



Semi-transparante PV voor kassen

Evaluatie van nieuwe semi-transparante fotonvoltaïsche cellen
als dekmateriaal voor Nederlandse kassen

Bram van Breugel, Esteban Baeza en Marcel Raaphorst

Rapport WPR-972

Referaat

Met behulp van simulatiemodellen is berekend in hoeverre semi-transparante PV-panelen in het kasdek invloed hebben op de productie en energiebehoefte van verschillende tuinbouwgewassen. Drie verschillende typen op de markt beschikbare semi-transparante PV-panelen zijn doorgemeten en geëvalueerd. Geen van de panelen is al rendabel in te zetten in de glastuinbouw.

Abstract

Simulation models have calculated the effect of semi-transparent PV panels in the greenhouse deck on the production and energy needs of different horticultural crops. Three different types of commercially available semi-transparent PV panels have been measured and evaluated. None of the panels can already be used profitably in greenhouse horticulture.

Rapportgegevens

Rapport WPR-972

Projectnummer: 3742281400

DOI-nummer: 10.18174/529564

Thema: Energie en klimaat

Dit project is gefinancierd vanuit het programma Kas als Energiebron, het innovatie- en actieprogramma voor energiebesparing en verduurzaming in de glastuinbouw van Glastuinbouw Nederland en het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit.

Disclaimer

© 2020 Wageningen, Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research, Business unit Glastuinbouw, Postbus 20, 2665 MV Bleiswijk T 0317 48 56 06, www.wur.nl/plant-research.

Kamer van Koophandel nr.: 09098104

BTW nr.: NL 8113.83.696.B07

Stichting Wageningen Research. 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 Stichting Wageningen Research.

Stichting Wageningen Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Adresgegevens

Wageningen University & Research, BU Glastuinbouw

Postbus 20, 2665 ZG Bleiswijk

Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk

T +31 (0)317 48 56 06

Inhoud

	Samenvatting	5
1	Inleiding	7
2	Doel	9
	2.1 Technische doelstellingen	9
	2.2 Afbakening	9
3	Methode	11
	3.1 Lichttransmissie en fotosynthese	11
	3.1.1 Hemisferische lichttransmissie	11
	3.1.2 Efficiëntie van de fotosynthese	11
	3.2 Kaspro	12
4	Simulatie van niet-transparante PV-cellen op een Nederlands kasdek	13
	4.1 Energieverbruik en gewasproductie	15
	4.1.1 Simulaties van een komkommergewas	15
	4.1.2 Simulaties van het Anthuriumgewas	17
	4.1.3 Simulaties van het rozen­gewas	20
	4.2 Economische analyse op basis van de simulaties	22
5	Onderzochte semi-transparante PV materialen	25
	5.1 Insolight	25
	5.1.1 Metingen	26
	5.1.2 Vergelijking met de simulaties	27
	5.2 Brite Solar	27
	5.2.1 Metingen	28
	5.2.2 Vergelijking met de simulaties	29
	5.3 DWP	29
	5.3.1 Metingen	31
	5.3.2 Vergelijking met de simulaties	31
	5.4 Andere technieken	32
6	Conclusies	33
	Literatuur	35

Samenvatting

Voor de productie van zowel tuinbouwgewassen als van elektriciteit uit fotovoltaïsche (PV) cellen is licht nodig. Omdat het beschikbare zonlicht niet altijd efficiënt wordt omgezet in tuinbouwproducten is er soms ruimte om dit licht te gebruiken voor de productie van elektriciteit.

Wageningen University & Research heeft in opdracht van Kas als Energiebron onderzocht of hiervoor semi-transparante PV-cellen kunnen worden ingezet. Hiervoor zijn eerst voor verschillende gewassen simulaties gemaakt waarbij een standaard kas wordt vergeleken met kas waarbij de helft van de zuidhelling van het kasdek is bedekt met PV-panelen (in dambordpatroon). Uit deze simulaties is gebleken dat voor vruchtgroentengewassen en snijbloemen de omzet door het lichtverlies van het dambordpatroon dermate wordt verlaagd, wat met de opbrengst van de elektriciteitsproductie gerekend met de huidige elektriciteitsprijzen niet kan worden gecompenseerd. De impact op het warmtegebruik en het elektriciteitsgebruik is relatief laag. Voor schaduwminnende potplanten zoals Anthurium wordt geschat dat het productieverlies minder groot is, waarmee hier nog wel kansen lijken te liggen voor toepassing van PV-cellen.

Drie typen semi-transparante PV-panelen zijn onderzocht op transmissie van PAR en NIR. Bij geen van de panelen zijn de investeringskosten bekend, en ook niet meegenomen bij de evaluatie van de haalbaarheid. Het paneel van Insolight bleek in de aangeleverde versie nog een lage lichttransmissie te hebben, maar heeft als voordeel dat het aandeel van het zonlicht dat beschikbaar is voor gewasproductie, kan worden bijgestuurd. Het aangeleverde paneel van Brite Solar lijkt met een hemisferische PAR-transmissie van slechts 32,2% ongeschikt voor toepassing boven glastuinbouwgewassen.

Het systeem van DWP, waarbij een gebogen plaat het NIR reflecteert naar een bovenliggend PV-paneel, waardoor het paneel van twee zijden wordt beschenen, was te complex voor een betrouwbare lichttransmissiemeting. Geschat wordt dat het lichtverlies van 25% voor het gewas gelijk oploopt met de hoeveelheid straling die op het PV-paneel terechtkomt. Hiermee zal het effect op de productie van gewas en elektriciteit half zo groot zijn als wat bij de simulaties met een dambordpatroon is berekend.

Uit de simulaties en de metingen is geconcludeerd, dat semi-transparante PV-cellen boven glastuinbouwgewassen alleen kans maken als de gewassen schaduwminnend zijn, en als de hoeveelheid licht die aan het gewas wordt onttrokken stuurbaar is.

1 Inleiding

De Nederlandse glastuinbouwsector zoekt al sinds lang naar systemen waarin de groei van tuinbouwgewassen wordt gecombineerd met het opwekken van energie. In het begin van deze eeuw is het genereren van warmte commercieel haalbaar gebleken, maar het genereren van elektriciteit tijdens de teelt is nog steeds een uitdaging, tenzij dit op een zodanige manier wordt uitgevoerd dat het niet interfereert met de gewasproductie [Hemming *et al.* 2014; de Zwart en van Noort, 2012]. Dit komt vooral doordat het licht dat nodig is voor de elektriciteitsopwekking meestal economisch effectiever kan worden ingezet voor de gewasgroei [de Zwart, 2010; de Zwart, 2011].

Semi-transparante fotonvoltaïsche (PV) cellen kunnen een selectief deel van het zonnenspectrum absorberen en een ander deel doorlaten. Tot op heden zijn de meeste van deze technieken alleen gedemonstreerd in het laboratorium, maar inmiddels worden ze soms ook als commercieel product verkocht. Dit roept de vraag op of deze technologie van waarde kan zijn voor de Nederlandse glastuinbouw.

2 Doel

De glastuinbouwsector in Nederland is momenteel een belangrijke gebruiker van energie uit fossiele bronnen, ondanks het feit dat een kas al meer energie ontvangt in de vorm van zonnestraling dan het kan gebruiken. Als een kas tijdens de teelt een deel van het inkomende zonlicht zou kunnen omzetten in elektriciteit en het terug zou kunnen leveren aan het elektriciteitsnet zonder de gewasproductie negatief te beïnvloeden, zou dit de duurzaamheid van de sector ten goede komen en ook additionele inkomsten kunnen genereren voor de teler. Het doel van dit project is om te evalueren of dit met deze opkomende semi-transparante fofovoltaïsche technologieën (deels) kan worden gerealiseerd.

2.1 Technische doelstellingen

- Met behulp van modelberekeningen met Kaspro voor verschillende gewassen wordt het effect van semi-transparante PV op het kasklimaat en de benodigde energie in algemene termen berekend, ook voor nog niet beschikbare materialen. Hiervoor wordt een kasdek gedefinieerd door aan te nemen dat conventionele niet-transparante PV in een dambordpatroon op het zuidelijke dak zijn geïnstalleerd, zodat het kasdek deels wordt bedekt.
- Op basis van de drogestofberekeningen met Kaspro, gewasgroeimodellen, en de expertise van gewasspecialisten, wordt een schatting gemaakt van de effecten op de gewasproductie.
- Enkele bedrijven hebben nu echte semi-transparante PV-producten op de markt. Deze zullen worden getest op hemisferische PAR-transmissie en loodrechte NIR-transmissie (nabij infrarode straling).
- De resultaten van de modelberekeningen zullen worden vertaald naar de impact op de operationele kosten en opbrengsten. Hierbij worden de afschrijvings-, rente- en onderhoudskosten niet meegenomen, aangezien de looptijd en productiekosten naar verwachting nog niet bekend zijn.

2.2 Afbakening

- De studie zal worden uitgevoerd voor de Nederlandse situatie. Vruchtgroenten, potplanten en sierteelt worden afzonderlijk onderzocht.
- Met nieuwe technologieën is er altijd beperkt inzicht in de omvang van de vereiste investeringen en hoe deze zich in de nabije toekomst zullen ontwikkelen. Vaak zijn kosten aan het begin van de marktintroductie van nieuwe technologieën te hoog. Aangezien de kosten grotendeels onbekend zijn en het feit dat dit project van een verkennende aard is, zullen de investeringen niet meegenomen worden in de evaluatie.

3 Methode

3.1 Lichttransmissie en fotosynthese

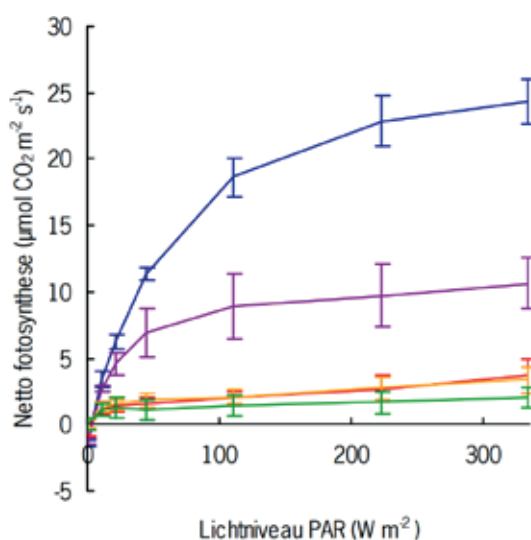
Voor de groei en ontwikkeling van tuinbouwgewassen is licht veelal een beperkende factor. Afhankelijk van het type gewas en de hoeveelheid beschikbaar licht, wordt vaak de vuistregel gehanteerd dat 1% meer licht op het gewas 0,5 tot 1% meer productie betekent [Marcelis *et al.* 2004]. Daarom zijn de producenten van kasdekmaterialen erop gericht de transmissie van fotosynthetisch actieve straling (PAR) in het golflengtegebied van 400 tot 700 nm, zo hoog mogelijk te laten zijn.

3.1.1 Hemisferische lichttransmissie

De hemisferische lichttransmissie van kasdekmaterialen wordt bepaald volgens NEN2675:2018 met speciale meetapparatuur [Swinkels *et al.* 2012]. De hemisferische lichttransmissie is de berekening van de lichttransmissies vanuit alle mogelijke hoeken van inval. Hierbij wordt rekening gehouden met weegfactoren per golflengte en invalshoek. Een exacte beschrijving van de methodiek is te vinden in NEN2675:2018.

