

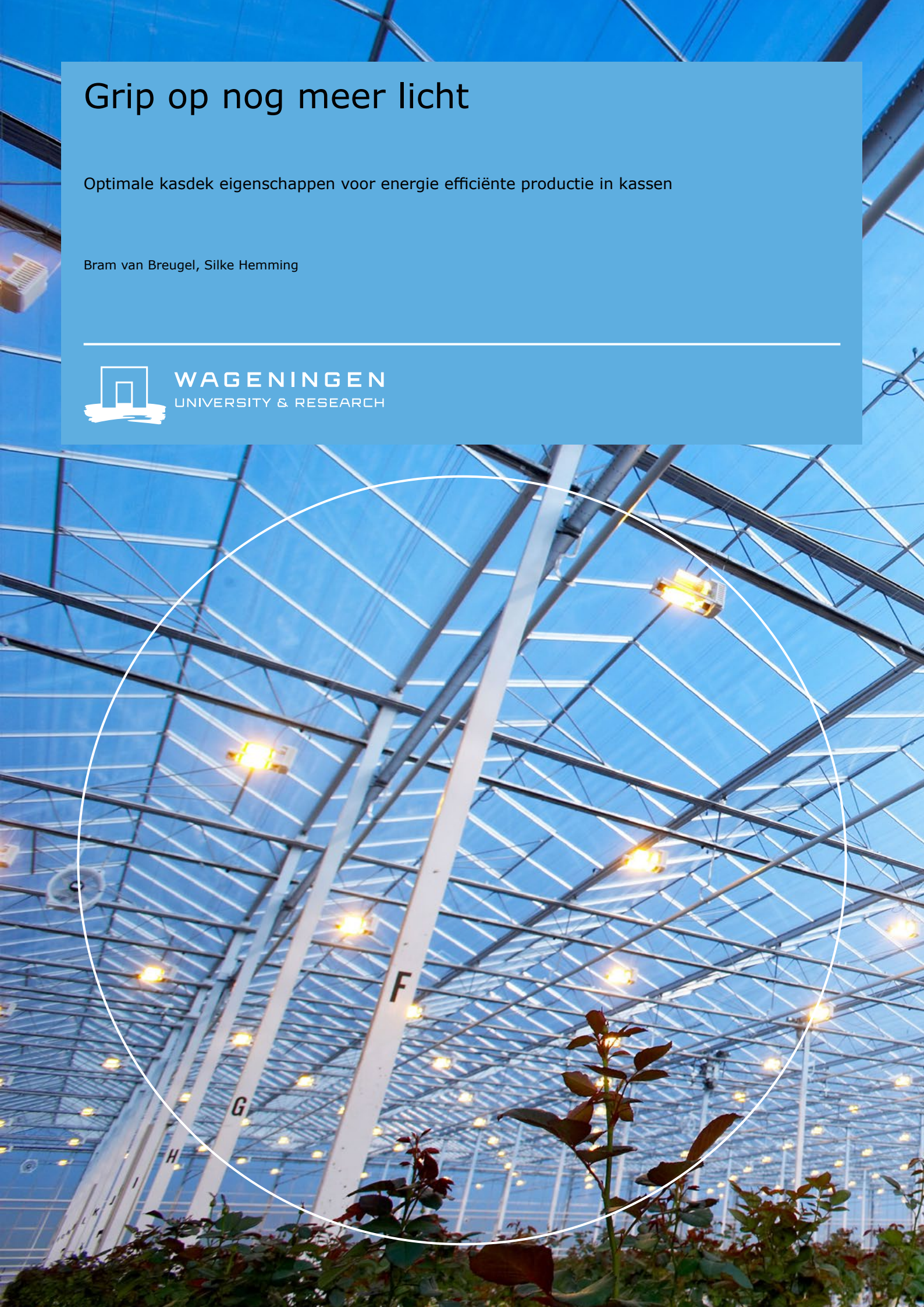
Grip op nog meer licht

Optimale kasdek eigenschappen voor energie efficiënte productie in kassen

Bram van Breugel, Silke Hemming



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH



Referaat

Licht is essentieel voor plantengroei, maar overmatige blootstelling kan schadelijk zijn. Hoog diffuse lenticulaire lamellen kunnen licht optimaal verspreiden zonder lichtverlies, hier wordt onderzocht of dit ook leid tot een besparing op energiegebruik.

Berekeningen laten zien dat deze lamellen potentieel de productie van vruchtgroentegewassen verhogen (tot 17%) en de CO₂-uitstoot per eenheid product verlagen, met een terugverdientijd van 2-3 jaar, absolute energiebesparing per teeltoppervlak wordt echter niet gerealiseerd. Bij lichtgevoelige gewassen kan een verhoogde lichttolerantie de behoefte aan kunstlicht met 22-34% verminderen, wat een terugverdientijd van 4-6 jaar oplevert, gebaseerd op de besparing op energiekosten.

Abstract

Light is crucial for plant growth, but excessive exposure can be harmful. Highly diffuse lenticular lamellae can optimize light distribution, here we research if this can also save energy.

Calculation show that these lamellae could potentially increase fruit vegetable crop yields (up to 17%) and reduce CO₂ emissions per unit of product, with a payback period of 2-3 years, however, no absolute energy savings per cultivation area are achieved. In light-sensitive crops, increased light tolerance can lower artificial lighting needs by 22-34%, leading to a 4-6 year payback period based on the saving on energy costs.

Rapportgegevens

Rapport WPR-1320

Projectnummer: 3742346800

DOI: <https://doi.org/10.18174/656687>

Dit project / onderzoek is mede tot stand gekomen door de bijdrage van Kas als Energiebron, Stichting Kennis in je Kas en ministerie van Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur.



**KAS ALS
ENERGIEBRON**

Kijk | Kennis in je Kas



Ministerie van Landbouw, Visserij,
Voedselzekerheid en Natuur

Disclaimer

© 2025 Wageningen, Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research, Business unit Glastuinbouw

Postbus 20, 2665 MV Bleiswijk T 0317 48 56 06, 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, Businessunit Glastuinbouw

Postbus 20, 2665 ZG Bleiswijk

Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk

T +31 (0)317 48 56 06

wur.nl/glastuinbouw

Postbus 644, 6700 AP Wageningen

Droevendaalsesteeg 1, 6708 PB Wageningen

T +31 (0)317 48 60 01

wur.nl/glastuinbouw

Inhoud

Samenvatting	5	
1	Introductie	7
	1.1 Doel	7
	1.2 Energie doelstellingen	7
2	Achtergrond en theorie	9
	2.1 Optische eigenschappen van een kasdek materiaal	10
	2.2 Het omzeilen van de trade-off in hemisferische transmissie en hortiscatter	11
	2.3 De invloed van meer licht toetreding op het energieverbruik en CO ₂ uitstoot	12
	2.3.1 Hypothese onbelicht vruchtgroente gewas	12
	2.3.2 Hypothese schaduw gewas met kunstlicht algemeen	12
	2.3.3 Hypothese schaduw gewas bij proportioneel schermen in combinatie met kunstlicht, specifiek Phalaenopsis	13
3	Modelberekeningen	14
	3.1 Tomaat	14
	3.1.1 Resultaten	15
	3.1.2 Economische evaluatie	16
	3.1.3 Conclusie tomaat	17
	3.2 Phalaenopsis	17
	3.2.1 Resultaten	20
	3.2.2 Economische evaluatie	21
	3.2.3 Conclusie Phalaenopsis	21
4	Inpassing	22
	4.1 Conclusie	22
	4.2 Aanbevelingen	22
Literatuur		23

Samenvatting

Licht is nog altijd de belangrijkste productiefactor. Toch zijn er vaak situaties dat gekozen wordt een deel van het licht weg te schermen. Uitgangspunt hierbij is dat voor diverse siergewassen geldt dat teveel licht schadelijk is voor het gewas. Deze schadegrenzen zijn vaak afgestemd op basis van direct licht. Met name in voor- en najaar als de variatie van licht over de dag en dagen zeer sterk kan wisselen wordt vanuit gewasoverwegingen, begrijpelijk, voor de veilige weg gekozen. Gevolg hiervan is dat juist in deze perioden dan om aan de juiste licht-som te komen er nog belicht wordt terwijl later op de dag licht wordt weggeschermd. Door maatregelen te nemen die het directe licht gegarandeerd omzetten in een zeer diffuus licht loopt het gewas minder gevaar, kunnen de schadegrenzen worden herzien, hoeft er minder zonlicht weggeschermd te worden en kan de belichting minder worden ingezet.

In dit onderzoek wordt gekeken naar de haalbaarheid om het gebruik van hoog diffuse lamellen om het licht diffuus te maken en gelijktijdig energie te besparen.

De resultaten laten zien dat er zeker winst te behalen is door de inpassing van diffuse lenticulaire getextureerde verticale lamellen. De vraag naar energie of uit welke bron deze komt wordt hierdoor niet fundamenteel veranderd, echter kan deze wel efficiënter worden ingezet. Het kan dan ook zeker een significante verbetering in de systeem efficiëntie betekenen ten opzichte van de state-of-the-art die op dit moment in de ontwikkelingspipeline zit (kas2030).

