

# Haalbaarheidsstudie Energiebesparingsmogelijkheden met Microstructuur Gecoate Kasdekmaterialen Eindrapport

Dr. P.J. Sonneveld, Ir. V. Mohammadkhani, Ing. J.J.G. Breuer, Ing. P. Knies

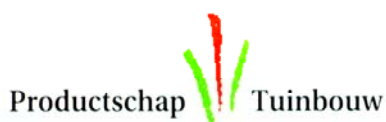
September 2003

IMAG Nota P2003-19

Onderzoek in het kader van het  
Convenant Glastuinbouw en Milieu



In opdracht van:



---

# Haalbaarheidsstudie Energiebesparingsmogelijkheden met Microstructuur Gecoate Kasdekmaterialen Eindrapport

Dr. P.J. Sonneveld, Ir. V. Mohammadkhani, Ing. J.J.G. Breuer, Ing. P. Knies

© 2003

Instituut voor Milieu- en Agritechniek (IMAG)  
Mansholtlaan 10-12, Postbus 43, 6700 AA Wageningen  
Telefoon 0317 – 476300  
Telefax 0317 – 425670  
[www.imag.wageningen-ur.nl](http://www.imag.wageningen-ur.nl)

Interne mededeling IMAG. Niets uit deze nota mag elders worden vermeld, of vermenigvuldigd op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van IMAG of de opdrachtgever. Bronvermelding zonder de feitelijke inhoud is evenwel toegestaan, op voorwaarde van de volledige vermelding van: auteursnaam, instituut en notanummer en de toevoeging: 'niet gepubliceerd'.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system of any nature, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying or otherwise, without the prior written permission of IMAG.

## Voorwoord

In het kader van het thema Kas- en Teeltconcepten van het energieonderzoeksprogramma van het Glami Convenant is in opdracht van het Productschap Tuinbouw (Projectnummer PT 11095) en het Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij (LNV) in de periode januari 2002 t/m mei 2003 een haalbaarheidsstudie verricht naar de Energiebesparingsmogelijkheden van met Microstructuur Gecoate Kasdekmaterialen.

Het onderzoek is gefinancierd door het Productschap Tuinbouw, het Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij (LNV) en de deelnemende bedrijven: Flabeg GmbH&Co. KG uit Duitsland, Hogla uit Nederland in samenwerking met Sunarc Technology A/S uit Denemarken en Asahi Glass Europe BV uit Amsterdam. Wij danken het Productschap Tuinbouw, LNV en de deelnemende bedrijven voor de opdracht en financiële ondersteuning van dit onderzoek.

# Inhoudsopgave

Voorwoord .....	2
Samenvatting .....	4
1 Inleiding .....	5
2 Onderzoeksopzet en Resultaten.....	6
2.1 Inleiding .....	6
2.2 Materiaaleigenschappen .....	6
2.2.1 Lichtdoorlatendheid .....	6
2.2.2 Emissiecoëfficiënt F-Clean film.....	9
2.2.3 Contacthoekmetingen .....	11
2.2.4 Condensatie op grote oppervlakken .....	13
2.3 Praktijkexperimenten.....	16
2.3.1 Natuurlijke veroudering ARM-glas .....	16
2.3.2 Vervuiling ARM-glas.....	17
2.3.3 Veroudering F-clean folie .....	17
2.3.4 Test met glaswasmachine .....	18
2.4 Berekening energiebesparing.....	19
2.4.1 Simulatiemodel en varianten .....	19
2.4.2 Resultaten KASPRO-berekeningen .....	20
2.5 Economische haalbaarheid .....	22
2.6 Kennisoverdracht.....	24
3 Conclusies en aanbevelingen .....	25
3.1 Gewastechnisch perspectief .....	25
3.2 Energetisch perspectief.....	25
3.3 Economisch perspectief .....	25
3.4 Aanbevelingen .....	25
Literatuur .....	26
Publicaties .....	26
Bijlage 1 KASPRO .....	27
Literatuur .....	28
Bijlage 2 Klimaatinstellingen .....	29

# Samenvatting

Dit haalbaarheidsonderzoek heeft als doelstelling de toepasbaarheid van microstructuur gecoat kasdek materiaal en het niveau van de te behalen energiebesparing in de glastuinbouw aan te tonen. Anti reflectie microstructuur (ARM) gecoate materialen hebben de hoogste lichttransmissie van de nu bekende materialen.

De hogere lichttransmissie leidt tot meer toetreding van zonne-energie in de kas en dus tot energiebesparing. De extra Photosynthetic Active Radiation (PAR) kan bovendien tot een hogere productie leiden waardoor het energieverbruik per kg product verder daalt.

Een dubbelglas bedekking met dit glas heeft een hogere lichttransmissie dan standaard enkelglas. Met een dubbelglas bedekking ontstaat extra warmte-isolatie waardoor energiebesparing optreedt. In dit onderzoek naar energiebesparing met behoud van productie is bovendien de combinatie onderzocht van het ARM-enkel glas met een hoog transparant energiescherm. Dit laatste heeft het voordeel dat montage in een standaard Venlokas mogelijk is zonder aanpassingen door extra constructiedelen is en dat het semi-permanent aangebracht kan worden (zoals bijvoorbeeld bij een standaard energiescherm of zoals bij de teelt van komkommers waarbij gedurende het koude seizoen bij de start van de teelt een extra folie wordt aangebracht).

## *Resultaten in het kort*

*Lichttransmissie* De gemeten lichttransmissie voor ARM gecoat glas is 96 % voor direct opvallend licht en 90 % voor diffuus licht. Dubbel ARM glas heeft een transmissie van 92 % voor direct opvallend licht en 86 % voor diffuus licht. Deze waarden zijn hoger dan voor standaard glas. De lichttransmissie is respectievelijk 90 % en 83 %. Voor de combinatie ARM glas met het hoogtransparant scherm zijn deze waarden respectievelijk 82 % en 70 %.

## *Opbrengst*

Bij een kas met ARM gecoat enkel glas ontstaat een 5-6% hogere opbrengst door de extra hoeveelheid licht. Voor de combinatie ARM gecoat enkel glas en hoogtransparant scherm zal echter bij de meest economische regeling een extra opbrengst van ca. 4 % ontstaan. Voor de combinatie ARM gecoat dubbel glas en hoogtransparante scherm treedt er een geringe verlaging van ca. 2 % op.

## *Energiegebruik*

Er komt meer licht en energie binnen in de kas met microcoating. Met ARM gecoat enkel glas draagt deze extra energie echter maar ten dele bij aan de energiebesparing, de rest van de energie wordt gebruikt voor extra verdamping. De energie besparing is voor enkel microstructuurglas ca. 3 %. De kasluchttemperatuur van de kas met microcoating is overdag hoger dan die van de referentie. Bij gebruik van het hoogtransparante scherm kan de energiebesparing afhankelijk van de teelt toenemen tot circa 12-20 %. Toepassen van het hoogtransparant scherm geeft 6- 10 % extra energiebesparing ten opzichte van een standaard scherm.

Voor ARM gecoat dubbel glas is de energiebesparing ca. 23-26%. De hoogste energiebesparing van 33-35 % is mogelijk bij een combinatie van ARM gecoat dubbel glas en het hoogtransparante scherm. In dit geval geeft het hoogtransparant scherm 1-7 % extra energiebesparing ten opzichte van een standaard scherm.

## *Economische haalbaarheid*

De meerwaarde van ARM gecoat glas is energiebesparing door extra energie- en lichtinval en een hogere opbrengst. Voor het toepassen van ARM- enkel glas, is de minimale afschrijvingsperiode 4,8-6,5 jaar, afhankelijk van de teelt en leverancier. De kortste afschrijving is bij de potplanten teelt en de langste voor de chrysantenteelt. Uit het onderzoek is gebleken dat een aantal warmte-isolerende maatregelen, zoals ARM gecoat dubbel glas en ARM glas in combinatie met het hoogtransparant F-clean scherm, op zich resulteren in een hoge energiebesparing maar momenteel economisch nog niet rendabel zijn. De verwachting is echter dat energieprijzen in de toekomst zullen stijgen en de prijzen van de hoogtransparante materialen zullen dalen. Door de goede bevochtigings- eigenschappen van het ARM gecoate glas is het met de bestaande technologie (glaswassers) goed schoon te houden. De condensatie eigenschappen zijn zodanig dat het condenswater goed van het glas afvloeit.

# 1 Inleiding

Door warmteverliezen in de koudeperiode hebben de gestookte teelten een grote energie-vraag. Terugdringen daarvan kan door de warmteverliezen te beperken. Isolatie door meerlaagse systemen is een voor de hand liggende oplossing. Voornamelijk leveren de thans beschikbare materialen teveel lichtverlies op om meerlaags toegepast te worden. De recent ontwikkelde dubbele zigzagplaat, die te zien was op de Kas van de Toekomst op de Floriade 2002 is een eerste aanzet om dit knelpunt op te lossen. Een andere mogelijkheid is door een oppervlakmodificatie van de kasdekmaterialen met microstructuren de lichtdoorlatendheid zodanig te verbeteren, dat meerlaagssystemen qua lichtopbrengst kunnen wedijveren met enkel glas en tevens het voordeel in zich bergen van een goede warmte-isolatie. Afhankelijk van de uitvoeringsvorm kan dit zowel bij nieuwbouw als in bestaande kassen worden toegepast.

In de verkenning: "Vooronderzoek Innovatieve Kas- en Teeltsystemen" is aangegeven dat de toepassing van microstructuur gecoate materialen kan leiden tot aanzienlijke energiebesparingen in de kasbouw door een meerlaagstechniek waardoor het energieverlies door het kasdek verminderd wordt. De energiebesparing door meerlaagstechniek kan worden gerealiseerd met twee nieuw beschikbare hoogtransparante materialen namelijk microporeus gecoat glas en met hoogtransparant kunststoffolie.

**A. Het antireflectie microporeus (ARM) gecoat glas** (Fig.1) is een vinding die ontwikkeld is door Merck en Fraunhofer [2] en wordt momenteel op de markt gebracht door de glasfabrikant Flabeg GmbH (zie verder [3]). Een ander product is het Sunarc AR-oppervlak dat ontwikkeld is met een speciale etstechniek van het glas en geen apart aangebrachte coating is op het glasoppervlak. Deze techniek is ontwikkeld en geproduceerd door Sunarc technology A/S in Denemarken (zie verder [4],[5]). In Nederland wordt dit product vertegenwoordigd door Vetrad voor kas-toepassingen. Bij de fabricage van de coating wordt het glas gehard, zodat het glas voldoet aan de nieuwste ARBO-wetgeving. Omdat de coating vervaardigd is op basis van kwarts, is de verwachte levensduur meer dan 25 jaar, terwijl geen extra onderhoud verwacht wordt. Het gecoate glas heeft een extra lichttransmissie (zonne-energie) van 6 tot 11 %, waardoor bij vervanging in plaats van normaal glas een mogelijke energiebesparing kan optreden van ca.. 9,5 %. Het microstructuur gecoate glas heeft betere zelfreinigende eigenschappen dan gewoon glas omdat het water beter afvloeit en er minder contact oppervlak ontstaat.

**B. Hoogtransparant kunststoffolie** Een kunststof folie met één van de hoogste lichttransmissies is de F-Clean folie van Asahi Glass [6]. Deze fluor polymeer heeft een lage transmissie voor ver-infrarode straling waardoor de warmte-isolerende eigenschappen zeer goed zijn (vergelijkbaar met glas). De levensduur van de folie wordt geschat op meer dan 20 jaar.

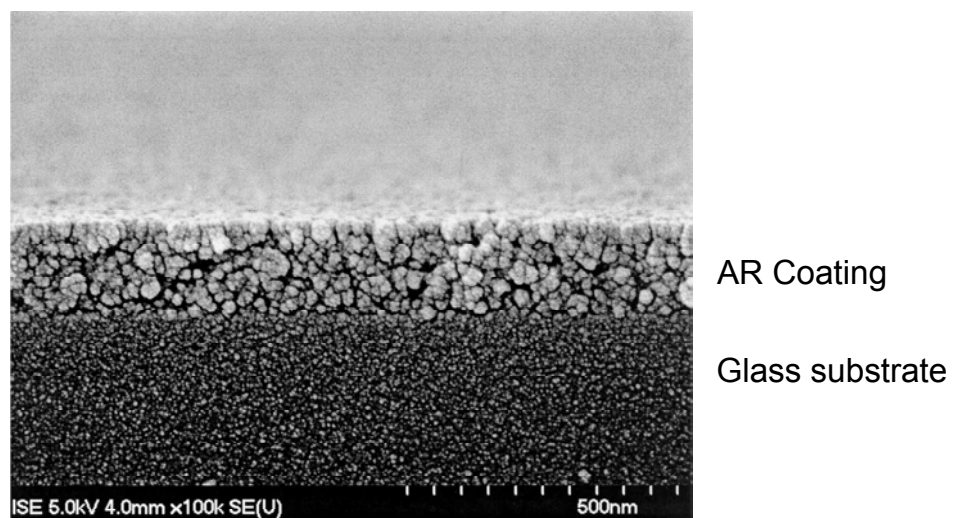


Fig.1 Microscopopname van de coatingsstructuur

Energiebesparing kan bereikt worden door toepassing van:

- Enkel ARM-glas
- Enkel ARM-glas met hoogtransparant scherm
- Dubbel ARM-glas
- Dubbel ARM-glas met hoogtransparant scherm

De combinatie van gecoat glas met een hoog transparant scherm is goed passend in bestaande scherm-installaties. In principe kan het microstructuur gecoat materiaal daarom direct na dit project in de tuinbouw toegepast worden. Het materiaal is vooral interessant voor teelten van groenten waar veel licht en energie nodig is. De kans op adoptie door de praktijk van de microstructuur gecoat glas lijkt hoog omdat het goed aansluit bij de bestaande kasbedekkings-materialen en scherminstallaties.