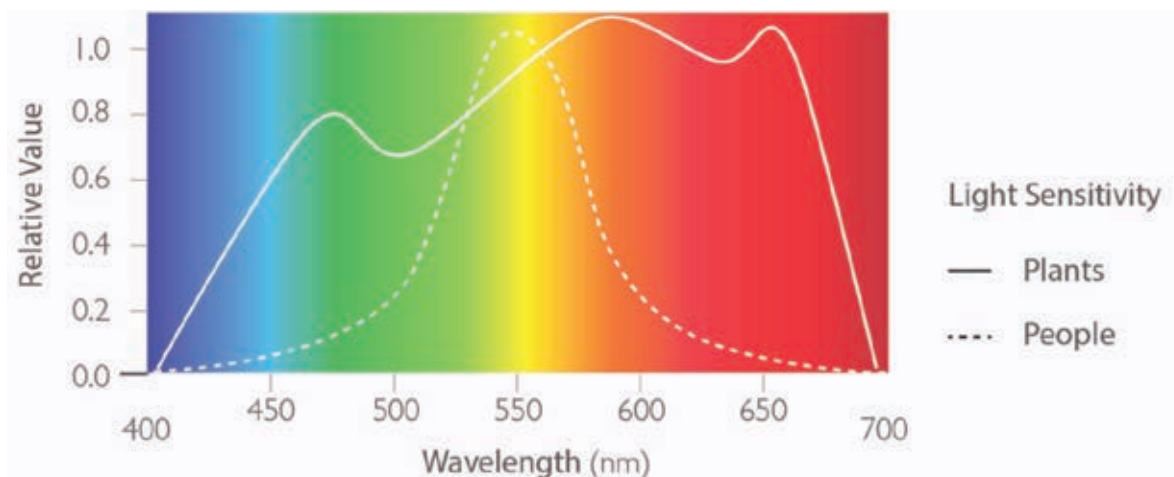
3.1.2 Efficiëntie van de fotosynthese

Absorptie van licht door het gewas kan niet 1 op 1 worden doorgerekend naar productie. Hoe efficiënt de lichtenergie kan worden omgezet in chemische energie in de vorm van suikers (fotosynthese), is afhankelijk van de lichtintensiteit, de golflengte, het type gewas en de leeftijd (en geschiedenis) van het blad. De invloed van de lichtintensiteit en de geschiedenis van het blad is te zien in Figuur 1. De fotosynthese stijgt minder dan proportioneel met een oplopende lichtintensiteit, en de oude bladeren die zich onderin het gewas bevinden, zijn veel minder efficiënt dan de jonge bladeren bovenin.



Figuur 1 Netto fotosynthese van paprikabladeren bij verschillende lichtintensiteiten (in W/m² PAR) en vijf verschillende hoogten in het gewas [Dueck *et al.* 2005].

De mate waarin bladeren licht absorberen, hangt af van de golflengte. Dit wordt weergegeven in McCree curve (zie Figuur 2). Hierin is te zien dat het gewas het rode licht beter absorbeert dan het blauwe of het groene licht. Dit effect kan ook gewas en zelfs ras specifiek zijn.



Figuur 2 De McCree curve toont de gevoeligheid van bladeren voor verschillende golflengten. Deze verschilt zeer met de gevoeligheid van het menselijk oog.

3.2 Kaspro

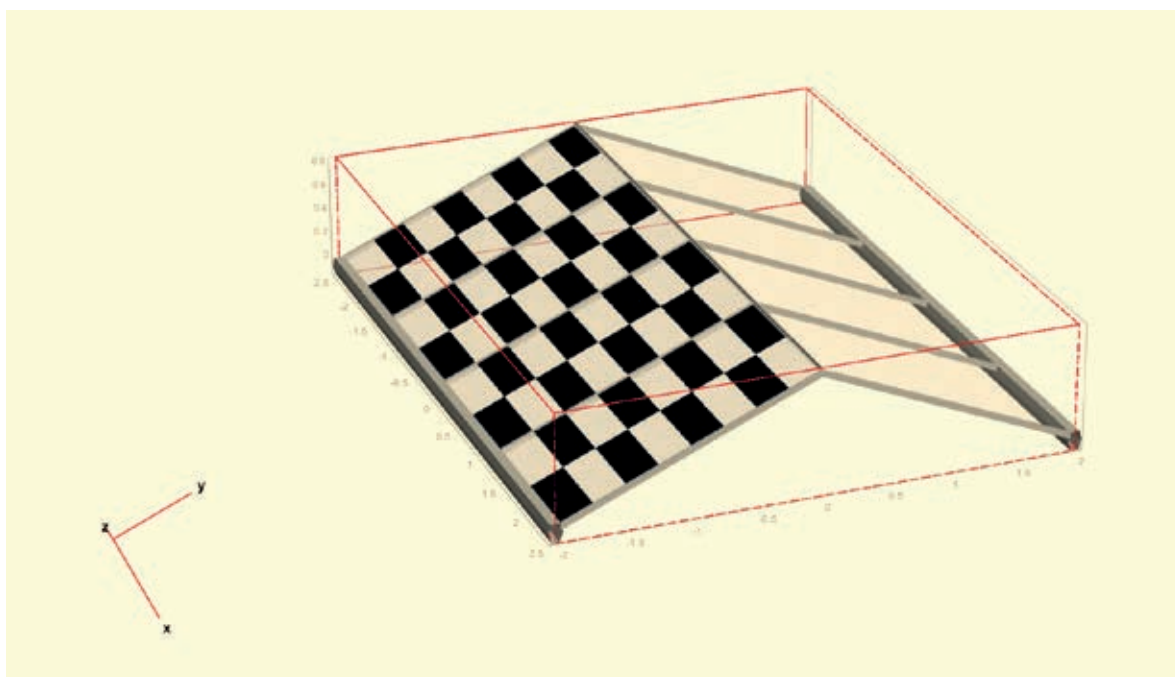
Het Kaspro simulatiemodel [de Zwart, 1996] kan voor verschillende gewassen, kasconfiguraties, klimaatomstandigheden en klimaatinstellingen, voor ieder uur van het jaar berekenen hoeveel energie er nodig is. Bovendien geeft Kaspro een schatting van de hoeveelheid drogestofproductie die wordt gegenereerd. Hiermee kunnen dus ook de impact van verschillende kasdekken worden gesimuleerd. In hoofdstuk 4 worden voor twee verschillende kasdektypen en drie verschillende gewassen de simulaties behandeld.

1. Kasdekken:
 - a. Enkel standaard glas zonder PV.
 - b. Standaard glas met op de zuidelijke helling lichtdicht PV in dambordpatroon.
2. Gewassen:
 - a. Komkommer (vruchtgroente).
 - b. Roos (snijbloem).
 - c. Anthurium (potplant).
3. Resultaten:
 - a. Productie ten opzichte van de referentie (zonder aanpassingen aan de belichtingsinstallatie).
 - b. Energiegebruik ten opzichte van de referentie (waarbij dezelfde setpoints voor temperatuur en RV worden gehanteerd).
 - c. Verschil in gebruik van zonwerend scherm.
 - d. Verschil in belichtingsuren.

4 Simulatie van niet-transparante PV-cellen op een Nederlands kasdek

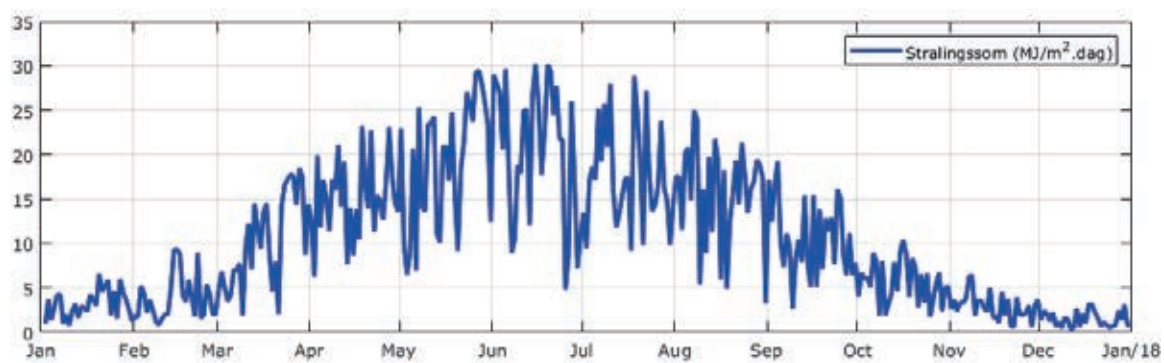
Eerst wordt in het algemeen het effect van semi-transparante PV-cellen op de zuidkant van het kasdek ingeschat op het klimaat van de kas, op het gebruik van energie en op de gewasperformance. Berekeningen worden gedaan waarbij wordt aangenomen dat de zuidkant van het kasdek wordt voorzien van 50% niet-transparante PV-panelen (=25% van het hele kasdek). Dit is gedaan met behulp van het kasklimaat / fotosynthese model (Kaspro). Drie verschillende gewassen zijn gesimuleerd: komkommer (een "lichtminnend" gewas), anthurium (een "schaduwminnend" gewas) en rozen (zowel veel gebruik van kunstlicht (vooral in de winter) en van het zonwerendscherm of krijt in de zomer).

Bij deze simulaties is uitgegaan van PV panelen van 50 cm bij 50 cm, in dambordpatroon geïnstalleerd op de zuidhelling van iedere kap zoals in Figuur 3.

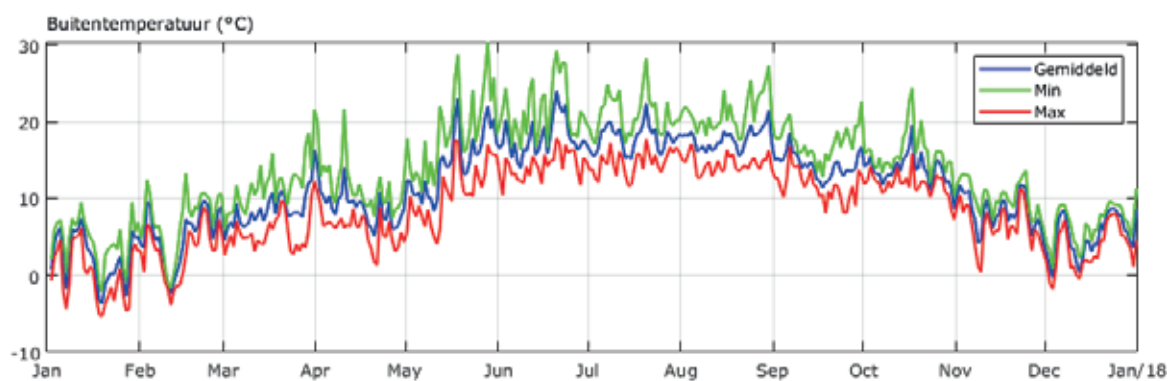


Figuur 3 Weergave van het gesimuleerde dambordpatroon met niet transparante PV panelen op het kasdek.

Figuur 4 en Figuur 5 geven het verloop van de globale straling en de gemiddelde, de maximum en de minimum buitentemperatuur per etmaal weer voor het weerstation WUR Bleiswijk (2017). Dit buitenklimaat is resrepresentatief en wordt gebruikt om de scenario's door te rekenen. De belangrijkste klimaatinstellingen per scenario zijn weergegeven in Tabel 2.



Figuur 4 Verloop van de dagelijkse globale stralingssom (MJ/m^2) in Bleiswijk (2017).



Figuur 5 Dagelijks verloop van de gemiddelde, maximum en minimum buitentemperatuur ($^{\circ}\text{C}$) in Bleiswijk (2017).

Ray tracing software is gebruikt om te bepalen hoeveel globale straling gedurende het jaar (uitgaande van het buitenklimaat in Bleiswijk 2017, zie Figuur 4) wordt doorgelaten door zowel de referentiekas met traditioneel float glas als met semi-transparante PV panelen. De totalen hiervan worden weergegeven in Tabel 1. De tabel laat zien dat hemisferische PAR-transmissie van het kasdek met het dambordpatroon ten opzichte van de referentie niet veel afwijkt van de 75%, die je zou mogen verwachten als 25% van het kasdek is bedekt met niet transparante PV-panelen.

Tabel 1

Overzicht van de meest relevante optische en radiometrische eigenschappen van de twee gesimuleerde kasdekken.

	Hemisferische PAR-transmissie	UV-transmissie	NIR-transmissie	Emissiefactor
Referentie (float glas)	0.792	0.688	0.755	0.89
Kas met 25% PV panelen	0.588	0.535	0.569	0.89
Verhouding ten opzichte van de referentie	74.2%	77.8%	75.4%	100%

Tabel 2

Samenvatting van de belangrijkste kasparameters en kasklimaatinstellingen die gebruikt zijn bij de simulaties voor komkommer, Anthurium en roos.

