



Levensduur van kasdekmaterialen

Van veroudering tot duurzaamheid

Gert-Jan Swinkels, Silke Hemming, Vida Mohammadkhani en Bas Briaire

Rapport WPR-1053

Referaat

Dit rapport bevat de resultaten van onderzoek naar de veroudering van coatings op tuinbouwglas. Hiervoor zijn de diverse invloedfactoren op de veroudering bepaald en is een protocol ontwikkeld voor het bepalen van de levensduur van coatings. Voor de glastuinbouwsector heeft het project inzicht gegeven in de duurzaamheid van verschillende typen coatings op verschillende glastypes en de verschillende invloed factoren die hierin een rol spelen. De betrokken fabrikanten hebben inzicht gekregen in de veroudering van hun eigen (toekomstige) producten.

Abstract

This report covers the results of research into the aging of coatings on greenhouse glass. Various influencing factors on aging have been determined and a protocol has been developed for determining the durability of coatings. For the greenhouse horticulture sector, the project has provided insight into the durability of different types of coatings on different types of glass and the various influence factors that play a role in this. The manufacturers involved have gained insight into the ageing of their own (future) products.

Rapportgegevens

Rapport WPR-1053

Projectnummer: 3742233600

DOI: <https://doi.org/10.18174/546803>

Thema: Kasklimaat & Energie

Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van Stichting Hortivation en is mede tot stand gekomen door financiële steun van Stichting Hortivation en de Topsector Tuinbouw & Uitgangsmaterialen. Binnen de Topsector werken bedrijfsleven, kennisinstellingen en de overheid samen aan innovaties op het gebied van duurzame productie van gezond en veilig voedsel en de ontwikkeling van een gezonde, groene leefomgeving.

Disclaimer

© 2021 Wageningen, Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research, Business unit Glastuinbouw, Postbus 20, 2665 MV Bleiswijk T 0317 48 56 06, www.wur.nl/plant-research.

Kamer van Koophandel nr.: 09098104

BTW nr.: NL 8113.83.696.B07

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

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

Adresgegevens

Wageningen University & Research, BU Glastuinbouw

Postbus 20, 2665 ZG Bleiswijk

Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk

T +31 (0)317 48 56 06

Inhoud

	Samenvatting	5
1	Inleiding	7
2	Testmethodes	9
	2.1 Inleiding	9
	2.2 Standaarden	10
	2.3 Kunstmatige veroudering	11
	2.3.1 UV-resistentie	11
	2.3.2 Klimaatwisseling	12
	2.3.3 Chemische resistentie	14
	2.3.4 Mechanische resistentie	15
	2.3.5 Effecten van rubber-oplegging	18
	2.4 Natuurlijke veroudering	18
	2.5 Controlemetingen	19
3	Materiaalselectie	21
4	Testresultaten	23
	4.1 Inleiding	23
	4.2 Natuurlijke veroudering	23
	4.3 UV-resistentie	26
	4.4 Klimaatwisseling	27
	4.5 Chemische resistentie	29
	4.6 Mechanische resistentie	31
5	Analyse	33
	5.1 Inleiding	33
	5.2 Relatie met de Hemisferische transmissie	33
	5.3 Relatie met aantal gecoate zijden	34
	5.4 Relatie met diffusiteit	35
	5.5 Relatie met producent	36
	5.6 Relatie tussen natuurlijke en kunstmatige veroudering	38
	5.7 Naar een concept testprotocol	39
	5.7.1 Selectie van testen	39
	5.7.2 Vertaling naar teelt	40
6	Testprotocol	43
7	Conclusies	45
	Literatuur	47
	Bijlage 1 Analyse T_{hem}	49
	Bijlage 2 Analyse aantal coatings	51
	Bijlage 3 Analyse diffusiteit	53

Samenvatting

Het kasdek materiaal van tuinbouwkassen is een belangrijk onderdeel van het gewasproductiesysteem en de PAR-transmissie van het materiaal bepaalt direct de hoeveelheid natuurlijk (gratis) zonlicht en daarmee het bedrijfsresultaat. De transmissie van het materiaal en het behoud hiervan in de tijd beïnvloeden direct de productie, productiesnelheid, kwaliteit en veiligheid van het eindproduct. Sinds een aantal jaren zijn nieuwe typen glas op de markt, veelal gecoat en afkomstig uit andere sectoren zoals solar industrie of bouwsector. De glastuinbouwsector wordt geconfronteerd met glas waarover weinig bekend is over het behoud van transmissie na een aantal jaren veroudering door zonlicht, hoge of lage temperaturen, hoge luchtvochtigheid of dekwassen.

In dit project zijn diverse invloedfactoren op de veroudering van coatings op glas bepaald en is een concept protocol ontwikkeld voor het bepalen van de levensduur van coatings conform gebruik als kasdek materiaal in de glastuinbouw. Aan het begin van het project is een overzicht gemaakt van bestaande normen met betrekking tot veroudering van glas. Daarna is een selectie gemaakt op basis van relevantie met de glastuinbouw en zijn enkele testmethodes aangepast. Simultaan zijn een aantal representatieve commercieel verkrijgbare typen gecoat glas verzameld. Van elk van deze typen zijn verschillende monsters van hetzelfde type glas gebruikt, elk voor één van de geselecteerde testen. Testen op het gebied van kunstmatige veroudering zijn vervolgens uitgevoerd door TÜV Rheinland Nederland B.V. Een test voor natuurlijke veroudering is uitgevoerd door Wageningen Research. Om veroudering te kwantificeren is de Hemisferische transmissie volgens NEN 2675 gebruikt die voorafgaande en na de verschillende verouderingstesten gemeten is. Alle transmissiemetingen zijn uitgevoerd in het Lightlab van Wageningen Research.

Na het beschikbaar komen van de testresultaten is een analyse uitgevoerd naar de relatie tussen de veroudering en de verschillende materiaaleigenschappen zoals Hemisferische transmissie, diffusiteit en fabrikant. Daarna is een concept testprotocol opgesteld voor het testen van de veroudering van AR-gecoat glas.

Bij de analyse van de controlemetingen is rekening gehouden met de meeton nauwkeurigheid van de gebruikte apparatuur en het effect van de testen op ongecoat float glas. De test met natuurlijke veroudering laat een significant effect zien binnen een bandbreedte van -3% tot +3% verandering van de Hemisferische transmissie (ΔT_{hem}). Soms loopt de veroudering weer terug na een bepaalde tijd en stabiliseert uiteindelijk niet na 24 maanden. De kunstmatige UV-veroudering is significant en varieert tussen ca. -2.5% tot +0.5% ΔT_{hem} . Ook hier is de doorlooptijd van 3000 uur voor sommige monsters onvoldoende om te stabiliseren. Een mogelijke oorzaak voor het optreden van een kantelpunt in de veroudering is een gestaag afnemende laagdikte van de coating waardoor de AR-werking fluctueert. De klimaatwisseltest is in eerste instantie mislukt door optreden van glascorrosie. Een aangepaste test met alleen het dynamische deel liet een meestal een veroudering zien tot -0.5% en bij een enkel monster tot -3% ΔT_{hem} . Voor het testen van de chemische resistentie is "Standaard water" gebruikt, een gestandaardiseerde worst-case samenstelling van water dat mogelijk in contact komt met de binnenzijde van tuinbouwglass. De gemeten veroudering was beperkt en bleek onbetrouwbaar door een blijvend residu dat mogelijk van invloed is geweest op de T_{hem} . De mechanische resistentie is getest door het simuleren van frequent dekwassen van schone monsters en vooraf vervuilde monsters. Alleen bij vervuilde monsters is een beperkte veroudering gemeten waarbij echter niet kan worden uitgesloten dat deze (gedeeltelijk) veroorzaakt door een blijvend residu.

Op basis van de resultaten zijn zwakke tot matige verbanden aangetoond tussen de verschillende testen en de materiaaleigenschappen, geclassificeerd naar startwaarde van T_{hem} , aantal gecoate zijden, diffusiteit en producent. Ook is er een matig tot sterk verband aangetoond tussen natuurlijke veroudering en de kunstmatige veroudering door UV en klimaatwisseling.

Het concept testprotocol is opgesteld op basis van het gemeten potentiële effect op de T_{hem} en de praktische uitvoerbaarheid en bestaat uit kunstmatige UV-veroudering, veroudering door klimaatwisseling en borstelen van vervuilde glasmonsters.

Voor de sector heeft het project inzicht gegeven in de duurzaamheid van verschillende coatings op verschillende glastypes en de verschillende invloed factoren die hierin een rol spelen. Per saldo is de veroudering beperkt, met de kanttekening dat sommige invloeden langer doorwerken dan binnen de doorlooptijd vastgesteld is kunnen worden. De betrokken fabrikanten hebben inzicht gekregen in de veroudering van hun eigen producten. Zij kunnen het protocol en de resultaten gebruiken om nieuwe materialen te laten testen.

Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van Stichting Hortivation en is mede tot stand gekomen door financiële steun van Stichting Hortivation en de Topsector Tuinbouw & Uitgangsmaterialen. Binnen de Topsector werken bedrijfsleven, kennisinstellingen en de overheid samen aan innovaties op het gebied van duurzame productie van gezond en veilig voedsel en de ontwikkeling van een gezonde, groene leefomgeving.

1 Inleiding

Het kasdek materiaal van tuinbouwkassen is een belangrijk onderdeel van het gewasproductiesysteem. De optische eigenschappen van het materiaal bepalen direct de hoeveelheid natuurlijk (gratis) zonlicht dat voor de gewasproductie ter beschikking staat. Licht is een belangrijke groei- en productiefactor. De optische eigenschappen van het materiaal en het behoud hiervan in de tijd beïnvloeden direct de productie, productiesnelheid, kwaliteit en veiligheid van het eindproduct. Ze beïnvloeden hiermee de energie-efficiëntie omdat materialen met een hogere lichtdoorlatendheid ervoor zorgen dat er meer producten kunnen worden geteeld met minder input van energie anders dan zonlicht. Dit beïnvloedt direct de inkomsten en kosten voor een teler. De levensduur van kasdekmaterialen heeft invloed op de carbon footprint van een productiesysteem en het is daarom wenselijk veroudering van materialen te voorkomen. Hiermee wordt een bijdrage geleverd aan een duurzame voedselproductie in kassen.

Sinds een aantal jaren zijn nieuwe kasdekmaterialen op de markt. Dit betreft dan voornamelijk glas, veelal afkomstig uit andere sectoren zoals solar industrie of bouwsector. De glastuinbouwsector wordt geconfronteerd met materialen met nieuwe productie verhogende eigenschappen maar waarover weinig bekend is hoe deze zich na een aantal jaren gedragen op een kas en hoe duurzaam deze eigenlijk zijn. Nieuw tuinbouwglas is veelal voorzien van coatings (bijvoorbeeld anti-reflectie coatings) waarvan de levensduur bij toepassing in de glastuinbouw onder kascondities vaak onduidelijk is. In de tuinbouwsector heerst onzekerheid over de levensduur van deze nieuwe materialen en hierdoor wordt de investering vertraagd en belemmerd. Het probleem is dat deze coatings door suboptimale productontwikkeling, de extreme condities op een kas (UV, lage of hoge temperaturen, hoge luchtvochtigheid) of gebruik door de tuinders (dekwasser, chemische reiniging) kunnen verouderen. Dit gebeurt veelal in een middellange of langere tijdperiode. Er is op dit moment geen geschikte methode om de veroudering van coatings op glas dat in de glastuinbouw gebruikt wordt, alsmede de diverse invloedfactoren die hierbij een rol spelen, te bepalen.

Het doel van het project is het bepalen van de diverse invloedfactoren op de veroudering van coatings op glas en uiteindelijk het ontwikkelen van een methode voor het bepalen van de levensduur van deze coatings conform gebruik in de glastuinbouw. Er is onderzocht of deze methode in de toekomst ook voor het testen van de veroudering van andere in de glastuinbouw gebruikte materialen (schermen, folies) binnen in de kas kan worden toegepast.

Onderzoek naar een methode specifiek voor tuinbouwtoepassing is economisch belangrijk voor de gehele sector. Voor Nederlandse glasleveranciers kan dit hun concurrentiekracht verbeteren.

In de eerste fase van het project is een overzicht gemaakt van bestaande normen met betrekking tot veroudering van glas. Hieruit is een selectie gemaakt op basis van relevantie met tuinbouwglas en praktische uitvoerbaarheid (Hoofdstuk 2). Tegelijkertijd is door de projectpartners via hun leveranciers een serie representatieve typen gecoat glas geleverd (Hoofdstuk 3) waarna van elk glastype fysiek verschillende monsters gebruikt zijn voor de geselecteerde testen (Hoofdstuk 4). Vervolgens is een analyse uitgevoerd naar de relatie tussen de veroudering en de verschillende materiaaleigenschappen waaronder hemisferische transmissie, diffusiteit en fabrikant (Hoofdstuk 5). Ook is op basis van de uitgevoerde testen de relatie tussen kunstmatige en natuurlijke veroudering onderzocht. Als laatste is een concept testprotocol opgesteld voor het testen van de veroudering van AR-gecoat glas (Hoofdstuk 6) en zijn de conclusies geformuleerd (Hoofdstuk 7).

Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van Stichting Hortivation en is mede tot stand gekomen door financiële steun van Stichting Hortivation en de Topsector Tuinbouw & Uitgangsmaterialen. Binnen de Topsector werken bedrijfsleven, kennisinstellingen en de overheid samen aan innovaties op het gebied van duurzame productie van gezond en veilig voedsel en de ontwikkeling van een gezonde, groene leefomgeving.

2 Testmethodes

2.1 Inleiding

Veroudering van een materiaal is het veranderen van de eigenschappen van het materiaal in de tijd, meestal door warmte en/of licht. Om van materialen (producten) de veroudering te testen worden deze kunstmatig verouderd. Veroudering van materialen speelt een rol bij vele toepassingsgebieden waaronder de bouw, automotive, verf, textiel en solar. Om veroudering kwantitatief te kunnen bepalen bestaan reeds een aantal internationale normen, o.a.:

- ISO 4892-2 (plastics).
- ISO 3917:2016 (autoglas).
- ISO 12543-4 (bouwglas).
- ISO 16474-2 (verf).
- ISO 105-B04 (textiel).
- EN 1096 (Glass in building – Coated glass).
- IEC 61215 (solar).
- IEC 61646 (solar).
- IEC 60721-2-1 (PV, solar).

In deze normen zijn de procedures voor het testen van de kunstmatige veroudering van materialen voor de diverse toepassingsgebieden beschreven. Voor het ontwikkelen van een concept testprotocol specifiek voor tuinbouwglas verdient het de voorkeur om zoveel mogelijk gebruik te maken van of aan te sluiten bij bestaande normen. Deze zijn vaak tot stand gekomen op basis van wetenschappelijk onderzoek en in overeenstemming met stakeholders uit de praktijk, zowel op technisch als op andere gebieden. Ook is commerciële testapparatuur om een test volgens de norm uit te voeren vaak al beschikbaar. Een voorbeeld hiervan is de "wheatherometer", een instrument waarmee de veroudering van een materiaal onder invloed van licht, temperatuur en vocht volgens ISO 4892-2 gemeten kan worden.

Wat de glastuinbouw onderscheidt van andere toepassingsgebieden is de te meten grootte om de veroudering mee te kwantificeren. De belangrijkste is hier de lichttransmissie voor PAR¹. Waar in de meeste toepassingsgebieden uitgegaan wordt van (relatief) eenvoudig te bepalen grootheden voor het bepalen van de lichtdoorlaat, zoals de totale transmissie voor loodrecht invallend licht, wordt voor tuinbouwglas uitgegaan van de Hemisferische transmissie (T_{hem}) volgens NEN2675¹). In vergelijking tot veel transmissiemetingen uit andere normen is dit een complexe meting waarbij o.a. met betrekking tot afmetingen een relatief groot monster nodig is om de meting correct te kunnen uitvoeren. Volgens deze norm wordt de T_{hem} berekend uit een serie gemeten transmissiewaarden onder verschillende hoeken van inval, waarbij belichting van de zijkant van het monster te allen tijde voorkomen moet worden. Als gevolg moet het monster, afhankelijk van de gebruikte apparatuur, een bepaalde minimum afmeting moeten hebben die veelal groter is dan wat standaard meetapparatuur voor bestaande normen kan hanteren. Ook gaat het vaak om lichtverstrooiende (diffuse) en/of anisotrope² materialen zoals figuurglas met een relatief grove structuur. Bij dit soort materialen is het van belang dat het meetoppervlak (dat mede bepaald wordt door de diameter van de lichtbundel) groot genoeg is zodanig dat een bepaald representatief oppervlak gemeten wordt en/of in meerdere oriëntaties. Ook dit zorgt er voor dat de maximale afmetingen van monster s die op bestaande apparatuur gemeten kan worden vaak te beperkt is voor de NEN2675.

Daarnaast zijn de omschreven testmethodes niet toegespitst op en representatief voor tuinbouwcondities waarbij glas bloot staat aan o.a. hoge luchtvochtigheden, hoge stralingsniveaus en machinaal reinigen.

1 Photosynthetically active radiation, de golflengte van 400 tot 700 nanometer binnen het lichtspectrum, welke planten gebruiken voor de fotosynthese

2 Materiaal dat het doorgelaten licht verstrooit in richtingen die (gedeeltelijk) worden bepaald door de geometrie van het materiaal, waardoor de lichttransmissie en lichtverstrooiing afhankelijk zijn van de oriëntatie. Voorbeelden zijn figuurglas en schermweefsels.

In de volgende paragraaf is een overzicht gegeven van de beschikbare normen die in potentie gebruikt zouden kunnen worden voor een protocol voor kunstmatige veroudering van tuinbouwglas. In het hoofdstuk daarna is een selectie gemaakt en zijn eventuele specifieke aanpassingen beschreven.

Vervolgens zijn materialen getest volgens deze geselecteerde (aangepaste) testen, uitgevoerd door TÜV Rheinland Nederland B.V. (TÜV) op de locatie Westervoortsedijk 73, Arnhem, Netherlands. TÜV is door het Nederlandse Ministerie van Infrastructuur en Milieu aangemeld als Notified Laboratory and Notified (Factory Production Control) Certification Body (nummer 0336) voor de European Construction Products Regulation 305/2011 (EU). TÜV is door de Raad voor Accreditatie (RvA) geaccrediteerd als ISO 17025 Testlaboratorium (nr. L 484) en ISO 17065 Certificatie Instelling (nr. C078). De voor dit rapport uitgevoerde testen vallen niet onder de ISO 17025 accreditatie.

2.2 Standaarden

In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van de beschikbare normen op het gebied van veroudering en verwerking van glas. Deze lijst is opgesteld in samenwerking met TÜV. Het gaat hierbij om normen die bekend zijn en breed gedragen worden binnen de glasindustrie en binnen de accreditatie scope vallen van TÜV.

Gecoat glas

EN 1096, Glass in building – Coated glass.

Deze norm beschrijft de CE voorwaarden voor gecoat glas voor diverse toepassingsgebieden en bestaat uit 5 onderdelen:

- EN 1096-1:2012: Glass in building – Coated glass – Part 1: Definitions and classification.
- EN 1096-2:2012: Glass in building – Coated glass – Part 2: Test methods for durability of A, B and S coatings (condensation test, salt-spray test, SO₂ test and abrasion resistance test; spectrop hotometric measurements before and after the tests).
- EN 1096-3:2012: Glass in building – Coated glass – Part 3 Test methods for durability of C and D coatings (1000h UV radiation; spectrophotometric measurements before and after the tests).
- EN 1096-4:2004: Glass in building – Coated glass – Part 4: Factory production and evaluation of conformity (factory production control plans are described, together with the evaluation of conformity).
- EN 1096-5:2016: Glass in building – Coated glass – Part 5: Test method and classification for the self-cleaning performances of coated glass surfaces.

Isolatieglas

EN 1279-2:2018 (E), Glass in Building – Insulating Glass Units

Deze norm beslaat het toepassingsgebied van isolatieglas en bestaat uit 6 onderdelen:

- EN 1279-2:2018 (E), Glass in Building – Insulating Glass Units – Part 2: Long term test method and requirements for moisture penetration, European Committee for Standardization, July 2018.
- EN 1279-1:2004/C1:2006: Generalities, dimensional tolerances and rules for the system description.
- EN 1279-2:2002: Long term test method and requirements for moisture penetration.
- EN 1279-3:2002: Long term test method and requirements for gas leakage rate and for gas concentration tolerances.

Gelamineerd glas

EN-ISO 12543, Glass in building – Laminated Glass and Laminated Safety Glass (EN 14449 for FPC)³⁾

Deze norm beslaat het toepassingsgebied van gelamineerd en veiligheidsglas en bestaat uit 6 onderdelen.

- EN-ISO 12543-1:2011: Definitions and description of component parts.
- EN-ISO 12543-2:2011: Laminated safety glass.
- EN-ISO 12543-3:2011: Laminated glass.
- EN-ISO 12543-4:2011: Test methods for durability.
- EN-ISO 12543-5:2011: Dimensions and edge finishing.
- EN-ISO 12543-6:2011: Appearance.

In samenwerking met TÜV is uit bovenstaande normen een selectie gemaakt op basis van enerzijds de invloeden vanuit kasklimaat en weersomstandigheden waaraan tuinbouwglas bloot staat en anderzijds kosten, doorlooptijd en praktische uitvoerbaarheid.

