

Anti-reflectie-coating voor tuinbouwglas – eerste praktijkervaringen

Silke Hemming, Frank Kempkes, Vida Mahammadkhani, Cecilia Stanghellini,
Gert-Jan Swinkels & Henk-Jan Holterman





Anti-reflectie-coating voor tuinbouwglas – eerste praktijkervaringen

Silke Hemming, Frank Kempkes, Vida Mahammadkhani, Cecilia Stanghellini,
Gert-Jan Swinkels & Henk-Jan Holterman

© 2006 Wageningen, Wageningen UR Glastuinbouw

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

Exemplaren van dit rapport kunnen bij de (eerste) auteur worden besteld. Bij toezending wordt een factuur toegevoegd; de kosten (incl. verzend- en administratiekosten) bedragen € 50 per exemplaar.

Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Droevendaalsesteeg 1, Wageningen
: Postbus 16, 6700 AA Wageningen
Tel. : 0317 - 47 70 00
Fax : 0317 - 41 80 94
E-mail : info.pri@wur.nl
Internet : www.pri.wur.nl

Inhoudsopgave

	pagina
Samenvatting	1
Inleiding	5
2. Methoden	7
2.1 Optische eigenschappen van verschillende uitvoeringen van Anti-reflectie-glas	7
2.1.1 Glazen	7
2.1.2 Lichtmeetapparatuur	7
2.1.3 Lichtmodel RAYPRO	9
2.1.4 Lichtopbrengst van enkellaags Anti-reflectie-glas in de praktijk	10
2.2 Condensatiegedrag van verschillende uitvoeringen Anti-reflectie-glas	14
2.2.1 Condensmeetapparatuur	14
2.2.2 Condensatiegedrag van enkellaags Anti-reflectie-glas in de praktijk	15
2.3 Energiebesparing en effecten op het klimaat bij toepassing van Anti-reflectie-glas	16
2.3.1 Klimaatmodel KASPRO	16
2.4 Effecten op de gewasproductie bij toepassing van Anti-reflectie-glas	17
2.4.1 Gewasgroeimodel INTKAM	17
3. Resultaten	19
3.1 Optische eigenschappen van verschillende uitvoeringen van Anti-reflectie-glas	19
3.1.1 Lichttransmissie kasdek	22
3.1.2 Lichtopbrengst van enkellaags Anti-reflectie-glas in de praktijk	30
3.1.3 Onderzoek naar het condensatiegedrag van Anti-reflectie-glas	38
3.2 Energiebesparing en effecten op klimaat bij toepassing van Anti-reflectie-glas	43
3.2.1 Klimaat en enhergie	43
3.3 Effecten op de gewasproductie bij toepassing van Anti-reflectie-glas	49
3.4 SWOT-analyse	51
4. Conclusies en aanbevelingen	57
5. Aanbevelingen	59
Literatuur	61
Bijlage I. Berekening van het kasklimaat	2 pp.
Bijlage II. Berekening optische transmissie droge en natte materialen	3 pp.
Bijlage III. Inschatting hoeveelheid condensatie en gemiddelde hoeveelheid regen	3 pp.
Bijlage IV. Effect van vervuiling op de lichtopbrengst	1 p.

Samenvatting

Zonlicht is een van de belangrijkste factoren met betrekking tot de groei en ontwikkeling van planten. 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. Een kasomhullingsmateriaal met een hoge lichtdoorlatendheid, zoals anti-reflectie-glas, verhoogt de productie en daarmee de energie-efficiëntie als het als enkel glas wordt gebruikt, het verlaagt het gasverbruik wanneer het als dubbel glas wordt gebruikt, zonder een teruggang in de productie.

Optische eigenschappen anti-reflectie-glas

De optische eigenschappen van verschillende uitvoeringen van tuinbouwglas en tuinbouwglas met een anti-reflectie-coating (anti-reflectie-glas) zijn zowel in het lab als ook in een praktijkkas onderzocht.

Van verschillende enkellaagse en dubbellaagse basisglazen en dezelfde glazen met verschillende vormen van anti-reflectie-coatings is de transmissie voor direct en diffuus licht en de lichtdoorlatendheid onder verschillende invalshoeken van het licht gemeten. Ook de spectrale transmissie van de glazen is geanalyseerd.

Een anti-reflectie-coating reduceert van de reflectie en verhoogt de lichttransmissie van glazen. De voor de planten belangrijke PAR transmissie ligt bij glazen van Sunarc bij 96-97% loodrecht en 89-90% voor diffuus invallend licht. Sunarc gebruikt licht ijzerarm glas oftewel tuinbouwglas 90+ als basismateriaal. Door de anti-reflectie-coating van Sunarc stijgt de lichttransmissie voor direct en diffuus invallend licht van het basisglas met rond 6-7%punten.

Een andere leverancier CentroSolar gebruikt twee verschillende basismaterialen, gewoon glas met een iets lagere transmissie, of witglas met een hogere transmissie. Door de anti-reflectie-coating van CentroSolar stijgt de lichttransmissie van het basisglas met rond 4.5%punten voor direct invallend licht. Voor diffuus invallend licht is deze toename gunstiger, de gemiddelde toename bedraagt rond 6.8%punten. De coating van Sunarc verhoogt de lichttransmissie precies in het PAR-gebied van 400-700nm. De coating van CentroSolar is in dat gebied iets minder effectief en zou nog verder geoptimaliseerd kunnen worden. In het algemeen kan worden gesteld dat een anti-reflectie-coating de samenstelling van het doorgelaten spectrum bijna niet verandert.

Van glazen van beide leveranciers hebben wij dubbellaags isolatieglas laten maken. De transmissie van de basisglazen in een dubbele uitvoering was naar verwachting laag (80-84% voor direct en 71-75% voor diffuus invallend licht). Doordat er dan tot 10%punten minder licht in de kas zou komen vergeleken met de enkellaagse uitvoering zijn gewone dubbele glazen weinig geschikt voor de tuinbouwproductie. De transmissie van de isolerende glazen met een vierzijdige anti-reflectie-coating daarentegen was met 90-94% voor direct en 82-86% voor diffuus invallend licht zelfs hoger dan het huidige tuinbouwglas 90+ en geeft een goed perspectief voor tuinbouwtoepassingen in de toekomst.

Lichtopbrengst kassen met anti-reflectie-glas

Met een lichtmodel gebaseerd op ray-tracing (RAYPRO), een methode waarmee een lichtstraal vanaf een lichtbron door een object gevolgd wordt is de jaarrond lichtopbrengst van een kas met verschillende uitvoeringen van tuinbouwglas en anti-reflectie-glas voor verschillende zonnestanden, kasoriëntaties en dakhellingen bepaald om de optimale gebruiksmogelijkheden voor de toekomst te kunnen bepalen.

De hogere directe en diffuse lichttransmissie van anti-reflectie-glas zorgt voor een hogere lichtsom op gewasniveau. Terwijl de lichtsom op gewasniveau onder tuinbouwglas ca. 1300 MJ/m² is, stijgt deze onder anti-reflectie-glas op 1400 MJ/m². De In deze analyse komt ook naar voren dat een dubbellaags anti-reflectie-glas dezelfde lichtsom op gewasniveau geeft dan enkellaags tuinbouwglas.

Er wordt regelmatig gediscussieerd over de effecten van vroeg licht en het belang van een hoge lichttransmissie bij kleine elevaties van de zon. Tuinders geven aan dat vooral het licht in de ochtend belangrijk is. Bij een anti-reflectie-glas is niet alleen de totale lichtdoorlatendheid verhoogd, maar ook de lichtdoorlatendheid voor direct licht onder kleine invalshoeken, wat positief zou zijn voor een hogere lichtopbrengst bij kleine elevaties van de zon. In het onderzoek is echter naar voren gekomen dat de hoeveelheid stralingsenergie bij lage zonnestanden op jaarbasis beperkt is. Maar 75-80 MJ/m² van de jaarlijkse totale lichtsom van 1300-1400 MJ/m² komt de kas binnen bij elevaties van de zon kleiner dan 10° en daarmee bij kleine invalshoeken op het kasdek. Door gebruik te maken van

anti-reflectie-glas neemt de lichtopbrengst bij kleine elevaties op jaarbasis maar $5\text{MJ}/\text{m}^2$ toe, dat is minder dan 1% van de jaarlijkse lichtsom, maar wel 7% tijdens de uren met lage elevaties. Anderzijds is de elevatie in de wintermaanden december en januari nooit hoger dan 20° , zodat een verhoging van de transmissie van een kasdek materiaal bij kleine elevaties deze maanden een relatief hogere impact heeft. Zo wijzen berekeningen van de opbrengst uit dat deze vooral in de wintermaanden met lage elevaties meer dan evenredig stijgt.

Een kasoriëntatie met nokrichting oost-west verhoogd in de winter de lichtopbrengst in de kas, evenwel als een steilere dakhelling. Echter, de keuze voor een bepaalde kasoriëntatie of dakhelling veranderd niet door de keuze voor een nieuw kasdek materiaal, in dit geval anti-reflectie-glas.

Eerste praktijkervaringen

Er zijn vergelijkende metingen van de lichtopbrengst van enkel anti-reflectie-glas in de praktijk bij van der Lans, tomatenteler, op de locatie Rilland uitgevoerd. De hier onderzochte kas is 1.6ha groot en is geheel gedekt met anti-reflectie-glas. Enkel twee vakken zijn voor het onderzoek gedekt met hetzelfde basisglas zonder coating. Lichtmetingen werden over een langere periode continue uitgevoerd met meerdere lichtsensoren die direct onder de kasdekmaterialen werden geplaatst. Ook werd de transmissie van de gehele kas, kasdek materiaal en constructie, bepaald.

Het in de praktijkkas gebruikte anti-reflectie-glas had een 5.5% hoger lichtdoorlatendheid dan het basismateriaal zonder coating (labmetingen). Tijdens de praktijkmetingen van de lichtopbrengst viel op dat de transmissie van het anti-reflectie-glas vaak achter liep op de verwachte transmissie in vergelijking met het basismateriaal. Een hogere lichtdoorlatendheid van anti-reflectie-glas van 5.5% boven het basismateriaal werd gemiddeld niet gemeten, wel op sommige momenten, namelijk als de materialen van binnen en buiten droog waren. Dat was het geval als er geen condens optrad en het dak ook van buiten niet nat was als gevolg van regen of dekbevoeiing. De coating was gedeeltelijk buiten werking als het oppervlak nat was.

In de onderzochte praktijkkas waren droge momenten op het kasdek schaars, want een belangrijk onderdeel van het kassysteem was warmteafvoer via dakbevoeiing. Van de buitenkant was het dek dus vaak nat. Bewolkte dagen gingen vaak gepaard met regen. Op heldere dagen of momenten naam de warmtetoevoer door zonnestralingsenergie naar de kas toe, de overtollige warmte werd gedeeltelijk afgevoerd door aanzetten van de daksproeiers. Ook van de binnenkant was het dek vaak nat door condens. Deze trad vaker op, omdat de vochtgehalte van de lucht in een (semi)gesloten kas vaak iets hoger ligt dan in een traditionele kas met luchtramen, en omdat de dektemperatuur in deze kas vaak verlaagd was door sproeien van koud water op de buitenkant van het dek, waardoor de dektemperatuur afnam. Het kan dus verwacht worden dat in een traditioneel kassysteem het dak minder vaak nat is als in de hier onderzochte praktijkkas.

In een analyse komen wij tot de conclusie dat een kas rond 90% van de tijd aan de binnenkant nat is als gevolg van condens. Een anti-reflectie-coating aan de binnenkant zou gedeeltelijk buiten werking zijn. Een enkellaags anti-reflectie-glas heeft dan ook de beste werking van mei tot september, wanneer het dek van de binnenkant vaker droog is. Verder laat een analyse van weergegevens van het KNMI zien dat in een traditioneel teeltsysteem (zonder dakbevoeiing) het dek 5-10% van de tijd nat is op grond van regen. Daardoor is een anti-reflectie-coating ook aan de buitenkant buiten werking.

De transmissie van de gehele SunergieKas® gedekt met anti-reflectie-glas inclusief constructie werd vastgesteld op meer dan 80%.

Condensatiegedrag anti-reflectie-glas

Er waren indicaties dat het condensatiegedrag van anti-reflectie-glas beter is dan van traditioneel glas. Zowel in het laboratorium als ook in de praktijkkas is nader onderzoek verricht naar de eigenschappen van anti-reflectie-glas ten opzichte van traditioneel tuinbouwglas. In het laboratoriumonderzoek werd het afvloeien van condens en de kwaliteit van de druppelvorming en het invloed op de lichttransmissie onderzocht. In de praktijkkas werd de kwaliteit van de druppelvorming onderzocht.

Tijdens de lab- en de praktijkmetingen werd een duidelijk verschil tussen glas met een AR coating 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 gereduceerd, terwijl bij gecoat glas een waterfilm werd gevormd en de transparantie hoog bleef. Dit had ook consequenties voor de lichtdoorlatendheid.

De transmissie voor direct, loodrecht invallend licht van gewoon glas neemt met rond 1.3% toe door een waterlaag erop. Anderzijds gaat de loodrechte transmissie van anti-reflectie-glas met ca. 2.6% achteruit. Dit is te verklaren door veranderingen van de brekingsindex door een waterlaag. Terwijl de brekingsindex van gewoon glas wordt verlaagd van 1.54 naar 1.33, stijgt de brekingsindex van anti-reflectie-glas van 1.27 naar 1.33. Hierdoor komt de lichttransmissie voor loodrecht invallend licht van beide glastypes dichter bij elkaar te liggen. Een verschil in condensatievorm, druppels of film, heeft ook sterke invloed op de transmissie voor diffuus invallend licht. Vooral bij kleine invalshoeken neemt de reflectie in waterdruppels enorm toe. Hierdoor neemt de transmissie voor diffuus invallend licht van standaard glas (met druppels) met 5.6% af. Maar ook bij glas met anti-reflectie-coating treedt een relatief lichtverlies door condensatie op. De transmissie voor diffuus invallend licht gaat met 3% terug, omdat de coating dan buiten werking is. De lichttransmissie is dan echter nog steeds hoger dan voor nat gewoon glas. Het kan daarom worden geconcludeerd dat het aanbrengen van een anti-reflectie-coating ook aan de binnenkant nuttig is en dat er een additioneel lichtwinst gaat optreden op momenten van condensvorming.

Verder kan worden verwacht dat een dubbellaags anti-reflectie-glas met een vierzijdige coating een relatief betere prestatie levert. Zelfs is de binnenkant nat als gevolg van condensatie, blijven de ander drie lagen werken en zal de lichtopbrengst nog steeds hoog zijn.

Samenvattend kan in een traditionele kas met anti-reflectie-glas door de coating en de betere condensvorming een ca. 4-5% hogere lichtopbrengst worden verwacht. Dat is iets minder dan oorspronkelijk voorspeld, maar nog steeds een heel goede prestatie. Wij trekken daarom ook de conclusie dat het onderzochte AR glas een goed kasdek materiaal is. Verder moeten wij concluderen dat laboratorium metingen van de lichttransmissie, uitgevoerd volgens de norm NEN 2675 op droge materialen, niet de lichtopbrengst van de materialen in de praktijk weergeven. Een aanpassing van de norm zou overwogen moeten worden.

Effect op kasklimaat en energieverbruik

Toepassing van kasdekmaterialen met afwijkende optische eigenschappen ten opzichte van standaard glas heeft altijd gevolgen op het klimaat en daarmee het energiegebruik en de productie. Omdat licht een belangrijke energiebron is, zal bij een hogere transmissie van het anti-reflectie-glas een ander klimaat ontstaan. Het toepassen van dubbel anti-reflectie-glas biedt de mogelijkheid om een zeer hoge lichttransmissie te combineren met een hoog energiebesparend effect. Met een klimaat- en energiemodel (KASPRO) zijn de effecten op het kasklimaat geanalyseerd en energiebesparingpotenties in kaart gebracht. De gevolgen voor kaslucht- en gewastemperatuur, vocht en CO₂ zijn het meest belangrijkst.

Het gasverbruik onder enkellaags anti-reflectie-glas neemt 1-2% af, het gasverbruik onder dubbellaags anti-reflectie-glas neemt rond 26% af. De temperatuur onder de enkellaagse materialen is vergelijkbaar, onder de onderzochte dubbellaagse materialen is de gemiddelde kasluchttemperatuur licht hoger. Ook is het onder de dubbele materialen vochtiger. Een geringer gasverbruik heeft gemiddeld een lagere CO₂-concentratie als gevolg. Terwijl de lichtsom om dubbel anti-reflectie-glas iets hoger is dan onder enkellaags tuinbouwglas, heeft de lagere CO₂-concentratie dezelfde biomassa productie ten gevolg.

Effect op gewasproductie van tomaat

Het effect van enkellaags anti-reflectie-glas en dubbellaags anti-reflectie-glas op een tomatengewas is nader onderzocht met behulp van een gewasgroeimodel (INTKAM). Om een indruk te krijgen van het verschil in efficiëntie van gasverbruik, tot aan de eerste oogst, is berekend hoeveel gram droge stof (DS) er per m³ gas in de vruchten is opgeslagen. Dan blijkt dat met een kuub gas onder gewoon glas 2.7 g DS in het eerste geoogste tros wordt opgeslagen, terwijl dit 3.1 onder een anti-reflectie-dek en zelfs 3.8 gram DS bij anti-reflectie-glas in dubbele uitvoering is. Dat is een verhoging van de efficiëntie van 12% en zelfs 40% voor respectievelijk AR enkel en AR dubbel. Deze verhouding in efficiëntie blijft vrijwel hetzelfde tot aan de vierde tros. Er is dus een goed perspectief voor het gebruik van AR glas en voor AR glas in een dubbele uitvoering.

Samenvattend kan worden geconcludeerd dat AR glas in een enkele en ook in een dubbele uitvoering als isolatieglas perspectief biedt om het energieverbruik van de tomatenproductie in de toekomst te verlagen. De winst van het glas zal afhangen van de energieprijzen en de te realiseren materialenprijzen. Eerste inschattingen laten zien dat een terugverdientijden van 5-6 jaar voor enkel AR glas en 7 jaar voor dubbel AR glas realistisch kunnen zijn.

Inleiding

Zonlicht is een van de belangrijkste factoren met betrekking tot de groei en ontwikkeling van planten. 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. Voor alle gewasgroepen wordt de productie verhoogd door meer licht in de kas (hogere opbrengst van vruchtgroenten, snellere ontwikkeling van snijbloemen en potplanten). Voordelen van meer licht worden vooral gerealiseerd in de (winter)maanden met het minste licht. Voor veel siergewassen zoals chrysant wordt ook de kwaliteit van het product sterk verbeterd.

In het transitieproject 'Optimale lichtomstandigheden bij de transitie naar een energiezuinige kastuinbouw' is naar voren gekomen dat er verschillende lijnen zijn om te komen tot maximaal gebruik van het natuurlijke licht in Nederland. Één belangrijk punt is, dat zo veel mogelijk zonlicht in de kas moet komen voor een hoge opbrengst van veel gewassen door veel PAR en een reductie van het gasverbruik door veel zonne-energie. Meer licht in de kas, kan worden gerealiseerd door glas met anti-reflectie-coating (Anti-reflectie-glas).

Een kasomhullingsmateriaal met een hoge lichtdoorlatendheid, zoals Anti-reflectie-glas, verhoogt de productie en daarmee de energie-efficiëntie als het als enkel glas wordt gebruikt, het verlaagt het gasverbruik wanneer het als dubbel glas wordt gebruikt, zonder een teruggang in de productie.

Anti-reflectie-glas enkel heeft een zeer hoge lichttransmissie (96% voor direct invallend licht en 90% voor diffuus invallend licht t.o.v. traditioneel glas met 90% direct en 83% diffuus). Dit leidt tot een productiestijging. Omdat vooral de transmissie voor diffuus licht en de transmissie onder grote invalshoeken wordt verhoogd, zal er ten opzichte van standaard glas een seizoenseffect optreden. Het glas laat in tegenstelling tot traditioneel glas meer licht door bij een lagere zonnestand. Andere gunstige eigenschappen zijn de naar verwachting betere zelfreinigende eigenschappen en de betere condensatie eigenschappen dan gewoon tuinbouwglas. Deze eigenschappen leiden tot een hogere lichttransmissie en daarmee tot extra productie vooral in periodes met weinig licht. Dit zijn echter effecten welke niet berekend kunnen worden door in het onderzoek vaak gebruikte en erkende modellen, omdat de nodige wetenschappelijke onderbouwing en ervaring ontbreekt.

Anti-reflectie-glas in een dubbele uitvoering biedt een uitstekende mogelijkheid om een hoge energiebesparing (ca. 25%) te realiseren zonder licht- en productieverlies. Terwijl de isolatiewaarde van de kassen toeneemt, zal de lichttransmissie en daarmee de productie hetzelfde blijven als bij traditioneel tuinbouwglas in een enkele uitvoering. Isolatie van kassen zal in de toekomst één van de belangrijke maatregelen zijn om een doorbraak in de verlaging van het energieverbruik van de sector te kunnen realiseren. Dubbel Anti-reflectie-glas leidt tot een verlaging van het energieverbruik zonder productieverlies en draagt zeer sterk bij aan Groenlabel (punten voor geringere k-waarde).

In deze rapportage zal onder andere nader worden ingegaan op de volgende aspecten:

- Wat is de lichttransmissie van verschillende uitvoeringen van Anti-reflectie-glas (enkel of dubbel, wel of niet UV-doorlatend, wel of niet diffuus)?
- Hoeveel energiebesparing kan (in een praktijksituatie) worden bereikt door het glas dubbel toe te passen?
- Er zijn indicaties dat vooral de lichttransmissie onder grote invalshoeken van Anti-reflectie-glas beter is dan van normaal glas, leidt dit tot additionele lichtwinst in de praktijk?
- Er zijn indicaties dat het condensatiegedrag van Anti-reflectie-glas beter is dan van normaal glas, leidt dit tot additionele lichtwinst in de praktijk?
- Er zijn indicaties dat de zelfreinigende werking van Anti-reflectie-glas beter is dan van normaal glas, leidt dit tot additionele lichtwinst in de praktijk?
- Wat is de (meer)opbrengst onder Anti-reflectie-glas?

2. Methoden

2.1 Optische eigenschappen van verschillende uitvoeringen van Anti-reflectie-glas

In overleg met twee fabrikanten van Anti-reflectie-glas zijn verschillende monsters Anti-reflectie-glas geproduceerd: enkel Anti-reflectie-glas, dubbel Anti-reflectie-glas, op basis van tuinbouwglas (zonder UVB-doorlatendheid) en op basis van Diamantglas (met UVB-doorlatendheid). Van de verschillende geproduceerde monsters is de transmissie voor direct- en diffuus-licht en de lichtdoorlatendheid onder verschillende invalshoeken van het licht gemeten. Ook de spectrale transmissie is geanalyseerd. Verder zijn de basismaterialen zonder coating geanalyseerd. Met lichtmodellen is de jaarrond lichttransmissie van het glas voor verschillende kasoriëntaties en dakhellingen bepaald om de optimale gebruiksmogelijkheden voor de toekomst te kunnen bepalen. Metingen worden uitgevoerd voortbouwend op eerdere resultaten in het project 'Microstructuur glas'.

2.1.1 Glazen

Een overzicht over de onderzochte glazen wordt weergegeven in Tabel 1.

Tabel 1. *Overzicht onderzochte glas materialen.*

Producent coating	Productnaam	WUR-Code	Aantal monsters
Basisglas 1	Standaard tuinbouwglas	PLA01Z	1
Basisglas 2	Pools tuinbouwglas gehard (90+ glas, weinig ijzerarm)	SC06A1-3	3
Sunarc	Basisglas 2 + AR coating	SC06B1-3	3
Sunarc	Basisglas 2 dubbel	SC06A4	1
Sunarc	Basisglas 2 + AR coating dubbel	SC06B4	1
Basisglas 3	Duits gewoon glas	CS06D1	1
CentroSolar	Basisglas 3 dubbel	CS06D2	1
CentroSolar	Basisglas 3 + AR coating	CS06B1-3	3
CentroSolar	Basisglas 3 + AR coating dubbel	CS06B4	1
Basisglas 4	Duits witglas (ijzerarm)	CS06C1	1
CentroSolar	Basisglas 4 dubbel	CS06C2	1
CentroSolar	Basisglas 4 + AR coating	CS06A	3
CentroSolar	Basisglas 4 + AR coating dubbel	CS06A4	1

2.1.2 Lichtmeetapparatuur

De belangrijkste optische eigenschappen voor kasdek materialen en scherm materialen zijn:

- Diffuse PAR transmissie 400-700nm (diffuus invallend licht op een materiaalmonster);
- Directe PAR transmissie 400-700nm (loodrecht invallend licht op een materiaalmonster en licht onder verschillende hoeken);
- Transmissie zonenergie 300-2500nm;
- Haze (lichtverstrooiing);
- IR transmissie (warmtestraling).

Diffuse transmissie en reflectie

Voor landen met een lage zonnestralsingsintensiteit is het van belang om de transmissie voor diffuus licht τ_d in het golflengte gebied van 400-700 nm (PAR) te weten, want in deze regio's bereikt ongeveer 75% van de straling gedurende het hele jaar de aarde als diffuus licht.

Metingen voor de diffuse licht transmissie en reflectie zijn op de 'Grote Ulbricht kogel' van WUR et de sensor 'Macam monochromator' uitgevoerd. De spectrale licht transmissie en reflectie is met dit instrument voor het golflengte gebied van $400 \text{ nm} < \lambda < 800 \text{ nm}$ gemeten. De interne diameter van de bol is 1m, de ingangsoening is 0.34m. De binnenkant van de bol is gecoat met BaSO₄ (KODAK). Voor kalibratie is er gebruikt gemaakt van een aantal standaard materialen. Een hoog aantal metingen resulteert in meetresultaten met een precisie van $\sigma < 0.03$. Voor metingen van direct licht valt een lichtstraal van halogeenlampen loodrecht op het monster. Voor de metingen van diffuus licht wordt het licht van Tl-buizen vanuit de basislijn rondom naar de hemel toe gestraald. Voor de reflectie metingen wordt licht van binnenuit de bol op het monster gestraald.

Metingen op de integrerende kogel zijn volautomatisch, volgens standaard procedures en standaard normen, verricht. Het monster wordt automatisch op de opening van de kogel geplaatst, er wordt gemeten, vervolgens wordt het monster verwijderd en dan wordt weer gemeten. Alle data wordt automatisch in een computer opgeslagen.

- Iedere meting (ρ , τ_d) is 10 keer herhaald.
- Het onderzochte golflengte gebied bestaat uit straling van 400 tot 700 nm (PAR = photosynthetic active radiation) in stappen van 1nm.
- De data zijn ongewogen en gewogen per golflengte volgens de internationale normen NEN 2676, DIN 5036-3 of EN 410.
- Het meet instrument is beschreven in een document van Intron, Houten, The Netherlands: 'Nationale beoordelingsrichtlijn voor schermmaterialen in tuinbouwkassen nr. 2365/01', January 1st, 1994.



Figuur 1. Grote integrerende kogel voor metingen van lichttransmissie en reflectie van een transparant materiaal.

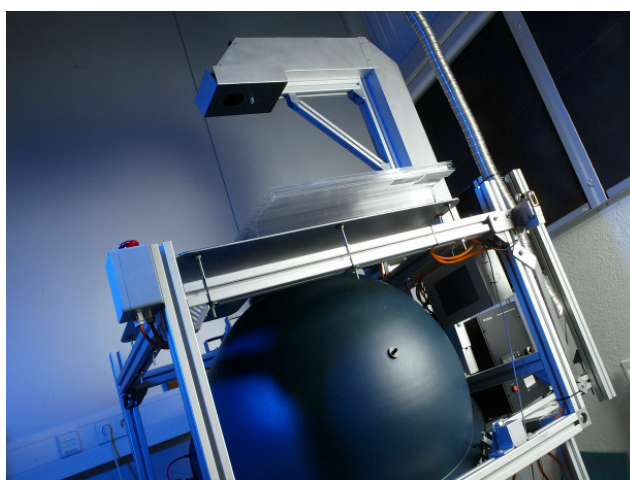
Directe transmissie en reflectie

Voor landen met hoge zonnestralsingsintensiteit is het van belang om de lichtdoorlatendheid voor direct licht τ_p , loodrecht vallend op materiaal, in golflengte gebied van 400-700 nm (PAR) te weten. In deze regio's zijn meestal weinig wolken waardoor een groot deel van de zonnestraling in de kas direct is. Metingen van direct licht transmissie τ_p zijn evenals met de 'Grote integrerende Ulbricht kogel' voor grote monsters uitgevoerd. Het is ook mogelijk om de transmissie en reflectie van direct zichtbaar licht vanaf 380-780 nm (VIS), volgens de eisen van het glas industrie, te meten.

- Het onderzochte golflengte gebied bestaat uit straling van 400 tot 700 nm (PAR = photosynthetic active radiation) of straling van 380-780nm (VIS=visible light) in stappen van 1nm.
- Iedere meting (ρ , τ_d) is 10 keer herhaald.
- De data zijn ongewogen en gewogen per golflengte volgens de internationale normen NEN 2676, DIN 5036-3 of EN 410.

Metingen van de directe lichttransmissie voor verschillende invalshoeken zijn voor monsters met afmetingen van 100mm * 100mm met de 'Kleine integrerende Ulbricht kogel' uitgevoerd. Volgende hoeken zijn onderzocht: 15, 30, 45, 60 en 75 graden. Dit meetinstrument bevat een Xenon lamp als licht bron en een diodearray spectrofotometer als meetdevice. Met deze apparatuur kan het hele golflengtegebied van 300-1100nm onderzocht worden.

- PAR transmissie van een monster onder verschillende hoeken van (15, 30, 45, 60, 75), het onderzochte golflengte gebied is 400 tot 700 nm (PAR) in stappen van 1nm.
- Iedere meting (ρ , τ_d) is 5 keer herhaald.
- De data zijn gewogen per golflengte volgens NEN 2676.



Figuur 2. Kleine Ulbricht kogel voor metingen van Haze en directe lichttransmissie en reflectie van een transparant materiaal, ook onder verschillende invalshoeken van de straling.

