

# Een innovatief veiligheidsconcept voor "Freeform Design" glasconstructies

Bram De Cleen

Promotoren: prof. dr. ir.-arch. Jan Belis, prof. dr. ir. Rudy Van Impe  
Begeleider: prof. dr. ir. Guy Lagae

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van  
Master in de ingenieurswetenschappen: architectuur

Vakgroep Architectuur en stedenbouw  
Voorzitter: prof. dr. Bart Verschaffel

Vakgroep Bouwkundige constructies  
Voorzitter: prof. dr. ir. Luc Taerwe

Faculteit Ingenieurswetenschappen  
Academiejaar 2008-2009



# VOORWOORD

De realisatie van deze masterproef werd mogelijk dankzij de hulp van:

*Promotoren & begeleider:*

prof. dr. ir-arch. Jan Belis  
prof. dr. ir. Rudy Van Impe  
prof. dr. ir. Guy Lagae

*Directe betrokkenen:*

ir.-arch. Dieter Callewaert  
ir. Ives De Baere  
ir. Didier Delincé  
Joris Dierck  
Dennis Elias  
Tim Gijs  
Sofie Van Goethem  
Frank Verwimp  
Eric Vonck  
...

*Contactpersonen:*

Karl J. Deichmann  
Igno Dur  
Jürgen Küchler  
Simon Ortmeier  
Marcel Melis  
Patrick Redon  
Henk van Dijk  
Carina Vanoeteren  
...

*Familie:*

Guido De Cleen  
Nele De Cleen  
Mariette Heirbaut  
Frank Moons  
Niké Vanderpoorten  
...

De auteur geeft de toelating deze masterproef voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de masterproef te kopiëren voor persoonlijk gebruik.

Elk ander gebruik valt onder de beperkingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze masterproef

1 juni 2009

Handtekening

# OVERZICHT

Een innovatief veiligheidsconcept voor “Freeform Design” glasconstructies  
door Bram De Cleen

Promotoren: prof. dr. ir.-arch. Jan Belis, prof. dr. ir. Rudy Van Impe  
Begeleider: prof. dr. ir. Guy Lagae

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van  
Master in de ingenieurswetenschappen: architectuur

Vakgroep Architectuur en stedenbouw  
Voorzitter: prof. dr. Bart Verschaffel

Vakgroep Bouwkundige Constructies  
Voorzitter: prof. dr. ir. Luc Taerwe

Faculteit Ingenieurswetenschappen  
Academiejaar 2008-2009

## SAMENVATTING

In deze masterproef wordt onderzoek geleverd naar een veiligheidsconcept voor ‘Freeform Design’ glasconstructies onder de vorm van op het glasoppervlak aan te brengen polymeerlagen. De aandacht wordt daarbij gericht op een directe bescherming van de omgeving tegen vallend glas en de invloed van de polymeerlaag op het (post)destructief gedrag van de glasconstructies. Door enkele van de voorgestelde materialen effectief op glas aan te brengen, kon tevens op een gestructureerde manier de technologie onderzocht worden.

Het *eerste hoofdstuk* schetst het algemeen kader waarbinnen deze masterproef op zoek gaat naar een geschikt antwoord op de veiligheidsproblematiek die samengaat met ‘Freeform Design’ glasconstructies. Aan de hand van enkele voorbeelden en de bestaande veiligheidsfilosofieën die zijn ontwikkeld voor glasconstructies, worden de te vervullen eisen scherper gesteld, waarna de eerste mogelijke antwoorden worden aangereikt onder de vorm van *veiligheidsfilms* en *coatings*.

In *hoofdstuk 2* wordt diepgaander onderzoek geleverd naar de op het glasoppervlak aan te brengen coatings. Hierbij gaat de aandacht naar de specifieke eigenschappen van enkele potentiële polymeerproducten en de reeds bestaande applicatietechnieken die momenteel vooral hun toepassing kennen op metaal. Op basis van de vergaarde informatie wordt het bijgevolg mogelijk geacht een selectie te maken van de meest geschikte producten.

In het *derde hoofdstuk* wordt getracht drie polymeerproducten op vlakke glaselementen (met beperkte afmetingen) aan te brengen door middel van het *wervelsinteren*. Met behulp van een zestigtal glaselementen wordt daarbij gezocht naar een optimalisatie van de gerelateerde procesparameters, met als doel de esthetische kwaliteit van de coating te verbeteren en de coatingdikte te controleren.

*Het vierde hoofdstuk* kan omschreven worden als een vergelijkend onderzoek naar de performantie van de op glas aangebrachte polymeerproducten door middel van een vierpuntsbuigproef. Deze vervormingsgestuurde vierpuntsbuigproef om de zwakke as van de gecoate glaselementen laat toe de producten kwalitatief te evalueren aan de hand van de visuele waarnemingen en de bekomen kracht-verplaatsingsdiagramma tijdens de proeven. De aandacht wordt vooral gericht op de invloed van de polymeercoating op het (post)destructief gedrag van de glaselementen.

In *hoofdstuk 5* wordt één van de polymeerproducten toegepast op drie schaalmodellen van een glazen knikstabilisator voor een hyperslanke stalen kolom. Naast de invloed van de coating op het bezwijkgedrag van de kolom, laat deze gevalstudie een directe confrontatie toe tussen de geambieerde vormvrijheid van de glasconstructie en het coatingproces. Een reflectie over de praktische gevolgen van schaalvergroting op de ontwikkelde veiligheidsfilosofie en de gehanteerde coatingtechniek dringt zich daarbij tevens op.

In een *zesde en laatste hoofdstuk* wordt een samenvatting en besluit gegeven en zijn tevens enkele suggesties voor verder onderzoek geformuleerd.

Trefwoorden: glas, freeform, veiligheidsconcept, coatings, wervelsinteren.

# Innovative safety concept for “Freeform Design” glass constructions.

Bram De Cleen

Supervisor(s): prof. dr. ir.-arch Jan Belis, prof. dr. ir. Rudy Van Impe, prof. dr. ir. Guy Lagae

**Abstract-** This article gives an introduction on how polymer coatings can be applied on ‘Freeform Design’ glass constructions as an integrated safety concept in case of glass failure.

**Keywords-** Freeform glass, Safety concept, Coatings, Safety films, Anti-shatter

## I. INTRODUCTION

Inspired by the form and transparency of falling raindrops, new shapes and forms are introduced in the world of glass. Taking these wildly shaped glass forms to another level, to the scale of building constructions, some problems occur. Recent research on the welding of glass is being performed [1], so the introduction of ‘freeform’ glass as a possible building component (e.g. welded glass tube trusses) comes closer, but remains impossible unless the safety demands can be fulfilled. A solution is presented by applying a transparent polymer coating on flat glass specimens as well as on glass tubes that act as buckling protectors for a steel column.

## II. MATERIAL RESEARCH

As a safety concept for “Freeform Design” glass constructions the idea of using the traditional glass laminating techniques with a polymer interlayer had to be abandoned, not only because of the deterioration of the interlayer while welding the different glass parts together during post-processing, but also because of the physical incapability of laminating preprocessed ‘freeform’ glass (e.g. shrinking of the interlayer that inevitably occurs during lamination).

Applying an outer polymer layer on the preprocessed glass constructions in order to prevent the shattering of glass and/or to introduce some stiffness so that sudden collapse of the structure is prevented, was thought to be the solution. In order to fulfill these requirements two possibilities arise.

First of all, a strong scratch resistant safety film could be adhered to the glass surface with a pressure sensitive adhesive making use of the ‘squeegee’-technique. Although these films show high strength, their limited ‘freeform’ applicability is a serious drawback.

