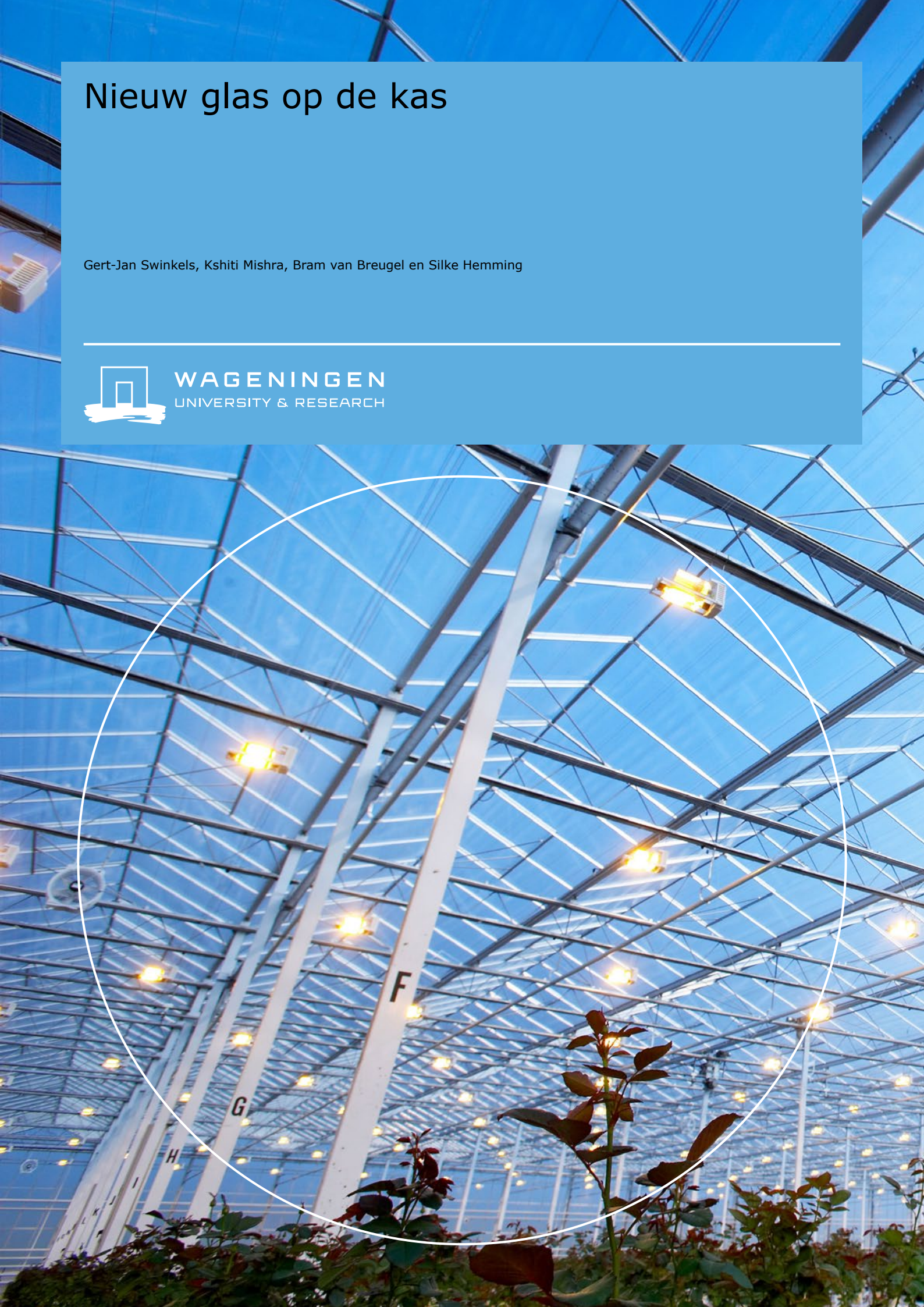


# Nieuw glas op de kas

Gert-Jan Swinkels, Kshiti Mishra, Bram van Breugel en Silke Hemming



**WAGENINGEN**  
UNIVERSITY & RESEARCH



---

## Referaat

Een kasdek in de Nederlandse glastuinbouw beschermt het gewas tegen weersinvloeden die steeds vaker extreem zijn en creëert een energie-efficiënt kasklimaat. In dit rapport wordt een globaal overzicht gegeven van de haalbaarheid van nieuwe technologieën op het gebied van transparante isolatie en laminaten voor toepassing als kasdek materiaal voor de Nederlandse glastuinbouw. Hierbij is gekeken naar glas en specifiek gekeken naar gelaagd glas, vacuümglas en ontwikkelingen op het gebied van transparante isolatiematerialen, om zo te komen tot een zeer transparant, energiezuinig maar ook risicobestendig kasdek. De belangrijkste bottlenecks zijn dat bij verbetering van één eigenschap andere verslechteren en dat onderzoek en ontwikkelingen zich veelal richt op sectoren waar de investeringsruimte vele malen hoger ligt dan bij de glastuinbouw. Desondanks wordt de behoefte aan nieuwe kasdekmaterialen steeds sterker door de transitie naar hogere energie-efficiëntie onder extreme weersomstandigheden en zullen veelbelovende innovaties uit andere industrieën steeds opnieuw onderzocht moeten worden.

## Abstract

A greenhouse cover in Dutch greenhouse horticulture protects the crop against weather influences that are increasingly extreme and creates an energy-efficient greenhouse climate. This report provides a global overview of the feasibility of new technologies in the field of transparent insulation and laminates for greenhouse application for Dutch greenhouse horticulture. The focus was on glass only, specifically laminated glass, vacuum glass and developments in the field of transparent insulation in order to achieve a highly transparent, energy-efficient but also hail and wind resistant cover. The most important bottlenecks are the fact that when one property is improved, others worsen and the fact that research often focus on sectors where the room for investment is much higher than in greenhouse horticulture. Nevertheless, the need for new greenhouse covering materials is increasing, due to the transition to a higher energy efficiency under more extreme weather. With this, re-examining of promising innovations from other industries is an ongoing process.

---

## Rapportgegevens

Rapport WPR-1368

Projectnummer: 374234000

DOI: <https://doi.org/10.18174/679213>

Dit onderzoek is tot stand gekomen in het kader van programma Kas als Energiebron, het innovatie- en actieprogramma van het ministerie van Ministerie van Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur en Glastuinbouw Nederland en mede gefinancierd door de Stichting Kennis in je Kas.



## Disclaimer

© 2024 Wageningen, Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research, Businessunit Glastuinbouw  
Postbus 20, 2665 MV Bleiswijk T 0317 48 56 06, [wur.nl/plant-research](http://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      Postbus 644, 6700 AP Wageningen  
Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk      Droevendaalsesteeg 1, 6708 PB Wageningen  
T +31 (0)317 48 56 06      T +31 (0)317 48 60 01  
[wur.nl/glastuinbouw](http://wur.nl/glastuinbouw)      [wur.nl/glastuinbouw](http://wur.nl/glastuinbouw)

---

# Inhoud

<b>Samenvatting</b>	<b>5</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>7</b>
<b>2 Materiaaleigenschappen</b>	<b>8</b>
2.1 Lichttransmissie en diffusiteit	8
2.1.1 Eigenschappen	8
2.1.2 Technologieën	9
2.2 Thermische isolatie	10
2.2.1 Eigenschappen	10
2.2.2 Technologieën	11
2.3 Mechanische resistentie	12
2.3.1 Eigenschappen	12
2.3.2 Technologieën	13
2.4 Adaptieve materialen	15
<b>3 Materialen en kasconcepten</b>	<b>16</b>
3.1 Isolerende materialen	16
3.2 Veilige materialen	20
3.3 Adaptieve materialen	23
<b>4 Conclusies</b>	<b>25</b>
<b>Literatuur</b>	<b>27</b>
<b>Bijlage 1 Eigenschappen isolerende materialen</b>	<b>31</b>
<b>Bijlage 2 Eigenschappen mechanisch resistente materialen</b>	<b>32</b>



---

# Samenvatting

Een kasdek in de Nederlandse glastuinbouw beschermt het gewas tegen weersinvloeden, moet een optimaal kasklimaat realiseren en het moet energie- en kostenefficiënt zijn. Daarnaast moet het dek bestand zijn tegen extreem weer zoals tegen storm en hagel, iets wat door de klimaatverandering de laatste jaren eerder regel dan uitzondering is geworden. Ondanks dat de Nederlandse glastuinbouwsector en verzekeraars op zoek zijn naar een klimaat- en risicobestendige kas en kunststof hier een meer logische oplossing voor lijkt, geeft de sector vooralsnog de voorkeur aan glas. Zeker wanneer dit gehard is beschikt glas over extreem goede eigenschappen en heeft vaak een langere levensduur dan de meeste kunststoffen.

In dit rapport wordt een globaal overzicht gegeven van de haalbaarheid van nieuwe technologieën en/of materialen op het gebied van transparante isolatie en laminaten voor toepassing als kasdek materiaal voor de Nederlandse glastuinbouw. Hierbij is alleen gekeken naar glas en specifiek gekeken naar gelaagd glas, vacuümglas en ontwikkelingen op het gebied van transparante isolatiematerialen, om zo te komen tot een zeer transparant, energiezuinig maar ook risicobestendig kasdek.

Om de lichttransmissie van het kasdek materiaal te verhogen zijn de volgende technieken beschikbaar: low iron glas, antireflectie coatings, oppervlaktebehandelingen op basis van verschillende werkingsprincipes (nano, micro/macro) en hydrofiliëit. De diffusiteit van glas kan verhoogd worden te verhogen door structuren op glas aan te brengen of dit te etsen of zandstralen. De volgende technieken worden gebruikt voor hoog isolerende kasdek materialen: low-e coatings (beperken stralingsverlies), meerlaags (isolerende spouw), aerogels (verhoogde spouwisolatie). Het verhogen van de mechanische resistentie kan door het glas thermisch (standaard) of chemisch (dun glas) te harden of te lamineren, waardoor het niet uiteenvalt na schade.

Voor de Nederlandse glastuinbouw is een beperkt aantal "nieuwe" materialen verkrijgbaar die concurrerend zijn de bestaande materialen. Daarnaast wordt door producenten en andere partijen zoals universiteiten en onderzoeksinstituten voortdurend gewerkt aan nieuwe materialen die op de korte termijn ter beschikking komen of nog maar op lab schaal of in concept bestaan. Met betrekking tot de kostprijs moeten nieuwe materialen concurreren met relatief goedkope alternatieven zoals energie- en schaduwsschermen en tijdelijke coatings.

Wat betreft thermische isolatie hebben verschillende concepten zoals low-e coatings en meerlaags glas zich qua energiebesparing in onderzoeks- en demonstratieprojecten reeds bewezen. De weg naar de praktijk wordt soms bemoeilijkt door praktische problemen zoals vervuiling en het niet kunnen afvoeren van sneeuw bij meerlaags glas. Voor de toekomst biedt vacuümglas wellicht perspectief maar nader onderzoek is hier aan te bevelen. Op dit moment is de prijs van dergelijk glas te hoog voor de glastuinbouw.

Met aerogels kan de isolatie van meerlaags glas verder verhogen en moeten dus meer als een lange-termijn oplossing worden gezien. Hoewel aerogels op zich hoog-transparant kunnen zijn, zorgt de combinatie met extra glaslagen niet voor een hogere transmissie dan andere meerlaags toepassingen. Er zijn vooralsnog geen kasdek materialen met aerogels op de markt.

Dun gehard glas is sterk en licht en maakt lichtgewicht meerlaags beglazing mogelijk maar heeft voor de lichtdoorlaat nauwelijks voordelen. De belangrijkste bottlenecks zijn voorlopig montage en beschikbare afmetingen, maar het is de verwachting dat de glastuinbouw kan meeliften op nieuwe ontwikkelingen in de bouwindustrie.

Gelamineerd glas maakt de kas veiliger voor breukschade en in combinatie met dun glas kan op gewicht worden bespaard. Er is echter nog weinig bekend over de voor de tuinbouw relevante eigenschappen.

---

Van adaptieve materialen blijft de PAR transmissie (ook bij volledig transparant) meestal ver achter ten opzichte van standaard glas waardoor deze vrijwel alleen in aanmerking komen voor (zwaar) geschermd teelten. Maar vooral door de nichemarkt en (blijvend) hoge kostprijs blijven deze materialen voorlopig ver buiten bereik van de glastuinbouw.

Technisch gezien kan een kasdekmetaal geoptimaliseerd worden voor een bepaalde eigenschap. De belangrijkste bottleneck hierbij is dat verbetering van één eigenschap vaak ook andere verslechtert. Zo neemt bij hoog-isolerende materialen in de regel de transparantie af en het gewicht toe.

Een andere bottleneck is dat onderzoek zich veelal richt op gebouwen, de automotive industrie en elektronica waarbij de investeringsruimte gewoonlijk vele malen hoger ligt dan bij de glastuinbouw, zeker bij consumentenelektronica. Desondanks wordt de behoefte aan nieuwe kasdekmaterialen steeds sterker door de transitie naar hogere energie-efficiëntie onder extreme weersomstandigheden en zullen veelbelovende innovaties uit andere industrieën steeds opnieuw onderzocht moeten worden.

---

# 1 Inleiding

Een kasdek beschermt een gewas tegen extreme weersomstandigheden, creëert een gunstig kasklimaat en bespaart energie. Dit vereist een tegenstrijdige combinatie van eigenschappen waarbij ook kostprijs een belangrijke rol speelt. Met name transparante hoog-isolerende materialen zijn typische meerlaags, relatief zwaar en hebben vaak een lagere lichttransmissie dan enkellaags materialen, terwijl juist de combinatie van hoog isoleren en transparant gewenst is.

Daarnaast moet een kas het gewas beschermen tegen storm en hagel, die door de klimaatverandering de laatste jaren eerder regel dan uitzondering zijn geworden. De sector en verzekeraars zijn op zoek naar een 'klimaat- en risicobestendige kas' die bestand is tegen de extremen veroorzaakt door klimaatverandering. Hoewel glas veel gevoeliger is voor schade door hagel of storm in vergelijking met flexibelere kunststof afdekkingen, is de Nederlandse glastuinbouwsector niet geneigd om voor alle kassen een glazen kasdek te verruilen voor een kunststof kasdek. Glas beschikt immers over extreem goede eigenschappen en heeft vaak een langere levensduur dan de meeste kunststoffen. Ook kan het risico voor medewerkers die in de kas werken aanzienlijk worden verminderd door het gebruik van gehard glas.