	Eenheid	Komkommer	Anthurium	Roos
Oppervlak	m ²	40,000	40,000	40,000
Orientatie van de kas		oost-west	oost-west	oost-west
Goothoogte	m	6	6	6
Kasdekhelling	°	23	23	23
Lek (lucht)	m ³ /(m ² .s) per m/s wind	0.0001	0.0001	0.0001
Breedte luchtraam	m	1.67	2.5	2.5
Hoogte luchtraam	m	1.6	1.32	1.25
Fractie luchtramen	%	5	5	7
Maximale openingshoek	°	60	60	60
Ketelvermogen	W/m ²	175	100	150
Lichtemissie-werend doek	-	Obscura 9530 FRW		Obscura 9530 FRW
Energiedoek	-	Luxous 1347	Luxous 1347_FR	Harmony 2515_O_FR
Zonwerend/Energiedoek	-	-	Solaro 6827_O_FR	-
Setpoint activering zonwerend doek	W/m ²	-	300/404*	-
Lamp type	-	HPS 1000	-	HPS 1000
Belichtingsintensiteit	μmol/m ² /s	100	-	220
Belichtingsuren	h	18	-	18-20
Setpoint stooktemperatuur (nacht/dag)	°C	18/21	19	19-22/15-19
Setpoint RV	%	92	85	78/85
Lichtwering krijgt	%	-	-	30 **
Setpoint CO ₂	ppm	600	700	700

* Setpoint activering zonwerend doek verschilt tussen de scenario's voor de referentie en het kasdek met PV-panelen.

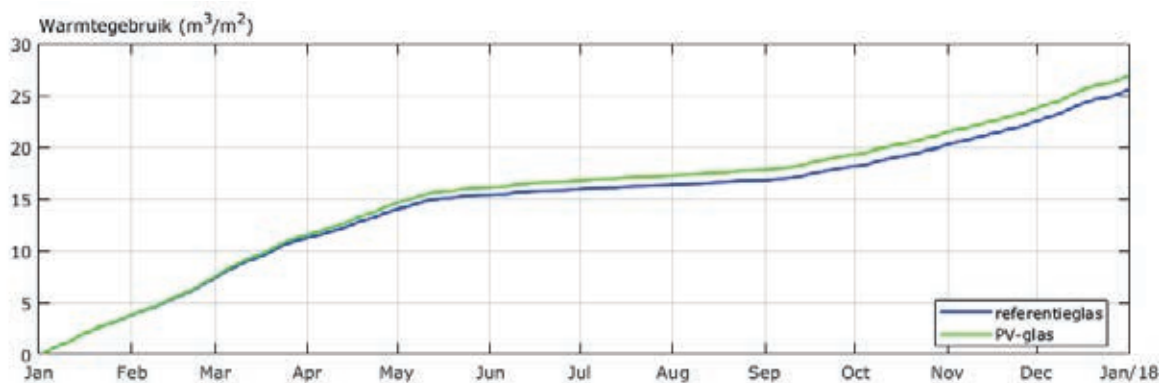
** Krijt wordt aangebracht van april tot september.

4.1 Energieverbruik en gewasproductie

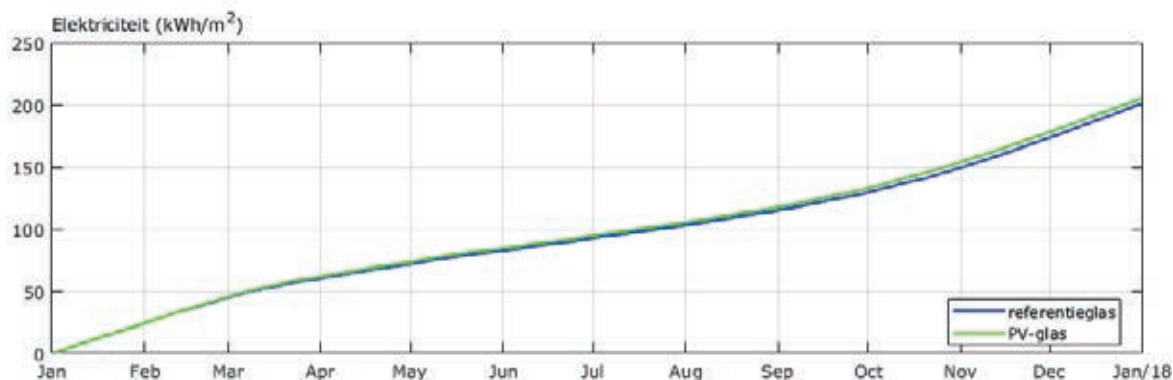
4.1.1 Simulaties van een komkommergewas

Een komkommergewas is gesimuleerd met een lange teeltcyclus, waarbij is uitgegaan van een hogedraadteelt met herbeworteling op de stengel [van Velden, 2019]. De teelt start op 28 december en eindigt op 15 november. De belangrijkste instellingen die worden gebruikt voor de simulatie staan in Tabel 2.

Figuur 6 laat het cumulatieve aardgasverbruik per m^2 kas zien. De aanwezigheid van 25% PV panelen op het kasdek blijkt het warmtegebruik (26.8 vs $25.5 \text{ m}^3/\text{m}^2$) slechts licht (5.1%) te verhogen. Hetzelfde geldt voor de hoeveelheid elektriciteit voor belichting (zie Figuur 7). Die stijgt met slechts 2.5% onder het gedeeltelijk met PV-panelen bedekte kasdek ($205 \text{ vs } 200 \text{ kWh}/\text{m}^2$). Dit laat zien dat de PV-panelen met de gehanteerde klimaatinstellingen bij komkommer, het energiegebruik slechts in geringe mate verhogen. De verhoging wordt veroorzaakt door de lagere lichttransmissie van het kasdek. Het warmte- en het elektriciteitsverbruik zijn echter vooral belangrijk in de wintermaanden, wanneer de hoeveelheid beschikbare buitenstraling klein is. Als deze met 25% verlaagd wordt (zoals in dit rekenvoorbeeld), werkt dit ook beperkt door op de hoeveelheid energieverbruik op jaarbasis.

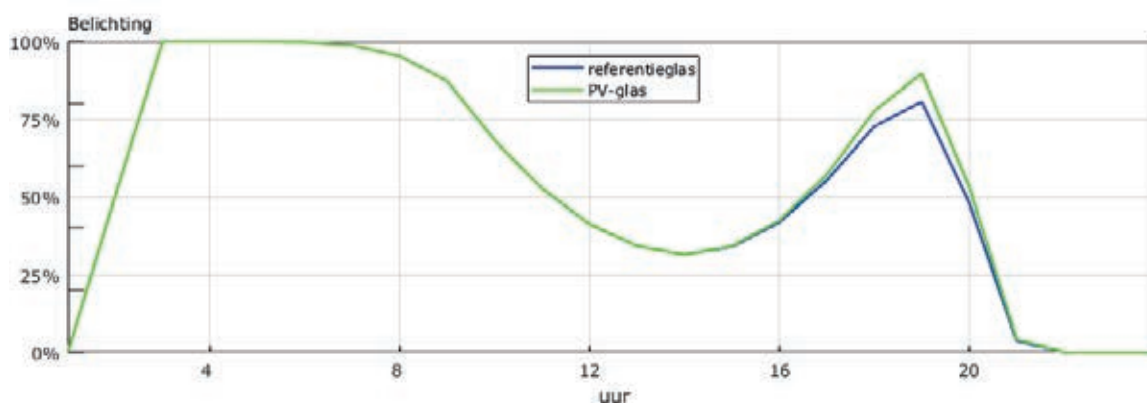


Figuur 6 Cumulatief aardgasverbruik (m^3/m^2) voor de verwarming van de kas in een belichte komkommerteelt.



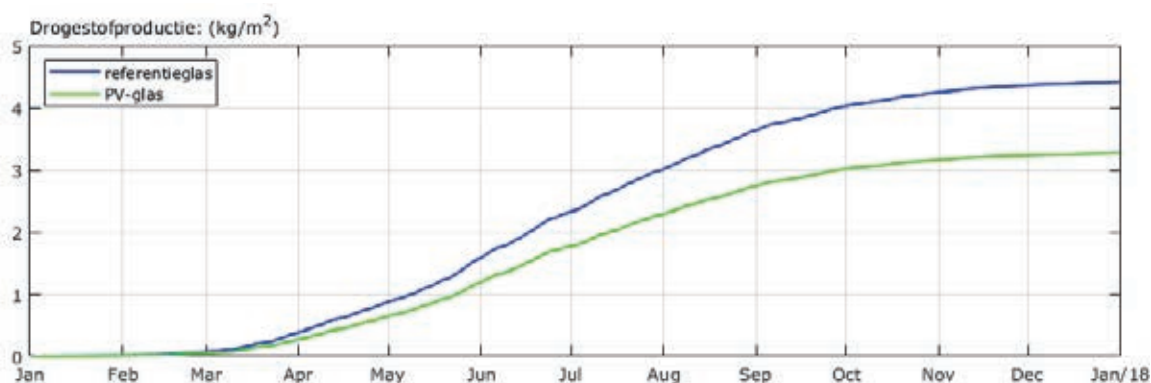
Figuur 7 Cumulatief elektriciteitsverbruik (kWh/m^2) voor de belichting in een komkommerteelt.

Het hogere verbruik aan elektriciteit komt doordat volgens de setpoints, de belichting wordt uitgeschakeld indien het gewas op een dag $14 \text{ mol}/\text{m}^2$ aan PAR heeft ontvangen. Dit zal vaker optreden bij de referentiekas dan bij de kas met PV-panelen (met 25% minder transmissie). Als we het cyclisch etmaalgemiddelde van het gebruik aan belichting analyseren (zie Figuur 8) zien we dat het verschil inderdaad optreedt aan het einde van de belichtingscyclus.



Figuur 8 Cyclisch etmaalgemiddelde van de hoeveelheid belichting die wordt ingezet tussen 1 oktober en 31 maart.

Tenslotte kijken we naar het verschil in drogestofproductie. Dat is een redelijk betrouwbare voorspeller voor het relatieve verschil in versproductie tussen de twee scenario's. Figuur 9 laat de cumulatieve drogestofproductie zien van de twee simulaties voor komkommer. Gedurende de hele teeltcyclus lopen beide cumulatieve drogestofproducties steeds verder uiteen. Aan het einde is het verschil 25,9%. Als we aannemen dat dit ook 25,9% minder opbrengst is betekent, dan is duidelijk dat elektriciteitsproductie van de PV-cellen deze opbrengstverliezen financieel niet kan compenseren met de huidige elektriciteitsprijzen en komkommerprijzen.



Figuur 9 Cumulatieve drogestofproductie (g/m^2) bij komkommer voor de twee gesimuleerde kasdektypen.

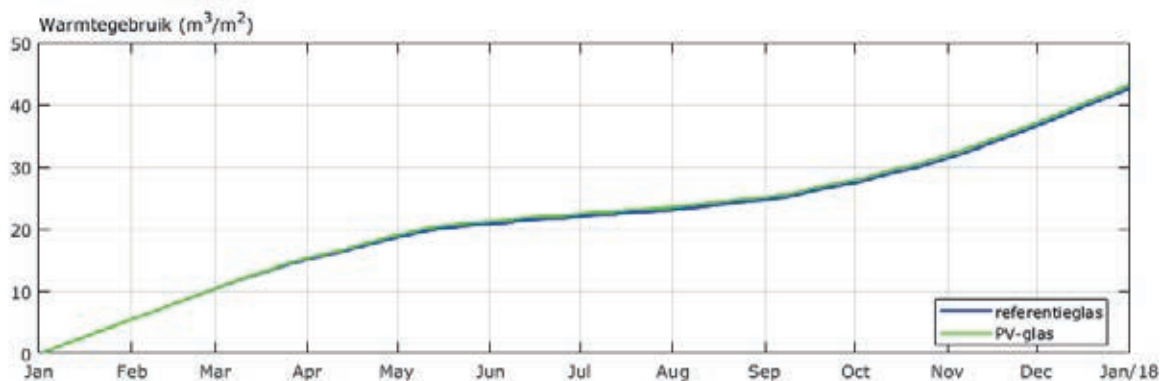
Bij de simulaties moet nog worden aangetekend, dat het Kaspro model geen rekening houdt met de verdeling van zonlicht in de kas. Deze verdeling zal door PV panelen op de zuidhelling bij direct zonlicht worden beïnvloed. Voor een nauwkeuriger berekening met een dambordpatroon op de zuidhelling is eigenlijk een ray tracing model voor de lichtverdeling in het gewas nodig. Verwacht wordt dat de verbetering van de nauwkeurigheid klein is ten opzichte van het nu berekende 25,9% opbrengstverschil. Bovendien zal de lichtverdeling onder de voor dit project relevante semi-transparante PV-cellen gelijkmatiger zijn dan onder een dambordpatroon met niet transparante cellen.