Naast een beschrijving van de technische uitvoering van de kunstmatige veroudering wordt in beschikbare normen eveneens beschreven hoe het testresultaat gemeten en/of geïnterpreteerd moet worden. Zo wordt in EN-ISO 12543 de "luminous transmittance" gebruikt om de veroudering uit te kwantificeren, een grootte die meestal gerelateerd is aan de gevoeligheid van het menselijk oog. De lichtdoorlaat van tuinbouwglas is echter vooral van invloed op de gewasproductie. Fotosynthese is een kwantum proces en de chemische reacties die hierbij optreden zijn veel meer afhankelijk van het aantal fotonen dan de energie per foton. De transmissie van tuinbouwglas moet daarom gewogen worden naar fotondichtheid in het PAR golfengtegebied, zaken waarvoor de norm NEN2675 ontwikkeld is. De Hemisferische transmissie (T_{hem}) uit deze norm is daarom gebruikt als controlemeting bij alle testen in dit onderzoek. Uitgaande van een bepaalde T_{hem} van het nieuwe niet-verouderde materiaal is als testresultaat de verandering in T_{hem} ($\Delta(T_{hem})$) gehanteerd.

2.3 Kunstmatige veroudering

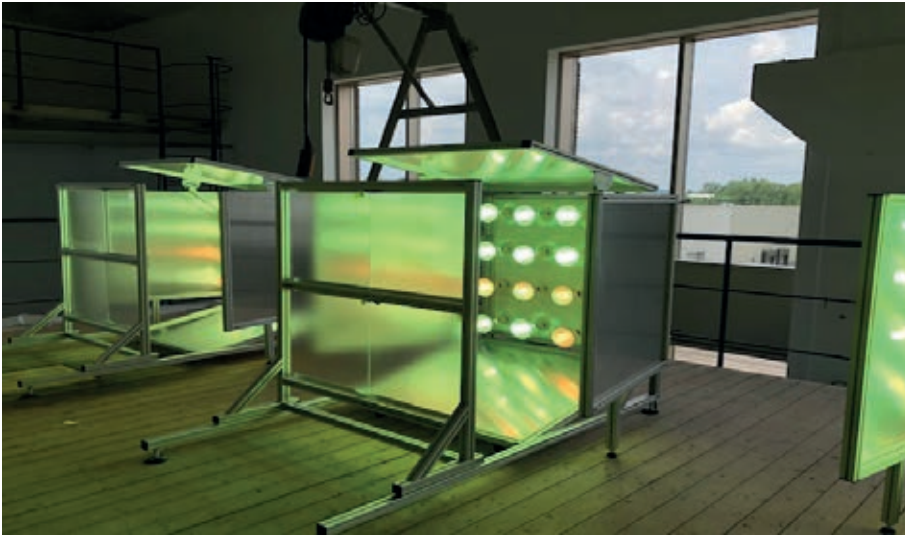
2.3.1 UV-resistentie

Tuinbouwglas staat minimaal 10 jaar bloot aan de zon waarbij de stabiliteit van een eventuele coating voor een bepaalde periode vaak gegarandeerd wordt door de leverancier van het glas. Zonlicht bestaat op zeeniveau uit straling tussen 300 en 2500 nanometer (nm). Het gedeelte tussen 300 en 400 nm bestaat uit ultraviolette straling (UV). Omdat de energiedichtheid afneemt is de UV-band de band met de hoogste energie. Binnen UV worden 2 banden onderscheiden: UV-B (300-315 nm) en het UV-A (315-400 nm). Traditioneel tuinbouwglas laat bijna geen UV-B straling door, alleen een groot gedeelte van de UV-A straling (vanaf 315 nm). Low iron glas laat daarentegen een groter deel van het UV door. UV is normaal gesproken geen probleem voor ongecoat glas maar kan daarentegen wel zorgen voor de degradatie van o.a. kunststoffen en coatings. Coatings aan de binnenzijde van het glas ontvangen dan, afhankelijk van de UV transmissie van het glas, minder UV dan aan de buitenzijde.

Voor het testen van de veroudering door UV is uitgegaan van de solar radiation uit de EN-ISO 12543 deel 4 7.3.1, met toepassingsgebied glas voor gebouwen: gelaagd glas en gelaagd veiligheidsglas³⁾. De duur van de test wordt van de voorgeschreven 2000 uur verhoogd naar 3000 uur wat resulteert in een doorlooptijd van ca. 4 maanden en wat vergelijkbaar is met ca. 5 jaar blootstelling aan zonlicht in Nederland. Het besluit om het aantal uren te verhogen is genomen om meerdere redenen. Zo wordt tegemoet gekomen aan de hogere blootstelling van tuinbouwglas ten opzichte van glas in gebouwen. Dit komt door de vrijwel horizontale positie van het glas, daar waar glas in gebouwen over het algemeen verticaal geplaatst is, waardoor de totale lichtsom op tuinbouwglas hoger is. Ook wordt tuinbouwglas nauwelijks beschaduwd in tegenstelling tot glas in gebouwen, vooral in gebieden met veel hoogbouw. Daarnaast wordt er een tussentijdse meting na 1500 uur uitgevoerd en kan op deze manier eventueel een verouderingscurve in de tijd worden bepaald. De temperatuur van de monsters wordt gedurende de test continu gemeten en moet volgens de norm binnen de waardes blijven van $45 \pm 5^\circ\text{C}$. Dit geldt ook voor de UV-A intensiteit, als deze lager wordt dan 50% van de startwaarde worden de lampen vervangen. De totale straling ter plekke van het monster wordt op $900 \pm 100\text{W/m}^2$ gehouden.

Uit de testresultaten zal bepaald worden of de verhoging naar 3000 uur gerechtvaardigd is of dat volstaan kan worden met de standaardduur van 2000 uur of zelfs nog minder. Als meetgrootte is niet de "luminous transmittance" uit de norm gebruikt maar de ΔT_{hem} . Deze is vooraf, halverwege de doorlooptijd en direct na afloop bepaald.

Figuur 1 toont de test volgens EN-ISO 12543 uitgevoerd door TÜV. De testopstelling bestaat uit een groot aantal UV-lampen op bepaalde afstand van de te testen monsters, waarbij o.a. brandduur en temperatuur continu gemonitord wordt. De resultaten van deze test worden beschreven in 4.2.



Figuur 1 Solar radiation test volgens EN-ISO 12543-4 uitgevoerd door TÜV.

2.3.2 Klimaatwisseling

Op het gebied van temperatuur en vocht wordt veroudering van coatings typisch veroorzaakt door extremen en snelle en/of frequente wisselingen tussen de extremen. Het binnenklimaat van tuinbouwkassen wordt door de klimaatcomputer zodanig geregeld dat altijd de optimale teeltomstandigheden worden gerealiseerd binnen de grenzen van wat mogelijk is op basis van buitenklimaat, verwarmings-, koel- en ontvochtigingsvermogen en ventilatiecapaciteit. Een volgroeid gewas heeft hierin een dempende werking op de luchttemperatuur waardoor deze, afhankelijk van het gewastype, normaal gesproken tussen de 15°C en 25°C wordt gerealiseerd. Tijdens de leegstand (teeltwisseling, bouw) kan de temperatuur echter dalen tot onder het vriespunt en oplopen tot zo'n 60°. De temperatuur van het kasdek wordt bepaald door de buitenluchttemperatuur, kasluchttemperatuur, condensatie, het gebruik van één of meerdere schermen en de bewolgingsgraad (uitstraling). Bij gesloten scherm(en) kunnen ook tijdens de teelt zeer lage dektemperaturen voorkomen omdat de temperatuur van het kascompartiment boven het scherm veel dichterbij de buitentemperatuur ligt. De frequentie van wisseling tussen extremen is gewoonlijk op etmaalbasis waarbij de lucht vanuit de aangehouden nachttemperatuur rond zonsopkomst verhoogd wordt naar de dagwaarde en rond zonsondergang weer verlaagd wordt. Overdag schommelt deze dan rond de ingestelde temperatuur en enkele graden erboven ten gevolge van instraling.

Naast de temperatuur wordt ook de luchtvochtigheid door de klimaatcomputer geregeld. Bij teveel vocht in de lucht wordt extra geventileerd of actief ontvochtigd, bij een te lage vochtigheid wordt, afhankelijk van het type gewas, is verneveling een optie. Voor de meeste gewassen wordt een relatieve luchtvochtigheid (RV) van tussen 85% en 90% aangehouden. Deze is gemiddeld wat hoger dan de luchtvochtigheid van buitenlucht (75-85%) en flink hoger dan de gemiddelde waarden in gebouwen (60-70%).

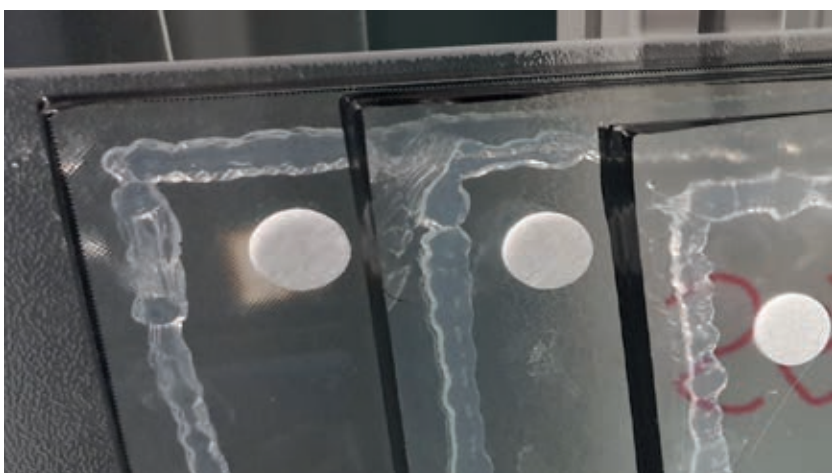
Voor het testen van de veroudering door klimaatwisseling is in eerste instantie uitgegaan van de EN 1279:2018²⁾. Deze test bestaat uit een 4-weekse dynamische fase van 56 temperatuurcycli van $-18 \pm 2^\circ\text{C}$ tot $+53 \pm 1^\circ\text{C}$ met veranderingen van plus of minus $14 \pm 4^\circ\text{C}/\text{uur}$ waarbij de relatieve luchtvochtigheid (RV) constant wordt gehouden op minimaal 95% gedurende fase met hoge temperatuur. Tijdens de fase met lage temperatuur wordt de RV niet geregeld. Condensatie op de monsters wordt toegestaan. Hierna wordt een fase van 7 weken ingezet waarbij een constant klimaat aangehouden wordt. Nadien is de 2018 versie geharmoniseerd waarbij veel wijzigingen zijn doorgevoerd maar de klimaatwisseltest is onveranderd gebleven.

Een bekend verschijnsel bij tuinbouwglas is corrosie⁵⁾: aantasting van het glasoppervlak door het langzaam weglekken van mobiele alkali-elementen en de gevolgen daarvan. Natrium speelt hierbij een dominante rol bij het veel voorkomende soda lime glas. In eerste instantie is dit depositie van deze alkali elementen op het glas nadat deze aan het oppervlak zijn gereageerd, bijvoorbeeld tot natriumcarbonaat of natriumhydroxide. In een vergevorderd stadium neemt de pH aan het oppervlak zo sterk toe dat ook het siliciumoxide-netwerk begint op te lossen. Het glas slaat meestal wit uit waarbij de lichttransmissie drastisch afneemt.

Corrosie is een vrij ongrijpbaar proces dat typisch ontstaat bij een verkeerde opslag van glas, meestal in combinatie met vocht tussen glaspanelen en veel direct zonlicht (Figuur 2). Ook bij testen volgens EN 1297 ziet TÜV met enige regelmaat corrosie optreden. Een aantal van de te testen monsters (zie Hoofdstuk 3) zijn enkelzijdig gecoat en juist ongecoat glas kan gevoelig zijn voor corrosie. Om er voor te zorgen dat het effect van de klimaatwisseltest op alleen de coating meetbaar is, is er voor gezorgd dat bij de enkelzijdig gecoate monsters de ongecoate zijde afgedekt is door telkens twee monsters met de ongecoate zijde aan elkaar te verbinden middels siliconenkit (Figuur 3).



Figuur 2 Voorbeeld van corrosie tijdens opslag van glas (niet het glas uit dit project)



Figuur 3 Enkelzijdig gecoate monsters zijn met de ongecoate zijde lucht- en vochtdicht aan elkaar bevestigd middels siliconenkit.

De klimaatwisseltest is in eerste instantie in zijn geheel uitgevoerd volgens EN 1279-2:2018. Hierbij is ernstige glascorrosie opgetreden bij het merendeel van de monsters waardoor controlemetingen niet zinvol waren en derhalve niet zijn uitgevoerd (zie 4.4). Er is geen sluitende oorzaak van de corrosie gevonden maar reacties van en/of met de gebruikte siliconenkit is de meest aannemelijke. Besloten is om de test te herhalen met alleen de eerste fase van de test is (temperatuurcycli). Om het risico op corrosie te minimaliseren zijn bij deze test de enkelzijdig gecoate monsters niet aan elkaar bevestigd.

De resultaten van deze test zijn beschreven in 4.4.

2.3.3 Chemische resistentie

Na montage in het kasdek komt tuinbouwglas in aanraking met verschillende stoffen:

- Neerslag (incl. stoffen uit de lucht).
- Vervuiling (vogelpoep, stof, industriële neerslag, organisch, minerale).
- Zout (bij ligging direct aan de kust).
- Gewasbestrijdingsmiddelen (afhankelijk van het type gewas).
- Nutriënten en sporenelementen (voedingswater).
- Glasreinigingsmiddelen.

Voor het testen van de chemische resistentie van gecoat glas is de bruikbaarheid van EN 1096⁴⁾ onderzocht. Gebleken is dat de testen en chemische middelen volgens deze norm niet representatief zijn voor de stoffen en condities waaraan tuinbouwglas bloot staat. Ook sluit de manier van aanbrengen zoals beschreven in EN 1096 sluit niet aan bij hoe chemische stoffen in de praktijk in aanraking komen met tuinbouwglas. Om deze redenen is besloten een nieuwe test te ontwikkelen op basis van een bestaande mix van chemicaliën die eerder ontwikkeld is voor de toetsing van zuiveringstechnologieën voor de glastuinbouw⁶⁾. Deze mix, het "Standaard Water", dient als standaard voor lozingswater uit zowel substraat- als grondgebonden teelten en bevat nutriënten en sporenelementen, organische en minerale vervuiling en gewasbeschermingsmiddelen. Dit zorgt voor een realistische worst-case samenstelling van het water dat mogelijk in contact komt met de binnenzijde van het glas. Het Standaard Water is gestandaardiseerd, makkelijk te produceren, veilig en wordt iedere 5 jaar herzien.

Daarnaast worden door telers nog glasreinigingsmiddelen gebruikt bestaande uit typische stoffen zoals waterstofperoxide, natriumhypochloriet, waterstofbifluoride en cloordioxide. Hoewel verwacht wordt dat reinigingsmiddelen aan coatings in potentie (aanzienlijk) meer schade kunnen toebrengen dan het Standaard Water is besloten om reinigingsmiddelen niet mee te nemen in dit onderzoek om de volgende redenen:

- Bij het mengen van reinigingsmiddelen kunnen mogelijk (heftige) chemische reacties ontstaan waardoor één standaardmengsel van alle relevante middelen niet mogelijk is daarom meerdere testen met verschillende mengsels nodig zouden zijn.
- Het is bekend dat bepaalde (fluorhoudende) reinigingsmiddelen coatings sterk kunnen aantasten. Dit zou betekenen dat per type coating onderzocht moet worden welke middelen toegestaan zijn en welke niet. Bij het gebruik van de norm in de praktijk zal door de producent of leverancier van het betreffende glas vooraf moeten worden aangegeven dat bepaalde middelen niet gebruikt mogen worden. Dit maakt het in principe onmogelijk om een standaard testmethode te ontwikkelen die geschikt is voor alle coating types.
- Eind 2020 is een project gestart waarin specifiek gekeken wordt naar reinigingsmiddelen voor AR-gecoat glas³

Na levering van het Standaard Water aan TUV is geëxperimenteerd hoe dit aan te brengen op het glas. Gewasbestrijdingsmiddelen worden normaal gesproken gespoten, d.w.z. onder druk verneveld waardoor de nevel op de bladeren gespoten wordt ofwel neerdaalt door de zwaartekracht. Voedingswater komt daarentegen normaal gesproken niet in contact met het glas. Besloten is om de realiteit zoveel mogelijk na te bootsten en een protocol te hanteren van besproeien, laten inwerken en passief laten drogen. Van de enkelzijdig gecoate monsters is alleen de gecoate zijde behandeld.

De resultaten van deze test zijn beschreven in par. 4.5

3 Het project "Veilig schoonmaken van AR glas" (BO-53-004-043) wordt uitgevoerd door Wageningen University & Research, business unit Glastuinbouw en is gefinancierd vanuit het programma Kas als Energiebron, het innovatie- en actieprogramma voor energiebesparing en verduurzaming in de glastuinbouw van het Ministerie van LNV en Stichting Kijk in samenwerking met Glastuinbouw Nederland. In dit project wordt onderzocht met welke middelen AR-gecoat tuinbouwglas veilig en effectief gereinigd kan worden ten behoeve van informatievoorziening aan de sector.



Figuur 4 Door Wageningen Research business unit Glastuinbouw locatie Bleiswijk is Standaard Water aangemaakt en in jerrycans aangeleverd bij TÜV die de test heeft uitgevoerd.

2.3.4 Mechanische resistentie

Voor de Nederlandse glastuinbouw is een blijvend hoge lichttransmissie van het kasdek van groot belang. Om vervuiling van glas en daarmee een afname in transmissie te voorkomen wordt het kasdek gemiddeld 2 tot 3 keer per jaar mechanisch gereinigd aan de buitenzijde. Dit gebeurt in de regel met (gedeeltelijk) geautomatiseerde dekwassers waarbij middels borstels en schoon water het dek gereinigd wordt en waarbij mechanische slijtage kan optreden. Tijdens de teeltwisseling wordt het glas aan de binnenzijde van de kas onder hogedruk gereinigd met water veelal in combinatie met reinigingsmiddelen. Om de redenen beschreven in de voorgaande paragraaf is mechanische veroudering door water op hoge druk niet meegenomen in dit onderzoek.

Voor het testen mechanische resistentie van tuinbouwglas ligt de abrasie test uit de EN 1096-2:2012⁴⁾ voor de hand. Deze norm test de weerstand van gecoate materialen tegen krassen, slijtage en kleurverlies door schuren van het materiaal met een viltkussen. De test bestaat uit een viltkussen met een dichtheid van $0,52 \pm 0,052$ g/cm², dikte van 10 ± 1 mm en diameter van $14,5 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$, dat met een frequentie van 60 ± 6 keer per minuut/min op en neer over het monster beweegt, met slaglengte van 120 ± 5 mm. Het behandelde oppervlak is dan maximaal 125×15 mm.

Om een aantal redenen ligt het gebruik van deze norm voor tuinbouwglas niet voor de hand:

- Bij (diffuus) structuurglas schrijft de NEN2675 voor dat minimaal 10 keer de maximale structuurafmeting gemeten moet worden voor T_{hem} . Bij bepaald figuurglas kan de structuurgrootte wel 20-30 mm bedragen. Een dergelijk monster moet dan meerdere keren behandeld worden om voldoende meetoppervlak te creëren.
- Een viltkussen is niet representatief voor een dekwasser waarbij kunststof borstels gebruikt worden.
- De behandeling met het viltkussen is droog terwijl bij een dekwasser water en vervuiling een rol spelen.

Hierom is besloten om niet de bestaande norm te gebruiken maar een nieuwe meetopstelling te ontwikkelen die de werking van een dekwasser nabootst. Aandachtspunten bij het ontwerp en de uitvoer van de test zijn o.a. het type machine en de slijtage van de borstel. Nieuwe borstels hebben scherpe haren die naar verwachting meer schade veroorzaken aan de coating dan gebruikte borstels. De frequentie van vervangen van borstels loopt erg uiteen en nadere details hierover ontbreken. Qua types zijn er machines met één borstel per ruit met draai-as in de richting van de roeden en machines met meerdere kleinere borstels met draai-as haaks op de ruit of een combinatie hiervan.



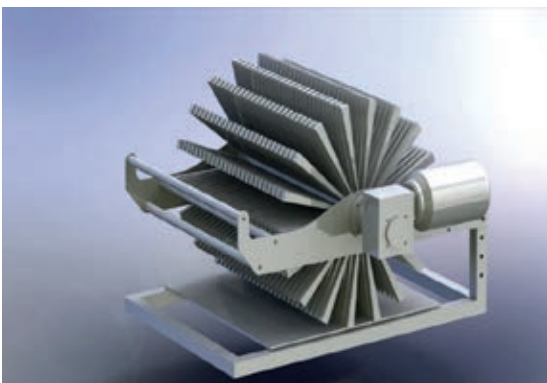
Figuur 5 Verschillende typen dekwassers. Bron van der Waay (links) en Besseling Techniek (rechts).

In overleg met Van der Waay⁴ is een simulator ontwikkeld bestaande uit een borstel, liggend in een kunststof bak waarin glasmonsters geplaatst kunnen worden (Figuur 6). Het contactoppervlak van de borstel met het glas, evenals het toerental van de borstel zijn instelbaar. De borstel is nieuw door Van der Waay geleverd en wordt ook in hun machines gebruikt. Voor de frequentie en ontwerplevensduur is uitgegaan van het TNO rapport over een test- en beoordelingsmethode voor draagkracht van gootprofielen⁵.

Op basis van bovenstaande gaat het beoogde testprotocol uit van de volgende aannames:

- Toerental 200 rpm.
- Rijsnelheid 250 mm/s.
- Contactoppervlak van 70 mm.
- 20 keer wassen per jaar.
- Ontwerplevensduur van 15 jaar.
- Nieuwe borstel.