Een combinatie van gecoat dubbelglas met een hoog transparant scherm vereist geen aanpassing wanneer dit in een standaard scherminstallatie wordt ingebouwd.

De microstructuur gecoat materialen kunnen in principe toegepast worden in al de gangbare teelten: groente, potplanten en snijbloemen. De grootste energiebesparing zal naar verwachting optreden bij de groente gewassen.

## 2 Onderzoeksopzet en Resultaten

### 2.1 Inleiding

Er zijn lichtdoorlatendheidsmetingen gedaan voor het golflengtegebied van 400-700nm (Photosynthetic Active Radiation (PAR) en voor het gebied 300-2500nm (globale straling UV-VIS-IR). Bij de monsters van Sunarc en Flabeg is er sprake van een 1<sup>e</sup> serie en een 2<sup>e</sup> serie.

Voor een aantal monsters zijn er metingen aan het condensatiegedrag uitgevoerd.

Er is gekeken naar de natuurlijke veroudering van de antireflectie microstructuur (ARM)-coatings op glas, de veroudering van de F-clean-folie en er is nagegaan wat de invloed is van het gedurende een groot aantal jaren regulier wassen/borstelen op de lichtdoorlatendheid van het glasdek.

Met de meetwaarden als uitgangspunt zijn er berekeningen voor de energiebesparing gedaan.

### 2.2 Materiaaleigenschappen

#### 2.2.1 Lichtdoorlatendheid

##### **Uitvoering van de metingen**

De lichtmetingen zijn uitgevoerd op een Integrerende Ulbricht-kogel zoals die bij het IMAG operationeel is. Op deze kogel zijn voor monsters van 50x50 cm gemeten de reflectie diffuus van de onderkant (Rd2), de transmissie diffuus van de bovenkant (Td1) en de transmissie loodrecht van de bovenkant (Tk1) voor het gebied van 400-700nm (zichtbare licht, ook wel PAR (Photosynthetic Active Radiation) genoemd). Binnen dit golflengtegebied is om de 25nm (voor metingen uitgevoerd voor 01-01-2002 en om de 10nm (na 01-01-2002) een meting uitgevoerd. Deze metingen worden daarna nog negen keer herhaald zodat de uiteindelijke resultaten gebaseerd zijn op een serie van 10 metingen. De reflectie wordt gemeten doordat in de kogel een drietal lampen zorgt voor diffuus licht dat in de bol op de onderkant van het monster valt. Bij de meting voor de diffuse transmissie worden lampen rondom de kogel aangeschakeld, waardoor er vanuit een kunstmatige hemel die boven de kogel is gesitueerd een diffuse lichtstroom wordt gegenereerd. Op de bovenkant van het monster valt dan alleen maar diffuus licht. Tenslotte kan door lampen die hoog in de hemel zijn aangebracht aan te schakelen een loodrechte lichtstroom worden gericht op het monster. Voor de Nederlandse tuinbouwomstandigheden is de diffuse straling het belangrijkste. Vooral in de winter

periode, wanneer licht voor een tuinder belangrijk is, bestaat circa 75 % van de lichtsom uit diffuus licht. Daarom is alleen de reflectie onder diffuse lichtomstandigheden gemeten. Alle meetresultaten in het gebied van 400-700 nm zijn gewogen naar de Nederlandse norm NEN 2675 (1990) voor het bepalen van de lichttransmissie.

Met behulp van een spectrofotometer van het merk Perkin-Elmer zijn ook lichtdoorlatendheidsmetingen gedaan voor het gebied 300-2500nm (UV-VIS-IR). Deze metingen betreffen de loodrechte transmissie voor het op aarde voorkomende deel van het UV-gebied (300-380nm), het gehele zichtbare gebied (380-780nm) en het gehele nabij Infrarode gebied (780-2500nm).

Bij deze meetwaarden is met een Europese norm EN-420 de gemiddelde transmissie bepaald voor het Zonnespectrum.

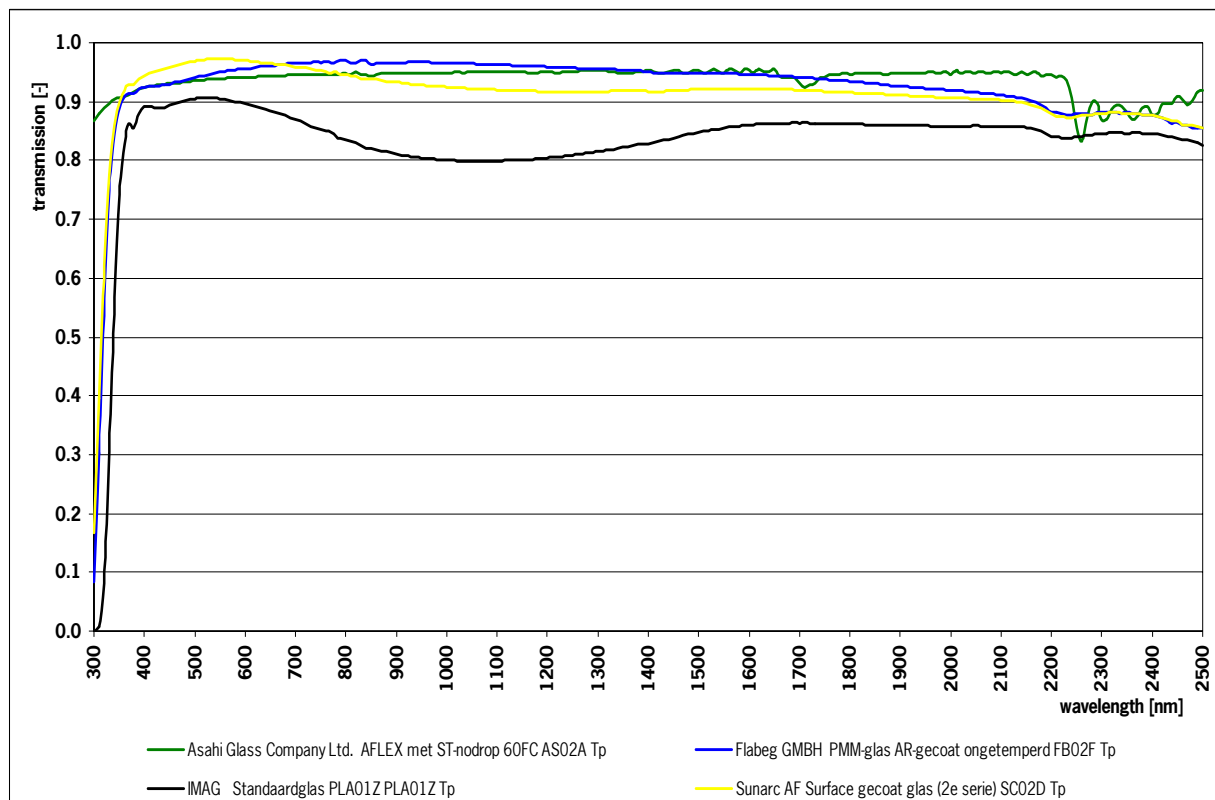


Fig. 2 Lichttransmissie loodrecht (Perkin-Elmer) UV-VIS-IR als functie van de golflengte voor ARM gecoat glas en de F-Clean folie in vergelijking met standaard enkelglas.

### Meetresultaten

De lichttransmissie als functie van de golflengte van het licht is gemeten voor loodrecht opvallend en diffuus opvallend licht. In Fig. 2 is de loodrechte lichttransmissie, gemeten op de Perkin-Elmer als functie van de golflengte voor het gebied 300-2500nm voor IMAG-standaard glas, voor ARM gecoat glas van Sunarc (2<sup>e</sup> serie), Flabeg PPM-glas AR-gecoat ongetemperd (2<sup>e</sup> serie) en de F-Clean folie van Asahi (60 micron dik) weergegeven. Uit deze grafiek blijkt dat de ARM coating het meest optimaal werkt in het golflengtegebied 700-800 nm daarna wordt de lichttransmissie langzaam minder. Door het relatief vlakke spectrum in het PAR-gebied (400-700nm) valt er weinig invloed te verwachten op de plantengroei door verandering van de lichtkleur. Omdat de transmissie van UV-straling (<380nm) goed is zal het gedrag van bijen en hommels naar verwachting geen problemen veroorzaken. Het gemeten lichtspectrum gewogen naar NEN-2675 en EN 410 levert de waarden weergegeven onder de kolom lichttransmissie in Tabel 1



De resultaten van de lichttransmissie-zijn in Tabel 1 (voor enkelvoudige materialen) en Tabel 2 voor combinaties weergegeven. In Tabel 1 is er voor de fabrikaten Flabeg en Sunarc een onderscheid gemaakt voor resultaten uit de 1<sup>e</sup> serie gecoat monsters (nr. 1a, 2a) en de 2<sup>e</sup> serie gecoat monsters (nr. 1b, 2b). De ETFE-film (F-Clean) van de firma Asahi (nr. 3) is door de firma Svensson geweven als schermdoek en de lichttransmissie is door IMAG opnieuw gemeten (nr. 4). IMAG-standaardglas (nr. 5) en twee enkelglasmonsters van Flabeg (2<sup>e</sup> serie) (nr. 6) en Sunarc (1<sup>e</sup> serie) (nr. 7) zijn eveneens weergegeven. De meetresultaten, zoals gemeten op de Ulbricht-kogel en de Perkin-Elmer zijn in bovenstaande tabel aangegeven.

Als we eerst Flabeg PMM-AR-gecoat (2<sup>e</sup> serie, nr. 1b) vergelijken met PMM-ongecoat (2<sup>e</sup> serie, nr. 6) zien we voor diffuus licht een absolute verhoging van 6,7% en voor direct licht een verhoging van 4,1% in het PAR-gebied. Bij Sunarc zien we bij Microstructuur gecoat (Vetraclear) (1<sup>e</sup> serie, nr. 2a) ten opzichte van Low iron ongecoat (1<sup>e</sup> serie, nr. 7, Diamond, dit is het beste ongecoate glas dat momenteel verkrijgbaar is) voor diffuus licht in het PAR-gebied een absolute verhoging van 3,9% en voor direct licht een verhoging van 4,2%. Opvallend hoog zijn, in vergelijking tot standaard glas, de transmissiewaarden voor loodrecht licht bij de Microstructuur gecoat materialen van Flabeg en Sunarc. Voor loodrechte lichttransmissie in het PAR-gebied worden zowel bij Flabeg als bij Sunarc waarden bereikt van bijna 96%. Dat geldt ook voor de F-Clean ETFE-film van Asahi die nog niet geweven is. Voor loodrecht lichttransmissie wordt bij F-Clean ongeweven ETFEe-folie een waarde bereikt van 94%.

In Tabel 1 is te zien dat het weven van de ETFE folie een extra absoluut lichtverlies geeft van 9,1 % voor direct licht en 12,4% voor diffuus licht.