4.1.2 Simulaties van het Anthuriumgewas

Anthurium is een schaduwminnend gewas. Het vereist een actieve beschaduwing wanneer de globale straling meer is dan 300 W/m^2 . Zelfs bij het Nederlandse klimaat gebruiken alle anthuriumtelers een of meerdere zwaar zonwerende schermen.

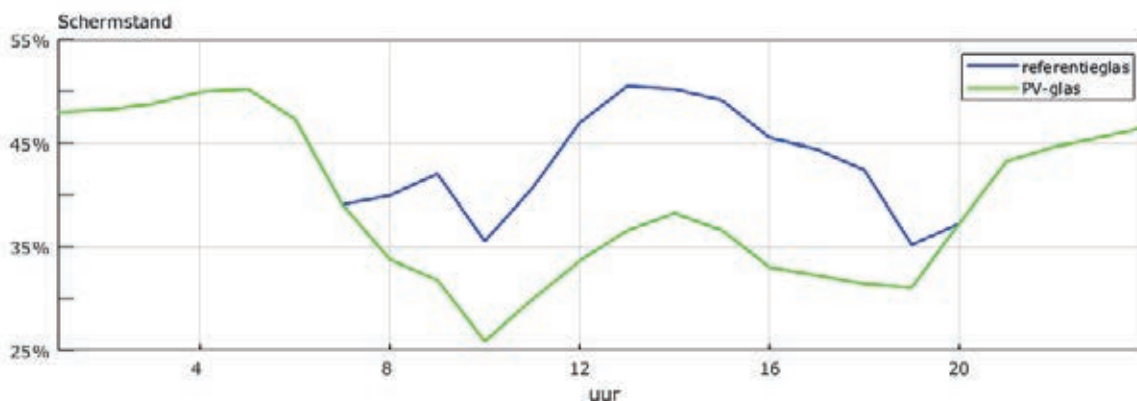
Met de aanwezigheid van de PV-panelen op het kasdek hoeft een zonwerend scherm minder uren te worden gebruikt. Aangezien de regeling van het zonwerende scherm in het Kaspro-model niet gebaseerd is op binnenwaarden van globale straling, maar (evenals bij de meeste praktijkbedrijven) op de buitenwaarden, hebben we het setpoint op zonnestraling waarboven het zonwerende scherm sluit, proportioneel verhoogd met het verschil in hemisferische lichttransmissie in het PAR-bereik (0,792/0,588; zie Tabel 1). Daarom is voor het PV-kasdek het setpoint voor het scherm ingesteld op 404 W/m² buitenstraling.

Als we de hoeveelheid aardgas voor verwarming beschouwen (Figuur 10) zien we wederom dat de kas met het PV kasdek een klein beetje (1%) meer warmte nodig heeft doordat er minder zonnestraling binnenkomt. Het totale aardgasverbruik betreft (43.2 m³/(m².jaar) ten opzichte van 42.7 m³/m².jaar bij de referentiekas.



Figuur 10 Cumulatief aardgasverbruik voor verwarming (m³/m²) voor de twee scenario's bij Anthurium.

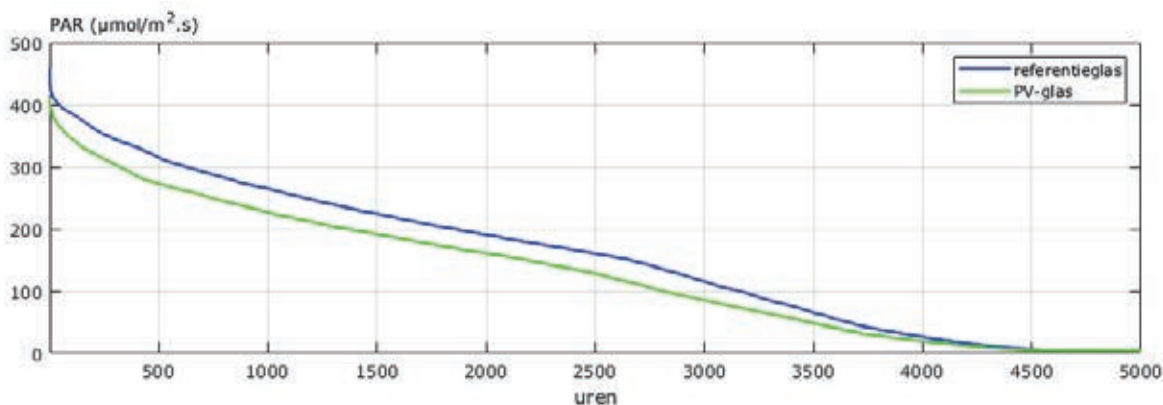
Het verschil in (zonwerend) schermgebruik voor Anthurium is weergegeven in Figuur 11. Hier is het cyclisch etmaalgemiddelde van de schermstand over het hele teeltjaar weergegeven. Omdat het zonwerende scherm ook kan worden ingezet om energie te besparen, is deze 's nachts ook vaak gesloten. Het verschil in schermgebruik tussen de scenario's betreft alleen overdag. Het aantal uren dat het zonwerende scherm is gesloten betreft 3896 onder het referentiekasdek en 3431 onder het PV-panelendeck. Dat is een verschil van 12%.



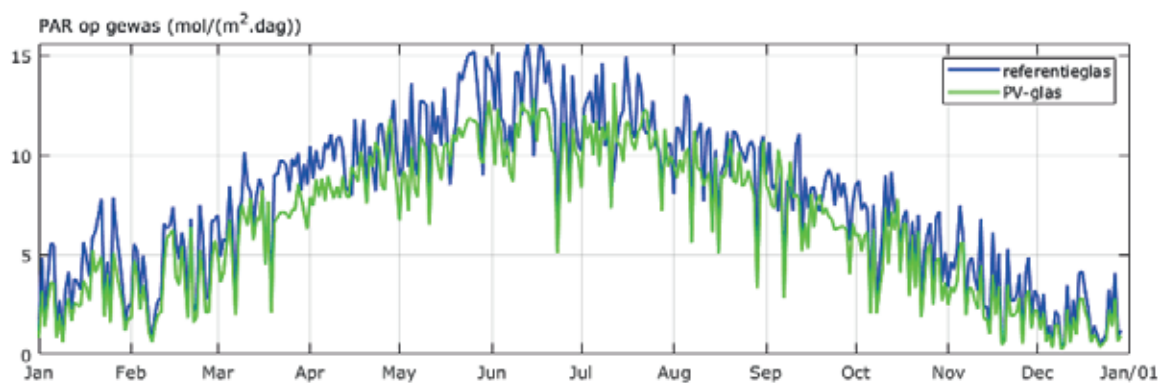
Figuur 11 Cyclisch etmaalgemiddelde van de zonwerende schermstand over het gehele teeltjaar (zonwerend doek wordt ook gebruikt als energiedoek).

Anthurium benut de PAR niet meer optimaal bij niveaus boven $270 \mu\text{mol}/(\text{m}^2.\text{s})$. Dat is een lager niveau dan de hoeveelheid PAR die in een standaard kas komt voordat pas bij een buitenstraling van $300 \text{ W}/\text{m}^2$ ($\pm 450 \mu\text{mol}/(\text{m}^2.\text{s})$) het zonwerende scherm wordt gesloten. Figuur 12 toont de belastingduurkromme voor de PAR gemeten net boven het gewas. Onder het gedeeltelijke PV-paneeldak is het aantal uren boven $270 \mu\text{mol}/(\text{m}^2.\text{s})$ iets lager dan voor het referentiedak (526 uur en opzichte van 927 uur). Figuur 13 toont de dagelijkse hoeveelheid PAR boven het gewas. Deze komt regelmatig boven de $8\text{--}10 \text{ mol}/\text{m}^2.\text{dag}$ uit. Boven deze dagsom biedt extra PAR geen meerwaarde voor het gewas [Nieves Garcia, pers. mededeling]. Dat zou betekenen dat van mei tot en met juni nog meer licht (tezamen $307 \text{ mol PAR per m}^2$) mag worden weggenomen ten bate van de elektriciteitsproductie, zonder dat dit de gewasproductie negatief beïnvloedt.

De totale hoeveelheid PAR die door de Anthurium onder de standaarddekking werd ontvangen, bedroeg $2811 \text{ mol}/\text{m}^2$, terwijl het voor het kasdek met PV-panelen $2362 \text{ mol}/\text{m}^2$ was, wat 16% minder is. Hiermee daalt de drogestofproductie onder het kasdek met gedeeltelijke bedekking met PV-panelen ten opzichte van de standaard dakbedekking. Voor gewassen zoals Anthurium zijn de uiteindelijke verkoopprijs en omzet echter niet uitsluitend gerelateerd aan de productie van drogestof. We kunnen niet nauwkeurig simuleren wat. Natuurlijk moet de plant een bepaalde grootte bereiken, maar er zijn andere kwaliteitsaspecten die van invloed zijn op de uiteindelijke prijs. Er zijn geen gewasmodellen beschikbaar die het effect op de gewaskwaliteit kunnen kwantificeren, van het aantal uren met hogere lichtintensiteiten dan optimaal. Daarom kunnen we niet bepalen wat het effect zou zijn van de PV-panelen op de omzet.



Figuur 12 Jaarbelastingduurkromme van de hoeveelheid PAR boven het gewas ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2.\text{s})$) voor de twee gesimuleerde kasdekken.



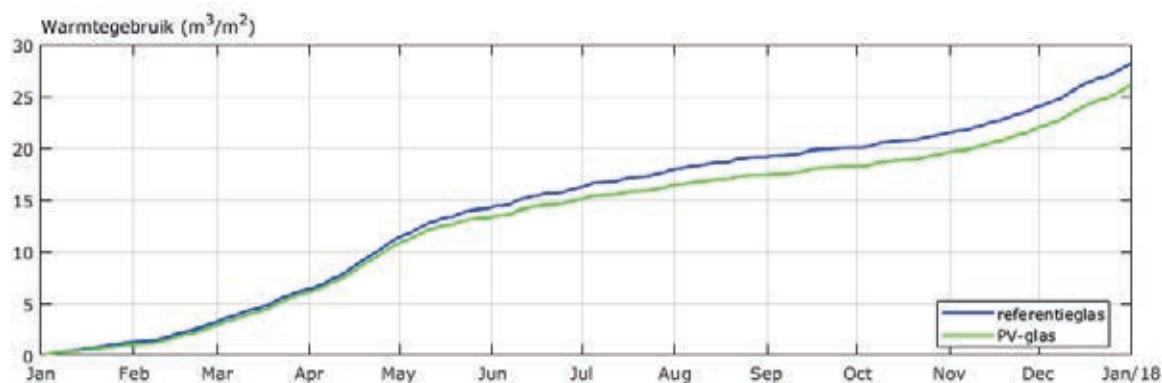
Figuur 13 Dagelijkse hoeveelheid PAR ($\text{mol}/\text{m}^2.\text{dag}$) boven het gewas voor de twee gesimuleerde kasdekken.

4.1.3 Simulaties van het rozengewas

Een rozengewas vereist een hoge belichtingsintensiteit tijdens het grootste deel van het jaar, maar ook veel beschaduwing in de zomer. De setpoints die gehanteerd zijn voor de simulaties staan vermeld in Tabel 2.