A second option was given by the coating industry, where polymer coatings are frequently used to protect metal from corroding [2]. Some of these techniques and products were already translated to glass substrates when used to protect glass labware and light bulbs from shattering. Clearly, the products used for these applications could form the starting point of the searched for safety concept.

Based on the available product specifications of the different polymers that are frequently being used for the mentioned applications, each possible ‘safety solution’ was visualized and compared to one another in Figure 1.

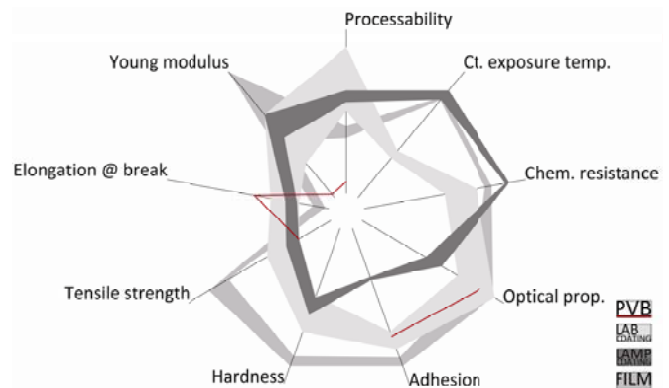


Figure 1: Comparison of main characteristics and their spread for different coating types and safety films.

In addition, studies showed that for some of the organic coatings the adhesion between glass and polymer could be improved by making use of chemical adhesion promoters (reactive silanes) [3] or by mechanically preparing the glass surface (sandblasting).

Because of the ability of applying coatings on quasi any possible shape and because of their relatively good mechanical qualities, the application and performance of coatings were tested as a possible safety concept for “Freeform Design” glass constructions.

## III. COATING PROCESS

First of all attention was given to the processing techniques and the performances of two products: *Abcite*<sup>®</sup> and *Levasint*<sup>®</sup>. The products were applied on small flat borosilicate glass specimens (230x50x2mm) using the *fluidized bed* technique [4]. During the coating process the preheated glass was immersed into the fluidized polymer bath and cured in an electrical radiation oven (Figure 2).

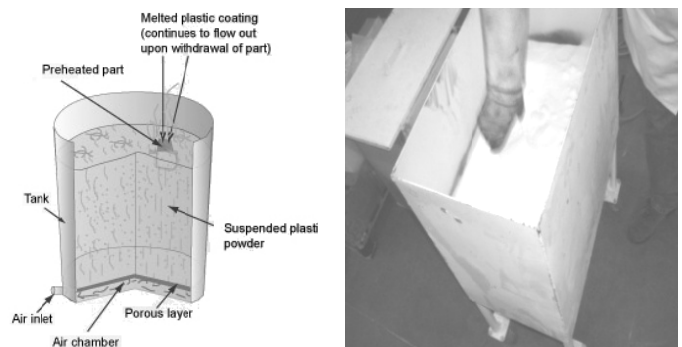


Figure 2: Scheme ([www.specialchem4coatings.com](http://www.specialchem4coatings.com)) and actual execution of the fluidized bed process.

During this process the different parameters that would not only determine the layer thickness, but also the esthetical quality of the polymer layer where taken into account (e.g. transparency, orange peel,...). It appeared that control of the preheating temperature was crucial to achieve a good coating quality. Where too high temperatures resulted in micro bubbles in the coating, too low temperatures of the substrate resulted in poor coating quality and uneven coating thickness. When the post heating temperature was too long, too high a brown discoloring of the coating would appear.

Using this technique and products a large amount of small flat glass elements were coated with different polymer layer thickness (0.1-0.5mm) and then submersed to four-point bending tests.

A third product, *Teflon*<sup>®</sup> was submersed to the same coating process. For this characteristic anti-stick product, adhesion between the preheated glass specimen and the fluidized polymer powder couldn't be achieved without mechanically and chemically preparing the glass surface.



Figure 3: Esthetical problems that occur as a result of bad process control.

#### IV. STRUCTURAL SAFETY

The behavior of the two different coatings applied on the previously mentioned glass specimens was evaluated during bending tests about the weak axis. The results of these test show not only a similar albeit small residual loadbearing capacity that was proportional to the coating thickness, but also enhanced break resistance of the glass specimens when using these polymer products. It was for this last subject that *Levasint*<sup>®</sup> showed slightly better test results. In none of the cases falling glass was noted, although small ruptures in the coatings initiated after large deformations of the test specimens (typically  $>L/30$ ).

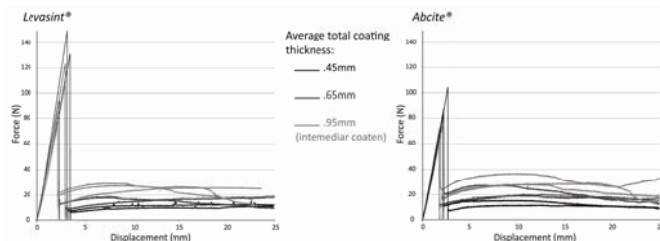


Figure 4: Comparison of the force-displacement diagrams of *Levasint*<sup>®</sup> and *Abcite*<sup>®</sup>.

#### V. APPLICATION ON A GLASS COLUMN

Making use of the *fluidized bed* technique *Levasint*<sup>®</sup> was applied on tree scale models of a hollow glass column (650x32x1.4mm) that functioned as a buckling protection for an integrated steel column [5]. The tree different spacer designs that were placed between the glass and the steel column resulted into two possibilities for the application of the polymer coating. In the first case the coating was only applied on the outer side of the glass tube, for the two other

tubes, the outer as well as the inner side of the tube was coated. During the coating process it was found difficult to control the coating thickness achieved on the inside of both tubes. This loss in process control resulted in limited uniformity of the inner polymer layer and optical distortions.

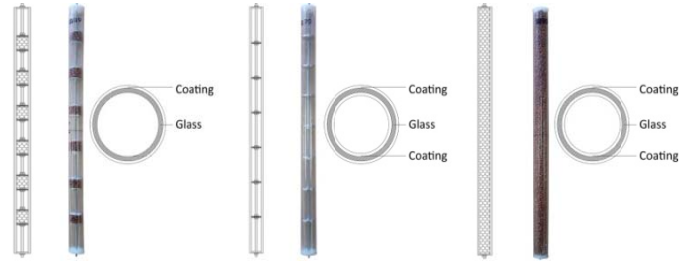


Figure 5: Tree types of columns and the matching coating concept.

Testing these scale models during axial pressure tests, the coated glass tubes showed a remarkable high loadbearing capacity and structural safety after glass failure due to the crack stopping effect of the coating. As a result, overload lead to local buckling of the unsupported (steel) column ends instead of a loss of buckling support by glass failure. For the tree cases the coating was completely intact after testing, and a significant residual loadbearing capacity was notated (typicaly 7kN).

#### VI. CONCLUSIONS

Based on the test results of the small scale models it can generally be cited that the required safety in "Freeform Design" glass construction by preventing glass from shattering and introducing structural safety in case of glass break was successfully achieved by applying a transparent polymer coating on the glass surface. Second of all the limited experience with the *fluidized bed* application technique showed a promising ease of processing when applying the coating on glass tubes.

It's obvious that these 'small' successes will need to be verified on real scale models in order to confirm the potential of the application techniques and the achieved positive influences of polymer coatings on the safety of "Freeform Design" glass constructions.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

The author gratefully acknowledges the suggestions of my supervisor prof .dr. ir.-arch. Jan Belis during the research and completion of this article. Frank Verwimp also deserves gratitude for his help and suggestions when applying the different coatings.