Tabel 1 Overzicht van de meetresultaten gewogen volgens EN 420 en NEN 2675

Nr.	Materiaal	IMAG-code	Standaard	Transmissie (%)		Reflectie	
				direct	diffuus	direct	diffuus
1a	Microstructuur gecoat glas (Flabeg, 1 <sup>e</sup> serie)	FB01A en FB02A	a. PAR vlg. NEN 2675 b. Solar vlg. EN 420	95,8* 94,3	92,6* 90,2	0,03	0,054
1b	Microstructuur PMM-AR-gecoat glas (Flabeg, 2 <sup>e</sup> serie)	FB02E (getemperd) FB02F (ongetemperd)	a. PAR vlg. NEN 2675 b. Solar vlg. EN 420	95,9* 94,6	90,1* 87,9		0,076
2a	Microstructuur gecoat glas Vetra (Sunarc, 1 <sup>e</sup> serie)	SC02B	a. PAR vlg. NEN 2675 b. Solar vlg. EN 420	94,8 93,4	87,6 86,3		0,094
2b	Microstructuur gecoat glas Vetra (Sunarc, 2 <sup>e</sup> serie)	SC02D	a. PAR vlg. NEN 2675 b. Solar vlg. EN 420	95,8 94,2	88,9 87,5		0,083
3	F-Clean ETFE-film (Asahi)	AS99A en AS2KA	a. PAR vlg. NEN 2675 b. Solar vlg. EN 420	93,9* 94,0	87,5* 87,7	0,05	0,113
4	F-Clean ETFE-film (geweven) (Asahi)	AS02B en AS02B1	a. PAR vlg. NEN 2675 b. Solar vlg. EN 420	84,8*	75,1*	0,11	0,213
5	Standaard glas (IMAG)	IM2KC	a. PAR vlg. NEN 2675 b. Solar vlg. EN 420	88,6 85,0	81,9 78,5	0,104	0,131
6	PMM-glas ongecoat, ongetemperd (Flabeg, 2 <sup>e</sup> serie)	FB02C	a. PAR vlg. NEN 2675 b. Solar vlg. EN 420	91,8	83,4		0,126
7	Low iron ongecoat glas (diamond) (Sunarc, 1 <sup>e</sup> serie)	SC02A	a. PAR vlg. NEN 2675 b. Solar vlg. EN 420	90,6 90,0	83,7 83,2	0,094	0,133

\*) gemiddelde van twee metingen,

De waarden van gecombineerde kasdekmaterialen zijn berekend volgens EN 410 met de onderstaande formule:

$$\tau = \frac{\tau_1 \cdot \tau_2}{1 - \rho_1 \cdot \rho_2}$$

Met  $\tau_1$  is de transmissie van de buitenste laag,  $\tau_2$  is de transmissie van de binnenste laag,  $\rho_1$  is de reflectie van de buitenste laag en  $\rho_2$  is de reflectie van de binnenste laag. Deze berekening is voor direct en diffuus licht uitgevoerd.

De meetresultaten van de lichttransmissies zijn in Tabel 2 voor de verschillende combinaties van kasdekmaterialen weergegeven. Voor het ARM gecoate glas is het door Flabeg geleverde glas (Tabel 1, nr. 1a) gebruikt. De ETFE-film is door de firma Asahi (Tabel 1, nr. 3) geleverd. In tweede instantie is die film door Svensson geweven als schermdoek (Tabel 1, nr. 4) en de lichttransmissie is door IMAG gemeten. De meetresultaten zijn in bovenstaande tabel aangegeven.

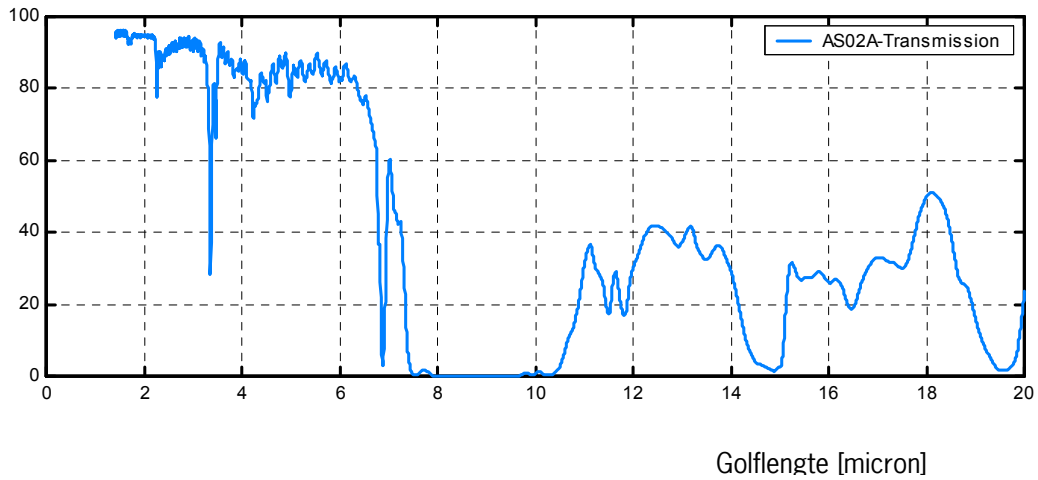
Tabel 2 Berekende waarden van gecombineerde kasdekmaterialen volgens EN 420 en NEN 2675

Nr.	Combinatie	Standaard	Transmissie (%)		Verschil in lichttransmissie t.o.v. low iron glas [%]	
			direct	diffuus	direct	diffuus
1	Dubbel micro-structuur gecoat glas (Flabeg, 1 <sup>e</sup> serie)	a. PAR vlg. NEN 2675	91,9	86,0	+1,4	+2,7
		b. Solar vlg. EN 420	89,0	81,6	-1,1	-1,9
2	Micro-structuur gecoat glas (Flabeg, 1 <sup>e</sup> serie) + F-Clean ETFE-film (Asahi)	a. PAR vlg. NEN 2675	90,1	81,5	-0,6	-2,6
		b. Solar vlg. EN 420	88,8	79,6	-1,3	-4,3
3	Micro-structuur gecoat glas (Flabeg, 1 <sup>e</sup> serie) + F-Clean ETFE-film geweven (Asahi)	a. PAR vlg. NEN 2675 b. Solar vlg. EN 420	81,5	70,4	-10,0	-15,9

De laatste twee combinaties (nr. 2 en 3) in Tabel 2 laten zien dat het weven (met extra verstekende vezels) van de ETFE folie bij de combinaties een extra absoluut lichtverlies geeft van 7,3 % voor direct licht en 9,2% voor diffuus licht.

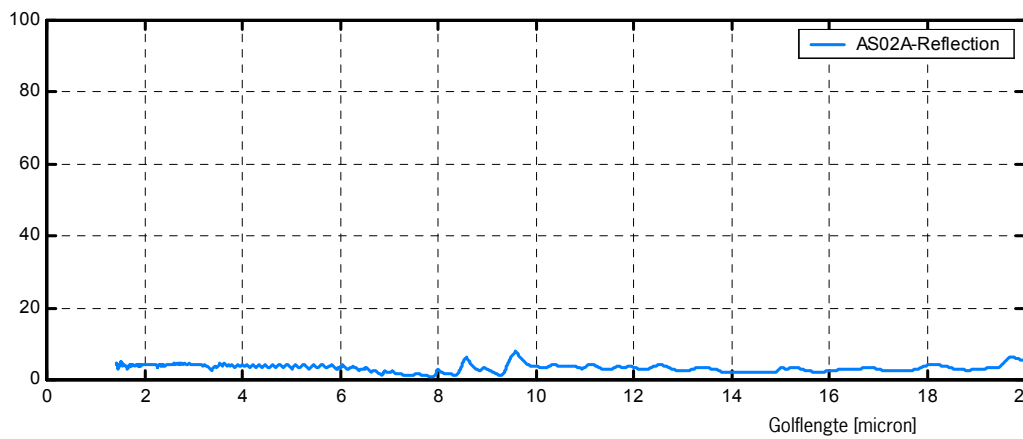
### 2.2.2 Emissiecoëfficiënt F-Clean film

De gemeten transmissie voor infrarode warmtestraling voor het golflengte gebied 3-20  $\mu\text{m}$  is in Fig. 3 weergegeven. De gestandaardiseerde waarde met een Max Planck weging is 0,2460.



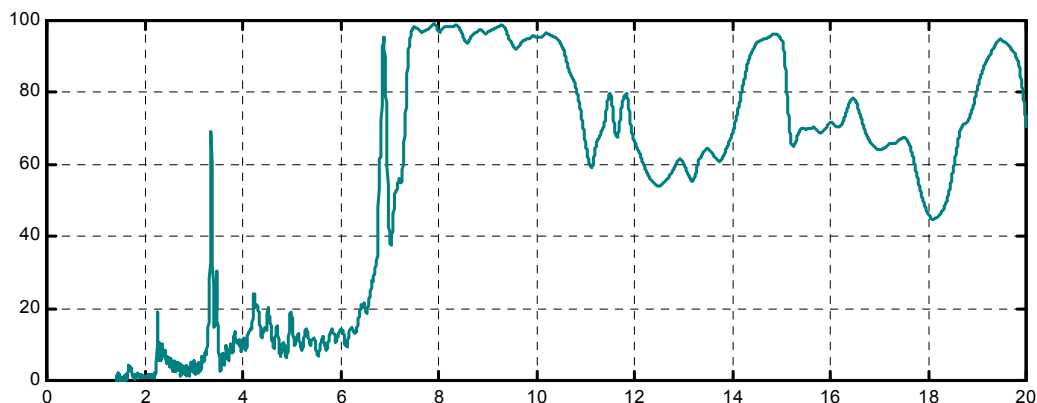
Figuur 3 Transmissie voor infrarode straling voor de F-clean folie

De gemeten reflectie voor infrarode warmtestraling voor het golflengte gebied 3-20  $\mu\text{m}$  is in Fig. 4 weergegeven. De gestandaardiseerde waarde met een Max Planck weging is 0,0311.



Figuur 4 Reflectie voor infrarode straling voor de F-clean folie

De emissie voor infrarode warmtestraling voor het golflengte gebied 3-20  $\mu\text{m}$  is uit de resultaten van de transmissie en reflectie berekend en in Fig. 5 weergegeven. De gestandaardiseerde waarde met een Max Planck weging is 0,723.



Figuur 5 Emissie voor infrarood voor de F-clean film

### 2.2.3 Contacthoekmetingen

#### Glas monsters

Vier verschillende glasmonsters zijn gebruikt voor het bepalen van het condensatiegedrag waarvan één ongecoat en drie gecoat. De codering van de monsters is in de onderstaande tabel aangegeven:

Tabel 3 Overzicht van de glasmonsters.

Naam glasmonsters	IMAG-code	Aantal monsters	Preparatie tijd [h]
Sunarc (ongecoat), (2e serie)	SC02C	4	23
Sunarc Vetraclear (gecoat), (2e serie)	SC02D	4	41
Flabeg Microporous Diamond (gecoat) (1e serie)	FB01C	5	41
Flabeg PMM AR-coated, (2e serie)	FB02F	1	41

#### Monster voorbereiding

Snijden van het glas in geschikte afmeting (50x30 mm) gaf wat problemen en daardoor was het niet mogelijk om het gewenste aantal monsters (5) voor drie glastypes te maken. Alle monsters waren ondergedompeld gedurende minimaal 24 uur in kleine glazen bekertjes gevuld met gedemineraliseerd water. Nadat de monsters uit het water waren gehaald, zijn ze schoongespoeld met gedemineraliseerd water, de druppels eraf geschud en opgehangen om te drogen.

#### Apparatuur voor contacthoekmeting

Voor de meting van de contacthoek van druppels op een vast oppervlak is een Krüss contacthoekmeter, type G1, gebruikt. Met deze goniometermicroscopie-techniek is de contacthoek van een druppel op een vlak oppervlak handmatig gemeten. Zowel de statische als dynamische (toenemend/afnemend) contacthoeken kunnen bepaald worden.

#### Contacthoekmeting

Monsters waren op een horizontale grondplaat (50x30 mm) met gecoate kant naar boven geplaatst. Het raam aan de voorzijde van de monsterkamer was verwijderd om de monsters met wat grotere afmeting op de grondplaat te kunnen plaatsen. Een druppel van gedemineraliseerd water was op het monsteroppervlak geplaatst met behulp van een glazen injectiespuit voorzien van een stalen naald (buiten diameter 0,5 mm). De injectiespuit was zodanig bevestigd dat de naald loodrecht op het monsteroppervlak stond op een afstand van ca. 0,5 mm. Nadat de naald boven het monsteroppervlak en in het middelpunt van de kijker van de microscoop geplaatst was, werd de naald 2,5 mm naar één kant verschoven. De meeste druppels groeien ongeveer assymmetrisch, maar soms groeit de druppel vanuit één kant (zie Figuur 6). Bovendien was de groei van de druppel soms afwijkend (contact oppervlak niet cirkelvormig).

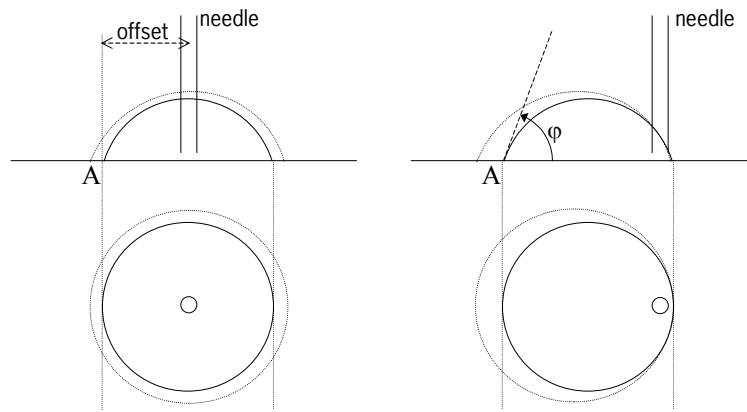


Fig. 6 Assymetrische druppel groei (links) en groei vanaf één zijde (rechts). De actuele meting van de contacthoek vindt plaats op punt A. De contacthoek is aangeduid met  $\varphi$ . De gestippelde druppel geeft de kwalitatieve verandering van de druppel tijdens de groei aan.