Uitgaande van een heen-en-weer beweging per kap komt dit op $70/250 \times 20 \times 15 \times 2 = 168$ sec borstelen totaal, afgerond naar 3 minuten. Analoog aan de praktijk worden dubbelzijdig gecoate monsters enkelzijdig behandeld waarbij altijd de gecoate zijde behandeld wordt, ongeacht de uiteindelijke plaatsing in het dek. Ook wordt er in één richting geborsteld en is geen rekening gehouden met de eventuele oriëntatie van anisotroop⁵ glas in de simulator. Controlemetingen van anisotrope materialen zijn echter wel voor 2 oriëntaties uitgevoerd zoals voorgeschreven volgens NEN 2675.



Figuur 6 Ontwerp (links) en realisatie van de meetopstelling voor het testen van de mechanische resistentie, ofwel het effect van een dekwasser.

⁴ Van der Waay te Hazerswoude is marktleider in kasdekreinigers, krijtmachines en machines voor het repareren en onderhouden van kassen.

⁵ Materiaal dat het doorgelaten licht verstrooit in richtingen die (gedeeltelijk) bepaald worden door de geometrie van het materiaal waardoor de lichttransmissie en lichtverstrooiing afhankelijk zijn van de oriëntatie.

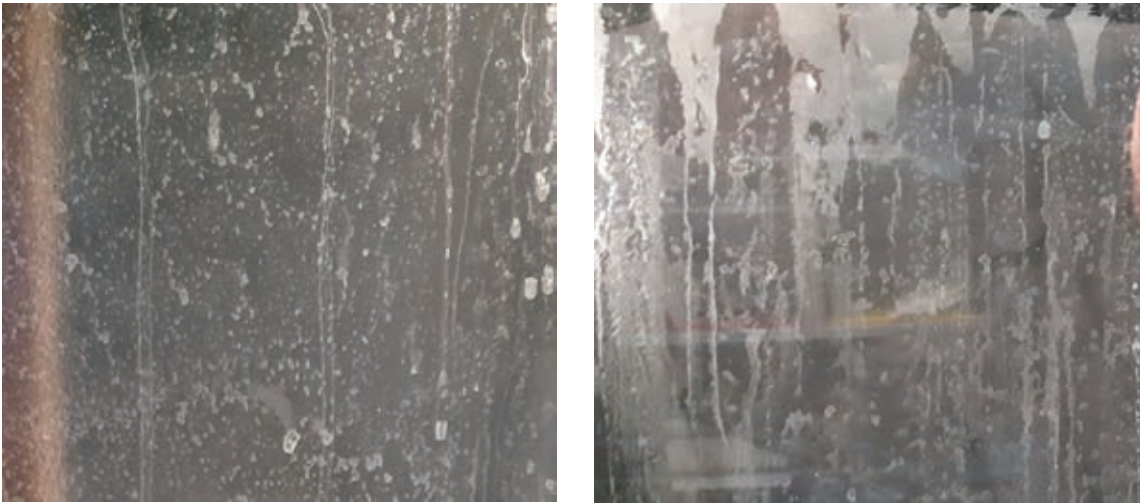
De test is in twee varianten uitgevoerd: met schone monsters en met vervuilde monsters. Hierbij is de aanname gedaan dat vervuiling een versterkende werking kan hebben op de mechanische slijtage van de coating. Voor het gestandaardiseerd vervuilen van glas is eerste instantie gekeken naar de EN 1096-5:2016. Deze norm beschrijft een methode om het zelfreinigend vermogen van coatings op glas te testen, gebruik makend van zonlicht, regen of een combinatie hiervan. Glasmonsters worden hierbij met een bespoten met een "dirt mixture" waarna natuurlijke veroudering plaats vindt door UV straling (simulatie van zonlicht) en water (simulatie van regen). Als testcriterium wordt de verandering in haze-waarde gemeten. De testprocedure levert geen informatie op over de duurzaamheid van het zelfreinigend vermogen.

Omdat het zelfreinigend vermogen van materialen buiten de scope van dit project valt is de EN 1096-5:2016 als zodanig niet geschikt. Om het vervuilen van monsters te standaardiseren kan echter wel de "dirt mixture" uit de norm gebruikt worden. Dit is een mengsel dat representatief staat voor vervuiling van glas aan de buitenlucht en kan in chemische labs geproduceerd worden. Na productie is het mengsel beperkt houdbaar en moet continu geroerd worden om segmentatie van de verschillende componenten te voorkomen. Om deze reden is de dirt mixture in de afzonderlijke componenten aangeleverd door TÜV waarna deze kort voor aanbrengen gemengd zijn door Wageningen University & Research (Figuur 7).



Figuur 7 Wegens de zeer beperkte houdbaarheid van de dirt mixture werden de componenten afzonderlijk aangeleverd (links) en kort voorafgaande aan de test gemengd (rechts).

Na het mengen van de verschillende componenten is de dirt mixture kort daarna met een drukspuit (handpomp, lage druk) op de verticaal staande monsters opgebracht. Bij eenzijdig gecoate monsters is de mix aangebracht op de gecoate zijde. De vervuilde monsters zijn eenzijdig gecoat en aan die zijde is ook geborsteld. Na het laten afdruipe van het mengsel gedurende 5 minuten zijn de monsters voorafgaande aan de meting een aantal dagen horizontaal opgeslagen om het residu te laten opdrogen. Het resultaat lijkt op het oog een goede weerspiegeling te zijn van vervuiling op glas in de praktijk (Figuur 8).



Figuur 8 Verschillend patroon in residu bij verschillend monster type na natuurlijke droging.

2.3.5 Effecten van rubber-oplegging

Wind kan enorme krachten uitoefenen op het kasdek. Deze worden opgevangen door de roeden en de verbinding tussen ruit en roede moet sterk genoeg zijn om deze krachten over te kunnen brengen. Hiervoor wordt het glas vierzijdig ingeklemd in de rubber sponning van de roeden. In het projectvoorstel is voorgesteld om het effect van de oplegging en inklemming van het glas op de coating te onderzoeken. Het contactoppervlak tussen glas en rubber is relatief klein en beperkt zich tot alleen enkele centimeters vanaf de rand van het glas. De T_{hem} volgens NEN2675 kan echter niet aan de rand gemeten worden en voor alle materialen geldt dat moet worden gemeten buiten de randzone van 5 cm. Daarnaast zal mogelijke aantasting door direct contact met de oplegging nauwelijks voor lichtverlies zorgen omdat het aangetaste deel vrijwel geheel in het aluminium profiel geklemd zit. Wat dan resteert is onderzoek naar mogelijke uitbreiding van aantasting vanuit de rand naar minimaal zo'n 15 cm uit de rand van de ruit maar dit lijkt erg onwaarschijnlijk en wordt in de praktijk ook niet waargenomen. Om deze redenen is besloten de effecten van rubber-oplegging niet verder te onderzoeken.

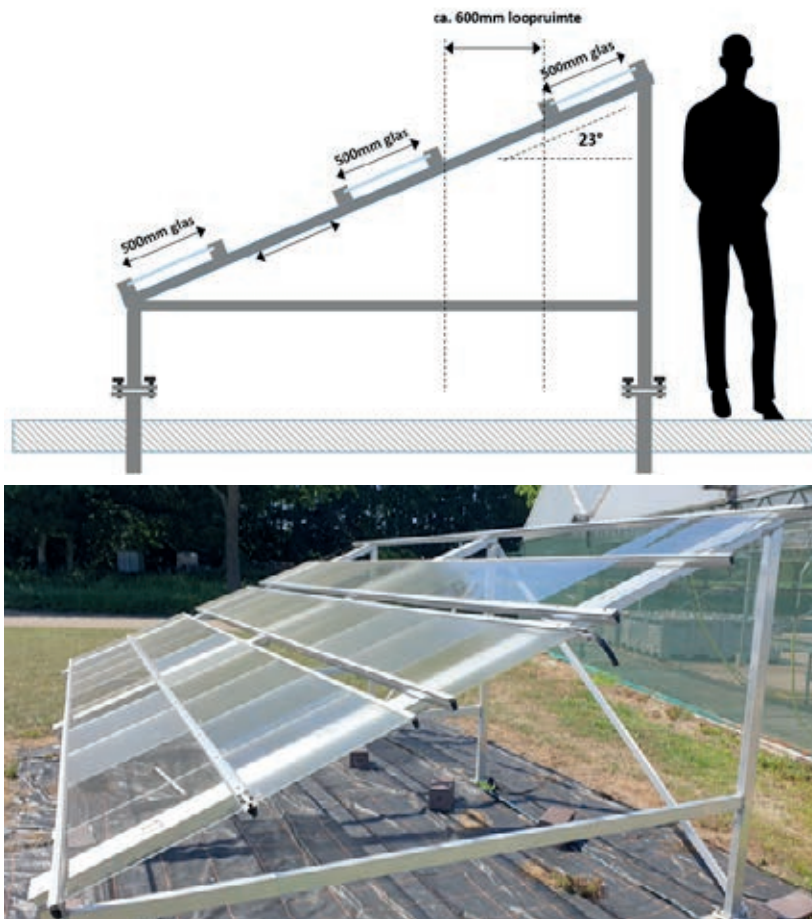
Het rek voor testen van de natuurlijke veroudering is gebouwd met kasprofielen en heeft een vergelijkbare rubber oplegging als in een praktijkkas. Het effect van de rubber oplegging wordt hier dus impliciet meegenomen en er zal op het oog beoordeeld worden of er zichtbare schade is ontstaan.

2.4 Natuurlijke veroudering

Een testprotocol moet praktisch uitvoerbaar zijn en binnen een acceptabele doorlooptijd en tegen acceptabele kosten een betrouwbaar resultaat opleveren. Om deze reden wordt bij de kunstmatige veroudering zoveel mogelijk een natuurlijke veroudering nagebootst. Om met name de kunstmatige veroudering ten gevolge van zonlicht, temperatuur en vocht te toetsten aan natuurlijke veroudering is een proef uitgevoerd in de buitenlucht. Glasmonsters zijn op een rek, vergelijkbaar met de situatie in een kasdek, langdurig aan de buitenlucht blootgesteld. Vooraf en daarna elke 6 maanden zijn de optische eigenschappen van de monsters bepaald. Na elke meting zijn de monsters weer teruggeplaatst in het rek. Het gaat hierbij om een langdurige test waarvan de performance tijdens de eerste twee jaren gerelateerd kan worden aan de resultaten van de kunstmatige veroudering. De proef is zodanig opgezet dat de materialen ook op lagere termijn (na het project) gemonitord kunnen worden en waarbij ook toekomstige nieuwe materialen bijgeplaatst kunnen worden.

De opzet van de natuurlijke veroudering is als volgt:

- 23° hellingshoek op het zuiden.
- Geen significante beschaduwing door gebouwen, bomen e.d.
- 2 monsters per glastype.
- Van enkelzijdig gecoate monsters 1 monster met de coating naar boven, de ander met de coating naar beneden.
- Minimaal 2 jaar blootstelling.
- Vooraf en elke 6 maanden controlemeting van T_{hem} .



Figuur 9 Testopstelling voor natuurlijke veroudering op de campus van Wageningen Research te Wageningen.

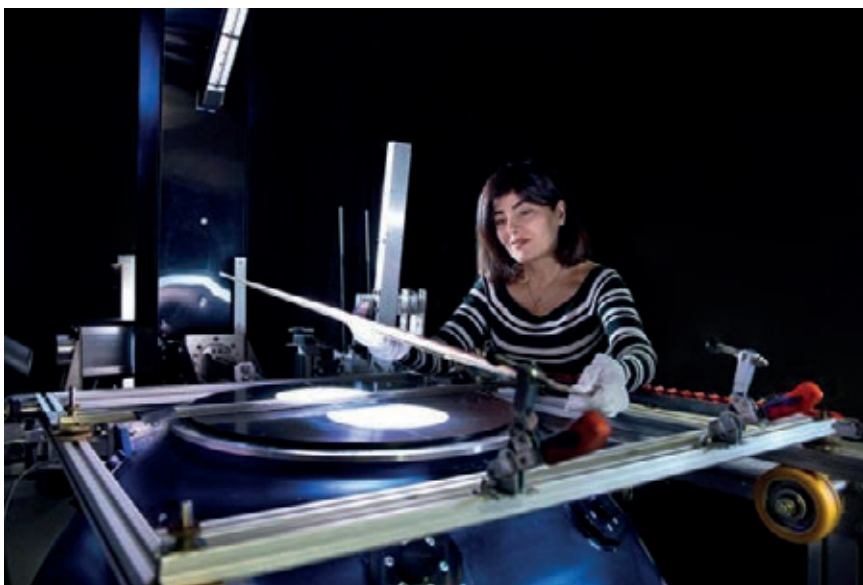
2.5 Controlemetingen

De hoeveelheid PAR die op plantniveau beschikbaar is in de kas is direct van invloed op de fotosynthese en daarmee groei en ontwikkeling van een gewas en de hoeveelheid en kwaliteit van de geoogste producten. Deze hoeveelheid daglicht wordt grotendeels bepaald door de lichttransmissie van kasdek- en schermmaterialen. Anders dan in andere sectoren wordt de lichttransmissie voor kasdekmaterialen en schermen niet gemeten voor loodrecht invallend licht maar voor hemisferisch invallend licht⁸⁾. Uit modelberekeningen en praktijkexperimenten is gebleken dat deze grootheid een goede indicator voor de optische prestaties van het glas voor tuinbouwtoepassing. Om deze meting te standaardiseren is in 2018 de bestaande norm NEN 2675 herzien waarbij het meten van de T_{hem} voor alle materialen anders dan onbehandeld, al dan niet thermisch gehard float glas, de loodrechte meting heeft vervangen¹⁾.

Om veroudering van coatings te kwantificeren is als controlemeting de T_{hem} volgens NEN2675 gebruikt. Dit betekent dat van alle materialen de T_{hem} voorafgaande aan de verschillende verouderingstesten en na de testen gemeten is. Bij enkel testen is gedurende de doorlooptijd van de test gemeten. Hierbij zijn de monsters elke keer schoongemaakt, tijdelijk opgeslagen en geconditioneerd volgens de norm. Bij de natuurlijke veroudering betekent dit dat vervuiling (voor zover verwijderd) niet meegenomen is in het resultaat. Alle controlemetingen zijn uitgevoerd in het Lightlab van Wageningen Research. Dit lab beschikt over de meetapparatuur om de T_{hem} te kunnen meten volgens NEN 2675. Het lab is wereldwijd een toonaangevend instituut op dit gebied. WUR Lightlab is ISO 17025 geaccrediteerd (no. L655) voor NEN 2675.

Controlemetingen zijn voor elk monster (160+ stuks) initieel uitgevoerd en daarnaast tijdens en na afloop van de verschillende testen:

- UV-bestendigheid: initieel, na 1500 uur, na 3000 uur.
- Klimaatwisseling: initieel en na afloop.
- Chemische resistentie: initieel en na afloop.
- Mechanische resistentie: initieel en na afloop.
- Natuurlijke veroudering: initieel, na 6 mnd., 12 mnd., 18 mnd. en 24 mnd.



Figuur 10 Meetapparatuur voor het meten van de T_{hem} volgens NEN 2675 in het lightlab van Wageningen Research.

3 Materiaalselectie

Het marktaanbod van tuinbouwglas bestaat uit een diversiteit van glastypen, van onbehandeld float glas naar meerszijdig gecoat diffuus glas. Om een representatieve selectie te verkrijgen is door de verschillende leden van het projectconsortium glas afgenomen van de eigen leverancier. In totaal zijn 21 verschillende typen glas verzameld waarbij een glastype gelijk staat aan de combinatie van producent en merknaam (Tabel 1). Om het meten van gestapelde effecten van verschillende testen te voorkomen zijn van elk glastype meerdere monsters geleverd waarbij elk monster enkel voor één test gebruikt is. In totaal zijn meer dan 160 monsters gemeten.

Tabel 1

Overzicht van de geteste monsters.

Diffuus klasse	Aantal varianten
Helder float ongecoat	2
Helder float AR	3
Low diffuse ongecoat	2
Low diffuse AR	5
Mid diffuse ongecoat	1
Mid diffuse AR	3
High diffuse ongecoat	1
High diffuse AR	4



AR-coatings verminderen de lichtreflectie bij de overgang van lucht naar glas en omgekeerd. Door de lagere reflectie bij de overgang glas-lucht dringt het licht efficiënter in het glas en door de overgang glas-lucht kan het licht beter uit het glas ontsnappen richting het gewas. Andersom zorgt een lagere reflectie er ook voor dat meer vanuit het gewas gereflecteerd licht kan ontsnappen. Een enkelzijdige coating kan de reflectie net 3-4% verlagen, dubbelzijdig gecoate monsters het dubbele. Terwijl AR-coatings de reflectie verlagen verhogen structuren of pigmenten juist de reflectie door het licht m.b.t. reflectie onder gemiddeld ongunstigere hoeken te verstrooien. AR-coatings worden bij diffuus glas daarom veelal gebruikt om het verlies aan transmissie ten opzichte van helder glas te beperken.

In dit rapport zijn alle monsters geanonimiseerd waardoor deze op basis van de naamgeving niet herleid kunnen worden naar merknaam.

De monsters zijn ingedeeld naar:

- Diffusiteit.
- Monster type.
- Aantal gecoate zijden.
- Coating type.

De indeling naar diffusiteit is gebeurd op basis van informatie van de producent of leverancier. De gebruikte categorieën zijn:

- FL (helder onbehandeld float glas).
- LH (laag diffuus, 0-30% Haze⁶).
- MH (middel diffuus, 30-60% haze).
- HH (hoog diffuus, >60% haze).

De gebruikte monster (sample) code is dan als volgt opgebouwd:

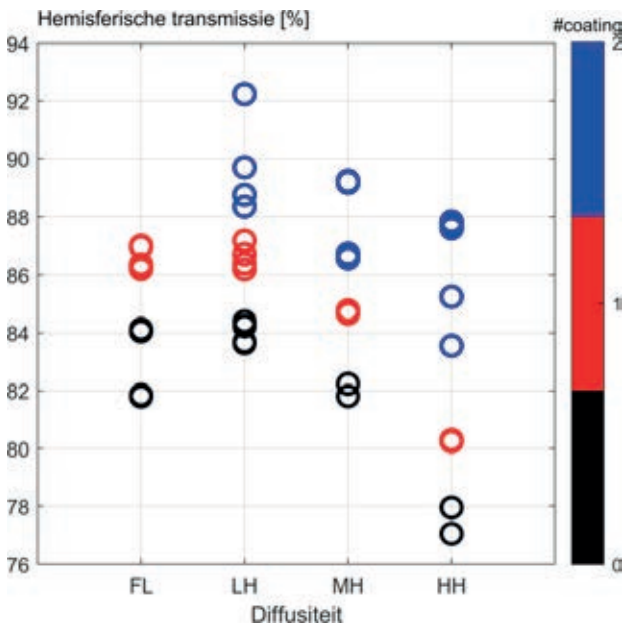
Diffusiteit**Samplettype****Coating#****Coatingtype****SampleNr**

⁶ Volgens ASTM D1003, sinds 2018 is als alternatief de Hortiscatter uit NEN2675 beschikbaar

B.v. MH323B is een middel diffuus monster van type 3 met dubbelzijdige coating van type 3 en het 2^e monster uit een serie van hetzelfde glastype/merknaam.

In onderstaande Figuur is van alle materialen de T_{hem} uitgezet tegen het aantal gecoate lagen en de diffusiteit. De Figuur geeft de verwachte effecten van coatings en diffusiteit weer, namelijk:

- Hoe hoger de diffusiteit, hoe lager de transmissie (bij hetzelfde aantal lagen coating).
- Hoe meer lagen coating hoe hoger T_{hem} (bij dezelfde diffusiteit).



Figuur 11 Aantal lagen coatings in relatie tot T_{hem} en diffusiteit.

4 Testresultaten

4.1 Inleiding

De behandelingen uit de verschillende testen zijn toegepast op het totaal van glas en coating. Het is in principe mogelijk dat de test ook de transmissie van ongecoat glas beïnvloed. Om het effect op de transmissie zoveel mogelijk te kunnen toeschrijven aan alleen de coating is bij het beoordelen van de effecten op de gecoate monsters rekening gehouden met de effecten op helder ongecoat glas.

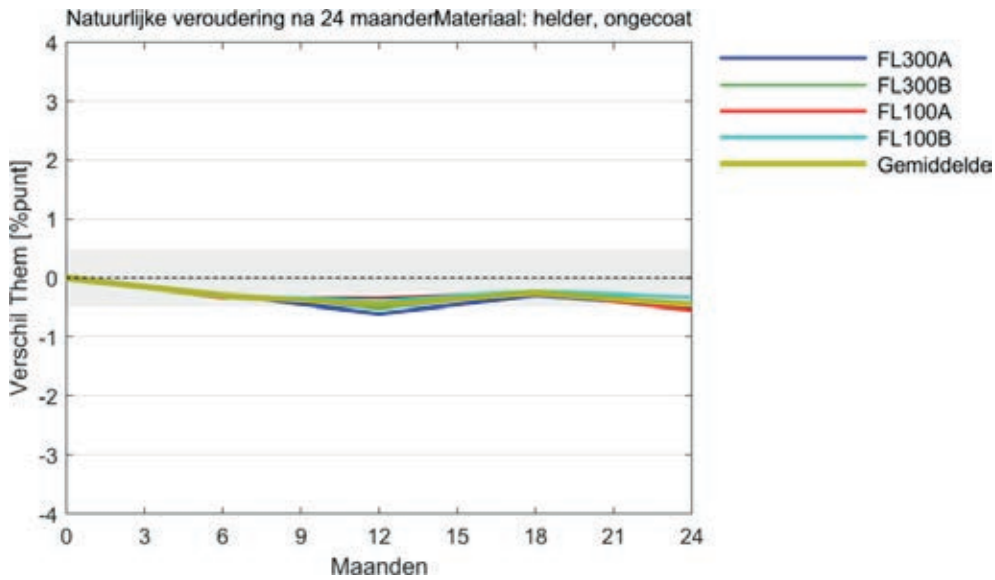
Daarnaast hanteert de NEN 2675 een meeton nauwkeurigheid van $\pm 1\%$. Dit zou betekenen dat het verschil tussen metingen van voor en na testen minimaal $\pm 2\%$ moet zijn om de verandering significant toe te kunnen schrijven aan de test. De gebruikte meetapparatuur voor het bepalen van de T_{hem} heeft echter een meeton nauwkeurigheid van ca. $\pm 0.20\%$ ⁹⁾ waardoor een bandbreedte van $\pm 0.5\%$ inclusief 0.1% marge gehanteerd kan worden als significant effect.