Bij tomaat en andere vruchtgroente gewassen leidt de inzet van diffuse lamelle tot een efficiënt kasdek doordat diffusiteit niet ten koste gaat van de toetreding van zonlicht in de kas en de plant er effectiever gebruik van kan maken.

- Hier wordt vooral economische winst behaald
 - 8 tot 17% meer productie ten opzichte van het huidige low-e kasdek op kas2030
 - 5 tot 12% meer productie ten opzichte van het huidige diffuus anti-reflectief gecoat glas op de markt
 - Terugverdientijd van 2 tot 3 jaar
- een evenredig verminderde CO₂ emissie per eenheid product
- er wordt echter geen absolute energiebesparing per teeltoppervlak gerealiseerd.

Bij licht gevoelige gewassen is de situatie complexer. Door licht diffuus te maken kunnen gewassen op een hogere licht intensiteit worden geteeld. Planten met CAM fotosynthese zoals Phalaenopsis kunnen slechts een zekere lichtsom effectief benutten. Hierdoor kan de hogere benutting van zonlicht leiden tot een reductie van kunstlicht en is een productiewinst onwaarschijnlijk.

- Extra natuurlijk zonlicht door een hogere transmissie van het kasdek leidt op zichzelf niet tot significante energiebesparing
- Als een diffuser kasdek leidt tot een hogere licht tolerantie van +25 of +50% kan 22 of 34% worden bespaard op belichting en wordt de terugverdientijd op 6 of 4 jaar geschat.

1 Introductie

Licht is nog altijd de belangrijkste productiefactor. Toch zijn er vaak situaties dat gekozen wordt een deel van het licht weg te schermen. Uitgangspunt hierbij is dat voor diverse siergewassen geldt dat teveel licht schadelijk is voor het gewas. Deze schadegrenzen zijn vaak afgestemd op basis van direct licht. Met name in voor- en najaar als de variatie van licht over de dag en dagen zeer sterk kan wisselen wordt vanuit gewasoverwegingen, begrijpelijk, voor de veilige weg gekozen. Gevolg hiervan is dat juist in deze perioden dan om aan de juiste licht-som te komen er nog belicht wordt terwijl later op de dag licht wordt weggeschermd. Door maatregelen te nemen die het directe licht gegarandeerd omzetten in een zeer diffuus licht loopt het gewas minder gevaar, kunnen de schadegrenzen worden herzien, hoeft er minder zonlicht weggeschermd te worden en kan de belichting minder worden ingezet. Dit levert direct energiebesparing op. Hiervoor is het echter ook noodzakelijk dat schadegrenzen opnieuw worden vastgesteld aangezien het tegenwoordig technisch mogelijk is 90% hemisferische transmissie te combineren met 90% hortiscatter¹ door het toepassen van diffuse lenticulair getextureerde verticale (LTV) lamelle onder een kasdek met helder glas met anti-reflectieve coating.

1.1 Doel

Door de schade grenzen voor lichtgevoelige gewassen op te zoeken bij zeer diffuse omstandigheden kan de strategie van het nieuwe telen nog een sprong vooruit maken. Bij sommige gewassen zal minder belichting nodig zijn en bij andere gewassen kan meer natuurlijk licht toegelaten worden wat kan resulteren in teeltversnelling of productieverhoging. In dit rapport wordt beoogd duidelijk te maken wat de meerwaarde kan zijn voor de toepassing van LTV Lamelle. Er is een haalbaarheidsstudie uitgevoerd naar het energiebesparingspotentieel en mogelijke teeltvoordelen bij toepassing van LTV Lamelle bij diverse gewassen.

1.2 Energie doelstellingen

In de huidige state-of-the-art gaat 50% hortiscatter samen met zo'n 7% licht verlies, met het voorgestelde systeem treedt er amper² lichtverlies op bij 90% hortiscatter. In de praktijk vertaalt zich dit **minimaal naar 5 à 6% productiewinst** en dus ook 2 à 3% energiebesparing³, dit is dus in het geval er geen verdere meerwaarde van 90% HS ten opzichte van 50% wordt gevonden en dus de ondergrens van de meerwaarde ten opzichte van de state-of-the-art die we mogen verwachten.

Een van de hypothesen die getest moet worden is of er mogelijk additionele teeltvoordelen optreden bij 90% hortiscatter bij lichtgevoelige gewassen.

¹ De technische mogelijkheden en kleinschalige planten proeven zijn gedemonstreerd in PPS Smart Materials.

² Bij raytracing berekeningen word er onder grote hoeken van inval verlies van 0.5 tot 1.1% berekent vanwege de beperkte resolutie van de BSDF metingen en de vele reflecties, in de kleinschalige praktijkproeven werd geen significant verschil in transmissie gevonden.

³ Voor onbelichte teelt van vruchtgroente gewassen.

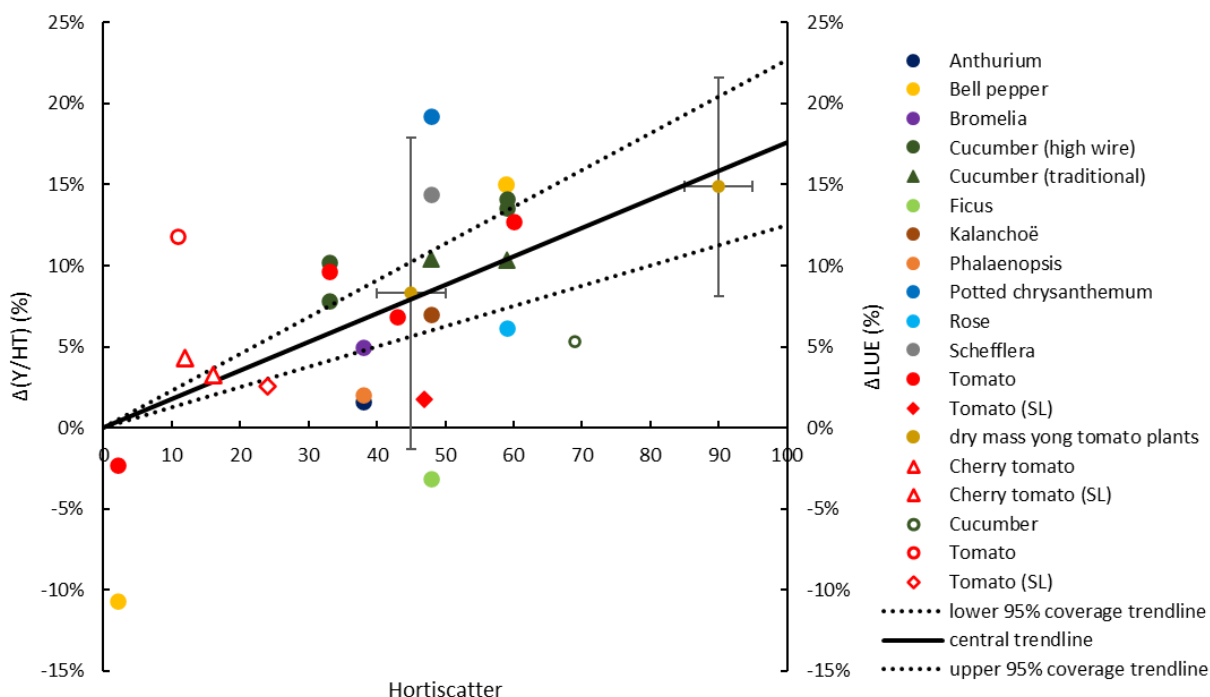
Bij een siergewas zoals bijvoorbeeld phalaenopsis kan het toelaten van meer natuurlijk zonlicht qua energiegebruik zeer interessant zijn. In deze teelt wordt vanaf half januari het eerste krijt al aangebracht gevolgd door een tweede laag begin mei en een derde laag begin juni. Half augustus wordt alweer begonnen met belichten, rond eind september wordt het krijt van het dek gewassen en vanaf dan wordt er iedere dag rustig 5 à 6 uur belicht terwijl in de ochtend het schermdoek al dicht wordt getrokken en in de middag ook het verduisteringsdoek voor een aantal uur gedeeltelijk dicht gaat. Een inherent diffuus kasdek zou hier de volgende voordelen op moeten kunnen leveren:

- Door later te krijten kan in het voorjaar meer natuurlijk zonlicht worden benut
- Door proportioneel te schermen met het verduisteringsdoek in de periode oktober tot mei kan de toetreding van natuurlijk zonlicht beter worden geregeld waardoor er minder geschermd en belicht hoeft te worden.

Dit mechanisme speelt in principe bij ieder gewas waar licht wordt weggeschermd en dat is de volledige potplantenteelt en ca. 50% van de bloementeelt. Daarbij is vaak nog sprake dat het gewas fotosynthetisch technisch gezien het licht wel kan benutten maar dat ter bescherming van bloemen (bijvoorbeeld roos) direct licht wordt weggenomen om de bloem temperatuur in de hand te houden en schade te voorkomen.