Het doel van dit haalbaarheidsonderzoek is het creëren van een globaal overzicht van de haalbaarheid van nieuwe technologieën en/of materialen op het gebied van transparante isolatie en laminaten voor toepassing als kasdek materiaal voor de Nederlandse glastuinbouw. Het gaat daarbij specifiek om gelaagd glas, vacuümglas en ontwikkelingen op het gebied van transparante isolatiematerialen, om zo te komen tot een zeer transparant, energiezuinig maar ook risicobestendig kasdek.

Hoewel transparante isolatie en mechanische resistentie ook met andere materialen kunnen worden gerealiseerd, zoals kunststof kanaalplaten, folies en schermen, is de scope van dit onderzoek beperkt tot glas, omdat dit traditioneel in Nederlandse kassen wordt gebruikt.

---

## 2 Materiaaleigenschappen

Dit hoofdstuk behandelt de belangrijkste fysische eigenschappen die een cruciale rol spelen bij het ontwerp en de evaluatie van nieuwe energiebesparende kasdekmaterialen die tevens klimaatbestendig zijn, zonder concessies te doen aan de gewasproductie onder Nederlandse klimaatomstandigheden. Dit zijn: (i) maximale lichttransmissie (voor maximale PAR voor groentegewassen en schaduwgewassen tijdens de winterperiode), (ii) diffusiteit (voor een betere verdeling en daarmee gepaard gaande productieverhoging), en (iii) thermische isolatie (vermindering van de warmtevraag). Daarnaast worden recente ontwikkelingen op het gebied van (iv) transparante isolatie (waarmee de uitdaging wordt aangegaan om (i) en (iii) gelijktijdig te maximaliseren) en (v) slagvastheid, die steeds relevanter wordt voor de glastuinbouw, besproken.

### 2.1 Lichttransmissie en diffusiteit

#### 2.1.1 Eigenschappen

Toekomstige kassystemen zijn duurzaam en combineren een kwalitatief hoogwaardige productie zonder, of met een zeer laag niveau van, fossiele brandstof. De benutting van zonlicht speelt een cruciale rol bij de transitie naar deze energiezuinige, duurzame glastuinbouw. Zonlicht is veruit de belangrijkste groeifactor voor het gewas en is tevens de belangrijkste energiebron voor de kas: een energiebron die tevens duurzaam is. Voor een optimale productie van hoge kwaliteit is het essentieel dat het beschikbare licht zo goed mogelijk wordt benut als motor voor de gewasproductie. Om geen of slechts zeer weinig fossiele energie te gebruiken moet het zonlicht zo goed mogelijk worden benut als duurzame energiebron.

Vooraf in de wintermaanden is het belangrijk om een hoge en kwalitatief goede gewasproductie te realiseren. In deze periode zijn productprijzen doorgaans hoog, waardoor juist de winterproductie voor telers belangrijk is. In Nederland zijn de gemiddelde stralingssommen in de winter tien keer lager dan in de zomer. Er is dan ook sprake van licht als beperkende groeifactor. Desondanks is het belangrijk om het beschikbare natuurlijke licht zo veel mogelijk voor de gewasproductie te benutten.

Voor de meeste gewassen resulteert een lichttoename van 1% in een toename van 0.5 tot 1% in het oogstbare product [55]. Als vuistregel kunnen de volgende waarden worden aangehouden: 0.8-1% voor grondgroenten, 0.7-1% voor vruchtgroenten, 0.6-1% voor snijbloemen, 0.25-1.25 voor bolbloemen, 0.5-1% voor bloeiende potplanten en 0.65% voor niet-bloeiende potplanten. Dit zijn gemiddelde waarden, die afhankelijk zijn van meerdere factoren. Zo is het relatieve effect van licht op de groei groter bij lagere lichtniveaus, bij hogere CO<sub>2</sub>-concentraties en bij hogere temperaturen. Het relatieve effect is daardoor in de winter groter dan in de zomer.

Omdat een kasdek voor het overgrote deel uit het transparante kasdek materiaal bestaat, is de lichtdoorlatendheid van dit materiaal bepalend voor de transmissie van het dek als geheel. Deze wordt bepaald door het basismateriaal (glas, kunststof), het aantal lagen, oppervlaktebehandelingen (bv. etsen) en coatings.

Naast de lichttransmissie is de diffusiteit van belang voor kasdek materiaal. Lichttransmissie geeft aan hoeveel licht er binnenkomt, en lichtverstrooiing geeft aan hoe het licht wordt verdeeld. Uit onderzoek is gebleken dat een regelmatige lichtverdeling op en in het gewas de fotosynthese, en daarmee productie, ten goede komt.

Lees [hier](#) meer over de transmissie van kasdek materialen.

Lees [hier](#) meer over diffuus licht en [hier](#) over wat dit doet met het gewas.



---

## 2.1.2 Technologieën

De lichttransmissie van een kas wordt bepaald door een groot aantal factoren waaronder de kasconstructie, installaties, ontwerp, geografische ligging, kasklimaat (condensatie aan het dek) en vervuiling. Maar het gebruikte kasdek materiaal heeft verreweg de grootste invloed op de transmissie van het dek.

Om de lichttransmissie van het kasdek materiaal te verhogen zijn een aantal technologieën beschikbaar:

### **Low iron glas**

Low iron glas, ook bekend als ultra helder glas of extra-helder glas, is een type glas dat een verminderd ijzergehalte heeft in vergelijking met standaard helder glas. IJzer is een natuurlijk onderdeel van zand, wat het belangrijkste grondmateriaal is voor de fabricage van glas. Echter, de aanwezigheid van ijzer in glas kan een groenachtige tint aan het materiaal geven, vooral merkbaar aan de randen. Low iron glas wordt gemaakt door een hoger percentage ijzeroxide uit de grondstoffen te verwijderen tijdens het fabricageproces. Deze vermindering van het ijzergehalte resulteert in een glas dat uitzonderlijke helderheid en hoge lichttransmissie heeft, waardoor het bijna kleurloos is en aanzienlijk helderder dan standaard helder glas. Dit type glas wordt vaak gebruikt in toepassingen waar hoge transmissie belangrijk is, zoals in de Nederlandse glastuinbouw.

### **Antireflectie coatings**

Een antireflectie coating, ofwel AR coating, is een dunne laag materiaal die wordt aangebracht op optische oppervlakken zoals brillenglazen, camera lenzen, of displays om de reflectie van licht te verminderen. Deze coating vermindert schittering en schaduwen die worden veroorzaakt door licht dat reflecteert op het oppervlak. Enkellaags coatings bestaan uit één laagje van 1/4 golflengte dikte met een brekingsindex die gelijk is aan de vierkantswortel uit de brekingsindex van het glas. Theoretisch onderdrukt dit de reflectie volledig voor de gekozen golflengte en vermindert het de reflectie in een breed gebied daar omheen. Multilaags coatings bestaan uit transparante dunne laagjes met afwisselende brekingsindices. De transmissie van de coating hangt dan af van de golflengte en de invalshoek van het licht, waardoor er kleuren verschijnen bij scheve inval. Bij het ontwerpen van dergelijke coatings moet dan ook een golflengtebereik worden opgegeven; in het geval van tuinbouwglas het PAR gebied van 400 tot 700 nm. Multilaags coatings werken vaak over een breed golflengtegebied maar zijn complex en relatief duur. Voor tuinbouwglas worden vaak enkellaags coatings gebruikt.

Lees [hier](#) meer over antireflectie coatings;

### **Oppervlaktebehandelingen**

Met oppervlaktebehandelingen worden structuren in of op het glas gecreëerd die net als AR-coatings de reflectie verlagen en daarmee de transmissie verhogen. Er zijn grofweg 2 principes, nano structuren waarvan de individuele elementen in de buurt van de golflengte van het (doorgelaten) licht liggen en micro/macrostructuren waarbij de elementen (veel) groter zijn dan de golflengte. Het principe achter nano structuren is diffractie, waarbij licht als golven beschouwd wordt die zicht anders gedragen bij obstakels en openingen. Het principe achter micro- en macrostructuren is refractie, waarbij het licht van richting verandert bij de overgang van het ene naar het andere medium.

Nanostructuren werken vaak als een graduele brekingsindex en minimaliseren de reflectie. Een bekend voorbeeld is de zogenaamde "moth eye" structuur, die bestaat uit microscopisch kleine kegelvormige structuren die heel dicht op elkaar zijn geplaatst. Deze kegelstructuren variëren in grootte en vorm en zijn gerangschikt in een regelmatig patroon. Door deze structuur wordt licht op een specifieke manier gebroken en geabsorbeerd, waardoor reflectie wordt verminderd waardoor de transmissie toeneemt. Dergelijke structuren kunnen worden aangebracht met verschillende technieken zoals nano-imprint lithografie of zelfassemblageprocessen. Micro- en macrostructuren werken vaak door de eerste reflectie opnieuw in te vangen. Voorbeelden hiervan zijn zigzag structuren [57] en V-structuren [58].

### **Hydrofiliëit**

De term "hydrofiel" of "hydrofoob" worden gebruikt om te beschrijven hoe water zich gedraagt op een oppervlak zoals glas. Bij condensatie van water op hydrofiel glas zal zich typisch een homogene waterlaag vormen terwijl hydrofoob glas druppels geeft.

---

Een homogene laag verlaagd dan de effectieve brekingsindex en daarmee de reflectie van het glas terwijl druppelvorming de reflectie juist verhoogt. De mate van hydrofiliteit is voor de kasdekmaterialen een belangrijke parameter omdat met name in de koudere regionen het kasdek vrijwel altijd nat is t.g.v. condensatie, vooral tijdens de winterperiode waarin daglicht limiterend is en daarmee de lichttransmissie juist erg belangrijk is.

Om de diffusiteit van kasdek materiaal te verhogen zijn de volgende technologieën beschikbaar:

### **Structuurglas**

Door het aanbrengen van structuren of patronen in of op het glas wordt licht gelijkmatig of willekeurig verstrooid in plaats van het onder dezelfde hoek door te laten. Technologieën voor het aanbrengen van structuren zijn:

- Etsen: behandeling met chemicaliën of zuren.
- Walsen: proces waarbij het (warme) glas aangedrukt wordt door een rol met structuren.
- Zandstralen: onder hoge druk blazen van fijne zandkorrels of andere abrasieve materialen tegen het glasoppervlak.

## 2.2 Thermische isolatie

### 2.2.1 Eigenschappen

Thermische isolatie van een materiaal is het vermogen om warmte-uitwisseling tussen het materiaal en de lucht (convectie), het warmtetransport door het materiaal (geleiding) en warmtestraling naar de hemel te voorkomen. Voor kasdekmaterialen bepalen deze eigenschappen voor een groot deel het warmteverlies van de kas. Met een hoog isolerende kas kan een hoge groeitemperatuur worden aangehouden bij een minimaal energieverbruik. De belangrijkste warmtebron voor een kas is de zon die het gewas, de vloer en overige installaties opwarmt waarna deze de warmte weer afgeven aan de kaslucht. Indien nodig wordt de kas verder opgewarmd met fossiele of hernieuwbare energie.

Warmte gaat op verschillende manieren weer verloren:

#### **Geleiding (conductie)**

Dit is warmteoverdracht binnen de desbetreffende stof, in het geval van kassen dus het glas. De mate van geleiding wordt uitgedrukt in de warmtegeleidingscoëfficiënt ( $W/m \cdot K$ ).

#### **Stroming (convectie)**

Dit is warmteoverdracht door verplaatsing van een warme vloeistof of een warm gas zoals de kaslucht. De mate van convectie wordt uitgedrukt in Wanneer warmte door stroming wordt meegevoerd, kan de mate daarvan worden uitgedrukt met de warmteoverdrachtscoëfficiënt ( $W/m^2 \cdot K$ ).

#### **Straling (radiatie)**

Overdracht van warmte door een lichaam in de vorm van elektromagnetische straling (met golflengten in het bereik van 2500 – 25.000 nm, zogenaamde langgolvlige straling (LWR) of thermische infraroodstraling (TIR)) zonder dat er direct contact of een medium nodig is zoals lucht.

Een kasdek absorbeert zonnestraling waardoor het opwarmt en straalt de opgenomen energie weer uit naar de hemel. Hetzelfde geldt voor alle objecten in de kas (gewas, vloer, buizen), die warmtestraling uitzenden naar koudere objecten (scherm, glas) op basis van hun temperatuur. De mate waarin een object kan uitstralen wordt uitgedrukt in de emissiewaarde. Dit is een dimensieloos getal wat ligt tussen 0 (perfect reflecterend object) en 1 (absorbeert alle straling die erop valt en zendt alle straling weer uit).

De totale warmte die via alle drie de kanalen verloren gaat wordt uitgedrukt in de U-waarde (vroeger K-waarde) van het materiaal. Het is de snelheid van het warmteverlies per vierkante meter bij een temperatuurverschil van 1K tussen binnen en buiten, uitgedrukt in  $W/m^2 \cdot K$ .

---

Hoe lager de U-waarde, hoe beter het materiaal isoleert. Ongecoat float glas heeft typisch een lage thermische geleidbaarheid van 0.96 W/m-K, een hoge emissiewaarde van 0.91 en een U-waarde van 6 W/m<sup>2</sup>K.

### 2.2.2 Technologieën

Hoog isolerende kasdekmaterialen maken gebruik van één of een combinatie van deze eigenschappen:

#### **Low-e coatings**

Deze coatings beperken de warmte-uitstraling en daarmee het warmteverlies en U-waarde van het kasdek materiaal. Wanneer aangebracht op de buitenzijde zal het materiaal ook warmer blijven waardoor er minder vocht condenseert aan de binnenkant van het kasdek. Voor low-e coatings is dit gunstig omdat de werking hiervan teniet gedaan wordt bij condensatie.

Low-e coatings zijn spectrum selectief: ze kunnen zonnestraling doorlaten, maar thermische infraroodstraling reflecteren. Zonnewarmte kan dus de kas binnenkomen, maar de stralingswarmte blijft binnen. Low-e-coatings zijn gewoonlijk samengesteld uit transparante geleidende oxiden (TCO's), zoals indiumtinoxide (ITO) en met fluor gedoteerd tinoxide (FTO) - opgenomen in het glasproductieproces als 'harde' coatings, of uit ultradun metaal (zilver, koper en goud) ingeklemd tussen dielectrische lagen - aangebracht na het uitharden van het glas, ook wel 'zachte' coatings genoemd. Beide coatingtypen hebben al zeer lage emissiewaarden bereikt (~0,01) en een verdere verlaging van de emissiviteit heeft slechts een klein marginaal voordeel [6].