#### REFERENCES

- [1] AA.VV., *Opportunities for the Welding and Hot-Shaping of Borosilicate Glass Tubes in Building Structural Applications*, Proceedings of Challenging Glass, 2008; 193-204.
- [2] AA.VV., *BBT voor de metaalbewerkende nijverheid*, Academia Press, Gent, 2008.
- [3] AA.VV., *Untersuchung von Kunststoffbeschichtungen auf Laborgeräten und Chemikalienflaschen aus Glas*, Rapport Nr. : 9757, 1996.
- [4] Akzo Nobel, *Complete Guide to Powder Coatings*, Issue 1, November 1999.
- [5] Van Goethem S., *Constructief ontwerp van een hyperslanke stalen kolom in een elegant glazen jasje*, masterproef, Universiteit Gent, 2009.

## AFKORTINGEN & SYMBOLEN

|                 |                                                   |
|-----------------|---------------------------------------------------|
| $\sigma_{\max}$ | breukspanning                                     |
| CEC             | Cold-End Coating                                  |
| CVD             | Chemical Vapor Deposition                         |
| E/VOH           | ethyleen vinyl alcohol.                           |
| EVA             | ethyleen vinylacetaat                             |
| FEP             | fluoroethyleen propyleen copolymeer               |
| $F_{\max}$      | bezwijkbelasting                                  |
| HEC             | Hot-End Coating                                   |
| L               | afstand tussen de steunpunten, overspanning.      |
| MFA             | polytetrafluoroethyleen perfluor methylvinylether |
| PA              | polyamiden (Nylon)                                |
| PE              | polyethyleen                                      |
| PET             | polyethheen tereftalaat                           |
| PFA             | perfluoralkoxy fluorocarbon                       |
| PMMA            | polymethyl methacrylaat                           |
| PSA             | Pressure Sensitive Adhesive                       |
| PU              | polyurethaan                                      |
| PVB             | polyvinyl butyral                                 |
| PVC             | polyvinylchloride,                                |
| PVD             | Physical Vapor Deposition                         |
| t               | tijd                                              |
| $T_{\max,i}$    | maximale voorverwarmingstemperatuur               |
| $T_{\max,t}$    | maximale <i>moffel</i> temperatuur                |

# INHOUD

|                                                    |                                                                            |           |
|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>HOOFDSTUK 1</b>                                 | <b>TECHNOLOGIE</b>                                                         | <b>1</b>  |
| ALGEMEEN                                           | - GLASS ISN'T PERFECT -                                                    | 1         |
| GLAS                                               | - $\text{SiO}_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{CaCO}_3 = \text{SiO}_4$ - | 3         |
| 1. Eigenschappen & samenstelling                   |                                                                            | 3         |
| 2. Gehard                                          |                                                                            | 4         |
| 3. Gelaminereerd                                   |                                                                            | 4         |
| VEILIGHEIDSCONCEPT                                 | - FILMS & COATINGS -                                                       | 5         |
| 1. Veiligheidsfilms                                |                                                                            | 6         |
| 2. Coatings                                        |                                                                            | 9         |
| REFERENTIES                                        | - IMAGINE ONLY GLASS -                                                     | 10        |
| 1. Transparante glasgevel ondersteuning   tu delft |                                                                            | 10        |
| 2. Transparante kolom   zappi tu delft             |                                                                            | 11        |
| 3. U-profielglas met PU-lak                        |                                                                            | 12        |
| 4. Gecoate glazen buis                             |                                                                            | 12        |
| <b>HOOFDSTUK 2</b>                                 | <b>COATING</b>                                                             | <b>14</b> |
| ALGEMEEN                                           | - PAINTING THE FUTURE -                                                    | 14        |
| TECHNIEKEN                                         | - THE ISSUE OF SAFETY REVISED -                                            | 14        |
| 1. Dampfase-depositie                              |                                                                            | 14        |
| 2. Poederlakken                                    |                                                                            | 16        |
| 3. Natlakken                                       |                                                                            | 20        |
| 4. Andere                                          |                                                                            | 23        |
| MATERIALEN                                         | - THE ISSUE OF SAFETY REVISED -                                            | 25        |
| 1. Lamp coatings                                   |                                                                            | 26        |
| 2. Labware coatings                                |                                                                            | 28        |
| SELECTIE                                           | - KILL YOUR DARLINGS -                                                     | 30        |
| <b>HOOFDSTUK 3</b>                                 | <b>COATINGPROCES</b>                                                       | <b>33</b> |
| ALGEMEEN                                           | - A NEW BEGINNING -                                                        | 33        |
| TEST CASE                                          | - LEVASINT® -                                                              | 34        |
| 1. Voorbereiding                                   |                                                                            | 35        |
| 2. Coaten                                          |                                                                            | 36        |
| 3. Bevindingen                                     |                                                                            | 39        |
| 4. Bemerkingen                                     |                                                                            | 40        |
| LEVASINT®   ABCITE®   TEFLON®                      | - TRIAL... TRIAL AND ERROR -                                               | 40        |
| 1. Voorbereiding                                   |                                                                            | 40        |
| 2. Coaten                                          |                                                                            | 41        |
| CONCLUSIES                                         | - SOURCE OF DISCUSSION -                                                   | 48        |

|                          |                                       |               |
|--------------------------|---------------------------------------|---------------|
| <b>HOOFDSTUK 4</b>       | <b>TESTEN</b>                         | <b>51</b>     |
| ALGEMEEN                 | - SHORT INTRODUCTION -                | 51            |
| TEST CASE                | - NO SOUND OF FALLING GLASS -         | 52            |
| 1. Proefopstelling       |                                       | 52            |
| 2. Proefstukken          |                                       | 53            |
| 3. Testen                |                                       | 54            |
| 4. Bemerkingen           |                                       | 58            |
| LEVASINT®   ABCITE®      | - SURVIVAL OF THE FITTEST -           | 58            |
| 1. Proefopstelling       |                                       | 58            |
| 2. Proefstukken          |                                       | 59            |
| 3. Vergelijk             |                                       | 60            |
| CONCLUSIES               | - THE SAME... SAME BUT DIFFERENT -    | 64            |
| <br><b>HOOFDSTUK 5</b>   | <br><b>GLAZEN KOLOM</b>               | <br><b>66</b> |
| ALGEMEEN                 | - CO-OPERATION -                      | 66            |
| PRODUCTINFORMATIE        | - LEVASINT® -                         | 67            |
| 1. Parameters            |                                       | 67            |
| COATEN                   | - THE FINE ART OF SURFACING -         | 69            |
| 1. Proefstukken          |                                       | 69            |
| 2. Uitvoeringsparameters |                                       | 70            |
| 3. Uitvoering            |                                       | 72            |
| 4. Resultaten            |                                       | 74            |
| TESTEN                   | - UNDER PRESSURE -                    | 76            |
| 1. Proefstukken          |                                       | 76            |
| 2. Proefopstelling       |                                       | 81            |
| 3. Bemerkingen           |                                       | 82            |
| VERGELIJK                | - NOTHING COMPARES -                  | 83            |
| 1. Analyse               |                                       | 83            |
| 2. Bevindingen           |                                       | 88            |
| CONCLUSIES               | - SIZE DOES MATTER -                  | 88            |
| <br><b>HOOFDSTUK 6</b>   | <br><b>SAMENVATTING &amp; BESLUIT</b> | <br><b>90</b> |
| SAMENVATTING             | - RETROSPECTIVE -                     | 90            |
| BESLUIT                  | - EVERY END IS A NEW BEGINNING -      | 93            |
| <b>BIJLAGEN</b>          |                                       | <b>I</b>      |
| BIJLAGE A                | - PRODUCTINFORMATIE -                 | II            |
| BIJLAGE B                | - COATEN VLAKGLAS -                   | XII           |
| BIJLAGE C                | - TESTEN VLAKGLAS -                   | XLII          |
| BIJLAGE D                | - BUIZEN AFMETINGEN -                 | XLVIII        |
| <b>BIBLIOGRAFIE</b>      |                                       | <b>LIX</b>    |