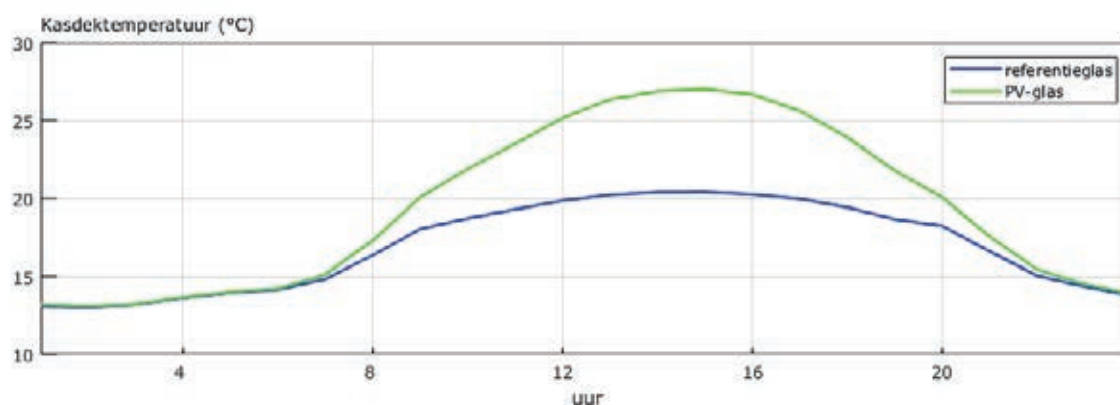
Aangezien het kasdek met PV-panelen al een hemisferische lichttransmissie heeft die 25% lager is dan het referentiekasdek, zijn we voor die simulatie niet uitgegaan van krijt op het dek in de zomerperiode. In tegenstelling tot de andere bestudeerde scenario's, is het warmtegebruik bij roos onder het dek met PV panelen lager berekend dan bij de referentie (Figuur 14).

We zien dat in dit gewas de hoeveelheid energie die wordt gebruikt voor verwarming voor een aantal perioden lager is onder het dak van het PV-paneel dan onder het referentieglas. Het totale gasgebruik in het referentieglas bedraagt $28,13 \text{ m}^3/\text{m}^2$ terwijl in de kas met PV-panelen, het $26,0 \text{ m}^3/\text{m}^2$ is. Dat betekent een verlaging van 7,6%.



Figuur 14 Cumulatief warmtegebruik in m^3/m^2 aardgasequivalenten voor de twee scenario's bij roos.

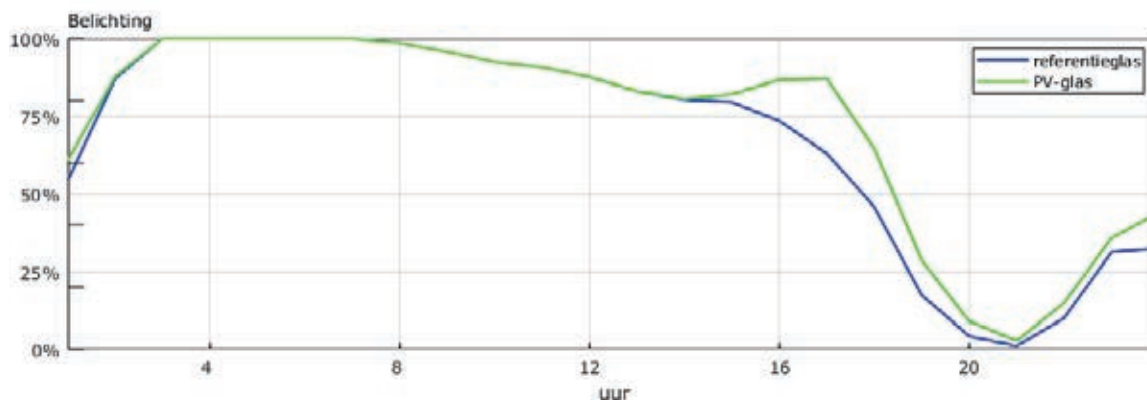
Deze afwijking ten opzichte van de andere scenario's is deels veroorzaakt doordat het kasdek met PV panelen door absorptie van globale straling en reflecterend NIR warmer wordt dan het referentiekasdek. De hogere kasdektemperatuur geldt nog meer als je het kasdek met PV panelen gedurende de zomer vergelijkt met een referentiekasdek met krijt (zie Figuur 15). Een warmer kasdek verkleint de warmteverliezen. Een ander deel van het lagere warmtegebruik is het groter aantal belichtingsuren bij de kas met PV panelen (zie Figuur 16)



Figuur 15 Cyclisch etmaalgemiddelde van 1 april tot 1 oktober van de kasdektemperatuur ($^{\circ}\text{C}$) in beide scenario's.

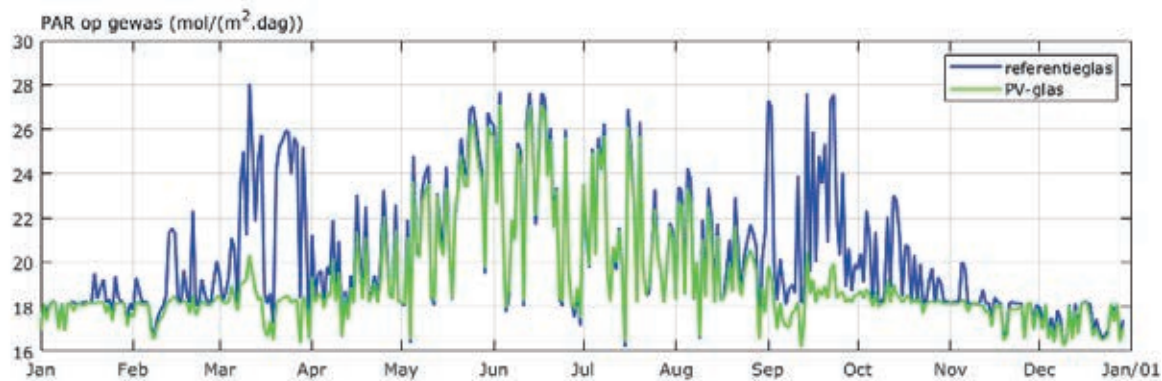
De hoeveelheid elektriciteit die wordt gebruikt om de lampen te laten branden is iets hoger voor het scenario met de PV panelen. De grootste verschillen treden op tijdens de donkere dagen, wanneer het langer duurt voordat de vereiste $18 \text{ mol}/\text{m}^2$ is bereikt. Bij het kasdek met PV panelen duurt dit nog langer. In Figuur 16 is voor de winterperiode te zien op welke tijd van de dag het verschil wordt gemaakt. Namelijk tussen 13 en 19 uur.

De uiteindelijke som van de elektriciteit benodigd onder het referentiekasdek en het kasdek met PV-panelen, bedroeg respectievelijk 531 kWh/m² en 560 kWh/m². Onder het kasdek met PV-panelen is dus 5,5% meer elektriciteit voor belichting nodig.



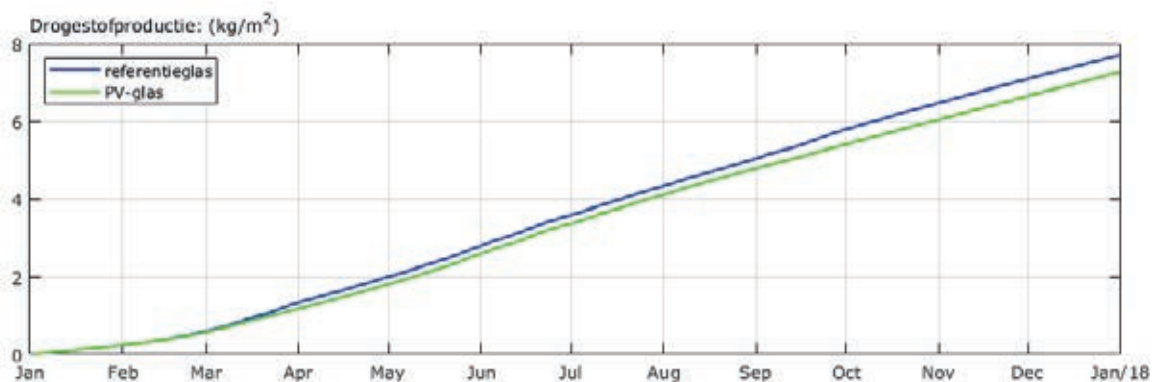
Figuur 16 Cyclisch etmaalgemiddelde van de inzet van belichting (%) in de winterperiode tussen 1 oktober en 31 maart.

Hier komt nog bij dat het gewas onder het kasdek met PV panelen jaarrond minder PAR ontvangt dan onder het referentiekasdek. Dit geldt vooral in het voorjaar en de herfst. In de winter komt de meeste PAR van de lampen, wat dan nauwelijks door het kasdek wordt beïnvloed, en in de zomer verliest het referentieglass 30% transmissie door het krijten, waardoor de beschikbare PAR-waarden dan vrijwel gelijkwaardig zijn in beide scenario's (zie Figuur 17). De totale PAR-som die per jaar beschikbaar is voor het gewas is voor de referentie- en PV-panelenscenario's respectievelijk 7363 mol/m² en 6993 mol/m². Dat betekent 5% minder PAR beschikbaar voor het PV-panelenscenario.



Figuur 17 Verloop van de dagelijkse PAR-som (mol/m²) op het rozengeas gedurende het jaar, voor twee scenario's.

De totale geproduceerde biomassa per jaar kan een indicatie geven van het opbrengstverschil dat zou kunnen bestaan tussen beide gesimuleerde scenario's. Het Kaspro-model schat dat het verschil in drogestofproductie nog groter is dan het verschil in PAR, namelijk 5,9% lager voor het PV-panelenscenario (zie Figuur 18). Dit grotere verschil kan zijn veroorzaakt door het warmere kasdek, waardoor een grotere ventilatiebehoefte en een lagere CO₂-concentratie ontstaat. Ook de hogere gemiddelde kastemperatuur van 0,2°C kan hebben bijgedragen aan een hogere ademhaling (dissimilatie) en daarmee een lagere aanmaak van netto assimilaten (drogestof).



Figuur 18 Cumulatieve drogestofproductie (kg/m²) van roos bij twee scenario's.

4.2 Economische analyse op basis van de simulaties

Op basis van verschillen in operationele kosten en opbrengsten kan een schatting worden gemaakt van de mogelijkheden om PV cellen in te zetten voor de verschillende gewassen. In Tabel 3 zijn de operationele meerkosten van PV-panelen in het kasdek weergegeven bij de huidige prijzen van elektriciteit, aardgas en gewasproducten. Hierbij zijn de investeringskosten van de panelen niet meegenomen. Uit de tabel komt naar voren dat de geschatte opbrengstderving verreweg de grootste kostenpost is en dat die voor Anthurium onbekend is.

Tabel 3

Schatting van de meerkosten van PV panelen in het kasdek voor de drie gewassen (exclusief investeringskosten van de panelen).

	Eenheid	Prijs per eenheid	Komkommer	Anthurium	Roos
Gasverbruik	m ³ /m ² .jr	0.25	1.30	0.50	-2.13
Elektriciteitsverbruik	kWh/m ² .jr	0.045	5.0	0.0	29.0
Geschatte opbrengstderving	€/m ² .jr	1	8.00	pm	6.14
Meerkosten	€/m ² .jr		€ 8.55	€ 0.13 + pm	€ 6.91

De meeropbrengsten bestaan uit de opbrengsten voor de verkochte elektriciteit. De jaarlijkse globale straling in Nederland betreft een hoeveelheid energie van ongeveer 1050 kWh/m². Door de PV-panelen op de zuidhelling van het kasdek te plaatsen, kan de hoeveelheid globale straling per m² PV-paneel nog iets worden vergroot. Een PV-paneel met een rendement van 18% levert dan ongeveer 200 kWh/m² aan elektriciteit op. Het oppervlak aan panelen op het kasdek is bij een bedekking van 50% op 1 van de 2 zijden bij een dekhelling van 23°C gelijk aan $50\% / 2 / \cos(23^\circ) = 27\%$ van het kasoppervlak.

De marktwaarde van elektriciteit (peakload) varieert de laatste jaren tussen 30 en 60 € per MWh [Raaphorst en Benninga, 2019]. Hoe deze marktwaarde zich in de toekomst zal ontwikkelen hangt af van vele factoren. Indien bijvoorbeeld het aanbod aan zonne-electriciteit groter wordt, zal bij veel zonlicht de elektriciteitsprijs lager worden, maar indien de vraag naar elektrische koeling groter wordt, dan zal bij veel zonlicht de elektriciteitsprijs hoger worden. Uitgaande van een waarde van € 45,- per MWh levert de $27\% \cdot 200 \text{ kWh/m}^2$ een bedrag van 2,43 €/(m².jaar) op.