2 Achtergrond en theorie

Ook bij Het Nieuwe Telen is een van de uitgangspunten het zo goed mogelijk gebruik maken van natuurlijk zonlicht. Door direct licht diffuus te maken kan het gewas het licht efficiënter gebruiken. Zo is uit een serie proeven in het verleden de vuistregel opgemaakt voor vruchtgroentegewassen dat 1% meer licht gelijk staat aan 0.8 tot 1% (Marcelis, 2006) meer productie. En voor Hortiscatter dat 10% meer hortiscatter leidt tot zo'n 1.8% meer productie (van Stekelenburg, 2024), voor een tomatengewas wordt in deze studie een iets groter effect van 2.1% genoemd, in de verdere berekeningen in dit verslag zijn we echter van het niet gewas specifieke effect uit gegaan. Of deze vuistregel standhoudt boven de 50% hortiscatter wordt momenteel nog actief onderzocht, (kleinschalige) proeven laten tot nu toe nog onzekere resultaten zien.



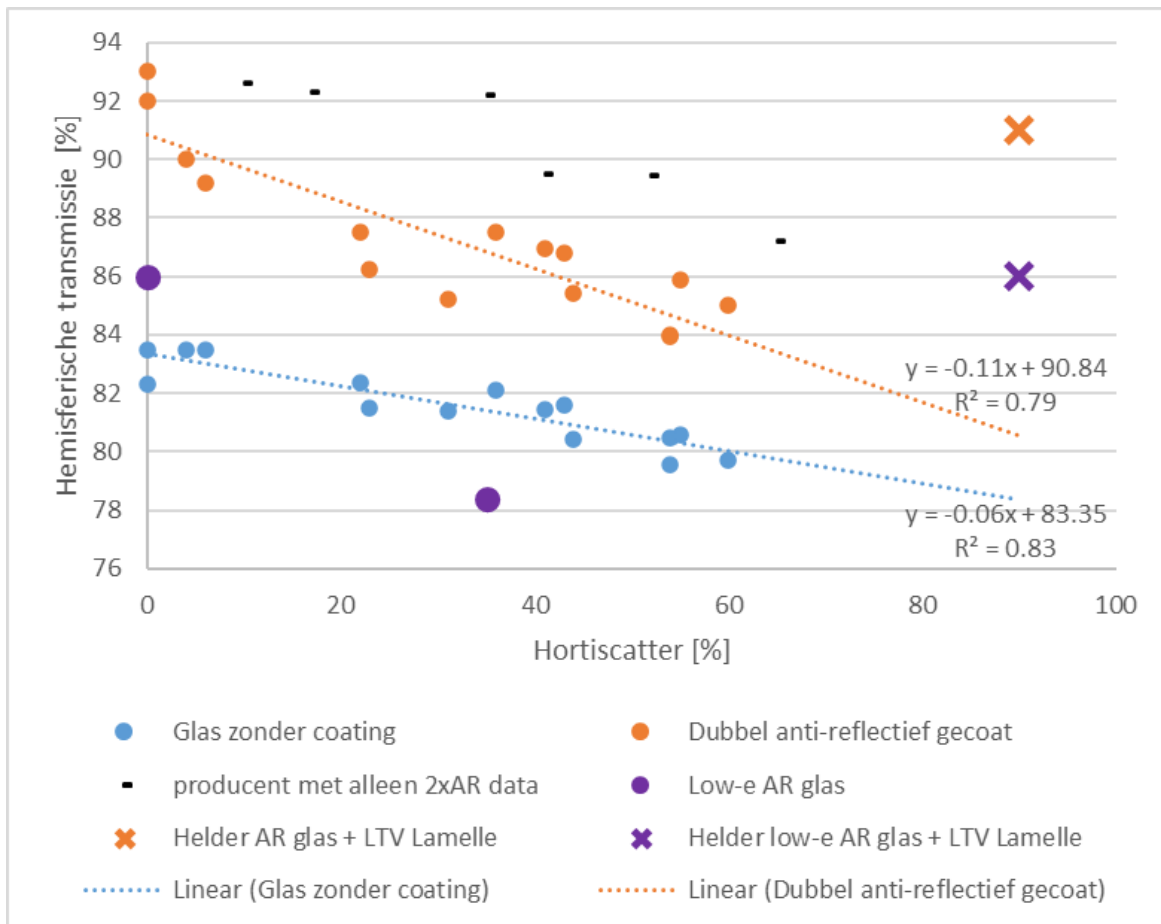
Figuur 1 het effect van een diffuus kasdek uitgedrukt in hortiscatter (x-as) op de light use efficiency (y-as rechts) of gewasopbrengst (y-as links) uit proeven uit het verleden. Overgenomen uit (Steeckelenburg, 2024). De punten voor droge stof productie van jonge tomaten planten zijn toegevoegd vanuit (Bram van Breugel, 2020), ondanks dat deze datapunten niet representatief zijn voor een volledige teelt worden deze toch relevant geacht omdat dit de eerste indicatieve resultaten zijn in de 90% hortiscatter regio en de eerste resultaten zijn welke met LTV lamelle zijn behaald.

In het verleden is veel onderzoek gedaan naar het omzetten van direct licht in diffuus licht zodat gewassen het beschikbare licht efficiënter kunnen gebruiken. Bij siergewassen heeft (Noort, 2013) laten zien dat naast een toename in light use efficiency er ook minder geschermd hoeft te worden omdat het risico op bladschade afneemt wanneer direct licht is omgezet in diffuus licht. In dit onderzoek is bij anthurium en bromellia onder een kasdek met 71% haze (na het ontwikkelen van de hortiscatter methodiek gemeten op 38% hortiscatter) zonder problemen 10 mol per dag toegelaten in de plaats van de onder helder glas gangbare 7.5 mol per dag, hierdoor kan de plant in 25% korter tijdsbestek worden geteeld.

Het verhogen van de productiviteit is op zichzelf staand interessant, het feit dat dit kan door beter gebruik te maken van een duurzame bron als zonlicht zal uiteraard leiden tot een efficiëntere productie en dus minder uitstoot per eenheid product.

2.1 Optische eigenschappen van een kasdek materiaal

Omdat zowel een hoge diffusiteit als een hoge transmissie bij draagt aan de productiviteit van een kas is er vraag vanuit de glastuinbouw sector om deze eigenschappen te combineren in het kasdekmateriaal. Diverse glas fabrikanten proberen zo goed mogelijk aan deze vraag te voldoen door middel van textuur aanbrengen op het glas oppervlak. Licht dat loodrecht invalt op de glasplaat dat wordt verstrooid komt onderweg lokaal minimaal 1 niet loodrecht oppervlak tegen van de textuur waardoor deze wordt afgebogen. Door fresnel refractie zal op ditzelfde oppervlak licht dat onder een hoek invalt op de glasplaat sterker worden gereflecteerd omdat lokaal door de textuur de hoek van inval groter zal zijn dan de hoek tussen de lichtstraal en de glasplaat. Een afname in hemisferische transmissie met toenemende licht verstrooiing door een oppervlakte textuur is dan ook onontkomelijk. In Figuur 2 is de trade off te zien die glasfabrikanten realiseren met het combineren van licht verstrooiing en hemisferische transmissie.



Figuur 2 Trade-off hemisferische transmissie en hortiscatter. Op basis van geanonimiseerde data uit het WUR LightLab uit de periode 2016 tot 2018 van 4 verschillende glas fabrikanten.

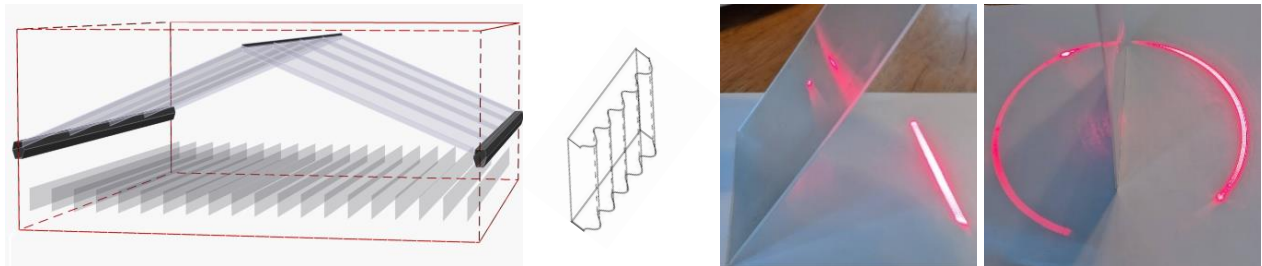
Deze trade-off blijkt sterker te zijn voor antireflectie gecoat glas dan voor ongecoat glas. De reden hiervoor is niet duidelijk maar het lijkt erop dat een anti-reflectieve coating aanbrengen op een getextureerd oppervlak simpelweg moeilijker is dan op vlak glas. Als we in Tabel 1 de in Figuur 2 gevonden trendlijn extrapoleren naar de 90% hortiscatter die haalbaar is met LTV lamelle wordt de effectiviteit van de laatste nog eens extra geaccentueerd.