*"From the inside there will be uninterrupted visual contact with the exterior World. The sun and the moon will shine in the landscape and the sky will be completely visible,..."*  
Buckminster Fuller

## ALGEMEEN

## - Glass isn't perfect -

Glas is een bijzonder materiaal. Met kiezelzand als basisgrondstof, wordt op een voldoende hoge temperatuur (1500°C) de *smelt* gevormd, die in onderkoelde vorm de unieke eigenschappen van transparantie en sterkte vertoont, maar tegelijk ook zeer bros is. Glas vormt een uitdaging voor architecten en ingenieurs die dit materiaal voor diverse toepassingen hanteren en daarbij de grenzen steeds trachten te verleggen, strevend naar maximale transparantie en vormvrijheid. Een evolutie van glasgebruik in de architectuur is dan ook duidelijk zichtbaar: waar glas het venster op de wereld opende bij de introductie van ramen in woningen, vormt het als structureel materiaal voor balken (bijvoorbeeld ter ondersteuning van het glazen dak van de faculteit Geneeskunde van de Universiteit Glasgow), vloeren (zoals de Grand Canyon Skywalk of het Vlaams parlement) en trappen (vb.: Apple Glass Cube in New York) vandaag geen uitzondering meer.

Deze ontwikkeling was echter enkel mogelijk indien bij eventuele glasbreuk voldoende veiligheid kon worden verzekerd, wat wil zeggen dat het brosse karakter van glas moest kunnen worden gecompenseerd. De noodzakelijke veiligheid wordt vaak geïntroduceerd door de constructie te overdimensioneren en redundantie in te bouwen, of door gebruik te maken van adhesieve kunststof tussenlagen die zich tussen de afzonderlijke glasplaten bevinden. Deze polymeertussenlagen bieden een dubbel voordeel. Eerst en vooral worden bij glasbreuk vallende scherven vermeden doordat deze aan de polymeerlaag blijven kleven. Anderzijds worden deze glasscherven samengehouden, waardoor drukspanningen in het glas vooralsnog kunnen worden opgebouwd en de polymeerlaag de trek kan opnemen. Dit laatste heeft tot gevolg dat de structuur niet meteen bezwijkt en dus het traditioneel bros glas een zekere ductiliteit krijgt wanneer het samen met een polymeerlaag tot een hybride structuur wordt omgevormd. Het vertraagd bezwijkgedrag geeft de tijd om eventuele glasbreuk (door overbelasting, impact,...) op te merken, te evalueren en de nodige maatregelen te treffen vooraleer de constructie bezwijkt.

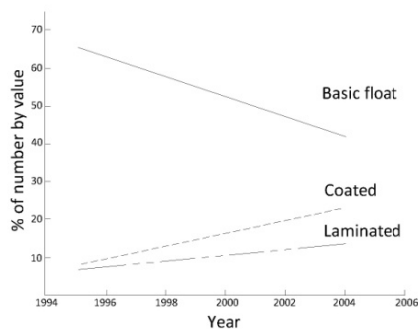
Toenemend gebruik van glas zorgde er tevens voor dat er vandaag diverse coatings beschikbaar zijn die de optische, thermische, mechanische, chemische, elektrische,... eigenschappen van dit unieke materiaal kunnen veranderen en zelfs verbeteren. Deze ontwikkeling heeft er voor gezorgd dat het punt bereikt is, waarop het gebruik van 'traditioneel' glas vaak moet wijken voor de gecoatete variant.

Wanneer naar lampen, exotisch gevormde parfumflacons of het uitgebreid gamma aan glazen laboratoriummateriaal wordt gekeken, lijkt het inmiddels mogelijk geworden om glas naar de wensen van de gebruiker te vormen. De groeiende ambitie om deze vormvrijheid te vertalen naar architecturale glastoepassingen blijkt onder andere uit recentelijk onderzoek dat peilt naar de mogelijkheden en de sterkte van aan elkaar gelaste glazen buizen<sup>1</sup>. Wanneer deze gelaste glaselementen worden ingezet als structureel element, ontstaat echter een noodzakelijk te verwezenlijken veiligheidseis. Aangezien om aan deze veiligheidseis te voldoen, de traditionele adhesieve kunststof tussenlagen niet onmiddellijk toepasbaar zijn omwille van het verbranden van de

<sup>1</sup> AA.VV., *Opportunities for the Welding and Hot-Shaping of Borosilicate Glass Tubes in Building Structural Applications.*, Proceedings of Challenging Glass, 2008, pp.193-204.

tussenlaag bij het lassen van reeds gelamineerde buizen of omwille van de onverenigbaarheid van de vorm van het glaselement met het laminatieproces (Figuur 1. 4). Deze laatste beperking maakte echter al voorwerp uit van diverse onderzoeken (cfr. *Referenties*), waaruit enkele voorstellen kunnen worden gedestilleerd om veiligheid te introduceren in eenvoudige ronde glazen kolommen. De esthetische beperkingen of de specificiteit van sommige van deze oplossingen laat echter niet toe deze te vertalen als algemeen geldend veiligheidsconcept voor de zogenaamde 'Freeform Design' glasconstructies.

In dit kader zal deze masterproef een algemeen toepasbare oplossing trachten te onderzoeken en formuleren. De aandacht wordt gericht op experimenteel onderzoek naar het effect van coatings op het postdestructief gedrag van glas en meer bepaald op 'Freeform Design' glas. Er wordt immers vastgesteld dat ondanks het steeds toenemend gebruik van coatings (Figuur 1. 1)<sup>1</sup>, de grote diversiteit, het gemak waarmee ze kunnen worden aangebracht (zelfs op zeer onregelmatige oppervlakken zoals lampen, Figuur 1. 2<sup>2</sup>) en de vaak hoge duurzaamheid, er nog maar weinig of geen onderzoek is verricht naar het mogelijk effect van coatings op de ductiliteit van structurele glas(-coating)elementen.



Figuur 1. 1 Veranderingen in productieaandeel van glas in Europa.  
-Bron: VEER, F., *The Future of the All Transparent Pavilion Concept*-



Figuur 1. 2 Teflon® FEP Lamp coating  
-Bron: [www.advancedlampcoatings.com](http://www.advancedlampcoatings.com)-

Dit onderzoek dient in een aantal stappen te worden uitgevoerd, waarbij in een eerste fase de zoektocht start naar de voor deze toepassing geschikte coatingproducten en uitvoeringstechnieken. Een overzicht van de verzamelde productinformatie zal het vervolgens mogelijk moeten maken een eerste beeld te schetsen van het potentieel van de verschillende coatings als veiligheidsconcept en de voor- en nadelen van elk product met elkaar te vergelijken. Aan de hand van de verworven kennis zullen enkele van deze coatings worden aangebracht op vlakke glaselementen met behulp van de geschikte uitvoeringstechniek. Het onderkennen van de belangrijkste procesparameters tijdens het coaten, maken daarbij een belangrijk deel uit van het onderzoek en laten toe inzicht te verwerven in welke mate deze kunnen worden gewijzigd om de toepasbaarheid op 'Freeform Design' glasstructuren te kunnen beoordelen en eventueel te optimaliseren.

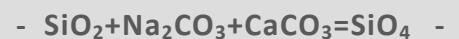
<sup>1</sup> Met gecoat glas wordt in deze figuur verwezen naar glas dat voorzien werd van een zogenaamde *functionele coating* (vb: zelfreinigend glas, glas met verbeterde thermische prestaties,...). De veiligheidscoatings die in deze masterproef worden behandeld vallen echter niet binnen deze categorie.

<sup>2</sup> Het gebruik van gecoat glas is in 10 jaar verdrievoudigd.