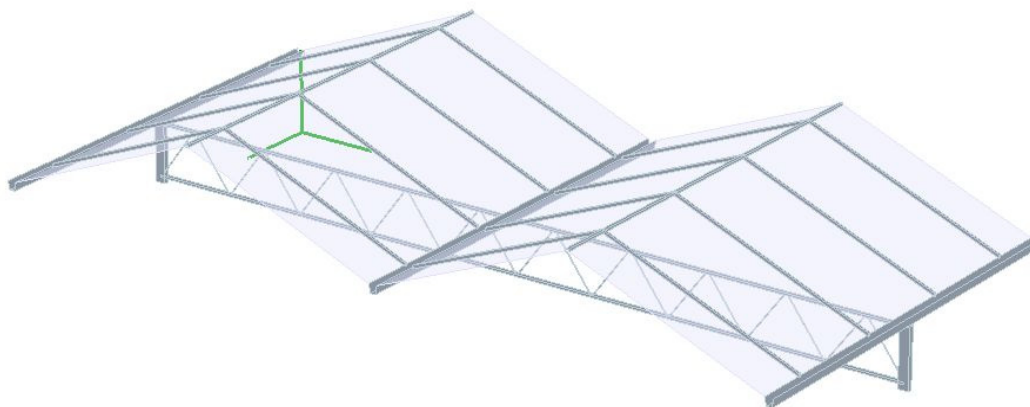
2.1.3 Lichtmodel RAYPRO

Toepassing van kasdekmaterialen met afwijkende optische eigenschappen ten opzichte van standaard glas heeft altijd gevolgen op het klimaat en daarmee het energiegebruik en de productie. Aan de hand van de optische eigenschappen, beschreven in paragraaf 2.1, zal de transmissie van de kas berekend worden. Hierbij worden de eigenschappen van de kas: kapbreedte, vakmaat, hellingshoek van het dek, grootte van de profielen en de goot en de reflectie van de onderbouw gebruikt om de transmissie van de kas te bepalen.

Hiervoor wordt het computerprogramma Raypro gebruikt, dat de lichttransmissie berekent door elk willekeurig 3-dimensionaal object. Het model is gebaseerd op ray-tracing, een methode waarmee een lichtstraal vanaf een lichtbron door het object gevolgd wordt. Anders dan de bestaande software voor het visualiseren van 3D omgevingen is de kracht van Raypro het berekenen van de lichttransmissie, -absorptie en -reflectie van een object. De geometrie van het object wordt vertaald naar een verzameling van vlakken in 3D. Licht wordt gemodelleerd als een groot aantal lichtstralen. De interactie van de lichtstraal met het object wordt bepaald op basis van de optische eigenschappen (zie in paragraaf 2.1) van het materiaal en natuurkundige wetten. Zo wordt rekening gehouden met de lichtbreking, -absorptie en -doorlatendheid van het object wanneer een lichtstraal een transparant object raakt. Doorgelaten en gereflecteerde lichtstralen worden, op basis van hun berekende hoek en intensiteit, verder door het object heen gevolgd totdat ze uittreden. De ray-tracing methode is dus een zeer realistische nabootsing van de werkelijkheid. Het meenemen van onderlinge invloeden van objecten, vaak ingewikkeld bij niet op ray-tracing

gebaseerde lichtberekeningsmodellen, gaat vanzelf. Dit maakt Raypro bijzonder geschikt voor het berekenen van de lichttransmissie van o.a. kasdekken of kasdekmaterialen, dit voor zowel direct als diffuus licht.

In Figuur 3 is een driedimensionaal overzicht van de kasconstructie gegeven waarmee de transmissie van het kasdek berekend is. Het resultaat van de transmissieberekening is een transmissietabel waar de directe transmissie afhankelijk van de azimut en elevatie van de zon is weergegeven.



Figuur 3. Overzicht van de kasconstructiedelen die voor de transmissieberekening van het kasdek zijn gebruikt.

2.1.4 Lichtopbrengst van enkellaags Anti-reflectie-glas in de praktijk

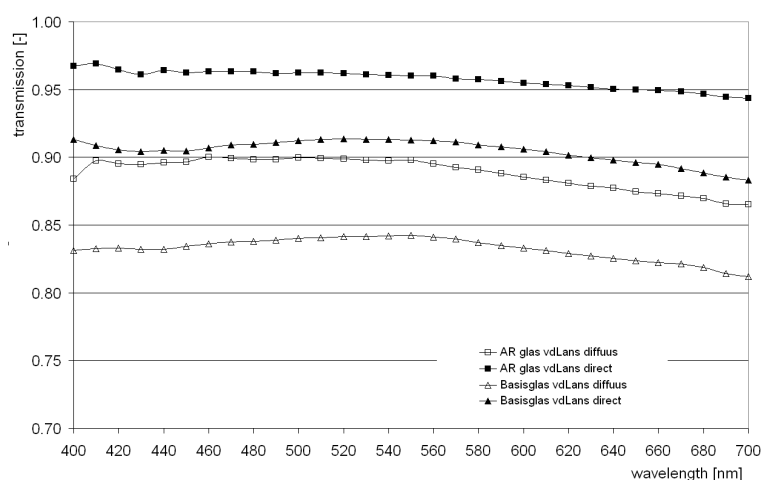


Figuur 4. Foto's van de met Anti-reflectie-glas gedekte kas bij van der Lans, Rilland.

Bedrijf en kasdekmateriaal

Er zijn vergelijkende metingen van de lichtopbrengst van enkel Anti-reflectie-glas in de praktijk bij van der Lans, tomatenteler, op de locatie Rilland uitgevoerd. In een in 2006 nieuwgebouwde kas van 1.6ha. (Figuur 4) zijn twee vakken van 9.60 m breedte (dubbele kap van 4.80m breed) en 5 m lengte (kolomafstand) uitgerust met gewoon glas (Basisglas 2, SC06A1-3, zie 2.1.1). De kas heeft een poothoogte van 6.60m. De rest van de kas is uitgerust met Anti-reflectie-glas (Basisglas 2 + AR-glas. SC06B1-3, zie 2.1.1). Alle constructiedelen zijn wit gecoat, op de bodem ligt een witte afdekfolie. In het dak zijn geen luchtramen, de glasruiten zijn 1,25m breed.

Het glas materiaal zoals geleverd voor de kas bij van der Lans is eerst onderzocht in het laboratorium. De volgende optische eigenschappen werden vastgesteld. De transmissie voor direct opvallend licht van het basisglas was 90.3%, met een AR-coating erop nam de directe transmissie toe tot 95.8%. De transmissie voor diffuus invallend licht was 83.2% voor het basismateriaal, met een AR-coating erop steeg de diffuse transmissie naar 88.9% (meetwaarden volgens NEN 2675).



Figuur 5. Optische eigenschappen van de glazen zoals geleverd voor de kas bij van der Lans.

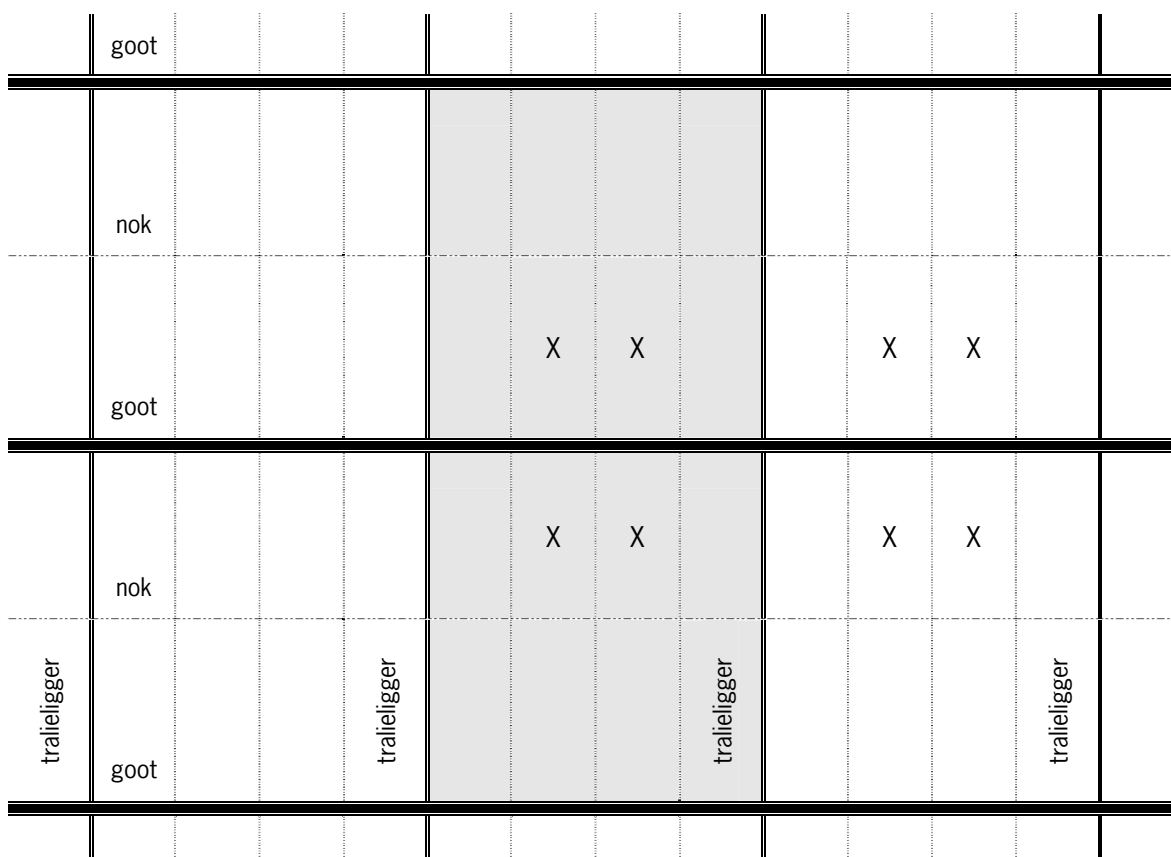
Lichtmetingen kasdekmateriaal

In de boven beschreven praktijkkas werden gekalibreerde PAR Lite sensoren van de firma Kipp & Zonen b.v. permanent voor de in de periodes 10 maart 2006 tot en met 25 april en 16 mei tot en met 13 juni 2006 geïnstalleerd. De PAR Lite sensoren meten de voor de planten relevante straling in het gebied van 400-700nm in $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. In de dakruimte boven de tralie van de kas zijn dicht bij het glas aan beide kanten van het dak in totaal 8 sensoren geïnstalleerd, welke de straling permanent meten en opsturen naar een datalogger. Deze slaat de waarden alle 20 seconden op zodat er 4320 meetpunten per dag per sensor worden verzameld. De sensoren zijn onder de twee middelste ruiten van het vak in het midden van de ruit horizontaal onder het glas geplaatst, twee sensoren aan de Noordkant en twee sensoren aan de Zuidkant. Dit zowel gedaan in een vak met gewoon glas als ook in een vak met AR-glas. In totaal zijn er 8 sensoren permanent in de kas geïnstalleerd. 1 sensor is ter bepaling van de transmissie van de glazen buiten op de nok geplaatst.

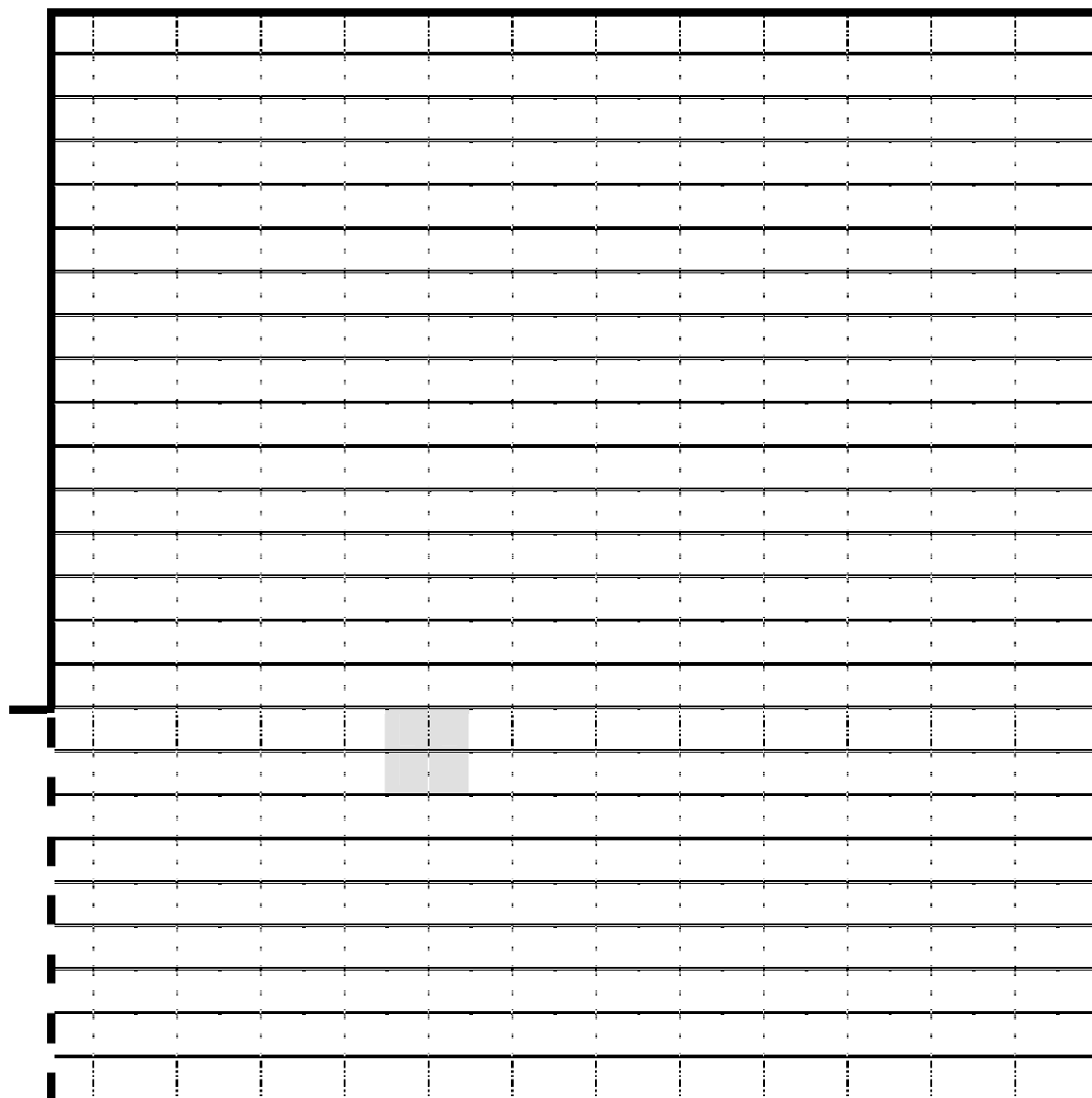
Met behulp van deze meetopstelling konden vergelijkende metingen van de lichtopbrengst van enkel Anti-reflectie-glas met gewoon tuinbouwglas in de praktijk worden vastgesteld. Op deze manier worden alleen verschillen tussen de materialen vastgesteld zonder rekening te houden met de kasconstructie.



Figuur 6. Foto van de meetopstelling in het dak in de kas bij van der Lans. Hier meetopstelling in vak gedekt met gewoon glas, twee sensoren horizontaal onder de middelste ruiten aan de Noordkant en twee aan de Zuidkant.



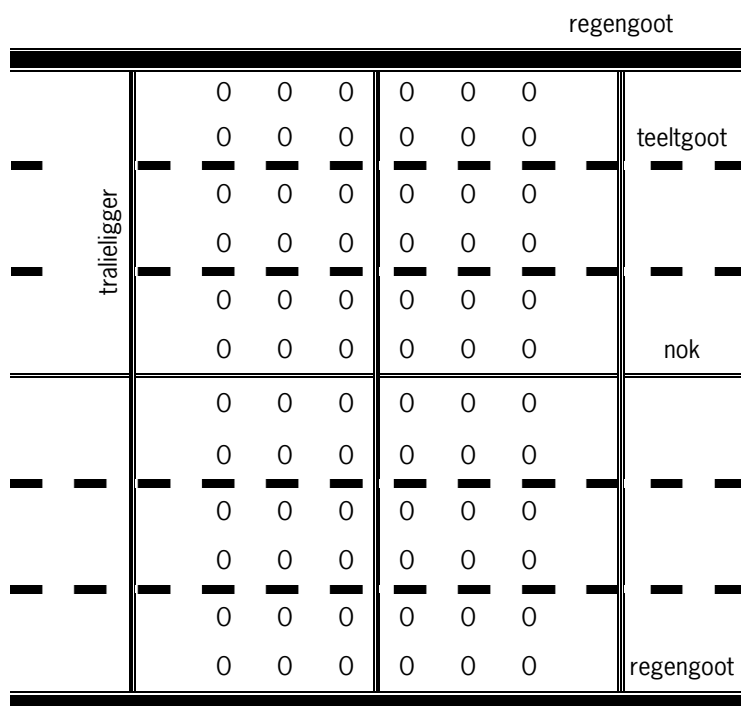
Figuur 7. Schematische weergave van de meetplaatsen (X) in de kas; het niet gekleurde deel is AR glas en het grijze deel is standaard glas.



Figuur 8. Plaats van het standaardglas in het kascomplex.

Lichtmetingen gehele kasconstructie

Om de transmissie van de gehele kas gedekt met AR-glas te bepalen en zo ook het invloed van de moderne kasconstructie mee te nemen, zijn op een bewolkte dag transmissie metingen in een grid van de kas uitgevoerd. Op 17 maart en 31 maart 2006 zijn op twee bewolkte dagen diffuse lichtmetingen uitgevoerd. In Figuur 9 is een overzicht gegeven van de meetpunten waar een (spot)meting is uitgevoerd. Het gemiddelde van de ratio tussen de straling zoals deze binnen is gemeten en de straling zoals die buiten is gemeten, is de transmissie van de kas. Dat is de totale transmissie van het kasdek materiaal inclusief de constructie. De metingen zijn uitgevoerd met TFDL-lichtsensoren, welke de straling van 400-700nm meten.



Figuur 9. Grid voor de bepaling van de lichttransmissie van de kas bij van der Lans, 0 = meetpunt.

2.2 Condensatiegedrag van verschillende uitvoeringen Anti-reflectie-glas

2.2.1 Condensmeetapparatuur

Er waren indicaties dat het condensatiegedrag van Anti-reflectie-glas beter is dan van traditioneel glas. Eerste laboratorium proeven tijdens het vooronderzoek 'Microstructuur glas' lieten zien, dat condensatiedruppels op Anti-reflectie-glas sneller afvloeien en zo de lichttransmissie stijgt ten opzichte van gewoon glas.

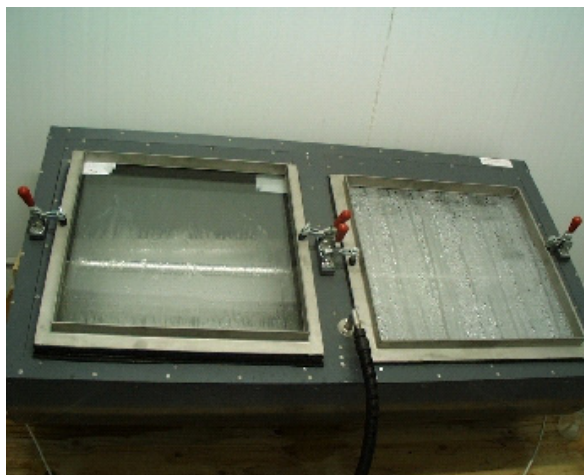
In het laboratorium is nader onderzoek verricht naar de eigenschappen van huidige en verbeterde materialen van het Anti-reflectie-glas ten opzichte van traditioneel tuinbouwglas. In het laboratoriumonderzoek werd het afvloeien van condens en de kwaliteit van de druppelvorming onderzocht. Er zijn 6 verschillende glasmonsters gebruikt waarvan twee ongecoat (enkel en dubbel) en vier gecoat (drie enkel en één dubbel). De codering van de monsters is in Tabel 2 aangegeven.

Tabel 2. Overzicht glasmonsters voor onderzoek naar het condensatiegedrag in het laboratorium.

Product	GT code
Standaard glas	PLA01Z
Sunarc, Basisglas 2	SC06A
Sunarc, Basisglas 2 dubbel	SC06A4
Sunarc, Basisglas 2 + AR coating	SC06B
Sunarc, Basisglas 2 + AR coating dubbel	SC06B4
CentroSolar Basisglas 3 + AR coating	CS06B
CentroSolar, Basisglas 4 + AR coating	CS06A

Kwaliteit condensaat

Om condensatie gedrag op grote oppervlaktes te bestuderen is er een condensatie meetapparaat (Figuur 10) ontworpen. De apparatuur is voorzien van een stoom toevoerpijp in het midden, twee pompen om afvallend water af te voeren en ten slotte twee afvoerkanalen onder twee identieke ramen om afglijdend water af te voeren. De metingen kunnen onder ieder willekeurig hoek tussen 0° en 45° uitgevoerd worden. De glas monsters van 0.5m x 0.5m kunnen in de twee raamopeningen zodanig bevestigd worden dat er geen vocht meer kan ontsnappen.



Figuur 10. Overzicht meetopstelling voor condensatiegedrag.

Via de stoom toevoerpijp in het midden van het apparaat wordt stoom gelijkmatig onder de glasplaten verdeeld. De glasplaten staan onder een hoek van 23°. De metingen zijn in een klimaatcel uitgevoerd waarin de buitentemperatuur constant op 10°C wordt gehouden. Het afgevoerde water wordt in maatbekers opgevangen en om de 15 minuten wordt het volume van water genoteerd. Metingen van het condensatiegedrag van een proefmonster worden altijd uitgevoerd in vergelijking met het standaard glas (PLA01Z).

Lichttransmissie condensaat

Daarnaast werd de invloed van het watercondens op de lichttransmissie onderzocht. Hiervoor werd water op de monsters gespoten, er ontstaat dan afhankelijk van de eigenschappen van het oppervlak een waterfilm of er ontstaan waterdruppels. Op de Ulbricht-kogel (Figuur 2) werd de lichttransmissie in droge en natte toestand gemeten onder verschillende hoeken.

2.2.2 Condensatiegedrag van enkellaags Anti-reflectie-glas in de praktijk

Het condensatiegedrag werd ook in de praktijk bij van der Lans waargenomen. Tijdens de periode van 9 maart 2006 tot 28 juni 2006 werden in de ochtenduren foto's genomen om het condensatiegedrag vast te leggen. Deze geven dan een kwalitatief beeld van de verschillen tussen gewoon glas en Anti-reflectie-glas in de praktijk.

2.3 Energiebesparing en effecten op het klimaat bij toepassing van Anti-reflectie-glas

Omdat licht een belangrijke energiebron is, zal bij een hogere transmissie van het Anti-reflectie-glas een ander klimaat ontstaan. Aan de andere kant biedt het toepassen van dubbel Anti-reflectie-glas de mogelijkheid om een zeer hoge lichttransmissie te combineren met een hoog energiebesparend effect. Na berekening van de lichttransmissie van de kas met behulp van het model zoals beschreven in 2.1.3 kunnen na invoer van de transmissietabel in het kasklimaatmodel KASPRO de effecten van de verschillende kasdekken op het klimaat, energiegebruik en gewasproductie bepaald worden.

2.3.1 Klimaatmodel 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 de tijd. Dit maakt berekening van de energiestromen en gewasproductie mogelijk.

De basis van het model wordt gevormd door de energie-, water- en CO₂-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 CO₂-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 onder andere het volgende doen:

- De stand van de mengklep van de warmwatertoevoer wordt aangepast, ten einde de temperatuur van de verwarmingsbuizen en daarmee de kaslucht 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 en vocht tussen de kas- en buitenlucht.
- De CO₂-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, warmtekrachtinstallatie en evt. warmtepomp, warmteopslagtank etc.) en de CO₂-productie van de ketel. De regelactiviteiten hebben direct of indirect invloed op het brandstofverbruik. Dit is duidelijk het geval bij verhoging van de buistemperatuur, waarbij een faseverschuiving mogelijk is tussen het moment van opwekking (en dus brandstofgebruik) en het gebruik van de warmte. De warmte wordt dan tijdelijk 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 CO₂-gift veroorzaakt een brandstofverbruik indien CO₂ 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 afkoelings eigenschappen, 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 meer lagen model overeenkomstig de uitgangspunten gepresenteerd door Yoo en Pak (1993). Naast de kasklimaatregelaar zijn de kasluchtomstandigheden ook afhankelijk van de warmte, vocht en CO₂-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 CO₂-concentratie hebben een directe invloed op de primaire toestandvariabelen 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 CO₂-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 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 vergelijkingen en eveneens gepresenteerd door Bot. De ventilatiestromen, in tuinbouwkundige context, zijn gebaseerd op natuurlijke ventilatie en worden 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 warmtegeleidingtheorie.

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 de tijdsduur per integratiestap vaak niet meer dan 15 sec bedraagt. Wanneer het buitenklimaat en de activiteiten van de klimaatregelaar 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 200m² 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 met betrekking tot ramen en de CO₂-gift toonden een goede gelijkheid. (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).

Met het KASRPO model wordt het kasklimaat van een tomatenteelt berekend. De bedrijfsuitrusting en de setpoints zijn beschreven in Bijlage I.

2.4 Effecten op de gewasproductie bij toepassing van Anti-reflectie-glas

Anti-reflectie-glas heeft een hogere lichttransmissie en naar verwachting een hogere lichttransmissie op bepaalde tijdstippen van de dag (ochtend, door betere lichttransmissie onder kleinere invalshoeken en beter condensatiegedrag). Wat het effect van enkellaags Anti-reflectie-glas en dubbellaags Anti-reflectie-glas op een tomatengewas zal zijn wordt met behulp van het gewasgroeimodel INTKAM onderzocht. Ook het effect van meer ochtendlicht op een tomatengewas wordt geanalyseerd. De berekeningen zijn gedaan voor een traditionele kas

2.4.1 Gewasgroeimodel INTKAM

De modelsimulaties zijn uitgevoerd met het INTKAM-gewasgroeimodel van Plant Research International (Marcelis *et al.*, 2000), dat is gebaseerd op het HORTSIM model (Gijzen *et al.*, 1998). De lichtdoordringing en onderschepping in het gewas is gebaseerd op het model van Spitters (1986) en de theorie van Goudriaan (1988). Het model berekent de fotosynthesesnelheid op basis van gedetailleerde biochemische vergelijkingen (Farquhar *et al.*, 1980)

die rekening houden met de effecten van straling, temperatuur, CO₂-concentratie en het dampdrukdeficiet van de atmosfeer. De assimilaten die door fotosynthese zijn verkregen worden op basis van relatieve sinksterktes van de plantorganen verdeeld, waardoor de groeisnelheden van de plantorganen berekend kan worden. De toename van het bladoppervlak wordt berekend uit de gewichtstoename van het blad en het potentiële specifieke bladoppervlak (SLA, m² g⁻¹). De verdamping wordt berekend met behulp van de Penman-Monteith vergelijkingen en maakt gebruik van een model voor stomataire geleidbaarheid zoals beschreven door Nederhoff en De Graaff (1993). Op verschillende niveaus in het gewas wordt de hoeveelheid onderschepte straling berekend. De fotosynthese en verdamping op gewasniveau wordt verkregen door de snelheden op de verschillende gewasdiepten te integreren. De gewasontwikkeling wordt dagelijks berekend via de temperatuurafhankelijke ontwikkeling van internodiën. Modelberekeningen worden uitgevoerd voor een tomatengewas, plantdatum is 10 december (dag 344), de teelt eindigt op 20 november een jaar later (dag 324). De teeltduur bedraagt 346 dagen.

3. Resultaten

3.1 Optische eigenschappen van verschillende uitvoeringen van Anti-reflectie-glas

Twee leveranciers (Sunarc en CentroSolar) hebben verschillende monsters gemaakt zonder en met een anti-reflectie-coating erop. Als basismaterialen werd Pools glas (90+ glas, ijzerarm), Duits gewoon glas en Duits witglas (ijzerarm) gebruikt. Deze basismaterialen werden door de twee leveranciers van een anti-reflectie-coating voorzien. Elke leverancier heeft inmiddels een speciale coating voor tuinbouwglas ontwikkeld. De vorm van de coatings is aangepast en bij één leverancier verbeterd (ten opzichte van een aantal jaren geleden (zie: 'Microstructuur glas'). Bij de ontwikkeling was het belangrijk om de lichttransmissie in het gebied van 400-700nm te verhogen. Alle meetwaarden worden vergeleken met standaard tuinbouwglas (PLAOZ).

Van de geleverde enkellaagse proefmonsters is door een glasfabriek (Stolker b.v. in Ede) dubbel glas geproduceerd. Het dubbel glas bestaat uit twee ruiten met dezelfde optische eigenschappen. Het glas is gelijmd met een spouwafstand van 12mm.

Een overzicht van de proefmonsters is gegeven in Tabel 1. Een overzicht over de meetresultaten van de optische eigenschappen van de proefmonsters wordt weergegeven in Tabel 3.

Het valt op dat de gebruikte basismaterialen verschillen in lichttransmissie. De glazen bevatten mede afhankelijk van hun herkomst min of meer ijzer. Dat heeft invloed op de lichttransmissie (400-700nm) en de doorlatendheid voor UVB (300-320nm). Standard tuinbouwglas heeft een lichttransmissie van 89-90% bij loodrecht, direct lichtinval en een transmissie van 82-83% bij diffuus lichtinval. UVB-straling wordt nagenoeg niet doorgelaten. Basisglas 3 is hiermee vergelijkbaar. Zodra het glas iets minder ijzer bevat, zoals dit vaak bij Oost-Europese glasproducties het geval is, stijgt de lichttransmissie, er wordt dan ook van 90+ glas gesproken. Een voorbeeld hiervoor is het basismateriaal 2. Als het glas nog nauwelijks ijzer bevat, verandert de kleur van het glas zichtbaar van groen naar wit, er wordt dan ook van witglas (merknaam bv. 'Diamantglas') gesproken. Een voorbeeld hiervoor is het basismateriaal 4. De transmissie voor loodrecht invallend licht is 91%, voor diffuus invallend licht is dat 84%.