Contacthoek karakterisering bestaat uit twee metingen: advancing contacthoek (tijdens langzame groei van de druppel) en receding contacthoek (tijdens langzame inkrimping van de druppel). De advancing contacthoek was gemeten door langzame toevoer van vloeistof aan de druppel d.m.v. de injectiespuit. Vervolgens was de receding contacthoek gemeten door opzuigen van vloeistof terug naar de injectiespuit.

Voor ieder monster, werd de contacthoek minstens drie keer gemeten door achtereenvolgens te druppelen op drie verschillende punten op het monsteroppervlakte. Dit geeft een totaal van 15 metingen voor zowel advancing als receding contacthoek, voor ieder monster. Voor glas types met minder dan 5 monsters, was het aantal onafhankelijke metingen minder dan 15.

## Resultaten

De gemiddelde waarde en standaardafwijking voor de advancing en receding contacthoek voor ieder monster zijn in Tabel 4 weergegeven. Alleen bij ongecoat materiaal van Sunarc (SC02C) was een niet-nul waarde voor receding contacthoek geobserveerd. Bij alle andere materialen (gecoat) was geen terugtrekking van de druppelrand opgetreden wanneer het water terug in injectiespuit werd gezogen. De advancing contacthoek voor gecoate monsters is aanmerkelijk lager dan dat voor ongecoate monsters. De coating ondersteunt onmiskenbaar de bevochtiging en adhesie.

Hysteresis (het verschil tussen advancing en receding contacthoek) is het laagst voor ongecoate monsters. Voor gecoate monsters is de hysteresis gelijk aan de advancing contacthoek doordat de receding contacthoek nul is. De oppervlakte van het laatste monster type van Flabeg (FB02F) is niet helemaal egaal (er is zichtbare oneffenheid). Echter heeft dit geen effect op de resultaten: noch de gemiddelde waarde noch de standaard afwijking vertonen opmerkelijke afwijkingen (zelfs al is alleen maar 5 druppels gemeten). Het laatste type monster van Flabeg (FB02F) heeft een oppervlak dat niet volkomen glad is (er is een zichtbare ruwheid) Dit had echter geen duidelijke invloed op de resultaten van de contacthoekmetingen en vervuilingseigenschappen (zie verder paragraaf 2.3.1 en 2.3.2). De gemiddelde contacthoek en de standaard deviatie lieten geen onverwachte resultaten zien (zelfs als het aantal gemeten druppels maar 5 bedraagt). De resultaten van Tabel 4 zijn in een histogram in Figuur 7 weergegeven.

Tabel 4 Samenvatting resultaten van contacthoek metingen van water druppels op de glas monsters.

Monster IMAG-code	Aantal Druppels	Advancing[deg]		Receding[deg]		Hysteresis [deg]	
		gemiddeld	stdev	gemiddeld	stdev	Gemiddeld	stdev
SC02C	14	55.6	7.5	22.9	6.7	32.8	6.0
SC02D	12	34.5	3.7	0.0	0.0	34.5	3.7
FB01C	15	44.5	4.1	0.0	0.0	44.5	4.1
FB02F	5	38.6	2.8	0.0	0.0	38.6	2.8

Concluderende kan gezegd worden dat het ARM gecoat glas uitstekende bevochtigings eigenschappen heeft (kleinere contacthoek dan ongecoat glas, SC02c). Door deze eigenschap is het de verwachting dat er bij ARM –glas minder drip optreedt dan standaard glas.

### contact hoek voor water druppels op verschillende glasmonsters

Project 'Microstructuur'; Januari 2003; staaf: standaard fout

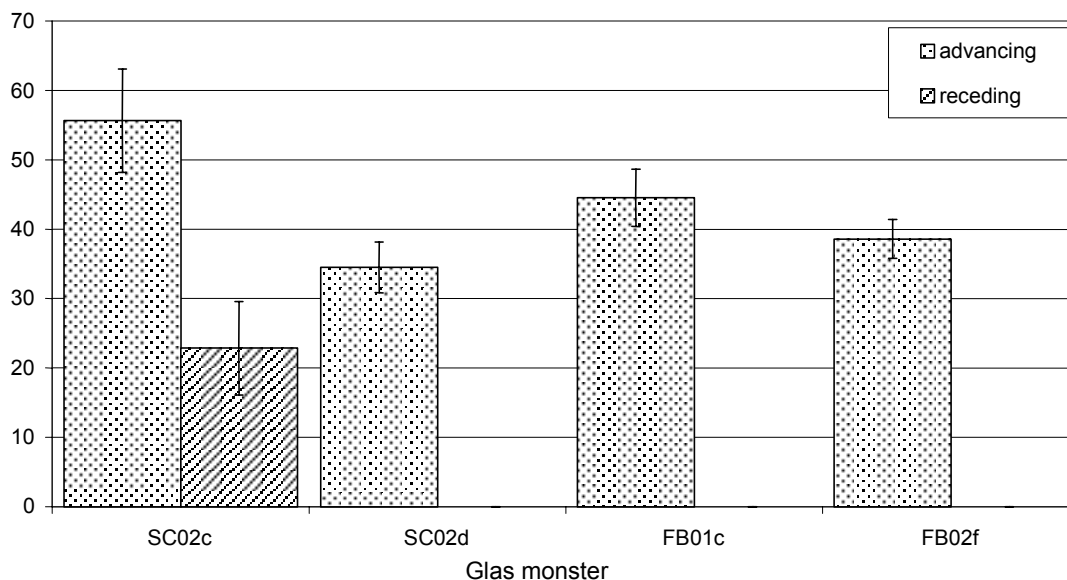


Fig. 7. Advancing en receding contacthoeken voor de onderzochte monster types, gemiddelde van ongeveer 15 druppels (uitzondering: FB02F, 5 druppels). De staafjes geven de standaard afwijking aan. Alleen voor SC02C een niet-nul receding contacthoek was geobserveerd.

#### 2.2.4 Condensatie op grote oppervlakken

Voor condensatie metingen zijn 3 verschillende glas monsters gebruikt waarvan één ongecoat en twee gecoat. De codering van de monsters is in de onderstaande tabel aangegeven:

Tabel 5 Overzicht van de glasmonsters.

Naam glasmonsters	IMAG-code
Standaard glas (IMAG)	PLA01Z
Sunarc Vetraclear (gecoat)	SC02B
Flabeg PMM-glas, AR-gecoat, getemperd	FB02E

#### Apparatuur voor condensatiemeting:

Om condensatie gedrag op grote oppervlaktes te bestuderen is er een condensatie meetapparaat (Fig. 8) ontworpen. De apparatuur is voorzien van een stoomtoevoerpijp in het midden, 2 pompen om afvallend water af te voeren en tenslotte 2 afvoerkanalen onder twee identieke ramen om afglijdend water af te voeren. De metingen kunnen onder ieder willekeurig hoek tussen 0° en 45° uitgevoerd worden. In deze test is een hoek van 20° genomen. De glasmonsters van 50X50 cm kunnen in de twee raamopeningen zodanig bevestigd worden dat er geen vocht meer kan ontsnappen.

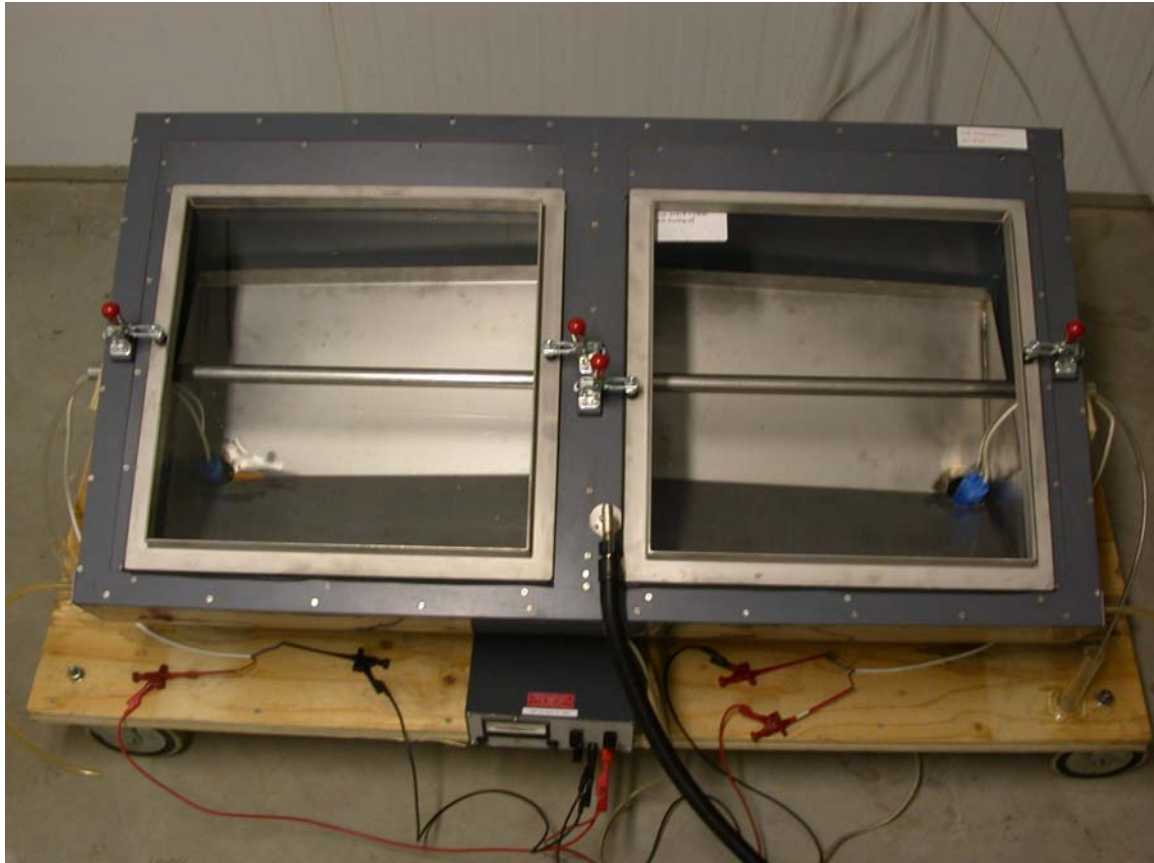


Fig. 8 Condensatie meetapparaat

#### Condensatiemeting

Er zijn twee metingen uitgevoerd, telkens met één gecoat glas (waarvan een monster van 50X50 cm aanwezig was) ter vergelijking met het standaard glas. Via de stoomtoevoerpijp in het midden van het apparaat wordt stoom gelijkmatig onder de glasplaten verdeeld. De glasplaten staan onder een hoek van  $20^\circ$ . De metingen zijn in een klimaatcel uitgevoerd waarin de buitentemperatuur constant op  $10^\circ\text{C}$  wordt gehouden. Het afgevoerde water wordt in maatbekers opgevangen en om de 5 minuten wordt het volume van het water genoteerd. De meetresultaten zijn in tabel 6 en 7 weergegeven en zijn gemiddeld over twee experimenten. Tijdens de metingen werd een duidelijk verschil tussen gecoat glas en standaard glas geconstateerd wat de transparantie van het glas plaat betreft. Bij standaard glas bleven de druppels langer hangen waardoor de transparantie van het glas werd belemmerd terwijl bij gecoat glas de druppels sneller in elkaar vloeiden waardoor de druppels sneller groeiden en konden afvallen/afglijden. De resultaten van het ARM gecoat glas geven goede condensatie eigenschappen weer die vergelijkbaar zijn met standaard glas.

Tabel 6 Resultaten van condensatie meting voor standaard glas en gecoat glas (FB02E)

Tijd (min)	Standaard glas (PLA01Z)		Gecoat glas Flabeg PMM-glas (FB02E)	
	Afglijdend water (ml)	Afvallend water (ml)	Afglijdend water (ml)	Afvallend water (ml)
5	120	14	147	13
10	149	14	184	15
15	182	31	223	15
20	214	31	264	34
25	248	32	300	35
30	281	65	344	57
35	323	67	381	68
40	360	67	433	69
45	394	76	476	77
50	433	89	510	86
55	471	107	552	104
60	528	109	590	104
Totaal	637		694	
Afglijdend/Totaal	83 %		85 %	
Afvallend/Totaal	17 %		15 %	

Tabel 7 Resultaten van condensatie meting voor standaard glas en gecoat glas (SC02B)

Tijd (min)	Standaard glas (PLA01Z)		Gecoat glas Sunarc Vetraclear (SC02B)	
	Afglijdend water (ml)	Afvallend water (ml)	Afglijdend water (ml)	Afvallend water (ml)
5	93	9	103	3
10	132	9	129	10
15	172	10	168	10
20	198	10	196	10
25	235	40	230	21
30	272	40	260	23
35	310	40	293	48
40	353	40	329	48
45	375	66	367	49
50	431	66	404	65
55	472	76	439	80
60	514	86	479	91
Totaal	600		570	
Afglijdend/Totaal	84 %		84%	
Afvallend/Totaal	16 %		16 %	



## 2.3 Praktijkexperimenten

### 2.3.1 Natuurlijke veroudering ARM-glas

Van standaard glas is bekend dat dit nagenoeg niet verouderd. Het ARM glas wordt getest met een aantal vries-dooicycli. De thermische uitzetting en inkrimping van het water-en ijs tijdens deze cycli is de enige belasting die kan leiden tot veroudering van de poreuze coating van glas. Een aantal glasplaten zijn 200 dagen aan de buitenlucht te Wageningen blootgesteld. Deze meting startte medio juli 2002 en eindigde op 10 februari 2003. In deze periode waren zowel, voor Nederlandse begrippen, erg warme dagen in de zomer maar ook een aantal koude winterdagen met enkele graden vorst. Analyse van de klimaat data van deze winter liet 31 vries-dooi cycli zien. Een aantal van deze cycli zijn weergegeven in Fig. 9. Deze cycli kunnen een belasting vormen voor de poreuze structuren van het gecoate glas. In die buiten exposure van 200 dagen is de coating blootgesteld aan 31 vries- dooi cycli. Bij een normale kas zal dit niet snel gebeuren omdat het in de kas warmer is dan ca. 20 °C. Deze test is hierdoor zwaarder dan onder praktijkomstandigheden.