Op destructieve wijze zal vervolgens het algemeen gedrag van de gecoate elementen en van de coating in het bijzonder, kwalitatief worden beoordeeld, waarbij parameters zoals de bezwijkbelasting, delaminatie, het breukpatroon, het restdraagvermogen,... zullen worden beschouwd. De testen op vlakglas zullen gevolgd worden door een praktische toepassing op glazen buizen in samenwerking met Sofie Van Goethem ("*Constructief ontwerp van een hyperslanke stalen kolom in een elegant glazen jasje*"). Naast een beoordeling van het gebruikte coatingproduct als veiligheidsconcept, zullen specifieke problemen met betrekking tot het aanbrengen van de coating en de geometrie van de glasconstructie worden geanalyseerd; alsook zullen de mogelijke omgevingsinvloeden (zure regen, detergenten, UV/IR stralen) die een nefast effect op het gedrag van de aangebrachte coating zouden kunnen hebben, worden onderzocht

In wat volgt, zal naast een beperkte inleiding over glas, een overzicht worden gegeven van de algemene veiligheidsfilosofieën die bij glasconstructies worden gehanteerd. Daarnaast worden enkele voorstellen gedaan om de noodzakelijke veiligheidseis en de gewenste vormvrijheid voor glasconstructies met elkaar te verzoenen.

## GLAS

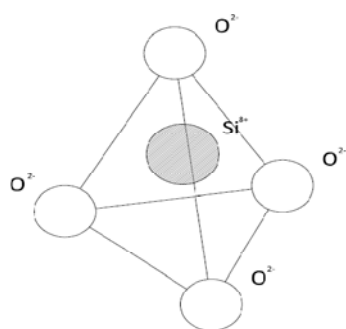


### 1. EIGENSCHAPPEN & SAMENSTELLING

Glas is een anorganisch smeltproduct dat chemisch algemeen wordt beschreven door een  $\text{SiO}_4$ -tetraëder (Figuur 1. 3) en ontstaat bij het gecontroleerd afkoelen van de *smelt*, die hoofdzakelijk is samengesteld uit kiezelzand ( $\text{SiO}_2$ ), soda ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) en kalk ( $\text{Ca}_2\text{CO}_3$ ). Het gebruik van deze laatste twee toeslagstoffen zorgt voor een beter verwerkbaar en dus goedkopere glassoort (natronkalkglas<sup>1</sup>), die dan ook frequent wordt gehanteerd in de bouwsector. Het is tevens dankzij de siliciumbasis dat glas de unieke eigenschap van transparantie bekommt. Tijdens het afkoelingsproces zal het siliciumoxide de amorfe structuur - die typisch is voor vloeistoffen - weten te behouden, waardoor de *smelt* niet opaak wordt bij het stollen. In deze basisstructuur schuilt echter ook de grootste zwakte van dit materiaal, namelijk dat er door de negatief geladen schil van de  $\text{SiO}_4$ -piramide microscheurtjes ontstaan in het glasoppervlak die verantwoordelijk zijn voor de plotse brose breuk na het doorlopen van een lineair elastische curve, die kenmerkend is voor glas. De theoretisch enorm grote treksterkte van glas zal hierdoor in belangrijke mate worden gereduceerd. Andere belangrijke eigenschappen van natronkalkglas worden vermeld in onderstaande tabel (Tabel 1. 1).

Het glas dat typisch gebruikt wordt voor zogenaamde 'Freeform Design' constructies, kent een licht afwijkende chemische samenstelling, gekenmerkt door een beperkte hoeveelheid booroxide (7-15%) wordt er vaak naar verwezen als borosilicaatglas (*Pyrex*). Deze glassoort is beter bestand tegen temperatuurschokken en vertoont typisch een lineaire thermische uitzettingscoëfficiënt die één- tot tweederde van die van natronkalkglas bedraagt.

<sup>1</sup> Andere benamingen mogelijk: sodo-calciet-silicaatglas, soda lime glass (Eng.)



Figuur 1. 3 Silicium-zuurstoftetraëder.

Tabel 1. 1 Eigenschappen van sodo-calciet-silicaat-glas.<sup>1</sup>

| EIGENSCHAPPEN                      | WAARDE                    |
|------------------------------------|---------------------------|
| Volumieke massa bij 18 °C          | 2500 kg/m <sup>3</sup>    |
| Elasticiteitsmodulus E             | 70000 N/mm <sup>2</sup>   |
| Coëfficiënt van Poisson $\nu$      | 0,2                       |
| Mohs hardheid                      | 6                         |
| Smelttemperatuur                   | 1500 °C                   |
| Verwekingstemperatuur              | 600 °C                    |
| Lineaire uitzettingscoëf. $\alpha$ | $9 \cdot 10^{-6}$ m/(m.K) |
| Warmtegeleidingscoëf. $\lambda$    | 1 W/(m.K)                 |
| Brekingsindex $\eta$               | 1.5                       |

## 2. GEHARD

Ondanks de praktische beperkte waarden voor de treksterkte van glas, kan deze toenemen door glas chemisch<sup>2</sup> of thermisch te harden, volgens een principe dat het best vergeleken kan worden met het voorspannen van gewapend beton, waarbij het glas als materiaal onveranderd blijft. Door het glas hetzij op te warmen (tot 600°C) en snel weer af te koelen, hetzij chemisch te behandelen (onderdompelen in een zoutbad), is men in staat voor(druk)spanning te introduceren in het glasoppervlak. Het is de gegenereerde drukspanning die de initiële microscheurtjes dichtdrukt en die bij belasting eerst dient te worden opgeheven vooraleer de intrinsieke treksterkte van het glas wordt aangesproken en de scheurgroei start. Ingevolge de behandeling zal het breukpatroon van gehard glas typisch kleine, niet scherpe fracties vertonen in tegenstelling tot uitgegloeid glas dat in grote scherpe scherven uiteenvalt.

Dankzij de dompeltechniek die wordt gehanteerd bij het chemisch harden van glas, is het mogelijk om zelfs in het geval van een complexere geometrie van zogenaamd 'Freeform Design' glas een zekere drukspanning aan te brengen over het gehele glasoppervlak, zij het dat deze spanning slechts in een zeer dunne laag (20-300  $\mu\text{m}$ ) wordt geïntroduceerd.

## 3. GELAMINEREERD

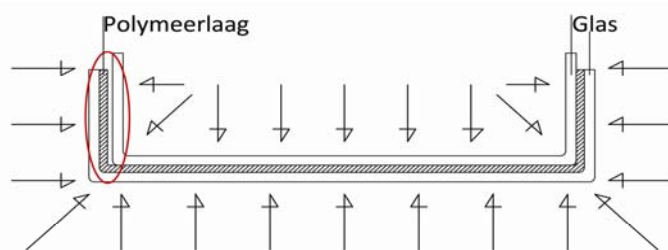
Het vermelde brosse karakter van glas blijft echter - ondanks het hardingsproces - ontoelaatbaar wanneer het wordt gebruikt voor structurele toepassingen. Om op deze problematiek een antwoord te formuleren is in de voorbije decennia een techniek ontwikkeld, die twee of meerdere glasvlakken met elkaar verkleeft door middel van een adhesieve polymeertussenlaag, het zogenaamd laminatieproces. Door het lamineren van de verschillende glasplaten is het mogelijk een zekere redundantie te introduceren in glasstructuren. Een vaak voorkomend onderscheid wordt gemaakt tussen het gebruik van kunststoffilms en de gietharsen, die elk een eigen specifiek toepassingsgebied en productieproces hebben in de wereld van gelamineerd glas. Bij het gebruik van de diverse kunststoffilms zoals polyvinyl butyral (PVB), ethyleen vinylacetaat (EVA) en SentryGlas (SG) dienen na het aanbrengen van de film tussen de glasvlakken, de mogelijk ingesloten luchtbellen te worden uitgewalst om de optische en mechanische eigenschappen van het gelamineerd glas te waarborgen. Daarna verdwijnt het geheel in de autoclaaf, waarbij door de hoge temperatuur (250°C) en druk een goede hechting tussen de film en de glasplaten wordt gerealiseerd. Dergelijke gelamineerde glasplaten kennen vooral hun

<sup>1</sup> WTCB, *Glas en glasproducten, functies van beglazing*, Technische Voorlichting 214, december 1999, p.9.