Zachte coatings kunnen economisch gunstiger zijn voor gebouwen met kleinere raamoppervlakken, maar deze coatings zijn dunner en kwetsbaarder en kunnen verslechteren bij blootstelling aan omgevingsomstandigheden. Daarom worden harde coatings vaker gebruikt voor gebouwen waar de beperkingen op het gebied van grootte en levensduur zwaarder wegen dan de initiële kosten in vergelijking met zachte coatings. Bij beide coatings levert het hebben van slechts één gecoat oppervlak voor de meeste toepassingen de grootste winst op het gebied van duurzaamheid op[6].

#### **Meerlaags materialen**

Bij kasdekmaterialen die bestaan uit meerdere lagen gescheiden door lucht of gassen zoals argon of krypton, wordt de warmteoverdracht door geleiding en convectie verminderd met een lagere u-waarde als gevolg.

In het WUR-onderzoek 'Feasibility thin glass' [7] werd de isolatie van enkel-, dubbel- en drielaags glas onderzocht voor verschillende glasafstanden en verschillende gasvullingen (lucht, argon en krypton). Krypton bleek tot de laagste U-waarde te leiden, gevolgd door argon en lucht. Vanwege de hoge prijs en prijsschommelingen van krypton wordt argon vaak gebruikt als gas voor isolatieglas wanneer een lage U-waarde nodig is. Bij montage onder een helling van 23° op de kas bleek de u-waarde te dalen bij een afstand tot ~10 mm. Bij een tussenruimte van 8 mm bij lucht vulling of 4 mm bij argonvulling werd een U-waarde lager dan 3 W/m<sup>2</sup>-K bereikt. Het gebruik van meerlaags glasbeglazing voor kasafdekkingen kan leiden tot een verminderde lichttransmissie in de kas als gevolg van meervoudige reflecties op elk glasoppervlak. Dit kan worden opgelost door het gebruik van antireflectie coatings op elk oppervlak.

Een ander belangrijk nadelen van meerlaags materialen is dat de binnenzijde van het materiaal in koude perioden veel warmer blijft in vergelijking met enkellaags materialen. Voor energiebesparing is dit natuurlijk een gewenst effect, maar de hogere temperatuur heeft ook gevolgen:

- a. Verminderde condensatie aan het kasdek ten gevolge van een hogere kasdektemperatuur. Hierdoor neemt de luchtvochtigheid toe en is soms extra ventilatie nodig waardoor vaak onbedoeld zowel voelbare als latente warmte verloren gaat.
- b. Sneeuw smelt minder snel of helemaal niet waardoor schade kan ontstaan aan zowel constructie als gewas.

Transparante isolatie (TI) wordt wereldwijd beschouwd als één van de meest belovende technologieën en verwijst naar het proces waarbij zonnestraling, met name zichtbaar licht, door een transparant materiaal heen gaat zonder significante absorptie of reflectie.

---

Dit fenomeen is belangrijk voor verschillende sectoren waaronder architectuur, bouwkunde, solar en glastuinbouw. Met de ontwikkeling van dunne (0,03 – 2 mm) maar zeer sterke glasplaten voor mobiele telefoons (o.a. Leoflex™, Falcon™ van Asahi Glass) ontstaan nieuwe mogelijkheden voor een meerlaags hoog isolerend kasdek dat toch licht van gewicht kan blijven. Dun glas heeft al een verminderde lichtabsorptie en door het toevoegen van AR-coatings kan de lichttransmissie verder worden vergroot, waardoor het mogelijk wordt om drie of meer lagen in een kasdek te gebruiken om de isolatie te verbeteren. De flexibiliteit van dun glas opent de mogelijkheid voor nieuwe structurele ontwerpen[7].

### **Aerogels**

Aerogels zijn synthetische poreuze materialen, afgeleid van gels, waarbij het vloeibare deel van de gel is vervangen door een gas, zonder dat de gelstructuur instort (Wikipedia, 2023). Silica-aerogels zijn een veel voorkomende klasse aerogels, gemaakt van een verknoopt netwerk van SiO<sub>2</sub>-ketens met daartussen een groot aantal met lucht gevulde poriën. De hoge porositeit en kleine poriegrootte (5 – 100 nm) geven aerogels unieke thermische, optische en akoestische eigenschappen. Silica-aerogels minimaliseren de warmteoverdracht door geleiding (aangezien een groot deel van het vaste silica wordt vervangen door lucht), door convectie (vanwege een kleinere poriegrootte dan het gemiddelde vrije pad van lucht), en ook door straling bij temperaturen die relevant zijn voor gebouwen en gebouwen. kassen (straling boven 7 µm, uitgezonden door objecten die koeler zijn dan 150 °C in kassen en gebouwen, wordt sterk geabsorbeerd en de transmissie ervan wordt sterk verzwakt [8]. Zo kunnen aerogels een thermische geleidbaarheid bereiken die lager is dan 13 s/m-K (vergeleken met 26 mW/m-K voor lucht).

Aerogels die op de markt worden gebracht voor ramen in gebouwen zijn verkrijgbaar in korrelvorm of monolithische vorm. De monolithische of plaatvorm heeft een hogere lichttransparantie, maar is moeilijk en duur om op grote schaal te vervaardigen vanwege de grote kans op scheuren of defecten, die de optische en thermische eigenschappen kunnen beïnvloeden. Contact met water moet ook worden vermeden voor monolithische panelen, daarom wordt het doorgaans afgedicht tussen glasruiten.

Aerogelkorrels zijn makkelijker te produceren en hanteren en zijn algemeen in de handel verkrijgbaar, maar hebben een lagere optische transmissie en thermische isolatie (als gevolg van lucht die opgesloten zit in de macroporiën tussen de korrels). In tegenstelling tot monoliet-aerogels kan bij korrelvormige aerogels in beglazingstoepassingen een bezinkingseffect worden waargenomen, wat hun prestaties in de loop van de tijd kan beïnvloeden [9], [10].

Voor transparante isolatietoepassingen in ramen worden aerogels tussen glasruiten geplaatst – vooral monolithische aerogels – om ze te beschermen tegen mechanische schade en contact.

## **2.3 Mechanische resistentie**

### **2.3.1 Eigenschappen**

Hoewel het hagelrisico in Nederland niet zo hoog is als in Zuid-Duitsland of Zwitserland, kunnen zelfs incidentele, hevige hagelbuien enorme verliezen in de glastuinbouw veroorzaken. Zo zorgde het zware hagelincident in 2016 voor circa 130 miljoen schade in de glastuinbouw in Nederland [1]–[4]. Modelleren en analyse van het hagelrisico heeft voorspeld dat het risico door de gevolgen van de klimaatverandering de komende jaren zal toenemen [5], en daarom zijn preventieve maatregelen belangrijk.

De belangrijkste mechanische eigenschappen die belangrijk zijn voor glas zijn [15]:

- Elasticiteit: hoeveel glas uitzet of krimpt als er spanning op wordt uitgeoefend. Dit wordt gegeven door 3 elastische moduli:
  - i. Young's modulus: meet de elasticiteit/stijfheid van het glas – hoe groter de Young's modulus hoe stijver het glas.
  - ii. Poisson-ratio: wanneer er in één richting spanning op glas wordt uitgeoefend, rekt het materiaal doorgaans uit in de richting van de uitgeoefende spanning en trekt het samen in de loodrechte richting. De Poisson-ratio geeft de relatie weer tussen deze uitzetting en krimp.

---

iii. Afschuifmodulus: geeft de stijfheid van het glas aan tegen een spanning die evenwijdig aan het glasoppervlak wordt uitgeoefend.

- Sterkte: hoeveel spanning het glas kan weerstaan voordat het breekt – de sterkte is hoger als de Young-modulus hoger is, en neemt af als er onvolkomenheden of defecten in het glas zitten.
- Hardheid: geeft de weerstand van glas weer tegen krassen, breuken of slijtage als het in contact komt met scherpe randen van andere materialen – de tests die dit aangeven zijn de schaal van Moh of de hardheid van Vicker.
- Slagvastheid: meet het vermogen van glas om breuk te weerstaan en de kwaliteit van het oppervlak te behouden nadat het is geraakt.

De elastische eigenschappen en sterkte van glas zijn een maat voor de weerstand tegen statische (of voortdurende) spanning, zoals het eigen gewicht of het gewicht van de sneeuw die zich op het glas heeft opgehoopt. Dynamische belastingen (hagelstenen) veroorzaken een grote kracht die ogenblikkelijk op één plek op het oppervlak wordt uitgeoefend en de relevante eigenschap is slagvastheid.

De belangrijkste belasting factoren waarmee rekening wordt gehouden voor kassen zijn: sneeuw- en windbelasting, belasting als gevolg van hagel, belasting als gevolg van gewasondersteuning en bevestiging van apparatuur. De hagelbelasting die het afdek materiaal kan verdragen, hangt samen met de slagvastheid van het materiaal. De wind- en sneeuwbelastingen kunnen verband houden met buig- (buig-), schuif-/scheur- en trekeigenschappen en mogelijk met het dynamische gedrag van het materiaal. De aard van de wind- of hagelbelasting is bijvoorbeeld dynamisch en fluctueert willekeurig in tijd en ruimte, terwijl de belasting die in het laboratorium wordt gebruikt voor het testen van de sterkte van een paneel uniform is en lineair toeneemt met de tijd. De transformatie tussen deze twee beladingsomstandigheden is niet erg eenvoudig. [16], [17]

De slagvastheid is hoog voor glazen met hogere waarden voor sterkte, hardheid en taaierheid. Typisch leidt een toenemende glasdichtheid en -dikte tot een betere slagvastheid. De slagvastheid kan worden gemeten met behulp van verschillende soorten testen: kogelval-, slinger- of raketinslagtest. Om de hagelbestendigheid van glas te testen, worden kunstmatige hagelstenen van verschillende groottes met verschillende snelheden en dus verschillende kinetische energie naar het glas gegooid. De kinetische energie (in joules of J) van hagel waarbij het glas breekt, wordt gebruikt om de hagelbestendigheid van het glas te meten.

### 2.3.2 Technologieën

De slagvastheid van glas kan worden verbeterd door middel van verschillende technieken en technologieën:

#### **Thermisch harden**

Glas kan worden verwarmd en snel afgekoeld, waardoor compressie op het oppervlak en spanning in het glas ontstaat. Het samengedrukte oppervlak zorgt ervoor dat het glas beter bestand is tegen mechanische en thermische belasting dan gewoon glas, en verandert ook de manier waarop het breekt. In plaats van scherpe, gevaarlijke scherven te vormen, breekt gehard glas in kleine, stompe, relatief onschadelijke stukjes. Het snijden of slijpen van het glas moet vóór het temperen gebeuren. Snijden, slijpen en scherpe schokken na het temperen zullen ervoor zorgen dat het glas breekt (Wikipedia, 2017).

#### **Chemisch harden**

Hier worden, in plaats van gebruik te maken van snelle verwarming en koeling om compressie op het oppervlak te creëren, chemische middelen gebruikt door ionen op het oppervlak van het glas te manipuleren. Het glas ondergaat een ionenuitwisselingsproces door het onder te dompelen in een bad met kaliumzout, de mobiele natriumionen diffunderen uit het glas en 30% grotere kaliumionen diffunderen in het glas. Door de grotere straal van de kaliumionen ontstaat er bij afkoeling een compressielaag op het oppervlak. De dikte van deze compressielaag ligt in de orde van grootte van 10 tot 100  $\mu\text{m}$ . Chemische harding resulteert in een grotere treksterkte vergeleken met thermische harding en kan worden toegepast op glazen voorwerpen met complexe vormen (Wikipedia, 2017). Dit proces wordt gebruikt voor het productieproces van dun glas en zorgt voor een hoge buigsterkte. De onderstaand tabel vergelijkt thermisch en chemisch gehard glas.

**Tabel 1**    *Vergelijking tussen thermisch en chemisch gehard glas [18].*

Parameter	Thermal Strengthening	Chemical Strengthening
Strength (max. value range)	~(200–400) MPa	~(800–1000) MPa
Surface compression layer	Thick	Thin
Stress distribution profile	Parabolic	More flat & square
Minimum sample thickness	2–3 mm	<1 mm
Process Time	Short (mins)	Long (hours)
Process Cost	Cheap	Expensive
Glass Composition	No relevant	Alkaline glass (i.e., soda-lime or aluminosilicate)
Product Shape	Simple geometries	Unusual shape

### Lamineren

Gelaagd glas bestaat uit meerdere lagen glas met daartussen een laag helder plastic, meestal polyvinylbutyral (PVB). Deze plastic laag houdt het glas bij elkaar, zelfs als het breekt, waardoor het niet versplintert. Gelaagd glas biedt niet alleen slagvastheid, maar ook extra veiligheid na breuk door het risico op verwondingen door blootstelling aan gebroken glas te verminderen.

Harden verbetert de hagelinslagweerstand van glas, aangezien de hagelinslag het best kan worden omschreven als een stompe inslag en het onwaarschijnlijk is dat deze door de compressielaag van gehard glas heen dringt. In [19] wordt aangetoond dat thermisch gehard glas met een dikte van 2 tot 4 mm een impactenergie van 3 tot 5 Joule kan weerstaan, terwijl chemisch gehard glas een impactenergie in het bereik van 27 tot 30 Joule kan weerstaan. In [20] volgden ze IEC61215: 2016 en laten zien dat geharde beglazing van 4 mm een hogere impact van ~2,8 kg m/s kan weerstaan in vergelijking met geharde beglazing van 3,2 en 2,8 mm dik, die beide faalden bij ~1,4 kg m/s. In [21] werd een impacttest met een metalen kogelvalopstelling gebruikt om een verhoogde impactweerstand aan te tonen voor gehard glas met een dikte van 5 tot 15 mm, wat wijst op een duidelijk lineair verband tussen impactweerstand en glasdikte. Het vergroten van de dikte van gehard glas om de hagelbestendigheid te vergroten, biedt een technisch gemakkelijke route om stapsgewijze verbeteringen aan te brengen.

Met de ontwikkeling van dun (0.03 – 2 mm) maar zeer sterk glas voor mobiele telefoons (o.a. Leoflex™, Falcon™ van Asahi Glass) zijn nieuwe mogelijkheden ontstaan voor een meerlaags, hoog isolerend en sterk kasdek materiaal. Flexibel dun glas is een chemisch gehard glas wat tevens gebogen kan worden [7].