Tabel 1 Trade-off tussen de hemisferische transmissie en hortiscatter geëxtrapoleerd naar 90% hortiscatter. *low-e integreren in anti-reflectieve coatings staat op moment van schrijven nog in de kinderschoenen waardoor hier nog verbetering valt te verwachten.

	Afname hemisferische transmissie voor iedere 10% extra hortiscatter	Afname geëxtrapoleerd naar 90% hortiscatter
Ongecoat	0.6%	5.0%
Dubbelzijdig anti-reflectief gecoat glas	1.1%	10.3%
Low-e geïntegreerd anti-reflectief gecoat glas	2.2%*	19.5%*
Helder met LTV Lamelle		0.5%

2.2 Het omzeilen van de trade-off in hemisferische transmissie en hortiscatter

Een technische oplossing om direct zonlicht om te zetten in zeer diffuus licht zonder verlies is inmiddels gevonden (zie Figuur 3). In het project PPS Smart Materials is dit kleinschalig getest met jonge tomatenplanten in een klimaatcel (Bram van Breugel, 2020) en op kweektafels in een kascompartiment (Nieves García Victoria, 2020). Hierbij is het omzetten van direct licht in zeer diffuus licht zonder verlies bevestigd, ook is daarbij een voorzichtige meerwaarde van 90% hortiscatter ten opzichte van 50% hortiscatter gevonden⁴ (zie de twee datapunten met onzekerheids indicatie in Figuur 1). De techniek is dus technisch gevalideerd in een relevante omgeving (technology readiness level 4), voordat dit praktisch klaar moeten er dus nog een aantal stappen worden gezet.



Figuur 3 Weringsprincipe lenticulair getextureerde verticale lamellen. Van links naar rechts: een illustratie van hoe de lamellen in de kas komen te hangen; een illustratie van de textuur; een foto die laat zien hoe de textuur het licht verspreid onder loodrechte inval; en een foto van hoe de textuur het zonlicht zal verspreiden in de kas, dus onder een schuine hoek van inval waarbij zowel de reflectie en de transmissie naar het gewas gaan.

⁴ +8% en +15% extra droge stof productie voor HS van 50% en 90% maar met grote statistische onzekerheid.

2.3 De invloed van meer licht toetreding op het energieverbruik en CO₂ uitstoot

Het verhogen van de productiviteit is op zichzelf interessant, het feit dat dit kan door beter gebruik te maken van een duurzame bron als gratis zonlicht zal uiteraard leiden tot een efficiëntere productie en dus minder CO₂ emissie per eenheid product. De vraag is echter in hoe het efficiëntere gebruik van zonlicht van invloed is op het primaire energieverbruik van de teelt en daarmee op de CO₂ emissie van de sector, deze moet volgens de huidige afspraken afnemen van 7.9 megaton in 2020 naar 4.3 tot 4.8 megaton in 2030 naar klimaat neutraal in 2040 (Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, 2022).

2.3.1 Hypothese onbelicht vruchtgroente gewas

1. Het toepassen van LTV Lamelle in combinatie met een helder kasdek met hoge doorlatendheid zal meer zonlicht binnen laten dan een klassiek diffuus kasdek.
2. Door de toename in toetreding van zonlicht zal minder energie nodig zijn voor het opwarmen van de kas en dus het gasverbruik lager zijn.
3. Door de toename in toetreding van zonlicht zal tevens meer productie behaald kunnen worden.
4. Door de toegenomen diffusiteit van het toegetreden zonlicht zal tevens meer productie behaald kunnen worden.
5. De CO₂ emissie per eenheid product zal afnemen.
6. De CO₂ emissie per eenheid teeltoppervlak zal afnemen.
7. De reductie in het gas verbruik en toename in productie zal een zekere investeringsruimte bieden voor het toepassen van LTV Lamelle

In dit onderzoek zijn hypothesen 2, 3, 5, 6 en 7 op basis van modelberekeningen getoetst. Hypothese 1 is in eerder onderzoek bevestigd.

2.3.2 Hypothese schaduw gewas met kunstlicht algemeen

1. Het toepassen van LTV Lamelle in combinatie met een helder kasdek met hoge doorlatendheid zal er meer natuurlijk zonlicht beschikbaar zijn voor het gewas.
2. Door de hoge hortiscatter zal er pas bij hogere instraling geschermd moeten worden om lichtschade te voorkomen ten opzichte van een klassiek diffuus kasdek.
3. Hierdoor zal bij een gelijke lichtsom per dag de inzet van kunstlicht verminderd kunnen worden.
4. Hierdoor zal bespaard kunnen worden op het gebruik van elektriciteit.
5. Dit zal samengaan met een CO₂ emissie reductie per eenheid product en per eenheid kas oppervlakte.
6. De besparing op energie input zal een zekere investeringsruimte opleveren.

De 2^e hypothese kan bij een modelstudie niet worden getest, in de plaats hiervan zijn een aantal scenario's gekozen om het potentiële effect te bepalen.

2.3.3 Hypothese schaduw gewas bij proportioneel schermen in combinatie met kunstlicht, specifiek Phalaenopsis

- Door het toepassen van LTV Lamelle kan er effectief proportioneel worden geschermd in de periode wanneer er geen krijt op het dek zit.
- Hierdoor kan het eerste toepassing van krijt in januari komen te vervallen.
- Hierdoor zal in de periode van januari tot september meer natuurlijk zonlicht beschikbaar zijn om mee te regelen.
- In combinatie met een helder kasdek met hoge doorlatendheid zal ook in de overige maanden meer natuurlijk licht beschikbaar zijn.
- Hierdoor zal de lichtsom per dag met een relatief groter aandeel natuurlijk zonlicht ingevuld kunnen worden en het gebruik van kunstlicht worden verlaagd.
- Door op een hoger lichtniveau te sturen zal dit effect verder versterken.
- De toename van zonlicht dat de kas binnenkomt zal bijdragen aan de warmtevraag in de kas en leiden tot een afname van het gasgebruik.
- Door de hogere verhouding natuurlijk zonlicht in de kas ten opzichte van kunstlicht zal er bespaard kunnen worden op elektriciteit.
- Dit zal samengaan met een CO₂ emissie reductie per eenheid product en per eenheid kas oppervlakte.
- De besparing op energie input zal een zekere investeringsruimte opleveren.

3 Modelberekeningen

Voor de berekeningen is gebruik gemaakt van het KasPro model (Zwart, 1996). In beide gevallen is de klimaatdata van Bleiswijk uit 2022 gebruikt.

3.1 Tomaat

Bij de onbelichte teelt van tomaat hebben we ervoor gekozen om voor het referentie punt de lat hoger te leggen dan de huidige state-of-the-art. Op dit moment kan glas gecoat met een anti-reflectieve coating met low-e eigenschappen zoals momenteel wordt gedemonstreerd in KAS2030 de toekomstige state-of-the-art worden. De eigenschappen van dit glas zijn dan ook gebruikt als referentie. Verder hebben we een regulier energiescherm gekozen in combinatie met een gealuminiseerd scherm voor tijdens de nacht. Over het geheel genomen komt er bij de situatie met LTV Lamelle meer licht binnen en is het diffuser dan in de referentie situatie.

Tabel 2 Parameters gebruikt in modelberekeningen voor een tomaatteelt.

*eigenschappen Low-e diffuus glas op KAS2030.

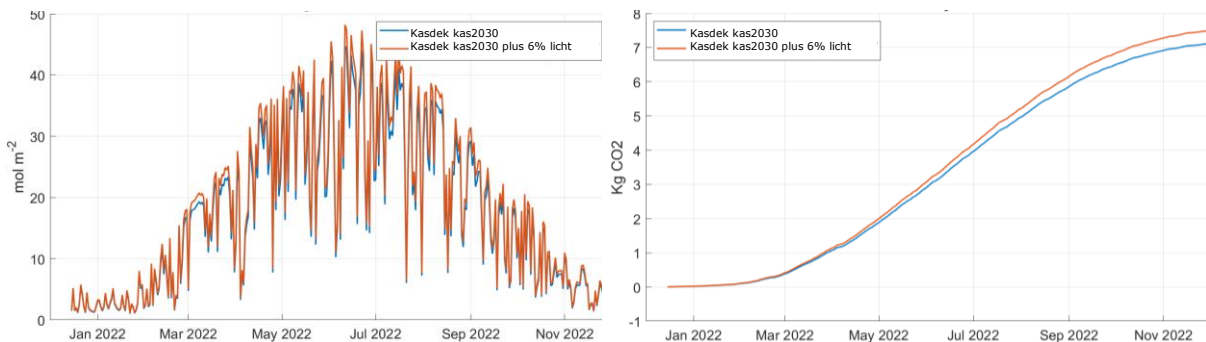
	Referentie situatie	Haalbare eigenschappen met behulp van LTV_Lamelle
Kasdek*	T _{Hem PAR}	80%
	Hortiscatter	35%
	overige eigenschappen hieronder zijn voor beide scenario's gelijk	
Energie scherm	ε _{Thermal IR}	18%
	T _{Hem PAR}	74%
	T _{Thermal IR}	34%
	R _{Thermal IR}	20%
	permeability	$8.7 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}$
Verduistering scherm	T _{Hem PAR}	0%
	T _{Thermal IR}	3%
	R _{Thermal IR}	77%
	permeability	$8.4 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}$

De afkortingen in Tabel 2 zijn als volgt:

- "T_{Hem PAR}" staat voor de transmissie (T) van Photosynthetic Active Radiation (PAR) onder Hemisferische inval (Hem) zoals beschreven in NEN2675.
- T_{Thermal IR} staat voor de loodrechte transmissie (T) van infrarood straling gewogen naar de thermische emissie van een zwarte straler met een temperatuur van 15 graden Celcius berekent via de wet van Planck.
- R_{Thermal IR} staat voor de loodrechte reflectie (R), waarbij Thermal IR dezelfde betekenis duidt als voorgaande
 - uit T_{Thermal IR} en R_{Thermal IR} is de emissiviteit ε simpelweg uit te rekenen via:
 - $\epsilon = 1 - T_{\text{Thermal IR}} - R_{\text{Thermal IR}}$
 - om deze reden is de emissiviteit weg gelaten voor de schermeigenschappen
 - voor glas geldt dat T_{Thermal IR}=0 waardoor louter de waarde voor ε tevens R_{Thermal IR} bepaald en daarom ook is weg gelaten.