Uit de meetresultaten in Tabel 8 blijkt dat het ARM-glas van Sunarc een uitstekende weerstand heeft tegen natuurlijke veroudering. Dit blijkt tevens uit metingen van een Zweedse onderzoeksgroep [7]. Dit geldt ook voor de 2<sup>e</sup> serie van Flabeg de zgn. PMM-AR coating. Door de duurzaamheid van deze materialen zijn deze zeer geschikt voor kasbedekking. De nummering in Tabel 8 is dezelfde als die in Tabel 1. De coating van Sunarc uit de 1<sup>e</sup> serie verliest in absolute zin 0,1% (voor direct licht) en 0,5% (voor diffuus licht). De coating van Flabeg uit de 1<sup>e</sup> serie verliest in absolute zin 4,5% (voor direct licht) en 8,0% (voor diffuus licht). Dit grote verlies van lichttransmissie betekent dat de coating beschadigd is. Deze coating was dus minder bestand tegen vries-dooi cycli. De achteruitgang is een probleem wanneer er in de kas s'inters niet gestookt wordt.

De coating van Flabeg uit de 2<sup>e</sup> serie was veel stabiel: in absolute zin is het verlies nog 0,5% (voor direct licht) en 0,8% (voor diffuus licht).

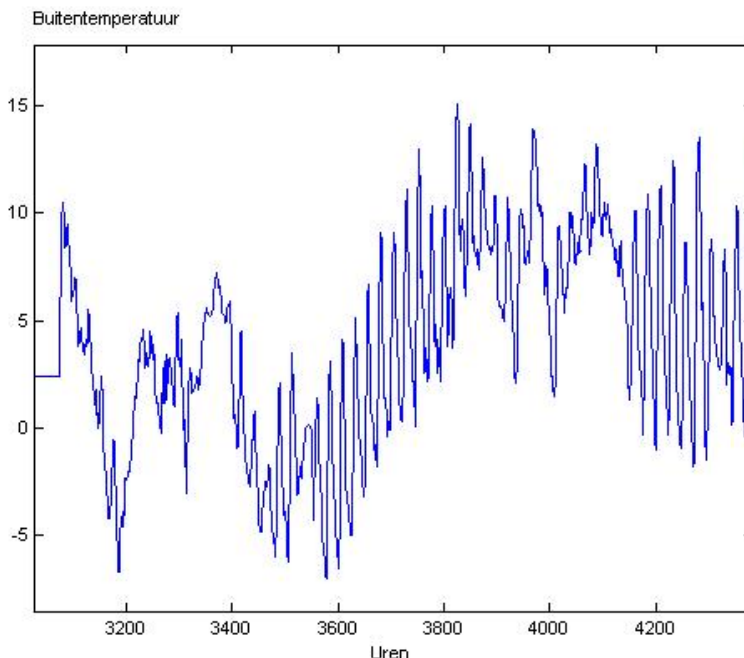


Fig. 9 Overzicht een aantal vries-dooi cycli van de buitentemperaturen winter 2003.

Tabel 8 Resultaten van de verouderingstest

	Combinatie	IMAG-code	Lichttransmissie voor buitenproef (%)		Lichttransmissie na buitenproef (%)		Exposure dagen
			direct	diffuus	direct	diffuus	
7	Diamond ongecoat glas (Sunarc), (1 <sup>e</sup> serie)	SC02A (na buitenproef SC02A2)	90,6	83,7	90,5	83,6	217
2a	Micro-structuur gecoat glas (Sunarc), (1 <sup>e</sup> serie)	SC02B (na buitenproef SC02B2)	94,8	87,6	94,7	88,1	213
1a	Micro-structuur gecoat glas (Flabeg), (1 <sup>e</sup> serie)	FB01A en FB02A (na buitenproef FB02A2)	95,8*	92,6*	91,3	84,6	217
1b	PMM-AR gecoat glas (Flabeg), (2 <sup>e</sup> serie)	FB02E (na buitenproef FB02E2)	95,9	90,1	95,4	89,3	196

\* gebaseerd op 2 metingen

### 2.3.2 Vervuiling ARM-glas

Op de energiekas van IMAG in Wageningen zijn twee luchtramen voorzien van ARM gecoat glas (één luchtraam met Flabeg gecoat glas en een raam met een coating van Sunarc). en gedurende 2002 vergeleken met standaard glas. Gedurende deze periode is er geen extra of abnormale vervuiling van het ARM-glas geconstateerd.

### 2.3.3 Veroudering F-clean folie

In Fig. 10 is de lichttransmissie van de F-Clean folie en een "long life" PE-folie weergegeven. De lichtstabiliteit van de F-clean folie is ruim drie maal beter dan een goede PE-folie. De F-CLEAN® folie vertoont nagenoeg geen veroudering na 1500 uur versnelde verouderingstest (Sunshine Weather-O-Meter). Deze test methode is equivalent aan 29 jaar in de zon. Bron: [http://www.fluon.jp/english/c/c\\_5/c\\_5.html](http://www.fluon.jp/english/c/c_5/c_5.html)

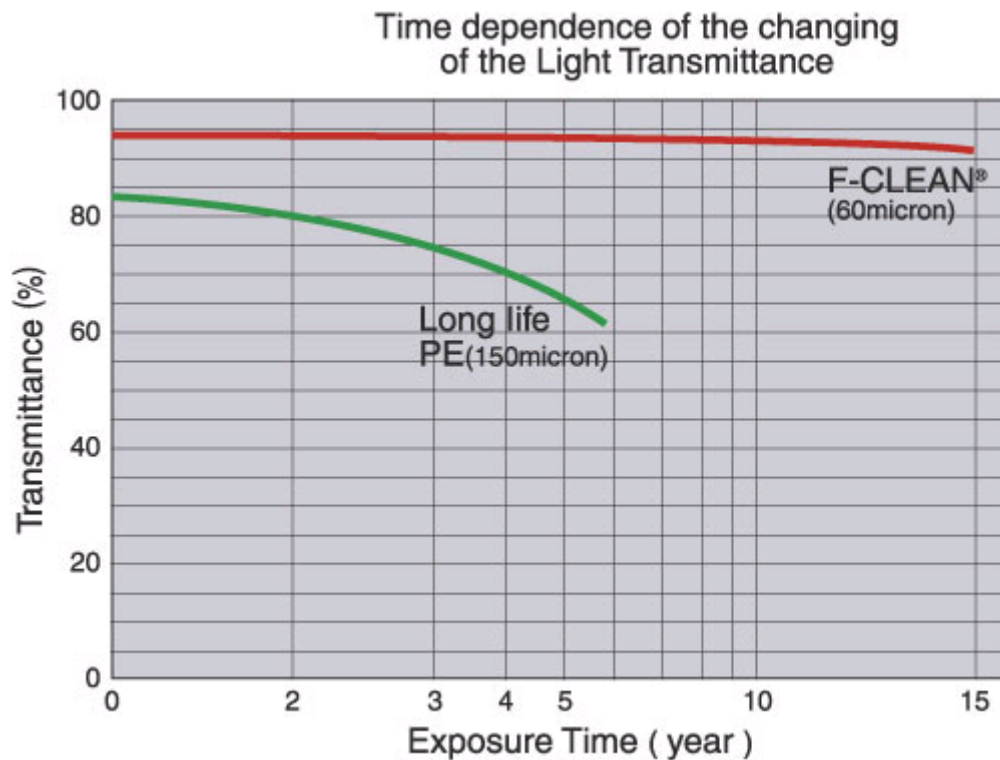


Fig. 10 Lichttransmissie van de F-clean folie en long life PE folie als functie van de tijd (bron Asahi Glass).

Bij toepassingen van de F-clean folie als schermmateriaal is de folie extra beschermd tegen UV-straling waardoor de levensduur nog toeneemt. Daarom kan in de praktijk een levensduur van meer dan 20 jaar verwacht worden voor deze folie. De F-clean folie mag niet in de buitenlucht verbrand worden omdat dan Waterstof fluoride vrijkomt. De folie kan afgevoerd worden naar speciale vuilverbrandingsinstallaties waar het bij hoge temperatuur verbrand wordt.

### 2.3.4 Test met glaswasmachine

Met de in Fig . 11 weergegeven glaswasmachine van de firma van de Waay Kasdekreiniging & Constructiebedrijf te Hazerswoude-Dorp zijn twee glasmonster getest, een van de firma Flaberg en een van de firma Sunarc,. Normaal wordt het glas twee maal per jaar met deze machine gewassen. In deze test is het glas 20 x gewassen. Dit komt overeen met een gebruiksduur van ca. 10 jaar. Gedurende deze test trad er geen visuele beschadiging op. De resultaten zijn in de lichttransmissie Tabel 9 weergegeven.



Fig. 11a Foto van de glaswasmachine

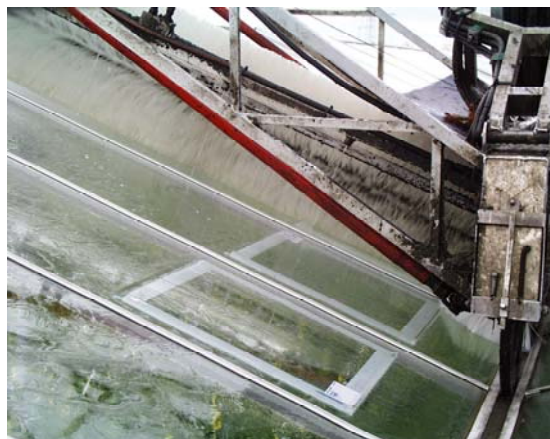


Fig. 11b Test van de glas met de ARM coatir  
18

Uit Tabel 9, waarin ook zoveel mogelijk is aangesloten met de nummering uit Tabel 1, blijkt dat de coating van Sunarc niet achteruit gaat, terwijl de coating van Flabeg uit de 1<sup>e</sup> serie 1,3% (voor direct) en 1,6% (voor diffuus) verliest.

Tabel 9 Lichttransmissie volgens NEN 2675 voor en na 20x wassen met een glaswasmachine

Nr	Combinatie	IMAG-code	Lichttransmissie voor het wassen (%)		Lichttransmissie na 20 x wassen (%)	
			direct	diffuus	direct	Diffuus
1	Micro structuur gecoat glas (Flabeg) (parallel monster uit 1 <sup>e</sup> serie)	FB03B=FB01B (na wassen FB03B3)	95,5	91,4	94,2	89,8
2b	Micro-structuur gecoat glas (Sunarc) (2 <sup>e</sup> serie)	SC02D (na wassen SC03D3)	95,8	88,9	95,7	89,0

## 2.4 Berekening energiebesparing

### 2.4.1 Simulatiemodel en varianten

Het simulatiemodel KASPRO (Bijlage 1) kent een groot aantal invoerparameters. De belangrijkste zijn genoemd in Bijlage 2. Voor het hoogtransparante foliescherm zijn de transmissie en emmissiewaarden uit paragraaf 2.2.2. gebruikt. Om het gestelde doel te bereiken zijn de volgende invoerparameters gevarieerd.