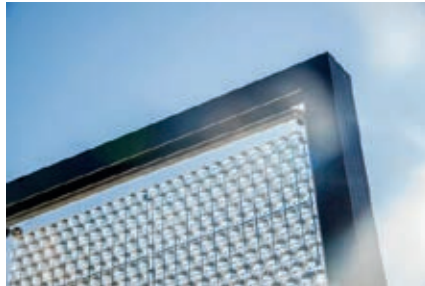
Dit bedrag is volstrekt onvoldoende om de meerkosten bij komkommer en roos (respectievelijk 8,55 en 6,91 €/m²), en de meerkosten van de investering (onbekend) te compenseren. Bij Anthurium, waarbij evenals bij veel andere potplanten de relatie tussen drogestofproductie en omzet minder lineair is, zijn nog wel kansen voor een rendabele inzet van PV-panelen in het kasdek.

Hierbij zullen met name de systemen met een regelbare lichttransmissie voordelen kunnen bieden, omdat de plant dan een meer gelijkmatig aanbod van licht kan krijgen. Zeker bij wisselende lichtomstandigheden kan het snel schakelen van de lichttransmissie positief uitwerken op de kwaliteit van de potplant.

5 Onderzochte semi-transparante PV materialen

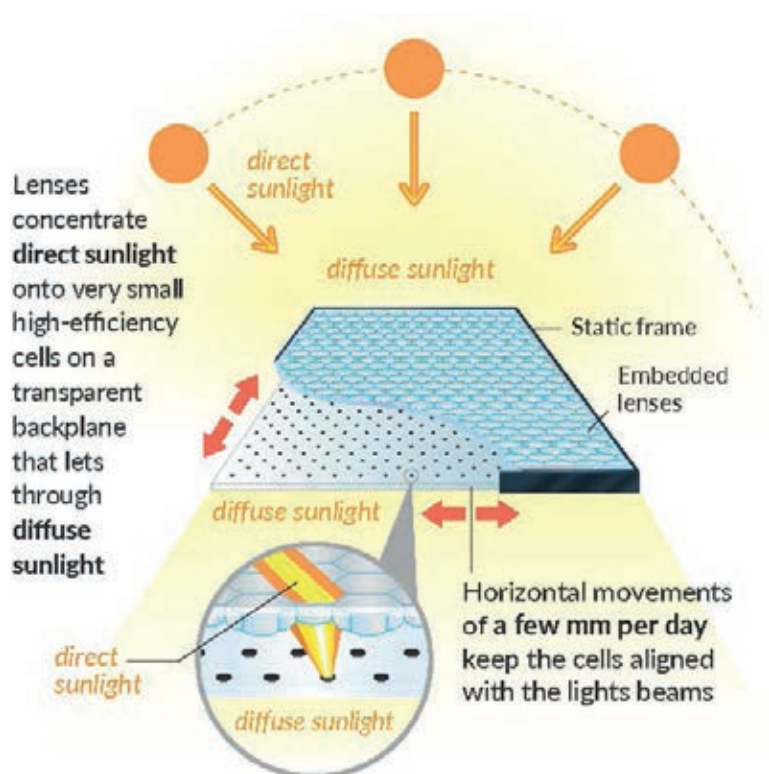
Voor dit project zijn monsters ontvangen van Insolight, Brite Solar en DPW. Hiervan zijn de transmissie en reflectie gemeten. De resultaten van deze metingen worden vergeleken met de uitgangspunten van de simulaties uit hoofdstuk 4.

5.1 Insolight



Figuur 19 Het Insolight PV-paneel.

De module van Insolight betreft een matrix van Planar-lenzen die het licht concentreert op een plaat met een netwerk van kleine PV-cellen met een hoge efficiency. Door microtracking kunnen de PV-cellen bewegen ten opzichte van de lenzen, waardoor ingespeeld kan worden op de verschillende invalshoeken van het zonlicht (zie Figuur 20). Alleen het directe zonlicht wordt naar de PV cellen afgebogen. Het diffuse licht dat vanuit andere invalshoeken komt, wordt grotendeels doorgelaten. Dit betekent dat de elektriciteitsproductie sterk afhankelijk is van de hoeveelheid direct zonlicht. Het systeem is al zo ver ontwikkeld dat het nu al op praktijkschaal zou kunnen worden getest.



Figuur 20 Werkingsprincipe van de Insolight PV panelen.

5.1.1 Metingen

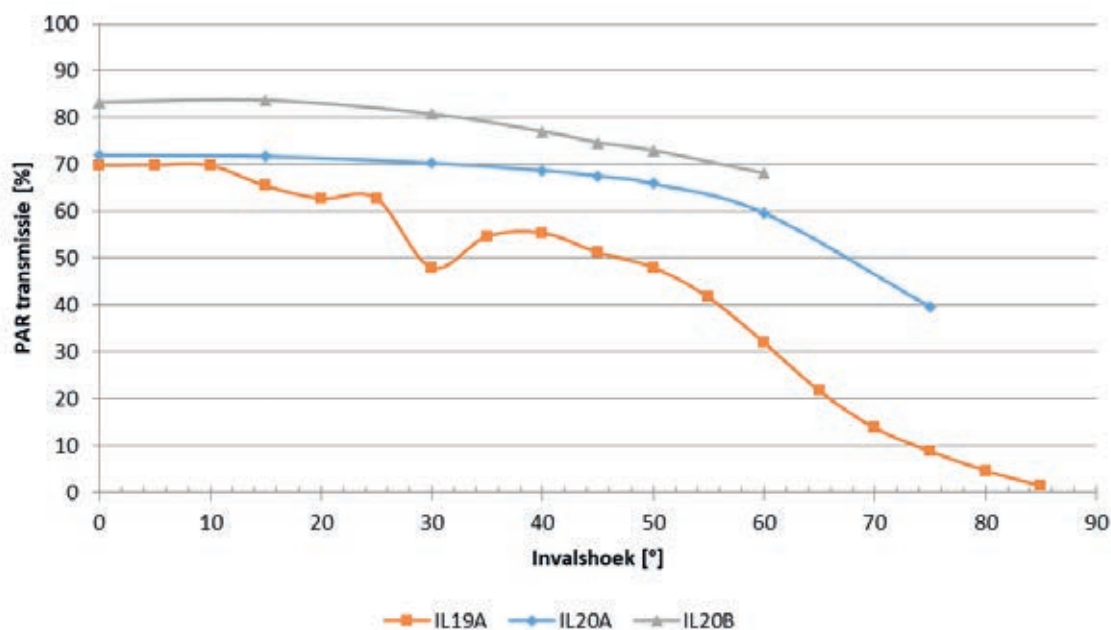
De gemeten hemisferische PARtransmissie van zowel de plaat en de lenzen los van elkaar en gecombineerd, is weergegeven in Tabel 4. Hieruit blijkt dat de hemisferische transmissie van het hele systeem op iets meer dan de helft ligt van die van ongecoat floatglas ($\pm 83\%$). Dit betreft de diffuse (indirecte) globale straling. De directe globale straling wordt gebruikt voor de PV cellen.

Tabel 4

Gemeten hemisferische transmissie van PAR en NIR bij de drie monsters van Insolight.

Monster	Code	Hemisferische PAR Transmissie	Hemisferische NIR Transmissie
Complete module	IL19A	43.8%	34.5%
Plaat met PV cellen	IL20B	62.6%	55.8%
Lens matrix	IL20A	70.7%	54.6%

De metingen wijken op enkele punten af van NEN2675:2018+C1 (zie voetnoot¹). Ondanks deze afwijkingen lijken de metingen acceptabel voor onze doelstelling, in die zin dat de combinatie van de twee aparte metingen IL20A en IL20B ($0,707 \cdot 0,626 = 0,443$) zeer goed overeenkomt met de meting van de integrale module IL19A (0,438).



Figuur 21 PARtransmissie (%) van de drie monsters van Insolight, uitgezet tegen de invalshoek van licht (°).

Voetnoot

1. NEN2675:2018+C1 is niet toepasbaar voor dubbel glas zoals bij IL19A.
2. Volgens NEN2675:2018+C1 p 5.6.4.2 moet de diameter van het monster minstens 10 keer zo groot zijn als de langste zijde van het repeterende patroon in het monster. Bij IL20A is dit twee keer de langste zijde, dus aan deze voorwaarde is niet voldaan.
3. Volgens NEN2675:2018+C1 p 5.6.4.3 mag de zijkant van het monster niet belicht worden. Door de beperkte monstergrootte kon dit niet worden bereikt bij een invalshoek van meer dan 60°.
4. Volgens NEN2675:2018+C1 p 7.1 moet het monster groot genoeg zijn opdat de hoek geen schaduw werpt op de ingangspoort van de geïntegreerde bol. Dit is niet gelukt voor alle invalshoeken bij IL19A en IL20B.

De metingen houden geen rekening met de mogelijkheid om de module af te stemmen op de invalshoek van het licht en tonen alleen de doorgifte voor volledig diffuse globale straling. Op heldere winterdagen kan in de praktijk een hogere transmissie worden bereikt dan de metingen suggereren, omdat de lenzenmatrix het doorgelaten licht dan kan richten op een niet-gemetalliseerde sectie van de plaat met pv-cellen.

Van de productieversie verwacht de producent dat deze tot 5-10% meer lichttransmissie kan realiseren dan wat bij het monster is gemeten. Deze hogere lichttransmissie kan worden gerealiseerd door antireflectie (AR) coatings, verkleining van de gemetalliseerde PV-cellen (nu 15% van het oppervlak) en optimalisering van de verlijmde delen.

Van de elektriciteitsproductie zegt de producent dat deze in Zwitserland vergelijkbaar is met die van conventionele niet transparante PV-panelen, en dat de energie van het directe zonlicht voor 30% wordt omgezet in elektriciteit. Omdat de potentiële elektriciteitsproductie afhankelijk is van de hoeveelheid directe straling, wordt verwacht dat met deze modules in Nederland enkele procenten minder rendement kan worden gerealiseerd dan met conventionele PV panelen. In Spanje, waar relatief meer direct zonlicht is, zal het rendement juist zo'n 5% hoger zijn.

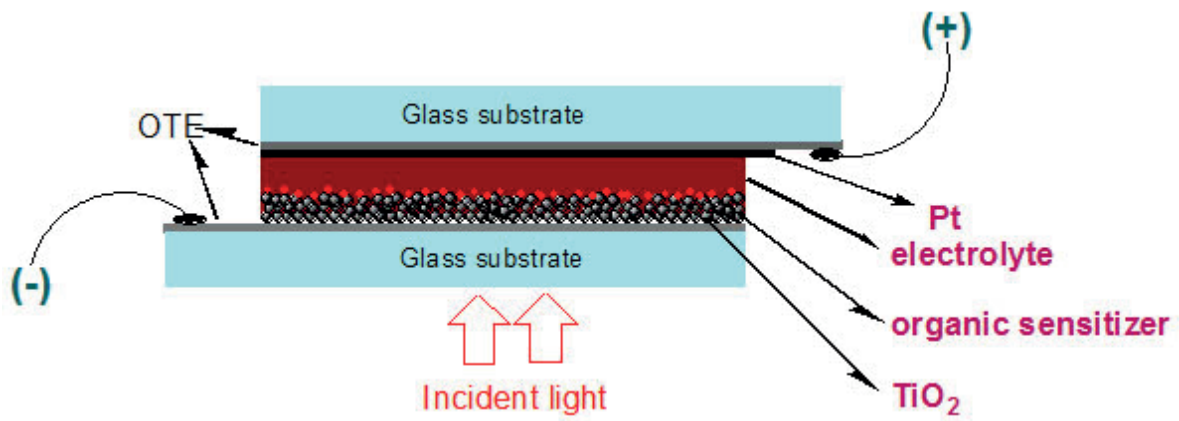
5.1.2 Vergelijking met de simulaties

Ten opzichte van de simulaties met het dambordpatroon in hoofdstuk 4 wijkt het systeem van Insolight op sommige eigenschappen af.