In de volgende paragrafen is een overzicht gegeven van de alle controlemetingen per test. Hierin worden de heldere ongecoate float glas met *ongecoate* aangeduid en de overige monsters met *gecoat*. Als testresultaat wordt de veranderingen in T_{hem} gebruikt, aangeduid met ΔT_{hem} en uitgedrukt in %punten. Dit wil zeggen dat het verschil berekend is als het verschil tussen twee T_{hem} -waarden in plaats van de verhouding ertussen.

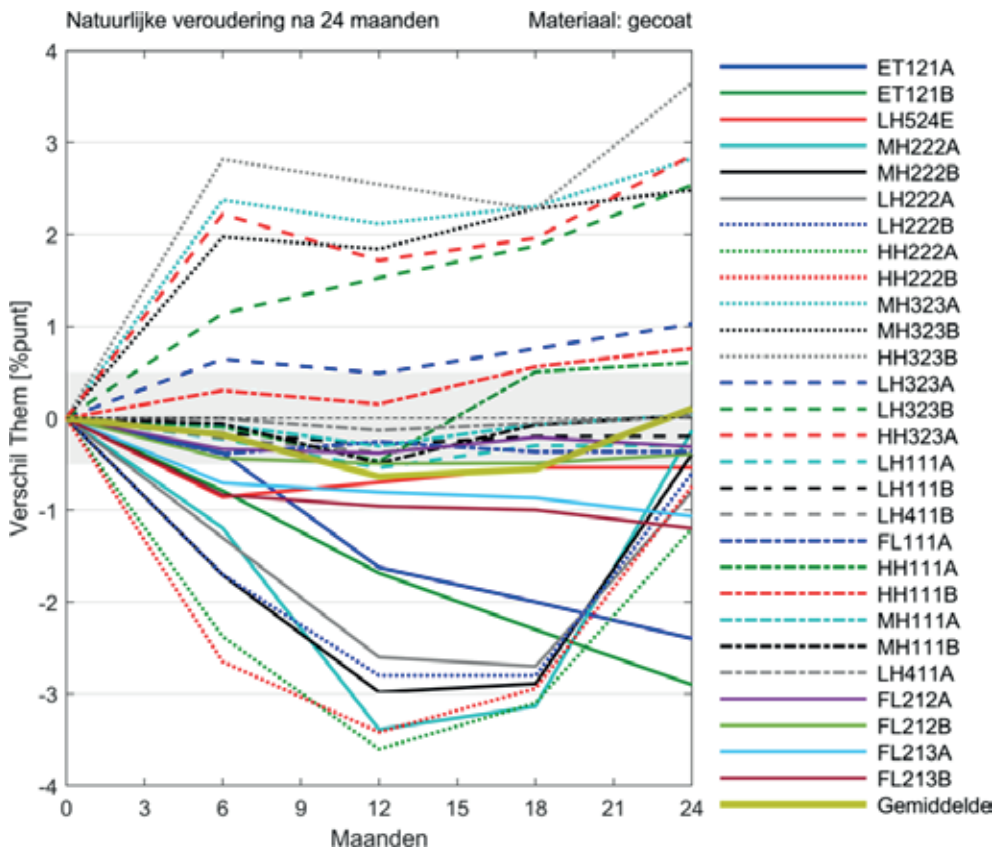
4.2 Natuurlijke veroudering

Deze rapportage is gebaseerd op metingen van monsters die allemaal 24 maanden in de buitenlucht getest zijn en vrijwel allemaal elke 6 maanden gemeten zijn. Bij de ongecoate monsters (Figuur 12) is een lichte nauwelijks significante trend te zien in ΔT_{hem} . De trend lijkt verband te houden met het seizoen en de grootste afname is gemeten in de winterperiode. Vast staat dat de veroudering van ongecoate monsters zeer beperkt tot niet significant is.

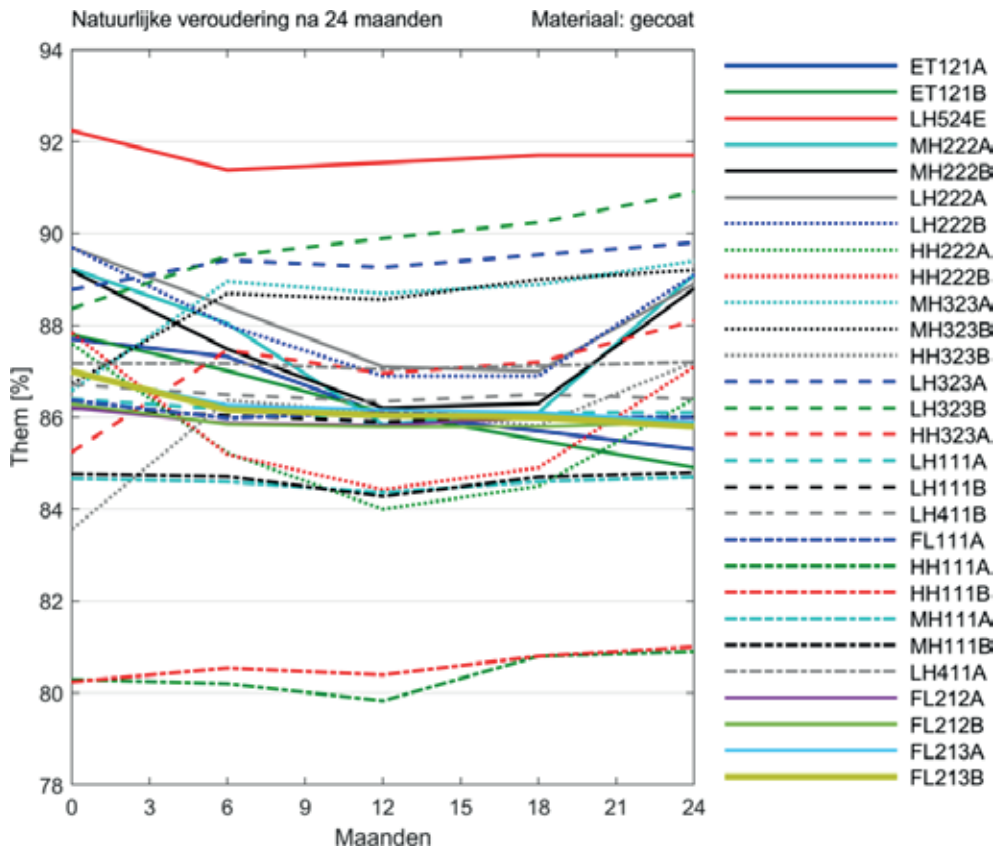
Een ruime meerderheid van de gecoate monsters laat een significant effect zien, rekening houdend met de meeton nauwkeurigheid (Figuur 13). De ΔT_{hem} loopt van -3% tot $+3\%$. Bij een aantal monsters neemt de transmissie het eerste jaar af tot een omslagpunt waarna deze na het tweede jaar weer zo goed als op de startwaarde terecht komt. Bij andere monsters blijft de transmissie steeds toenemen of afnemen. Bij het merendeel van de monsters stabiliseert de veroudering na 24 maanden niet wat maakt dat in dit geval een doorlooptijd van 24 maanden te kort is om een definitieve veroudering vast te stellen.



Figuur 12 Relatieve $\Delta Them$ van de ongecoate monsters ten gevolge van natuurlijke veroudering.



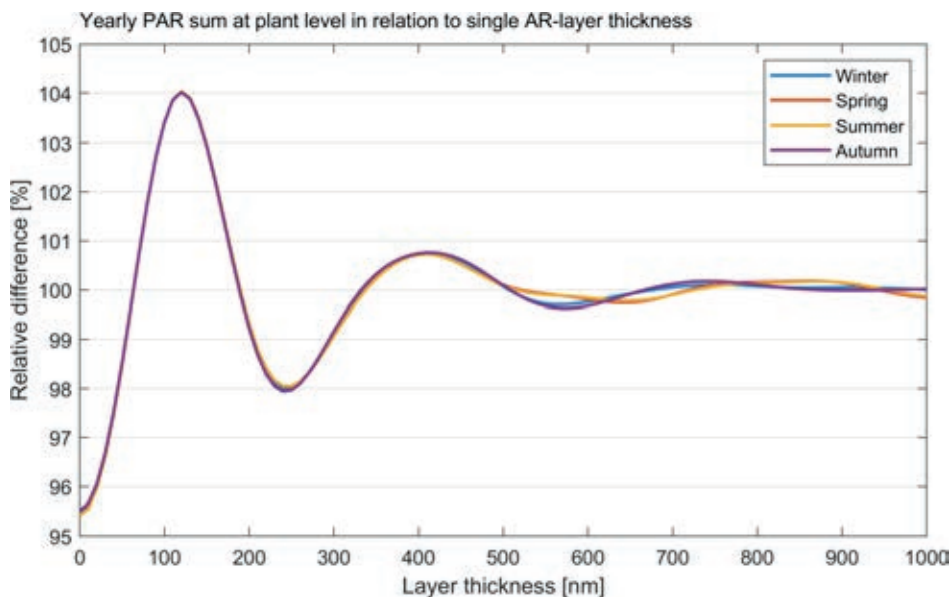
Figuur 13 Relatieve $\Delta Them$ van de gecoate monsters ten gevolge van natuurlijke veroudering.



Figuur 14 Absolute ΔT_{hem} van gecoate monsters ten gevolge van natuurlijke veroudering.

Een mogelijke verklaring voor het verloop van de ΔT_{hem} is een geleidelijke afname van de laagdikte van de coating in de tijd rondom lokale transmissie-optima (Figuur 15). De laagdikte van een AR-coating is geoptimaliseerd op maximale transmissie binnen een bepaald golflengtegebied, voor een bepaalde invalshoek of (gewogen) gemiddelde invalshoek. Zo zal een AR-coating voor PV-panelen geoptimaliseerd worden voor het werkzame golflengtegebied en loodrechte inval. Voor tuinbouwglas voor de Nederlandse markt mag verwacht worden dat AR-coatings geoptimaliseerd worden op het PAR golflengtegebied en hemisferisch invallend licht waarbij invalshoeken rondom 45° de belangrijkste zijn.

Laagdiktes liggen in de orde van $\frac{1}{4} \times \lambda$ (golflengte) en daarmee rond de 150 nm. Relatief kleine verandering in laagdikte kunnen al vrij snel tot procenten verschil in transmissie leiden. In onderstaande Figuur (volgende pagina) is de relatieve jaarlijkse PAR-som op plantniveau weergegeven in relatie tot de laagdikte van een enkelzijdige AR-coating met brekingsindex van 1.32 op glas met brekingsindex van 1.52. Dit geldt voor een O-W georiënteerde Venlo kas met 25° dakhelling, de gemiddelde globale straling in Nederland en rekening houdend met de fracties direct en diffuus licht.

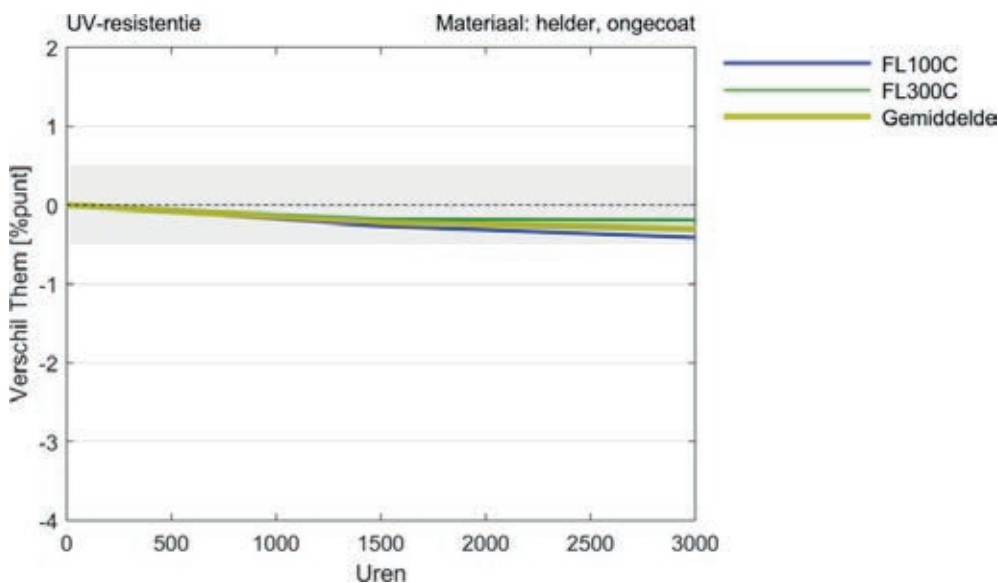


Figuur 15 Verschil in jaarlijkse PAR-som in relatie tot de laagdikte van een enkelzijdige AR-coating op glas met brekingsindex van 1.32 op een 25° Venlo kasdek in Nederland.

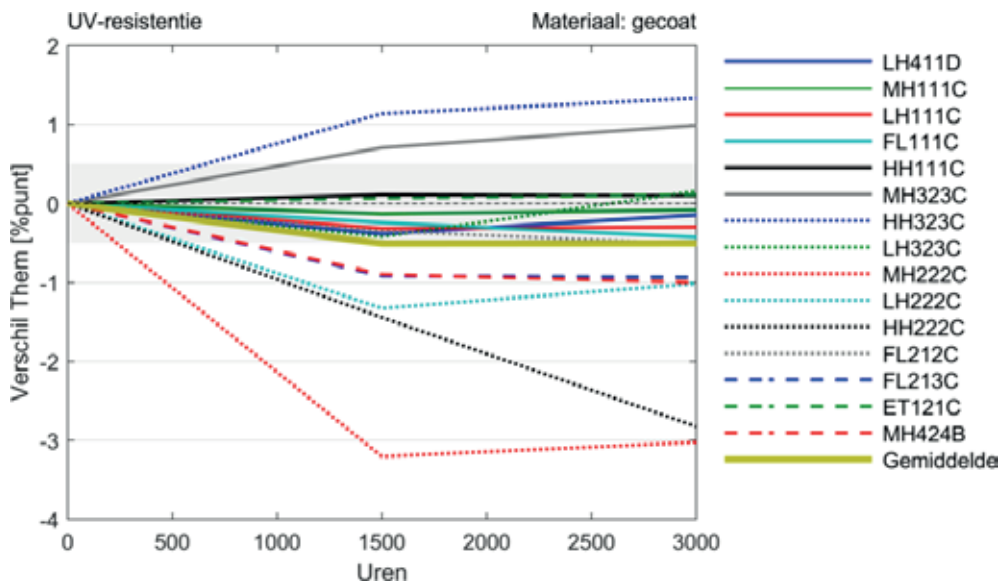
Wanneer de initiële laagdikte groter is dan de optimale laagdikte zou veroudering voor een geleidelijke afname van de laagdikte kunnen leiden waardoor de transmissie eerst toeneemt, daarna weer afneemt of andersom, wat een verklaring zou kunnen zijn voor het verloop in T_{hem} (en daarmee ΔT_{hem}).

4.3 UV-resistentie

In de onderstaande figuren is de veroudering door UV-straling volgens EN-ISO 12543-4 weergegeven in %punten ΔT_{hem} . Voor de ongecoate monsters is bij het ene monster geen en bij het andere monster een gering significant effect gemeten. Bij ca. de helft van de gecoate monsters is een significant effect gemeten tussen ca. -2.5% en 0.5%, rekening houdend met de meetonnauwkeurigheid. Voor een deel van de monsters geldt dat de ΔT_{hem} tussen 1500 u en 3000 u weinig meer verandert waardoor de duur van 1500 u een goede indicator is voor de UV-resistentie. Voor andere monsters lijkt de ΔT_{hem} echter niet gestabiliseerd bij 3000 u waardoor een periode van 3000 u te kort is om tot een stabiele waarde te komen.



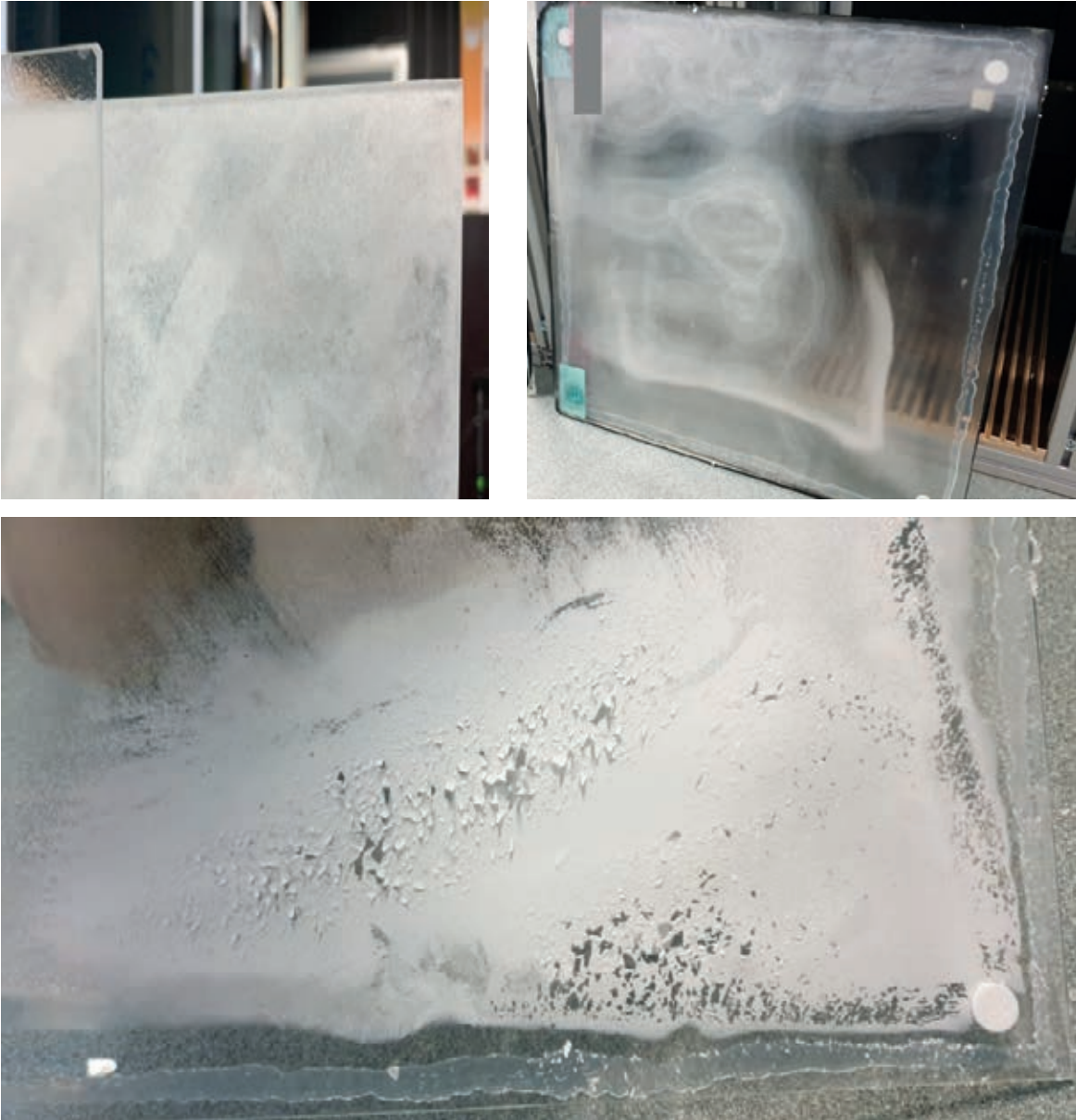
Figuur 16 Resultaten van de UV-resistentie van ongecoate monsters.



Figur 17 Resultaten van de UV-resistentie van gecoate monsters.

4.4 Klimaatwisseling

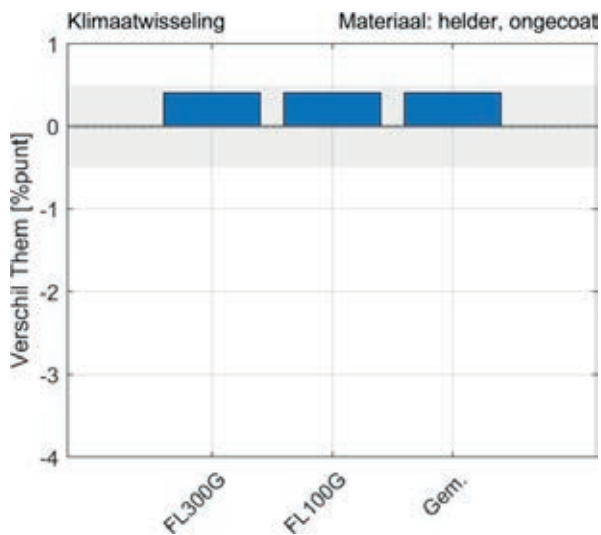
De klimaatwisseltest is in eerste instantie in zijn geheel uitgevoerd volgens EN 1279-2:2018. Hierbij is echter ernstige glascorrosie en/of neerslag opgetreden aan de geteste zijde bij het merendeel van de monsters. Omdat de T_{hem} hierdoor sterk beïnvloed is waren controlemetingen zinloos (Figuur 18).



