Paper no. 02SE013, International Conference on Agricultural Engineering (AgEng), Boedapest, Hongarije, 30 juni - 4 juli 2002.
- Sonneveld P.J., Breuer J.J.G., Campen J.B., Swinkels G.L.A.M. en Waaijenberg D. 2001. Ontwikkeling van een hoog isolerend zigzag-vormig kasdek met een geoptimaliseerde lichttransmissie, IMAG Nota P 2001-88, pp 51.
- Spaargaren J.J. 2000. Belichting van tuinbouwgewassen. Hortilux-Schröder BV, Monster.
- Steinmetz K.A. en Potter J.D. 1996. Vegetables, fruit and cancer prevention: a review. *J. Am. Diet Assoc.* **96**: 1027-1039.
- Stoffers J.A. 1968. Licht en dakhelling van warenhuizen, Instituut voor Tuinbouwtechniek, Wageningen, Mededelingen van de Directie Tuinbouw **31**, 1 (jan), 17-21
- Suntek 1998. Productinformation "Thermochromic Window Film". Suntek Inc., 6817A Academy Parkway, Albuquerque, NM 87109.

- Taiz L. en Zeiger E. 1998a. Photosynthesis: physiological and ecological considerations. In: *Plant Physiology*, 2nd ed. L. Taiz & E. Zeiger (eds.). Sinauer Associates, Inc. Publishers, Sunderland, MA, USA, 227-249.
- Taiz L. en Zeiger E. 1998b. The control of flowering. In: *Plant Physiology*, 2nd ed. L. Taiz & E. Zeiger (eds.). Sinauer Associates, Inc. Publishers, Sunderland, MA, USA. Pp. 691-724.
- Tevini M. 1993. *UV-V Radiation and Ozone Depletion*. Lewis Publishers, Boca Raton, London.
- Thomas B. en Dickinson H.G. 1979. Evidence for two photoreceptors controlling growth in de-etiolated seedlings. *Planta* **146**: 545-550.
- Tikhomirov A.A., Zolotuklin I.G., Lisovskii G.M. en Sid'ko F.Y. 1987. Specificity of responses to the spectral composition of PAR in plants of different species under artificial illumination. *Fiz. Rast.* **34**: 774-785.
- Tucker D.J. 1975. Far-red light as a suppressor of side shoot in the tomato. *Plant Sci. Lett.* **5**: 127-130.
- Verlode I., Daponte T. en Verschaeren P. 1995. Interferentie pigments for greenhouse films, *Plasticulture* **108**: 13.
- Verlode I. en Waaijenberg D. 1999. Folie om de kas doet niet meer onder voor glas, *De Boomkwekerij* **(43)**:13-15.
- Verlode I. en Verschaeren P. 1997. New interference film for climate control. *Plasticulture* **115**: 27-35.
- Verlode I., Daponte T. en Verschaeren P. 1995. Interference pigments for greenhouse films. *Plasticulture* **108**, 13-26.
- Vogt E. 1995. Kunststoffabrikanten ontdekken metallocenen, *Chemisch Weekblad*, **48**: 549.
- Waaijenberg D. en Sonneveld P.J. 2002. Greenhouse design for the future with a cladding material combining high insulation capacity with high light transmittance, paper no. S16-O-29, XXVIth International Horticultural Congress and Exhibition (ISHS), Toronto, Canada, 11 – 17 augustus 2002.
- Waltz F. en Horn W. 1997. The influence of light quality on gas exchange of *Dendranthema*. *Acta Horticulturae* **418**, 53-57.
- Warner R.M. en Erwin J.E. 2002. Estimation of total canopy photosynthetic capacity of roses grown under two canopy management systems. *Acta Hort. (ISHS)* **580**:89-93.
- Warrington I.J. en Mitchell K.J. 1976. The influence of blue- and red-biased light spectra on the growth and development of plants. *Agric. Meteorol.* **16**: 247-262.
- Weiss D. en Halevy A.H. 1991. The role of light reactions in the regulation of anthocyanin synthesis in *Petunia* corollas. *Phys. Plant.* **81**: 127-133.
- Wheeler R.M., Mackowiak C.L. en Sager J.C. 1991. Soybean stem growth under high-pressure sodium with supplemental blue lighting. *Agron.J.* **83**:903-906.
- Zabeltitz Chr. von 1986. *Gewächshäuser (greenhouses)*, Handbuch des Erwerbsgärtners, Eugen Ulmer GmbH, pp. 284.

- Zarka Y. en Zarka A. 1985. New PVC fluorescent film for cladding greenhouses - the results from three years' trials. *Plasticulture* **85** (1), 6-16
- Zieslin N. en Halevy A. H. 1969. Petal blackening in 'Baccara' roses. *Journal of American Society for Horticultural Science* **94**, 629
- Zuylen van 1995. Isoleren met gebakken lucht, *Chemisch Weekblad* **11** (1995), 500
- Zwart H.F. de 1996. Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model. IMAG-DLO rapport 96-05, pp. 236.