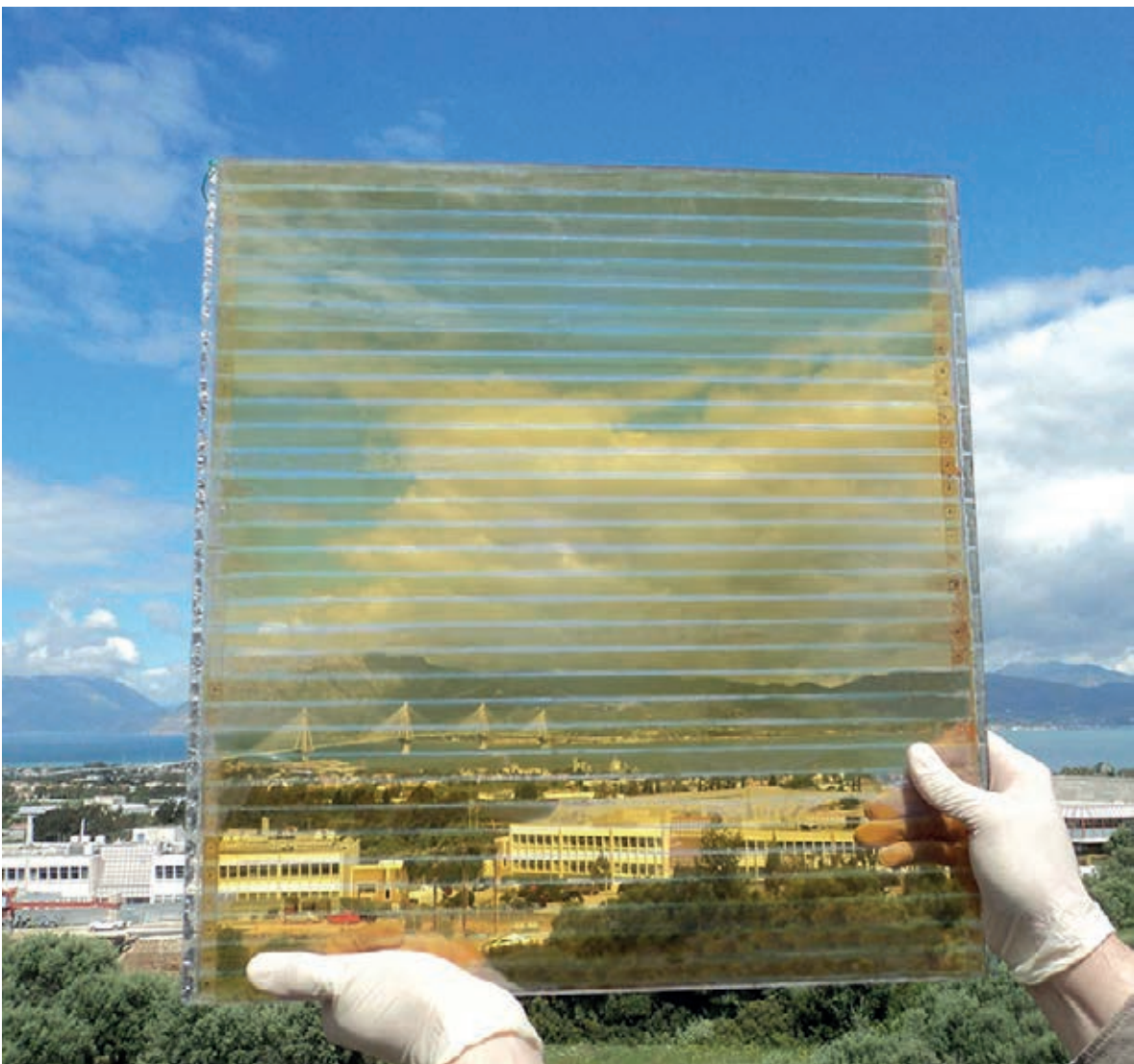
1. Alleen het directe licht wordt geabsorbeerd voor elektriciteitsproductie. Dit kan ervoor zorgen dat bij bewolkt weer meer licht op het gewas komt dan bij zonnig weer. Bovendien geeft het systeem de mogelijkheid om bij zonnig weer het te absorberen deel van het zonlicht te sturen. Beide eigenschappen zullen een positiever resultaat geven op de gewasproductie dan de simulaties. Dat zal met name gelden bij schaduwminnende gewassen [van Noort *et al.* 2014] [van Noort *et al.* 2013].
2. De isolatiewaarde en absorptie van globale straling (inclusief NIR), welke invloed hebben op de temperatuur van het kasdek, kunnen anders zijn. Een hogere isolatiewaarde geeft minder warmtegebruik, maar vraagt in de zomer om meer ventilatie. Hierdoor is moeilijker om een hoge CO₂-concentratie aan te houden. Integrale effecten zouden door proeven kunnen worden vastgesteld.
3. Een vergelijkbaar rendement met niet transparante PV panelen zal leiden tot een verdubbeling van de elektriciteitsproductie ten opzichte van de ondoorzichtige PV-panelen in dambordpatroon (indien jaarrond al het directe zonlicht wordt geabsorbeerd).
4. Met een hemisferische PAR-transmissie van 43,8% laten de panelen van Insolight bij bewolkte hemel iets meer PAR door dan een dambordpatroon van floatglas en ondoorzichtige PV-panelen ($79,3/2=39.7\%$). Dit voordeel zal groter worden als de door de producent beoogde transmissieverbeteringen worden bereikt. Het directe zonlicht (in Nederland op jaarbasis $\pm 43\%$ van de globale straling [Velds en van der Hoeven, 1992]) kan echter gefocust worden op de PV-cellen, waardoor de totale PAR-som op het gewas op jaarbasis lager wordt dan bij de simulaties.
5. Verwacht wordt, dat het Insolight systeem voor schaduwminnende gewassen een positiever resultaat zal geven dan het dambordpatroon van hoofdstuk 4. Juist op de zonnige momenten waarop in een referentiekas veel licht moet worden weggeschermd, kan het Insolight systeem hier meer gebruik van maken.

5.2 Brite Solar

Het semi-transparante PV-paneel van Brite Solar bestaat uit twee glaslagen, waartussen een vaste elektrolyt zorgt voor de omzetting van licht naar elektriciteit (zie Figuur 22). De panelen hebben een transparante kleurstof, zoals te zien in Figuur 23.



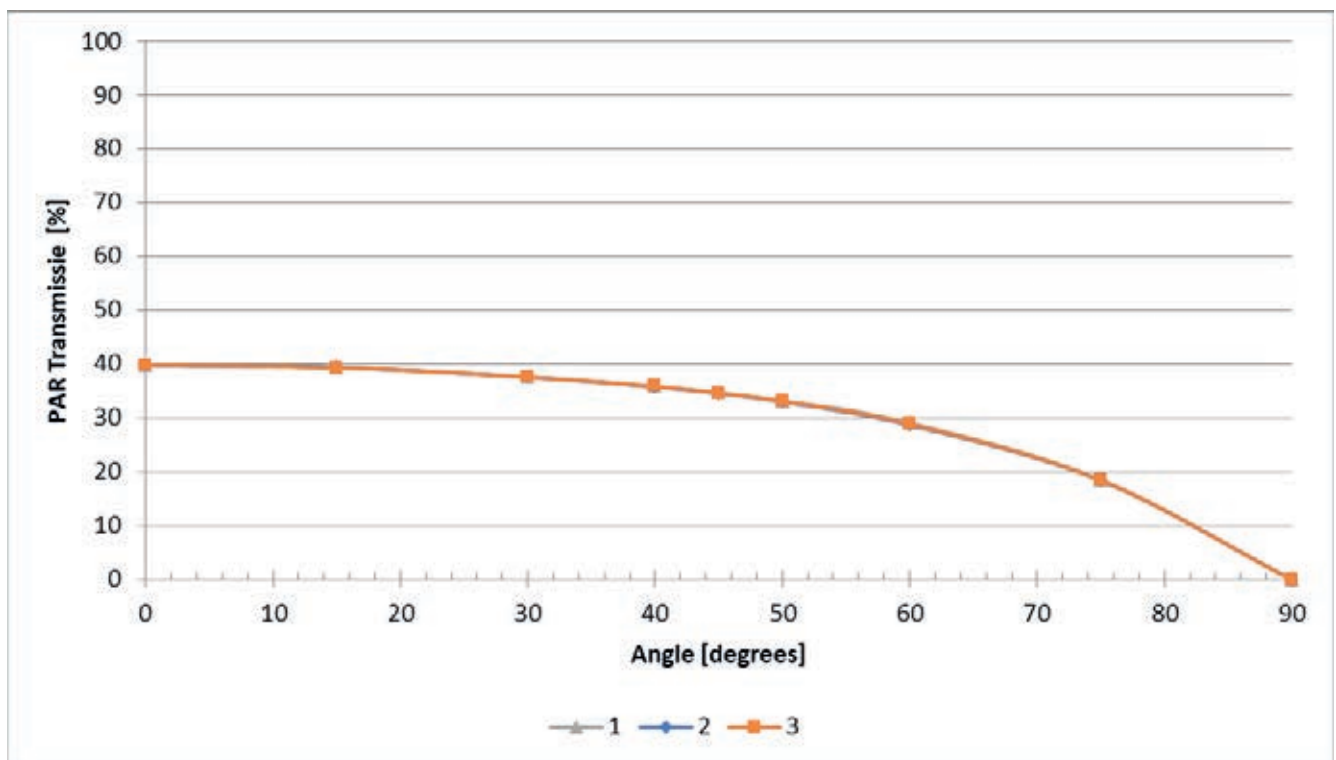
Figuur 22 Opbouw van het PV-paneel van Brite Solar.



Figuur 23 Presentatie van het "Dye sensitized" PV-paneel.

5.2.1 Metingen

Bij monster BS19A van Brite Solar is een hemisferische PAR transmissie van 32,2% en een hemisferische NIR transmissie van 39,1% gemeten. Verdeeld over de invalshoeken van licht, is de PAR transmissie weergegeven in Figuur 24. Tussen de herhalingen is nauwelijks verschil te zien.



Figuur 24 Gemeten PAR transmissie (%) van monster BS19A (inclusief 2 herhalingen).

5.2.2 Vergelijking met de simulaties

Ten opzichte van de simulaties met het dambordpatroon in hoofdstuk 4 wijkt het systeem van Brite Solar op sommige eigenschappen af.

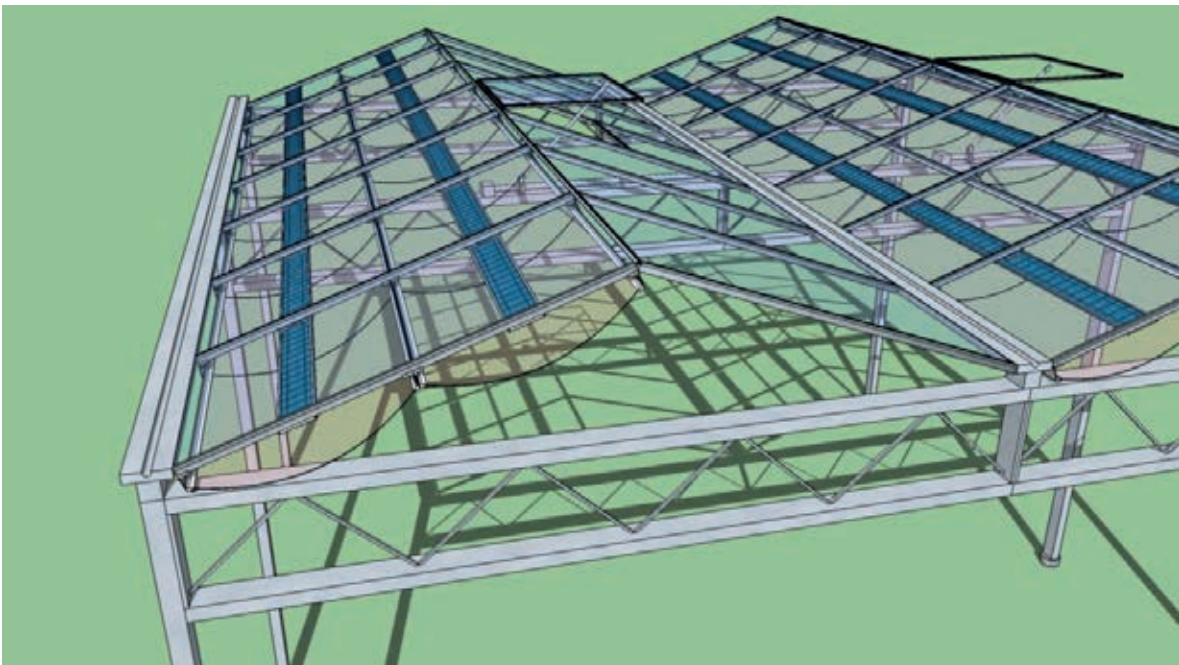
1. Met een hemisferische PAR-transmissie van 32,2% laten de panelen van Brite Solar minder PAR door dan een dambordpatroon van floatglas en ondoorzichtige PV-panelen ($79,3/2 = 39.7\%$).
2. De isolatiewaarde en absorptie van globale straling (inclusief NIR), welke invloed hebben op de temperatuur van het kasdek, kunnen anders zijn. Deze factoren zijn niet gemeten. Een hogere isolatiewaarde geeft minder warmtegebruik, maar vraagt in de zomer om meer ventilatie. Hierdoor is moeilijker om een hoge CO_2 -concentratie aan te houden.
3. Een andere verdeling van het spectrum zal invloed hebben op de gewasgroei. Het zal van het type gewas afhangen of deze invloed positief of negatief is.
4. In totaal mag worden verwacht dat het systeem van Brite Solar jaarrond te veel licht wegneemt. De productiederving zal niet kunnen worden gecompenseerd door elektriciteitsverkoop.