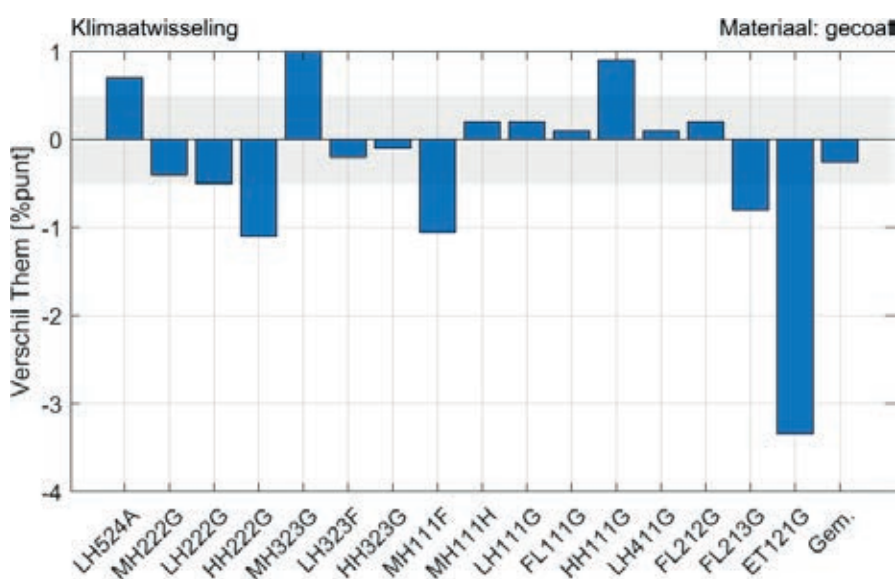
Figuur 18 Zware glascorrosie en/of neerslag aan de geteste zijde na de volledige klimaatwisseltest volgens EN 1279-2:2018.

Het is niet mogelijk gebleken de definitieve oorzaak van de corrosie te achterhalen maar het ligt voor de hand dat de gebruikte siliconenkit van invloed geweest. Volgens TUV wordt corrosie soms ook bij enkel glas en isolatieglas waargenomen. Besloten is om de test te herhalen waarbij alleen de eerste fase van klimaatwisseling is uitgevoerd (de temperatuurcyclus) waarbij enkelzijdige samples niet gekit zijn. Bij geen van de monsters bleek hierna corrosie op te treden.

In de onderstaande figuren is de ΔT_{hem} weergegeven. Voor de ongecoate monsters is geen significant effect geconstateerd. Bij iets minder dan de helft van de gecoate monsters is een significant effect gemeten tussen ca. -3% en 0.5%, rekening houdend met de meetonnauwkeurigheid. Op één na lagen alle resultaten binnen de $\pm 0.5\%$ en gemiddeld gezien is bij de gecoate monsters geen significant effect gemeten.



Figuur 19 Resultaten van de klimaatwisseltest voor de ongecoate monsters.



Figuur 20 Resultaten van de klimaatwisseltest voor de gecoate monsters.

4.5 Chemische resistentie

Nat het uitvoeren van de test beschreven in paragraaf 2.3.3 zijn de monsters voorafgaande aan de meting gereinigd volgens NEN 2675 wat bestaat uit wassen en spoelen. Na reinigen was een residu zichtbaar op alle geteste monsters (Figuur 21 en Figuur 22). Afhankelijk van het type monster was het residu in meer of mindere mate aanwezig en vertoonde een ander neerslagpatroon. Het kan niet worden uitgesloten dat het residu mogelijk van invloed geweest op de gemeten T_{hem} .



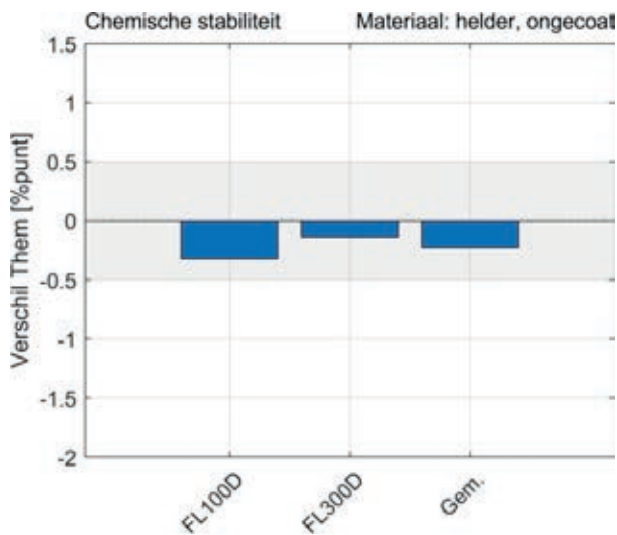
Figuur 21 Residu van Standaard Water bij helder onbehandeld float glas.



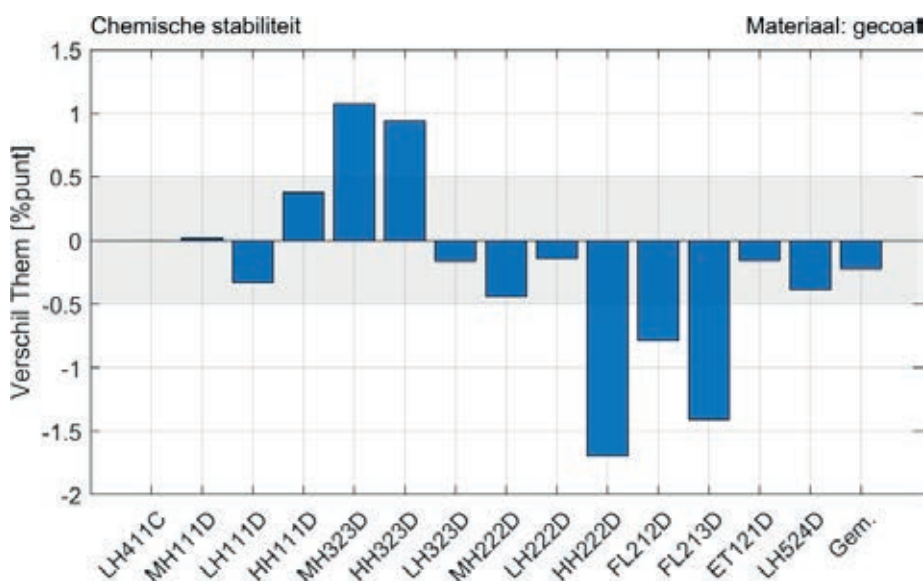
Figuur 22 Residu van Standaard Water op een gecoat diffuus monster.

In de onderstaande figuren is de ΔT_{hem} ten gevolge van de behandeling door het Standaard water weergegeven. Hoewel er ook bij de ongecoate heldere monsters duidelijk sprake was van residu is geen significant effect op de T_{hem} gemeten (Figuur 23).

Bij de diffuse monsters was het residu echter meer zichtbaar aanwezig en bij ca. een derde van de gecoate monsters is een significant effect gemeten tussen ca. -1% en +0.5%, rekening houdend met de meeton nauwkeurigheid. Van de monsters met (veel) lagere transmissie is het niet duidelijk of dit veroorzaakt is door het residu of door het effect op de coating. Bij monsters met een verhoogde T_{hem} lijkt het erg onwaarschijnlijk dat dit aan het residu te wijten is maar zekerheid kan hiervoor niet gegeven worden. Als conclusie kan gesteld worden dat de test op deze manier uitgevoerd niet geschikt is om de veroudering ten gevolge van blootstelling aan chemicaliën te testen.



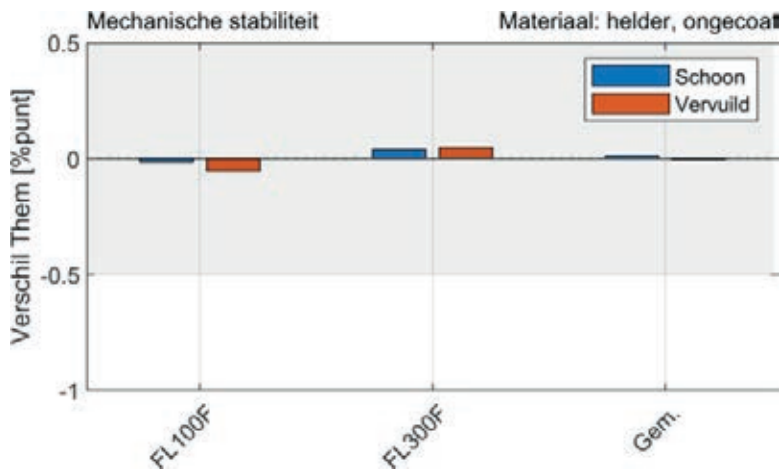
Figuur 23 Resultaten van de chemische resistenietest voor de ongecoate monsters.



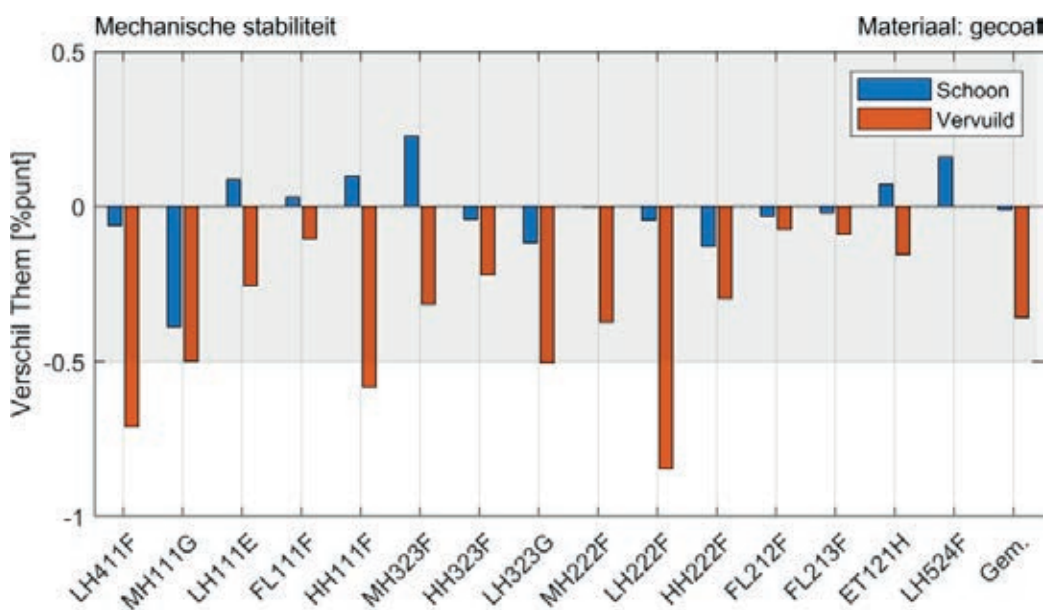
Figuur 23 Resultaten van de chemische resistenietest voor de gecoate monsters.

4.6 Mechanische resistentie

Zoals beschreven in paragraaf 2.3.4 is de test voor mechanische resistentie twee keer uitgevoerd: met schoon glas en met vervuild glas. Bij het vervuilde glas bleek na de test nog zichtbaar residu aanwezig wat na reinigen volgens NEN 2675 goed verwijderd kon worden. Na wassen was nauwelijks tot geen residu zichtbaar. In de onderstaande figuren is de ΔT_{hem} ten gevolge van de borsteltest weergegeven. Voor de ongecoate monsters is zowel voor niet-vervuilde als vervuilde monsters geen significant effect gemeten. Voor de gecoate vervuilde monsters is het effect gemiddeld gezien sterker dan bij de onvervuilde maar slechts bij enkele monsters is het effect weliswaar significant maar erg beperkt (max. 1% ΔT_{hem}).



Figuur 25 Resultaten van de mechanische resistentie voor de ongecoate monsters.



Figuur 26 Resultaten van de mechanische resistentie voor de gecoate monsters.

5 Analyse

5.1 Inleiding

Een van de doelstellingen van het project is een analyse naar de relatie tussen de veroudering en het type coating enerzijds en het glastype (in termen van lichtverstrooiende structuur/etsing) anderzijds. Tijdens de uitvoering van het project is duidelijk geworden dat het in sommige gevallen niet mogelijk was de coating en/of glastype te categoriseren. Van de ene kant behoort dit tot het intellectueel eigendom van producenten van glas en coatings, iets wat niet zonder meer toegankelijk is voor derden. Aan de andere kant was het door de uitvoerder van het project niet altijd mogelijk om het type structuur en coating te achterhalen en de coating te categoriseren. Daarnaast bestaat het risico dat een bepaalde categorie bepaalde (unieke) kenmerken heeft waardoor de betreffende monsters te herleiden zijn naar producent, wat ongewenst is. Om deze redenen zijn de monsters op een alternatieve manier gecategoriseerd, en wel op:

- Hemisferische transmissie (T_{hem}).
- Aantal gecoate zijden.
- Diffusiteit (LH, MH, HH, zie Hoofdstuk 3).
- Producent/leverancier (anoniem).

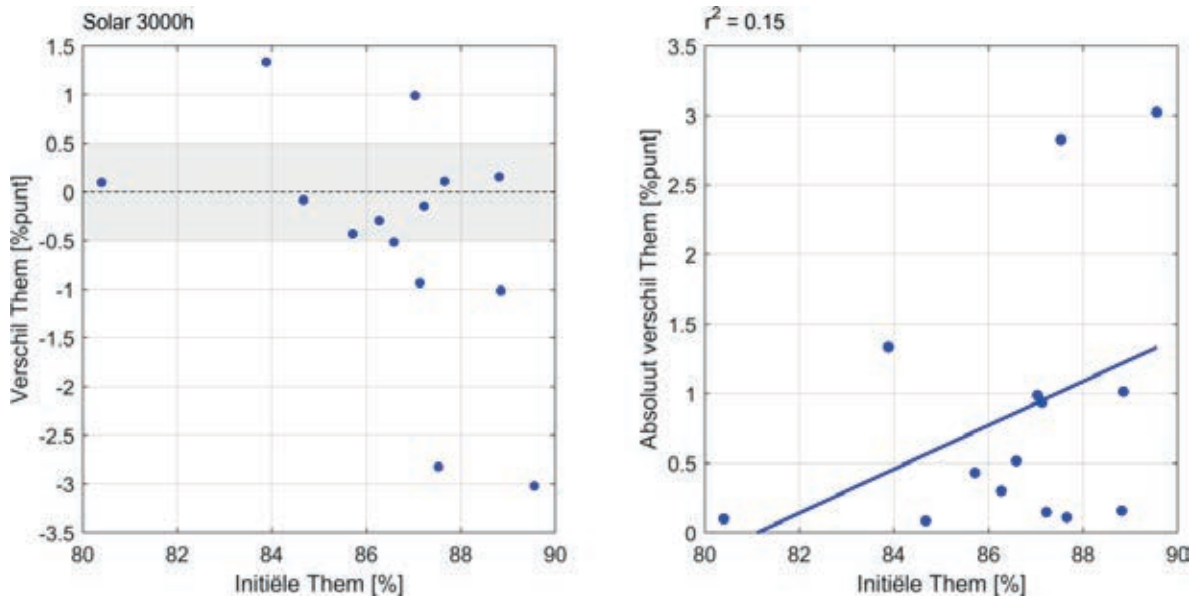
Voor de verschillende testen is per categorie de relatie bepaald tussen het testresultaat (de absolute waarde van de ΔT_{hem} en de categorie (par. 5.2). In de volgende paragrafen is telkens de relatie en de correlatie met de categorie in een figuur weergegeven, uitgedrukt in r^2 ^[7].

- Voor het concept testprotocol, zijn de volgende vragen van belang:
- Welke testen laten een significant effect zien en welke niet?
- Zijn de effecten groot genoeg om de test op te nemen in het concept testprotocol?
- Is de test praktisch uitvoerbaar op het gebied van doorlooptijd en kosten?
- Deze vragen zijn beantwoord in § 5.7.

5.2 Relatie met de Hemisferische transmissie

In deze paragraaf is de relatie tussen veroudering en de initiële T_{hem} onderzocht. Met initiële T_{hem} wordt bedoeld de T_{hem} zoals die van elk (fysiek verschillend) monster gemeten is voorafgaande aan de test. In de onderstaande Figuur (op volgende pagina) is deze relatie voor kunstmatige UV-veroudering weergegeven waarbij er een zwak verband gevonden is. Bij de andere testen is geen significant verband met de T_{hem} aangetoond (zie Bijlage 1). Hoewel de significantie erg beperkt is betekent dit dat bij de kunstmatige veroudering door UV de T_{hem} enigszins verband houdt met de veroudering. Mogelijk speelt de laagdikte van coatings zoals beschreven in paragraaf 4.2 een rol. Een optimale werking van de coating gaat gepaard met een hoge nauwkeurigheid van de laagdikte en kleine afwijkingen hierin hebben dan relatief grote gevolgen voor de werking van de coating. Ook is hoogtransparant glas vaak dubbelzijdig gecoat waardoor de veroudering aan beide kanten optreedt, hoewel door absorptie door het glas de hoeveelheid UV aan de niet-geteste zijde beduidend minder is dan aan de kant van de lichtbron.

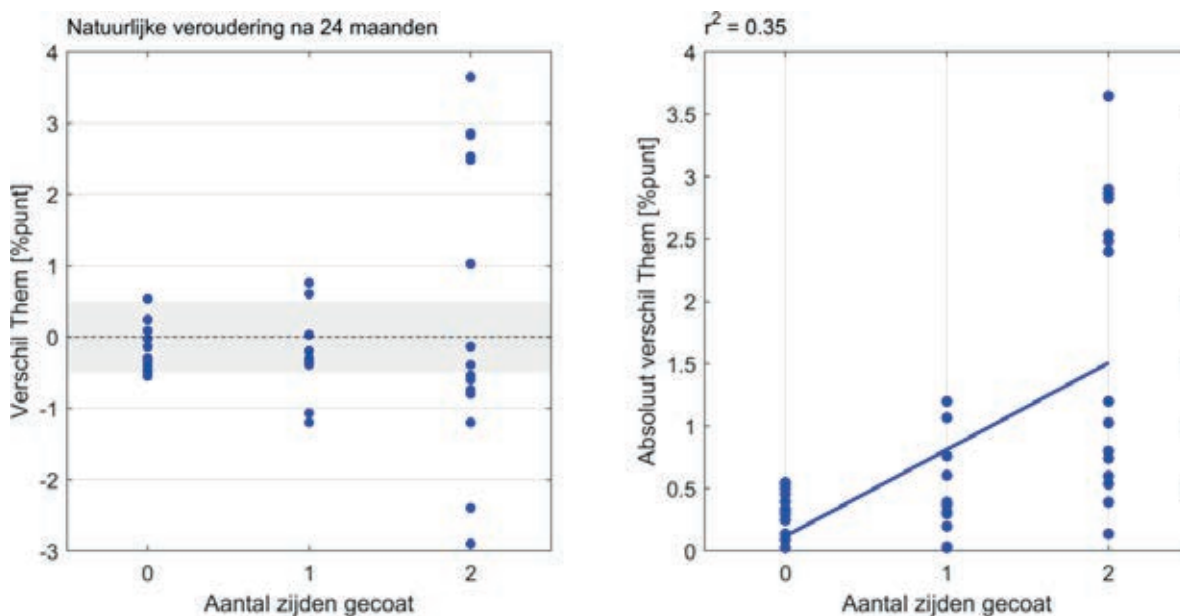
⁷ r^2 is de determinatiecoëfficiënt (het kwadraat van de correlatiecoëfficiënt) en is een maat voor het deel van de variabiliteit dat wordt verklaard door het statistisch model. Als vuistregel geldt $r^2 < 0.1$ voor een triviaal verband, $0.1 < r^2 < 0.25$ bij een zwak verband, $0.25 < r^2 < 0.75$ voor een matig tot sterk verband en $r^2 > 0.75$ bij een zeer sterk verband



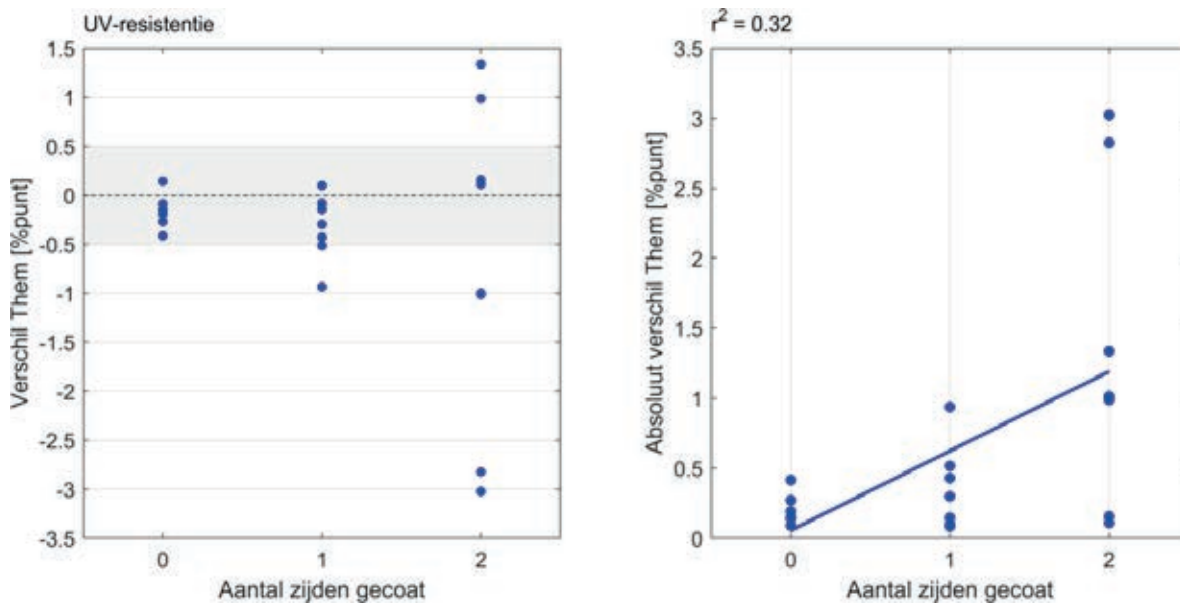
Figuur 27 Het verband tussen de veroudering door UV-resistentie en de initiële Them.