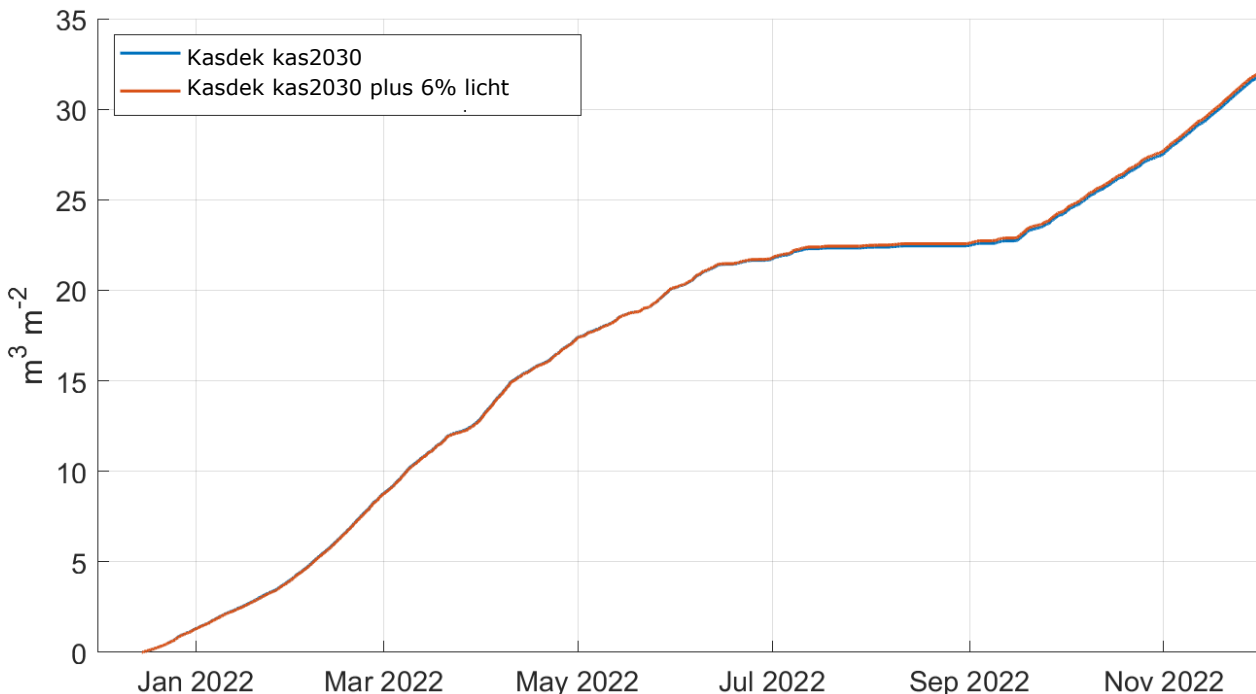
3.1.1 Resultaten

Over een teeltperiode van 1 jaar zien we in Figuur 4 uiteraard dat er meer licht binnen komt. Ook wordt er door het model zo'n 5.4% extra CO₂ opname door het gewas berekent. Kaspro berekent fotosynthese in eerste instantie onafhankelijk van de diffusiteit van het kasdek, als we uitgaan van het pessimistische scenario uit Figuur 1 zou daar voor de lamelle nog 3% bij op komen en voor het optimistische scenario 10%⁵.



Figuur 4 Links de dagelijkse PAR lichtsom over de teelt periode en rechts de berekende netto fotosynthese uitgedrukt in kilogram opgenomen CO₂.

Het berekende gasverbruik is echter voor beide scenario's nagenoeg hetzelfde. In het verleden werd nog wel eens berekend dat een hogere licht doorlatendheid van het kasdek een (zeer bescheiden) energiebesparing met zich meebracht omdat het zonlicht bij draagt aan het opwarmen van de kas. Echter, als wij in het model via de Radiation Temperature Ratio (Geelen, 2020) de plantbalans optimaal gehouden, wordt het temperatuur setpoint omhoog bijgestuurd naar gelang de instraling waardoor deze eerder berekende besparing vervalt.



Figuur 5 Cumulatief gebruik van aardgas over de teelt periode heen.

⁵ De eerste indicatieve gewasproeven bij 90% hortiscatter hebben laten zien dat de waarheid er tussenin zal liggen, echter is de onzekerheid in de te verwachten effect grootte zo hoog dat op dit moment het bereik aan onzekerheid informatiever wordt geacht dan de eerste indicatieve resultaten in Figuur 1.

3.1.2 Economische evaluatie

De modelberekeningen laten zien dat er van meer of minder licht toetreding geen effect op het gasverbruik verwacht mag worden. Verder is het berekende effect op de gewasopbrengst lineair met de lichtsom en wordt het effect van hortiscatter op gewasopbrengst in eerste instantie niet meegenomen in de modelberekeningen. Om deze reden is de economische evaluatie met behulp van de KWIN voor de Glastuinbouw 2023 in een bredere context geplaatst⁶ naast de gangbare beschikbare opties voor de kassenbouwer.

Bij de economische berekeningen voor de toepassing van LTV Lamelle bij een onbelichte tomatenteelt zijn de volgende inschattingen gemaakt:

- hypotheekrente: 4%
- extra investering lamellen: €15/m² ingeschat op basis van materiaalkosten en verwachte installatie kosten.
- Levelsduur: 15 jaar, de levensduur van polycarbonaat wordt voor buiten toepassingen gangbaar ingeschat op 10 tot 20 jaar, de verwachting is dat de lamelle even lang meegaan als de kas zelf, in de KWIN is dit 15 jaar.
- onderhoudskosten: 5%, de verwachting is dat reiniging van de lamelle nodig zal zijn en dat dit extra kosten met zich mee brengt, deze op voorhand niet bekend maar zijn voor dit moment met 5% van de investeringskosten op een gelijke onderhoudsintensiteit gezet met een scherm installatie.
- De optimistische en pessimistische inschatting is gebaseerd op wel of geen meerwaarde van nog diffuser licht boven de 50% hortiscatter.

Tabel 3 Berekende economische waarde van LTV Lamelle voor de onbelichte teelt van grove tros tomaat.

	90+ float	diffuus	helder AR	diffuus AR	AR plus lamelle pessimistisch	AR plus lamelle optimistisch
hemisferische transmissie	83%	80%	91%	85%	91%	91%
hortiscatter	0%	50%	0%	50%	90%	90%
productie factor	1.000	1.063	1.072	1.108	1.162	1.234
voor grove tros tomaat met wkk zonder belichting						
omzet productie	€ 63.50	€ 67.50	€ 68.07	€ 70.36	€ 73.79	€ 78.36
evenredig met productie:						
teeltarbeid	€ 18.55	€ 19.72	€ 19.89	€ 20.55	€ 21.56	€ 22.89
fust verpakking	€ 0.87	€ 0.92	€ 0.93	€ 0.96	€ 1.01	€ 1.07
afzetkosten	€ 1.90	€ 2.02	€ 2.04	€ 2.11	€ 2.21	€ 2.34
transport	€ 0.79	€ 0.84	€ 0.85	€ 0.88	€ 0.92	€ 0.97
dekking van de vaste kosten 90+ float	€ 41.39	€ 44.00	€ 44.37	€ 45.86	€ 48.10	€ 51.08
winst (plus benodigde dekking extra vaste kosten)		€ 2.61	€ 2.98	€ 4.47	€ 6.71	€ 9.69
extra investering		€ 2.50	€ 5.50	€ 8.00	€ 20.50	€ 20.50
simpele terugverdientijd (jaar)		0.96	1.85	1.79	3.06	2.12
onderhoud		1%	1%	1%	5%	5%
levensduur (jaar)		15	15	15	15	15
Netto contante waarde		€ 28.71	€ 32.52	€ 48.81	€ 63.15	€ 96.29
Voordeel		€ 26.21	€ 27.02	€ 40.81	€ 42.65	€ 75.79