5.3 DWP

DWP maakt gebruik van ondoorzichtige PV-panelen die licht van boven en van beneden kunnen absorberen. Door stroken van deze PV-panelen op het kasdek te plaatsen, en daaronder een brede parabolisch gevormde NIR-reflecterende plaat te hangen, kan direct zonlicht van bovenaf, en de gereflecteerde NIR van onderaf worden opgevangen (zie Figuur 25 en Figuur 26).



Figuur 25 PV-paneel van DWP met daaronder een parabolisch gebogen NIR-reflecterende plaat in de meetopstelling.

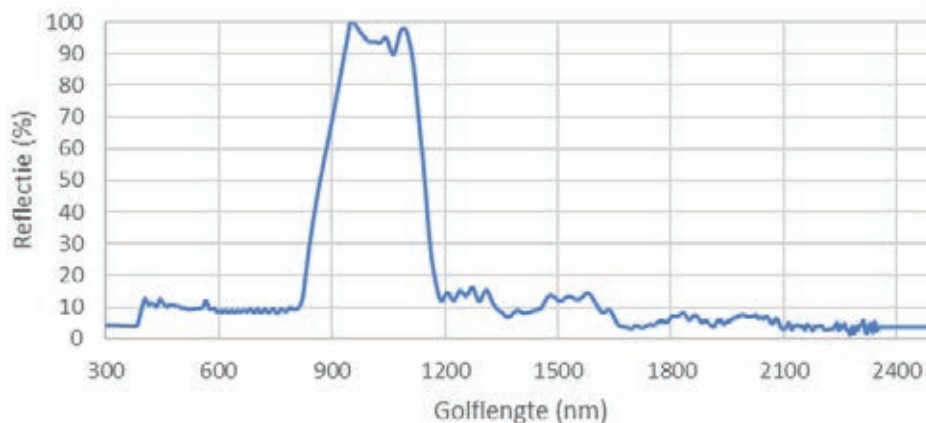


Figuur 26 Voorbeeld van de PV-panelen van DWP met daaronder de gebogen NIR reflecterende plaat, bevestigd aan een zijde van het kasdek.

In Figuur 26 is het systeem aangebracht op een helling van het kasdek. Idealiter zou dit de zuidhelling zijn. Doordat de gebogen NIR-reflecterende plaat een extra laag in (de helft van) het kasdek brengt, wordt de isolatiegraad van de kas vergroot. Dit zal het warmteverbruik verlagen. Daarentegen kunnen de luchtramen slechts aan een zijde worden geopend, wat nadelig is voor de ventilatiecapaciteit in de zomerperiode.

5.3.1 Metingen

Van de NIR reflecterende plaat is de reflectie gemeten (zie Figuur 27). Hieruit blijkt dat de straling met een golflengte tussen 900 en 1100 nm vrijwel volledig wordt gereflecteerd. Voor PAR ligt de reflectie rond 10%. De NIR met een golflengte van meer dan 1100 nm wordt ook nauwelijks gereflecteerd.



Figuur 27 Reflectie uitgezet tegen de golflengte van de NIR-reflecterende plaat.

Vanwege de complexiteit van de installatie is de PAR-transmissie van de gebogen NIR-reflecterende plaat niet gemeten. Gezien de reflectie in dit gebied van 10% zal de PAR-transmissie lager liggen dan 90%. Daarnaast nemen de niet transparante PV-panelen 16% van het oppervlak in beslag, waardoor de totale lichttransmissie met minimaal $10\% + 16\% \cdot (100\% - 10\%) = 25\%$ wordt verlaagd.

5.3.2 Vergelijking met de simulaties

Ten opzichte van de simulaties met het dambordpatroon in hoofdstuk 4 wijkt het systeem van DPW op sommige eigenschappen af.

1. De isolatiewaarde en absorptie van globale straling (inclusief NIR), welke invloed hebben op de temperatuur van het kasdek, kunnen anders zijn. Deze factoren zijn niet gemeten. Een hogere isolatiewaarde geeft minder warmtegebruik, maar vraagt in de zomer om meer ventilatie. De NIR reflecterende laag kan daarentegen de kas bij zonnig weer iets koeler houden. Door deze elkaar compenserende eigenschappen zal de invloed op de CO₂-concentratie klein blijven.
2. Indien de volledige zuidhelling wordt bedekt met het systeem, wordt het moeilijk om daar ook luchtramen te plaatsen. Een kleine ventilatiecapaciteit kan een negatief effect hebben op het zomerklimaat.
3. 1/6^e deel van het zonlicht wordt direct onderschept, en indirect vrijwel 100% van de straling tussen 900 en 1100 nm. Dit deel van het spectrum bevat ongeveer 13% van de energie in globale straling [Hemming *et al.* 2005; van Weel, 2009]. Hiermee wordt geschat dat $17\% + (100\% - 17\%) \cdot 90\% \cdot 13\% \approx 26\%$ van de globale straling op het PV-paneel terechtkomt. Hierbij is verondersteld dat alle gereflecteerde NIR naar het PV-paneel wordt afgebogen. 26% is vrijwel gelijk aan het percentage lichtverlies dat wordt geleden.
4. In totaal mag worden verwacht dat bij een installatie op de zuidhelling van het kasdek, de invloed op zowel de gewasproductie als op de elektriciteitsproductie half zo groot is als bij de simulaties. Ten opzichte van een patroon waarbij 1/4^e van de zuidhelling wordt bedekt, zal het systeem een lager warmteverbruik hebben, een iets lagere dagtemperatuur geven en waarschijnlijk een hogere investering vergen.

5.4 Andere technieken

Andere bedrijven hebben technieken op de markt gebracht waarbij het zonlicht wordt geconcentreerd op de PV-cellen, en waarbij het spectrum van het zonlicht wordt verschoven van kortgolvig naar langgolvig. De eigenschappen van deze technieken zijn in dit project niet getest.

Bij enkele (niet in dit project onderzochte) technieken verschuift het lichtspectrum van kortgolvig (blauw) naar meer langgolvig (rood of zelfs verrood en NIR). Volgens de McCree curve zou dit moeten leiden naar een iets hogere absorptie van PAR door het gewas. De meeste onderzoeken met LED licht (o.a. [Meinen *et al.* 2009]), waarbij relatief veel rood licht wordt gegeven, laten echter zien dat dit voor veel gewassen een vergelijkbare lichtbenutting per mol PAR geeft, en in sommige gevallen (o.a. [Sterk *et al.* 2009]) juist een lagere lichtbenutting. Omdat een ander lichtspectrum ook invloed (zowel positief als negatief) kan hebben op de plantmorfologie zullen de betreffende spectra in de praktijk moeten worden getest voordat een uitspraak kan worden gedaan over de economische haalbaarheid van systemen waarbij het spectrum verschuift.

6 Conclusies

Geen van de geteste PV-panelen kunnen rendabel worden ingezet boven groenten- en snijbloemengewassen zoals komkommer en roos, in Nederland. Ze nemen daarvoor te veel PAR weg, wat de productie van de genoemde tuinbouwproducten ernstig belemmert. Boven schaduwminnende gewassen, waarbij een hoge PAR intensiteit ongewenst is, zijn de perspectieven voor PV-panelen groter, met name voor de panelen waarbij de lichtintensiteit snel en nauwkeurig kan worden beheerst (zoals bij Insolight), waardoor zelfs kwaliteitsverbetering is te realiseren.

Technieken waarbij PV wordt gebruikt zonder dat de gewasproductie negatief wordt beïnvloed hebben de voorkeur. Een voorbeeld hiervoor is een eerdere ontwikkeling als de daglichtkas [de Zwart en van Noort, 2012].

Literatuur

- Hemming, S., Kempkes, F., Mohammadkhani, V., Braak, N.v.d., Dueck, T., Jongschaap, R. en Marissen, N. (2005):
Het effect van NIR-filterende kasdek- en schermmaterialen op kasklimaat, energieverbruik en gewasproductie, Agrotechnology and Food Innovations, Wageningen.
- Hemming, S., de Zwart, H.F., Swinkels, G.L.A.M. en Janssen, H.J.J. (2014):
DEVELOPMENT OF ELECTRICITY PRODUCING GREENHOUSES - TWO CASE STUDIES. Acta Horticulturae, 1037, p. 129-136.
- Marcelis, L., Broekhuijsen, G., Meinen, E., Nijs, L. en Raaphorst, M. (2004):
Lichtregel in de tuinbouw : 1% licht = 1% productie? Nota / Plant Research International;305. Plant Research International. Wageningen.
- Meinen, E., Marcelis, L., Steenhuizen, J. en Dueck, T. (2009):
Is een μmol een μmol ? : groei en ontwikkeling van chrysant geteeld onder SON-T belichting en onder LED verlichting. Rapport / Wageningen UR Glastuinbouw;315. Wageningen UR Glastuinbouw. Wageningen.
- van Noort, F., Kromdijk, W., Snel, J.F.H., Warmenhoven, M., Meinen, E., Li, T., Kempkes, F. en Marcelis, L.F.M. (2013):
'Grip op licht' bij potanthurium en bromelia : meer energie besparing bij Het Nieuwe Telen Potplanten met meer natuurlijk, diffuus licht en verbeterde monitoring, Wageningen UR Glastuinbouw, Wageningen.
- van Noort, F.R., Marcelis, L.F.M., Kempkes, F.L.K. en Snel, J.F.H. (2014):
Grip op licht – Energiebesparing en diffuus licht bij potplanten.
- Sterk, F., Steenhuizen, J. en Dueck, T. (2009):
Effect van LEDs op komkommer in de praktijk : de Waddenkas, Wageningen UR Glastuinbouw, Bleiswijk.
- van Velden, P. (2019):
Langdurige hogedraadteelt met herbeworteling geeft hoge productie : hogedraadteelt komkommers in Winterlichtkas: Onder glas 16 (4): 26 - 27, 2019.
- Velds, C.A. en van der Hoeven, P.C.T. (1992):
Zonnestraling in Nederland. Klimaat van Nederland ; 3. Thieme ; KNMI. Baarn/De Bilt.
- van Weel, P.A. (2009):
Effecten van materialen die Nabij-Infrarode straling aan het kasdek tegenhouden, Wageningen UR Glastuinbouw, Bleiswijk.
- de Zwart, H.F. (1996):
Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model, Wageningen University, Wageningen.
- de Zwart, H.F. (2010):
De performance van de drie demo-kassen op het Innovatie en Demo Centrum, Wageningen UR Glastuinbouw, Wageningen.
- de Zwart, H.F. (2011):
Benutting van zonne-energie in de tuinbouw : een strategische verkenning, Wageningen UR Glastuinbouw, Wageningen.
- de Zwart, H.F. en van Noort, F. (2012):
Praktijkervaringen met de DaglichtKas, Wageningen UR Glastuinbouw, Wageningen.

To explore
the potential
of nature to
improve the
quality of life



Wageningen University & Research,
BU Glastuinbouw
Postbus 20
2665 ZG Bleiswijk
Violierenweg 1
2665 MV Bleiswijk
T +31 (0)317 48 56 06
www.wur.nl/glastuinbouw

Rapport WPR-972

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 5.000 medewerkers en 12.000 studenten behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.