5.3 Relatie met aantal gecoate zijden

In deze paragraaf is de relatie tussen veroudering en het aantal gecoate zijden onderzocht. Bij de natuurlijke veroudering en kunstmatige UV-veroudering blijkt er een matig tot sterk verband te bestaan. Voor deze testen betekent dit hoe hoger het aantal gecoate zijden hoe groter de veroudering. Bij de andere testen is een zwak tot geen verband met de T_{hem} aangetoond (zie Bijlage 2). De oorzaak van enig verband lijkt duidelijk, uit de testresultaten blijkt dat ongecoate samples niet of nauwelijks verouderen en dubbelzijdig gecoate materialen kunnen in theorie een dubbele veroudering hebben ten opzichte van enkelzijdig gecoate materialen.



Figuur 28 Het verband tussen natuurlijke veroudering en het aantal gecoate lagen.

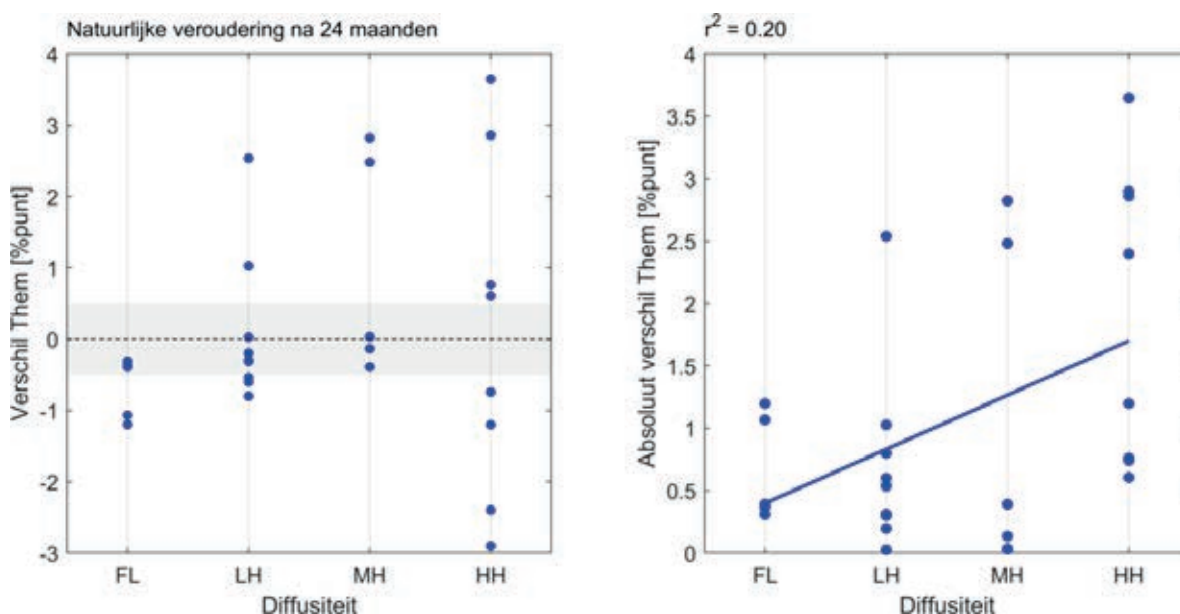


Figuur 29 Het verband tussen de veroudering door UV-resistentie en het aantal gecoate lagen.

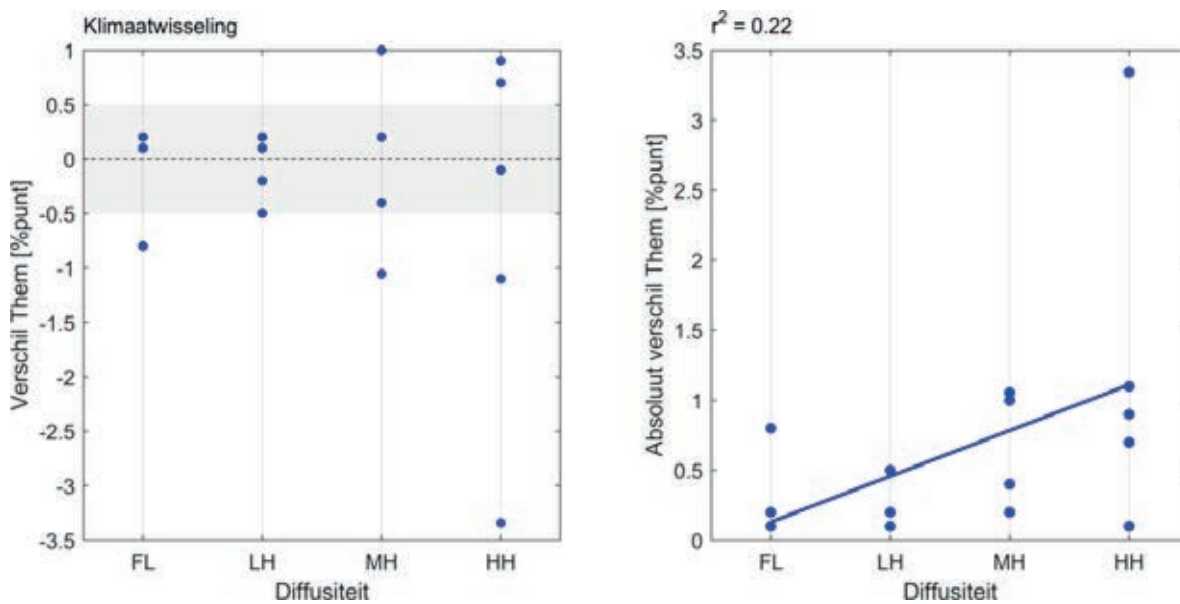
5.4 Relatie met diffusiteit

In deze paragraaf is de relatie tussen veroudering en diffusiteit onderzocht. De diffusiteit van de monsters is afgeleid uit de specificaties vanaf de producent, vaak uitgedrukt in één van de categorieën FL, LH, MH en HH (Hoofdstuk 3) waardoor in principe geen statistische bepaling van de correlatie mogelijk is. Om hierover toch iets te kunnen zeggen zijn deze categorieën getalsmatig vertaald naar respectievelijk 0, 1, 2 en 3.

In onderstaande grafieken is de relatie met diffusiteit voor de natuurlijke veroudering en klimaatwisseltest weergegeven waarbij een zwak verband blijkt te bestaan. Dit betekent dat hoe hoger diffusiteit hoe groter de veroudering. Bij de andere testen is geen significant aantoonbaar (zie Bijlage 3). Net zoals bij de relatie met de hemisferische transmissie en het aantal gecoate zijden geldt hier dat hoog diffuse materialen vaak dubbelzijdig gecoat zijn met waarbij de laagdikte van de coating kritischer is dan bij laag diffuse monsters.



Figuur 30 Het verband tussen natuurlijke veroudering en diffusiteit.



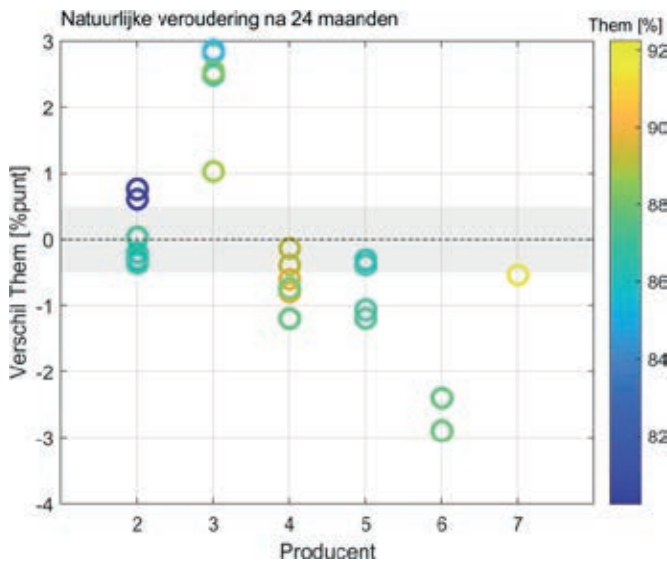
Figuur 31 Het verband tussen klimaatwisseling en diffusiteit.

5.5 Relatie met producent

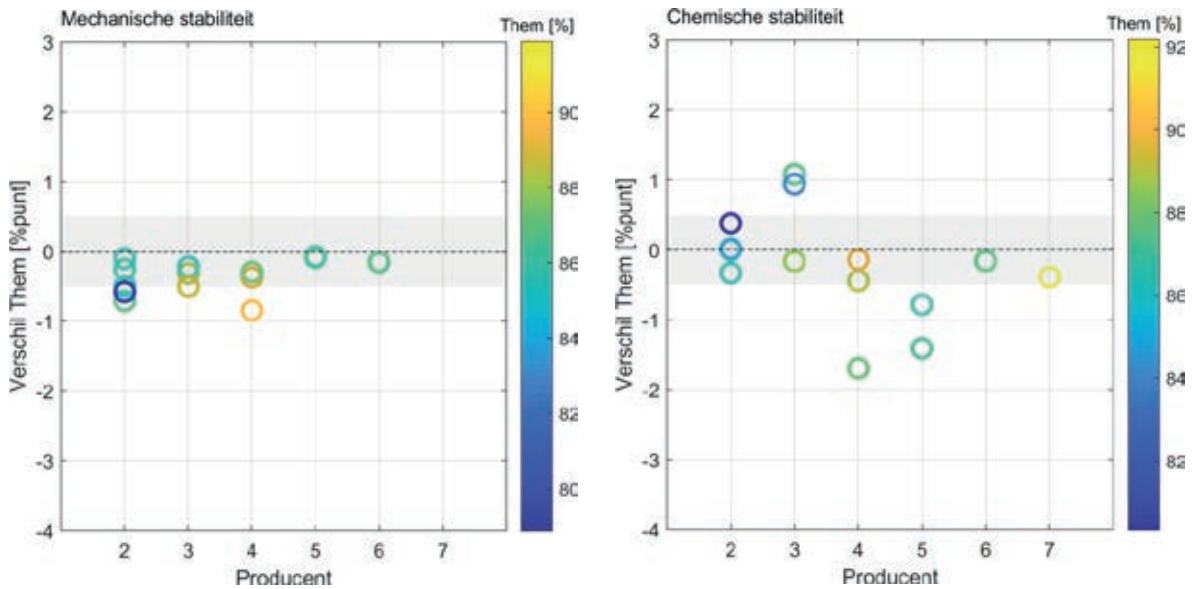
In deze paragraaf is de relatie tussen veroudering en producent. Hiervoor zijn de producenten geanonimiseerd en genummerd van 2 t/m 7. Van producent 1 zijn alleen heldere ongecoate monsters gemeten en omdat veroudering in dit onderzoek alleen betrekking heeft op de coating is deze niet opgenomen in de resultaten in deze paragraaf.

Net zoals bij diffusiteit is de fabrikant geen kwantificeerbare eigenschap is kunnen geen statistische correlaties worden bepaald. Door de veroudering te groeperen naar fabrikant kunnen echter wel verschillen tussen fabrikanten zichtbaar gemaakt worden.

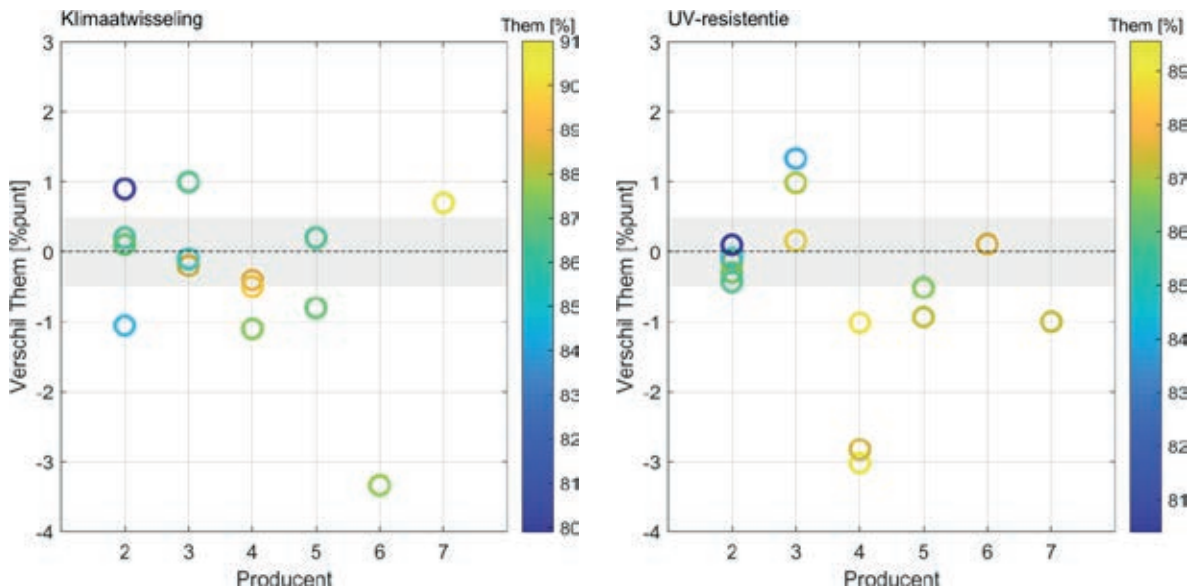
In onderstaande figuren is voor alle testen de ΔT_{hem} weergegeven. Producent 3 laat bij 4 van de 5 testen een toename in transmissie door veroudering zien. Producent 6 vertoont een zeer sterke afname in T_{hem} door natuurlijke veroudering en klimaatwisseling, terwijl er geen afname is door kunstmatige UV-veroudering. De veroudering lijkt hier dus veroorzaakt door (wisselingen in) temperatuur en/of vocht. Producenten 4 en 5 laten in mindere mate een afname in transmissie zien door natuurlijke veroudering, hier voornamelijk als gevolg van UV-straling. Fabrikant 2 is over alle testen heen het meest stabiel. Hoewel uit deze analyse duidelijk blijkt dat er significante verschillen zijn tussen de verschillende producenten moet opgemerkt worden dat bij zowel de natuurlijke als kunstmatige UV-veroudering geen stabilisatie is opgetreden gedurende de doorlooptijd van de test waardoor conclusies sterk afhankelijk zijn van het ijkmoment na de start van de test.



Figuur 32 Relatie tussen producent en natuurlijke veroudering.



Figuur 33 Relatie tussen producent en mechanische veroudering (links) en chemische stabiliteit.



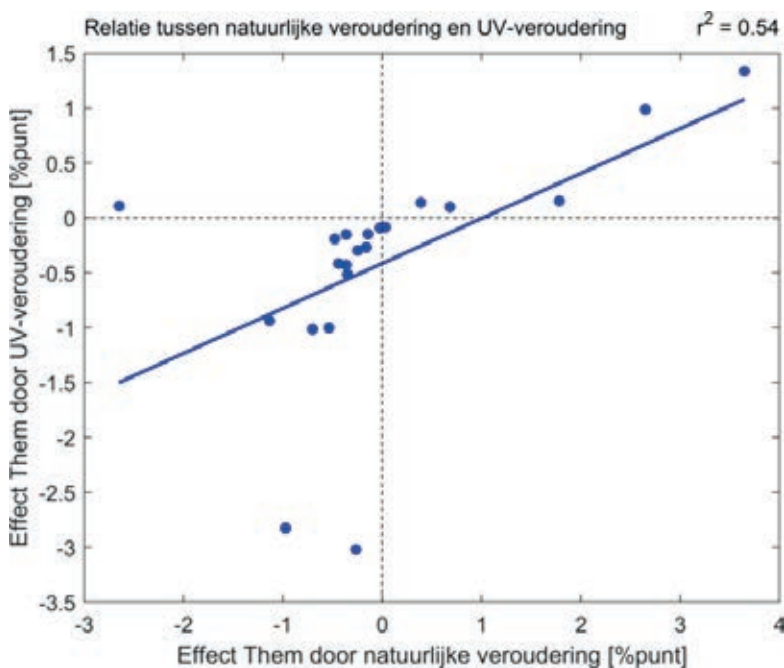
Figuur 34 Relatie tussen producent en veroudering t.g.v. klimaatwisseling (links) en UV-resistentie.

5.6 Relatie tussen natuurlijke en kunstmatige veroudering

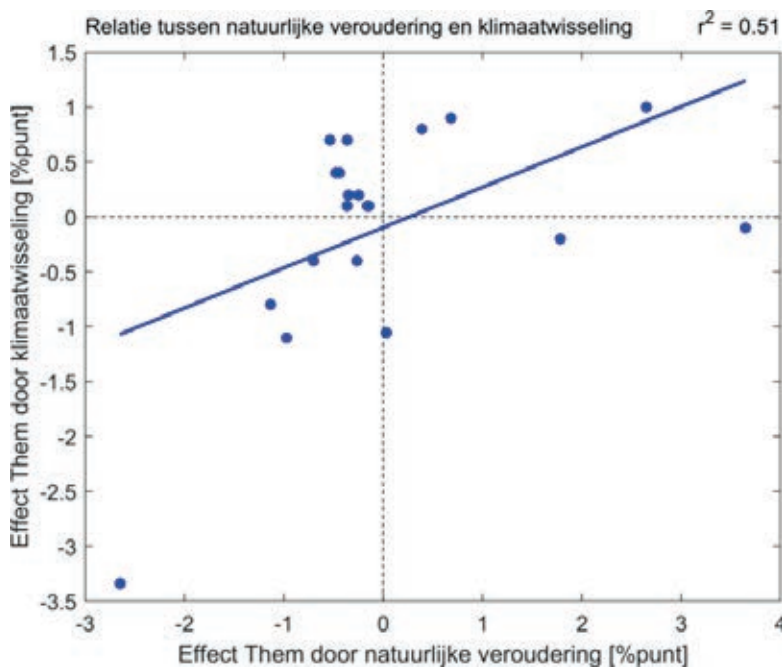
De EN-ISO 12543 is ontwikkeld om de duurzaamheid van glas voor gebouwen te testen. Onderdeel hiervan is de solar radiation test die bedoeld is om de duurzaamheid bij blootstelling aan zonlicht en dan name UV te testen. De test zou een vergelijkbaar resultaat op moeten leveren als 3-5 jaar blootstelling aan de zon, afhankelijk van de geografische locatie. Wat betreft temperatuur en vocht is de EN 1279-2:2018 ontwikkeld als lange-duurbeproevingmethode voor vochtindringing door sealers en/of afstandshouders bij isolatieglas, getest door glasmonsters aan een lange periode van klimaatwisselingen bij hoge vochtigheid bloot te stellen. Beide testen zijn bedoeld als nabootsing van natuurlijke omstandigheden. Wanneer het effect van de test met natuurlijke veroudering uitgezet wordt tegen het effect van beide kunstmatige verouderingstesten blijkt er een matig tot sterk verband te staan met een r^2 van >0.5 (Figuur 35 en Figuur 36). De overeenkomst met de solar radiation is niet verrassend omdat deze test juist met dit doel ontwikkeld is. Ook bij de klimaatwisseltest blijkt dat deze test tot op zekere hoogte representatief is voor natuurlijke veroudering.

Opvallend is dat de effecten van de natuurlijke veroudering gemiddeld anders zijn bij een positieve veroudering (toename T_{hem}) dan bij negatieve veroudering (afname T_{hem}). Bij een positieve veroudering is de natuurlijke veroudering gemiddeld sterker, bij negatieve veroudering is de kunstmatige UV-veroudering sterker dan de natuurlijke. Dit laatste is te verklaren door de hoeveelheid ontvangen UV-straling: 2 jaar natuurlijke zon in vergelijking tot een kunstmatige 5 jaar zonlicht.

Bij de klimaatwissel is het verschil tussen positieve en negatieve veroudering minder uitgesproken. Bij negatieve veroudering lijkt de klimaatwisseltest goed aan te sluiten bij het dag/nacht/seizoen regime van de temperatuur en luchtvochtigheid.



Figuur 35 Het effect van kunstmatige UV-veroudering uitgezet tegen het effect van natuurlijke veroudering. Elk punt vertegenwoordigt de resultaten van één en hetzelfde glastype waarvan 2 fysiek verschillende monsters getest zijn.



Figuur 36 Het effect van de klimaatwisseeltest uitgezet tegen het effect van natuurlijke veroudering. Elk punt vertegenwoordigd de resultaten van één en hetzelfde glastype waarvan 2 fysiek verschillende monsters getest zijn.