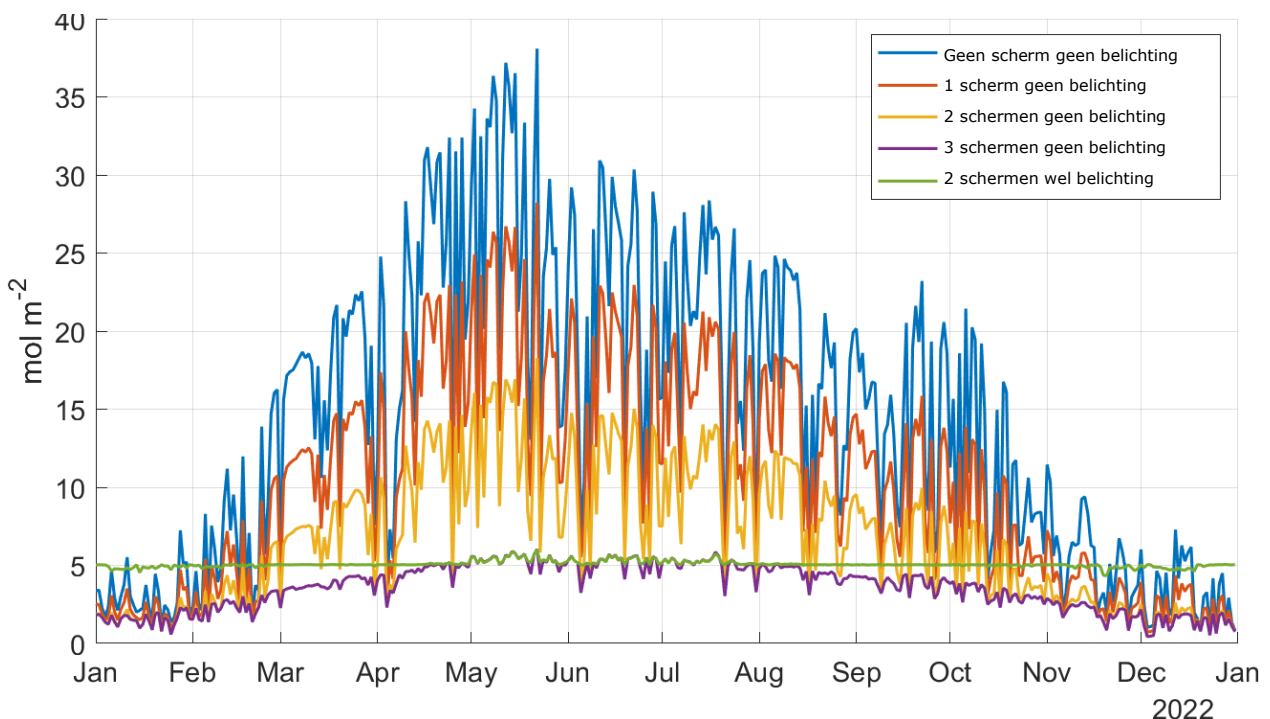
⁶ Een tweede reden hiervoor is dat in de KWIN wel inschattingen voor de kostprijs van float glas, diffuus glas, AR gecoat glas en diffuus AR gecoat glas staan maar nog geen indicatie voor de kosten van low-e AR coatings.

3.1.3 Conclusie tomaat

- Voor een tomatenteelt mag er op basis van de huidige inzichten zeker economisch voordeel verwacht worden bij de toepassing van LTV Lamelle, ten opzichte van de huidige state of the art maar ook als toevoeging op eventueel toekomstig AR glas met low-e eigenschappen.
- Een reductie van de gasconsumptie en CO₂ emissie per vierkante meter tuinbouw areaal mag niet worden verwacht.
- Wel mag er redelijkerwijs een reductie in de CO₂ emissie per kilogram geproduceerd product worden verwacht van 5 tot 12% ten opzichte van het huidige diffuus AR glas en 8 tot 15% ten opzichte van de verwachte toekomstige state-of-the-art.

3.2 Phalaenopsis

De teelt van Phalaenopsis verschilt van de teelt van tomaat. Tomaat kan in Nederland al het zonlicht benutten dat de kas in komt. Phalaenopsis is een schaduw minnend gewas met CAM-fotosynthese. Dit soort planten hebben een groot deel van de dag de huidmondjes dicht zitten waardoor ze niet af kunnen koelen door verdamping en een hoger risico lopen op schade door oververhitting door teveel instraling van zonlicht. Verder wordt de hoeveelheid assimilaten dat ze overdag aan kunnen maken beperkt door de hoeveelheid CO₂ die tijdens de nacht in de vorm van appelzuur in de bladeren is opgeslagen. Om deze redenen wordt er bij Phalaenopsis ingezet op het behalen van een vaste PAR lichtsom per dag en een lage lichtintensiteit.

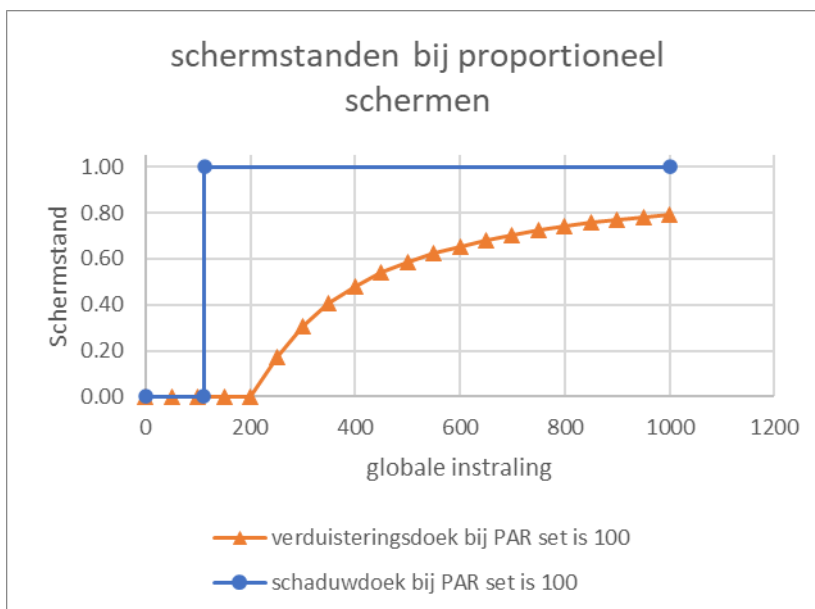


Figuur 6 In de Phalaenopsis teelt wordt veel licht weg geschermd. Blauw geeft de dagelijkse lichtsom aan die de kas binnen komt, oranje wat na het eerste scherm over is, geel na het 2e scherm, paars wat over is na de proportionele regeling door het verduistering doek. Groen het licht aangevuld door kunstlicht, deze laatste vormt het referentie scenario.

De instraling van zonlicht wordt op de volgende manieren beheerst (van grofstoffelijk naar fijnere bijsturing):

1. Krijt: in de praktijk wordt er in de opkweek 2 keer per jaar krijt op het dek aangebracht:
 - a. Half januari wordt krijt aangebracht met het doel het kasdek diffuus te maken en daarmee de fijnere regeling mogelijk te maken, hiermee neemt de hemisferische transmissie van het kasdek met zo'n 15% af.
 - b. Begin mei wordt nog eens krijt aangebracht om de hoeveelheid instraling verder te beperken.
 - c. Eind september wordt het krijt van het dek gewassen.
2. Diffuus energiescherm wordt tevens als eerste schaduwdoek dicht getrokken bij te veel instraling.
3. Schaduwdoek wordt als tweede scherm dicht getrokken.
4. Verduisteringsdoek wordt als derde scherm ingezet, deze wordt niet geheel dicht getrokken maar gedeeltelijk afhankelijk van de instraling.
5. Op basis van PAR sensoren binnen kan de regeling van het verduisteringsdoek verder worden bijgesteld.

Hierbij moet worden opgemerkt dat de fijnere afregeling door het verduisteringsdoek tot problemen kan leiden bij heldere omstandigheden en een helder kasdek omdat hierbij schaduwbanen kunnen ontstaan en er stroken met te hoge licht intensiteit overblijven. Met de toepassing van krijt en 2 diffuse doeken zoals hierboven beschreven treedt dit probleem niet op.



Figuur 7 Bij proportioneel schermen wordt eerst het reguleren schaduwdoek dicht getrokken en vervolgens wordt de stand van het verduisteringsdoek aangepast om tot het gewenste lichtniveau te komen.

LTV Lamelle zouden in een dergelijke teelt toegepast kunnen worden en daarmee mogelijk

1. De noodzaak van de eerste krijt laag in januari wegnemen en
2. Het regelen op een hoger lichtniveau mogelijk maken op een veilige manier.