Het combineren van chemische en thermische harding bij meerlaags glas zou later kunnen leiden tot beter hagelbestendige beglazing, maar onderzoek heeft tot nu toe aangetoond dat dit technisch een grote uitdaging is en nog niet het beoogde resultaat opgeleverd heeft [22].

Alternatieve materialen die slagvaster zijn dan glas zijn:

- Polycarbonaat: Polycarbonaatpanelen zijn lichtgewicht en zeer slagvaste alternatieven voor glas. Ze worden vaak in kassen gebruikt vanwege hun vermogen om hagel, door de wind geblazen puin en andere schokken te weerstaan. Polycarbonaatpanelen zijn verkrijgbaar in verschillende diktes en kunnen bovendien uitstekende isolatie-eigenschappen bieden.
- Acryl: Acryl, ook wel plexiglas genoemd, is een ander alternatief voor traditioneel glas dat slagvastheid biedt. Het is lichter dan glas en heeft een goede optische helderheid, waardoor het geschikt is voor toepassingen in de kas.

De voordelen van glas ten opzichte van kunststoffen zijn:

- Hoge transmissie (initieel, na verloop van tijd)
- Hoge levensduur
- Hergebruik
- Temperatuurafhankelijkheid
- Stijfheid

---

## 2.4 Adaptieve materialen

Adaptieve of slimme materialen kunnen hun (optische) eigenschappen veranderen als reactie op bepaalde externe omstandigheden of controleacties. Potentiële voordeel ten opzichte van schermen is dat schermen regelbaar zijn, maar de lichttransmissie altijd met minimaal 25% verlagen indien gesloten (beste transparante scherm). Tijdelijke coatings zijn alleen seizoensafhankelijk op te brengen waardoor de regelbaarheid zeer beperkt is.

Adaptieve materialen kunnen in verschillende typen worden onderverdeeld:

- **Elektrochrome materialen:** Deze materialen kunnen hun optische eigenschappen (zoals lichttransmissie en opaciteit) veranderen wanneer er elektrische spanning wordt aangelegd. Ze worden vaak gebruikt in ramen en slimme glastechnologie om de hoeveelheid licht die erdoorheen valt te regelen.
- **Fotochrome materialen:** Fotochrome materialen veranderen hun kleur of lichttransmissie-eigenschappen wanneer ze worden blootgesteld aan licht. Ze worden vaak gebruikt in brillen en lenzen die donkerder worden in zonlicht.
- **Thermochrome materialen:** deze materialen veranderen van kleur of lichttransmissie-eigenschappen als reactie op temperatuurveranderingen. Ze worden gebruikt in verschillende toepassingen, waaronder textiel en temperatuurgevoelige indicatoren.
- **Vloeibare kristalmaterialen:** Vloeibare kristallen kunnen hun oriëntatie en optische eigenschappen veranderen wanneer ze worden blootgesteld aan een elektrisch veld. Ze worden gebruikt in beeldschermen (zoals Lcd-schermen) en lichtmodulatie-apparaten.
- **Metamaterialen:** Metamaterialen zijn kunstmatige structuren die unieke eigenschappen vertonen die niet voorkomen in natuurlijke materialen. Ze kunnen worden ontworpen om de voortplanting van elektromagnetische golven, inclusief zichtbaar licht, op ongebruikelijke manieren te controleren.
- **Vormgeheugenmaterialen:** deze materialen kunnen van vorm veranderen als reactie op een verandering in temperatuur of een externe stimulus. Hoewel ze niet direct verband houden met lichttransmissie, kunnen ze mogelijk worden gebruikt in mechanismen die de vorm van luchtdoorlatende componenten veranderen.

Een overzicht over diverse technologieën wordt o.a. gegeven door Timmermans et.al [59] en een overzicht over de inzet in kassen wordt gegeven door Baeza [60].

---

## 3 Materialen en kasconcepten

### 3.1 Isolerende materialen

Voorbeelden van kasconcepten met een meerlaags dek zijn de VenLow kas [23], de 2SaveEnergy kas [24] end BEST kas, allen onderdeel van het Innovatie en Demonstratiecentrum van Wageningen Research in Bleiswijk.

#### **VenLow kas**

Dit kasconcept gaat uit van een maximale isolatie van de kasomhulling door toepassing van hoog isolerend glas, gecombineerd met energiezuinig ontvochtiging van de kaslucht met buitenlucht met warmteterugwinning en het toepassen van een energiezuinig teeltconcept gebaseerd op de ervaring en bij het nieuwe telen. Gecombineerd met extra schermen, ontvochtiging en teeltprotocollen kan een energiebesparing van ruim 50% worden gerealiseerd.

Eigenschappen kasdek:

- Het dak is voorzien van dubbel glas met 2 ruiten van 3 mm glas. Drie van de vier zijden van het dubbelglas zijn gecoat met AR-coatings om de lichttransmissie te maximaliseren, en één zijde heeft een low-e-coating om de kasisolatie te verbeteren.
- Het afdek materiaal is hoog isolerend met een u-waarde van 1.2, gecombineerd met een hoge PAR lichttransmissie van 88% loodrecht en 79% hemisferisch. [23].

De hoge isolatie zorgt er echter voor dat de sneeuw op het deksel in de winter niet kan smelten, omdat het buitenoppervlak van het glas geïsoleerd is van de warme binnenkant van de kas.

#### **2SaveEnergy greenhouse:**

Dit kasconcept bestaat uit een combinatie van een "standaard" kasdek met daaronder een ETFE-film om een goede isolatie te bereiken. Deze combinatie samen met een dubbel scherm, welke op slechts enkele centimeters afstand van elkaar gemonteerd is, heeft in het teeltjaar 2015 tot een laag energiegebruik en een prima tomaten productie geleid. Tijdens de teelt zijn de principes van Het Nieuwe Telen zoveel mogelijk aangehouden. Ten opzichte van de gangbare praktijk was het energiegebruik meer dan 50% lager bij een minimaal gelijke productie.

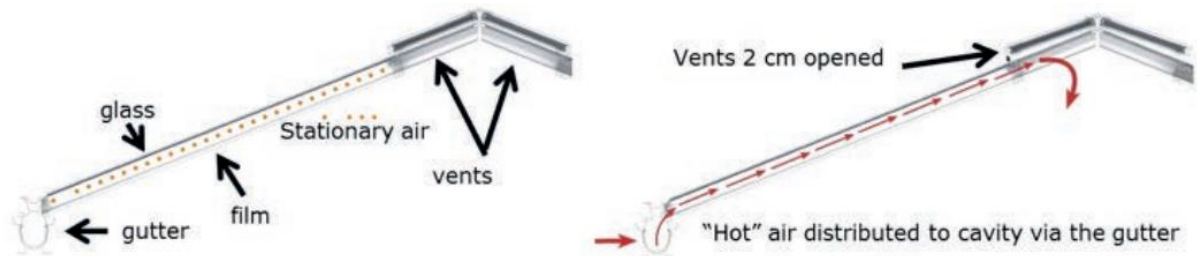
Eigenschappen kasdek:

- Een combinatie van helder glas gecoat met AR-coatings aan beide zijden en een diffuse ETFE ('F-clean') film 7 cm onder het glas.
- De hemisferische transmissie van de enkele beglazing met 2 zijden AR-gecoat is 90.5%, die van de F-clean diffuus is 83.3% en die van de combinatie is 76% [24].

Dit concept was bedoeld om de uitdaging van het smelten van sneeuw op de afdekking, ondanks de hoge isolatie, aan te pakken. Om het smelten van sneeuw te bevorderen kan de luchtspouw tussen het glas en de ETFE-folie gevuld worden met de "verwarmde" kaslucht. Afhankelijk van de dakraampositie openen of sluiten rubbers de luchtspouw in de dakraamflens, zoals weergegeven in 0. Vanuit de onderste holle ruimte zijn aan de gootzijde gaten gemaakt, die uitkomen in de spouw tussen glas en folie. Als de dakramen volledig gesloten zijn, drukt er een rubber op de dakramen. In deze spiegel zitten gaten, die in verbinding staan met de spouw. Doordat het rubber de gaten afdicht, blijft de lucht in de holte stilstaan (0 links).

Zodra de vleugel meer dan 2 cm open staat, worden de gaten in de spiegel geopend (0 rechts). Er ligt echter nog steeds een rubberen flap op het kasdek. Dit houdt in dat het raam gesloten is voor de buitenlucht maar het is wel mogelijk om lucht via de goot de spouw in te blazen, waarna de spouw lucht via het dakraam weer naar binnen wordt geleid. De warme lucht wordt met behulp van een ventilator uit de kas gehaald en in de goot geblazen.





**Figuur 1** Illustratie van de gesloten (links) geopende (rechts) spouw.

### **Berry Energy Saving Technology (BEST) greenhouse:**

BEST staat voor Bubble Energy Saving Technology en het meest in het oog springende onderdeel van deze kas is het gebruikte kasdek materiaal: noppenfolie. Deze speciale kas is vooral geschikt voor gewassen die van origine buiten in de volle grond worden geteeld, omdat deze gewassen behoefte hebben aan een beschermde teeltomgeving vanwege klimaatverandering (meer kans op nachtvorst, overmaat aan regen/hagel). Foliekassen zijn goedkoper dan glazen kassen en kunnen van een ventilatiecapaciteit voorzien worden die vrijwel oneindig is, wat voor dit soort gewassen erg belangrijk is. Het noppenfolie heeft een relatief goede lichtdoorlatendheid (67% hemisferisch), een hoge isolatiewaarde, een lange levensduur van minstens 15 jaar en is diffuus. Deze kas vraagt een "beperkte" investering, bespaart zo'n 50% energie t.o.v. een eenvoudige glazen kas en is geschikt voor gewassen met een matig energieverbruik, zoals houtige klein fruitgewassen.

Eigenschappen kasdek:

- Isolerend noppenfolie van RKW/Hyplast wordt gebruikt als afdek materiaal voor teelten met hoge energiebesparing en beperkte investeringen [25]. Noppen met een diameter van een 2 Euromunt zijn aan beide zijden gelamineerd zodat het oppervlak weer glad wordt.
- Dit materiaal heeft ondanks hoge isolatie een hoge lichttransmissie ( $67.5 \pm 5\%$ ), lage U-waarde (3.3), is diffuus (Hortiscatter  $38 \pm 5\%$ ), heeft een lange levensduur ( $>15$  jaar) en is hagel- en stormbestendig resistent.
- Low-e- en NIR-reflectiecoatings waren gepland maar niet gerealiseerd – dit zou de energiebesparende prestaties nog verder kunnen verbeteren.

Daarnaast zijn ook door andere partijen nog nieuwe hoog isolerende kasconcepten onderzocht en gerapporteerd.

### **Dynamische zeepbelisolatie**

De in Noorwegen en Nederland gevestigde startup BBLS B.V. heeft een concept met dynamische injecteerbare zeepbellen ontwikkeld voor isolatie/schaduw in kassen met behulp van dubbele ETFE-folie als basismateriaal. Een PAR-transmissie van de ETFE-dubbele folie van 82% zonder bellen en 60% met bellen wordt gerapporteerd, met diffuse eigenschappen. Een onderzoek met een BBLS-kasontwerp [27] rapporteerde een U-waarde van  $0.9 \text{ W/m}^2\text{-K}$  en een vermindering van de energievraag van ongeveer 80% vergeleken met conventionele technologie in de Scandinavische omgeving. Het concept ging bovendien uit van warmteopslag en actief sneeuwsmelten. In Noorwegen is een kas van  $1500 \text{ m}^2$  gebouwd en in Monster lagen initiatieven voor de oplevering van een demokas. Inmiddels is BBLS B.V. failliet verklaard waardoor het concept geen vervolg krijgt.

### **Liquid Foam Technology**

Aberkani onderzocht schaduw en isolatie met vloeibaar schuim in Canadese kassen met een dubbellaags luchttopgeblazen PE-afdekking [26] met een lichttransmissie van  $71 \pm 3\%$  zonder schuim. Voor zonwering werd de verspreiding van schuim geregeld op buitenstraling en kasluchttemperatuur. Er werd gemeld dat het koelpotentieel van het schuim hoger was dan dat van schaduwschermen. Het injecteren van schuim leverde een energiebesparing op van 30 tot 60%, afhankelijk van het seizoen. Het schuim werd alleen 's nachts geïnjecteerd en vóór zonsopgang weer verwijderd. In de winter verlaagde het schuim de gemiddelde U-waarde van  $4.3 \text{ W/m}^2\text{-K}$  naar  $2.9 \text{ W/m}^2\text{-K}$  (33%) en in het voorjaar van  $3.7 \text{ W/m}^2\text{-K}$  naar  $1.3 \text{ W/m}^2\text{-K}$  (65%). De variatie werd toegeschreven aan de temperatuur die de fysieke eigenschappen, en daarmee de dekking van het schuim, beïnvloedde.

---

In alle onderzochte concepten zijn energiebesparingen van 30 tot 80% gerapporteerd. Dergelijke hoge energiebesparingen zijn echter vaak niet alleen toe te schrijven aan de isolerende werking van het kasdek alleen, maar ook aan het aanpassen van de klimaatregeling, gewasmanagement en de integratie in een energieopslagsysteem.

### **Geysir (AGC)**

Geysir-glas van AGC heeft een enkelzijdige low-e coating en een dubbelzijdige AR-coating. Het glas heeft een hemisferische transmissie van  $83\pm 1\%$  en een u-waarde van  $3.7 \text{ W/m}^2/\text{K}$  [28]. In experimentele proeven waarbij Geysir-glas werd gecombineerd met aangepaste teeltstrategieën zijn energiebesparingen van ca. 23% gerealiseerd bij een tomatenteelt [29]. Grotere energiebesparingen worden verwacht voor een warmte teelt als aubergineteelt [30].