De diffuse reflectie van glas ligt rond de 12%. Door een anti-reflectie-coating wordt de reflectie gereduceerd op 6-7%. Door de reductie van de reflectie wordt de lichttransmissie van glazen met een anti-reflectie-coating verhoogd. Deze ligt bij glazen van Sunarc bij 97.2% loodrecht en 90.6% voor diffuus invallend licht. Het gaat hierbij om licht ijzerarm glas. Door de anti-reflectie-coating van Sunarc stijgt de lichttransmissie voor direct en diffuus invallend licht van het basisglas met rond **7.5%**.

De anti-reflectie-coating van CentroSolar verhoogd de lichttransmissie van het basismateriaal van 89.7% naar 94.1% in het geval van gewoon glas en van 91.4% naar 96% in het geval van witglas. Door de anti-reflectie-coating van CentroSolar stijgt de lichttransmissie van het basisglas met rond **4.5% voor direct invallend licht**. Voor diffuus invallend licht is deze toename gunstiger. Deze stijgt van 82.4% naar 89.3% en van 84.4% naar 91.1%. De gemiddelde toename bedraagt dus rond **6.8% voor diffuus invallend licht**.

Deze verschillen zijn ook te zien in het spectrum van de glazen (Figuur 11 en Figuur 12). De coating van Sunarc verhoogd de lichttransmissie precies in het PAR-gebied van 400-700nm. De coating van CentroSolar is in dat gebied iets minder effectief.

Door de sterk verhoogde lichttransmissie is het nu ook mogelijk om dubbel isolerend glas van twee ruiten Anti-reflectie-coating te produceren. Terwijl de lichttransmissie van een dubbele uitvoering van het basismateriaal 2, zonder coating, maar een transmissie van 82.9% bij direct invallend licht heeft en zelfs maar 73.2% voor diffuus invallend licht, heeft hetzelfde glas met een vierzijdige coating een transmissie van 94.3% direct en 83.6% diffuus. Ook de lichttransmissie van de basismaterialen 3 en 4 in dubbele uitvoering is te gering om deze toe te passen voor een kas voor de vruchtgroentenproductie. Maar ook deze glazen zijn geschikt als ze van een vierzijdige anti-reflectie-coating worden voorzien. In dit geval stijgt de transmissie voor direct invallend licht naar 89.6% voor basismateriaal 3 en 92.9% voor basismateriaal 4. Net als bij de enkellaagse glazen van CentroSolar is vooral de transmissie voor diffuus invallend licht verhoogd. Deze bedraagt 82,2% voor basismateriaal 3 en 86% voor basismateriaal 4 in dubbele uitvoering en vierzijdige coating. Dat betekent dat een dubbel, isolerend glas met anti-reflectie-coating

zowel voor direct als voor diffuus invallend licht een hogere transmissie heeft als het huidige standaard tuinbouw glas en zelfs een hogere transmissie dan het vaak in kassen gebruikte 90+ glas.

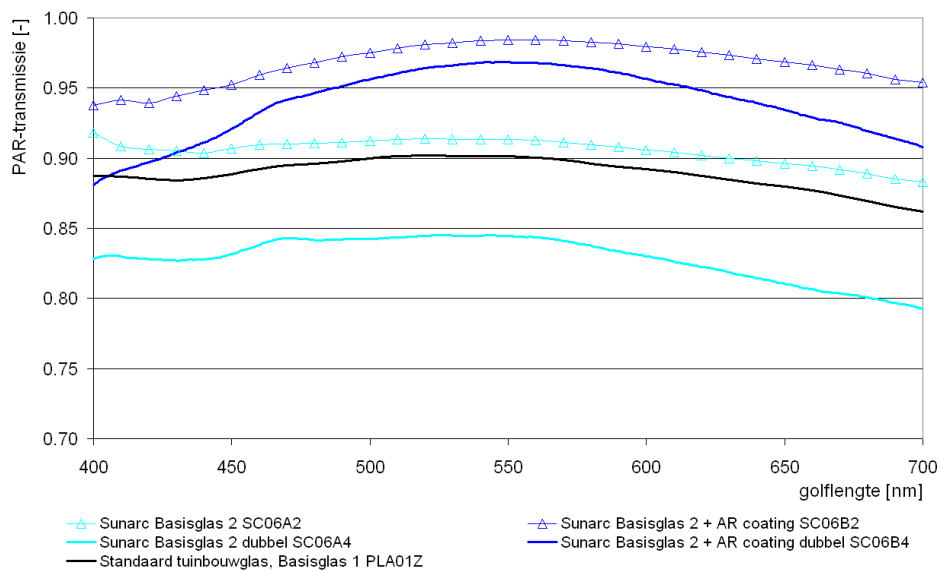
Deze resultaten geven een goed perspectief voor het gebruik van isolerend anti-reflectie-coating glas in de tuinbouw in de toekomst. Ze hebben een hogere lichttransmissie dan alle huidige dubbele materialen en een reële prijs.

Niet allen de totale lichttransmissie van AR glas is hoger dan standaard tuinbouw glas, maar ook de transmissie onder kleine invalshoeken (Figuur 13). Een hogere transmissie van AR glas onder kleine invalshoeken veroorzaakt de hogere transmissie voor diffuus invallend licht, omdat diffuus licht is samengesteld uit licht van alle invalshoeken. Welk invloed dit heeft op de totale lichtsom in de kas, wordt in hoofdstuk 3.1.1 nader onderzocht.

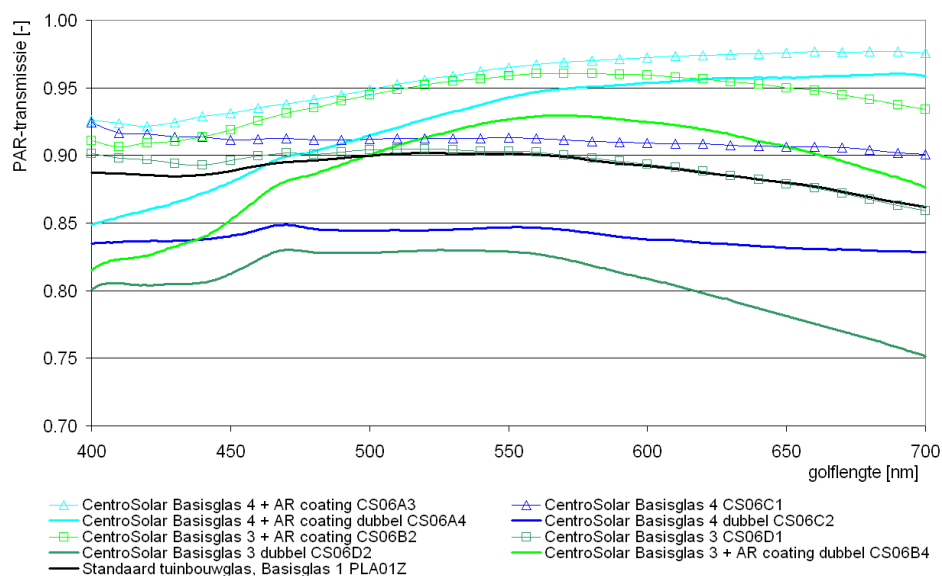
Onderzocht is ook een mogelijke verandering van de spectrale transmissie van de glazen onder verschillende invalshoeken. De spectrale eigenschappen zijn samenvattend weergegeven in Tabel 4. De spectrale eigenschappen veranderen nauwelijks. Alleen onder zeer grote invalshoeken (schuin op het glas) neemt relatief de hoeveelheid blauw licht (400-500nm) toe, zodat de blauw:rood verhouding stijgt. De verandering is echter uiterst gering.

Tabel 3. *Overzicht optische eigenschappen onderzochte glazen; gemiddelden over het PAR-gebied 400-700nm (NEN-2675).*

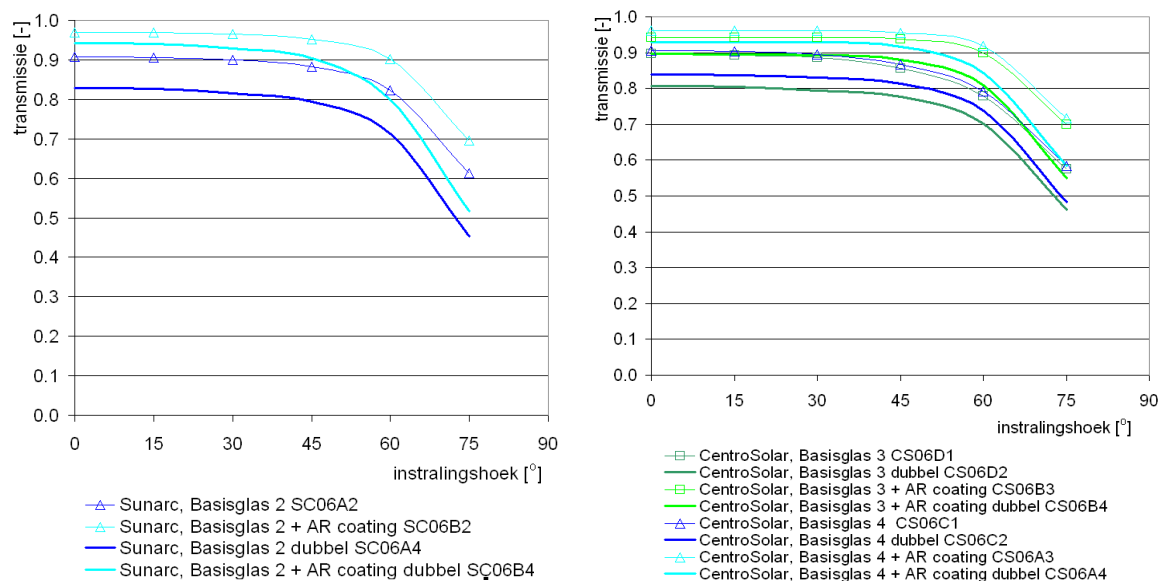
		Product													
		Standaard tuinbouwglas, Basisglas 1 (PLA01Z)	Sunarc Basisglas 2 (SC06A)	Sunarc Basisglas 2 + AR coating (SC06B)	Sunarc Basisglas 2 dubbel (SC06A4)	Sunarc Basisglas 2 + AR coating dubbel (SC06B4)	CentroSolar, Basisglas 3 (CS06D1)	CentroSolar, Basisglas 3+ AR (CS06B)	CentroSolar, Basisglas 3 dubbel (CS06D2)	CentroSolar Basisglas 3+ AR dubbel (CS06B4)	CentroSolar, Basisglas 4 (CS06C1)	CentroSolar, Basisglas 4 + AR (CS06A)	CentroSolar, Basisglas 4 dubbel (CS06C2)	CentroSolar, Basisglas 4 + AR dubbel (CS06A4)	
Grote Kogel	Reflectie diffuus	0,124	0,120	0,056	0,156	0,074	0,121	0,061	0,158	0,067	0,123	0,064	0,169	0,072	
	Transmissie diffuus	0,822	0,832	0,906	0,732	0,836	0,824	0,893	0,716	0,822	0,844	0,911	0,751	0,860	
	Transmissie direct	0,890	0,903	0,970			0,893	0,942			0,910	0,959			
PAR-transmissie gemeten met Kleine Kogel	Direct	0,897	0,907	0,972	0,829	0,942	0,897	0,941	0,808	0,897	0,914	0,960	0,840	0,929	
	15 °	0,893	0,907	0,972	0,827	0,940	0,893	0,942	0,805	0,896	0,923	0,961	0,838	0,930	
	30 °	0,886	0,900	0,967	0,816	0,929	0,886	0,940	0,794	0,893	0,924	0,960	0,830	0,930	
	45 °	0,857	0,884	0,951	0,793	0,903	0,857	0,935	0,776	0,880	0,918	0,954	0,814	0,917	
	60 °	0,780	0,822	0,899	0,713	0,800	0,780	0,895	0,702	0,809	0,874	0,914	0,738	0,843	
	75 °	0,575	0,608	0,695	0,454	0,517	0,575	0,693	0,462	0,549	0,664	0,710	0,482	0,584	



Figuur 11. Spectrale transmissie van de Sunarc proefmonsters.



Figuur 12. Spectrale transmissie van de CentroSolar proefmonsters.



Figuur 13. Hoekafhankelijke transmissie van de onderzochte proefmonsters (links Sunarc, rechts CentroSolar).

Tabel 4. Samenvatting van de spectrale transmissie voor verschillende golflengtes van gewoon glas (basisglas 2) en anti-reflectie-glas (basisglas 2 + AR).

			Invalshoek straling op glas					
			0	15	30	45	60	75
Basisglas 2 (Pools glas)	PAR	400-700nm	90,8	90,7	90,0	88,3	82,2	61,0
	UV	300-400nm	62,2	62,2	61,2	58,7	53,2	37,6
	B	400-500nm	91,2	91,0	90,3	88,6	82,4	60,9
	R	600-700nm	89,9	89,7	89,1	87,2	81,0	59,5
	FR	700-800nm	87,8	87,6	87,0	85,1	79,0	57,7
	R:FR		1,02	1,02	1,02	1,02	1,03	1,03
	B:R		1,01	1,02	1,01	1,02	1,02	1,02
AR glas (Pools glas + anti-reflectie-coating)	PAR	400-700nm	97,2	97,2	96,7	95,1	89,9	69,5
	UV	300-400nm	63,9	64,1	64,0	62,8	59,0	45,6
	B	400-500nm	96,3	96,6	96,5	95,4	90,8	71,4
	R	600-700nm	96,7	96,6	95,6	93,3	87,1	66,2
	FR	700-800nm	93,8	93,7	92,5	90,0	83,6	63,0
	R:FR		1,03	1,03	1,03	1,04	1,04	1,05
	B:R		1,00	1,00	1,01	1,02	1,04	1,08

3.1.1 Lichttransmissie kasdek

De transmissie van het kasdek is met behulp van het ray-tracing programma RAYPRO bepaald. Als uitgangspunten voor de berekening zijn de in Tabel 5 weergegeven afmetingen van de kasconstructiedelen gebruikt. In combinatie met de in Tabel 6 gegeven reflectie en transmissie is voor de 4 materiaalcombinaties de transmissietabel, voor direct licht, van de kapconstructie tot en met de tralieligger bepaald. Constructiedelen en kasuitrusting die daarnaast nog in de kas aanwezig zijn als scherminstallatie, gewasdraden, verwarmingsbuizen (bovennet of hijsverwarming) enz. enz. worden in de modelberekeningen meegenomen. Er zijn verschillende configuraties van het kasdek onderzocht. Zo is gekeken wat het invloed is van de zonnestand, de dakhelling en de kasoriëntatie. De voor een anti-reflectie-glas beste configuratie kan zo gekozen worden.

Tabel 5. Afmetingen van de kasconstructiedelen gebruikt voor de berekening van de transmissie van het kasdek.

Onderdeel	maat [m]
Kapbreedte	4,8
Dakhelling	22
Vakmaat	5
Diffuse reflectie van constructiedelen	0,8
Breedte van de nokroede	0,036
Hoogte van de nokroede	0,027
Aantal dwarsroeden per vak	4
Breedte dwarsroede	0,024
Hoogte dwarsroede	0,038
Breedte van de goot aan de bovenzijde	0,100
Breedte van de goot aan de onderzijde	0,066
Hoogte van de tralieligger	0,640
Breedte van de tralieligger	0,050
Hoogte van de onderste ligger van de tralieligger	0,025
Hoogte van de bovenste ligger van de tralieligger	0,017
Aantal spijlen in de tralieligger	20
Breedte van de poot	0,06
Dikte van de poot	0,12
Hoogte van de poot	0,70

Tabel 6. Transmissie direct en reflectie van enkel- en dubbellaags tuinbouwglas en AR glas.

Materiaal	Reflectie		Transmissie					
	diffuus	diffuus	direct	15 °	30 °	45 °	60 °	75 °
Tuinbouwglas 90 +	0,120	0,832	0,907	0,907	0,900	0,884	0,822	0,608
Tuinbouwglas 90 + dubbel	0,156	0,732	0,829	0,827	0,816	0,793	0,713	0,454
AR glas	0,056	0,906	0,972	0,972	0,967	0,951	0,899	0,695
AR glas dubbel	0,074	0,836	0,942	0,940	0,929	0,903	0,800	0,517

Tabel 7. Diffuse transmissie van enkel- en dubbellaags tuinbouwglas en AR glas.

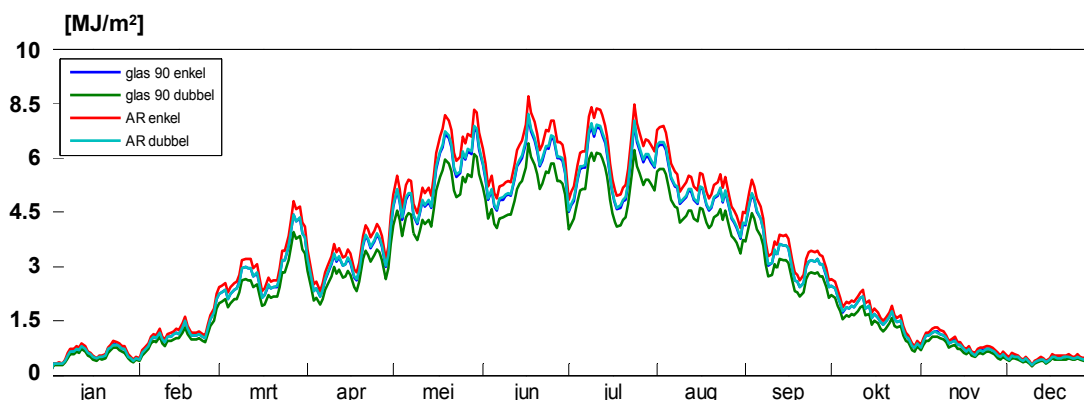
	Tuinbouwglas 90 + enkel	Tuinbouwglas 90 + dubbel	AR enkel	AR dubbel
Diffuse transmissie [%]	0,778	0,695	0,839	0,784

Invloed van zonnestand en invalshoek op het glas

AR-glas heeft een hogere lichttransmissie dan tuinbouwglas 90+ voor direct en diffuus invallend licht (Tabel 6 en Tabel 7). Daarnaast heeft AR glas een hogere lichttransmissie bij kleine invalshoeken van het licht en dus bij lage zonnestanden in de ochtend en de winter. Deze materiaaleigenschappen bepalen samen met de zonnestand (azimut en elevatie) en de bijhorende stralingsintensiteit de lichtsom in een kas in Nederland.

De totale performance van een Venlo-kas met Noord-Zuid opstelling met enkellaags en dubbellaags AR glas vergeleken met enkellaags en dubbellaags tuinbouwglas 90+ wordt weergegeven in Figuur 14. Hierin is de dagsom van de PAR-energie, weergegeven als een voortschrijdend gemiddelde over 7 dagen. Uit deze figuur blijkt dat enkellaags AR glas de hoogste lichtopbrengst geeft. AR glas in een dubbellaagse uitvoering geeft een vrijwel gelijke lichtsom als

het tuinbouwglas 90+ in een enkellaagse uitvoering. Zoals te verwachten is de lichtsom onder dubbel tuinbouwglas 90+ het laagst.



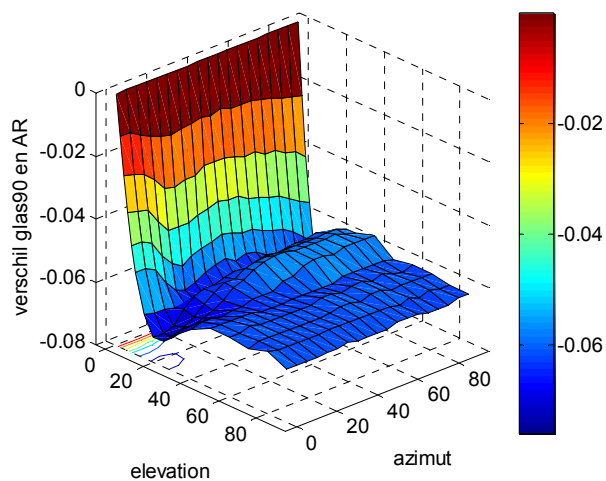
Figuur 14. Dagsom van de PAR-energie, weergegeven als een voortschrijdend gemiddelde over 7 dagen.

Om de invloed van een hogere lichttransmissie van AR glas bij kleine invalshoeken van het licht en dus bij lage zonnestanden in de ochtend en de winter nader te onderzoeken wordt in Figuur 15 de lichttransmissie van tuinbouwglas 90+ en AR glas bij alle voorkomende elevaties en azimuths weergegeven. In Figuur 15 is het verschil in transmissie tussen beide materialen weergegeven. Uit deze figuur kan worden opgemaakt dat er bij kleine elevatiehoeken (ca. 10° á 15°) een verschil tot ca. 7% in directe transmissie ontstaat. Bij grotere elevaties van de zon stabiliseert zich dit enigszins op ca. 6% winst voor het AR-glas ten opzichte van het tuinbouwglas 90+.

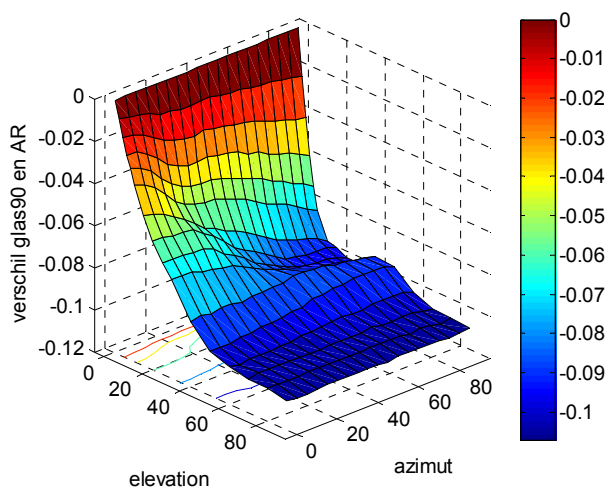
Ook voor de twee dubbelglas varianten is het verschil in directe transmissie weergegeven, Figuur 16. Hieruit blijkt dat het dubbel AR-glas altijd beter presteert dan het dubbel glas 90+. Wel is de verbetering in transmissie geleidelijker dan bij de twee enkel glas varianten zoals in Figuur 15 weergegeven. De verbetering stabiliseert pas bij elevaties van boven de ca. 50°. Dat de zon een elevatie van meer dan 50° bereikt komt slechts een beperkt aantal uren in het jaar voor in de periode eind april eind augustus rond de middag uren. In het algemeen kan worden gesteld dat de invloed van de azimuth is veel beperkter dan de elevatie.

Voor de groei van het gewas is uiteindelijk de hoeveelheid licht die op het gewas valt van belang. Om hier inzicht in te verkrijgen is in Figuur 17 de lichtsom in het PAR gebied afhankelijk van de elevatie voor het AR-glas en het tuinbouwglas 90+ opgenomen. Uit Figuur 17 blijkt dat de kas met AR-glas over de hele lijn meer licht doorlaat. De toename bij het AR-glas is bij kleine elevaties fractioneel hoger dan bij de grotere elevaties, maar bedraagt over de hele lijn ca. 8%. De in Figuur 17 weergegeven lichtsom is het totaal van direct en diffuus licht.

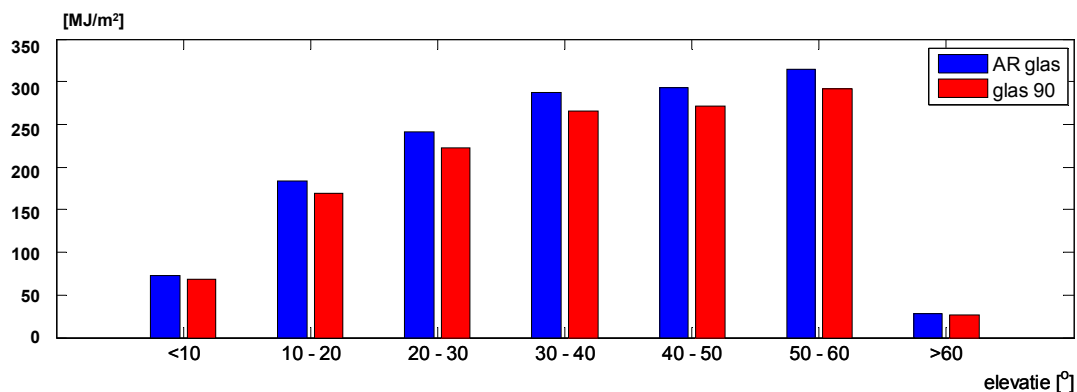
In Figuur 18 is een verdere uitsplitsing gemaakt naar een directe en diffuse stralingssom voor het PAR-licht in de situatie met een enkel dek. Deze figuur maakt duidelijk dat er meer diffuus dan direct licht invalt. Dat is ook logisch, omdat op jaarbasis van de totale lichtsom ca. 1/3 direct en 2/3 diffuus licht is. Omdat de transmissie van een kasdek met AR glas een hogere diffuse transmissie heeft dan met tuinbouwglas 90+ is de lichtsom op gewasniveau hoger. Erbij komt dat meer licht de kas binnenkomt door een hogere transmissie van AR glas voor directe straling onder kleine elevaties, dit effect is echter naar verhouding kleiner, zoals hierna zal worden uitgelegd



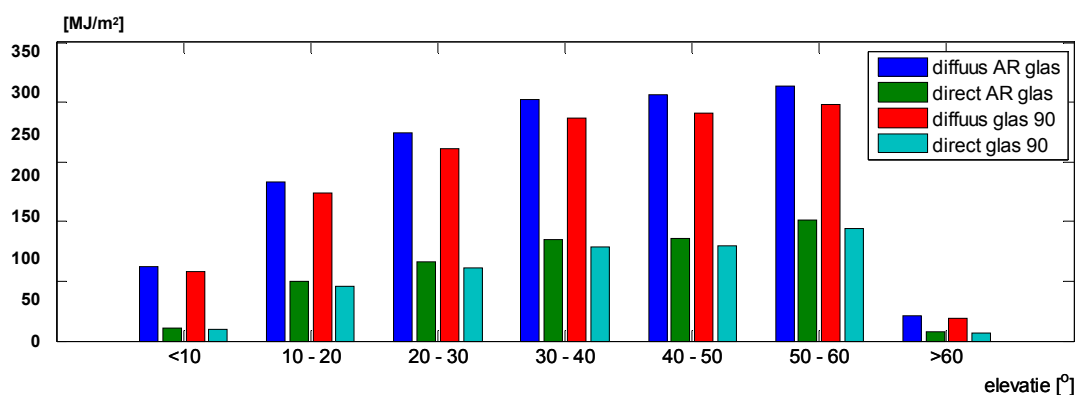
Figuur 15. Verschil in transmissie van het kasdek tussen tuinbouwglas 90+ en AR glas onder verschillende azimut en elevatie van de zon.



Figuur 16. Verschil in transmissie van het kasdek tussen dubbel tuinbouwglas 90+ en dubbel AR glas onder verschillende azimut en elevatie van de zon.



Figuur 17. PAR lichtsom onder tuinbouwglas 90+ en AR glas op jaarbasis afhankelijk van de elevatie van de zon.

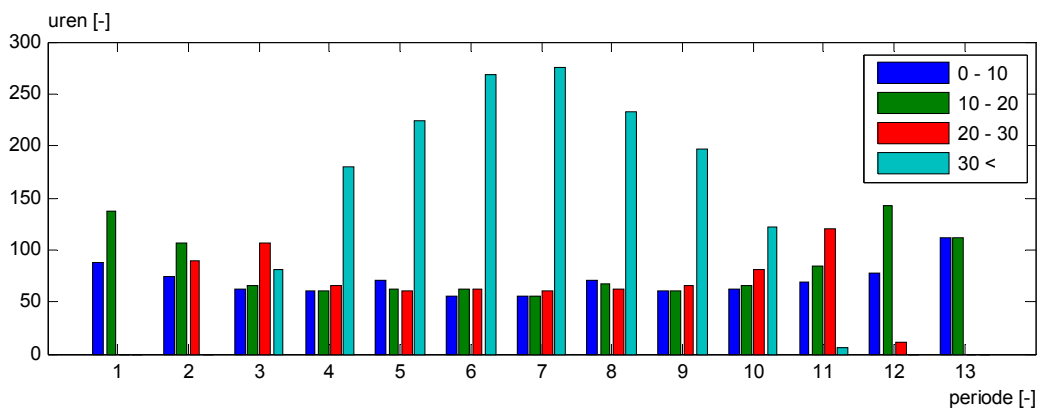


Figuur 18. PAR lichtsom onder tuinbouwglas 90+ en AR glas op jaarbasis uitgesplitst naar direct en diffuus licht voor verschillende elevaties van de zon.

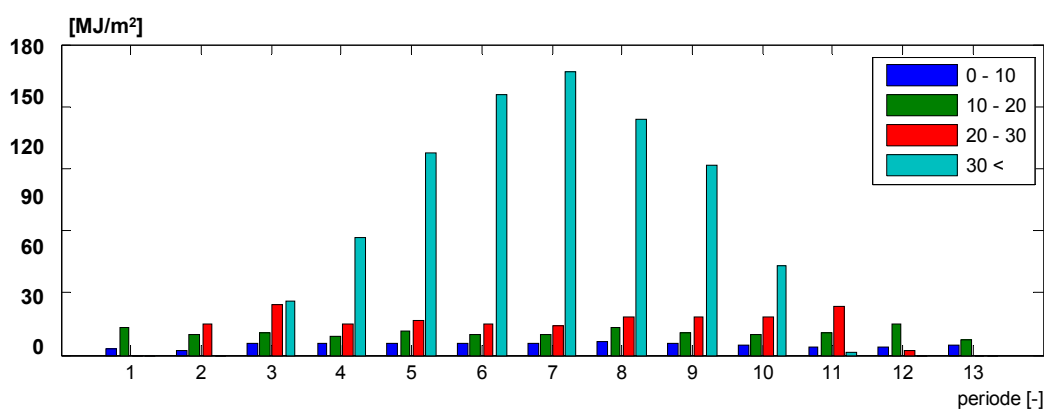
Er wordt regelmatig gediscussieerd over de effecten van vroeg licht. Tuinders geven aan dat vooral het licht in de ochtend belangrijk is. Hierna zal worden onderzocht, hoeveel licht er in de kas komt bij lage zonstanden (elevaties) en hoe belangrijk een kasdek materiaal met een relatief hogere transmissie bij kleine elevaties is.