Tabel 10 Invoerparameters die zijn gevarieerd

variant			dekmateriaal	scherm soort <sup>1)</sup>	schermregeling <sup>2)</sup>
<b>tomaat</b>	<b>potplant</b>	<b>chryasant</b>			
tomrf			enkel glas	geen scherm	standaard
tomrfms	potrf	chrrf	enkel glas	energiescherm LS10_Plus	
tomcg1es	potcg1es	chrcg1es	enkel glas mc	energiescherm LS10_Plus	standaard
tomcg1cs	potcg1cs	chrcg1cs	enkel glas mc	foliescherm mc	verlengd gesloten
tomcg1csw	potcg1csw	chrcg1csw	enkel glas mc	geweven foliescherm mc	
tomcg1cswx	potcg1cswx	chrcg1cswx	enkel glas mc	geweven foliescherm mc	optimaliserend
tomcg2ns	potcg2ns	chrcg2ns	dubbel glas mc	geen scherm	standaard
tomcg2es	potcg2es	chrcg2es	dubbel glas mc	energiescherm LS10	
tomcg2cs	potcg2cs	chrcg2cs	dubbel glas mc	foliescherm mc	verlengd gesloten
tomcg2csw	potcg2csw	chrcg2csw	dubbel glas mc	geweven foliescherm mc	
tomcg2cswx	potcg2cswx	chrcg2cswx	dubbel glas mc	geweven foliescherm mc	optimaliserend

1) mc: met microporeuse coating; bij chryasant verduisteringsscherm

2) standaard dicht bij straling < 5 W m<sup>-2</sup> en T<sub>bu</sub> < 10°C  
 verlengd gesloten dicht bij straling < 200 W m<sup>-2</sup> en T<sub>bu</sub> < 15°C  
 optimaliserend zie tekst

Zoals Tabel 10 laat zien, is voor de cswx-varianten (varianten met het geweven scherm met microporeuse coating) een optimaliserende regeling gebruikt. In deze regeling wordt van uur tot uur berekend wat de winst uitgedrukt in geld zou zijn als het scherm wordt gesloten. De winst is het verschil tussen de baten van het sluiten en de kosten ervan. Baten worden verkregen door energiebesparing, kosten door verminderde assimilatie (groei). Bij het berekenen wordt gebruik gemaakt van een aardgasprijs van € 0,18 per m<sup>3</sup> en van een opbrengst van € 40 voor tomaat en chryasant en van € 45 voor potplanten. Als de winst positief is, wordt het scherm gesloten.

Berekend zijn de volgende waarden:

Tabel 11 Berekenende waarden

energiegebruik	energiegebruik van de ketel gesommeerd over modeljaar [ $m^3$ ae $m^2 j^{-1}$ ]
kasluchttemperatuur	gemiddelde kasluchttemperatuur over modeljaar [ $^{\circ}C$ ]
CO <sub>2</sub> -niveau	gemiddelde relatieve CO <sub>2</sub> -niveau over modeljaar t.o.v. referentie
CO <sub>2</sub> gedoseerd	relatieve hoeveelheid CO <sub>2</sub> die gedurende het modeljaar werd toegediend t.o.v. referentie
geassimileerde hoeveelheid CO <sub>2</sub>	relatieve hoeveelheid CO <sub>2</sub> die gedurende het modeljaar werd vastgelegd t.o.v. referentie

#### 2.4.2 Resultaten KASPRO-berekeningen

Aan de hand van deze meetresultaten is de energiebesparing voor de verschillende systemen en teelten berekend. Deze resultaten zijn samengevat in onderstaande Tabel 12 voor enkel glas en in Tabel 13 voor dubbel glas.

Tabel 12 Gasverbruik, gemiddelde kasluchttemperatuur, gemiddeld relatief CO<sub>2</sub>-niveau, gemiddelde relatieve hoeveelheid gedoseerde hoeveelheid CO<sub>2</sub>, gemiddelde relatieve hoeveelheid assimilatie en relatieve energiebesparing voor drie gewassen en ARM gecoat enkelglas<sup>1</sup> en schermvarianten<sup>2</sup>. Relatieve waarden uitgedrukt als percentage van bijbehoren referentie

Enkel glas	Tomaat						Potplant					Chrysant				
	Stand. glas	microporeus gecoat glas					Stand. glas	microporeus gecoat glas				Stand. glas	microporeus gecoat glas			
Uitvoering	referentie tomaat (zonder scherm)	energie scherm	energie scherm	F-Clean scherm	F-Clean woven scherm	F-Clean woven scherm optimalisatie-regeling	referentie potplanten (met energie scherm)	energie scherm	F-Clean scherm	F-Clean woven scherm	F-Clean woven scherm optimalisatie-regeling	referentie chrysant (met energie scherm)	energie scherm	F-Clean scherm	F-Clean woven scherm	F-Clean woven scherm optimalisatie-regeling
Verbruik [ $m^3 \cdot m^2 \cdot a^{-1}$ ]	55,9	42,7	42,2	39,2	39,0	39,8	52,4	50,9	43,4	42,3	46,1	37,1	36,1	31,3	31,1	32,5
Tkas [ $^{\circ}C$ ]	19,4	19,9	20,0	20,4	20,4	20,1	22,4	22,5	22,5	22,6	22,5	20,0	20,1	20,3	20,4	20,1
CO <sub>2</sub> niveau	100	96,0	94,5	92,0	92,5	95,5	100	98,9	93,6	94,6	97,9	100	98,9	93,9	94,5	98,7
CO <sub>2</sub> gedoseerd	100	103,3	105,0	120,3	119,3	106,9	100	101,6	124,9	122,2	105,6	100	100,8	117,2	115,9	109,3
assimilatie prod.	100	98,6	104,4	100,4	98,0	104,1	100	105,2	100,7	97,9	104,3	100	105,0	100,2	97,5	104,6
Energiebesp. [%]		23,6	24,6	29,9	30,2	28,9		2,7	17,1	19,3	12,1		2,7	15,5	16,2	12,5

<sup>1</sup>) Voor het ARM -glas zijn de meetresultaten van het Flabeg gecoat glas (FB02E) gebruikt aangegeven in tabel 1 (nummer 1b). De lichttransmissies van de twee leveranciers verschillen weinig.

<sup>2</sup>) Voor het F-clean schermmateriaal zijn lichttransmissies gebruikt zoals aangegeven in tabel 1 (nummer 3 en 4). De warmte overdracht coëfficiënt is bepaald in paragraaf 2.2.2.

Opvallend in de resultaten is dat vervanging van standaard glas door microstructuur gecoat enkelglas een verhoging tot 4,6 % van de opbrengst kan geven. De energiebesparing die hiermee gepaard gaat is echter bescheiden n.l., afhankelijk van het gewas, ca. 1-3 %. Hierbij moet worden opgemerkt dat bij tomaten is uitgegaan van een kas zonder scherm als vergelijkings-standaard. Wanneer uitgegaan wordt van een vergelijking met scherm (thans in 20 % van het teelt oppervlak het geval) is een energiebesparing in dezelfde grote orde te verwachten.

De energiebesparing van de varianten met microporeus gecoat glas en een energiescherm is in vergelijking met die met standaard glas en een energiescherm lager dan werd verwacht. Om de discrepantie te verklaren zijn voor tomaat de energiestromen van de twee genoemde varianten vergeleken.

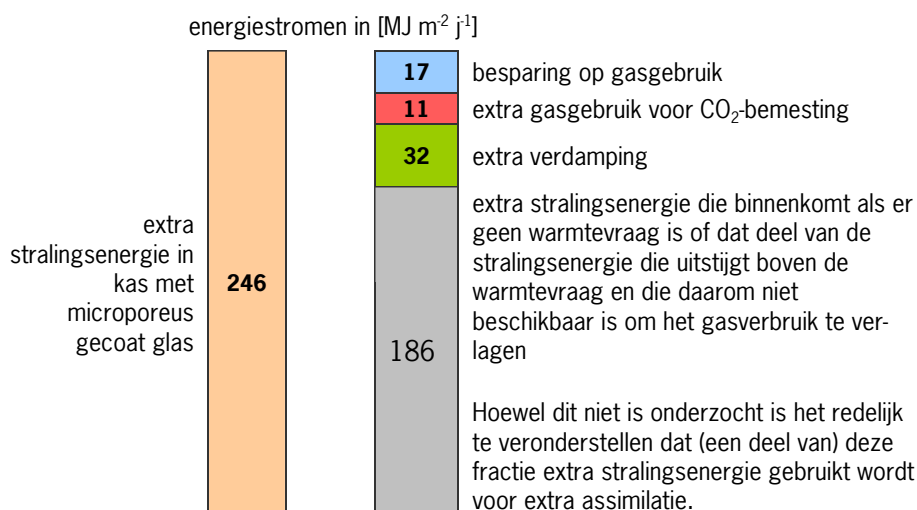


Fig. 12 Balans van extra zonne-energie die in de kas met micro gecoat glas wordt ingestraald en gasverbruik

Uit figuur 12 blijkt dat een belangrijk deel van de extra ingestraalde zonne-energie en wel 76% niet in aanmerking komt voor besparing op het gasgebruik omdat deze beschikbaar is op momenten dat er geen warmtevraag is of omdat het ingestraalde vermogen hoger is dan de momentane warmtevraag en alleen de warmtevraag door zonne-energie kan worden gesubstitueerd.

Verder blijkt dat de ingestraalde zonne-energie het gewas aanzet tot meer verdamping en assimilatie. Daarin wordt  $32 \text{ MJ m}^{-2} \text{j}^{-1}$  geïnvesteerd met een hogere productie als resultaat.

$11 \text{ MJ m}^{-2} \text{j}^{-1}$  wordt niet bespaard omdat er extra gas wordt gebruikt voor  $\text{CO}_2$ -bemesting. Dat hangt vermoedelijk samen met verhoogde  $\text{CO}_2$ -opname door het gewas (meer assimilatie) en de daarmee gepaard gaande hogere verdamping. Bij een hogere verdamping moet meer vocht worden afgevoerd om de vochtigheid van de kaslucht binnen aanvaardbare grenzen te houden. Meer vochtafvoer betekent meer luchten en daarmee afvoer van met  $\text{CO}_2$  verrijkte kaslucht. Dit  $\text{CO}_2$ -verlies moet via verbranding van aardgas worden aangevuld.

Blijft over  $17 \text{ MJ m}^{-2} \text{j}^{-1}$  die volgens deze analyse op gasverbruik wordt bespaard. Deze waarde komt goed overeen met het verschil in gasgebruik tussen de onderzochte varianten zoals vermeld in tabel 12. van  $0,5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{j}^{-1}$ .

Volledigheidshalve moet worden vermeld dat in de analyse gebruik is gemaakt van netto warmtevraag. Dat wil zeggen de hoeveelheid energie die via het verwarmingssysteem in de kas wordt gebracht. De netto warmtevraag ligt zo'n 10% lager dan het gasgebruik waarin verliezen zijn verwerkt.

**Samenvattend:** De ingestraalde energie kan in drie stromen worden verdeeld. De eerste komt niet in aanmerking om het gasgebruik te verlagen. De tweede stroom komt via extra  $\text{CO}_2$ -bemesting en extra verdamping ten goede komt aan de assimilatie. De derde stroom tenslotte draagt in bescheiden mate bij aan verlaging van het energiegebruik

Het is zeer aannemelijk dat met een aangepaste regeling de verhouding gasgebruik/assimilatie kan worden beïnvloed.

Bij vergelijking van de resultaten voor de varianten microporeus gecoat glas met F-Clean geweven scherm de ene met en de andere zonder optimaliserende regeling, blijkt dat er door de regeling een aanzienlijke productiewinst kan worden gerealiseerd ten koste van een relatief bescheiden offer in de vorm van extra energiegebruik.

In Tabel 13 is dubbel microstructuur gecoat glas vergeleken met standaard enkelglas. De eerste kolom bij iedere teelt is standaard enkelglas terwijl de andere kolommen dubbelglas met microstructuur is weergegeven.

Tabel 13 Gasverbruik, gemiddelde kasluchttemperatuur, gemiddeld relatief CO<sub>2</sub>-niveau, gemiddelde relatieve hoeveelheid gedoseerde hoeveelheid CO<sub>2</sub>, gemiddelde relatieve hoeveelheid assimilatie en relatieve energiebesparing voor drie gewassen ARM gecoat dubbelglas<sup>1</sup> en schermvarianten<sup>2</sup>. Relatieve waarden uitgedrukt als percentage van bijbehoren referentie (zie tabel 10)

dubbel glas met microporeuse coating	Tomaat					Potplant					Chrysant				
	geen scherm	energie-scherm	F-Clean scherm	F-Clean woven scherm	F-Clean woven scherm optimalisatie-regeling	geen scherm	energie-scherm	F-Clean scherm	F-Clean woven scherm	F-Clean woven scherm optimalisatie-regeling	geen scherm	energie-scherm	F-Clean scherm	F-Clean woven scherm	F-Clean woven scherm optimalisatie-regeling
Uitvoering															
Verbruik [m <sup>3</sup> .m <sup>2</sup> .a <sup>-1</sup> ]	41,4	38,0	36,7	36,6	37,4	49,1	40,0	36,0	35,1	38,0	36,0	27,5	25,3	25,1	26,2
Tkas [°C]	20,0	20,4	20,8	20,9	20,5	22,6	22,6	22,7	22,7	22,6	20,2	20,2	20,4	20,5	20,2
CO <sub>2</sub> niveau	93,6	89,1	85,6	86,0	88,8	96,8	91,1	85,3	85,9	89,5	96,5	89,8	84,8	85,3	89,6
CO <sub>2</sub> gedoseerd	109,1	110,8	122,4	121,6	112,1	108,1	111,1	124,9	122,7	112,7	97,5	102,7	112,3	111,4	108,1
assimilatie prod.	97,9	97,7	94,0	91,8	97,7	98,2	98,1	93,8	91,1	97,7	99,8	98,3	93,9	91,4	98,3
Energiebesp. [%]	26,1	32,0	34,4	34,5	33,1	6,3	23,6	31,2	33,0	27,4	3,0	25,9	31,8	32,4	29,4

<sup>1</sup>) Voor het ARM -glas zijn de meetresultaten van het Flabeg gecoat glas (F glas (FB01A en FB02A)) gebruikt aangegeven in tabel 1 (nummer 1a). De lichttransmissies van de twee leveranciers verschillen weinig.