<sup>2</sup> Door ionenuitwisseling tussen het glasoppervlak ( $\text{Na}^+$ -ionen) en de  $\text{KNO}_3$ -oplossing (groter  $\text{K}^+$ -ionen) ontstaat er drukspanning aan het glasoppervlak.

toepassing als structureel en veiligheidsglas. Wanneer het constructief gebruik van gelamineerd glas zich echter niet langer meer beperkt tot vlakke toepassingen zoals vloeren, balken, rechthoekige kolommen,... mag het duidelijk zijn dat het voorgenoemde noodzakelijke walsen en de geometrie als dusdanig (Figuur 1. 4 & Figuur 1. 13) een belangrijk obstakel gaan vormen<sup>1</sup>.

Het gebruik van vloeibare harsen laat zich daarentegen makkelijker aan complexer vormgegeven elementen aanpassen. Traditioneel wordt met behulp van een afstandshouder een holte (1-4mm) tussen twee glasplaten gevormd, waartussen het vloeibaar hars wordt gegoten. De uitharding gebeurt onder invloed van UV-stralen, warmte of katalysatoren. Waar deze harsen vroeger werden gekenmerkt door hun vrij bros karakter (en dus niet meteen geschikt leken voor structurele toepassingen), hebben recente ontwikkelingen er voor gezorgd dat naast de akoestische kwaliteit, ook de impactweerstand is verbeterd, wat tot eventuele nieuwe toepassingsmogelijkheden leidt op gebied van structureel 'freeform' glasgebruik. \_I



Figuur 1. 4 Probleem bij het lamineren t.g.v. de geometrie van eenvoudige 'freeform' glasstructuur.

Voor een uitgebreide inleiding over glas wordt verwezen naar de veelvuldig beschikbare literatuur.\_II, III, IV, V

## VEILIGHEIDSCONCEPT

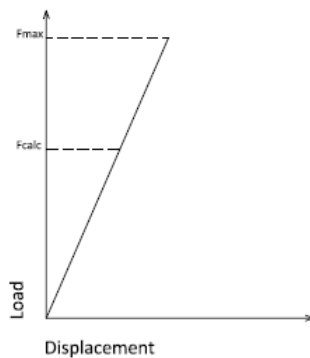
## - Films & Coatings -

Zoals reeds vermeld, worden er verschillende technieken toegepast om de veiligheid te introduceren bij het gebruik van structurele elementen uit glas (lamineren, harden, overdimensionering). Het is mogelijk om daarbij uit te gaan van twee fundamenteel verschillende veiligheidsfilosofieën (Figuur 1. 5 & Figuur 1. 6<sup>2</sup>). Enerzijds kan een onderdeel van een welbepaald structureel element worden beschermd door het te bekleden met extra glazen elementen, zodat het moeilijker wordt om het effectief dragende element te beschadigen. De algehele constructie krijgt hierdoor relatief grote afmetingen, wat vaak als een nadelig gevolg van dergelijk veiligheidsconcept wordt beschouwd. Anderzijds kan er naar een hybride constructie worden gestreefd, waarbij glas samen met harsen, plastic films,... voor een voldoende ductiele structuur zorgt. Wanneer de maximale belasting optreedt, zal de structuur zeer sterk gaan vervormen en dus waarschuwen alvorens volledig te bezwijken. Het reeds vermelde lamineerproces is een techniek die dergelijk concept indachtig houdt, maar gezien de praktische beperkingen wanneer deze letterlijk zou worden vertaald naar 'freeform' glasconstructies, wordt gezocht naar een ander en geschikter proces om een kunststoflaag met glas te combineren. Een techniek die echter al bestond, maar zelden wordt toegepast om de veiligheid

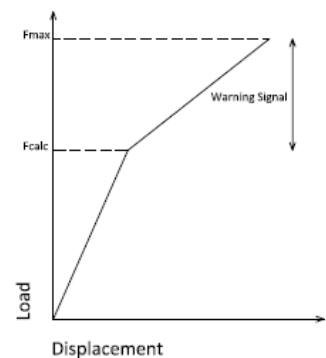
<sup>1</sup> Met behulp van een 'vacuüm bag' is men in staat beperkt gebogen oppervlakken (vb: autoruit) met een polyvinyl butyral (PVB) film te lamineren.

<sup>2</sup> Overgenomen uit: BOS F, *Designing and Planning the World's Biggest Experimental Glass Structure*, Glass Processing Days, 2005.

van constructief glas te garanderen, is de polymeerlaag aanbrengen met behulp van diverse en courant gebruikte coatingtechnieken of door verlijming van veiligheidsfilms aan het glasoppervlak.



Figuur 1. 5 Overdimensionering zodat kan worden ondersteld dat  $F_{\max}$  nooit wordt bereikt.



Figuur 1. 6 Hybride constructies zorgen voor ductiliteit van de structuur.

Bron: BOS F, Designing and Planning the World's Biggest Experimental Glass Structure-

In het complex kluwen van producten die momenteel reeds worden toegepast in bepaalde takken van de glasverwerkingsindustrie, zal onderstaande duidelijkheid trachten te scheppen. Hierbij zal een eerste onderscheid worden gemaakt tussen *veiligheidsfilms* en *coatings*. Deze laatste zullen samen met frequent toegepaste coatingtechnieken in het volgende hoofdstuk (*hoofdstuk 2*) uitvoerig worden toegelicht. Met behulp van de door de producenten vermelde technische productdata en de gehanteerde toepassingstechnieken wordt steeds getracht een gefundeerde selectie te maken van de meest geschikte materialen in het raam van de beoogde doelstellingen.

## 1. VEILIGHEIDSFILMS

*Veiligheidsfilms*, vaak (ten onrechte) gereduceerd tot eenvoudige zelfklevende plasticfolies, die frequent op glas worden aangebracht met de ambitie het glas te beschermen bij impact, vormen een bijzonder onderdeel in de zoektocht naar een geschikt veiligheidsconcept voor 'Freeform Design' glasconstructies. De grote diversiteit aan specifieke basismaterialen en samenstellingswijzen van deze films doen echter al vermoeden dat van de vooropgestelde eenvoud vandaag geen sprake meer is en dat zowel de keuze als het vervaardigen van dergelijke films een complex proces vormt.

De basis van het merendeel van deze veiligheidsfilms bestaat - algemeen beschouwd - evenwel hoofdzakelijk uit één of meerdere polyesterlagen ( $PET^1$ ) die met elkaar en met het glas verkleefd worden met behulp van een drukgevoelige lijm ( $PSA^2$ ). Hoewel verschillende fabrikanten in essentie gelijkaardige films op de markt lijken te brengen (*Bijlage A-veiligheidsfilms*), kan de kwaliteit en het specifiek type van de samenstellende componenten een belangrijke invloed uitoefenen op de uiteindelijke eigenschappen van de film, wat duidelijk blijkt uit de relatief grote spreiding van de resultaten (Figuur 1. 8) in vergelijking tot die van coatings (Figuur 2. 17).

<sup>1</sup> PET: polyethen tereftalaat is een thermoplastisch polymeer en maakt deel uit van de polyester familie.