In de berekeningen is er wederom voor gekozen te vergelijken met een sterke referentie situatie waarvan verwacht mag worden dat dit in de toekomst de state-of-the-art in de praktijk zal worden. Dus wederom is het kasdek dat recent op KAS2030 is gelegd als uitgangssituatie gekozen.

1. Als eerste scenario is dezelfde situatie berekent waarbij het aanbrengen van krijt in januari wordt overgeslagen.
 - De mogelijke stap naar een hogere transmissie van het kasdek is wel gelaten omdat het weglaten van een laag krijt reeds voldoende inzicht geeft over het effect van meer beschikbaar licht in de kas.
2. Als tweede scenario wordt 25% meer PAR licht binnen gelaten.
3. Als derde scenario wordt 50% meer PAR licht binnen gelaten ten opzichte van de referentie.

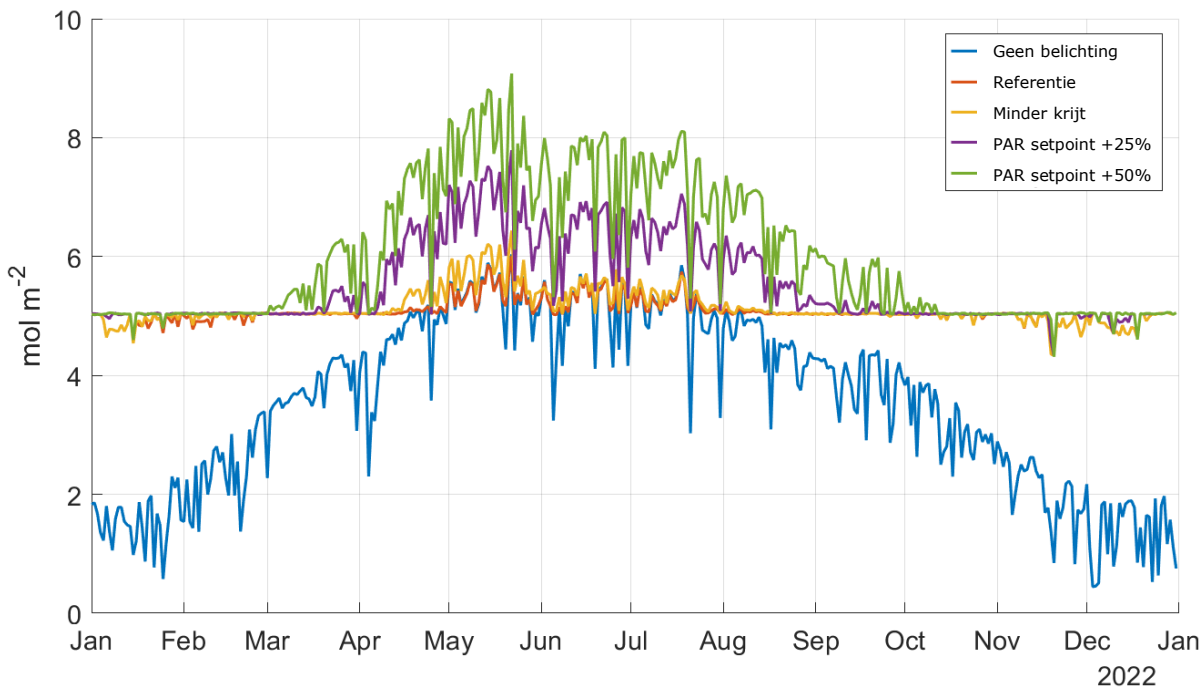
Hoewel de toepassing van krijt op een kasdek met low-e coating de emissie van thermische straling waarschijnlijk aanzienlijk verhoogd vanwege de organische binder wordt daar op dit moment geen rekening mee gehouden omdat a, niet bekend is hoe sterk deze invloed is en b, het onduidelijk is of deze invloed gereduceerd kan worden en het eventueel berekende voordeel niet direct toegeschreven kan worden aan de toepassing van LTV Lamelle.

In Tabel 4 staan de parameters zoals toegepast in de scenario berekeningen samengevat samen met een selectie andere eigenschappen welke relevant zijn voor het beperken van energie verlies via het kasdek.

Tabel 4 Input parameters voor de modelberekeningen aan de teelt van *Phalaenopsis*.

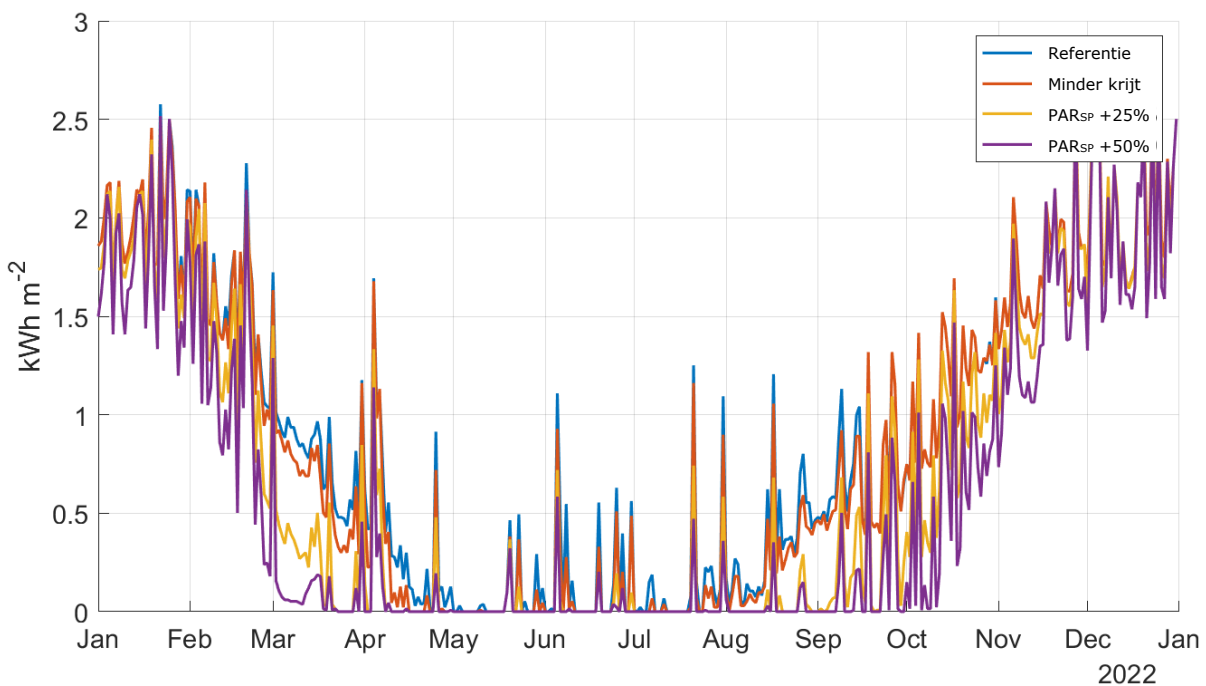
	Referentie situatie	Met LTV Lamelle en minder krijt	LTV Lamelle, minder krijt en 25% hoger setpoint voor PAR	LTV Lamelle, minder krijt en 50% hoger setpoint voor PAR
Kasdek	T _{hem} zonder krijt	80%	80%	80%
	T _{hem} vanaf half jan	68%	80%	80%
	T _{hem} vanaf mei	48%	60%	60%
	T _{hem} vanaf okt	80%	80%	80%
	Thermische emissiviteit	18%	18%	18%
	Hortiscatter	35%	90%	90%
	Foton flux set point	100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$	100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$	125 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$
overige eigenschappen hieronder zijn voor alle scenario's gelijk				
Schermbv verduistering	T _{Hem} PAR		0%	
	T _{Thermal IR}		3%	
	R _{Thermal IR}		77%	
	permeability		$8.4 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}$	
Schaduw scherm	T _{Hem} PAR		57%	
	T _{Thermal IR}		30%	
	R _{Thermal IR}		21%	
	permeability		$2.4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}$	
Energie scherm	T _{Hem} PAR		68%	
	T _{Thermal IR}		35%	
	R _{Thermal IR}		23%	
	permeability		$8.7 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}$	

3.2.1 Resultaten



Figuur 8 De dagelijkse lichtsom bij meer licht door het kasdek door minder krijt en door op een hoger instralingsniveau van natuurlijk zonlicht te regelen. Blauw en oranje zijn respectievelijk paars en groen uit het voorgaande figuur. Bij geel, paars en groen wordt de eerste toepassing van krijt in januari overgeslagen en wordt respectievelijk op 100, 125 en 150 $\mu\text{mol/m}^2\text{s}$ gestuurd.

Voor de behaalde lichtsommen in Figuur 8 zien we niet heel veel gebeuren, dat er meer natuurlijk licht beschikbaar is bij het minder krijt scenario wordt hier niet zichtbaar omdat het extra zonlicht netjes wordt verruilt voor een vermindering in assimilatie belichting. Bij het gebruik van hogere set-points worden er in de zomer echter ook hogere dagsommen behaald omdat in het model het verduisteringsdoek niet dichtgetrokken wordt bij het behalen van een bepaalde dagsom.