### **FINEO (AGC)**

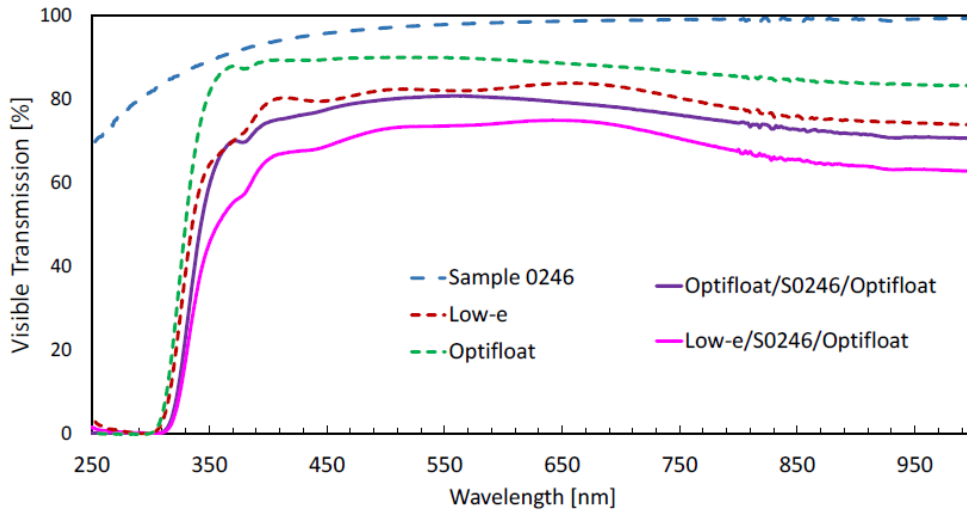
Fineo-beglazing van AGC maakt gebruik van vacuümisolatietechnologie in dun glas [31]. Er worden energieprestaties van Fineo gerapporteerd die vergelijkbaar zijn met die van driedubbele beglazing, met 4 tot 5 keer dunnere ruiten en een derde van het gewicht. Voor de transmissie van loodrecht invallend zichtbaar licht wordt 72% tot 80% gerapporteerd, afhankelijk van het glastype en de -dikte. Het normale Fineo-glas heeft een vacuüm spouw van 0/1 mm tussen twee geharde heldere glasplaten van 3 – 6 mm dik, een enkelzijdige low-e coating in de vacuümspouw en een totale ruitdikte van 7.7 mm. Voor de U-waarde wordt  $0.7 \text{ W/m}^2/\text{K}$  gerapporteerd. Het vacuüm wordt afgedicht door een loodvrije anorganische randafdichting waarop 15 jaar garantie wordt afgegeven. Deze u-waarde is aanzienlijk lager dan de laagste u-waarde van  $2.37 \text{ W/m}^2/\text{K}$  die bekend is voor dubbel glas voor kassen [32]. De transmissie voor loodrecht invallend licht van 80% is echter vergelijkbaar met die van ongecoat dubbel glas en zou met AR coatings verder kunnen worden verbeterd.

Fineo combineert de hoge isolatie van drielaags glas met de hoge lichttransmissie van dubbel glas. De dikte, het lichte gewicht, de lage U-waarde en de hoge transmissie van Fineo zijn gunstiger voor gebruik in kassen dan andere met argon gevulde dubbele beglazingen van AGC, zoals Thermobel Top beglazing (loodrechte PAR-transmissie van 81%; u-waarde van  $1,1 \text{ W/m}^2/\text{K}$ ) of Themrobel Advanced Glazing (loodrechte PAR-transmissie van 71%; u-waarde van  $0.8 \text{ W/m}^2$ ) [33].

### **Aerogels**

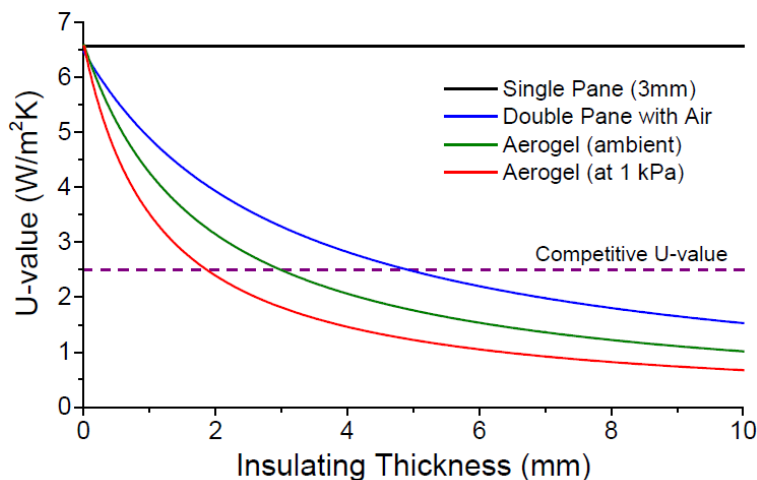
Aeroshield, een in de VS gevestigde startup, produceert zeer transparante aerogels voor ramen [34]. Het promotieonderzoek [35] waarop het bedrijf is gebaseerd onderzocht prototypes van silica-aerogel, afgedicht tussen twee ruiten van borosilicaatglas van 3 mm met behulp van een droogmiddelfstandhouder en een siliconen randafdichting, wat een u-waarde van  $1,5 \text{ W/m}^2/\text{K}$  opleverde. De aerogels vertoonden een hoge loodrechte solar transmissie (PAR+NIR) van 97%, samen met een hoge zichtbare transmissie (98%) en een lage transmissie voor warmtestraling (TIR). Voor kassen in koude klimaten is de combinatie van hoge solar transmissie en lage TIR-transmissie gunstig om de (gratis) zonnewarmte vast te houden. Voor de zomermaanden moet juist de transmissie van NIR worden vermeden en kan het nodig zijn tijdelijke zonwering of NIR-reflecterende coatings te gebruiken, met als nadeel dat deze vaak ook de PAR-transmissie verlagen.

Vanwege hun structurele kwetsbaarheid moeten aerogels tussen glasruiten worden aangebracht. Dus in plaats van de op zichzelf staande eigenschappen van de aerogel, moeten deze zowel optisch als thermisch worden beoordeeld op het integrale pakket van glas en aerogel/ 0 toont de loodrechte lichttransmissie van 250 – 1000 nm van alleen de aerogel (sample 0246) vergeleken met Pilkington Optifloat helder glas, Pilkington Energy Advantage glas met lage emissie en met 2 combinaties dubbel glas met de aerogel in de spouw.



**Figuur 2** Zichtbare lichttransmissie van aerogel Sample0246 vergeleken met Pilkington's Energy Advantage low-e coating, Optifloat-glas en als dubbel glas gevuld met de aerogel [35].

Wanneer de aerogel onder enige druk en afgedicht in een raam wordt toegepast kan de totale U-factor hoger worden. In **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** worden berekende u-waarden voor verschillende raamontwerpen vergeleken met een standaard u-waarde van  $2.5 \text{ W/m}^2/\text{K}$  van commercieel verkrijgbare materialen. Volgens de figuur kan met aerogel dezelfde U-waarden gehaald worden als lucht en al bij een dikte van 2 mm concurrerend zijn. Uit de in het proefschrift gerapporteerde testen werden experimenteel veel hogere u-waarden waargenomen dan berekend, als gevolg van uitdagingen bij het opschalen ten behoeve van betrouwbare metingen.



**Figuur 3** U-waarden van verschillende raamontwerpen, berekend op basis van de thermische geleidbaarheid (geen rekening gehouden met convectie) volgens de standaardomstandigheden van de NFRC. Om concurrerend te zijn met commerciële materialen is een U-waarde op of onder de  $2.5 \text{ W/m}^2/\text{K}$  vereist. Aerogel vertoont bij zowel omgevingsdruk als iets verminderde druk aanzienlijk betere prestaties bij acceptabele diktes [35].

Een ander voordeel van met Ar gevulde aerogel ramen vergeleken met Ar gevulde dubbele beglazing is de verslechtering van de werking bij een defecte afdichting [35].

Op het gebied van lichtverstrooiing is geprobeerd om de mate van diffusiteit te beïnvloeden door verschillende fabricage recepten [35]. Dit werd ook op betrouwbare wijze gemodelleerd waarbij de relatie tussen de verstrooiingsgrootte (een representatieve gemiddelde straal van zowel poriën- als deeltjeskenmerken), verstrooiing en transmissie werd getoond [36].

---

Dit soort voorspelbare controle op de eigenschappen zou interessant kunnen zijn voor een hoog transparant diffuus kasdek materiaal met regelbare diffusiteit, zonder de lichttransmissie te verlagen. Strobach maakte een economische analyse waarin hij stelde dat transparante aerogels met een consumentenprijs van minder dan 3-4 US\$/sqft hetzelfde potentieel zou hebben als de low-e coatings die op vrijwel alle nieuwe ramen te vinden zijn [35].

In 2023 rapporteerde een ander onderzoek de op cellulose gebaseerde gesilaniseerde aerogel SiCellA [13]. Silanisatie is een verwerking van de cellulosevezels die hun hydrofobiteit verhoogt. De aerogel zelf had een transmissie van zichtbaar licht van 97-99%, hoger dan de 90-92% van ongecoat float glas. De hoge transmissie komt voort uit de nanostructuur van SiCellA waarbij alle afmetingen van de aerogelmorfologie veel kleiner zijn dan de golflengte van licht in het zichtbare gebied (<100 nm poriegrootte en <10 nm diameter van nanovezels). Er werd gemeld dat de fabricageprocedure zeer schaalbaar en compatibel is met roll-to-roll-verwerking en het uitgangsmateriaal van cellulose, afgeleid van houtpulp, is goedkoop en overvloedig verkrijgbaar en zou ook kunnen worden verkregen uit verspilling van voedsel- en bierproductie-industrieën, met kosten voor de uiteindelijke SiCellA-film in de orde van grootte van 1 US\$/sqft in beide gevallen. De aerogel kan worden gebruikt als middelste ruit omringd door twee glasruiten met lucht/gasvulling in een driedubbele ruitstructuur, of kan achteraf worden ingebouwd in bestaande glasconstructies, door deze aan één zijde te verlijmen op beschermend helder plastic of dunne glassubstraten en het lamineren hiervan op de binnenzijden van ramen met enkele beglazing. Een dergelijke aanpassing zou de energie-efficiëntie van enkellaags ramen kunnen vergroten zodat de isolatiewaarde met dubbele beglazing worden geëvenaard of zelfs worden overtroffen. U-waarden van ca. 2.5 W/m<sup>2</sup>/K en ca. 3.5 W/m<sup>2</sup>/K werden bijvoorbeeld gemeten voor enkelvoudige ruiten die achteraf werden voorzien van respectievelijk 3 mm en ca. 1.2 mm dikke SiCellA-lagen op ondersteunende substraten van 100 µm.

In bijlage 1 wordt een opsomming van de relevante eigenschappen getoond van de materialen die in voorgaande paragrafen zijn onderzocht.

N.b. van veel materialen zijn geen gegevens bekend over hemisferische transmissie en/of Hortiscatter en vaak zijn transmissiewaarden o.b.v. verschillende normen (bijv. EN410, ISO9005) bepaald en dit kan vergelijking tussen de materialen lastig maken.

## 3.2 Veilige materialen

### Chemisch gehard glas

De afgelopen jaren hebben CORNING® Inc., Asahi Glass Corporation (AGC) en SCHOTT AG chemisch gehard aluminiumsilicaatglas ontwikkeld (Gorilla glass®-serie van CORNING®, Dragontrail™ van AGC en Xensation-serie van SCHOTT AG) met een zeer hoge weerstand tegen breuk en krassen, voor toepassing als bescherm laag op touch screens van elektronische apparaten zoals smartphones en tablets. In alle toepassingen wordt de hoge oppervlakteweerstand (>900 Mpa voor de beste materialen), flexibiliteit (>700 MPa als buigspanning) en lage gewicht (glasdikte < 1 mm) bereikt door chemisch harden op basis van Na<sup>+</sup>. ↔ K<sup>+</sup> ionenuitwisseling [18].

Dun glas heeft bovendien een lager gewicht vergeleken met het traditionele siliciumdioxide glas. Voor Leoflex™-glas, met een dichtheid van 2.48 kg/m<sup>2</sup>/mm, geldt een gewicht van ca. 1.4 kg/m<sup>2</sup>, 2.1 kg/m<sup>2</sup>, 2.7 kg/m<sup>2</sup> en 3.2 kg/m<sup>2</sup> voor diktes van respectievelijk 0.55 mm, 0.85 mm, 1.1 mm en 1.3 mm. In vergelijking, het gewicht van 4 mm traditioneel tuinbouwglas is met 2.5 kg/m<sup>2</sup>/mm ongeveer 10 kg per m<sup>2</sup> ruit [7]. Lichtgewicht glas zou kassen mogelijk goedkoper en transparanter kunnen maken en maakt ook lichtgewicht meerlaags beglazing mogelijk.

Dun glas voor touch screens is doorgaans veel kleiner dan afmetingen die voor kasglas nodig zijn. In sommige toepassingen, zoals de autoruiten en bouwkundig glas wordt echter met grotere oppervlakken gewerkt. Bij het hybride Gorilla-glas voor autoruiten werd standaardglas (2.1 mm)/PVB-tussenlaag/standaardglas (2.1 mm) vervangen door standaardglas (2.1 mm)/PVB-tussenlaag/Gorillaglas (0/5 – 0/7 mm). Er werd een verhoogde schokbestendigheid, met name hagelbestendigheid, waargenomen, gekoppeld aan een gewichtsvermindering van 31 – 34% van het gelaagde glas, waardoor het gewicht van auto's met ruim 5 kg kon worden verminderd met verhoogde veiligheid ook een verminderd brandstofverbruik [39].

---

Corning heeft bouwkundig glas aangekondigd waarbij gebruik wordt gemaakt van chemisch gehard dun Gorilla-glas, verkrijgbaar als gelaagd dun glas (voor slagvaste en orkaanbestendige ramen die tot 45% minder wegen dan bestaande impactlaminaat) of als drievoudig glas met 0/5 mm dun glas in het midden geplaatst (voor betere isolatieprestaties, maar tot 25% lichter dan standaard driedubbele beglazing, d.w.z. vergelijkbaar gewicht als een raam met dubbele beglazing) [40]. Het dunne glas heeft 1/6 van de dikte en 1/3 van de thermische uitzetting vergeleken met standaardglas met een verwachte U-factor van 0.17 W/m<sup>2</sup>/K, zelfs zonder low-e coatings [41]. De grootste uitdaging bij het toepassen van dit glas in kassen is het grote oppervlak en daaraan gerelateerde de kosten.