<sup>2</sup>) Voor het F-clean schermmateriaal zijn lichttransmissies gebruikt zoals aangegeven in tabel 1 (nummer 3 en 4). De warmte overdracht coëfficiënt is bepaald in paragraaf 2.2.2.

Alleen dubbel microstructuur gecoat glas blijkt energiebesparing te hebben van 3% voor chrysanten en tot liefst-26 % bij tomaten. Toepassing van microstructuur gecoat glas en een hoogtransparant energiescherm verhoogt de energiebesparing tot een niveau van 27-33 %.

Ook bij de varianten met dubbel glas blijkt dat een optimaliserende regeling bij de variant microporeus gecoat glas met F-Clean geweven scherm een aantrekkelijke productiewinst geeft ten opzichte van de vergelijkbare variant zonder zo'n regeling.

## 2.5 Economische haalbaarheid

De economische effecten van het toepassen van ARM-glas voor de teelten van tomaten, potplant en chrysant zijn respectievelijk weergegeven in Tabel 14, 15 en 16. De uitgangspunten voor deze berekeningen zijn: een rente percentage van 3 %, een afschrijvingsperiode voor het scherm van 5 jaar (voor het F-cleanscherm 20 jaar) en 5 % onderhoud. De investeringskosten voor de scherminstallatie zijn 4,5 €/m<sup>2</sup> en voor het scherm 1,5 €/m<sup>2</sup> (F-cleanscherm 10 €/m<sup>2</sup>).



Tabel 14. Effecten van ARM-glas in combinatie met twee schermtypen ten opzichte van standaard enkel glas met scherm en zonder scherm voor de tomatenteelt bij een ARM-prijs van 13-20 € per m<sup>2</sup> en een schermkosten berekening die uitgaat van een 10-jarige afschrijving van het mechaniek en een 20-jarige afschrijving van het F-clean doek

Dekmateriaal Scherm referentie	Enkel ARM				Dubbel ARM						
	st. scherm		F-Clean		Geen scherm		st. scherm		F-Clean		
	scr+	scr-	scr+	scr-	scr+	scr-	scr+	scr-	scr+	scr-	
Investering € per m <sup>2</sup>											
ARM-glas	8 - 15	8 - 15	8 - 15	8 - 15	21 - 35	21 - 35	21 - 35	21 - 35	21 - 35	21 - 35	21 - 35
Scherm	0.0	6.0	8.5	14.5	-6.00	0.00	0.00	6.00	8.50	14.50	
<b>Total investering</b>	8 - 15	14 - 21	16.5 - 23.5	22.5 - 29.5	15 - 29	21 - 35	21 - 35	27 - 41	29.5 - 43.5	35.5 - 49.5	
Afschrijving € per m <sup>2</sup>											
ARM-glas	0.9-1.8	0.9-1.8	0.9-1.8	0.9-1.8	2.5-4.2	2.5- 4.2	2.5-4.2	2.5-4.2	2.5-4.2	2.5-4.2	2.5-4.2
Scherm	0.00	1.23	0.88	2.11	-1.23	0.00	0.00	1.23	0.88	2.11	
<b>Totale kosten</b>	0.9-1.8	2.2-3.0	1.8-2.7	3.1-3.9	1.3-3.0	2.5-4.2	2.5-4.2	3.8-5.4	3.4-5.1	4.6-6.3	
Baten € per m <sup>2</sup>											
Energie besparing	0.09	2.47	0.63	3.01	0.23	2.61	0.85	3.22	1.08	3.46	
Productie toename	2.32	1.76	0.72	0.16	-0.28	-0.84	-0.36	-0.92	-1.84	-2.40	
<b>Total opbrengst</b>	2.41	4.23	1.35	3.17	-0.05	1.77	0.49	2.30	-0.76	1.06	
<b>Netto Kosten effect</b>	1.4/0.6	2.0/1.2	-0.5/-1.3	0.1/-0.7	-1.3/3	-0.7/-2.4	-2.0/-3.7	-1.4/-3.1	-4.1/-5.8	-3.6/-5.3	
<b>Terugverdientijd</b>	5.5 - 24.5	6.9 - 17.5	NR	234-NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	

Afkortingen: st.scherm= standaard scherm, scr+=vergelijking met situatie met scherm, scr-=vergelijking met situatie zonder scherm  
NR=niet relevant

Tabel 15. Effecten van ARM-glas in combinatie met twee schermtypen ten opzichte van standaard enkel glas met scherm en zonder scherm voor de potplantteelt bij een ARM-prijs van 13-20 € per m<sup>2</sup> en een schermkosten berekening die uitgaat van een 10-jarige afschrijving van het mechaniek en een 20-jarige afschrijving van het F-clean doek

Dekmateriaal Scherm	Enkel ARM		Dubbel ARM		
	st. scherm	F-Clean	Geen scherm	st. scherm	F-Clean
Investering € per m <sup>2</sup>					
ARM-glas	8.0 - 15.0	8.0 - 15.0	21.0 - 35.0	21.0 - 35.0	21.0 - 35.0
Scherm	0.00	8.50	-6.00	0.00	8.50
<b>Total investering</b>	8.0 - 15.0	16.5 - 23.5	15.0 - 29.0	21.0 - 35.0	29.5 - 43.5
Afschrijving € per m <sup>2</sup>					
ARM-glas	0.96 - 1.80	0.96 - 1.80	2.5 - 4.2	2.5 - 4.2	2.5 - 4.2
Scherm	0.00	0.88	-1.23	0.00	0.88
<b>Totale kosten</b>	0.96 - 1.80	1.84 - 2.7	1.3 - 3.0	2.5 - 4.2	3.4 - 5.1
Baten € per m <sup>2</sup>					
Energie besparing	0.27	1.62	0.59	2.23	2.95
Productie toename	2.34	0.31	-0.81	-0.85	-2.79
<b>Total opbrengst</b>	2.61	1.93	-0.22	1.38	0.16
<b>Netto Kosten effect</b>	1.65/0.8	0.1/1.2	-1.5/-1.3	-1.1/-0.7	-3.2/0.16
<b>Terugverdientijd</b>	4.8 - 18.5	173/NR	NR	NR	NR

Afkortingen: st.scherm= standaard scherm, scr+=vergelijking met situatie met scherm, scr-=vergelijking met situatie zonder scherm,  
NR=niet relevant



Tabel 16. Effecten van ARM-glas in combinatie met twee schermtypen ten opzichte van standaard enkel glas met scherm voor de chrysantenteelt bij een ARM-prijs van 13-20 € per m<sup>2</sup> en een schermkosten berekening die uitgaat van een 10-jarige afschrijving van het mechaniek en een 20-jarige afschrijving van het F-clean doek

Dekmateriaal Scherm	Enkel ARM		Dubbel ARM		
	st. scherm	F-Clean	Geen scherm	st. scherm	F-Clean
Investering € per m <sup>2</sup>					
ARM-glas	8.0 – 15.0	8.0 – 15.0	21.0 – 35.0	21.0 – 35.0	21.0 – 35.0
Scherm	0.00	8.50	-6.00	0.00	8.50
<b>Total investering</b>	8.0 – 15.0	16.5 – 23.5	15.0 – 29.0	21.0 – 35.0	29.5 – 43.5
Afschrijving € per m <sup>2</sup>					
ARM-glas	0.96 – 1.80	0.96 – 1.80	2.5 – 4.2	2.5 – 4.2	2.5 – 4.2
Scherm	0.00	0.88	-1.23	0.00	0.88
<b>Totale kosten</b>	0.96 – 1.80	1.84 – 2.7	1.3 – 3.0	2.5 – 4.2	3.4 – 5.1
Baten € per m <sup>2</sup>					
Energie besparing	0.18	1.04	0.20	1.73	2.12
Productie toename	2.00	0.08	-0.08	-0.68	-2.44
<b>Total opbrengst</b>	2.18	1.12	0.12	1.05	-0.32
<b>Netto Kosten effect</b>	1.2/0.38	-0.7/-1.6	-1.2/-2.9	-1.5/-3.2	-3.7/-5.4
<b>Terugverdientijd</b>	6.5 – 39	173/NR	NR	NR	NR

Afkortingen: st.scherm= standaard scherm, scr+=vergelijking met situatie met scherm, scr-=vergelijking met situatie zonder scherm  
NR=niet relevant

De meerwaarde van ARM gecoat glas is energiebesparing door extra energie- en lichtinval en een hogere opbrengst. Voor het toepassen van enkel ARM-glas, blijkt uit de Tabellen 14 t/m 16 een minimale afschrijvingsperiode van 4,8-6,5 jaar, afhankelijk van de teelt en leverancier. De kortste afschrijving is bij de potplanten teelt (Tabel 15) en de langste voor de chrysantenteelt (Tabel 16). Andere combinaties zoals dubbel ARM glas en ARM glas in combinatie met een hoogtransparant scherm kunnen veel energie besparen maar zijn op dit moment nog niet economisch interessant.

## 2.6 Kennisoverdracht

De verschillende materialen en resultaten zijn 6-9 november 2002 getoond op de Hortifair te Amsterdam en heeft een aantal reacties opgeleverd van 4 tuinders en industrie (kassenbouwers en systeem leveranciers). Tuinders zien vooral productieverhoging als reden voor mogelijke investering in ARM-glas. Voor kassenbouwers is het enkel ARM-glas eenvoudig in een kas te implementeren, waardoor invoering relatief eenvoudig is.

De systeemleveranciers Alcoa, Alcomij en Boal zijn benaderd voor de haalbaarheid van dubbelglassystemen. Uit dit onderzoek kwam naar voren dat systeemleverancier BOAL profielen heeft voor een dubbel glas systemen. Vanuit de praktijk (tuinders en glasindustrie) is er vraag naar een onderzoek (energiebesparing, opbrengst, kwaliteit) op praktijkschaal. Omdat dubbel ARM glas nu niet economisch rendabel is, is in eerste instantie enkel ARM glas het meest voor de hand liggend. In een viertal publicaties zijn de onderzoeksresultaten bekend gemaakt voor telers en kassenbouwers (zie publicaties [1] t/m [4]).

## **3 Conclusies en aanbevelingen**

### **3.1 Gewastechnisch perspectief**

Bij een kas met enkel ARM gecoat glas ontstaat een 4-5% hogere opbrengst door de extra hoeveelheid licht. Voor dubbel ARM gecoat glas en bij het hoogtransparant scherm is de opbrengst gelijk of treedt er een geringe verlaging van ca. 2 % op. Voor de combinatie enkel ARM gecoat glas en hoogtransparant scherm zal echter bij de meest economische regeling een extra opbrengst van ca. 4 % ontstaan. Door de goede bevochtigings- eigenschappen van het ARM gecoate glas is het met de bestaande technologie (glaswassers) goed schoon te houden. De condensatie eigenschappen zijn zodanig dat het condenswater goed van het glas afvloeit.

### **3.2 Energetisch perspectief**

Er komt meer licht en energie binnen in de kas met microcoating. Met enkel ARM gecoat glas draagt deze extra energie echter maar ten dele bij aan de energiebesparing, de rest van de energie wordt gebruikt voor extra verdamping en hogere kasluchttemperatuur. De energie besparing is voor enkel ARM glas ca. 3 %. Bij gebruik van het hoogtransparante scherm kan de energiebesparing afhankelijk van de teelt toenemen tot circa 12-20 %. Toepassen van het hoogtransparant scherm geeft 6- 10 % extra energiebesparing ten opzichte van een standaard scherm.

Voor dubbel ARM gecoat glas is de energiebesparing ca. 23-26%. De hoogste energiebesparing van 33-35 % is mogelijk bij een combinatie van dubbel ARM gecoat glas en gebruik van het hoogtransparante scherm. In dit geval geeft het hoogtransparant scherm 1-7 % extra energiebesparing ten opzichte van een standaard scherm.

### **3.3 Economisch perspectief**

De meerwaarde van ARM gecoat glas is energiebesparing door extra energie- en lichtinval en een hogere opbrengst. Voor het toepassen van enkel ARM-glas, is de minimale afschrijvingsperiode 4,8-6,5 jaar, afhankelijk van de teelt bij de goedkoopste investeringskosten van ARM-glas. De kortste afschrijving is bij de potplanten teelt en de langste voor de chrysantenteelt. Andere combinaties zoals dubbel ARM glas en ARM glas in combinatie met een hoogtransparant scherm kunnen veel energie besparen maar zijn op dit moment nog niet economisch interessant.