5.7 Naar een concept testprotocol

5.7.1 Selectie van testen

Een van de doelstellingen van het project is het ontwikkelen van een concept testprotocol voor het bepalen van de levensduur van coatings op glas conform gebruik in de glastuinbouw. Dit protocol zou dan mogelijkterwijs in de toekomst ook voor het testen van de veroudering van andere in de glastuinbouw gebruikte materialen binnen in de kas (schermen, folies) worden toegepast. Met een dergelijk protocol kunnen telers en toeleveranciers beoogde materialen laten testen en op basis hiervan de juiste materialen kiezen waarna een afweging gemaakt kan worden tussen de kosten en mogelijke veranderende lichttransmissie. Dit is economisch belangrijk voor de gehele sector en verbetert de concurrentiekracht.

Om tot een concept testprotocol te komen worden een aantal afwegingen gemaakt waarbij elke uitgevoerde test wordt beoordeeld op het gemeten (en potentiële) effect op de T_{hem} en de praktische uitvoerbaarheid.

Natuurlijke veroudering

Het experiment met betrekking tot natuurlijke veroudering is enkel uitgevoerd voor onderzoeksdoeleinden en niet met het doel om dit als commerciële test door te ontwikkelen. Daarvoor is de doorlooptijd van 24 maanden al te lang en om tot stabilisatie van de veroudering te komen is zelfs nog meer tijd nodig. Op basis van de proef met natuurlijke veroudering is de correlatie met de kunstmatige UV-veroudering en klimaatwisseling onderzocht en deze blijkt matig tot sterk. Dit maakt dat een combinatie van beide kunstmatige verouderingstesten een goed alternatief is van natuurlijke veroudering.

UV-bestendigheid

De solar radiation test volgens EN 12543 blijkt een goede nabootsing voor de veroudering ten gevolge van natuurlijke veroudering door zonlicht. De test heeft bij de geteste monsters ook een goede respons gegeven, bij ca. de helft van de gecoate monsters is een significant effect gemeten tussen ca. -2.5% en 0.5%. Voor de ongecoate monsters is geen significant effect geconstateerd wat betekent dat de test specifiek de veroudering van coatings test. De test is volledig gestandaardiseerd en vastgelegd in een norm waardoor deze in principe door ieder testlab kan worden uitgevoerd. Om deze redenen lijkt de test geschikt om op te nemen in het testprotocol. Belangrijk punt is nog de doorlooptijd. Voor een aantal van de geteste monsters geldt 1500u als een goede indicator maar voor een ander deel zijn na 3000 u niet gestabiliseerd. Voorgesteld wordt om de doorlooptijd te verhogen naar 6000 u.

Klimaatwissel

Door het optreden van ernstige glascorrosie tijdens de eerste klimaatwisseltest, in zijn geheel uitgevoerd volgens EN 1279-2:2018, is deze niet beoordeeld kunnen worden op geschiktheid voor testen van veroudering van coatings op tuinbouwglas. Er is geen sluitende oorzaak gevonden voor het opgetreden van de corrosie. De alternatieve test is echter zonder corrosie verlopen, heeft een veel kortere doorlooptijd en laat ook significante effecten op de T_{hem} zien en vertoont correlatie met natuurlijke veroudering. Om deze redenen lijkt deze test geschikt om op te nemen in het testprotocol. Het verdient aanbeveling om nog onderzoek te doen naar de oorzaken van de opgetreden corrosie. Mogelijk kan de test toch in zijn geheel volgens de norm uitgevoerd worden.

Chemische resistentie

De test zoals die uitgevoerd is blijkt ongeschikt te zijn door het residu dat zich niet laat verwijderen door reinigen volgens de NEN 2675 norm. Hierdoor is het effect van een mogelijk chemische reactie van de chemicaliën op de coating niet vast te stellen. De test zal dus met een ander mengsel uitgevoerd moeten dat geen of makkelijk verwijderbaar residu oplevert. Een andere oplossing is een andere uitvoering van de test waarbij de monsters niet nat opdrogen maar gedurende een bepaalde periode volledig ondergedompeld zijn in het mengsel en daarna met gespoeld worden alvorens te drogen. Daarnaast wordt in een nieuw project "Veilig Anti Reflectief glas schoonmaken" specifiek gekeken naar diverse reinigingsmiddelen en het effect op de T_{hem} . Om deze redenen is vooralsnog besloten deze test niet mee te nemen in het testprotocol.

Mechanische resistentie

De testopstelling voor de mechanische resistentie simuleert de dekreiniging met een bepaald type dekwasser voor een worst-case situatie waarbij het dek zeer frequent gereinigd wordt. Voor schoon glas is bij geen enkel monster een effect gemeten waardoor dit niet nuttig lijkt. Met vervuilde monsters is bij enkele monsters wel een significante veroudering gemeten. Het lijkt erg onwaarschijnlijk dat dit te wijten valt aan alleen het residu van de dirt mixture, wat met het oog nauwelijks waarneembaar was maar dit kan niet uitgesloten worden. Daar staat tegenover dat een testopstelling beschikbaar is waarmee de test relatief eenvoudig en snel uitgevoerd worden. Om deze redenen is besloten om de test beschikbaar te stellen in het concept protocol.

5.7.2 Vertaling naar teelt

Diffuus glas zorgt voor een betere verticale en horizontale lichtverdeling in en op het gewas wat resulteert in een hogere productie, iets wat in onderzoek reeds meerdere malen is aangetoond, zowel in modelberekening als bij praktijkexperimenten^{10) t/m 13)}. Dat diffusiteit ten koste gaat van de lichttransmissie is een feit en om deze reden wordt diffuus glas door fabrikanten vrijwel altijd voorzien van één of meerder AR-coatings. Het belang van een hoge transmissie geldt vooral voor gewassen met een hoge lichtbehoefte zoals glasgroentes. Voor deze gewassen is een constante afname in transmissie dan ook vrij eenduidig te vertalen naar een afname in productie en daarmee in rendabiliteit.

In onderstaande tabel is de relatie weergegeven tussen 1% meer of minder PAR op jaarbasis. Op basis van het type gewas kan dan een vertaling worden gemaakt van effect van veroudering (als ΔT_{hem} naar minderproductie. Voor tomaat geldt dat 1% transmissieverlies door veroudering ca. 0.7 kg/m² aan product per jaar ingeleverd wordt. In de winter heeft 1 kg tomatomaat een waarde van ca. €1.50 per kg, in de zomer van ca. €0.70 per kg.

Tabel 2

Meerproductie bij 1% meer PAR op jaarbasis

Gewas	% meerproductie
Sla	0.8
Radijs	1.0
Komkommer	0.7 - 1.0
Tomaat	0.7 - 1.0
Roos	0.8 - 1.0
Chrysant	0.6
Pointsettia	0.5 - 0.7
Ficus	0.6

Het gemeten effect van veroudering op de T_{hem} is echter niet constant. Bij de testen waar een tussenmeting gedaan is (3 keer bij natuurlijke veroudering en 1 keer bij de UV-resistentie) is een verloop te zien. Bij de natuurlijke veroudering neemt de T_{hem} van bepaalde monsters steeds af of zelfs toe maar bij andere monsters is er ook sprake van een kantelpunt. Voor zover dit vastgesteld is kunnen worden is dit in mindere mate ook het geval bij de kunstmatige UV-veroudering. Op basis van 2 metingen en 3000 u doorlooptijd is voor enkele monsters geen duidelijke stabilisatie te zien. Dit betekent dat de vertaling naar productie niet zozeer op de eindwaarde van de test te nemen maar meer op het gemiddelde.

6 Testprotocol

Op basis van de analyse en overwegingen in het voorgaande Hoofdstuk is een protocol opgesteld voor het testen van de veroudering van gecoat glas. Het protocol bestaat uit een aantal concrete stappen waarvan de verschillende testen in stap 5 naar keuze uitgevoerd kunnen worden.

1. Aanvraag door client bij testlab.
2. Afhandelen offerte en akkoord
3. Zending van monsters door client aan testlab
 - Per test (punt 5) één monster uit dezelfde batch
 - Afmetingen: 50×50 cm
 - Indien mogelijk dubbelzijdig gecoat
 - Vrij van defecten, tenzij op uitdrukkelijk verzoek van de client
 - Labeling volgens NEN 2675
4. Meting van de initiële T_{hem} volgens NEN 2675 van alle monsters door het testlab
5. Uitvoering door testlab van de gewenste test(en) waarbij voor elke test een afzonderlijk monster gebruikt wordt.
 - a. UV-veroudering volgens EN-ISO 12543 deel 4 7.3.1
Aanpassingen:
 - 6000 uur in plaats van 1500 uur
 - Controlemeting van T_{hem} na 3000 uur, aanvullende tussentijdse controlemetingen in overleg
 - b. Klimaatwisseling volgens EN 1279-2:2018
Aanpassingen:
 - Uitvoering van alleen het 1^e deel van de test: de 4-weekse dynamische fase bestaande uit 56 temperatuurcycli
 - c. Mechanische resistentie:
 - Gebruik van een testopstelling zoals beschreven in par. 2.3.4
 - Contactoppervlak tussen borstel en monster van 70 mm
 - 180 sec behandeling per contactoppervlak, met een totaal oppervlak van minimaal 200 × 200 mm, niet verder dan 50 mm uit de rand van het monster
 - Dubbelzijdig gecoate monsters worden enkelzijdig behandeld.
 - Eén borstelrichting per monster, te bepalen door het testlab, tenzij anders aangegeven door de client
6. Meting van de resulterende T_{hem} volgens NEN 2675 per monster
7. Rapportage
 - Datum van aanleveren monsters en rapportage
 - Naam van de opdrachtgever
 - Voor elk monster:
 - Unieke code zoals op de sticker vermeld
 - Materiaal dikte en afmetingen
 - omschrijving eventueel aanwezige defecten in en/of op het monster
 - Omschrijving van de uitgevoerde test
 - T_{hem} voor, eventueel tussentijds, na de test en bijbehorende ΔT_{hem}

Een nevendoelstelling van het project is een mogelijk gebruik van het testprotocol voor andere transparante materialen die in de glastuinbouw gebruikt worden zoals schermen en folies. Voor folies ontstaat al direct een principieel probleem omdat deze, in tegenstelling tot schermen, niet onder het toepassingsgebied van de NEN 2675 vallen waardoor controlemetingen niet mogelijk zijn en folies hiermee buiten het protocol vallen. Wat betreft de bruikbaarheid van het protocol voor schermen geldt in het algemeen dat dit niet erg voor de hand ligt omdat schermen hele andere eigenschappen hebben en er andere factoren spelen zoals chemische stabiliteit. Wat betreft de testen uit het protocol zijn er nog een aantal aandachtspunten:

UV-resistentie: Schermen waarbij transmissie kritisch is (energieschermen) worden binnen toegepast, waardoor deze, afhankelijk van het glas, een andere UV belasting ervaren. Per scherm zal onderzocht moeten worden of het materiaal bestand is tegen de temperaturen van $> 45^{\circ}\text{C}$ en ca. 900 W/m^2 straling. Het gaat dan vooral om thermische processen (vervorming) die de lichttransmissie beïnvloeden. Vanwege de grotere gevoeligheid van foliehoudende schermen kan in overleg de doorlooptijd verlaagd worden of het aantal tussentijdse controlemetingen worden verhoogd.

Klimaatwisseling: Evenals bij de UV-resistentie zal onderzocht moeten worden of het materiaal bestand is tegen extremen in temperatuur, dit geval van -18 tot $+53^{\circ}\text{C}$.

Mechanische resistentie: Schermen worden niet gereinigd op de manier waarop glas aan de buitenzijde mechanisch gereinigd wordt. Voor schermen gelden andere factoren die van invloed zijn op de veroudering zoals herhaaldelijk opvouwen, uitvouwen of oprollen, afhankelijk van het type scherm.

7 Conclusies

In het project is op basis van beschikbare normen met betrekking van veroudering van gecoat glas een selectie gemaakt van de meest relevante en geschikte normen qua uitvoerbaarheid, doorlooptijd en kosten. Vervolgens zijn de testprotocollen uit de geselecteerde normen waar mogelijk aangepast aan de specifieke invloed factoren van tuinbouwglas en eisen die aan glasmonsters gesteld worden met betrekking tot de controlemeting. Daarna is een verzameling van verschillende typen AR-gecoat glas, met als referentie onbehandeld helder glas, getest en vooraf, tussentijds en na afloop van de test gemeten volgens NEN 2675.

Met betrekking tot de kwantitatieve testresultaten kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

Natuurlijke veroudering: Deze test laat specifiek op de coating een significant effect zien bij de meerderheid van de geteste monsters van -3% tot +3% ΔT_{hem} waarbij de veroudering bij sommige monsters een kantelpunt heeft. Een mogelijke verklaring hiervoor is een geleidelijke afname van de laagdikte van de coating rondom lokale transmissie-optima. Bij een deel van de monsters stabiliseert de ΔT_{hem} niet aan het einde van de test waardoor geen harde conclusies getrokken kunnen worden over de veroudering na 24 maanden. Voor de monsters die wel gestabiliseerd zijn kan niet met zekerheid gezegd worden dat dit ook zo blijft op langere termijn.

UV-resistentie: Bij de gecoate monsters is bij ca. de helft van de monsters een significante veroudering gemeten van ca. -2.5% tot +0.5% ΔT_{hem} . Een deel van de monsters stabiliseert na 3000 uur niet of onvoldoende waardoor geen definitieve veroudering bepaald kon worden. In het voorgestelde protocol wordt om deze reden uitgegaan van 6000 uur.

Klimaatwisseling: Bij de gecoate monsters is met een aangepaste test een significante veroudering gemeten van $\pm 0.5\%$ ΔT_{hem} en voor een enkel monster -3% ΔT_{hem} . Bij deze test is glascorrosie een aandachtspunt.

Chemische resistentie: De resultaten van de test zoals uitgevoerd zijn onbetrouwbaar door residu van de gebruikte chemische oplossing en manier van aanbrengen. De test is als zodanig niet geschikt is om de veroudering ten gevolge van blootstelling aan chemicaliën te testen.

Mechanische resistentie: Alleen bij enkele vervuilde monsters is een significante veroudering gemeten tot 1% ΔT_{hem} waarbij niet kan worden uitgesloten dat dit (gedeeltelijk) te wijten is aan een residu van de dirt mixture.

Conclusies met betrekking tot relaties tussen veroudering en materiaaleigenschappen:

Relatie met T_{hem} : Alleen bij de kunstmatige UV-veroudering bestaat een zwak verband: hoe hoger de initiële T_{hem} hoe sterker de veroudering. Mogelijke verklaringen zijn het gebruik van meerlaags en/of dunnere coatings.

Relatie met aantal zijden: Alleen bij natuurlijke veroudering en kunstmatige UV-veroudering blijkt een matig tot sterk verband te bestaan: hoe meer zijden gecoat, hoe sterker er de veroudering. De verklaring lijkt triviaal, elke coating laag zorgt voor hogere transmissie maar kan ook verouderen.

Relatie met diffusiteit: Alleen bij de natuurlijke veroudering en kunstmatige UV-veroudering blijkt een zwak verband te bestaan: hoe hoger diffuser het glas, hoe sterker de veroudering. Hoog diffuus glas is vaak dubbelzijdig gecoat waarbij de laagdikte meer kritisch is.

Relatie met producent: Er zijn significante verschillen gemeten tussen de verschillende fabrikanten. Bij de ene fabrikant is de veroudering vooral het gevolg van klimaatwisselingen, bij de andere vooral van UV-straling en weer een andere is stabiel bij alle testen.

Tussen natuurlijke en kunstmatige veroudering t.g.v. UV en klimaatwisselingen blijkt een sterk verband. Bij negatieve veroudering (afname T_{hem}) is de kunstmatige UV-veroudering sterker dan de natuurlijke wat ook te verklaren valt door de UV lichtsom: 2 jaar in vergelijking tot een kunstmatige 5 jaar.

Het concept testprotocol is opgesteld op basis van het mogelijke effect op de T_{hem} en de praktische uitvoerbaarheid. Besloten is om de volgende testen op te nemen:

- UV-bestendigheid op basis van 6000 uur.
- Aangepaste klimaatwisseltest.
- Mechanische resistentie op basis van vervuilde monsters.

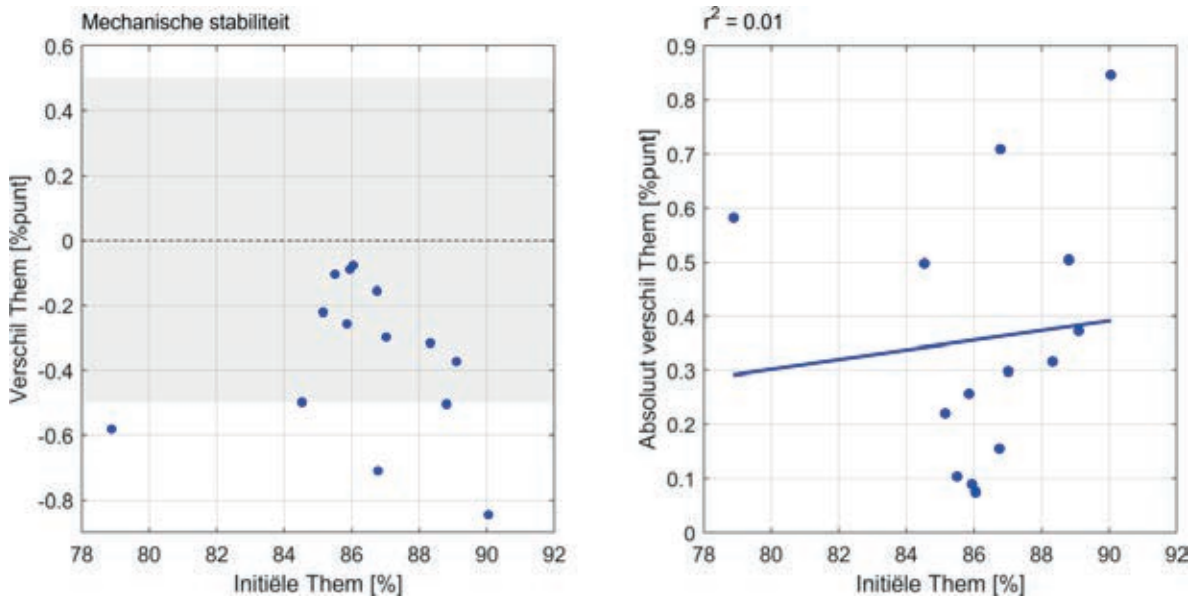
Het testprotocol kan mogelijk in de toekomst, eventueel na aanpassing, ook gebruikt worden voor het van de veroudering van schermen.

Voor de sector heeft dit project inzicht gegeven in de duurzaamheid van verschillende coatings op verschillende glastypes en de verschillende invloed factoren die hierin een rol spelen. Per saldo is de veroudering beperkt, met de kanttekening dat sommige invloeden langer doorwerken dan binnen de doorlooptijd vastgesteld is kunnen worden. De betrokken fabrikanten hebben inzicht gekregen in de veroudering van hun eigen producten. Zij kunnen het protocol en de resultaten gebruiken om nieuwe materialen te laten testen.