Om een idee te krijgen van het aantal uren dat de elevatie klein is, is in Figuur 19 per periode een klassenindeling van de elevatie gemaakt. Dit zijn de klassen <10, 10-20, 20-30 en groter dan 30 graden. Bij de klasse kleiner dan 10, zijn de uren dat het donker is niet meegeteld. Het is duidelijk dat in periode 1 en 13 de elevatie van de zon niet boven de 20° komt. Daarnaast is in de zomermaanden het aantal uren met kleine elevaties (<10°) duidelijk minder dan in de winter, de meeste uren is de elevatie groter dan 30 graden.

De hoeveelheid PAR-energie die dit vervolgens vertegenwoordigd, is in Figuur 20 weergegeven. Dit is weergegeven voor tuinbouwglas 90+.



Figuur 19. Aantal uren dat de zonelevatie per periode binnen een klasse valt.



Figuur 20. PAR-energie op plantniveau per periode, afhankelijk van de elevatie (tuinbouwglas 90+).

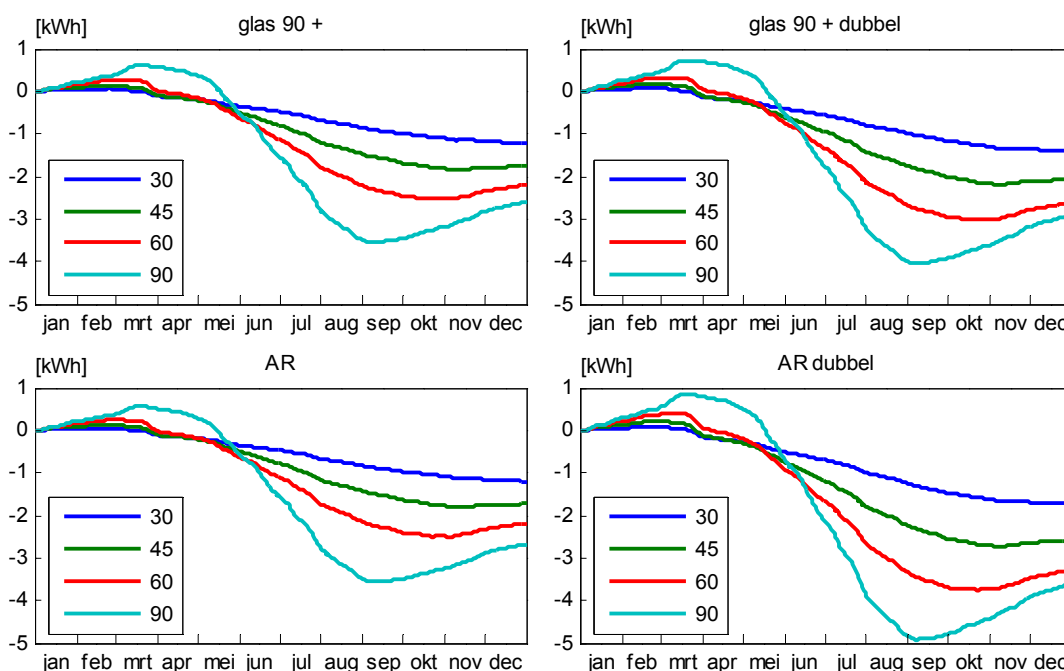
In Figuur 20 valt op dat de meeste PAR-energie de kas binnenkomt bij elevaties groter dan 30 graden. De bijdrage aan de lichtsom van licht dat de kas binnenkomt tijdens een lage zonnestand (elevaties kleiner 10° of 10-20°) is relatief klein. Dit wordt enerzijds veroorzaakt door een lager lichtintensiteit bij kleine elevaties (zonsopkomst en zonsondergang). Anderzijds neemt de transmissie van een kasdekmateriaal bij kleine elevaties af als gevolg van een hogere reflectie. Bij kleine elevaties is de transmissie dus slechter dan bij grotere elevaties.

Als een kasdekmateriaal een hogere transmissie heeft onder kleine invalshoeken zal dit resulteren in een hogere lichtsom in de kas. In een Venlo-kas met tuinbouwglas 90+ is de lichtsom van PAR op gewasniveau ca. 1300 MJ/m² op jaarbasis. Slechts ca. 75 MJ/m² daarvan is bij elevaties kleiner dan 10°. Onder AR glas met een hogere lichttransmissie onder kleine invalshoeken is de lichtsom op jaarbasis ca. 1400 MJ/m², de hoeveelheid PAR-licht bij elevaties <10° bedraagt ca. 80 MJ/m². Dat is maar 5 MJ/m² meer PAR licht op een totaal van ca. 1300 MJ/m² per jaar. Welk effect een toename van de lichtsom bij kleine elevaties heeft op de gewasgroei, zal in hoofdstuk 3.3 worden behandeld.

Invloed van de kasoriëntatie

De in de vorige paragraaf weergegeven resultaten vormen een vergelijk tussen de verschillende kasdekmaterialen bij één en dezelfde dekhelling en kasoriëntatie, namelijk een Venlo-kas met nokrichting Noord-Zuid en een dakhelling van 22°. In deze paragraaf wordt verder ingegaan op de invloed van de kasoriëntatie en de dakhelling op de PAR-energie die in de kas komt onder enkellaags en dubbellaags AR glas in vergelijking met tuinbouwglas 90+. Is het nodig om een andere kasoriëntatie of dakhelling te kiezen bij gebruik van een nieuw kasdekmateriaal?

Het is bekend dat de oriëntatie van de kas invloed heeft op de hoeveelheid licht die door het gewas wordt onderschept. Dit effect is seizoensafhankelijk. Wat in de winter voor het één een voordeel is, kan in de zomer juist negatief uitpakken. Om dit te illustreren is in Figuur 21 het verschil in PAR-lichtsom boven het gewas (som van diffuus en direct) in de tijd cumulatief uitgezet voor verschillende oriëntaties. In de referentie heeft de nok een Noord-Zuid richting. Daarnaast is gerekend met een nok die 30, 45, 60 en 90° verdraaid is. De nok loopt in de 90° situatie in oost-west richting.



Figuur 21. Cumulatief verschil in PAR-energie ten opzichte van een nokverdraaiing van α° , voor 4 kasdekmaterialen.

Uit Figuur 21 blijkt dat de totale lichtsom in een kas met oost-west opstelling lager bij alle 4 kasdekmaterialen lager is dan in een kas met Noord-Zuid opstelling. Een verdraaiing van de nok ten opzichte van een Noord-Zuid situering is echter in de wintermaanden gunstig. De lichtopbrengst in een oost-west kas (90°) loopt tot eind mei op, is dan ten opzichte van een Noord-Zuid kas tijdens de zomermaanden tot eind augustus lager, waarna de lichtopbrengst weer toeneemt. De winst in de wintermaanden wordt in de zomer teniet gedaan.

De in het figuur weergegeven waarden moeten wel in perspectief van de absolute PAR-lichtsom (380 tot 313 kWh/m² oftewel 1368 tot 1127 MJ/m², Tabel 12) gezien worden. Dan komt er tussen de 0.5 en 1% minder PAR-licht boven het gewas bij verdraaiing van de nok van Noord-Zuid naar oost-west. Hierbij is het effect voor de dubbeldeks kassen iets groter dan van de enkeledeks kassen. Bij een keuze voor een andere kasdek materiaal, in dit geval AR glas, verandert dit beeld niet. Omdat de meeste gewassen vooral in de winter meer licht nodig hebben, is het aan te raden een kas met een oriëntatie oost-west te bouwen voor een hogere lichtopbrengst in de winter. Tijdens de zomermaanden is licht vaak niet de beperkende factor. Bij een oost-west opstelling zal in de zomer minder energie de kas binnen komen, wat een licht positief effect heeft voor de opwarming van de kas. Verder zijn er nauwelijks gevolgen voor het energiegebruik. Doordat er in de wintermaanden meer energie in de kas komt, hoeft er iets minder gestookt worden. Op jaarbasis is dit slechts een paar tiende procent. De absolute gasverbruiken verschillen niet zoals uit Tabel 8 blijkt (bij deze nauwkeurigheid).

De keuze voor een bepaalde kasoriëntatie verandert niet door de keuze voor een nieuw kasdek materiaal, in dit geval AR glas.

Tabel 8. Gasgebruik bij 5 verschillende oriëntaties voor enkel- en dubbellaags tuinbouwglas 90+ en AR glas.

Oriëntatie ¹⁾	Glas 90+ enkel	Glas 90+ dubbel	AR glas enkel	AR glas dubbel
0	43,4	32,9	42,7	32,1
30	43,4	32,8	42,7	32,1
45	43,4	32,8	42,7	32,1
60	43,3	32,8	42,7	32,1
90	43,4	32,8	42,7	32,1

¹⁾ 0 is een nokrichting noord-zuid en 90 is nokrichting oost-west.

Invloed van de dakhelling

Naast de kasoriëntatie heeft ook de dakhelling een effect op de totale lichtsom en het energieverbruik in de kas. Hierbij is het effect op het energiegebruik iets groter. Dit komt omdat bij een toename van de dakhelling het kasdekkoppervlak toeneemt waardoor het energieverlies ook toeneemt. Om het invloed van de dakhelling bij de keuze voor een kasdek materiaal in kaart te brengen, zijn voor de 4 glasmaterialen de dekhellingen gevarieerd tussen 16 en 28°. De dakhelling in de referentie is 22°. De gevolgen op het energiegebruik zijn in Tabel 9 weergegeven.

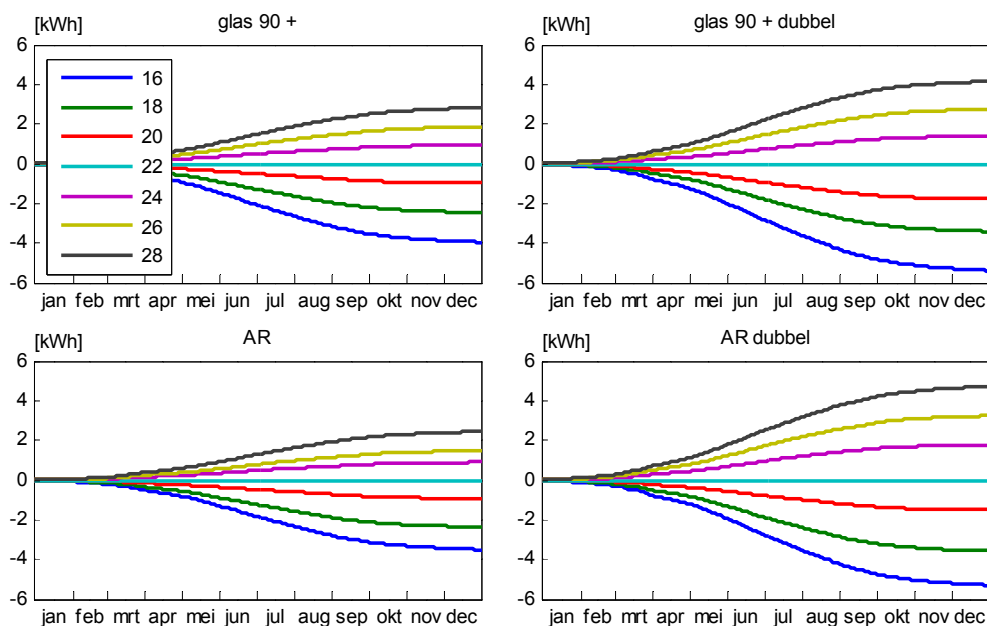
Tabel 9. Gasgebruik en procentuele besparing ten opzichte van referentie met 22° dekhelling voor 4 kasdekmaterialen.

Dekhelling	Absoluut gasgebruik [m ³ /m ²]				Procentueel ten opzichte van helling met 22°			
	glas 90 + enkel	glas 90 + dubbel	AR glas enkel	AR glas dubbel	glas 90 + enkel	glas 90 + dubbel	AR glas enkel	AR glas dubbel
16	43,2	32,9	42,5	32,2	0,5	-0,2	0,5	-0,1
18	43,2	32,9	42,6	32,1	0,4	-0,1	0,4	-0,1
20	43,3	32,9	42,6	32,1	0,2	0,0	0,2	0,0
22	43,4	32,9	42,7	32,1	0,0	0,0	0,0	0,0
24	43,5	32,9	42,8	32,1	-0,3	0,0	-0,3	0,0
26	43,6	32,9	43,0	32,1	-0,5	0,0	-0,6	0,0
28	43,8	32,9	43,1	32,1	-0,9	0,0	-0,9	0,0

De dekhelling heeft dus een kleine invloed op het energiegebruik. Bij een toename van 6° dekhelling ten opzichte van de referentie van 22° neemt het energiegebruik met 0.8 á 0.9% toe bij de kasdekken in enkeldeks uitvoering. Bij een afname met 6° dekhelling ten opzichte van de referentie van 22° neemt het energiegebruik met 0.4 á 0.5% af. Ook in dit geval verandert het beeld niet bij een ander kasdek materiaal. Daarnaast is bij de dubbeldeks uitvoeringen de gevoeligheid voor de dakhelling klein.

Naast gevolgen op het energiegebruik heeft de dekhelling ook gevolgen voor de hoeveelheid PAR licht dat op het gewas valt. In Figuur 22 is voor ieder van de 4 kasdekmaterialen het verschil, cumulatief door het jaar, ten opzichte van de referentie met een dekhelling van 22° van de PAR-energie boven het gewas weergegeven. De verschillen variëren tussen de -1.6 (tuinbouwglas 90 + dubbel, 16°) en +1.3% (AR glas dubbel, 28°) op jaarbasis. Hierbij is de invloed van de dubbellaags materialen duidelijk zichtbaar. Bij een kleine hellingshoek neemt de hoeveelheid licht meer af en bij een grotere dakhellingshoek van het kasdek meer toe dan bij de enkellaags materialen. Voor alle materialen geldt dat bij een kleinere hoek er meer licht verloren gaat dan dat er bij een toename van de dakhellingshoek bijkomt aan licht. De afweging die gemaakt moet worden is enerzijds het meerverbruik aan energie door een toename van de dekhelling en een bijbehorende lichtwinst of anderzijds een energiebesparing met gelijktijdig minder licht. Uit de grafieken volgt wel dat het grootste verschil in de zomer wordt gecreëerd.

De in huidige kasontwerpen gebruikte dakhelling van 22° in Venlo-kassen of 26° in Breedkappers is een compromis tussen een goede lichtsom en gering energieverbruik. Een verandering van de dakhelling omdat er een nieuw kasdek-materiaal, in dit geval AR glas, wordt gekozen, is niet nodig.

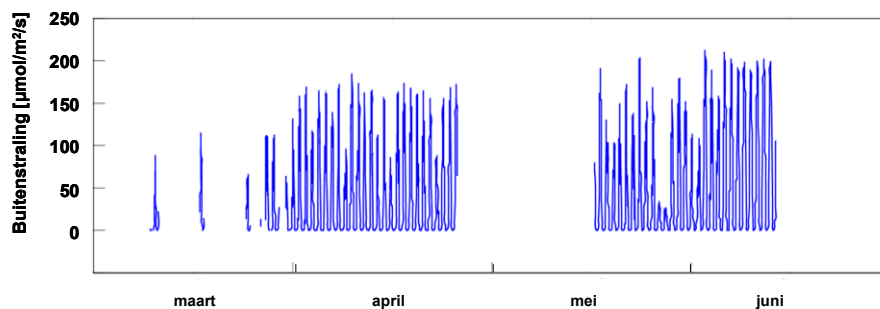


Figuur 22. Cumulatieve verschil van de PAR-energie ten opzichte van de referentie met een dekhelling van 22° boven het gewas voor 4 kasdekmaterialen.

3.1.2 Lichtopbrengst van enkellaags Anti-reflectie-glas in de praktijk

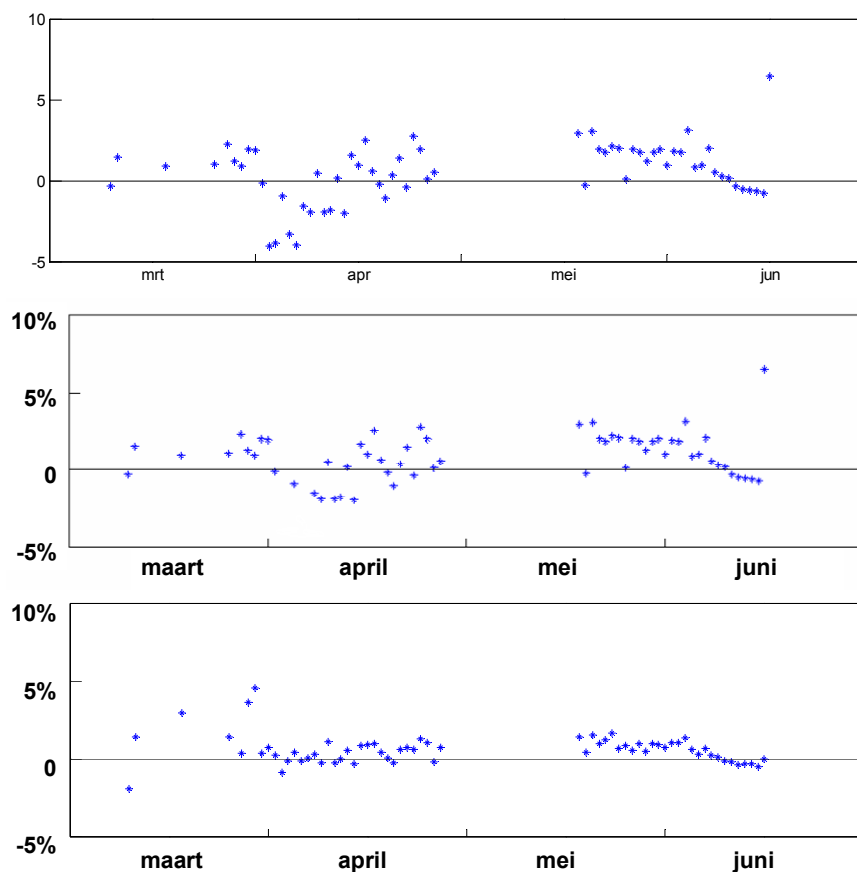
Lichtmetingen kasdek materiaal

In een praktijkkas werd onderzoek uitgevoerd naar de lichtopbrengst van enkellaags AR glas ten opzichte van hetzelfde basisglas zonder AR coating. Hiervoor is de praktijkkas gedekt met AR glas, enkel twee kappen zijn gedekt met het basisglas. Direct onder het kasdek is met sensoren in de periodes 10 maart 2006 tot en met 25 april en 16 mei tot en met 13 juni 2006 continue een lichtmeting uitgevoerd. Buiten was één sensor van het zelfde type op de nok gemonteerd. De nokrichting is van noord-noordwest naar zuid-zuidoost. De meetmethode is beschreven in hoofdstuk 2.1.4.



Figuur 23. Buitenstraling van de praktijkkas in de periode maart tot juni voor de locatie Rilland, provincie Zeeland.

Figuur 23 geeft de buitenstraling van de locatie Rilland weer. Er waren periodes met zware bewolking in maart, april was meestal half bewolkt, half zonnig, met enkele dagen zware bewolking er tussen. De eerste meetperiode werd gevolgd van een zonnige periode begin mei, waar geen metingen zijn uitgevoerd. De tweede helft van mei was weer half bewolkt, half zonnig, met enkele dagen zware bewolking er tussen. De eerste helft van juni was helder en zonnig. De locatie dicht bij de zee maakt dat het weer vaak wisselvallig was, bewolking met regen volgde op zon met hoge instraling.

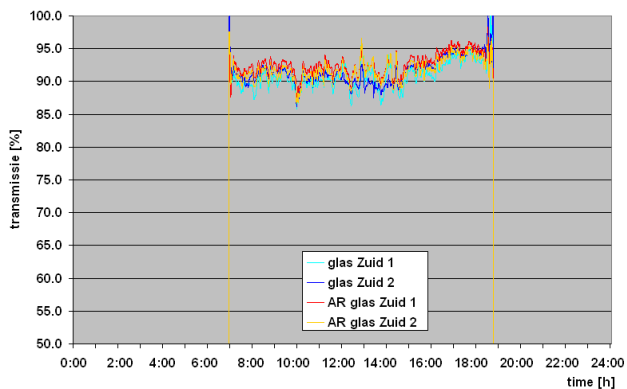


Figuur 24. Gemiddelde lichtopbrengst onder AR glas in de praktijkkas vergeleken met het basisglas, boven: metingen zuidkant van het dak, beneden: metingen noordkant van het dak.

De lichtdoorlatendheid van de kasdekmaterialen zoals deze geïnstalleerd zijn op de praktijkkas in Rilland is in een steekproef van tevoren in het lab bepaald. De resultaten hiervan zijn weergegeven in hoofdstuk 2.1.4 (Figuur 5). De transmissie voor direct (loodrecht) en diffuus opvallend licht in het lab was voor AR glas 5.5% hoger dan voor het basisglas. Metingen in het lab zijn volgens de norm NEN 2675 in droge toestand uitgevoerd.

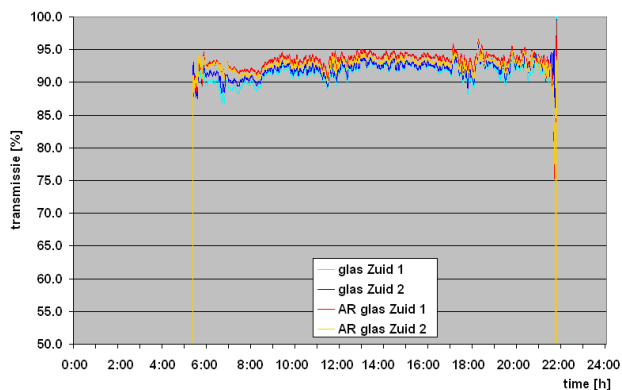
Tijdens de praktijkmetingen van de lichtopbrengst viel op dat de transmissie van AR glas vaak achter liep op de verwachte transmissie in vergelijking met het basismateriaal. Een hoger lichtdoorlatendheid van AR glas van 5.5% boven het basismateriaal wordt gemiddeld niet gemeten (Figuur 24), wel op sommige momenten, namelijk als de materialen van binnen en buiten droog zijn. Dat is het geval als er geen condens optreedt en het dak ook van buiten niet nat is als gevolg van regen of dekbevoeiing. In het vervolg zal middels enkele voorbeelddagen worden uitgelegd hoe zich de twee kasdekmaterialen AR glas en het basisglas gedragen.

In Figuur 25 tot en met Figuur 27 is de gemeten transmissie van het kas in de praktijkkas voor verschillende voorbeelddagen weergegeven. Er is onderscheid gemaakt in dagen met volledige bewolking met een kleinere of grotere hoeveelheid regen, in dagen met zware bewolking en regen afwisselend met zonnige periodes en in dagen met een lichte bewolking en veel zon en vooral zonder natuurlijke regen. Het kan ervan uitgegaan worden dat tijdens langere zonnige periodes altijd de dakbevoeiing aanstond, zodat ook op deze momenten het dak nat was.



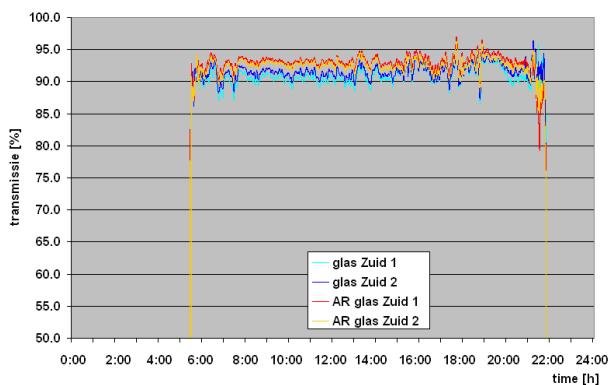
Datum: 10 maart 2006

Conditie:
Geheel bewolkt (8 octa's)
0 uur zon
5.4 uur regen (4 mm)



Datum: 26 mei 2006

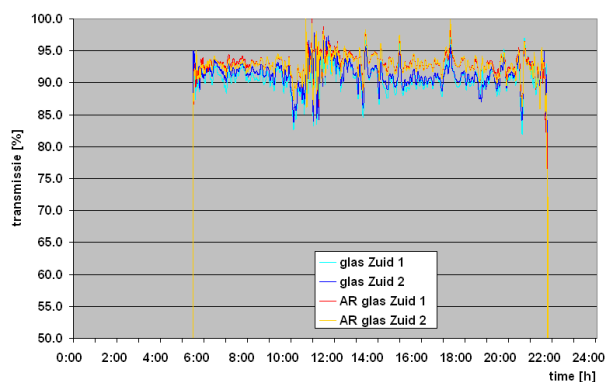
Conditie:
Geheel bewolkt (8 octa's)
0 uur zon
9 uur regen (11,3 mm)



Datum: 27 mei 2006

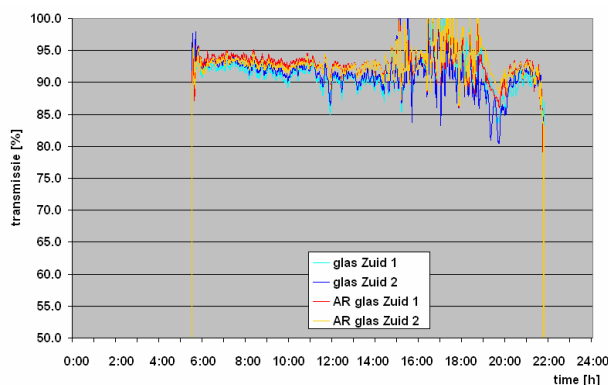
Conditie:
Geheel bewolkt (8 octa's)
0 uur zon
3.9 uur regen (8,7 mm)

Figuur 25. Transmissie kasdek in praktijkkas op verschillende bewolkte en halfbewolkte dagen met regen.



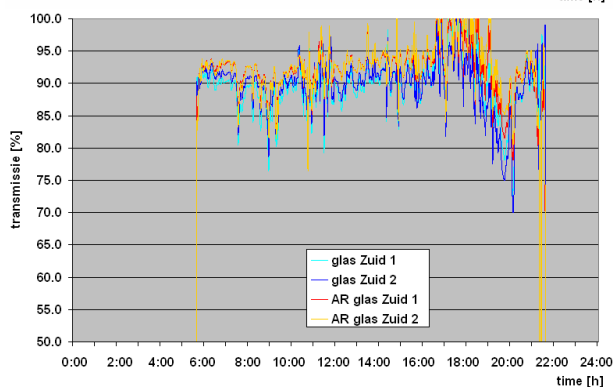
Datum: 21 mei 2006

Conditie:
Zwaar bewolkt (7 octa's)
1.7 uur zon
3 uur regen (5,7 mm)



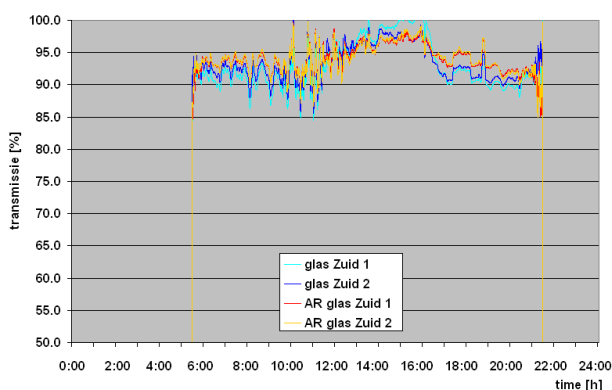
Datum: 19 mei 2006

Conditie:
Zwaar bewolkt (7 octa's)
3.3 uur zon
4.2 uur regen (6,6 mm)



Datum: 18 mei 2006

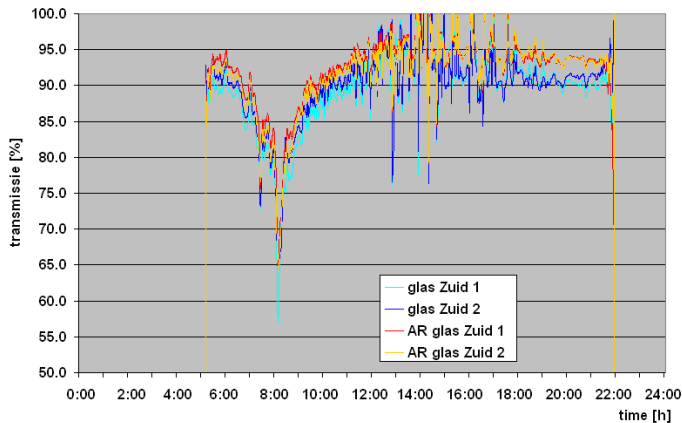
Conditie:
Zwaar bewolkt afwisselend met zon (6 octa's)
8.8 uur zon
1.1 uur regen (4,2 mm)



Datum: 17 mei 2006

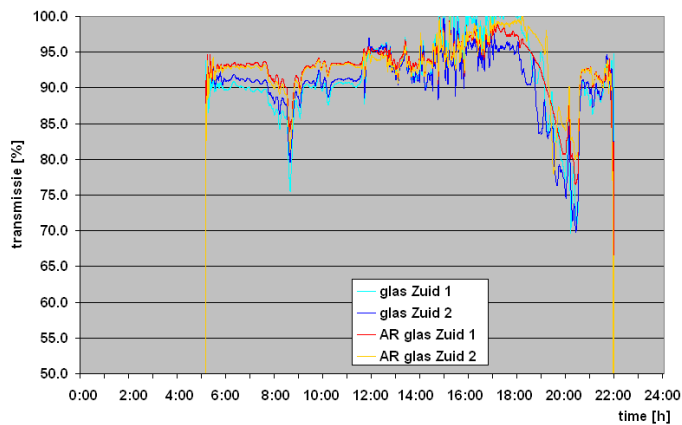
Conditie:
Zwaar bewolkt afwisselend met zon (6 octa's)
4.9 uur zon
2.7 uur regen (9,3 mm)

Figuur 26. Transmissie kasdek in praktijkkas op verschillende bewolkte en halfbewolkte dagen.