AGC bracht rond 2012 de Leoflex-serie chemisch gehard dun glas uit voor speciale toepassingen zoals zonnepanelen, verlichting en gebouwen. In de onderzoeksprojecten uit paragraaf 3.1 zijn de optische en mechanische eigenschappen die relevant zijn voor kastoepassingen bestudeerd voor Leoflex-glas met een dikte variërend van 0.55 – 1.3 mm. Verwacht werd dat dit glas een vergelijkbare of hogere PAR-transmissie zouden vertonen dan standaard float glas vanwege de verminderde dikte. De gemeten hemisferische transmissies volgens NEN2675+C1 waren 84%, 75%, 69% en 64% voor respectievelijk enkel, dubbel laags, drielaags en vier laags ongecoat glas met een dikte van 0.5 mm. Door het glas te coaten met een meerlaags metaaloxide AR-coating aan beide zijden, zoals die ook op standaard float glas wordt toegepast, werd de hemisferische transmissie verhoogd tot respectievelijk 91%, 86%, 82% en 78%. De interferentie door de AR-coating is geoptimaliseerd voor een relatief smallere bandbreedte rondom PAR. In het NIR gebied heeft het glas een lage transmissie (hoge reflectie) wat een extra energie tijdens de koude maanden zou vragen, ondanks de hogere isolatiewaarde. Om hogere NIR transmissie te halen zouden eenvoudiger, enkellaags anti reflecterende coatings met een kwartgolf en lage brekingsindex kunnen worden gebruikt die meer breedbandige anti reflecterende eigenschappen hebben.

Om dun, chemisch gehard glas (hoog) diffuus te maken is een chemische etsbenadering nodig. Door de geringe dikte is er niet genoeg ruimte beschikbaar om structuren aan te brengen in dit type glas door bijvoorbeeld wals technieken.

Over het geheel genomen zijn voor de glastuinbouw de voordelen van chemisch gehard glas ten opzichte van thermisch gehard glas vooral het lage gewicht en daarmee de mogelijkheden voor meerlaags toepassing. Ook de hogere hardheid (bescherming tegen microscheuren) en buigsterkte spelen een rol, hoewel dit geen directe indicatoren zijn voor weerstand van chemisch gehard glas tegen hagel.

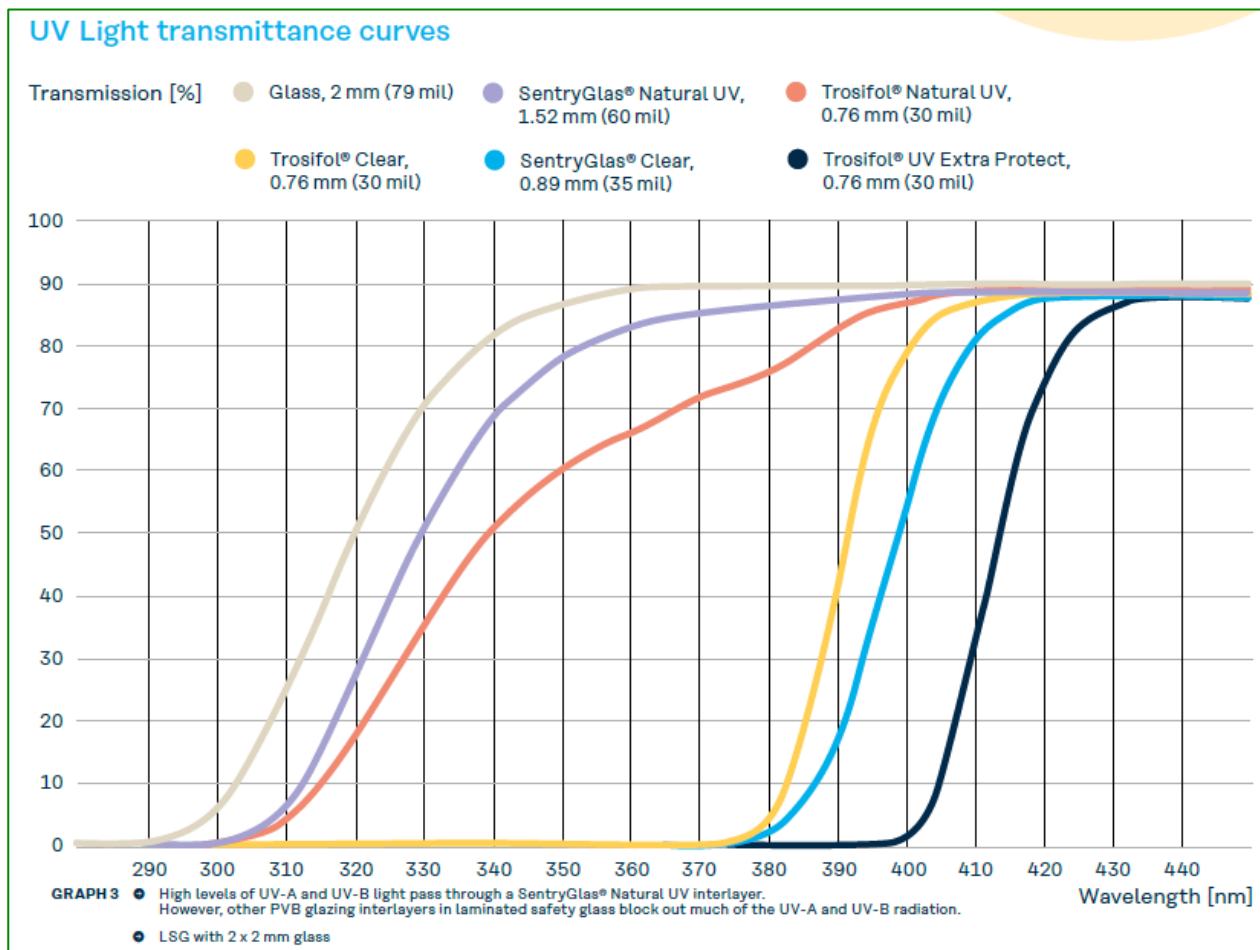
Naast de technische obstakels blijven de kosten en de mogelijkheid tot schaalvergroting de belangrijkste bottlenecks voor de glastuinbouw. Ook zijn er geen grote technische voordelen ten opzichte van het huidige standaard gehard glas. Bij zowel thermisch als chemisch gehard glas zal het glas fragmenteren in plaatst van in grote scherpe stukken breken, wat de veiligheid in de kas verbetert, maar het opruimen van glasschade van gehard glas kan nog steeds een grote uitdaging zijn. Een oplossing hiervoor zou gelaagd glas zijn, waarbij de gebroken stukken door het laminaat bij elkaar gehouden worden.

### **Gelamineerd glas**

Kuraray Glass Laminating Solutions produceert een verscheidenheid aan tussenlagen voor het lamineren van glas. Hun producten zijn grofweg in twee categorieën te verdelen: Trosifol® (op PVB gebaseerde tussenlagen) en SentryGlas® (ionoplast tussenlagen). Vergeleken met PVB-tussenlagen is de SentryGlas®-ionoplast-tussenlaag sterker, 100 keer stijver en presteert deze beter over een groter temperatuurbereik [42]. Voor toepassingen die hoge temperaturen boven de 30°C of een lange belasting duur vereisen, presteren ionoplast-tussenlagen het beste [43].

Binnen deze twee categorieën hebben de tussenlagen, afhankelijk van de gewenste eigenschappen, verschillende helderheid, lichttransmissie, treksterkte, stijfheid, Young- en afschuifmoduli en hechting van het glas aan het laminaat. Trosifol® Ultraclear Extra Stiff zijn voorbeelden van op PVB gebaseerde tussenlagen die respectievelijk zijn afgestemd op hoge lichttransmissie en stijfheid. Verschillende lagen kunnen worden gecombineerd om gecombineerde eigenschappen te realiseren, maar zullen de lichttransmissie verlagen naarmate de dikte van de tussenlaag toeneemt. Op basis van de beschikbare gegevens die beschikbaar [44] zijn is het niet mogelijk om conclusies te trekken over de schokbestendigheid, met name de hagelbestendigheid.

Voor zowel Trosifol®- als SentryGlas®-tussenlagen geldt dat een zekere mate van spectrale selectiviteit in het UV-bereik (~290 - 430 nm) mogelijk is door gebruik te maken van natuurlijke UV-tussenlagen (met hoge transmissie) of UV Extra Protect (die een groot deel van het UV-A- en UV-B tegenhoudt) (zie 0). Bij teelten waarbij (een teveel van) UV ongewenst is [45], zou het gebruik van de juiste tussenlaag hagelbescherming en veiligheid kunnen combineren met UV filtering.



**Figuur 4** UV transmission for the different interlayers – natural UV, clear, and Extra Protect.

Bij op PVB gebaseerde laminaten wordt ook gekeken naar de mogelijkheid om de thermische eigenschappen te ontwikkelen op basis van NIR-selectieve eigenschappen in glas [46]-[48]. Maar omdat een vaste NIR-filtering niet ideaal is voor kassen in koude regio's, zou met een low-e coating of spectrum up/down-conversie [49], die optimaal zou werken zonder de PAR-transmissie te verlagen, gelamineerd veiligheidsglas gecombineerd kunnen worden met andere voor de glastuinbouw belangrijke eigenschappen.

### Fineo

De Fineo vacuümbeglazing van AGC is ook verkrijgbaar met gelaagd veiligheidsglas aan beide zijden – voor dit glas neemt de totale glasdikte toe tot 14,6 mm door laminering en de zichtbare lichttransmissie (loodrecht) daalt van 80% naar 77%. standaard Fineo-beglazing. Vergeleken met de isolerende dubbele beglazing die in [32] voor kassen is onderzocht met 2 x 4 mm glas met een onderlinge afstand van 8 mm, is dit nog steeds een dunnere beglazing met een aanzienlijk lagere u-waarde dan de laagste u-waarde (2,37 W/m<sup>2</sup>- K) in dat onderzoek, met als bijkomend voordeel de veiligheid.

### LionGlas

Een recente ontwikkeling op het gebied van sterk glas is LionGlass dat ontwikkeld is door Penn State University. Dit glas is veel sterker dan standaard glas en de ecologische voetafdruk en de energiebehoefte van het productieproces zijn respectievelijk ca. 50% en ca. 30% lager.

---

Omdat LionGlass niet is gemaakt van koolstof houdende materialen komt er minder CO<sub>2</sub> vrij tijdens de productie. Vergeleken met een temperatuur van 2700°C voor standaard glas minder energie nodig door het lagere smeltpunt van ca. 300 – 400°C. De ontwikkelaars claimen dat LionGlass minstens 10 keer zo barst bestendig is als standaard glas. Barst weerstand is een indicator voor de slijtage op de lange termijn omdat microscheuren en krassen zwakke punten in glas veroorzaken, waardoor het uiteindelijk breekt. De verhoogde scheurweerstand van LionGlass geeft het potentieel om 10 keer lichter te zijn dan standaard glas, bij dezelfde sterkte [50]. Een marktintroductie kan nog lang duren aangezien de huidige status een patentaanvraag is. Over kosten is vooralsnog niets bekend.

In bijlage 2 zijn de eigenschappen (voor zover bekend) van alle onderzochte materialen opgenomen.

### 3.3 Adaptieve materialen

Het meest bekende adaptieve glas is elektrochrome glas, ook wel bekend als smart glas of schakelbaar glas. Dit is een type glas dat zijn transparantie, kleur of lichtdoorlatende eigenschappen kan veranderen wanneer er een spanning op wordt aangebracht. Dit glas maakt gebruik van elektrochromie, een fenomeen waarbij het glas zijn optische eigenschappen verandert als reactie op een elektrische lading. Het glas kan van transparant naar opaak gaan of de kleur veranderen wanneer er een elektrische spanning wordt toegepast.

Elektrochrom glas wordt vaak gebruikt in de architectuur, in automotieve toepassingen en verschillende slimme technologieën om de energie-efficiëntie te verbeteren, het comfort te verhogen en de privacy te verbeteren. Het kan handmatig worden bediend, via sensoren die reageren op veranderingen in licht of temperatuur, of via geautomatiseerde systemen om aanpassingen te maken op basis van vooraf ingestelde voorkeuren of omgevingsomstandigheden.

Technisch gezien bestaat elektrochrom glas meestal uit een transparante halfgeleider (wolfraamoxide of vanadiumoxide) die de anode of kathode is van een galvanische cel. Bij een bepaalde ladingstoestand neemt de elektronendichtheid toe tot een punt waarop de plasmafrequentie naar het zichtbare deel van het spectrum verschuift en zichtbaar licht begint te absorberen. Om deze reden worden ze ook wel plasmochrome vensters genoemd.

De kostprijs van elektrochrom glas is min of meer gekoppeld aan de prijs van flatscreen Tv's en ligt over het algemeen rond de 500 €/m<sup>2</sup> en zal naar verwachting niet zodanig goedkoper worden dat deze kan concurreren met (meerdere) schaduwschermen.

Voor zover bekend zijn de volgende adaptieve materialen commercieel verkrijgbaar.

#### **Sage Glas (Saint Gobain)**

Dit product verbruikt geen elektriciteit om de toestand te behouden, dus alleen tijdens het schakelen. Het schakelen gaat relatief langzaam, wat op zich geen nadeel hoeft te zijn als kasglas. Om in de buurt te komen van toepassing als kasdekmateriaal zullen allereerst de kosten drastisch lager moeten. Het doen van concessies aan de (esthetische) kwaliteit van het product zou de prijs kunnen drukken.

#### **PRIVA-LITE (Saint-Gobain)**

Dit product gebruikt continu stroom om één van de 2 staten (heldere of opaak) vast te houden. De hemisferische transmissie ligt tussen de 63-65% en het product is voornamelijk bedoeld voor indoor gebruik.

#### **HALIO (Kinestral Technologies, Inc)**

Dit product is een op polymeer gedispergeerd schakelbaar glas op basis van vloeibare kristallen en verbruikt geen elektriciteit om de toestand te behouden. De schakeltijd is relatief snel.

#### **Smart-folie**

Op webshops worden smart pdlc folies aangeboden voor a. 300 euro/m<sup>2</sup> voor binnenshuis toepassingen. Waarschijnlijk zijn deze folies niet geschikt voor buiten. De folie verbruikt continu stroom om de staat te behouden.

---

## **TUE**

Bij de TU Eindhoven wordt veel onderzoek gedaan waarbij technisch veel mogelijk is op (zeer) kleine oppervlakken van maximaal enkele cm<sup>2</sup>.

## **Eyrise**

Deze startup die ontstaan is vanuit een spin-off van de TUE en later is overgenomen door Merck. Zij maken elektrochrom glas voor toepassing als zonwering en privacy, zowel binnen- als buitenshuis.

## **Insolight**

De Zwitserse startup Insolight houdt zich bezig met concentrated photo voltaics op kassen en heeft een transparant concept ontwikkeld op basis van microlenzen en met solar tracking, dat als kasdek materiaal gebruikt kan worden.