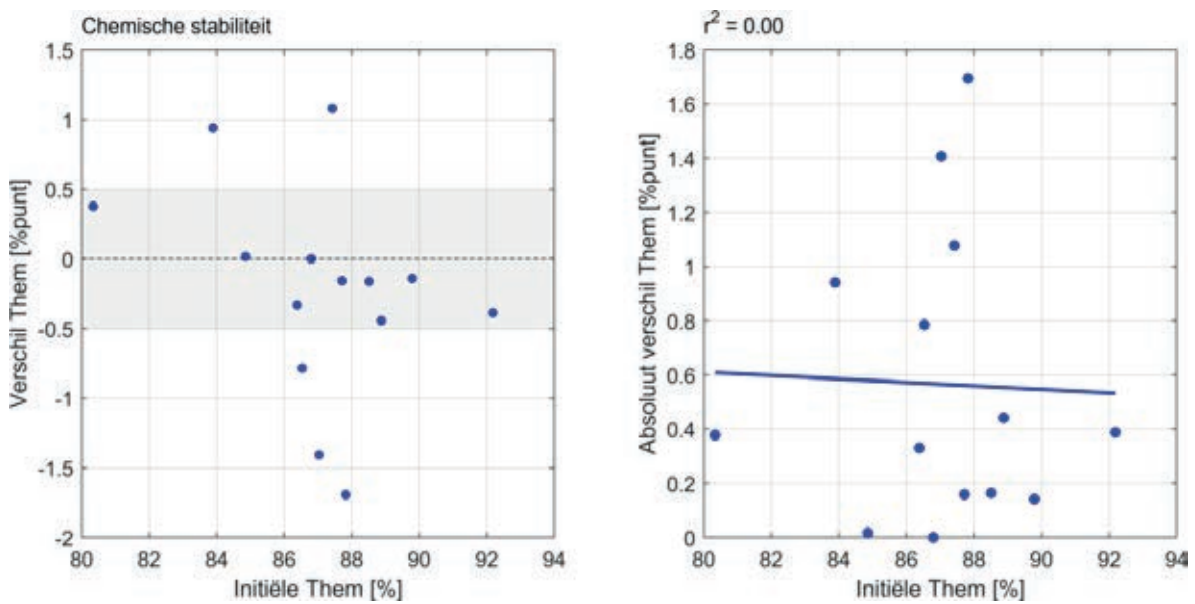
Literatuur

- Nederlands Normalisatie Instituut (Delft). Tuinbouwkassen – Bepaling van de optische eigenschappen van kasbedekkings – en schermmaterialen: Greenhouse glass – Determination of optical properties of greenhouse covering materials and screens; Nederlandse Norm, NEN 2675; Nederlands Normalisatie-Instituut: Delft, 2018
- European standard EN 1279-2:2018 (E), Glass in Building – Insulating Glass Units – Part 2: Long term test method and requirements for moisture penetration, European Committee for Standardization, July 2018.
- EN ISO 12543-2: Glass in building–Laminated glass and laminated safety glass–Part 2: Laminated safety glass (ISO 12543-2:2011)
- EN 1096: Glass in building - Coated glass, 2012
- Adams, P. B. 1984.
Glass Corrosion a Record of the Past? A Predictor of the Future? *Journal of Non-Crystalline Solids* 67 (1), 193–205 DOI: 10.1016/0022-3093(84)90150-9.
- Ruijven, J. van; Os, E. van; Blok, C; Beerling, E. 2016.
'standaard Water' Voor Toetsing Zuiveringstechnologie Voor De Glastuinbouw : Versie 2
- Van der Knaap, L. 2014.
Rijden in de kasgoot. Test- en beoordelingsmethode om de draagkracht van /gootprofielen vast te stellen. TNO rapport 2014 R10342
- Kaskieswijzer; <https://wiki.groenkennisnet.nl/display/KAS/Transmissie>
- 5L-Validation report Transvision testing of hemispherical light transmittance
- Dueck, T. A., Janse, J., Kempkes, F. L. K., Li, T., Elings, A. & Hemming, S., 2012.
Diffuus licht bij tomaat. Wageningen: Wageningen UR Glastuinbouw. 60 p. (Rapporten GTB; no. 1158)
- Garcia Victoria, N. and Kempkes, F. L. K., 2012.
Rapport: Diffuus licht bij roos. Web publication/site, Productschap Tuinbouw/MinEL&I. <http://www.energiek2020.nu/onderzoeken/detail/rapport-diffuus-licht-bij-roos/>
- Hemming, S., van Noort, F. R., Hemming, J. & Dueck, T. A., 2007.
Effecten van diffuus licht bij potplanten: resultaten van een teeltextperiment. Wageningen: Wageningen UR Glastuinbouw. 50 p. (Nota / Wageningen UR, Glastuinbouw; no. 454)
- Li, T., E. Heuvelink, T.A. Dueck, J. Janse, G. Gort and L.F.M. Marcelis, 2014.
Enhancement of crop photosynthesis by diffuse light: quantifying the contributing factors. *Annals of Botany* 114(1): 145-156

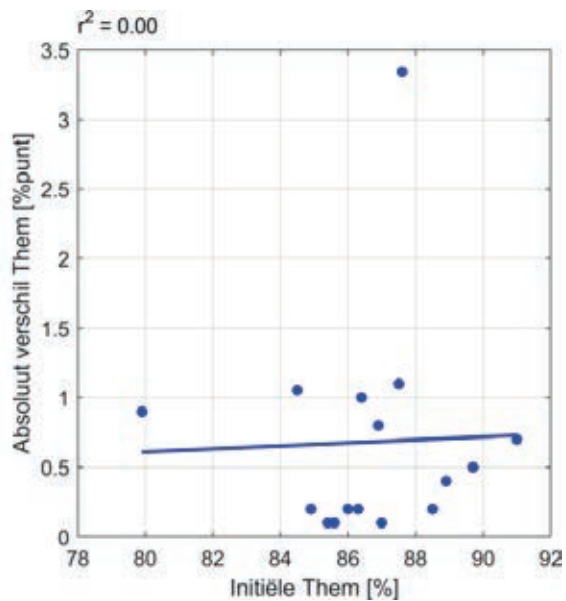
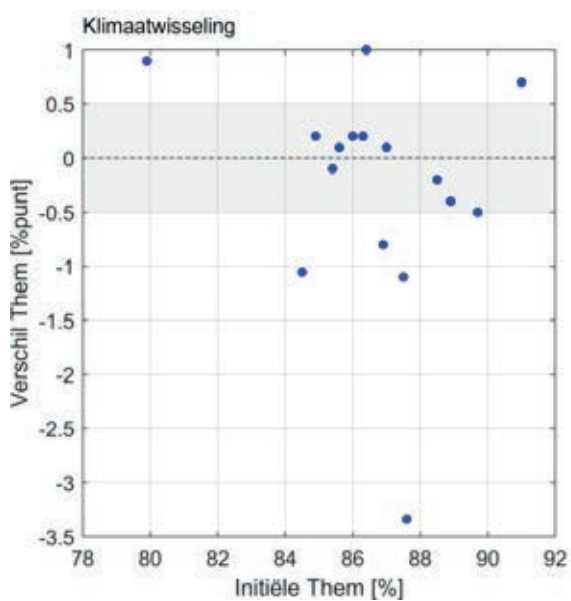
Bijlage 1 Analyse T_{hem}



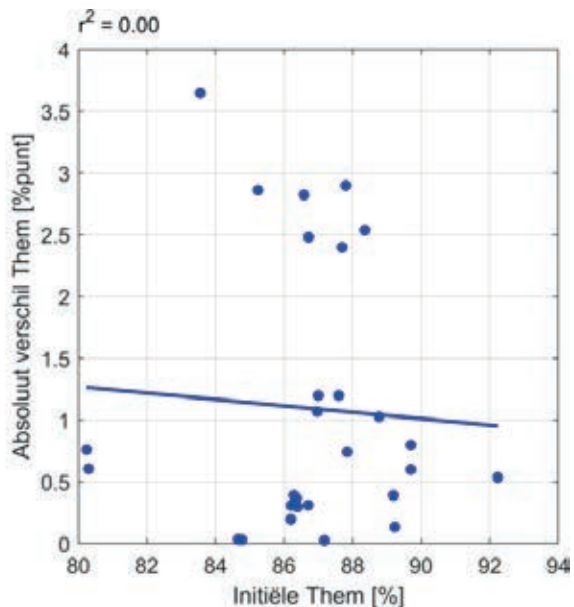
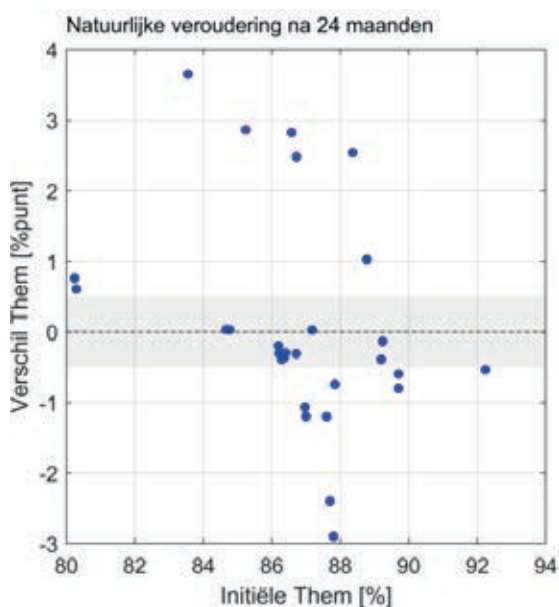
Figuur 37 Het verband tussen de mechanische stabiliteit en de initiële Them.



Figuur 38 Het verband tussen de chemische stabiliteit en de initiële Them.

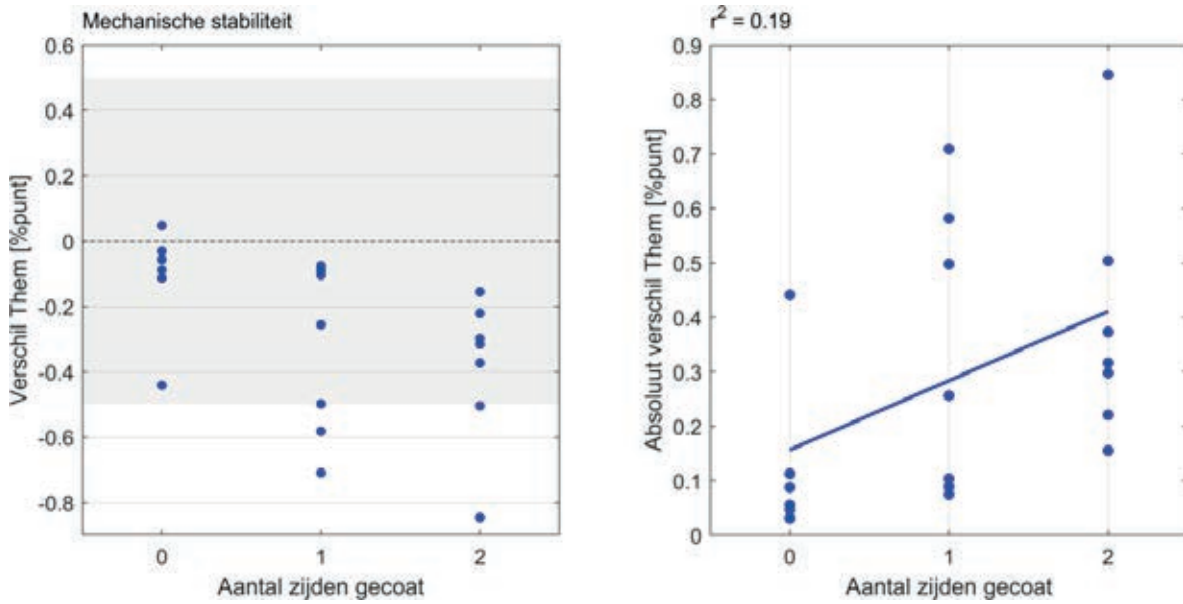


Figuur 39 Het verband tussen de klimaatwisseling en de initiële Them.

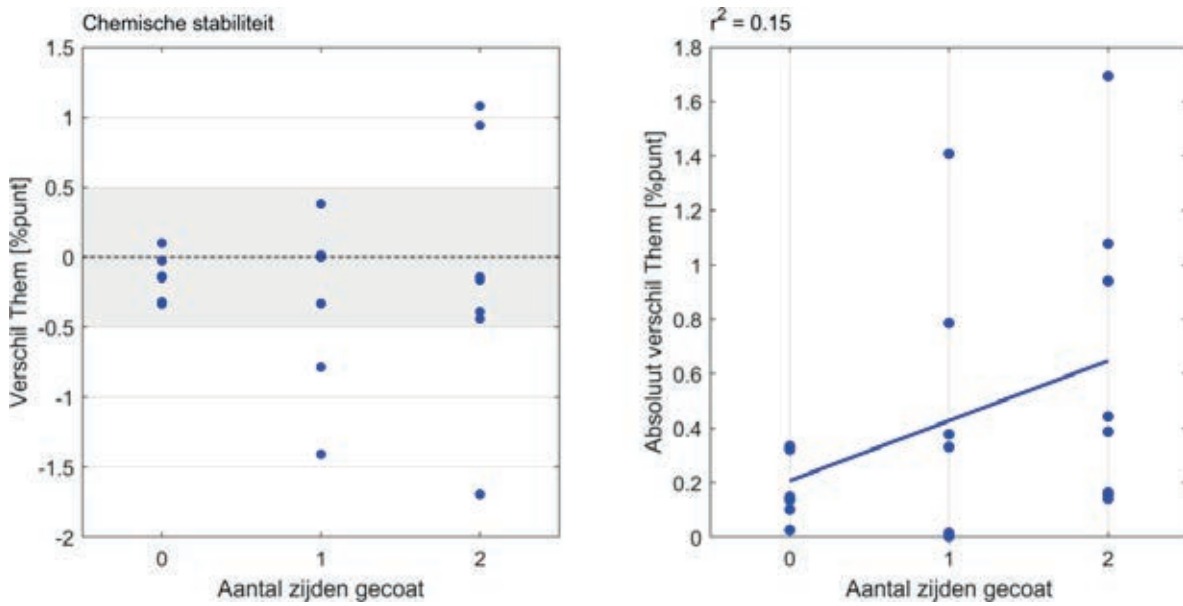


Figuur 40 Het verband tussen natuurlijke veroudering en de initiële Them.

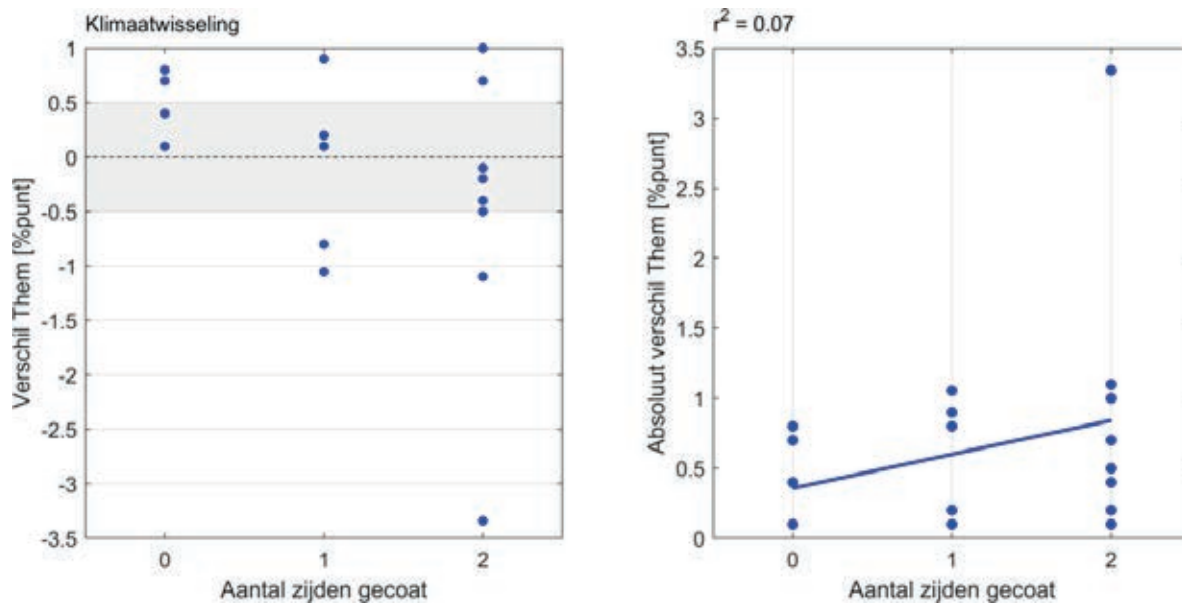
Bijlage 2 Analyse aantal coatings



Figuur 41 Het verband tussen de mechanische stabiliteit en aantal gecoate zijden.

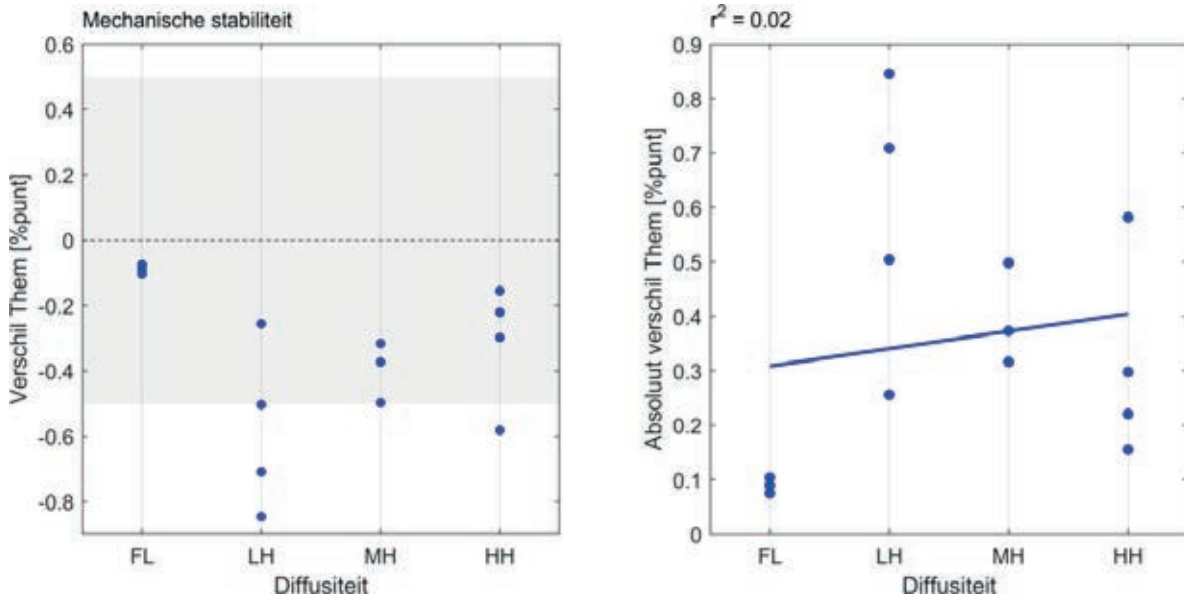


Figuur 42 Het verband tussen de chemische stabiliteit en aantal gecoate zijden.

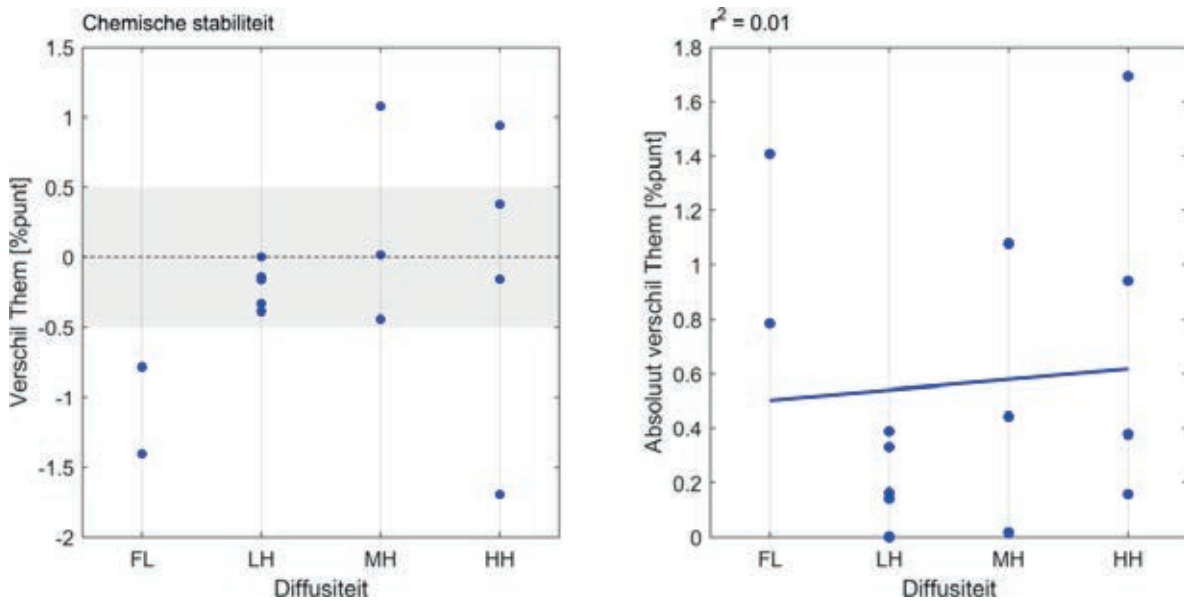


Figuur 43 Het verband tussen klimaatwisseling en aantal gecoate zijden.

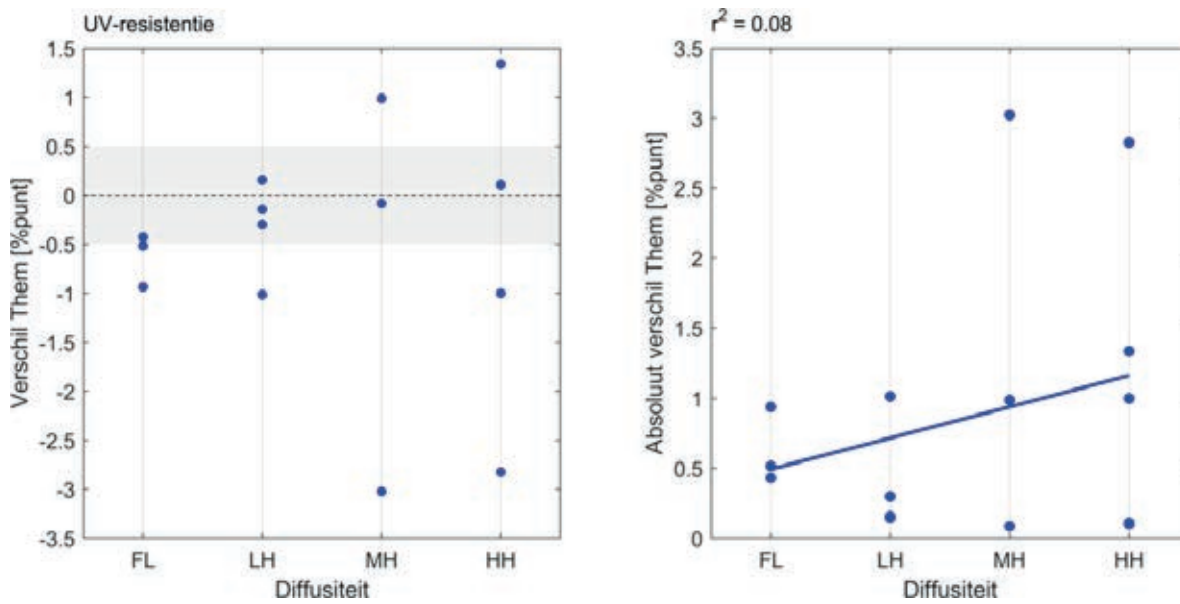
Bijlage 3 Analyse diffusiteit



Figuur 44 Het verband tussen de mechanische stabiliteit en diffusiteit.



Figuur 45 Het verband tussen de chemische stabiliteit en diffusiteit.



Figuur 46 Het verband tussen de UV-resistentie en diffusiteit.

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



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

Rapport WPR-1053

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