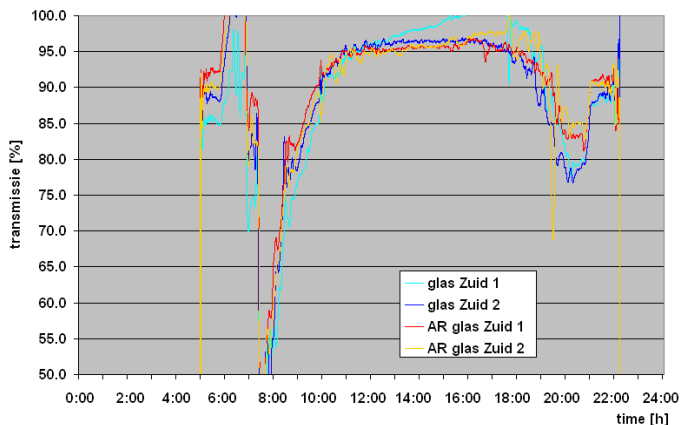
Datum: 28 mei 2006

Conditie:
Half bewolkt (5 octa's)
9.2 uur zon
0 uur regen



Datum: 3 juni 2006

Conditie:
Licht bewolkt (3 octa's)
11.7 uur zon
0 uur regen



Datum: 8 juni 2006 tot 12 juni 2006

Conditie:
Onbewolkt (0 octa's)
15.1 uur zon
0 uur regen

Figuur 27. Transmissie kasdek in praktijkkas op verschillende licht bewolkte en onbewolkte dagen.

In Figuur 25 worden drie dagen met een volledige bewolking getoond. Het valt op dat de lichtopbrengst onder AR glas (2 sensoren) gemiddeld maar $\approx 1.5\%$ hoger was dan onder het basisglas. Op 10 maart viel 5.4 uur regen met een totaal maar 4 mm neerslag. In de transmissiecurven is goed te zien dat het dek blijkbaar de hele dag nat was met een kleine hoeveelheid water, zodat de AR coating aan de buitenkant buiten werking was. Hierdoor gaat tot 3% van de theoretische meeropbrengst van licht onder AR glas verloren. Op grond van de lage buitenluchttemperaturen (gemiddeld 5°C) op deze dag kan ervan uitgegaan worden dat ook de temperatuur van het kasdek laag was, zodat vrijwel de hele dag condensatie tegen dek optrad. Dat betekent dat het kasdek ook van de binnenkant nat was, waardoor ook de AR coating aan de binnenkant buiten werking was. Hierdoor gaat nog eens tot 3% van de theoretische meeropbrengst van licht onder AR glas verloren. Het resultaat is nog een kleine meeropbrengst van licht onder AR glas als gevolg van een kwalitatief betere condens- en waterlaag (zie hoofdstuk 3.1.3). Op 26 mei viel 9 uur lang regen. Deze begon rond 9 uur in de ochtend, daarvoor is een hogere transmissie van AR glas ten opzichte van het basisglas te zien. Op 27 mei viel maar 3.9 uur regen, waarschijnlijk na 16 uur, wanneer de

transmissie van AR glas weer bijna gelijk wordt aan de transmissie van het basisglas. Op beide dagen was de buitentemperatuur gemiddeld 14°C, duidelijk lager dan de kasluchttemperatuur, waardoor wederom een condenslaag aan de binnenkant verwacht kan worden.

Inde tweede helft van mei was het weer vaak wisselvallig, zware bewolking met regen wisselden af met periodes met zon. In de transmissiecurven in Figuur 26 zijn te periodes met wolken en zon goed uit te maken. Wanneer er grote schommelingen in de transmissie optreden, wisselden zon en wolken elkaar snel achter elkaar af, bijvoorbeeld op 21 mei rond 11 uur of op 19 mei tussen 15 uur en 19 uur. Op 21 mei is te zien dat in de ochtend het dek van binnen en buiten nat was door condens en regen. Rond 11 uur kwam de zon er doorheen, waarna het dak waarschijnlijk van de buitenkant droog was. De dakbevoeiing stond ook niet aan, omdat het een bewolkte dag met relatief weinig zonenergie toevoer naar de kas was. Blijkbaar was echter de binnenkant van het dek nat door condens (buitenluchttemperatuur was gemiddeld 14.1°C), waardoor niet de volledige theoretische meeropbrengst van licht gehaald kan worden onder AR glas ten opzichte van het basisglas. Ook op 19 mei was het dak blijkbaar nat en droogde in de loop van de ochtend op, 's middags kwam de zon er doorheen. Door condens aan de binnenkant van het dek is de transmissie lager dan verwacht. Het principe was op 18 mei vergelijkbaar. Op 17 mei was er nog meer zon, vooral rond de middaguren. Op deze dag was de doorkomende zon vrij krachtig, de buitenluchttemperaturen liepen dan ook op tot bijna 20°C. Wij kunnen aannemen dat op deze dag de dakspoeier rond de middaguren aan stonden. De transmissie van AR glas loopt dan ook terug tot op het niveau van het basisglas. Pas na 17 uur stijgt de transmissie van AR glas duidelijk aan boven die van het basismateriaal wat erop duidt dat de dakspoeier nu uit staat en het kasdek redelijk droog is. De transmissiewaarden van sensor 'glas Zuid 1' rond de middaguren worden overigens veroorzaakt door een meetfout. Tijdens dit soort wisselvallige periodes konden wij gemiddeld een $\approx 2.0\text{-}2.5\%$ hogere lichtopbrengst onder AR glas meten.

Figuur 27 geeft de lichtopbrengst onder AR glas en het basismateriaal weer op licht bewolkte en onbewolkte dagen. Tijdens uren met afwisselend bewolking en zon, kan de transmissie niet goed bepaald zijn, zichtbaar in bijvoorbeeld sterke schommelingen van de transmissie op 28 mei tussen 12 uur en 18 uur. Op 3 juni was een licht bewolkte en zonnige dag met 11.7 uur zon en zonder enige neerslag. Het valt op dat er een verschil in transmissie tot ca. 11:30 uur optreedt. Daarna is het verschil verdwenen, waarschijnlijk was dit het tijdstip wanneer de dakbevoeiing aanging. Na 19:00 uur neemt het verschil in transmissie geleidelijk weer toe, waarschijnlijk als gevolg van het feit dat de dakbevoeiing nu uit staat. Zowel het AR glas als het basisglas laten in de ochtenduren een duidelijke dip zien van de sensoren die aan de zuidkant zijn geplaatst. Omdat de zon opkomt aan noordkant van de nok, worden de sensoren aan de zuidkant van enige tijd beschaduwde door de nok en een glasroede. Dit valt alleen op op heldere dagen.

In het algemeen zijn de gemeten verschillen tussen AR glas en het basismateriaal lager dan theoretisch verwacht. De oorzaken hiervoor kunnen als volgt worden samengevat:

- Nat oppervlak veroorzaakt door regen of dakbevoeiing, waardoor de AR coating aan de buitenkant buiten werking is
- Omdat bij gebruik maken van een ander teeltsysteem in het algemeen geen dakbevoeiing wordt gebruikt, kan ervan uit worden gegaan dat dan het dek minder nat is en de lichtopbrengst met rond 3% hoger zal zijn dan hier gemiddeld gemeten.
- Nat oppervlak veroorzaakt door condensatie, waardoor de AR coating aan de binnenkant buiten werking is
- Omdat in een traditionele kas de luchtvochtigheid lager is en het dek zonder dakbevoeiing een hogere temperatuur heeft, kan ervan uit worden gegaan dat dan het dek minder nat is en de lichtopbrengst licht hoger zal zijn.
- Het in de praktijk gebruikte AR glas had een lagere transmissie dan de proefmonsters die wij van dezelfde leverancier hebben ontvangen. Terwijl het steekproefmonster uit de praktijkkas transmissiewaarden had van $\tau_{\text{dir}}=95.8\%$ en $\tau_{\text{diff}}=88.9\%$, hadden andere proefmonsters een $\tau_{\text{dir}}=97.0\%$ en $\tau_{\text{diff}}=90.6\%$. Op grond van de labwaarden kan een meeropbrengst van licht onder AR glas van 5.5% worden verwacht ten opzichte van het gebruikte basismateriaal. Of er ook nog verschillen waren in lichtdoorlatendheid tussen de glazen op de praktijkkas is niet bekend.

Hoe komt het dat de AR coating buiten werking is, als het materiaal nat is? Dit is te verklaren door de brekingsindex van de materialen. Gewoon glas heeft een brekingsindex van ongeveer 1.45. Gewoon glas laat ongeveer heeft bij loodrechte instraling een reflectie van ongeveer 8%, de rest is absorptie, zodat de transmissie ongeveer 90% wordt. Als licht onder een ander invalshoek invalt, nemende reflectieverliezen toe. Door aanbrengen van een reflectieverminderende laag / AR coating op het glas worden de reflectieverliezen verlaagd. De brekingsindex van het materiaal daalt. De samenstelling van de reflectieverminderende laag / AR coating wordt zo ontworpen dat de reflectieverliezen bij een droog oppervlak zo klein mogelijk zijn. De brekingsindex van het oppervlak wordt verlaagd naar 1.27 in droge toestand. Water heeft een brekingsindex van 1.33 en ligt dus tussen die van gewoon glas en van AR glas. Het gevolg is dat bij gewoon glas een waterlaag de brekingsindex verlaagd, de reflectieverliezen worden minder, de transmissie zelfs hoger (zie hoofdstuk 3.1.3). Een waterlaag op AR glas heeft het tegengestelde effect. De brekingsindex wordt verhoogd, waardoor de reflectieverliezen relatief toenemen en de transmissie verlaagd wordt.

Om het effect van water op AR glas en op gewoon glas te kwantificeren hebben wij berekeningen na de optische transmissie van droge en natte materialen uitgevoerd (zie Bijlage II). Hieruit blijkt dat de transmissie van gewoon glas met een waterlaag (géén druppels!) met 1.7% verhoogd, de transmissie van AR glas met een waterlaag aan één kant gaat met 2.8% achteruit. Dit kan worden geobserveerd als het glas aan de buitenkant nat is door dakbevoeiing. De dakbevoeiing zorgt voor een redelijk uniforme waterlaag op het materiaal. Anders kan dit zijn door regen of condens. In beide gevallen ontstaat niet altijd een waterlaag maar soms ook waterdruppels op het materiaaloppervlak. Bij heftige regen zal de buitenkant van het dek wel worden voorzien van een waterlaag. Waterdruppels kunnen daarentegen zorgen voor extra reflectie. Waterdruppels ontstaan vooral op gewoon glas, water op AR glas veroorzaakt meestal een waterfilm (hoofdstuk 3.1.3). Een condensatielaag aan de binnenkant van AR glas zal dus hetzelfde effect hebben als een waterlaag aan de buitenkant, namelijk een verlies van de reflectieverminderende werking van de coating en een relatieve teruggang in transmissie van ca. 2.8%. Condensatie aan de binnenkant van gewoon glas zal meer in druppelvorm ontstaan, waardoor de transmissie van het glas niet met 1.7% toeneemt, zoals boven voor een nat oppervlak berekend, maar afneemt door hogere reflectie in de druppels zelf. Hoe hoog deze reflectieverliezen zijn hangt af van de hoeveelheid condens en de vorm van de druppels. Hierover is te weinig bekend om dit effect te kwantificeren. Meer onderzoek hierna zou wenselijk zijn.

De volgende vraag is hoe vaak komt het eigenlijk door het jaar heen voor dat het dek nat is als gevolg van regen en/of condensatie? Hiervoor hebben wij een aantal modelberekeningen gedaan om een inschatting van het condens tegen het dek te maken. Om een inschatting te maken van een nat dek aan de buitenkant hebben wij de gegevens van het KNMI opgevraagd.

Een enkellaags kasdek is meer dan 7800 uur van het jaar nat als gevolg van condens, dat is bijna 90% van de tijd. 4400 uur daarvan zijn overdag. Een droog kasdek komt rond 900 uur voor, waarvan meer als 750 uur overdag. Dat betekent dat het dek tijdens de nacht meestal nat is, wat echter geen gevolgen heeft voor de performance van het kasdek materiaal. Voor een inschatting van de lichtdoorlatendheid van een kasdek materiaal, zijn alleen de uren met condensatie overdag belangrijk. Op een dubbellaags kasdek treedt minder vaak condensatie op, overdag zijn dit maar 3600 uur, dat zijn bijna 20% minder dan bij een enkellaags dek. Verder kunnen wij vaststellen dat condensatie vooral tijdens de wintermaanden optreedt. Tot eind april en vanaf half september is volgens onze berekeningen een enkellaags kasdek vrijwel altijd nat. In de periode mei en juni hangt dit af van de weersomstandigheden en in de zomermaanden is het dak vaker droog. Een dubbel kasdek is volgens onze berekeningen reeds vanaf half april redelijk droog. De genoemde getallen moeten worden gezien als inschatting van de werkelijkheid, exacte getallen uit de praktijk zijn niet bekend.

Op grond van deze inschatting kan worden gesteld dat een enkellaags AR glas de beste werking heeft van mei tot september, tijdens de wintermaanden treedt vaak condens op, waardoor de coating op de binnenkant buiten werking is, blijft de lichtmeeropbrengst op grond van de buitenkantse coating over.

Naast condensatie aan de binnenkant, kan het kasdek door regen ook aan de buitenkant nat worden. Data zoals deze door het KNMI beschikbaar worden gesteld, geven de neerslagintensiteit per uur weer. Gemiddeld over de laatste jaren valt rond 800 uur neerslag > 0.1 mm/uur en 1200 uur een neerslag van < 0.1 mm/uur. Als verondersteld wordt dat de helft van het neerslag overdag valt en de rest in de nacht, is het kasdek op grond van regen ca. 400-1000 uur per jaar tijdens de lichte uren nat. De gemiddelde hoeveelheid regen per jaar in Nederland bedraagt 793 mm.

Op grond van deze gegevens kan worden gesteld dat in een traditioneel teeltsysteem (zonder dakbevoeiing) het dek 5-10% van de tijd nat is op grond van regen. Daardoor zal de werking van de buitencoating afnemen.

Samenvattend kan worden gesteld dat een coating aan de binnenkant van het kasdek weinig zinvol is, omdat het dek toch rond 90% van de tijd nat is als gevolg van condens. Wel zorgt een AR coating aan de binnenkant voor een waterfilm in plaats van druppels, waardoor vooral de diffuse lichtdoorlatendheid iets hoger zal zijn dan zonder coating. Kosten en baten moeten hier goed tegen elkaar afgewogen worden. Een AR coating aan de buitenkant daarentegen zal de lichtopbrengst jaarrond gemiddeld 3% verhogen.

In de onderzochte praktijkkas waren droge momenten op het kasdek schaars, omdat een belangrijk onderdeel van het kassysteem warmteafvoer via dakbevoeiing was. Van de buitenkant was het dek dus vaak nat. Bewolkte dagen gingen vaak gepaard met regen. Op heldere dagen of momenten nam de warmtetoevoer door zonnestralingen-energie naar de kas toe, de overtollige warmte werden gedeeltelijk afgevoerd door aanzetten van de daksproeiers. Ook van de binnenkant was het dek vaak nat door condens. Deze treedt vaker op, omdat de vochtgehalte van de lucht in een (semi)gesloten kas vaak iets hoger ligt dan in een traditionele kas met luchtramen, en omdat de dektemperatuur in deze kas vaak verlaagd wordt door sproeien van koud water op de buitenkant van het dek, waardoor de dektemperatuur afneemt. Het kan dus verwacht worden dat in een traditioneel kassysteem het dak minder vaak nat is als in de hier onderzochte praktijkkas. Wel zal het zo zijn het materiaal in de praktijk vaak nat is, waardoor de lichtopbrengst in de praktijk lager zal zijn dan op grond van labmetingen kan worden verwacht. Gemiddeld kan een met ca. 3% hogere lichtopbrengst vergeleken met huidige tuinbouwglazen worden verwacht, wat nog steeds een goede prestatie is. Wij trekken daarom ook de conclusie dat het onderzochte AR glas een goed kasdek materiaal is, dat hier gebruikt werd met het verkeerde teeltprincipe.

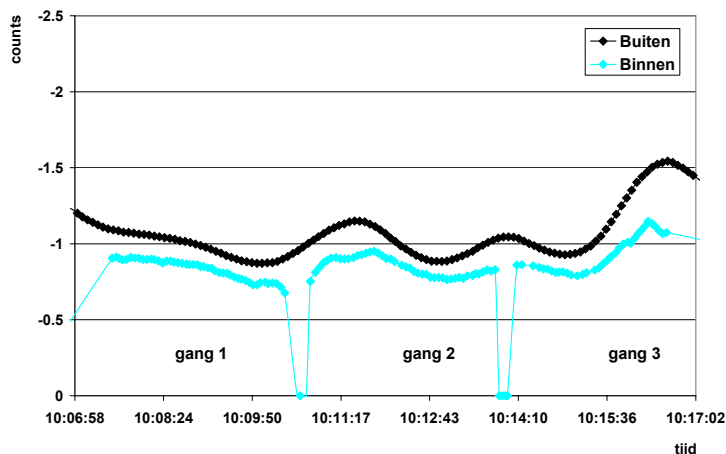
Tijdens de onderzoeksperiode zijn er overigens geen indicaties gevonden dat AR glas sneller of minder snel vervuult dan het basismateriaal. Ook in de lichtmetingen werden hiervoor geen aanduidingen gevonden. In labtests kon vuil makkelijk weer verwijderd worden en had geen invloed op de lichttransmissie (Bijlage IV).

Lichtmetingen gehele kasconstructie

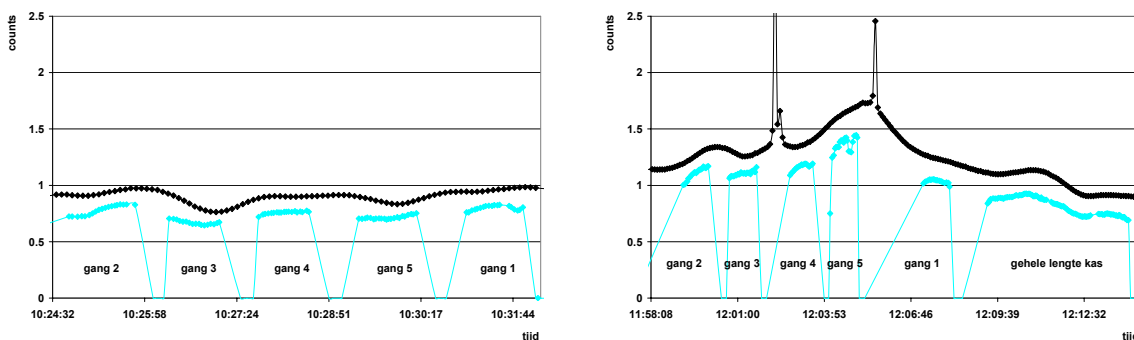
Naast de transmissie van de twee verschillende glazen in de praktijkkas bij van der Lans is ook de transmissie van de kas inclusief anti-reflectie-coating glas en constructie gemeten. Metingen zijn uitgevoerd in een lege kas op 17 maart en in een kas met een klein gewas op 31 maart. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 10. Samenvattend kan worden gesteld dat de transmissie van de kas duidelijk meer dan 80% bedraagt. Dit is niet alleen het resultaat van AR glas in het dak, maar ook door hogere lichtreflectie door de witte bodemfolie, de witte kasconstructiedelen, witte goten en andere witte onderdelen in de kas. In een kas met een groeiend gewas wordt de reflectie verminderd, de lichtopbrengst neemt af.

Tabel 10. *Transmissiemetingen van de SunergieKas® bij van der Lans; gemiddelde waarden van alle meetpunten per pad.*

	17 maart 2006	31 maart 2006 ochtend	31 maart 2006 middag
Gang 1	80,2%	82,1%	83,3%
Gang 2	83,6%	82,5%	89,1%
Gang 3	81,3%	81,1%	85,9%
Gang 4	-	83,4%	84,2%
Gang 5	-	82,5%	80,1%
Gehele lengte van de kas	-	-	79,5%



Figuur 28. Lichtmetingen gehele kasconstructie in praktijkkas, gemeten in een lege kas op 17 maart 2006.



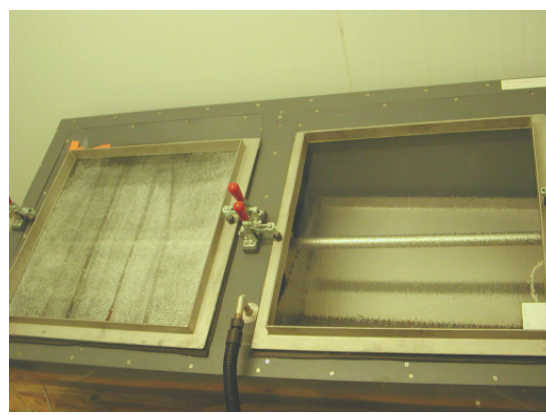
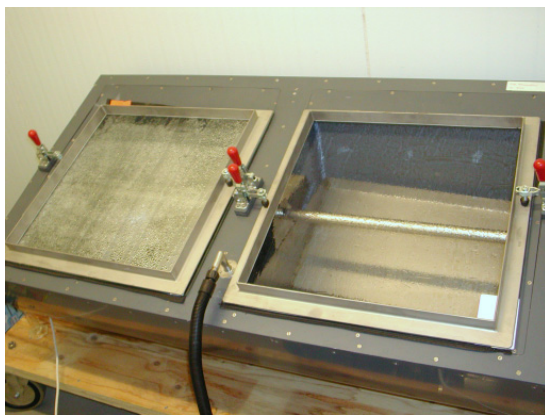
Figuur 29. Lichtmetingen gehele kasconstructie in praktijkkas, gemeten in een lege kas op 31 maart 2006 tijdens twee tijdstippen.

3.1.3 Onderzoek naar het condensatiegedrag van Anti-reflectie-glas

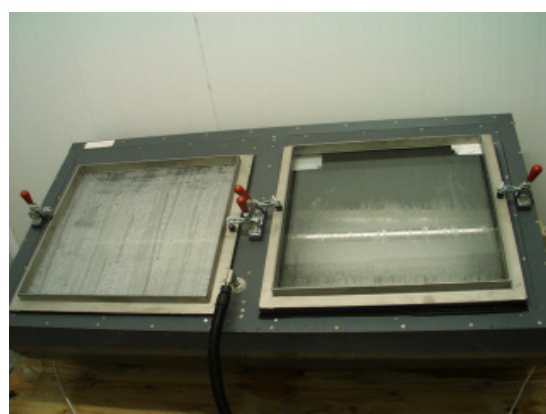
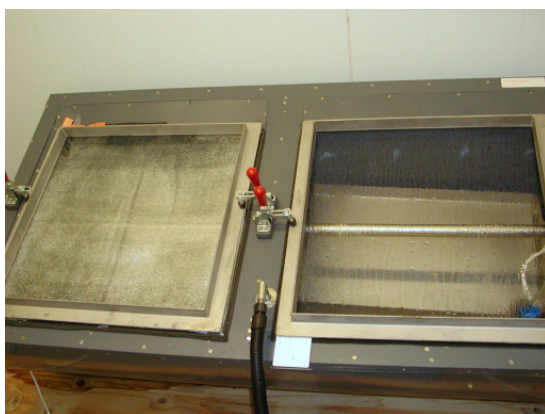
Kwaliteit condensaat

Om meer te weten te komen over de kwaliteit van de condensatielaag op verschillende kasdekmaterialen is het condensatiegedrag van verschillende glas monsters in het lab onderzocht. Het condensatie gedrag op grote oppervlaktes kan met een speciaal condensatie meetapparaat worden bestudeerd. Een zestal verschillende kasdekmaterialen, waaronder enkel- en dubbellaagse basisglazen met en zonder AR coating in vergelijking standaard glas. Een overzicht van de onderzochte monsters wordt gegeven in hoofdstuk 2.2 (Tabel 2).

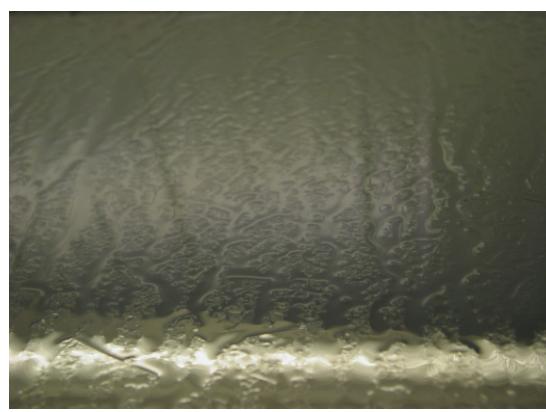
Tijdens de metingen werd een duidelijk verschil tussen glas met een AR coating en standaard glas geconstateerd wat de transparantie van het glas plaat betreft. Bij standaard glas, bleven de druppels langer hangen, waardoor de transparantie van het glas werd gereduceerd, terwijl bij gecoat glas een waterfilm werd gevormd en de transparantie hoog bleef. In Figuur 30 en Figuur 31 laten het condensatiegedrag zien van verschillende AR glazen ten opzichte van standaard glas. Terwijl onder standaard glas condensatie duidelijk in druppelvorm plaats vindt (Figuur 32, links), wordt op AR glas een waterfilm gevormd (Figuur 32, rechts). Dit heeft consequenties voor de lichtdoorlatendheid, zoals hieronder zal worden uitgelegd.



Figuur 30. Verschil in condensatiegedrag: op beide foto's links standaard glas (PLA0Z) vergeleken met CentroSolar witglas + AR coating (CS06A, foto links) en CentroSolar gewoon glas + AR coating (CS06B, foto rechts).



Figuur 31. Verschil in condensatiegedrag: op beide foto's links standaard glas (PLA0Z) vergeleken met Sunarc AR glas enkel (SC06B, foto links) en Sunarc AR glas dubbel (SC06B4, foto rechts).



Figuur 32. Detailfoto condensatiegedrag tijdens onderzoek in het lab van standaard glas (links) en AR glas (rechts).

Hetzelfde fenomeen kan duidelijk worden geobserveerd in de onderzochte praktijkkas. Terwijl AR glas met condensatie goed transparant bleef, was dit bij het basisglas veel minder het geval (Figuur 33).



Figuur 33. Verschil in condensatiegedrag in de praktijkkas, links het basisglas en rechts het AR glas, opnames gemaakt op 31 maart en 28 juni 2006.

Lichttransmissie condensaat

Om een inschatting te kunnen maken welk effect een druppel- of juist filmvormige condenslaag heeft op de lichttransmissie zijn metingen in het lab uitgevoerd met een nat en een droog materiaal. Met lichtmeetapparatuur is de transmissie van water op AR glas en op standaard glas bepaald (Tabel 11 en Figuur 35). De lichttransmissie werd gemeten op de kleine Ulbricht-kogel. Een beschrijving van de meetmethode wordt gegeven in hoofdstuk 2.2.

Als op standaard glas water wordt opgespoten, vormen zich druppels (Figuur 34, links), als op AR glas water wordt opgespoten, vormt zich een filmvormige waterlaag (Figuur 34, rechts). In het vervolg verandert de lichttransmissie voor loodrecht of diffuus invallend licht. Het valt op dat de transmissie voor direct, loodrecht invallend licht van gewoon glas met rond 1.3% toeneemt door een waterlaag erop (Tabel 11) en dat de loodrechte transmissie van anti-reflectie-glas met ca. 2.6% achteruit gaat.

Een waterlaag op het glas verandert de brekingsindex. Terwijl de brekingsindex van gewoon glas wordt verlaagd van 1.54 naar 1.33, stijgt de brekingsindex van Anti-reflectie-glas van 1.27 naar 1.33. Hierdoor komt de lichttransmissie voor loodrecht invallend licht van beide glastypes dichter bij elkaar te liggen. Dit is ook bewezen door middel van berekeningen (zie Bijlage II). De hier berekende toename in lichttransmissie van standaard glas en de afname in lichttransmissie van AR glas komen goed overeen met de gemeten waardes.

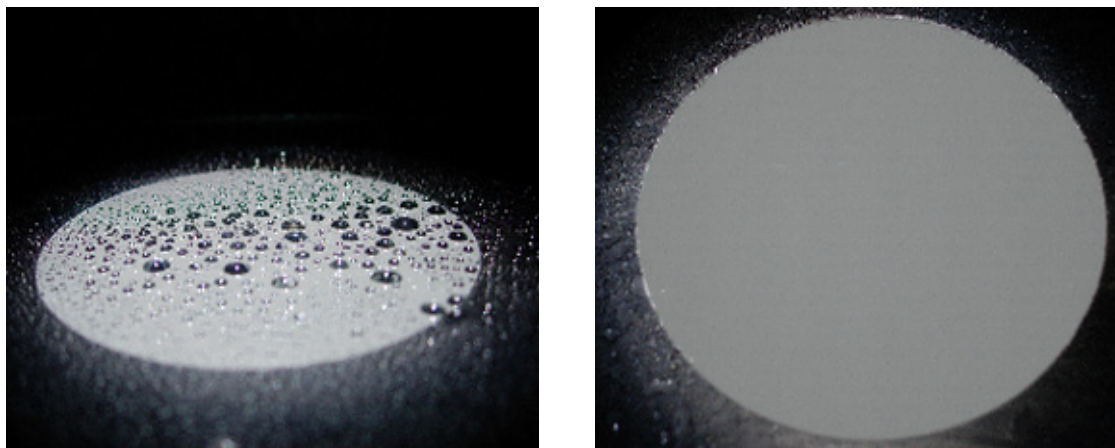
Een verschil in condensatievorm, druppels of film, heeft ook sterke invloed op de transmissie voor diffuus invallend licht. Vooral bij kleine invalshoeken neemt de reflectie in waterdruppels enorm toe. Hierdoor neemt de transmissie voor diffuus invallend licht van standaard glas af van 82.2% naar 76.6%. Dat is een verlies van 5.6%. Dat betekent dat er een enorm lichtverlies optreedt tijdens de periodes als condensatie in druppelvorm op het kasdek materiaal voorkomt. Maar ook bij glas met AR coating treedt een relatief lichtverlies door condensatie op. De transmissie voor diffuus invallend licht gaat van 90.6% naar 87.5% terug. Zoals reeds aangetoond, gaat door een waterlaag de AR coating buiten werking, rond 3% van de lichttransmissie gaat verloren. Als het materiaal aan één kant nat is, gaan rond 3% lichttransmissie verloren, als twee kanten nat zijn, gaan rond 6% lichttransmissie verloren. AR glas heeft in dat geval nog maar een weinig hogere lichttransmissie dan droog standaard glas zonder coating. Omdat de lichttransmissie van standaard glas door meer druppelvormige condensatie echter ook zal afnemen, is het aanbrengen van een AR coating nog steeds nuttig.