### **3.4 Aanbevelingen**

Uit het onderzoek is gebleken dat een aantal warmte-isoleerde maatregelen, zoals dubbel ARM gecoat glas en het hoogtransparant F-clean scherm momenteel economisch nog niet rendabel zijn. De verwachting is echter dat energieprijzen in de toekomst zullen stijgen en de prijzen van de hoogtransparante materialen zullen dalen. Als energieprijzen stijgen of prijzen van ARM glas dalen kan het financieel plaatje een stuk gunstiger worden voor dubbel ARM glas. De ontwikkeling van een hoogtransparant goedkope folie kan hier eveneens verandering in brengen. De vorstbestendigheid van het ARM-gecoat glas van Flabeg bleek bij één type glas onvoldoende. Dit type glas is daardoor ongeschikt voor toepassingen in kassen. De energiebesparing kan verder toenemen wanneer het ARM gecoat glas gecombineerd wordt met een systeem voor energiezuinig droogstoken. Een onderzoek op praktijkschaal gecombineerd met een systeem voor energiezuinig droogstoken kan de energiebesparing nog aanzienlijk laten toenemen.

## Literatuur

- [1] P.J. Sonneveld en J.C. Bakker, Vooronderzoek Innovatieve Kas- en Teeltconcepten, 1 februari 1999, Nota V99-08 IMAG Wageningen
- [2] Site van het Fraunhofer instituut: <http://www.ise.fhg.de/Projects/OFO/Welcome.html>
- [3] Site van Flabeg (leverancier ARM-glas): <http://www.flabeg.de/>
- [4] Site van Hogla (leverancier ARM-glas): <http://www.hogla.nl/>
- [5] Site van (producer ARM-glas): <http://www.sunarc.net>
- [6] Site van Asahi Glass Leverancier F-clean folie):  
<http://www.agc.co.jp/english/chemicals/film/aflex/aflex.htm>
- [7] Test Report Solar Anti Reflection Coating, Institute of Technology, Uppsala University, Sweden and Alvkärlby Laboratory, Swedish State Power Board.
- [8] Kwantitatieve Informatie voor de Glastuinbouw 2000-2001; groenten – snijbloemen - potplanten IKC glasgroenten, Naaldwijk, 2000.

## Publicaties

- [1] T. Van Gastel, Superbesparende kasdekken in aantocht, *Groenten & Fruit*, **3**, 2003, p.28-29
- [2] P. Sonneveld, D. Waaijenberg, Höhere Lichtdurchlässigkeit mit einem beschichteten Glas, *Garterbörse*, **06**, 2003, p.8-11
- [3] P. Sonneveld, D. Waaijenberg, Nieuwe coating zorgt voor meer licht in de kas, *Vakblad voor de bloemisterij*, **15**, 2003, p.42-43
- [4] P. Sonneveld, D. Waaijenberg, Met coating meer licht in kas, *Groente en Fruit*, **20**, 2003, p.22-23

## Bijlage 1 KASPRO

Het simulatiemodel (KASPRO) is een uit samenhangende componenten samengesteld model van de eigenschappen van een kas, gewasgegevens, ingestelde setpoints en buitenklimaat, dat de relevante variabelen berekent als functie van tijd. Dit maakt berekening van de energiestromen en gewasproductie mogelijk.

De basis van het model wordt gevormd door de energie-, water- en CO<sub>2</sub>-balansen van de in beschouwing genomen samenhangende onderdelen van het systeem. Het resulteert in een set van niet lineaire, eerste orde differentiaal vergelijkingen die numeriek worden opgelost.

Het kasklimaatmodel heeft als startpunt de kasklimaatregelaar.

Kaslucht is een component waarvan de temperatuur, vochtigheid en CO<sub>2</sub>-concentratie als primaire variabelen worden beschouwd. De kasklimaatregelaar vergelijkt deze waarden met setpoints. De setpoints zijn functies van tijd en buitenklimaat en aangenomen wordt dat de teler ze van parameters voorziet.

Op grond van de vergelijkingen zal de regelaar het volgende doen:

- De stand van de mengklep van de warmwatertoevoer wordt aangepast, ten einde de temperatuur van de verwarmingbuizen te wijzigen. Meestal wordt de temperatuur van twee afzonderlijke verwarmingssystemen geregeld, waarvan één met pijpen dicht bij de grond en één met pijpen in of boven het gewas.
- De stand van de luchtramen wordt aangepast voor warmte, vocht en CO<sub>2</sub>-uitwisseling tussen de kas- en buitenlucht.
- De CO<sub>2</sub>-gift naar de kas wordt gestart en gestopt.

Naast het kasklimaat, stuurt de regelaar de apparaten aan die van belang zijn voor de warmtevoorziening (ketel en evt warmtepomp, opslagtank etc.) en de CO<sub>2</sub>-productie van de ketel. De regelactiviteiten hebben direct of indirect invloed op het brandstofverbruik. Dit is duidelijk het geval bij verhoging van de buistemperatuur, hoewel de brandstof om in de warmtebehoefte te voorzien, al uren eerder opgewekt kan worden en tijdelijk worden opgeslagen in een warmteopslagtank.

Geopende ramen hebben een effect op de energieconsumptie wanneer de regelactiviteiten worden uitgevoerd op grond van het setpoint luchtvochtigheid gedurende perioden van energievraag. De CO<sub>2</sub>-gift veroorzaakt een brandstofverbruik indien CO<sub>2</sub> wordt verkregen uit uitlaatgassen van de ketel of de WK-installatie tijdens perioden zonder energievraag.

Omdat het warmtedistributiesysteem in kassen gewoonlijk bestaat uit een warmwatercircuit van pijpen met een groot thermisch vermogen met typische afkoelingseigenschappen, wordt extra aandacht besteed aan de beschrijving van het dynamisch gedrag (De Zwart, 1996). De tank voor korte termijn warmteopslag met zijn grote thermische vermogen is gemodelleerd met een uitgebreid meerlagen model overeenkomstig de uitgangspunten gepresenteerd door Yoo en Pak (1993). Naast de kasklimaatregelaar zijn de kasluchtomstandigheden ook afhankelijk van de warmte, vocht en CO<sub>2</sub>-uitwisseling tussen de kaslucht en zijn directe omgeving. Om deze interacties te beschrijven onderscheidt het model samenhangende componenten voor het gewas, de bodem en het kasdek.

De grond onder de kas vertegenwoordigt een grote warmteopslagcapaciteit met een sterk dempend effect op fluctuaties van de kasluchttemperatuur. Om een goede afspiegeling van dit effect te verkrijgen is de grond onderverdeeld in meerdere lagen.

Het kasdek vormt een belangrijke belemmering voor warmteverlies naar de buitenlucht. Indien de temperatuur van het dek echter onder het dauwpunt van de kaslucht komt, veroorzaakt het dekoppervlak ontvochtiging van de kas.

De buitenomstandigheden dienen als omgevingsfactoren voor het model. De buitenluchttemperatuur en de hemeltemperatuur beïnvloeden de warmteverliezen door convectie en straling bij het kasdek en daardoor de temperatuur van het dek. De buitentemperatuur, vochtigheid en CO<sub>2</sub>-concentratie hebben een directe invloed op de primaire toestandsvariabelen via luchtuitwisseling door geopende ramen of kieren. De windsnelheid is een belangrijke indirecte weerconditie omdat deze invloed heeft op de convectieve warmte-uitwisseling aan het dek en in belangrijke mate de luchtuitwisseling door de ramen bepaalt.

Een belangrijk weergegeven is de globale straling. Directe en diffuse straling wordt geabsorbeerd, gereflecteerd en doorgelaten door het dek, het gewas en de grondoppervlakte. Bovendien is straling op gewashoogte belangrijk voor de fotosynthese. Voor de berekening van de warmte-, vocht- en CO<sub>2</sub>-stromen tussen de samenhangende componenten, zijn de relaties voor de warmtestroming ontleend aan een aantal auteurs. De warmtestraling is berekend met gebruikmaking van relaties gebaseerd op de wet van Stefan-Boltzmann, en bevat *view* factoren, absorptie en emissie. Interceptie van de straling door het gewas is

behandeld in overeenstemming met Goudriaan (1988). De transmissie van licht door het dek is berekend middels een methode beschreven door Bot (1983). De convectieve warmte-uitwisseling aan de binnen en buitenkant van het dek is beschreven in de relaties eveneens gepresenteerd door Bot. De ventilatiestromen, in tuinbouwkundige context is gebaseerd op natuurlijke ventilatie, en is berekend op basis van de theorie gepresenteerd door De Jong (1990). De gewasverdamping, een belangrijk onderdeel van het model, is afgeleid van het werk van Stanghellini (1987). De convectieve warmteoverdracht van verwarmingsbuizen en convectieve warmte-uitwisseling van de bodem is eveneens beschreven door Bot. De warmtegeleiding in de grond is benaderd vanuit de algemene warmtegeleidingstheorie.

Ten gevolge van de complexiteit en de niet lineairiteit van het model, is de oplossing van de differentiaalvergelijkingen uitgevoerd in numerieke voorwaartse integratie. De stapgrootte wordt steeds zodanig gekozen dat geen numerieke instabiliteit ontstaat. Dat betekent dat het tijdsduur per integratiestap vaak niet meer dan 15 sec bedraagt. Wanneer het buitenklimaat en de klimaatregelaar activiteiten stabiel zijn, neemt de stapgrootte toe tot 2 minuten, hetgeen overeen komt met de meetfrequentie van de klimaatregelaar.

Vergelijking van de resultaten van het model met metingen in een semi-praktijk kas (4 afdelingen van 200 m<sup>2</sup> elk) toonden een zeer goede overeenkomst. Absolute verschillen tussen model en metingen voor de luchttemperatuur voor gemiddelde 10 minuten waarden bedroegen minder dan 0.5 °C in 90% van de tijd. Het energieverbruik (warmte) werd gesimuleerd met een nauwkeurigheid van 95% en de regelactiviteiten m.b.t. ramen en de CO<sub>2</sub>-gift toonden een goede gelijkenis. (de Zwart, 1996).

Voor de beschrijving van het buitenklimaat wordt een dataset gebruikt die uitgaat van typisch Nederlandse weersomstandigheden. Deze dataset is wordt aangeduid als het SEL-jaar (Breuer en Van de Braak, 1989).

## Literatuur

Bot, G.P.A., 1983. Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model. PH. D. Thesis Agricultural University Wageningen, The Netherlands.

Breuer, J.J.G. en N.J. van de Braak, 1989 Reference Year for Dutch Greenhouses, Acta Horticulturae 248, 1989

De Jong, T., 1990. Natural ventilation of large multi-span greenhouses. PH. D. Thesis Agricultural University Wageningen, The Netherlands.

De Zwart H.F., 1996. Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model. IMAG-DLO rapport 96-05, 236 blz.

Goudriaan, J., 1988. The bare bones of leaf-angle distribution in radiation models for canopy photosynthesis and energy exchange. Agricultural and forest meteorology, 43:155-169

NEN 2697, 1e druk, oktober 1995

Stanghellini, C, 1987. Transpiration of greenhouse crops. An aid to climate management. PH. D. Dissertation, Landbouwniversiteit, Wageningen.

Yoo H. , E. Pak, 1993. Theoretical model of the charging process for stratified thermal storage tanks. Solar Energy, 51(1993)6 pp. 513-519.

## Bijlage 2 Klimaatinstellingen

gewas		chry sant	paprika			potplant	tomaat			
plantdatum		jaarrond	25-11			jaarrond	11-12			
ruimdatum			07-11				20-11			
<b>kas</b>										
kasoppervlak		39010								
dekmateriaal		enkel glas								
gothoogte	m	4,5								
kapbreedte	m	4,8								
<b>verwarmingsinstallatie</b>										
ketelvermogen	W/m <sup>2</sup>	250								
rookgascondensor		ja								
warmtebuffer	m <sup>3</sup> /ha	50	100			50	100			
CO <sub>2</sub> -dosering		uit ketel								
ondernet	per kap	6 x Ø 35	6 x Ø 51			6 x Ø 51	6 x Ø 51			
bovennet		3 x Ø 51	3 x Ø 35			3 x Ø 51	3 x Ø 28			
<b>instellingen</b>										
kastemperatuur dag	°C	17,7	25/11	16/12	22,5	22,0				
nacht			16/12	06/01	22,5		11/12	10/01	19,0	
			06/01	27/01	22,0		10/01	31/03	18,0	
			27/01	07/11	21,0		31/03	20/11	19,0	
			07/11	25/11	5,0		20/11	11/12	5,0	
			25/11	16/12	22,5		11/12	10/01	18,0	
		16/12	06/01	20,0	10/01	31/03	17,0			
		06/01	27/01	18,0	31/03	20/11	18,0			
		27/01	07/11	19,0	20/11	11/12	5,0			
07/11		25/11	5,0							
minimum buis dag		°C	40	20/11	07/11	35	35	11/12	20/11	45
nacht				07/11	20/11	5		20/11	11/12	0
			40	20/11	07/11	35	35	11/12	20/11	45
				07/11	20/11	5		20/11	11/12	0
	RV	%	85							