<sup>2</sup> PSA is een afkorting die bij veiligheidsfilms vaak wordt vermeld en staat voor Pressure Sensitive Adhesive, zijnde de lijm die zorgt voor de verlijming tussen hetzij de verschillende PET-lagen, hetzij PET en glas.

*Veiligheidsfilms* worden traditioneel immers opgebouwd uit de verschillende componenten (Figuur 1. 7), met als eerste een loslatende folie. Deze folie – meestal uit polyester – wordt alvorens de film op het glas wordt geplaatst, aangebracht om de lijm te beschermen tegen vuil. De lijm is een hoge kwaliteitslijm die wordt aangebracht op een heldere, sterke polyesterfilm en wordt gekenmerkt door de goede hechting met zowel glas als polyester. Het is mogelijk dat de eigenlijke film is samengesteld uit meerdere onderling verlijmde polyesterlagen, eventueel in combinatie met PVB<sup>1</sup> (*Spallshield*®, Du Pont de Nemours). Vervolgens wordt vaak nog een krasvaste *hard film coating*<sup>2</sup> voorzien, die de polyesterfilm beschermt tegen eventuele fysische of chemische aanvallen. Het mag duidelijk zijn dat de samenstellende onderdelen uitermate transparant dienen te zijn, wil de resulterende veiligheidsfilm zo weinig mogelijk optische belemmering veroorzaken; het resultaat is immers maar zo goed als de zwakste schakel.

Hoewel de breedte van deze films meestal beperkt is, zou het mogelijk zijn twee films overlappend aan te brengen, zonder daarbij de eigenschappen van de film in belangrijke mate te beïnvloeden en het dus zou lijken alsof de film een naadloze bekleding op het glasoppervlak vormt.

Afhankelijk van de uiteindelijke filmdikte, die varieert tussen 25 µm en 300 µm, wordt het uitermate moeilijk om deze op dubbel gekromde oppervlakken of in scherpe hoeken aan te brengen, aangezien een dikkere film stijver wordt en zich dus niet zomaar naar de wensen van de gebruiker laat plooien. Bestaat de ambitie er toch in om een complex gebogen glasoppervlak te voorzien van een glasfilm, dan dient deze voorafgaandelijk te worden vormgegeven en dit met behulp van een externe warmtebron die het thermoplastisch polyester doet verweken waardoor de gewenste vorm kan worden verkregen.

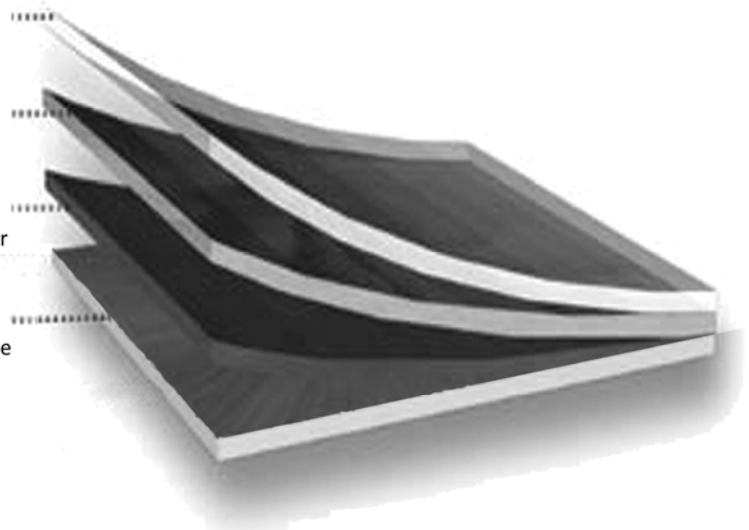
Loskomende beschermingsfilm met  
siliconen coating:

Doel: lijm beschermen tegen vuil

Transparante hoge kwaliteitslijm:  
Doel: Polyesterfilm met het glasoppervlak  
verkleven.

Polyesterfilm:  
Sterk, transparant, hoog kwaliteitspolymeer

Krasbestendige harde acrylic coating:  
Doel: beschermt polyesterfilm tegen schade  
en krassen

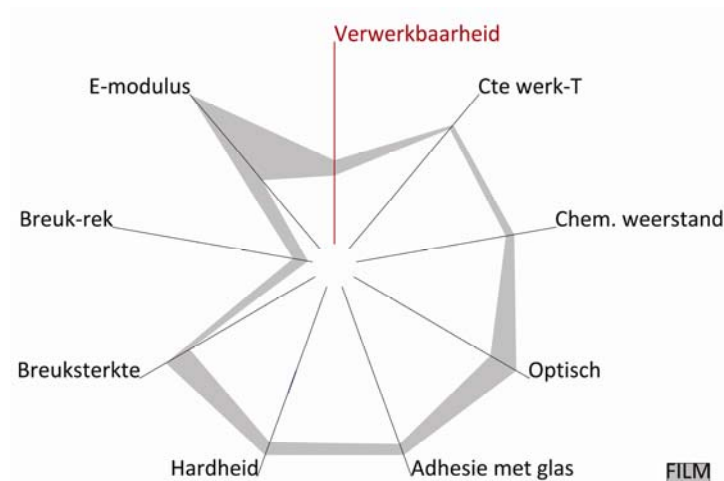


Figuur 1. 7 Typische samenstelling van *veiligheidsfilms*.

-Bron: [www.ewfa.com](http://www.ewfa.com)-

<sup>1</sup> Polyvinyl butyral, een polymeer dat frequent wordt gebruikt bij het lamineren van vlakke glasstructuren.

<sup>2</sup> Deze *hard film coating* wordt op films aangebracht met *Physical Vapor Deposition*.

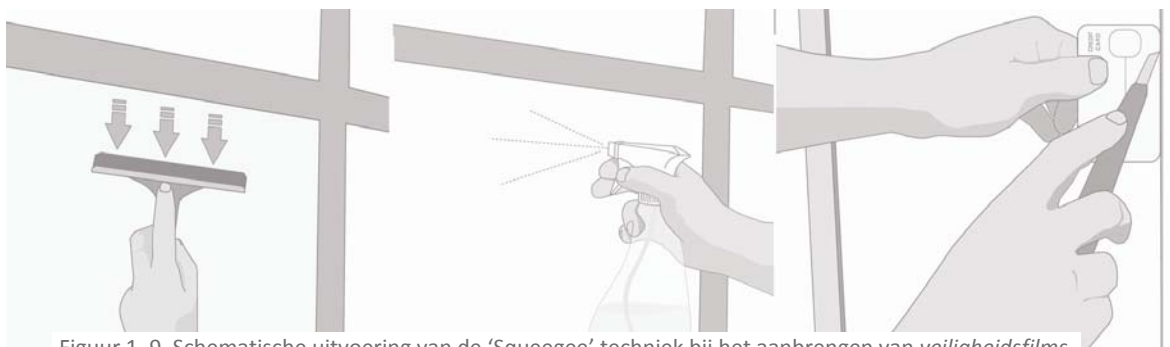


Figuur 1. 8 Materiaaleigenschappen en spreiding van veiligheidsfilms.

De traditionele techniek die wordt gehanteerd bij het aanbrengen van dergelijke films is vrij eenvoudig. Om de hechting zo goed mogelijk te laten geschieden, dient het glas volledig vrij te zijn van vuil, vet en andere contaminaties, waarna het glas wordt voorzien van een zeepoplossing. Vervolgens dient de bescherm laag van de film te worden verwijderd, waarna dezelfde zeepoplossing ook op de film moet worden aangebracht. De film kan dan op het glas worden geplaatst, waarbij de oplossing tussen glas en film met een spatel wordt verdreven. Het is belangrijk dat dit uiterst zorgvuldig gebeurt, zodat eventuele luchtinsluitingen onder de film worden vermeden. Deze techniek wordt in de literatuur omschreven als de 'squeegee'-techniek. Het belangrijkste voordeel dat aan deze techniek kan worden toegeschreven is dat ze zowel op de bouwplaats, als in het labo of de fabriekshal kan worden toegepast, zonder dat dit een grote impact heeft op de kwaliteit van de uitvoering en de uiteindelijke eigenschappen. Het is echter moeilijk om deze films op dubbel gekromde oppervlakken aan te brengen, wat hun toepassing op 'freeform' glasstructuren in het gedrang brengt.