Hierbij is aan te merken dat hier boven genoemde getallen een richtlijn vormen voor wat er in een kas zal gebeuren. Hoeveel licht daadwerkelijk verloren gaat is mede afhankelijk van de kwaliteit van de condensatie. Deze kan bij ander types glazen afwijken. Zo is denkbaar dat tuinbouwglazen vooral als er meer vuil op zit een minder sterke druppelvorming laten zien dan in ons onderzoek. Om deze effecten nauwkeuriger te kwantificeren zou nader onderzoek nodig zijn.

In Bijlage III is aangetoond dat een enkellaags kasdek meer dan 7800 uur van het jaar nat is als gevolg van condensatie, dat is bijna 90% van de tijd. 4400 uur daarvan zijn overdag. Een droog kasdek komt rond 900 uur voor, waarvan meer als 750 uur overdag. Dat betekent dat het dek tijdens de nacht meestal nat is, wat echter geen gevolgen heeft voor de performance van het kasdek materiaal. Voor een inschatting van de lichtdoorlatendheid van een kasdek materiaal, zijn alleen de uren met condensatie overdag belangrijk. Op een dubbellaags kasdek treedt minder vaak condensatie op, overdag zijn dit maar 3600 uur, dat zijn bijna 20% minder dan bij een enkellaags dek.

Verder kunnen wij vaststellen dat condensatie vooral tijdens de wintermaanden optreedt. Tot eind april en vanaf half september is volgens onze berekeningen een enkellaags kasdek vrijwel altijd nat. In de periode mei en juni hangt dit af van de weersomstandigheden en in de zomermaanden is het dak vaker droog. Een dubbel kasdek is volgens onze berekeningen reeds vanaf half april redelijk droog. De genoemde getallen moeten worden gezien als inschatting van de werkelijkheid, exacte getallen uit de praktijk zijn niet bekend.

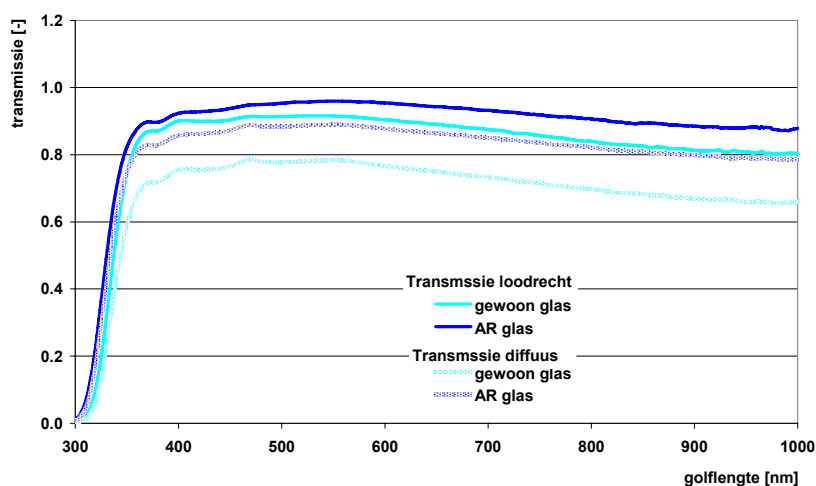
Op grond van deze inschatting kan worden gesteld dat een enkellaags AR glas de beste werking heeft van mei tot september, tijdens de wintermaanden treedt vaak condensatie op, waardoor de coating op de binnenkant buiten werking is. Aan de andere kant zou de lichttransmissie van standaard glas door meer druppelvormige condensatie echter nog verder afnemen (>2% meer t.o.v. AR glas), waardoor het aanbrengen van een AR coating nog steeds nuttig is.



Figuur 34. Detailfoto water in de vorm van druppels op standaard glas (links) en water in vorm van een film op AR glas (rechts), de glasmonsters liggen op de van binnen verlichte Ulbricht kogel, het ronde oppervlak is de meetopening van de kogel.

Tabel 11. Lichttransmissie van standaard glas en AR glas in droge en natte toestand; gemiddelden over PAR-gebied 400-700nm (NEN-2675).

	Zonder water		Met waterlaag	
	loodrecht	diffuus	loodrecht	diffuus
standaard glas	0,890	0,822	0,903	0,766
AR glas	0,973	0,906	0,947	0,875



Figuur 35. Spectrale transmissie bij loodrechte en diffuse lichtinval van standaard glas en AR glas in natte toestand.

3.2 Energiebesparing en effecten op klimaat bij toepassing van Anti-reflectie-glas

3.2.1 Klimaat en energie

Het invloed van enkel- en dubbellaags AR glas op kasklimaat en energieverbruik is onderzocht in vergelijking met tuinbouwglas 90+. Voor verschillende materiaalcombinaties zijn met klimaatsimulatiemodel KASPRO berekeningen uitgevoerd. Voor de berekeningen wordt een traditionele Venlo-kas met luchtramen van 2 ruit breed (2.5 meter) en 1.4 meter hoog aangenomen. De kasuitrusting, setpoints en teeltwijze zijn beschreven in Bijlage I en vormen zo een aan de praktijk gelijkwaardige tomatenteelt. De onderzochte kasdekmaterialen zijn enkel- en dubbellaags AR glas ten opzichte van tuinbouwglas 90+. Het model en de berekeningsmethode is beschreven in hoofdstuk 2.3.1.

Zoals in paragraaf 3.1.1 al beschreven is, geeft de hogere transmissie van AR-glas de mogelijkheid om een dubbeldeksuitvoering te maken, waarbij de transmissie gelijkwaardig is aan die van een enkeldeks kas met tuinbouwglas 90+. Naast een energiebesparingeffect omdat het warmteverlies van een dubbeldek sterk verminderd, heeft een dubbeldek ook gevolgen voor de vochthuishouding in de kas. Doordat de dektemperatuur in een dubbeldek situatie toeneemt, zal er minder condensatie tegen het kasdek plaatsvinden, waardoor er minder vocht wordt afgevoerd. Bij de teeltstart is dit een positief effect, echter later in de teelt als er juist veel vocht afgevoerd moet worden, kan dit juist een nadelig effect zijn. Er zou dan juist meer geventileerd moeten gaan worden dan in een kas met een enkeldek. Naast een vermindering in de energiebesparing zou dit ook nadelige gevolgen voor het CO₂-niveau kunnen hebben. Om inzicht te krijgen in de hier beschreven effecten is bij de berekeningen ook aandacht besteed aan condensatie tegen het kasdek en CO₂-dosering.

In Tabel 12 zijn de jaarrond resultaten van deze 4 cases weergegeven. AR glas bespaart in deze berekeningen ca. 2% gas ten opzichte van tuinbouwglas 90+. De dubbeldeks uitvoeringen besparen ca. 24% energie ten opzichte van de enkeldeks uitvoeringen, onafhankelijk van het gebruikte materiaal. Deze grote besparing, kan op bepaalde momenten ervoor zorgen dat er minder CO₂ beschikbaar is. Dit is af te leiden uit de CO₂-concentratie tijdens de uren dat het licht is, die duidelijk lager ligt voor de cases met dubbeldek, terwijl er ook nog eens minder CO₂ gedoseerd is. Dit duidt op een incidentele CO₂ tekort, dat geen invloed lijkt te hebben op de productie. Later in deze paragraaf zal daar verder op worden ingegaan.

Tabel 12. Jaarrond kasklimaat en energieverbruik van enkel- en dubbellaags tuinbouwglas 90+ en AR glas.

		Glas 90+ enkel	Glas 90+ dubbel	AR glas enkel	AR glas dubbel
Gasgebruik	[m ³ /m ²]	43,4	32,9	42,7	32,1
Biomassa	[kg DS/m ²]	6,0	5,5	6,3	6,0
Verdamping	[l/m ²]	767	735	810	801
CO ₂ gedoseerd	[kg/m ²]	37,6	36,6	37,7	36,6
CO ₂ -concentratie (als licht)	[ppm]	708	684	699	671
Condensatie top-dek ¹⁾	[kg/m ²]	13,6	5,5	13,6	5,5
Condensatie kas-dek ¹⁾	[kg/m ²]	89,3	23,5	89,4	23,5
Dampafvoer top-buiten ¹⁾	[kg/m ²]	7,3	13,7	7,4	14,0
Dampafvoer kas-buiten ¹⁾	[kg/m ²]	670,9	706,2	713,7	771,6
PAR diffuus ²⁾	[MJ/m ²]	929,5	830,5	1002,2	936,7
PAR direct ²⁾	[MJ/m ²]	373,7	332,3	403,6	375,5
Globale straling ³⁾	[MJ/m ²]	3618	3618	3618	3618
Kaslucht temperatuur	[°C]	18,8	18,9	18,8	19,0
Kaslucht RV	[%]	82,7	85,0	82,6	84,7
Raamstand	[%]	22,3	24,4	22,9	25,4
Scherm	[uren]	1976	1966	1976	1965

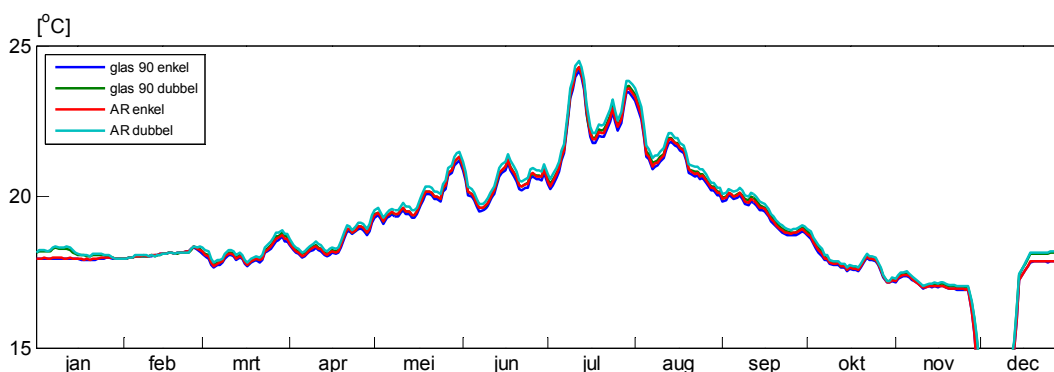
¹⁾ In het model wordt onderscheid gemaakt tussen uren dat het scherm gesloten is (meer dan 80% gesloten) en uren dat het scherm geopend is. Indien het scherm gesloten is, wordt er een extra compartiment 'top' gecreëerd. Voor de condensatie en dampafvoer wordt dit onderscheid ook gemaakt. Top-dek en top-buiten zijn dus in feite momenten dat het scherm geopend is en kas-dek en kas-buiten de perioden dat het scherm geopend is.

²⁾ Gemeten op gewasniveau.

³⁾ Gemeten buiten de kas.

Temperatuur en vocht

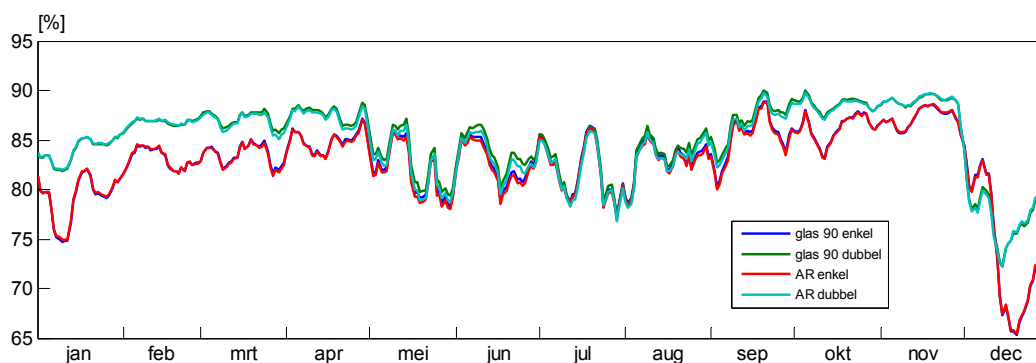
De kasluchttemperatuur van de dubbeldeks kassen ligt in het algemeen boven die van de enkeledeks kassen, Figuur 36. In de opstartfase van de teelt is dit vooral het gevolg van de minimumbuis temperatuurinstellingen, in combinatie met het schermgebruik en een relatief grote dode zone, die voorkomt dat er bij een temperatuuroverschrijding van het setpoint verwarmen al snel wordt afgelucht. Er wordt in de dubbeldeks kassen soms teveel energie ingebracht. Algemeen gesproken wordt het door het verminderde warmteverlies door de dubbele dekken gemiddeld 0,2°C warmer dan in de enkeledeks kassen. Ook onder AR glas wordt het licht warmer dan onder tuinbouwglas 90+, vooral in de zomermaanden. De verschillen zijn echter klein.



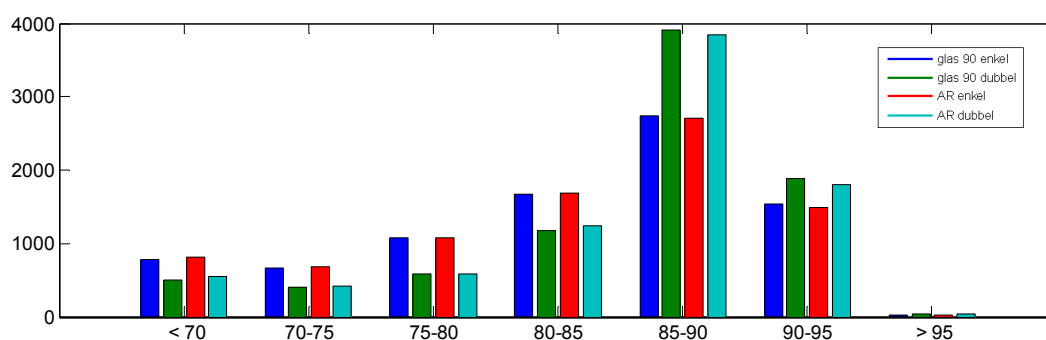
Figuur 36. Daggemiddelde van de gerealiseerde kasluchttemperatuur weergegeven als een voortschrijdend gemiddelde over 7 dagen.

Bovendien verandert de vochtthuishouding. Dit is niet alleen het gevolg van andere temperaturen, die de verdamping zullen beïnvloeden, maar ook van de vochttafvoer. Door de hogere isolatiegraad van de dubbele dekken, neemt de glastemperatuur toe, waardoor er minder condensatie tegen het kasdek zal plaatsvinden. Hierdoor zal het vochtiger worden. Uit Tabel 12 blijkt dat de condensatie bij de dubbeldeksuitvoeringen met ca 70% drastisch afneemt. Dit zal gecompenseerd moeten worden door extra ventilatie. Omdat het AR-glas een hogere transmissie heeft, zal er ook meer energie in de kas komen, wat resulteert in een lichte toename van de verdamping. Deze verdampingstoename wordt niet via condensatie maar vrijwel uitsluitend via de luchtramen afgevoerd (Tabel 12). Figuur 37 laat de gerealiseerde RV zien. Daarin vallen verschillen tussen enkel- en dubbellaagse kasdekken meer op dan tussen AR glas en tuinbouwglas 90+. Alleen tijdens de zomermaanden, waar de ventilatie niet vocht maar vooral temperatuur gerelateerd is, is er vrijwel geen verschil in de gerealiseerde kaslucht RV tussen de verschillende kasdekken. De rest van het jaar zijn de verschillen behoorlijk. Op jaarbasis is de gemiddelde RV ongeveer 2 a 2.5% hoger in de dubbeldeksuitvoering dan in de enkeledeks uitvoering (Tabel 12). Deze hogere vochniveaus komen goed tot uitdrukking in Figuur 38, waar een histogram van de RV is gemaakt voor alle uren dat de teelt duurt. Hier zijn dus de uren van de teeltwisseling buiten beschouwing gelaten. Dit histogram maakt nog eens duidelijk dat er bij de dubbele dekken een grotere verschuiving plaats vindt naar de hogere vochniveaus. Het setpoint RV ligt, afhankelijk van het dagdeel, op 85% of 87%. Hierdoor vallen de meeste uren ook in de klasse 85-90. Door de regeling zullen er veel uren zijn dat de RV rondom het setpoint hangt. Vandaar ook dat er vrijwel geen uren zijn met een RV > 95%.

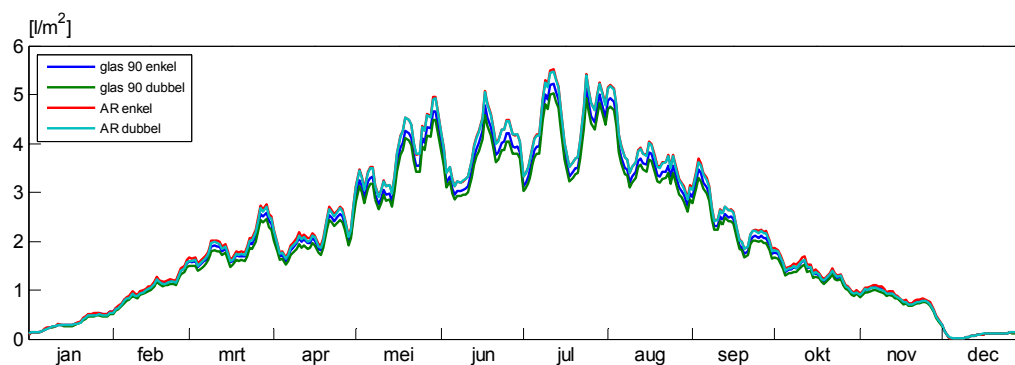
Zoals uit Tabel 12 is op te maken, wijkt de verdampingssom tussen de 4 kasdekmaterialen nogal fors af, met een verschil dat wel op kan lopen tot ongeveer 10%. Deze verschillen kunnen geheel verklaard worden uit de verschillen in transmissie, zoals deze in Tabel 6 en Tabel 7 zijn gegeven. In Figuur 39 is de dagsom van de verdamping weergegeven. Bij de teeltstart zijn de verschillen zo klein, dat dit niet uit de grafiek is op te maken. In het voor- en najaar is de volgorde altijd gerelateerd aan de transmissie van de kas, het meeste licht geeft de meeste verdamping.



Figuur 37. Daggemiddelde van de gerealiseerde kaslucht RV weergegeven als een voortschrijdend gemiddelde over 7 dagen.

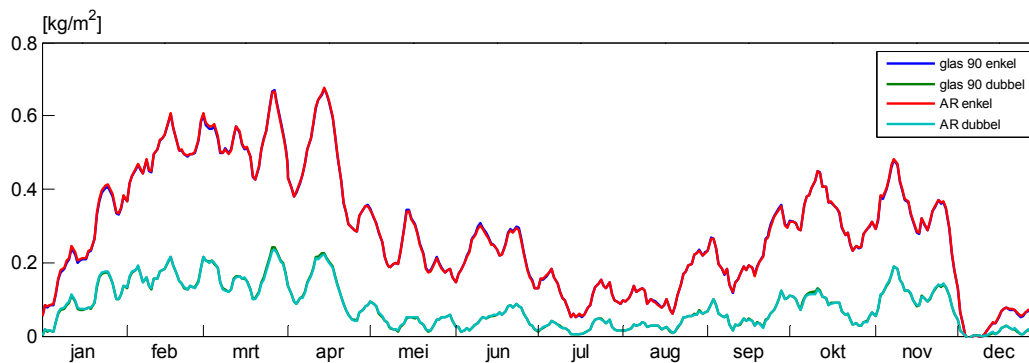


Figuur 38. Histogram van de gerealiseerde kaslucht RV.



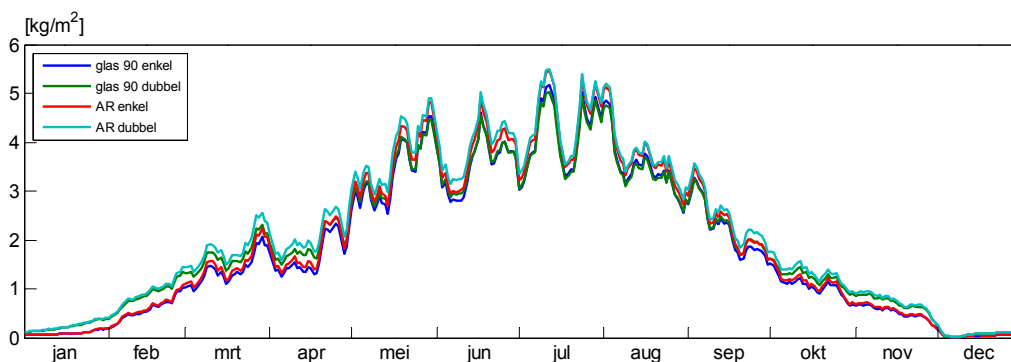
Figuur 39. Dagsom van de verdamping, weergegeven als een voortschrijdend gemiddelde over 7 dagen.

Deze vochtproductie moet ook weer uit de kas worden afgevoerd. Hierbij wordt dus onderscheid gemaakt tussen condensatie tegen het kasdek en afvoer via de luchtramen. In Figuur 40 is de dagsom van de condensatie tegen het kasdek, weergegeven. Er is vrijwel geen verschil in condensatie tussen de gebruikte materialen in een vergelijkbare opstelling. Wel is er een groot verschil tussen de dubbellaagse en enkellaagse dekken. Dat de condensatie in december en januari nog zo klein is, wordt veroorzaakt door de kleine verdampingssom in die periode, die veroorzaakt wordt door weinig licht en een kleine plant.



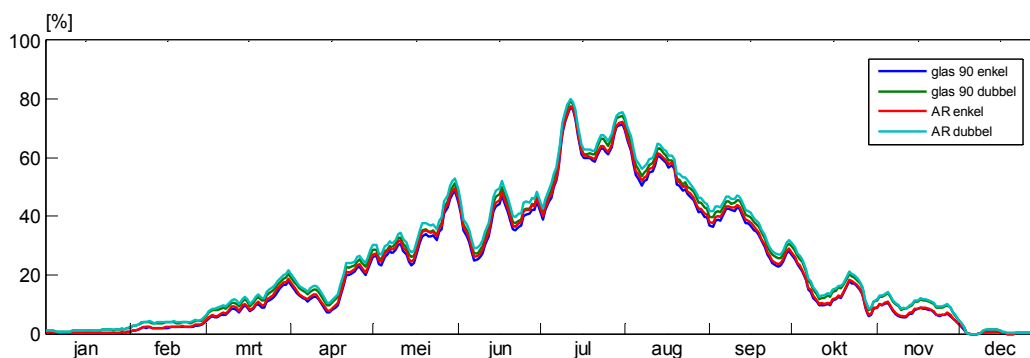
Figuur 40. Dagsom van de condensatie tegen het kasdek, weergegeven als een voortschrijdend gemiddelde over 7 dagen.

Wat niet condenseert zal via de luchtramen afgevoerd moeten worden, indien het vochniveau in de kas te hoog is. Een deel van de verminderde condensatie zal dan ook alsnog via de luchtramen moeten worden afgevoerd. Dat is ook goed op te maken uit Figuur 41, waar uit blijkt dat vooral in de wintermaanden de kassen met een dubbeldek meer vocht moeten afvoeren via de ramen. In het voorjaar en de zomer kan dit variëren als gevolg van ventilatie op temperatuur die de overhand kan krijgen en de lichttransmissie.



Figuur 41. Dagsom van de vochtafvoer via de luchtramen, weergegeven als een voortschrijdend gemiddelde over 7 dagen.

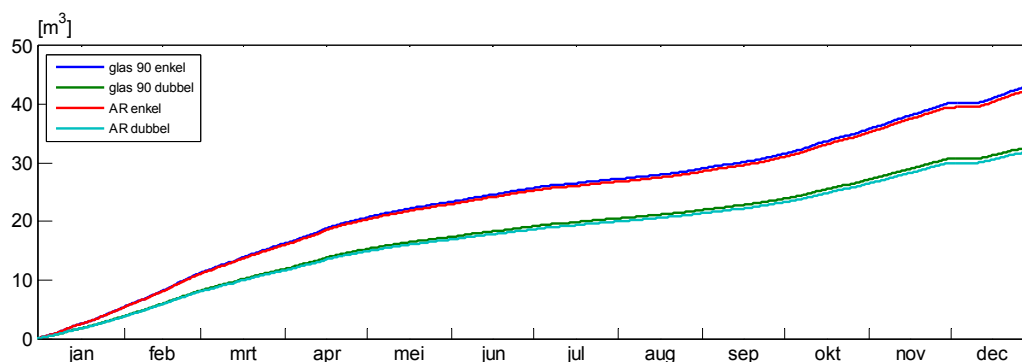
Vochtafvoer via de ramen kan alleen bereikt worden door de ramen te openen. In Figuur 42 is de daggemiddelde raamstand geprojecteerd. De combinatie van hogere temperaturen (Figuur 36) en 'weinig' condensatie (Figuur 40) tegen het kasdek (dus hogere vochniveaus in de kas, Figuur 37) leiden tot een toename in de ventilatie. Jaarrond wordt er in de dubbeldeks-kassen dan ook meer geventileerd. Hoewel de verschillen in de winterdag klein zijn, moet wel bedacht worden dat door het grote temperatuurverschil binnen–buiten er per m^3 uitgewisselde kaslucht meer vocht afgevoerd wordt dan bij kleine temperatuurverschillen binnen–buiten. Hierdoor gaat ook een deel van de energiebesparing verloren.



Figuur 42. Daggemiddelde van de raamstand aan de lijzijde, weergegeven als een voortschrijdend gemiddelde over 7 dagen.

Gasverbruik en CO₂

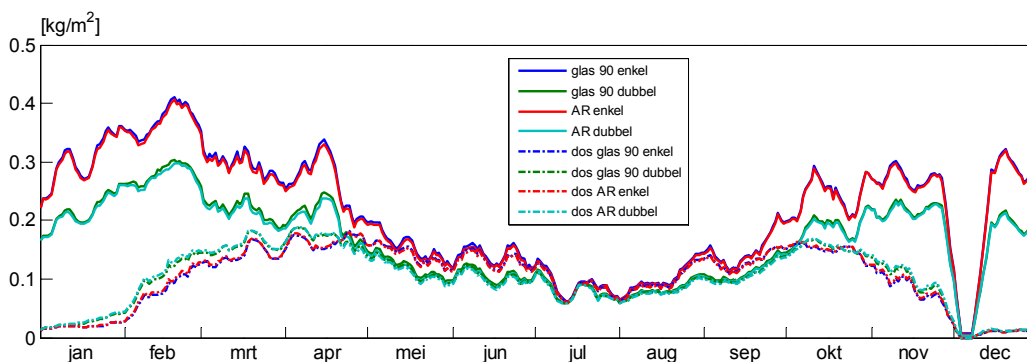
Door de isolerende werking neemt het energiegebruik bij toepassing van een dubbel dek fors af, met name in de winter en het najaar. In de periode oktober tot medio april is de besparing dan ook het grootst. In de 5 zomermaanden mei tot en met september wordt er slechts 2 m³ van de ca. 10 m³ bespaard. (Tabel 12). In Figuur 43 is het cumulatieve gasgebruik weergegeven. Hierbij presteren de kasdekken met AR-glas net iets beter dan de dekken met tuinbouwglas 90+. De hogere lichttransmissie van de AR-dekken (Tabel 6 en Tabel 7) levert netto, ca. 0.7 m³, meer besparing op dan dat de extra verdamping (Tabel 12) kost.



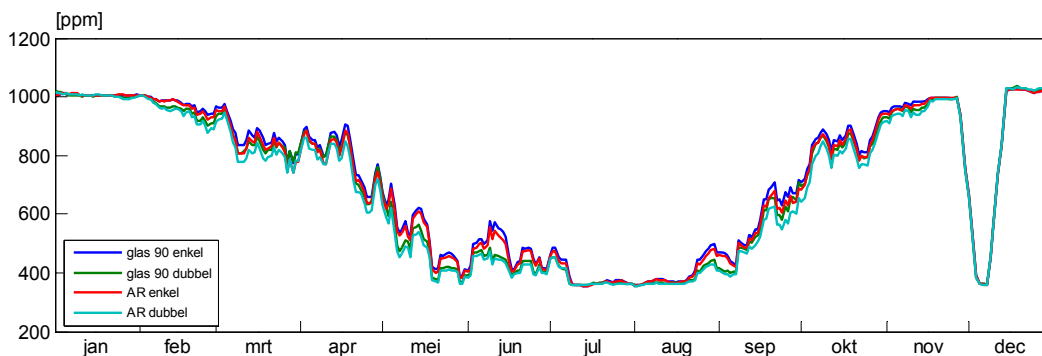
Figuur 43. Cumulatief gasgebruik.

In de kassen met dubbeldek ligt het energiegebruik en dus de CO₂-productie het gehele jaar onder die van de kassen met een enkel dek. Alleen in de periode juli–augustus is er hoegenaamd geen verschil. Opvallend is dat in de periode medio januari tot 2^e helft april en na de eerste helft oktober tot het einde van de teelt er in de dubbeldekskassen meer CO₂ wordt gedoseerd. Dit is het gevolg van de grotere ventilatie in de dubbeldekskassen. CO₂-vraag en CO₂-productie zijn niet altijd op elkaar afgestemd. In Figuur 44 is de dagsom van de CO₂-productie en de CO₂-dosering weergegeven. De CO₂-productie is gelijk aan het dagelijkse gasgebruik waarbij er vanuit is gegaan dat verbranding van 1 m³ aardgas 1.8 kg CO₂ oplevert. De CO₂-dosering is wat er dagelijks aan CO₂ is gedoseerd. Dit is nog niet noodzakelijkerwijs de CO₂-vraag want de CO₂-vraag is vrijwel onbegrensd. Bij volledig geopende ramen is het setpoint CO₂ nog steeds 1000 ppm, echter de systeemgrenzen beperken de gedoseerde hoeveelheid CO₂. Deze grens wordt door 2 parameters begrensd: de maximale doseercapaciteit (180 kg CO₂ per ha per uur) en het uitgangspunt dat er geen warmte vernietigd wordt. Hierdoor wordt er niet meer CO₂-gedoseerd dan dat er voor de warmtebehoefte (via de buffertank) beschikbaar is. Een optie met aanvullende CO₂-dosering is hier niet in beschouwing genomen.