## **Soliculture**

Het Amerikaanse bedrijf Soliculture heeft in 2012 het LUMO-zonnepaneel op de markt gebracht. Dit transparante paneel bevatten een lage dichtheid van silicium fotovoltaïsche (PV) strips die periodiek op een glaspaneel zijn gerangschikt, waardoor licht tussen de strips kan worden doorgelaten. Aan de achterkant van het glas is een dunne laag luminescerend materiaal geplakt, waardoor groen licht wordt omgezet in rood licht. Het paneel absorbeert meer fotonen in het groene spectrum dan dat dit omzet naar het rode spectrum, dus verlaagt in feite de PAR transmissie. Volgens Soliculture is dit geen probleem aangezien planten geen groen licht gebruiken.

## **UbiQD**

Het product van UbiQD is gebaseerd op quantum dot fluorescentie waarbij UV/blauw naar oranje wordt omgezet.

Eerder onderzoek van adaptieve materialen voor glastuinbouw gewassen is o.a. uitgevoerd binnen PPS Smart Materials [61] en [62].



---

## 4 Conclusies

Als alternatief van conventioneel tuinbouwglas in verschillende uitvoeringen, zoals diffuus, low-iron, low-e of AR coating, zijn voor de Nederlandse glastuinbouw een beperkt aantal "nieuwe" materialen verkrijgbaar. Deze kunnen qua kostprijs of effecten op gewas en/of energiegebruik concurreren met de bestaande materialen. Daarnaast wordt door producenten en andere partijen zoals universiteiten en onderzoeksinstituten voortdurend gewerkt aan nieuwe materialen die op de korte termijn ter beschikking komen of nog maar op lab schaal of in concept bestaan. Van alle materialen zijn zoveel mogelijk de eigenschappen, voor- en nadelen behandeld in het voorgaande hoofdstuk.

Ten opzichte van de relatief goedkope glassoorten die hedendaags gebruikt worden, zijn bij nieuwe materialen diverse eigenschappen belangrijk: o.a. de hoeveelheid licht beschikbaar voor het gewas, de diffusiteit van het licht voor een hogere gewasproductie, de isolatie van de kas voor een hoge energiebesparing, maar zeker ook de kostprijs voor de teler c.q. de ROI. Voor glasgroenten geldt de zogenaamde 1% vuistregel waarbij de oogstbare productie met 0.7-1% toeneemt met elke extra procent PAR op het gewas (Marcelis, 2006). Hiervoor is de hemisferische lichttransmissie van het kasdek belangrijk. Gelijktijdig heeft onderzoek laten zien dat bij gelijke lichttransmissie een hogere diffusiteit van het licht de gewasproductie verhoogt. In de praktijk is een gemiddelde toename van 6% vastgesteld [63]. Hiervoor is de Hortiscatter van het kasdek belangrijk. Economisch gezien betekent dit dat bij een productomzet van ca. 50-100 €/m<sup>2</sup> elke procent toename van lichttransmissie van het kasdek de omzet toeneemt met zo'n 0,35 – 1,00 €/m<sup>2</sup> per jaar of dat bij een diffuus kasdek en gelijke lichttransmissie de omzet toeneemt met zo'n 3 €/m<sup>2</sup> per jaar. Bij schaduwgewassen geldt dit verband in mindere mate. Met betrekking tot de kostprijs moeten nieuwe materialen ook concurreren met relatief goedkope alternatieven, namelijk energie- en schaduw-schermen en tijdelijke coatings.

Wat betreft thermische isolatie hebben verschillende concepten (VenLow, 2saveEnergy, BEST kas) zich qua energiebesparing bewezen, waarbij moet worden opgemerkt dat ook teelt- en klimaatmanagement hieraan hebben bijgedragen. Hoewel losse onderdelen langzaam de weg naar de praktijk vinden geldt dit niet voor het meerlaags-principe van deze kasdekken. Waar in de woningbouw geen problemen zijn heeft dubbel glas als toepassing in kassen voorsnog een probleem met lekkage, na loop van de tijd, veroorzaakt door vocht. Folies hadden last van vervuiling en alle hoog-isolerende materialen hebben het probleem met sneeuwval, zeker in koude gebieden waar isolatie het hards nodig is, wat voor de praktijk voorsnog een probleem blijkt. Maar gezien het toenemend belang van energiebesparing is het van groot belang om een alternatief te vinden voor het afsmelten van sneeuw zoals dat op dit moment gebeurt.

Low-e coatings worden inmiddels op kleine schaal beproefd maar hebben de weg naar de praktijk voorsnog niet gevonden. Bij stijgende energieprijzen is de terugverdientijd kort, aangezien low-e op enkel glas ca. 20% energiebesparing kan opleveren.

In de toekomst kan vacuümglas wellicht een perspectief bieden. De energetische prestaties zijn heel interessant met hele lage u-waardes. Hier worden dunne glazen gecombineerd in een dubbel glas toepassing. Door het additioneel aanbrengen van AR coatings is het aannemelijk aan te nemen dat de lichttransmissie verbeterd kan worden. Nader onderzoek door metingen is aan te bevelen. Op dit moment is de prijs van dergelijk glas te hoog voor de glastuinbouw. Indien de ontwikkelingen voor de bouwindustrie verder doorzetten is grootschalige productie echter mogelijk en is het denkbaar dat de tuinbouw hiervan ook zou kunnen profiteren. Het zou interessant zijn om berekeningen uit te voeren hoe hoog de energiebesparing zou kunnen zijn bij een dergelijk zeer energiebesparend materiaal om het maximaal haalbare potentieel vast te stellen. Ook een inschatting van de gevolgen voor gewasproductie zou daarin meegenomen moeten worden.

---

Gebruik van aerogels is door kwetsbaarheid alleen mogelijk tussen 2 lagen. Deze moeten dus meer als een lange-termijn oplossing worden gezien, om de isolatie van dubbel glassystemen extra te verhogen. De aerogels op zich kunnen hoog-transparant zijn, maar in combinatie met 2 of meer lagen wordt de totale transmissie naar verwachting niet hoger dan vergelijkbaar dubbel glas gevuld met lucht of Argon. Er zijn vooralsnog geen kasdekmaterialen met aerogels op de markt.

Dun gehard glas heeft in potentie een aantal voordelen voor de glastuinbouw. Het glas is sterker en lichter dan standaard glas waardoor lichtgewicht meerlaags beglazing mogelijk wordt. Sommige varianten van het glas hebben een hoge schokbestendigheid en hagelbestendigheid. Afgezien door een wat lagere absorptie door de dunnere laag heeft dun glas nauwelijks voordelen wat betreft lichttransmissie. De belangrijkste bottlenecks voor de glastuinbouw blijven op dit moment nog technische obstakels in de montage en beschikbare afmetingen van dergelijke glazen. Het mag echter verwacht worden dat indien de ontwikkelingen voor de bouwindustrie verder gevorderd zijn, hier ook nieuwe opties voor de glastuinbouw kunnen ontstaan.

Meer veilige kasdekken zijn mogelijk wel te realiseren met gelamineerd glas. Dit is een bewezen techniek in andere sectoren. Voor de glastuinbouw zijn variaties in UV doorlatendheid interessant. In combinatie met dunnen glazen kan het gewicht worden verlaagd. Er is echter nog weinig bekend over optische eigenschappen, metingen volgens eisen vanuit de glastuinbouw zijn aan te bevelen om het potentieel beter in te kunnen schatten.

Adaptieve materialen hebben op korte- en middellange termijn het nadeel dat de PAR transmissie meestal ver achter blijft ten opzichte van standaard glas, ook in volledig transparante toestand. Hierdoor komen dit soort producten teelt technisch gezien alleen in aanmerking voor (zwaar) geschermd schaduwplanten. Ook worden deze materialen vrijwel uitsluitend ontwikkeld voor nichemarkten en blijven door de hoge kostprijs naar verwachting voorlopig ver buiten bereik voor toepassing als kasdekmateriaal.

Technisch gezien zijn er allerlei mogelijkheden om de materiaaleigenschappen die voor een kasdekmateriaal in een koud klimaat belangrijk zijn te optimaliseren. De belangrijkste bottleneck hierbij is dat optimalisatie van één eigenschap vaak ook de andere eigenschappen beïnvloed. Een typisch voorbeeld hiervan is dat verhogen van de thermische isolatie vaak ten koste gaat van de lichttransmissie en om deze reden heeft transparante isolatie (TI) ook veel aandacht in de onderzoekswereld. Een andere bottleneck is dat onderzoek naar innovatief glas en toepassingen met glas zich veelal richt op gebouwen, de automotive industrie en elektronica waarbij de investeringsruimte gewoonlijk vele malen hoger ligt dan bij de glastuinbouw, zeker bij consumentenelektronica. Dit komt omdat het daar om hoogwaardige producten gaat waar het glas een (veel) kleinere fractie uitmaakt van de totale productkosten. Voor de glastuinbouwsector betekent het grote glasoppervlak dat men zelfs bij kleine verhogingen van de materiaalkosten extra alert moet zijn op de ROI. Daar komt bij dat nieuwe materialen vaak nog in beperkte afmetingen geproduceerd kunnen worden. Als opschaling alleen een grotere investering in productiefaciliteiten nodig is het een voordeel om mee te kunnen liften met andere industrie sectoren, maar soms is opschaling door b.v. materiaaleigenschappen of het technisch principe niet mogelijk.

Desondanks wordt de behoefte aan nieuwe kasdekmaterialen, vooral m.b.t thermische isolatie en mechanische sterkte, steeds sterker door de nodige transitie naar hogere energie-efficiëntie, duurzaamheid en onder extreme weersomstandigheden. Om deze reden zullen veelbelovende innovaties uit andere industrieën steeds opnieuw onderzocht moeten worden op hun bruikbaarheid voor de glastuinbouw.

---

# Literatuur

- [1] "Hail causes millions of euros in damage in the southern parts of the Netherlands. - (Re)Cover® BV." Accessed: Oct. 16, 2023. [Online]. Available: <https://www.recoverpools.com/en/hail-causes-millions-of-euros-in-damage-in-the-southern-parts-of-the-netherlands/>.
- [2] "Extensive damage for Dutch horticulture due to extreme weather conditions - Hortipoint." Accessed: Oct. 16, 2023. [Online]. Available: <https://www.hortipoint.nl/floribusiness/extensive-damage-for-dutch-horticulture-due-to-extreme-weather-conditions/>.
- [3] "Dutch growers struggling to repair hail damaged glass - Hort News." Accessed: Oct. 16, 2023. [Online]. Available: <https://hortnews.com/dutch-growers-struggling-repair-hail-damaged-glass/>.
- [4] "Dutch hail horror: a year later." Accessed: Oct. 16, 2023. [Online]. Available: <https://www.hortidaily.com/article/6035931/dutch-hail-horror-a-year-later/>.
- [5] van D. Putten and de H. Moel, "A hail climatology of the Netherlands," 2019.
- [6] E. Strobach, "Optically Transparent, Thermally Insulating and Soundproofing (OTTIS) Aerogel for High-Efficiency Window Applications," Massachusetts Institute of Technology, Boston, 2020.
- [7] S. Hemming et al., "Feasibility study thin glasses for greenhouse roof designs," 2018, doi: 10.18174/432087.
- [8] J. Fricke, E. Hümmer, H.-J. Morpher, and P. Scheuerpflug, "Thermal Properties of Silica Aerogels," *Le Journal de Physique Colloques*, vol. 24, no. C4, pp. C4-87-C4-97, Apr. 1989, doi: 10.1051/jphyscol:1989414.
- [9] C. Buratti, F. Merli, and E. Moretti, "Aerogel-based materials for building applications: Influence of granule size on thermal and acoustic performance," *Energy Build*, vol. 152, pp. 472–482, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.07.071.
- [10] A. Lamy-Mendes, A. D. R. Pontinha, P. Alves, P. Santos, and L. Durães, "Progress in silica aerogel-containing materials for buildings' thermal insulation," *Constr Build Mater*, vol. 286, p. 122815, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.122815.
- [11] J. Wang, D. Petit, and S. Ren, "Transparent thermal insulation silica aerogels," *Nanoscale Adv*, vol. 2, no. 12, pp. 5504–5515, 2020, doi: 10.1039/D0NA00655F.
- [12] E. Strobach, B. Bhatia, S. Yang, L. Zhao, and E. N. Wang, "High temperature annealing for structural optimization of silica aerogels in solar thermal applications," 2017, doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2017.02.009.
- [13] E. Abraham et al., "Highly transparent silanized cellulose aerogels for boosting energy efficiency of glazing in buildings," *Nature Energy* 2023 8:4, vol. 8, no. 4, pp. 381–396, Mar. 2023, doi: 10.1038/s41560-023-01226-7.
- [14] B. P. Jelle, "The Concept of Nano Insulation Materials—Challenges, Opportunities, and Experimental Investigations," in *Thermal Insulation and Radiation Control Technologies for Buildings*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2022, pp. 347–392. doi: 10.1007/978-3-030-98693-3\_12.
- [15] "The Properties of Glass eBook." Accessed: Oct. 16, 2023. [Online]. Available: <https://go.koppglass.com/properties-of-glass-ebook>.
- [16] D. Briassoulis,; D Waaijenberg,; J Gratraud, and; B Von Elsner, "Mechanical Properties of Covering Materials for Greenhouses Part 2 : Quality Assessment," *J. agric. Engng Res*, vol. 67, pp. 171–217, 1997.
- [17] D. Briassoulis, D. Waaijenberg, J. Gratraud, and B. Von Elsner, "Mechanical Properties of Covering Materials for Greenhouses : Part 1, General Overview," *J. agric. Engng Res*, vol. 67, pp. 81–96, 1997.
- [18] S. Berneschi, G. C. Righini, and S. Pelli, "Towards a Glass New World: The Role of Ion-Exchange in Modern Technology," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 10, p. 4610, May 2021, doi: 10.3390/app11104610.
- [19] J. Neugebauer and G. P. Kneringer, "Hail Resistance of Greenhouse Coverings," *Proceedings of Challenging Glass Conference*, vol. 8, 2022, Accessed: Oct. 16, 2023. [Online]. Available: <https://proceedings.challengingglass.com/index.php/cgc/article/view/454/371>.