Figuur 9 Elektriciteit behoefte voor assimilatiebelichting in de verschillende scenario's. Blauw geeft de referentie situatie weer, bij geel, paars en groen wordt de eerste toepassing van krijt in januari overgeslagen en wordt respectievelijk op 100, 125 en 150 $\mu\text{mol/m}^2\text{s}$ gestuurd.

Met deze uitgangspunten is met behulp van Kaspro berekend wat het effect zou zijn op de energievraag van de teelt, waar we in Figuur 8 weinig effect zagen op de behaalde dagsommen zien we in Figuur 9 wel duidelijk terug dat deze dagsommen in het voorjaar en najaar zijn behaald met minder input van elektriciteit. In Tabel 5 is het jaar rond energie gebruik per vierkante meter kas oppervlak berekend.

Tabel 5 Berekend effect op gas en elektra verbruik bij de teelt van Phalaenopsis.

		Referentie situatie	Met LTV Lamelle en minder krijgt	LTV Lamelle, minder krijgt en 25% hoger setpoint voor PAR	LTV Lamelle, minder krijgt en 50% hoger setpoint voor PAR
Gas gebruik	Absoluut [m ³]	44.3	43.2	45.3	46.8
	Relatief [%]	Ref	-2%	+2%	+6%
Elektra gebruik voor belichting	Absoluut [kWh]	84	80	65	56
	Relatief [%]	Ref	-5%	-22%	-34%

Als het toepassen van LTV Lamelle en het weglaten van de eerste keer krijten verder geen invloed heeft op de teelt wordt er marginaal bespaard op het gasgebruik en ietsjes minder elektra voor belichting gebruikt. Zodra de toepassing van LTV Lamelle het mogelijk maakt om veilig op een hoger lichtniveau te telen kan er significant worden bespaard op het elektriciteitsverbruik, in dat geval wordt lamplicht vervangen door zonlicht.

3.2.2 Economische evaluatie

Om een beeld te krijgen van de economische implicaties voor de teelt is wederom de KWIN voor de glastuinbouw 2023 gebruikt en zijn dezelfde set inschattingen gebruikt als vermeld bij de evaluatie van de tomatenteelt. De economische kosten-baten-analyse is in dit geval beïnvloed door het berekende energieverbruik.

Tabel 6 Economische verwachting van de toepassing van LTV Lamelle in de teelt van Phalaenopsis.

Gasprijs	€ 0.40	per m ³		
Eektraprijs	€ 0.17	per kWh		
Phalaenopsis warme fase	kasdek kas2030	minder krijgt	+25% PAR intensiteit	+50% PAR intensiteit
Gas gebruik [m ³]	44.3	43.2	45.3	46.8
Elektra voor belichting [kWh]	84.0	80.2	65.3	55.7
Besparing [euro]		-€ 1.09	-€ 2.77	-€ 3.79
Extra investering		€ 15.00	€ 15.00	€ 15.00
Simpele terugverdientijd (jaar)		13.7	5.4	3.95
Onderhoud		5%	5%	5%
Levensduur (jaar)		15	15	15
Netto contante waarde		€ 3.83	€ 22.50	€ 33.85
Voordeel		€ -11.17	€ 7.50	€ 18.85

3.2.3 Conclusie Phalaenopsis

- Als de setpoints voor de teelt niet kunnen worden bijgesteld dankzij de LTV Lamelle zal de energiebesparing beperkt zijn en zal de toepassing van LTV Lamelle economisch niet rond te rekenen zijn bij de huidige energieprijzen.
- Mocht de toepassing van LTV Lamelle het mogelijk maken om op een hoger setpoint voor lichtintensiteit te telen doordat de mate van diffusiteit door de LTV Lamelle extra bescherming biedt tegen lichtschade zal er significant bespaard kunnen worden op het elektra verbruik voor assimilatie belichting. Het economische voordeel zal bij de huidige energieprijzen echter beperkt zijn.

4 Inpassing

4.1 Conclusie

Dit onderzoek laat zien dat het gebruik van hoog diffuse lenticulaire lamellen (LTV Lamellen) gunstige effecten kan hebben op de productie-efficiëntie en het energieverbruik in de glastuinbouw. Bij vruchtgroentegewassen, zoals tomaten, leidt de toepassing van deze lamellen tot een verhoging van de lichtbenutting zonder lichtverlies, wat resulteert in een productieverhoging van 8-17% en een verlaging van de CO₂-uitstoot per eenheid product. Hoewel er geen absolute energiebesparing per teeltoppervlak wordt gerealiseerd, is de nodige investering zoals deze nu wordt ingeschat economisch rendabel met een geschatte terugverdientijd van 2-3 jaar.

Voor lichtgevoelige gewassen zoals Phalaenopsis is de situatie complexer. Een hogere lichttolerantie leidt al snel tot een significante afname in de behoefte aan kunstlicht (22-34% besparing), voor gewassen met CAM fotosynthese is het tevens waarschijnlijk dat een hogere licht tolerantie daadwerkelijk naar besparing op assimilatie belichting zal gaan in de plaats van een hogere productie. De economische haalbaarheid hangt echter sterk af van de mate waarin deze gewassen veilig op een hogere lichtintensiteit kunnen worden geteeld. De terugverdientijd varieert in de berekende scenario's tussen 4-6 jaar, afhankelijk van de gerealiseerde besparing op belichting.

Over het algemeen biedt de toepassing van LTV Lamellen een veelbelovende verbetering in de systeemefficiëntie van kassen. Bij vruchtgroentegewassen kan het de introductie van low-e glas ondersteunen door de productievoordelen van diffuse lamellen te combineren met de licht transmissie en energiebesparing van helder low-e glas. Bij siergewassen is aanvullend onderzoek nodig naar de teeltgrenzen en de langetermijneffecten van een verhoogde lichtintensiteit.

4.2 Aanbevelingen

Voor vruchtgroenten kunnen hoog diffuse LTV Lamelle helpen bij de markt introductie van low-e glas. Het huidige beschikbare low-e glas heeft in de diffuse uitvoering een relatief lage hemisferische lichttransmissie bij een gemiddelde hortiscatter. Dit nadeel heeft low-e glas in de heldere uitvoering niet. In combinatie met LTV Lamelle kan een hoge energiebesparing met een zeer hoge hortiscatter worden gecombineerd. Hierdoor wordt een hoge energiebesparing door het low-e glas gecombineerd met potentiële productievoordelen voor tomaat door de zeer diffuse lamellen. Hiervoor is het belangrijk dat de effectiviteit van de LTV Lamelle te demonstreren in een proef met een volledig tomatengewas waarbij minimaal een hele teeltcyclus wordt doorlopen.

Voor siergewassen zoals phalaenopsis zal eerst een proef moeten worden opgezet om na te gaan wat de schade grenzen zijn bij 90% hortiscatter omdat de potentiële energiebesparing zeer sterk afhankelijk is van een verbeterde lichttolerantie. Als tweede stap zal voor geselecteerde gewassen een proefteelt uitgevoerd moeten worden om lange termijn effecten van telen bij een hogere licht intensiteit uit te sluiten waar tevens een teeltplan toepasbaar voor de praktijk uit zal moeten komen.

Literatuur

- Bram van Breugel, E. M. (2020). *Vertical lamellae highly diffusive for light: effect on growth of young tomato plants in a climate chamber*. Wageningen Plant Research, Business Unit Greenhouse Horticulture. Wageningen: Stichting Wageningen Research. doi:<https://doi.org/10.18174/563067>
- Geelen, P. V. (2020). *Plant Empowerment. De basisprincipes*. Zevenbergen: Plant Empowerment.
- Marcelis, L. F. (2006). Quantification of the growth response of light quantity of greenhouse grown crops. *Acta Horticulturae*, 711, 97-103. doi:<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.711.9>
- Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit. (2022, 12 19). Convenant Energietransitie Glastuinbouw 2022-2030. *Staatscourant van het Koninkrijk der Nederlanden*, 33878, 1-9. Opgehaald van <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/stcrt-2022-33878.html>
- Nieves García Victoria, E. B. (2020). *Effect of high scattering lamellae on growth and photosynthesis of young tomato plants*. Wageningen Plant Research, Business Unit Greenhouse Horticulture. Wageningen: Stichting Wageningen Research. doi:<https://doi.org/10.18174/564877>
- Noort, F. v. (2013). *Grip op licht' bij potanthurium en bromelia*. Wageningen: Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek (DLO) onderzoeksinstituut Wageningen UR Glastuinbouw.
- Steekelenburg, G. v. (2024). Quantifying the effects of hortiscatter in greenhouse cover materials on crop yield. *ISHS Lightsym*. Seoul, South Korea.
- Zwart, H. d. (1996). *Analyzing energy-saving potentials in greenhouse cultivation using a simulation model*. DLO Institute of Agricultural and Environmental Engineering. Wageningen: Landbouwniversiteit Wageningen. Opgehaald van <https://edepot.wur.nl/195238>

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



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

Rapport WPR-1320



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, 7.700 medewerkers (7.000 fte), 2.500 PhD- en EngD-kandidaten, 13.100 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers 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.