Figuur 44 laat zien dat in de dubbeldekskassen in de periode eind april tot begin oktober alle beschikbare CO₂ ook wordt gedoseerd (de stippellijnen die de dosering weergeven, vallen samen met de CO₂-productie). Voor de enkeldeks kassen is deze periode korter, van medio mei tot medio september. In feite betekent dit dat er in deze periode een tekort aan CO₂ is. Deze verminderde beschikbaarheid van CO₂ heeft ook zijn weerslag in het in de kas bereikte CO₂-niveau. Het verschil in CO₂-niveau in de periode eind april – half mei en half september – half oktober wordt gedeeltelijk verklaard doordat in die periode in de dubbeldeks kassen er in feite al een CO₂ te kort is en dat er minder CO₂ geproduceerd wordt doordat de warmtevraag kleiner is in de dubbeldeks kassen. In de periode juli – augustus is er geen verschil omdat er dan ook een gelijke CO₂ productie is. In Figuur 45 is het CO₂-niveau van 13:00 uur 's middags weergegeven (dit geeft een goed beeld van het jaarrond CO₂-niveau). Het CO₂-niveau in de kassen met dubbeldek ligt vrijwel jaarrond lager dan in de kassen met enkel dek. De verschillen in CO₂-niveau tussen AR glas en tuinbouwglas 90+ zijn klein, de CO₂-concentratie onder AR glas is gemiddeld 10ppm lager dan onder tuinbouwglas 90+ (Tabel 12).



Figuur 44. Dagsom van de CO₂productie(-) en de CO₂dosering (-.-), weergegeven als een voortschrijdend gemiddelde over 7 dagen.



Figuur 45. CO₂-niveau van iedere dag 13:00 uur in de middag, voortschrijdend gemiddelde over 7 dagen.

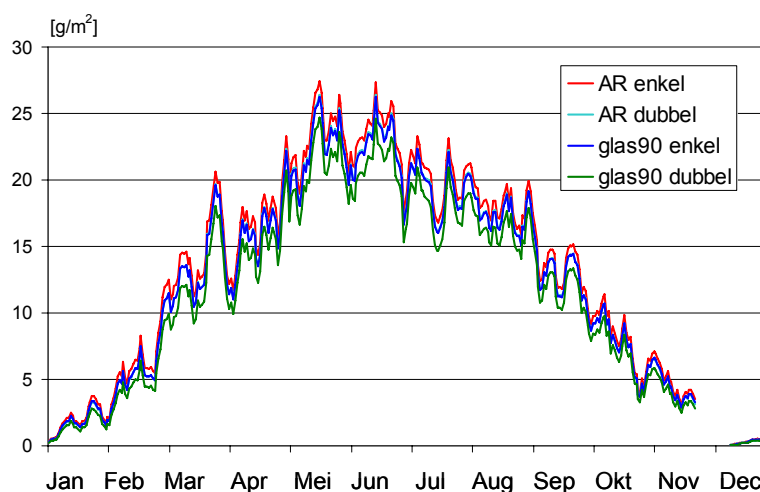
3.3 Effecten op de gewasproductie bij toepassing van Anti-reflectie-glas

Licht, CO₂ en temperatuur vormen samen in combinatie de belangrijkste groeistenen voor de productie. De verschillen in kasluchttemperatuur zijn op de wintermaanden na klein (Figuur 36) zodat dit slechts marginale invloed heeft op de productie. In Tabel 12 is de jaarsom van de biomassa productie van tomaat onder enkel- en dubbellaags AR glas vergeleken met tuinbouwglas 90+ weergegeven. De resultaten van de modelberekeningen laten zien dat de productie van tomaat onder enkellaags AR glas het hoogste zijn en de productie onder AR glas in dubbeluitvoering gelijk is aan dat onder enkel tuinbouwglas 90+. In Tabel 13 zijn de meest relevante productiekenmerken weergegeven als percentage ten opzichte van de referentie (tuinbouwglas 90+ enkel).

Tabel 13. Productiekenmerken ten opzichte van de productie onder glas 90 enkel.

	Glas 90+ enkel	Glas 90+ dubbel	AR enkel	AR dubbel
Geabsorbeerde PAR	100	89	108	101
Totale biomassa (droog gewicht)	100	92	106	100
Bladeren	100	92	105	100
Stengel	100	91	106	100
Wortels	100	91	106	100
Vruchten	100	92	105	100
Gemiddelde bladoppervlakte	100	97	102	100
Vers gewicht	100	93	105	101

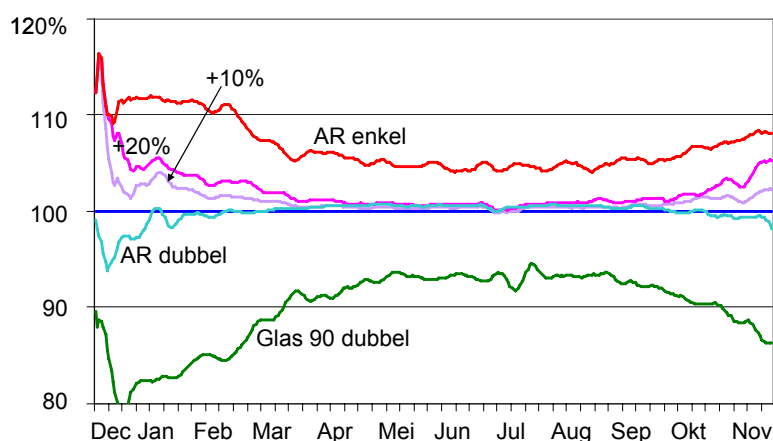
Figuur 46 geeft de dagsom van de vruchtproductie weer. Het verschil tussen de enkeldeks kassen enerzijds en de dubbeldekskassen anderzijds wordt voornamelijk veroorzaakt door de verschillen in lichtopbrengst. Absoluut gezien, is het effect het grootst in de maanden met het meeste licht. Enkellaags AR glas geeft de hoogst opbrengst. De opbrengst van AR dubbel en tuinbouwglas 90+ is vergelijkbaar en de opbrengst onder dubbel tuinbouwglas is het laagst.



Figuur 46. Dagsom van de vruchtproductie, weergegeven als een voortschrijdend gemiddelde over 7 dagen. De lijnen van AR dubbel en glas90 enkel zijn vrijwel gelijk.

Een indruk van het effect van de verschillende kasdekken in de perioden waar de lichtopbrengst de limiterende factor voor productie is, is gegeven in Figuur 47, waar de dagsom van de vruchtgroei is weergegeven, in relatie tot de groei in de referentiekas. Vooral in de winter kan daarom verwacht worden dat de productie onder AR glas flink hoger is dan onder tuinbouwglas 90+. Ook de productie onder dubbel AR is goed, bijna vergelijkbaar met traditioneel tuinbouwglas 90+. Alleen in de beginfase zal de vruchtproductie iets achter lopen. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het lagere CO₂-niveau in de kas.

In Figuur 47 is ook weergegeven wat het effect is van meer licht onder kleine zonnestanden. Er is een fictief kasdek aangenomen, glas 90 enkel, met een verhoogde doorlatendheid (10% dan wel 20%) bij kleine zonnestanden (elevaties <10°). Door een analyse van de groei blijkt dat vooral aan het begin van de teelt een deel van de betere prestatie van AR glas veroorzaakt wordt door een hogere lichttransmissie onder kleine elevaties.



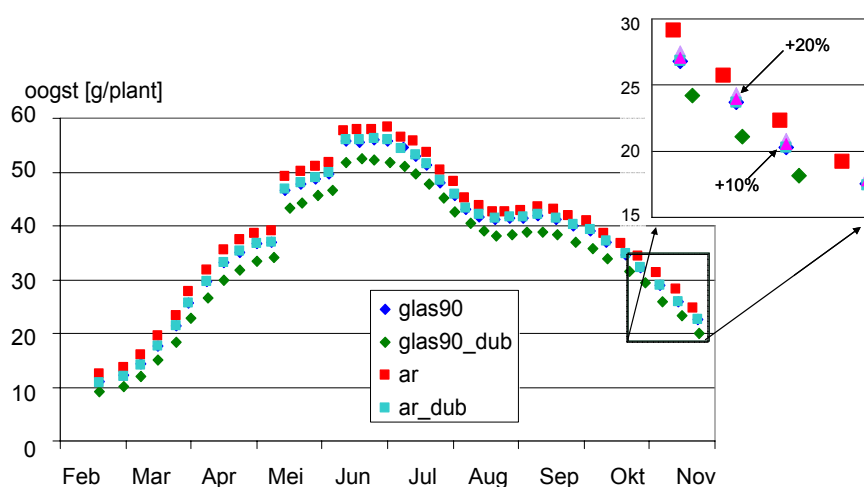
Figuur 47. Dagelijks groei van de vruchten onder de verschillende kasdekken ten opzichte van de groei in de referentiekas gedekt met tuinbouwglas 90+. De x-as geeft de weken na start van de teelt weer.

De snelheid van de gewasontwikkeling, de vorming van bladeren en trossen, is ook sterk afhankelijk van de temperatuur. Omdat de klimaatregeling echter ervoor zorgt dat de gewenste temperatuur gerealiseerd wordt, worden de eerste trossen onder alle kasdekmaterialen tegelijk geogst. Het verschil in lichtsom onder de kasdekmaterialen vertaalt zich echter in zwaardere vruchten, daar waar meer groei heeft plaatsgevonden. Het drooggewicht van de eerste vier trossen, in alle behandelingen is weergegeven in Tabel 14. Het effect een hoger lichtsom bij kleine elevaties van de zon verklaard een deel van de betere prestatie van AR glas (Figuur 20). Het effect is relatief het grootst in de eerste tros, later speelt de lichtopbrengst door kleine elevaties steeds minder een rol.

Om een indruk te krijgen van het verschil in efficiëntie van gasverbruik, tot aan de eerste oogst, is berekend hoeveel gram droge stof (DS) er per m³ gas in de vruchten is opgeslagen. Dan blijkt dat met een kuub gas onder gewoon glas 2.7 g DS in het eerste geogste tros wordt opgeslagen, terwijl dit 3.1 onder een antireflectie dek en zelfs 3.8 gram DS bij AR in dubbel uitvoering is. Dat is een verhoging van de efficiëntie van 12% en zelfs 40% voor respectievelijk AR enkel en AR dubbel. Deze verhouding in efficiëntie blijft vrijwel hetzelfde tot aan de vierde tros. Er is dus een goed perspectief voor het gebruik van AR glas en voor AR glas in een dubbele uitvoering.

Tabel 14. Drooggewicht (g per plant) van de eerste vier trossen in alle scenario's, inclusief het fictief (glas 90) dek dat 10%, respectievelijk 20% meer licht doorlaat bij een zon elevatie kleiner dan 10°.

Oogstdag	1 ^{ste} tros 18 Feb	2 ^{de} tros 1 Mrt	3 ^{de} tros 9 Mrt	4 ^{de} tros 17 Mrt
Glas 90+ enkel	12,1	13,2	15,3	18,7
Glas 90+ dubbel	10,1	11,0	12,9	16,0
AR enkel	13,4	14,6	16,9	20,5
AR dubbel	11,9	13,0	15,2	18,6
+10%	12,4	13,5	15,6	19,0
+20%	12,7	13,7	15,8	19,2



Figuur 48. Jaarverloop van het oogst gewicht (g droge stof per plant per oogstdag) in de verschillende behandelingen. De twee fictieve dekken met verbeterde doorlatendheid bij kleine invalshoeken zijn alleen in de vergroting getoond voor de duidelijkheid van de grafiek.

3.4 SWOT-analyse

In de onderstaande SWOT-analyse zijn de sterktes en zwaktes geanalyseerd en de richting van wenselijke vervolgacties aangegeven. Hiervoor zijn de resultaten van beschreven werkzaamheden en andere economische en technische aspecten, zoals prijsontwikkeling, markt, levensduur, toepasbaarheid in bestaande kasconstructies. Er wordt een aparte SWOT-analyse opgesteld voor enkellaags anti-reflectie-glas (Tabel 15) en dubbellaags anti-reflectie-glas (Tabel 16).

Tabel 15. SWOT-analyse enkellaags anti-reflectie-glas.

		Externe analyse van ontwikkelingen (markt, prijsontwikkeling, toepassing, concurrentie)	
		kansen ↓ hoe uit te buiten	bedreigingen ↓ hoe aan te passen
Interne analyse van het product zelf (technische en economische aspecten)	sterkten →	<ul style="list-style-type: none"> Sunarc AR coating verhoogd lichttransmissie van glazen voor direct en diffuus invallend licht met 6-7%punten in droge toestand. (Sunarc AR glas met tweezijdige coating droog: 96-97% loodrecht en 89-90% diffuus) Sunarc AR coating verhoogd lichttransmissie precies in het PAR-gebied (400-700nm). AR glas heeft een hogere lichtdoorlatendheid voor direct licht onder kleine invalshoeken. De lichtopbrengst van AR glas in een praktijkkas bij van der Lans, tomatenteler, op de locatie Rilland was hoger vergeleken met glas zonder coating. De transmissie van de gehele SunergieKas® bij van der Lans gedekt met AR glas inclusief constructie was meer dan 80%. Condensatie treedt op AR glas op als een waterfilm, de transparantie blijft hoog. Daarentegen ontstaan op glas zonder coating druppels, die langer blijven hangen, waardoor de transparantie afneemt. In een traditionele kas met AR glas wordt meer zonne-energie toegevoerd door de hogere lichtdoorlatendheid, daardoor neemt het gasverbruik met 1-2% af. In de onderzochte (semi)gesloten praktijkkas met AR glas leidt de hogere transmissie niet tot meer toevoer van zonne-energie, omdat de gebruikte dakbevoeiing zorgt voor een relatieve afname in transmissie en koelingcapaciteit. De opbrengst van tomaat is verhoogd onder AR glas, omdat de lichtsom op gewasniveau verhoogd is. De energie-efficiëntie neemt tot 10% toe. De lichtopbrengst van een kasdek met enkel AR glas wordt jaarrond op 4-5% geschat (incl. momenten dat het dek nat is als gevolg van condensatie en regen). Bij een productieverhoging van 5% is de terugverdientijd van AR glas 5-6 jaar, bij een productieverhoging van 3% is de terugverdientijd ca. 8 jaar. 	
	zwaktes →		<ul style="list-style-type: none"> AR glas biedt perspectief voor gebruik in traditionele kassen, kan gebruikt worden i.p.v. traditioneel tuinbouwglas. AR glas kan in (semi)gesloten kassen het beste toegepast kunnen worden in combinatie met dakbevoeiing.
		<ul style="list-style-type: none"> 1% meer licht op gewasniveau leidt tot 0.8-1% meer productie bij tomaat, paprika, sla en roos. Reeds op dit moment kost AR glas gezien de levensduur van een kas van 15 jaar jaarlijks maar ca. € 0,45 per m² meer dan traditioneel tuinbouwglas. Als AR glas zal op termijn op grotere schaal geproduceerd wordt, kan dit tot verdere prijsdaling leiden. 	

AR glas enkel		Externe analyse van ontwikkelingen (markt, prijsontwikkeling, toepassing, concurrentie)	
zwakten →	kansen ↓ hoe te verbeteren	bedreigingen ↓ waarvoor oppassen	
<p>Interne analyse van het product zelf (technische en economische aspecten)</p> <ul style="list-style-type: none"> • De AR coating is gedeeltelijk buiten werking als het oppervlak nat is als gevolg van condensatie of regen/dakbevoeiing. • Berekningen wijzen uit dat het kasdek in een traditionele kas rond 90% van de tijd aan de binnenkant nat als gevolg van condens. Weergegevens van het KNMI laten zien dat het dek 5-10% van de tijd nat is op grond van regen. • De transmissie van AR glas met een waterfilm / condensatie neemt met ca. 2.5-3.0% af. Vergeleken met glas zonder coating is de transmissie echter nog steeds hoger (vooral bij diffuus invallend licht), door een kwalitatief beter condenslaag. • In een traditionele kas met AR glas wordt meer zonne-energie toegevoerd door de hogere lichtdoorlatendheid, er moet in de zomer iets vaker gelucht worden, daardoor zal de CO₂-concentratie gemiddeld 1-2% lager zijn. • De investeringskosten zijn hoger dan voor traditioneel glas. • Ander onderzoek wijst uit dat diffuus licht voordelen biedt ten opzichte van direct licht. AR glas maakt het licht echter niet diffuus. 	<ul style="list-style-type: none"> • Door condensatie aan de binnenkant van het dek te verminderen zal het dek minder nat zijn en de licht-opbrengst verder stijgen. • Hoe vaak condensatie in een praktijkkas jaarrond optreedt is niet bekend, hiervoor zou nader onderzoek nodig zijn. • Ramen toch langer gesloten houden, telen bij hogere temperaturen, gebruik van temperatuurintegratie. • Gebruik van een NIR-reflecterend scherm tijdens de zomermaanden. • Als AR glas zal op termijn op grotere schaal geproduceerd wordt, kan dit tot verdere prijsdaling leiden. 	<ul style="list-style-type: none"> • Minder condensatie mag niet leiden tot een hogere luchtvochtigheid, ontvochtiging zou dan ook belangrijk zijn. • Nieuwe materialen ontwikkelen met een hoge lichtdoorlatendheid en diffuse eigenschappen. • Het nieuwe materiaal moet zijn hoge lichtdoorlatendheid behouden met een gelijkijdig zo laag mogelijke prijs. 	

Tabel 16. SWOT-analyse dubbellaags anti-reflectie-glas.

AR glas dubbel		Externe analyse van ontwikkelingen (markt, prijsontwikkeling, concurrentie)	
sterkten →	kansen ↓ hoe uit te buiten	bedreigingen ↓ hoe aan te passen	
<p>Interne analyse van het product zelf (technische en economische aspecten)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dubbellaags isolerend glas met een vierzijdige AR coating heeft een lichttransmissie van 90-94% voor direct en 82-86% voor diffuus invallend licht. Deze waardes zijn zelfs hoger dan voor de meeste enkellaagse tuinbouwglazen. Vergeleken met traditioneel dubbellaags tuinbouwglas is de lichtdoorlatendheid zelfs meer dan 10% hoger. • Sunarc AR coating verhoogd lichttransmissie precies in het PAR-gebied van 400-700nm. • Een dubbellaags AR glas geeft naar verwachting een iets hogere lichtsom op gewasniveau dan enkellaags tuinbouwglas. • Condensatie treedt op als een waterfilm, de transparantie blijft hoog. Daarentegen ontstaan op glas zonder coating druppels, die langer blijven hangen, waardoor de transparantie afneemt. • Het kan worden verwacht dat een dubbellaags AR glas met een vierzijdige coating een relatief betere prestatie levert tijdens condensatie dan enkel AR glas. Zelfs is de binnenkant nat als gevolg van condensatie, blijven de ander drie lagen werken en zal de lichtopbrengst nog steeds hoog zijn. Bovendien treedt rond 20% minder vaak condensatie op een isolerend dek. • Het gasverbruik onder dubbellaags anti-reflectie-glas neemt met 26% af. • De energie-efficiëntie neemt tot 40% toe. • Verondersteld dat de opbrengst onder dubbel AR glas gelijk is aan die van tuinbouwglas 90+, is de terugverdientijd van een kasdek met dubbel AR glas 7 jaar, als de productie 2% minder is dan onder tuinbouwglas 90+, ligt de terugverdientijd rond de 9 jaar. • Materiaal combineert de volgende goede eigenschappen: Hoge lichtdoorlatendheid, hoge energiebesparing, niet-brandbaar, weinig vervuiling, nagenoeg geen druppelvorming. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dubbel AR glas biedt perspectief voor toepassing in de glastuinbouw-productie. Hierdoor kan een zeer hoge lichttransmissie gecombineerd worden met een hoge energiebesparing. Tuinders profiteren van een hoge lichtsom op gewasniveau en een daarmee onverminderde productie. Het energieverbruik van de tuinbouwsector wordt drastisch gereduceerd. 	<ul style="list-style-type: none"> • Onderzoek naar dubbel AR glas nodig om mogelijke risico's voor tuinders weg te nemen en om het beste systeem te ontwikkelen. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nadenken hoe dubbel AR glas het beste uitgevoerd kan worden, als isolerend materiaal met een vaste spouw, als twee losse ruiten in een roede of een nog ander systeem. Hierbij afwegen van technische mogelijkheden en voordelen tegenover kosten nodig.

AR glas dubbel		Externe analyse van ontwikkelingen (markt, prijsontwikkeling, concurrentie)	
zwakten →	kansen ↓	bedreigingen ↓	waarvoor oppassen
<p>(Interne analyse van het product zelf)</p> <ul style="list-style-type: none"> • De AR coating aan de binnenkant s gedeeltelijk buiten werking als het oppervlak nat is als gevolg van condensatie • De CO₂-concentratie is gemiddeld lager onder dubbel AR glas als gevolg van een geringere gasverbruik. Een deel van de productieverhoging gaat hierdoor verloren. • Gemiddelde kasluchttemperatuur en luchtvochtigheid zijn licht hoger dan onder traditioneel tuinbouwglas. In een traditionele kas zal meer ventilatie nodig zijn voor vochtafvoer. Een deel van het energiebesparend effect gaat dan ook verloren door meer ventilatie. • De investeringskosten zijn hoger dan voor enkellaags tuinbouwglas, de huidige standaard. • Het hogere gewicht van dubbel AR glas zal aanpassingen vragen aan de kasconstructie. 	<ul style="list-style-type: none"> • Condensatie aan de binnenkant van het dek verminderen. • Hoe vaak condensatie in een praktijkkas jaarrond optreedt is niet bekend, hiervoor zou nader onderzoek nodig zijn. • Optimalisatie CO₂, temperatuur en vocht nodig. In (semi)praktijkonderzoek aandacht besteden aan optimalisatie kasklimaat. • Als AR glas zal op termijn op grotere schaal geproduceerd worden, kan dit tot verdere prijsdaling leiden. 	<ul style="list-style-type: none"> • Minder condensatie mag niet leiden tot een hogere luchtvochtigheid, ontvochtiging zou dan ook belangrijk zijn. 	
(technische en economische aspecten)			

4. Conclusies en aanbevelingen

Tuinders zullen vanwege de hogere lichtopbrengst in de kas voor AR glas kiezen. Dat geeft hun extra productie en daarmee een hogere energie-efficiënte. Aangezien de hoge lichttransmissie en de relatief hoge lichtwinst per € investeringskosten zijn ook oplossingen zoals dubbel AR glas denkbaar. In dit geval zou een nieuw dekmateriaal ontstaan met een lichttransmissie vergelijkbaar met traditioneel enkel tuinbouwglas, een energiebesparing vergelijkbaar met andere dubbele materialen (zoals Acrylplaten en ZigZag-platen), maar tegen lagere investeringskosten verbonden met voordelen tegenover andere materialen zoals niet-brandbaar, weinig vervuiling, nagenoeg geen druppelvorming.

Onderzoek in dit project heeft de volgende resultaten naar voren gebracht:

- De lichttransmissie van AR glas ten opzichte van tuinbouwglas 90+ is een belangrijke factor. In het lab gemeten waardes liggen tussen 5.5-7.5 hoger voor AR glas ten opzichte van tuinbouwglas 90+, afhankelijk van de coating.
- De lichttransmissie van dubbel AR glas ligt hoger dan die van enkel tuinbouwglas 90+.
- De anti-reflectie-coating is gedeeltelijk buiten werking als deze nat is als gevolg van condensatie aan de binnenkant of door regen (of dakbevoeiing) aan de buitenkant.
- In de standaard meetmethode (NEN 2675) wordt geen rekening gehouden met natte materialen. Het meten van nieuwe kasdekmaterialen zoals glazen met een coating geeft een verkeerd beeld over de prestatie in de praktijk. Een aanpassing van de meetmethode zou moeten worden overwogen.
- Vooral de mate van condensatie in een kas heeft sterke invloed op de lichtopbrengst van AR glas op gewasniveau. Hoe vaak is het dek in de praktijk echt nat? Een eerste inschatting op basis van fysische principes laat zien, dat het dek ca. 90% van de tijd nat is, vooral in de wintermaanden. De mate van condensatie zal o.a. afhangen van het type gewas, het teeltsysteem en het kassysteem. En welk invloed heeft de condensatie op de lichtopbrengst op gewasniveau? Een eerste inschatting laat zien, dat vooral bij druppelvorming de diffuse lichttransmissie van tuinbouwglas tot 5.6% achteruit kan gaan, voor AR glas zijn dit maar 3% doordat de coating aan één kant dan buiten werking is. De transmissie van AR glas zal dan echter nog steeds hoger zijn dan die van tuinbouwglas.
- De gemeten lichtopbrengst in de semi-gesloten praktijkkas was sterk afhankelijk van de condities in de kas en dakbevoeiing aan de buitenkant. In de onderzochte praktijkkas waren droge momenten op het kasdek schaars, omdat een belangrijk onderdeel van het kassysteem warmteafvoer via dakbevoeiing was. Van de buitenkant was het dek dus vaak nat. Bewolkte dagen gingen tijdens de meetperiode vaak gepaard met regen. Op heldere dagen of momenten naam de warmtetoever door zonnestralingenergie naar de kas toe, de overtollige warmte werd o.a. afgevoerd door aanzetten van de daksproeiers. Ook van de binnenkant was het dek vaak nat door condens. Deze trad vaker op, omdat de vochtgehalte van de lucht in een (semi)gesloten kas vaak iets hoger ligt dan in een traditionele kas met luchtramen, en omdat de dektemperatuur in deze kas vaak verlaagd was door sproeien van koud water op de buitenkant van het dek, waardoor de dektemperatuur afnam.
- In een traditionele kas is er volgens onze analyse nog steeds een minimale lichtwinst van 4-5% te verwachten van AR glas ten opzichte van tuinbouwglas 90+, rekening houdend met condensatie op het dek.
- Dubbel AR glas heeft een vierzijdige coating. Als de binnenkant nat is als gevolg van condensatie, blijft de werking van de drie overige coatings overeind, mits er sprake is van isolatieglas met een afgesloten spouw. De lichtopbrengst van dubbel AR glas zal dus nog steeds ongeveer vergelijkbaar zijn met enkel tuinbouwglas.
- Op basis van berekeningen van AR glas ten opzichte van tuinbouwglas 90+ (uitgaande van droge kasdekmaterialen) is de productie van tomaat met minimaal 3-5% verhoogd. De productie onder dubbel AR glas is gelijk tot 1% hoger.
- Economische berekeningen laten zien dat de terugverdientijd van enkel AR glas 5-6 jaar is en voor dubbel AR glas rond 7 jaar. De winst van het glas zal afhangen van de energieprijzen en de te realiseren materialenprijzen (op dit moment rond €7 hoger dan voor traditioneel glas).

- In de toekomst zou het AR glas ook met andere materiaaleigenschappen zoals lichtverstrooiing (diffusiteit) of warmtewerende eigenschappen (NIR-reflectie) te combineren zijn. Vooral aan een combinatie met diffuse eigenschappen wordt op dit moment door glasproducenten gewerkt. Het optimale materiaal is nu echter nog niet beschikbaar. De combinatie met NIR-reflectie is vooral zinvol voor warme gebieden. In het Nederlandse klimaat zou het een negatieve invloed op het energieverbruik in de wintermaanden hebben.

Samenvattend kan worden geconcludeerd dat vooral AR glas in een dubbele uitvoering als isolatieglas perspectief biedt om het energieverbruik van de tomatenproductie in de toekomst drastisch te verlagen. De energie-efficiënte van dubbel AR glas is tot 40% verhoogd. Ook enkel AR glas geeft perspectief in de vruchtgroentenproductie. Een 4-5% hogere lichtopbrengst in de praktijk is op jaarbasis realistisch en zal de productie verhogen en het energieverbruik in de winter verlagen.

In de toekomst zou dan ook experimenteel onderzoek naar de prestatie van dubbellaags AR glas noodzakelijk zijn. Het effect van dubbel AR glas op energiebesparing, lichtdoorlatendheid en opbrengst moet worden aangetoond in de (semi)praktijk. Hierbij moeten positieve en eventuele onverwachte negatieve aspecten in kaart worden gebracht om het risico van tuinders te minimaliseren. Ook zou nader onderzoek naar het condensatiegedrag van een kasdek wenselijk zijn: (Wanneer is het dek in de praktijk nat? Hoe lang is het dek in de praktijk nat? Welke gevolgen heeft dit voor de lichtopbrengst? Welke mogelijkheden zijn er om de condensatie te minimaliseren? Deze vraagstelling is niet alleen relevant voor glas met een anti-reflectie-coating maar ook voor andere kasdekmaterialen, zoals Stegdoppelplaten.

5. Aanbevelingen

- Experimenteel onderzoek naar de prestatie van dubbellaags AR glas (energiebesparing, opbrengst, lichtopbrengst, eventueel vergelijking dubbel isolatiemateriaal met vaste spouw tegenover goedkopere methode van twee losse glasruiten in een roede), onderzoek in de praktijk (of op proefbedrijf) wenselijk, omdat onverwachte positieve of negatieve aspecten op kunnen treden, nader onderzoek wenselijk om risico van tuinder te minimaliseren.
- Nader onderzoek naar het condensatiegedrag van een kasdek (wanneer is het dek in de praktijk nat? Hoe lang is het dek in de praktijk nat? Welke gevolgen heeft dit voor de lichtopbrengst? Welke mogelijkheden zijn er om de condensatie te minimaliseren?