- 
- [20] S. Chakraborty, A. K. Haldkar, and N. Manoj Kumar, "Analysis of the hail impacts on the performance of commercially available photovoltaic modules of varying front glass thickness," *Renew Energy*, vol. 203, pp. 345–356, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.RENENE.2022.12.061.
- [21] M. Kozłowski, K. Zemła, M. Kosmal, and O. Kopyłow, "Experimental and FE Study on Impact Strength of Toughened Glass–Retrospective Approach," *Materials* 2021, Vol. 14, Page 7658, vol. 14, no. 24, p. 7658, Dec. 2021, doi: 10.3390/MA14247658.
- [22] M. Zaccaria and M. Overend, "The mechanical performance of bi-treated glass," *Proceedings of the Challenging Glass Conference*, vol. 4, 2014, Accessed: Oct. 16, 2023. [Online]. Available: <https://www.gft.eng.cam.ac.uk/system/files/documents/zaccaria-the-mechanical-performance-of-bi-treated.pdf>.
- [23] F. Kempkes and J. Janse, "Praktijkervaringen met de Venlow energy kas 2010 - 2012 (GTB-1279)," 2013. Accessed: Oct. 16, 2023. [Online]. Available: <https://edepot.wur.nl/283586>.
- [24] F. Kempkes and J. Janse, "Cultivation and energy 2SaveEnergy greenhouse (GTB-1403)," 2016. Accessed: Oct. 17, 2023. [Online]. Available: <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/385097>.
- [25] F. Kempkes, J. Janse, M. Raaphorst, A. Boedijn, and E. van Os, "Proof-of-principle Noppenfolie-kas voor de teelt van framboos : Ontwikkeling van kas- en teeltconcept voor energie-extensieve gewassen," 2020. doi: 10.18174/528801.
- [26] K. Aberkani, "Study of the Effects of a Liquid Foam Technology Injected Between the Double Layer of Polyethylene of the Greenhouse on Light Transmission and Spectral Quality, Microclimate, Physiology of Tomato and Sweet Pepper Crops, and Energy Saving.," Université Laval, Quebec, 2009.
- [27] K. Stoknes, F. Scholwin, W. Krzesiński, E. Wojciechowska, and A. Jasińska, "Efficiency of a novel 'Food to waste to food' system including anaerobic digestion of food waste and cultivation of vegetables on digestate in a bubble-insulated greenhouse," *Waste Management*, vol. 56, pp. 466–476, Oct. 2016, doi: 10.1016/J.WASMAN.2016.06.027.
- [28] "Geysir : Energy-saving glass for cold climates." *agculture by AGC*. Accessed: Oct. 16, 2023. [Online]. Available: <https://www.agculture.eu/wp-content/uploads/2022/05/GeysirDigital.pdf>.
- [29] "Innovatief glas brengt warmtevraag met meer dan 20% terug - Vakblad Onder Glas." Accessed: Oct. 16, 2023. [Online]. Available: <https://www.onderglas.nl/innovatief-glas-brengt-warmtevraag-met-meer-dan-20-terug/>.
- [30] "New coating ensures high energy savings in greenhouse - WUR." Accessed: Oct. 16, 2023. [Online]. Available: <https://www.wur.nl/en/research-results/research-institutes/plant-research/greenhouse-horticulture/show-greenhouse/new-coating-ensures-high-energy-savings-in-greenhouse.htm>.
- [31] "Ultra Thin Double Glazing | FINEO by AGC." Accessed: Oct. 16, 2023. [Online]. Available: <https://www.fineoglass.eu/product/thin-double-glazing/>.
- [32] S. Hemming, F. L. K. Kempkes, and J. Janse, "NEW GREENHOUSE CONCEPT WITH HIGH INSULATING DOUBLE GLASS AND NEW CLIMATE CONTROL STRATEGIES - MODELLING AND FIRST RESULTS FROM A CUCUMBER EXPERIMENT," *Acta Horti*, no. 952, pp. 231–239, Jun. 2012, doi: 10.17660/ActaHortic.2012.952.28.
- [33] "AGC YourGlass Pocket (Brochure)." 2015. Accessed: Oct. 17, 2023. [Online]. Available: <https://www.agc-yourglass.com/en-UK/document-library>.
- [34] "Home | AeroShield." Accessed: Oct. 16, 2023. [Online]. Available: <https://www.aeroshield.tech/>.
- [35] E. Strobach, "Optically Transparent, Thermally Insulating and Soundproofing (OTTIS) Aerogel for High-Efficiency Window Applications," *Massachusetts Institute of Technology*, Boston, 2020.
- [36] L. Zhao et al., "Theoretical and experimental investigation of haze in transparent aerogels," *Opt Express*, vol. 27, no. 4, p. A39, Feb. 2019, doi: 10.1364/OE.27.000A39.
- [37] F. Kempkes and J. Janse, "Praktijkervaringen met de Venlow energy kas 2010 - 2012 (GTB-1279)," 2013. Accessed: Oct. 16, 2023. [Online]. Available: <https://edepot.wur.nl/283586>.
- [38] F. Kempkes, J. Janse, M. Raaphorst, A. Boedijn, and E. van Os, "Proof-of-principle Noppenfolie-kas voor de teelt van framboos : Ontwikkeling van kas- en teeltconcept voor energie-extensieve gewassen," 2020. doi: 10.18174/528801.
- [39] T. Leonhard, T. Cleary, M. Moore, S. Seyler, and W. K. Fisher, "Novel Lightweight Laminate Concept with Ultrathin Chemically Strengthened Glass for Automotive Windshields," *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems*, vol. 8, no. 1, pp. 2015-01-1376, Apr. 2015, doi: 10.4271/2015-01-1376.

- [40] "More energy-efficient windows to enhance our spaces | Architectural Technical Glass | Corning." Accessed: Oct. 16, 2023. [Online]. Available: <https://www.corning.com/worldwide/en/the-progress-report/crystal-clear/energy-efficient-windows-to-enhance-our-spaces>.
- [41] "Corning Debuts New Glass and Production Line for Thin Triples – DWM Magazine - DWM Magazine." Accessed: Oct. 16, 2023. [Online]. Available: <https://www.dwmmaq.com/corning-debuts-new-glass-and-production-line-for-thin-triples/>.
- [42] "SENTRYGLAS® IONOPLAST INTERLAYER TECHNICAL MANUAL FOR STRUCTURAL ENGINEERS FOREWORD FOREWORD WWW.SENTRYGLAS.COM".
- [43] "Next Generation Ionoplast for Improved Lamination | glassonweb.com." Accessed: Oct. 17, 2023. [Online]. Available: <https://www.glassonweb.com/article/next-generation-ionoplast-improved-lamination>.
- [44] "Kuraray Architectural Glazing Product portfolio." 2023. [Online]. Available: [www.aey.me](http://www.aey.me).
- [45] "View of UV Transmission in Laminated glass: Effects on Plant Growth and Development." Accessed: Oct. 17, 2023. [Online]. Available: <https://proceedings.challengingglass.com/index.php/cgc/article/view/455/372>.
- [46] G. Zhang, W. Yan, and T. Jiang, "Fabrication and thermal insulating properties of ATO/PVB nanocomposites for energy saving glass," *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, vol. 28, no. 5, pp. 912–915, Oct. 2013, doi: 10.1007/s11595-013-0792-4.
- [47] F. T. Chien, C. P. Hung, H. C. Chiu, T. K. Kang, C. H. Cheng, and Y. T. Tsai, "PVB/ATO Nanocomposites for Glass Coating Applications: Effects of Nanoparticles on the PVB Matrix," *Coatings* 2019, Vol. 9, Page 247, vol. 9, no. 4, p. 247, Apr. 2019, doi: 10.3390/COATINGS9040247.
- [48] J. Mater, C. Chem, C. Piwuan, J. Wootthikanokkhan, and C. Muangphat, "NIR shielding performance and spectral selectivity of PVB interlayer films loaded with composite fillers derived from CsWO<sub>3</sub> coupled with Au nanorods," *J Mater Chem C Mater*, 2023, doi: 10.1039/D3TC01705B.
- [49] K. Mishra, C. Stanghellini, and S. Hemming, "Technology and Materials for Passive Manipulation of the Solar Spectrum in Greenhouses," *Adv Sustain Syst*, vol. 7, no. 5, p. 2200503, May 2023, doi: 10.1002/ADSU.202200503.
- [50] "A new glass for the future: Taking LionGlass out of the lab and into the market | Penn State University." Accessed: Oct. 16, 2023. [Online]. Available: <https://www.psu.edu/news/research/story/new-glass-future-taking-lionglass-out-lab-and-market/>.
- [51] "Corning® Gorilla™ Glass," 2008, Accessed: Oct. 16, 2023. [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20140529230251/http://www.corning.com/docs//specialtymaterials//pisheets//PI2317.pdf>.
- [52] "Corning PI Sheet: Gorilla Glass for Automotive-Glazing." Accessed: Oct. 16, 2023. [Online]. Available: [https://www.corning.com/microsites/csm/gorillaglass/PI\\_Sheets/PI\\_Sheet\\_Automotive\\_Glazing.pdf](https://www.corning.com/microsites/csm/gorillaglass/PI_Sheets/PI_Sheet_Automotive_Glazing.pdf).
- [53] "AGC Dragontrail™ Chemically Strengthened Glass", Accessed: Oct. 16, 2023. [Online]. Available: <https://abrisatechnologies.com/media/AGC-Dragontrail.pdf>.
- [54] "SCHOTT Xensation™ Aluminosilicate Cover Glass." Accessed: Oct. 17, 2023. [Online]. Available: <https://abrisatechnologies.com/media/SCHOTT-Xensation.pdf#zoom=100>.
- [55] Marcelis, L.F.M.; Broekhuijsen, A.G.M.; Nijs, E.M.F.M.; Raaphorst, M.G.M. 2006. Quantification of the growth response of light quantity of greenhouse grown crops. *Acta Horticulturae* (2006), Volume: 711 - ISSN 0567-7572 - p. 97-103.
- [56] Marcelis, L.F.M.; Broekhuijsen, A.G.M.; Nijs, E.M.F.M.; Raaphorst, M.G.M. 2006. Quantification of the growth response of light quantity of greenhouse grown crops. *Acta Horticulturae* (2006), Volume: 711 - ISSN 0567-7572 - p. 97-103.
- [57] Swinkels, G.L.A.M.; Sonneveld, P.J.; Bot, G.P.A. Improvement of greenhouse insulation with restricted transmission loss through zigzag covering material, 2001. *Journal of Agricultural Engineering Research* 79 (2001)1. - ISSN 0021-8634 - p. 91 - 97.
- [58] Gieling, T.H., Van Ruijven, Jim, Swinkels, G.L.A.M., Schropp, R.E.I. 2013. Ultra-energiezuinige kassystemen met Supertransparante Micro-V Gestructureerde materialen. Rapportage in het kader van het EOS-LT programma van Agentschap NL.
- [59] Gilles H. Timmermans, Silke Hemming, Esteban Baeza, Evelien A. J. van Thoor, Albert P. H. J. Schenning,\* and Michael G. Debije\*, 2020. *Advanced Optical Materials for Sunlight Control in Greenhouses*. *Adv. Optical Mater.* 2020, 2000738.

- 
- [60] Baeza, Esteban, Hemming, Silke, Stanghellini, Cecilia, 2020. Materials with switchable radiometric properties: could they become the perfect greenhouse cover? *Biosystems Engineering*, (157–173), Elsevier Ltd, (2020).
- [61] García Victoria, N, Franken, G & Hemming, S 2020, Smart materials: crop experiment with electrochromic glass: first experiment with the potted plant Anthurium. Report / Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research, Business Unit Greenhouse Horticulture, no. WPR-912, Wageningen Plant Research, Bleiswijk. <https://doi.org/10.18174/563862>.
- [62] García Victoria, Nieves; Baeza, Esteban; Franken, Geert et al. / Cultivation of the potted plants Schefflera and Anthurium under electrochromic glass: Smart materials crop experiments. Bleiswijk: Wageningen Plant Research, 2021. 26 p. (Report / Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research, Business Unit Greenhouse Horticulture; WPR-973).
- [63] Kempkes, Frank; Brunsting, Martine; Franken, Geert et al. / Diffuus kasdek - maak het eens helder. Bleiswijk: Wageningen Plant Research, 2021. 46 p. (Rapport / Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research, Business unit Glastuinbouw; WPR-1085).

# Bijlage 1 Eigenschappen isolerende materialen

Traditional single-pane greenhouse glass	-	90%	82%	6.7
	Venlow greenhouse	88%	79%	1.2
Bubble film	BEST greenhouse		67.5	38% 3.3
	2Save greenhouse		76%	
	Feasibility study thin glasses			
Dynamic liquid foam greenhouse	BBBLS	82% w/o bubbles; 60% w. bubbles		0.9
Geysir	AGC	90%	83%	3.7
Fineo	AGC	80%		0.7
Clear Silica aerogel	Aeroshield	Gel: 98%		< 3-4 US\$/sqft
Cellulose-based aerogel		Gel: 97 - 99%		2.5 Estimated cost of SiCellA film ~US\$1 per square foot

1) Transmissie voor loodrecht invallend licht in het PAR bereik.

2) Hemisferische transmissie volgens NEN2675+C1.

## Bijlage 2 Eigenschappen mechanisch resistente materialen

Name	Type	Thick-ness (mm)	Compression strength (MPa)	Young's modulus (Gpa)	Poisson Ratio	Dicht-heid (g/cm3)	Vicker's Hardness	Flexural Strength (Mpa)	PAR trans-mis-sie <sup>1)</sup>	Overig
Sodalime glass [7]	Thermisch gehard	3.2 mm	80	70	0.2	2.5	527	40		
Leoflex glass [7]	Chemisch gehard	0.85 mm	260	74	0.23	2.48	673		91.7% Floodr; 84.1% Them	
Gorilla glass [51]	Chemisch gehard	0.7 – 2 mm	>800 MPa	73.3	0.21	2.42	701	~850		Sheet sizes available (as of 2008): 405 mm x 460 mm
Gorilla glass for automotive glazing [52]	Chemisch gehard Gorilla glass and thermisch gehard soda-lime glass gelami-neerd met PVB interlayer	2.1mm (SLG) /0.8mm (PVB)/ 0.5mm (Gorilla glass)	> 500	71.7	0.21	2.44				Sheet sizes: 1219.2 mm x 736.6mm standard; 1524mm x 736.6mm available
AGC Dragontrail [53]	Chemisch gehard	0.8 mm/ 1.1 mm	>600 MPa	74	0.23	2.48	673			
Schott Xensation [54]	Chemisch gehard	0.55 – 2 mm	> 900 Mpa	74	0.22	2.48	681	>800 MPa		Sheet sizes: 1150 x 950 mm & 475 x 575 mm

1) Volgens NEN2675+C1.





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](mailto:glastuinbouw@wur.nl)  
[wur.nl/glastuinbouw](http://wur.nl/glastuinbouw)

Rapport WPR-1368



---

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.

---