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. & N.J. van de Braak, 1989.
Reference Year for Dutch Greenhouses. Acta Horticulturae 248.
- 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. Proefschrift Landbouwniversiteit te Wageningen. Publicatie 96-5 IMAG-DLO. ISBN 90-5485-533-9.
- Farquhar, G.D., S. von Caemmerer & J.A. Berry, 1980.
A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta* 149, 78-90.
- Gijzen, H., E. Heuvelink, H. Challa, L.F.M. Marcelis, E. Dayan, S. Cohen & M. Fuchs 1998.
HORTSIM: A model for greenhouse crops and greenhouse climate. Acta Horticulturae 456, 441-450.
- 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.
- IAPWS, 1997.
<http://www.iapws.org/relguide/rindex.pdf>
- Intron, 1994.
Nationale beoordelingsrichtlijn voor schermmaterialen in tuinbouwkassen, rapport nr. 2365/01 van Intron in Houten., January 1st, 1994.
- Marcelis, L.F.M., H.A.G.M van den Boogaard & E. Meinen, 2000.
Control of crop growth and nutrient supply by the combined use of crop models and plant sensors. In: Proc. Int. Conf. Modelling and Control in Agriculture, Horticulture and Post-Harvested Processing. IFAC, 351-356.
- Nederhoff, E.M. & R. de Graaf, 1993.
Effects of CO₂ on leaf conductance and canopy transpiration of greenhouse grown cucumber and tomato. *Journal of Horticultural Science* 68, 925-937.
- Philip Laven, 2006.
<http://www.phiplaven.com/p20.html>.
- Spitters, C.J.T., H.A.M. Toussaint & J. Goudriaan, 1986.
Separating the diffuse en direct component of global radiation en its implication for modeling canopy photosynthesis. Part II. Calculation of canopy photosynthesis. *Agricultural en Forest Meteorology* 38: 231-242.
- Stanghellini, C., 1987.
Transpiration of greenhouse crops. An aid to climate management. Ph. D. Thesis, Agricultural University Wageningen, The Netherlands.
- Yoo, H. & E. Pak, 1993.
Theoretical model of the charging process for stratified thermal storage tanks. *Solar Energy*, 51, 513-519.

Bijlage I.

Berekening van het kasklimaat

Kas

Bij de standaardteelt is uitgegaan van een kas van 4. ha met een goothoogte van 6 meter. De traliemaat is 9.6 meter (2 kappen van 4.8 meter) en de pootafstand is 5 meter.

Het verwarmingssysteem is een standaard systeem voor de intensieve glasgroenteteelt en bestaat uit zes 51 mm buizen per kap in het ondernet en half zo veel 28 mm buizen in het secundaire verwarmingsnet. Dit net fungeert als condensornet, maar ook als secundair net wanneer een groot verwarmingsvermogen noodzakelijk is. De buistemperaturen zijn begrensd op 80 °C voor het onder- en 70 °C voor het boven-net. Het secundaire net wordt pas bijgeschakeld voor verwarming indien het ondernet een buistemperatuur van 60 °C heeft bereikt.

De kas is uitgerust met een rookgas-verdeelsysteem voor de CO₂-dosering waarmee maximaal 180 kg CO₂ per ha per uur kan worden toegediend.

De ketel heeft een verwarmingscapaciteit van 150 w/m² en er is een warmteopslag buffer met een waterinhoud van 120 m³/ha. Indien de buffer vol is, wordt de CO₂-dosering gestopt.

Gewas- en teeltgegevens

De tomaten worden geplant op 10 december en op 20 november geruimd.

Kasklimaat

In onderstaande tabel worden de temperatuursetpoints weergegeven. Er wordt met 3 dagdelen gewerkt. Er wordt met een opstookhelling van 1°C per uur gewerkt.

Datum ingang setpoint	Dagtemperatuur	Voornachttemperatuur	Nachttemperatuur
10/12	20	16	18
temperatuur bereikt op	2 uur na zonsopkomst	half uur na zonsondergang	23:00
01/03	19	15	17
temperatuur bereikt op	1 uur na zonsopkomst	bij zonsondergang	23:00
20/11	5	5	5

Van de teeltstart (10 december) staat de ventilatielijn 3 °C boven de stooklijn. Er wordt derhalve weinig warmte afgelucht, zodat op heldere dagen hogere etmaaltemperaturen kunnen worden behaald. Op 1 februari wordt dit terug gebracht tot 1 °C

Vanaf half maart is het zaak de etmaaltemperatuur te drukken, zodat in die periode de ventilatielijn slechts 0.5 °C boven de stooklijn wordt gelegd, wat tot het eind van de teelt zo blijft gehandhaafd. Deze temperaturen zijn dag en nacht gelijk.

Er wordt beperkt gebruik gemaakt van een minimumbuistemperatuur. Van zonsopgang tot 3 uur na zonsopgang is deze 40 °C en vervolgens tot zonsondergang 45 °C. Van zonsondergang tot 23:00 is deze 20 °C en vervolgens tot zonsopgang 30 °C. Tussen de 100 en 300 W/m² globale straling wordt buistemperatuur afgebouwd.

De vochtregeling geschiedt met de luchtramen en indien de ruimtetemperatuur door deze ventilatie onder de setpointtemperatuur verwarmen komt, wordt er pas bijgestookt.

Er wordt ingegrepen op de luchtvochtigheid wanneer de kaslucht boven de 85% tussen 2 uur voor zonopgang tot 2 uur voor zonondergang en boven de 87% RV op de andere uren van de dag komt. De regelactie is beperkt, met name als het buiten koud is, namelijk 2% raamopening per % overschrijding van de RV wanneer het buiten kouder dan 2 °C is. Als het buiten warmer dan 15 °C is wordt het raam met 5% per % overschrijding op de RV geopend. De regeling loopt lineair tussen deze 2 uitersten.

Het setpoint voor de CO₂-concentratie in de kas is jaarrond 1000 ppm. De CO₂ wordt gedoseerd met een maximale hoeveelheid van 180 kg/ha/uur tussen zonsopkomst en zonsondergang. De resterende ruimte in de buffer wordt over de rest van de CO₂-doseerperiode verdeeld.

Er wordt een transparant beweegbaar scherm type SLS 10 ultra plus gebruikt tussen 15 oktober en 1 mei. Vanaf het eind van de oude teelt (10 november) tot 15 januari, wordt het scherm pas geopend bij een stralingsniveau van boven de 80 W/m². Daarna bij een niveau van 15 W/m². Komt de straling weer onder deze niveaus, dan wordt het scherm weer gesloten. Als tweede voorwaarde is er de buitentemperatuur. Vanaf 10 november gaat het scherm pas dicht bij een buitentemperatuur lager dan 10 °C. Vanaf 15 januari bij een buitentemperatuur van 8 °C, vanaf 15 februari 5 °C, 5 maart 3 °C en na 1 mei wordt het scherm tot 15 oktober uitgeschakeld. Vanaf 15 oktober mag het scherm pas weer dicht bij een buitentemperatuur van lager dan 5 °C.

Wanneer de RV minder dan 0.5% onder het setpoint komt wordt het scherm op een vochtier van maximaal 3% getrokken. In de gevel is een beweegbaar gevelscherm geplaatst, dat gelijktijdig met het horizontale scherm geopend en gesloten wordt.

Er wordt in de standaardteelt geen temperatuurintegratie toegepast. Daarnaast wordt er ook geen gebruik gemaakt van minimumraamstanden.

Buitenklimaat

Voor de straling, buitentemperatuur en overige van belang zijnde buitenklimaatfactoren, wordt gebruik gemaakt van het SEL-jaar, dat representatieve klimaatgegevens voor Nederland bevat en dat de variatie in klimaat eigenschappen tussen dagen en tussen uren heeft gehandhaafd.

Bijlage II.

Berekening optische transmissie droge en natte materialen

Doel van dit deelonderzoek was het bepalen van het effect van een waterlaag op de optische transmissie van gecoat en ongecoat glas. Voor de vergelijking van de effecten wordt loodrecht invallend licht en licht onder 25 en 45 graden invalshoek bekeken. Gebruik is gemaakt van de software Essential MacLeod, v7.0b. De brekingsindex van water is berekend met behulp van de formule van de International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS, 1997; <http://www.iapws.org/relguide/rindex.pdf>), bij een temperatuur van 15°C en uitgaande van een dichtheid van water van 998 kg/m³. Absorptie door water is verwaarloosd in de transmissieberekeningen: imaginair deel van brekingsindex is voor PAR in de orde van 10⁻⁸ of lager (zie website Philip Laven, <http://www.philiplaven.com/p20.html>).

Tabel 17. Brekingsindex van water bij 15°C (berekend naar model van IAPWS, 1997).

Golflengte [nm]	Brekingsindex
200	1.42425
250	1.37778
300	1.35930
350	1.34954
400	1.34361
450	1.33966
500	1.33684
550	1.33473
600	1.33307
650	1.33171
700	1.33056
750	1.32955
800	1.32865
850	1.32781
900	1.32701
950	1.32624
1000	1.32548
1050	1.32472
1100	1.32395

Coating geëts met H₂SiF₆

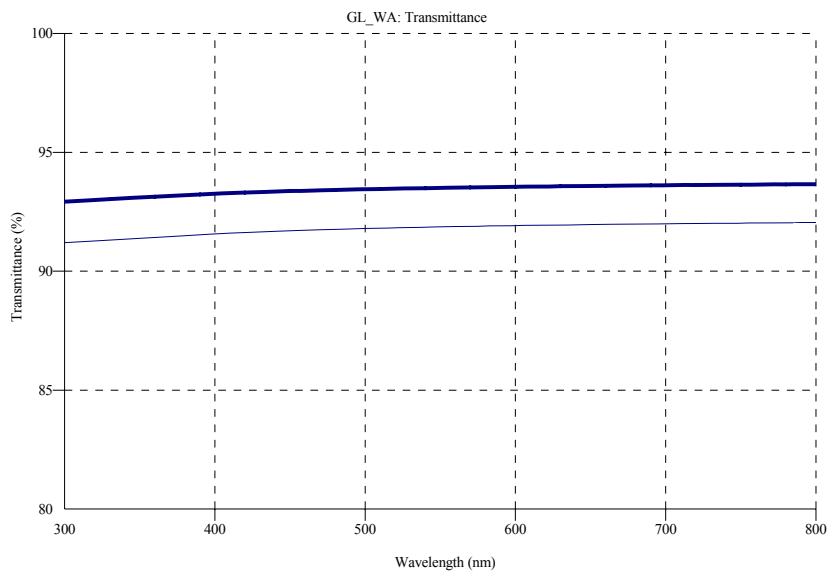
De reflectieverminderde laag wordt bereikt door etsen met H₂SiF₆. Daardoor wordt een laag van ca. 100 nm dikte verkregen met een brekingsindex van ca. 1,27. Een theoretisch perfecte enkellaags anti-reflectie-coating (voor één bepaalde golflengte) moet een dikte $\frac{1}{4}\lambda$ hebben en een brekingsindex die de wortel is van de brekingsindex van het substraat. In geval van glas (n=1,53) is de ideale brekingsindex dan 1,24. De geëtsde laag komt zeer dicht bij dit ideaal: op basis van de opgegeven dikte en brekingsindex is het een $\frac{1}{4}\lambda$ -laag bij een golflengte van ca. 510 nm, terwijl de brekingsindex dicht bij de theoretisch ideale waarde van 1,24 ligt. Verwacht mag dus worden dat de etslaag zeer goede anti-reflectie-eigenschappen heeft. Voor de berekeningen wordt de laag opgevat als een absorptievrije coating met een constante brekingsindex voor alle golflengtes. De transmissiewaardes liggen daarom ca. 2% hoger dan in realiteit op grond van absorptie verwacht mag worden.

Effect van waterlaag op de glasplaat

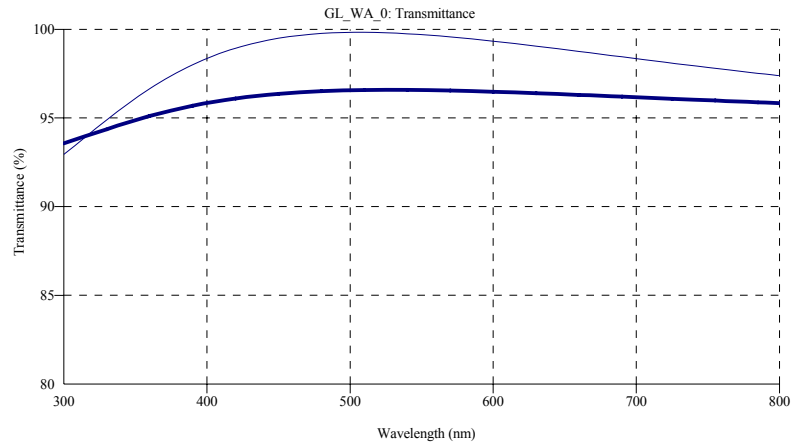
In Tabel 2 hieronder staan de gemiddelde transmissies vermeld op golflengtegebied 400-700 nm, voor drie hoeken van inval (0° , 25° en 45°). Daarbij is ongepolariseerd licht verondersteld. Door de waterlaag aan de bovenzijde neemt de transmissie voor ongecoat glas ca. 1,7% toe, onafhankelijk van de hoek van inval (althans op $0-45^\circ$). Voor glas dubbelzijdig geëtsd met silicilzuur neemt de transmissie bij aanwezigheid van een waterlaag juist af, en wel met ca. 2,8%. De transmissie voor droog glas met coating, bij kleine invalshoeken, is wel onwaarschijnlijk hoog ($>99\%$), omdat in de berekening geen rekening werd gehouden met absorptie, die in het algemeen ca. 2% is.

Tabel 18. Gemiddelde transmissies op 400-700 nm voor drie hoeken van inval, voor ongecoat en geëtsd glas, met en zonder waterlaag aan de bovenzijde, zonder absorptie.

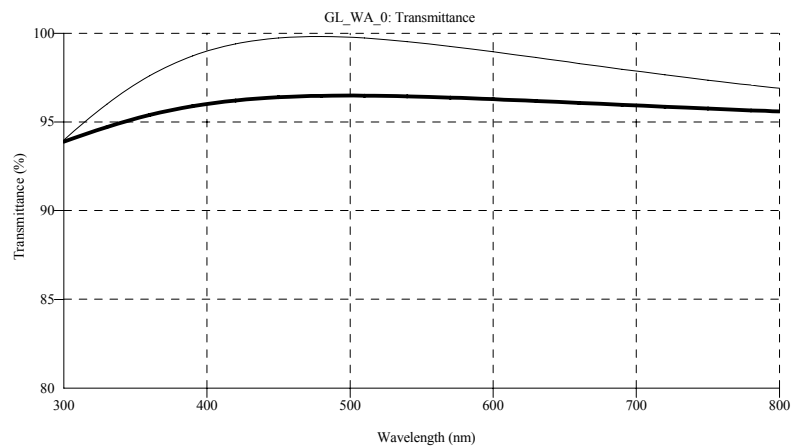
Coating	Hoek van inval [°]	Transmissie [%]		
		Droog	Nat	Vershil
Geen	0	91,8	93,5	1,7
	25	91,7	93,4	1,7
	45	90,3	92,0	1,7
Fluosilicaat-etslaag	0	99,2	96,4	-2,8
	25	99,1	96,3	-2,8
	45	97,9	95,0	-2,9



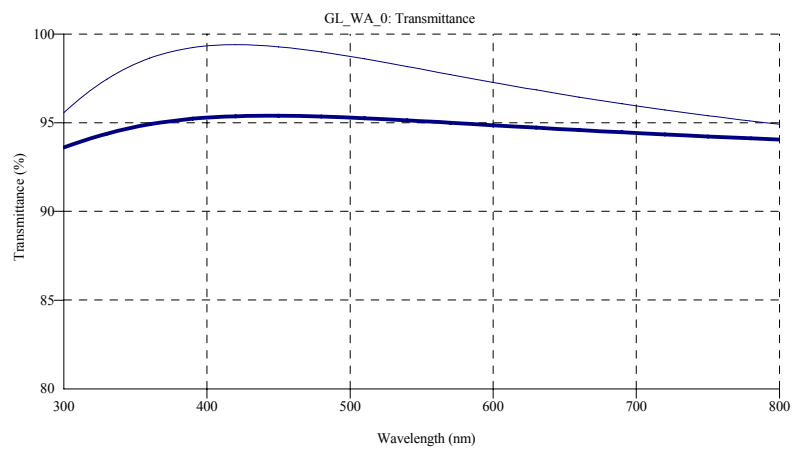
Figuur 49. Optische transmissie als functie van de golflengte voor een ongecoate glasplaat bedekt met een egale waterfilm aan de bovenzijde (dikke lijn). Ter vergelijking: transmissie voor droge ongecoate glasplaat (dunne lijn). Loodrecht invallend licht.



Figuur 50. Optische transmissie als functie van de golflengte voor een glasplaat dubbelzijdig geëts (100 nm, silicaat, $n=1,27$). Dikke lijn: glasplaat bedekt met een egale waterfilm aan de bovenzijde; dunne lijn: droge glasplaat. Loodrecht invallend licht.



Figuur 51. Optische transmissie als functie van de golflengte voor een glasplaat dubbelzijdig geëts (100 nm, silicaat, $n=1,27$). Dikke lijn: glasplaat bedekt met een egale waterfilm aan de bovenzijde; dunne lijn: droge glasplaat. Hoek van inval: 25° .



Figuur 52. Optische transmissie als functie van de golflengte voor een glasplaat dubbelzijdig geëts (100 nm, silicaat, $n=1,27$). Dikke lijn: glasplaat bedekt met een egale waterfilm aan de bovenzijde; dunne lijn: droge glasplaat. Hoek van inval: 45° .

Bijlage III.

Inschatting hoeveelheid condensatie en gemiddelde hoeveelheid regen

Doel van dit deelonderzoek was het bepalen van de hoeveelheid condensatie en de gemiddelde hoeveelheid regen op een kasdek in Nederland. Een exacte kwantificering van deze gegevens is niet mogelijk, hiervoor zou meer praktijkonderzoek naar het condensatiegedrag moeten worden uitgevoerd, wel kan op basis van fysische processen een inschatting worden gemaakt hoeveel uren een kasdek nat is.

Met KASPRO is voor een standaard tomatenteelt bepaald wanneer er condensatie tegen het dek plaats vindt in een traditionele Venlo-kas. In het model heeft het glas een maximaal watergehalte van 0.04 kg/m². In iedere rekenstap wordt bepaald of er een flux is naar of van het dek op basis van het waterdampdeficiet van de kaslucht, de buitentemperatuur, de binnentemperatuur en de dektemperatuur. Indien het watergehalte op het dek nul is, is het dek droog. Zodra er enig water is, wordt het dek als nat verondersteld. Berekeningen zijn uitgevoerd voor enkel- en dubbellaags AR glas tegenover tuinbouwglas 90+. In de berekeningen kan geen rekening worden gehouden met de kwaliteit van de condenslaag.

In Tabel 17 zijn de uren wanneer het kasdek nat of droog is weergegeven. Figuur 49 en Figuur 50 geven de hoeveelheid uren met een gedefinieerde condensatie op het dak overdag en tijdens de nacht weer, Figuur 51 geeft het verloop van de condensatie tijdens het jaar weer. Een enkellaags kasdek is meer dan 7800 uur van het jaar nat als gevolg van condens, 4400 uur daarvan zijn overdag. Een droog kasdek komt rond 900 uur voor, waarvan meer als 750 uur overdag. Dat betekent dat het dek tijdens de nacht meestal nat is, wat echter geen gevolgen heeft voor de performance van het kasdek materiaal. Voor een inschatting van de lichtdoorlatendheid van een kasdek materiaal, zijn alleen de uren met condensatie overdag belangrijk. Op een dubbellaags kasdek treedt minder vaak condensatie op, overdag zijn dit maar 3600 uur, dat zijn bijna 20% minder dan bij een enkellaags dek.

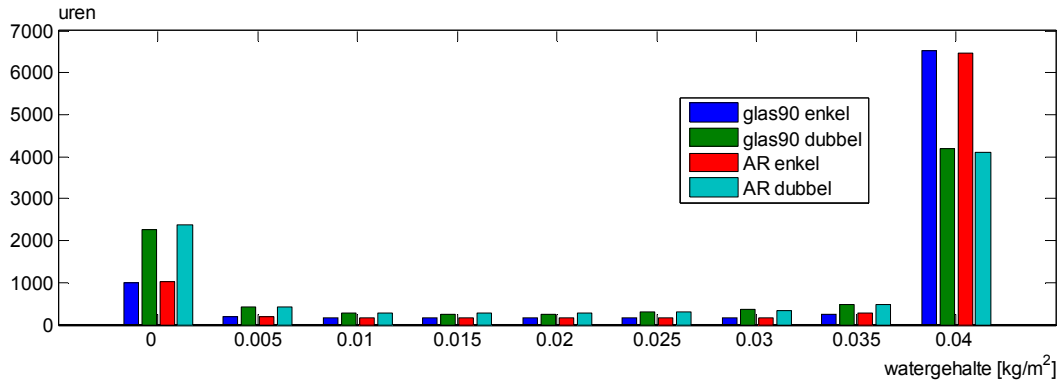
Tussen nat en droog zijn ook nog gradaties aan te brengen, in Figuur 49 en Figuur 50 is voor alle uren en alleen voor de lichte daguren een histogram van het watergehalte van het kasdek aan de binnenkant van de kas gemaakt. Het valt op dat er maar weinig uren zijn wanneer het dek gedeeltelijk nat is, de meeste uren komen overdag voor.

Verder kunnen wij vaststellen dat condensatie vooral tijdens de wintermaanden optreedt (Figuur 51). Tot eind april en vanaf half september is volgens deze berekeningen een enkellaags kasdek vrijwel altijd nat. In de periode mei en juni hangt dit af van de weersomstandigheden en in de zomermaanden is het dak vaker droog. Een dubbel kasdek is volgens deze berekeningen reeds vanaf half april redelijk droog.

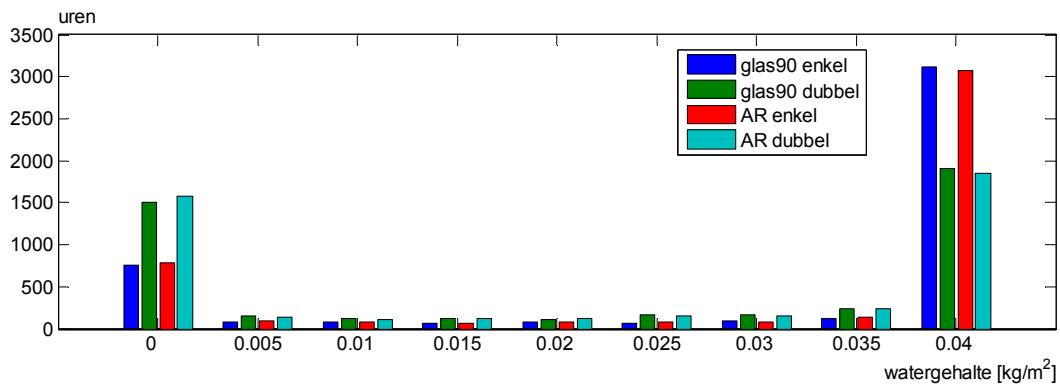
Op grond van deze inschatting kan worden gesteld dat een enkellaags AR glas de beste werking heeft van mei tot september, tijdens de wintermaanden treedt vaak condens op, waardoor de coating op de binnenkant buiten werking is, blijft nog de lichtmeeropbrengst op grond van de buitenkantse coating.

Tabel 19. Uren kasdek nat of droog.

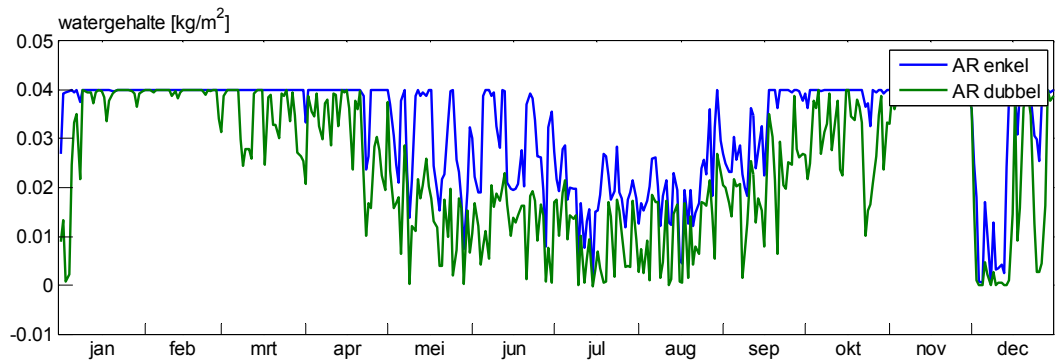
	Dag en nacht		Dag	
	droog	nat	droog	nat
g90_enkel	870	7889	743	4407
g90_dubbel	1987	6772	1520	3631
ar_enkel	895	7864	766	4384
ar_dubbel	2059	6700	1584	3566



Figuur 53. Histogram van het watergehalte van het kasdek aan de binnenkant van de kas voor alle uren van het jaar voor 4 verschillende kasdekken.



Figuur 54. Histogram van het watergehalte van het kasdek aan de binnenkant van de kas voor alle uren dat het licht is door het jaar voor 4 verschillende kasdekken.



Figuur 55. Daggemiddeld vochtgehalte tegen het kasdek van AR enkel en dubbel glas.

Naast condensatie aan de binnenkant, kan het kasdek door regen ook aan de buitenkant nat worden. De data zoals deze door het KNMI beschikbaar worden gesteld, geven de neerslagintensiteit per uur weer. De kleinste neerslaghoeveelheid die gemeten wordt is 0.05 mm/uur. Voor de jaren 1989 tot en met 2005 is voor het KNMI station 'de Bilt' bepaald hoeveel uren het droog was of juist regende. Bij de neerslag is het probleem dat er vrijveel uren zijn met erg kleine neerslaghoeveelheden (minder dan 0.05 mm/uur) dit is een hoeveelheid die niet goed gemeten kan worden. Het kasdek wordt hierdoor naar verwachting niet helemaal nat, het effect op de lichttransmissie is niet bekend, daarom wordt het in navolgend ook apart benoemd. Tabel 18 geeft de uren met neerslag per jaar weer. Gemiddeld over de laatste jaren valt rond 800 uur een neerslag > 0.1 mm/uur en 1200 uur een neerslag van < 0.1 mm/uur. Als verondersteld wordt dat de helft van het neerslag overdag valt en de rest in de nacht, is het kasdek opgrond van regen ca. 400-1000 uur per jaar tijdens de licht uren nat. De gemiddelde hoeveelheid regen per jaar in Nederland bedraagt 793 mm.

Tabel 20. Uren met neerslag en het aantal uren dat het op jaarbasis droog is.

Jaar	Jaarsom neerslag [mm]	Uren			
		droog	neerslag > 0.1 mm/uur	Neerslag < 0.1 mm/uur	Neerslag < 0.05 mm/uur
1989	714	6838	673	1249	1056
1990	772	6713	722	1325	1142
1991	702	6852	626	1282	1075
1992	964	6754	839	1167	930
1993	937	6477	891	1392	1140
1994	1070	6623	940	1197	956
1995	777	6807	775	1178	947
1996	624	6936	646	1178	972
1997	789	6978	689	1093	910
1998	1295	6220	1117	1423	1101
1999	952	6577	893	1290	1018
2000	982	6301	942	1517	1206
2001	1092	6373	1031	1356	1071
2002	948	6878	834	1048	–
2003	540	7230	616	914	731
2004	764	6768	816	1176	959
2005	778	6795	774	1191	946
gem.	865	6713	813	1234	1010

Bijlage IV.

Effect van vervuiling op de lichtopbrengst

Het effect van vervuiling op de lichttransmissie is onderzocht in het lab. In de praktijk waren er tijdens de onderzoeksperiode geen indicaties dat AR glas sneller of minder snel vervuilt dan het basismateriaal. Ook in de lichtmetingen in de praktijk werden hiervoor geen aanduidingen gevonden. Daarom werden labtests uitgevoerd naar het opbrengen en verwijderen van vuil en naar het effect van resterende vervuiling op de lichttransmissie.

Hiervoor werd op een schone ruit een gedefinieerde hoeveelheid van een mengsel van zeer fijne met fijne zand opgebracht (Figuur 52). Het vuil werd eraf geblazen (wind). Ten slotte werd het resterende vuil afgespoeld met water (regen). Er werden lichtmetingen op de kleine Ulbricht kogel uitgevoerd van het schone materiaal aan het begin, van het vuile materiaal na het afblazen met lucht en van de weer schone ruit na afspoelen met water. Een tweetal materialen werd onderzocht, standaard glas (PL01M en van AR glas (SC06B2). De resultaten hiervan zijn weergegeven in Tabel 19.

Door vuil neemt de lichtdoorlatendheid op standaard glas en op AR glas voor loodrechte lichtinval en voor diffuse lichtinval met rond 2% af. Deze metingen zijn uitgevoerd na afblazen van het grove vuil met lucht. Het vuil kon bij beide glazen goed eraf geblazen worden. Ook kon het resterende vuil daarna makkelijk weer afgespoeld worden met water. Uit de lichttransmissie blijkt, dat de ongeveer de waardes van de schone ruit weer bereikt konden worden. Afwijkende meetwaardes vallen in het bereik van de meetnauwkeurigheid. Er zijn geen aanwijzingen gevonden dat op AR glas een snellere of minder snelle vervuiling optreedt.



Figuur 56. Methode van nabootsing vervuiling van het glas, Schoon (links), met zand bevuild (midden), zand afgeblazen met lucht (rechts), ten slotte afgespoeld met water (geen foto).

Tabel 21. Lichtdoorlatendheid van schoon, vuil en gereinigd standaard glas en AR glas; gemiddelden over PAR-gebied 400-700nm (NEN-2675).

Product	WUR-code	Transmissie						
		diffuus	direct	15 °	30 °	45 °	60 °	75 °
Standaard glas	PL01M	0,822	0,897	0,893	0,886	0,857	0,780	0,575
Standaard glas + vuil	PL01M	0,803	0,879	0,876	0,869	0,848	0,785	0,607
Standaard glas, gereinigd	PL01M	0,827	0,893	0,892	0,887	0,872	0,817	0,603
Sunarc basisglas 2 + AR coating	SC06B2	0,906	0,972	0,972	0,967	0,951	0,899	0,695
Sunarc basisglas 2+ AR coating + vuil	SC06B2	0,887	0,959	0,959	0,957	0,938	0,882	0,659
Sunarc basisglas 2+ AR coating, gereinigd	SC06B2	0,899	0,970	0,972	0,965	0,948	0,901	0,692