Tabel 1. 2 Belangrijkste voor- en nadelen van Film Squeegee techniek.

| Voordelen                     | Nadelen                                                       |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| +geen infrastructuur          | -moeilijk aan te brengen voor freeform structuren             |
| +eenvoudig aan te brengen     | -kwaliteit van uitvoering is sterk afhankelijk van uitvoerder |
| + uitvoering in-situ mogelijk |                                                               |



Figuur 1. 9 Schematische uitvoering van de 'Squeegee' techniek bij het aanbrengen van veiligheidsfilms.

-Bron: www.purifrost.com-

## 2. COATINGS\_VI

Het coaten van glas impliceert dat er één of meerdere lagen worden aangebracht op het glasoppervlak die kunnen variëren in samenstelling en dikte, afhankelijk van de gewenste toepassing. Bij het aanbrengen van deze coatings kan een eerste globale onderscheid worden gemaakt tussen het natlakken (*liquid coating*), het poederlakken (*powder coating*) en dampfase-depositie (*vapor coating*). Het coatingmateriaal wordt dus respectievelijk als een poeder, een vloeistof of vanuit de dampfase op het substraat aangebracht. Algemeen gesteld, worden de coatings (organisch of anorganisch) aangebracht vanuit dampfase omschreven als *thin film coatings*, aangezien hun dikte vaak maar enkele nanometer bedraagt. Beide andere technieken die vaak gehanteerd worden om organische coatings met laagdiktes van enkele micrometer (tot enkele millimeter) aan te brengen, worden als *thick film coatings* bestempeld<sup>1</sup>. Elke categorie kan vervolgens verder worden onderverdeeld volgens de specificiteit van de gehanteerde technieken (*hoofdstuk 2*).

Coatings aangebracht op het glasoppervlak vormen een essentieel onderdeel in verschillende takken van de glasindustrie. Uit voorbeelden van courante glasproducten, waarop vandaag coatings worden toegepast om hun uiteindelijke eigenschappen te verbeteren (Tabel 1. 3), wordt al snel duidelijk dat zonder dergelijke coatings, het gebruik van glas in belangrijke mate gelimiteerd zou worden, omdat het dan vrijwel onmogelijk lijkt om nog aan de hedendaagse wetgeving en normering te voldoen. Als voorbeeld wordt verwezen naar de energieprestatienorm. Zonder het gebruik van coatings die de warmteverliezen via gigantisch gordijngevels van megalomane wolkenkrabbers weten te beperken, zouden deze glazen kolossen maar moeilijk aan de steeds strenger wordende normen kunnen voldoen.

Voor het coaten van glas werd in de afgelopen decennia een veelheid en diversiteit aan technieken ontwikkeld, die door de technologische evolutie steeds verder wordt verfijnd.

De materialen en de bijhorende toepassingstechnieken die interessant lijken om veiligheid bij 'Freeform Design' glasconstructies te waarborgen, alsook de respectievelijke voor- en nadelen zullen in '*hoofdstuk 2*' behandeld worden. De gehanteerde materialen zijn hoofdzakelijk polymeren, hetzij thermohardende, hetzij thermoplastische, die in het verleden hun kwaliteit al hebben bewezen in diverse subcategorieën van de glasindustrie als zogenaamde *anti-shatter coatings*<sup>2</sup> en die meestal worden aangebracht onder vloeibare- of poedervorm (*liquid* en *powder coating*).

Tabel 1. 3 Functionele glascoatings met typische gebruikte toepassingstechnieken.

| Glascoatings voor:              | Techniek |
|---------------------------------|----------|
| Warmtereflecterend (Low-E) glas | CVD      |
| UV beschermend glas             | PVD      |
| Zonnewerend glas                | PVD      |
| Zelfreinigend glas              | CVD      |

<sup>1</sup> Binnen de gedefinieerde categorieën wordt echter vaak nog een opsplitsing gemaakt in uitvoeringstechnieken die tot dunne of dikke coatinglagen leiden.

<sup>2</sup> Ook vaak naar verwezen als: fragment retention, anti-spall, splinter shield coatings.

In een poging volledig transparante constructies te bekomen, vrij van stalen, houten en betonnen elementen, waarvan de visuele impact niet is te overschatten, is de voorbije jaren intensief onderzoek verricht naar transparante verbindingen en constructie-elementen. In wat volgt, zullen een aantal voorbeelden worden gegeven waarbij het streven naar algehele transparantie als één van de uitgangspunt wordt gehanteerd.

Daarnaast zal bij wijze van voorbeeld ook een gevalstudie worden aangehaald waaruit de complexiteit blijkt die gepaard gaat met het coaten van glas, wat zowel de keuze van het geschikte coatingmateriaal als de daarbij horende toepassingstechniek betreft.

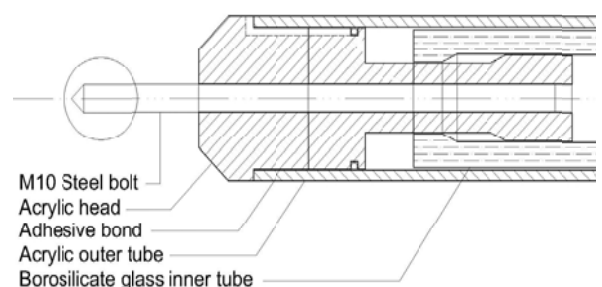
### 1. TRANSPARANTE GLASGEVEL ONDERSTEUNING | TU DELFT \_VII

Met het doel de stalen steunen van de glasgevel te vervangen door transparante, werd een hybride element ontwikkeld, waarbij twee concentrische buizen in staat werden geacht zowel de optredende trek- als drukspanning (als gevolg van de op de gevel aangrijpende windbelasting) op te nemen. De buitenste buis, uit kunststof vervaardigd, deed hierbij dienst als primair dragend element en omsloot een glazen buis (borosilicaatglas) met een kleinere diameter.

De polymeerschil vertoonde typisch een elastisch en dus veilig breukgedrag en was in staat om bij eventuele glasbreuk de scherven van de inwendig glazen buis op te vangen. Deze glazen buis diende de stijfheid van het constructie element te bewerkstelligen, aangezien een volledige kunststoffen buis, omwille van de kenmerkende beperkte stijfheid, een zeer grote sectie zou krijgen om overdreven doorbuiging te vermijden. Door bij het ontwerp, de glazen buis korter te maken dan de polymeerbuis werd ervoor gezorgd dat er geen directe normaalspanningen in het glas ontstonden. Enkel wanneer de kunststofbuis zou doorbuigen en contact maakt met het glas, zouden er belangrijke spanningen in deze glazen buis worden geïntroduceerd. Het kunststof dat werd gebruikt om zowel de uitwendige buis als de verbindingen met de glaswand te vervaardigen was *PMMA* (polymethyl methacrylaat). Een pijnlijk nadeel van dit materiaal is echter de (in vergelijking met glas, beperkte) brosheid, daarom diende een verbinding te worden ontwikkeld die ervoor kon zorgen dat de glazen binnenbuis als back-up kon functioneren in het geval dat de PMMA-buis zou bezwijken.



Figuur 1. 10 Impressie van transparante gevelsteun.



Figuur 1. 11 Opbouw van uiteinde gevelsteun

-Bron: BOS F., Hybrid glass-acrylic façade struts.-

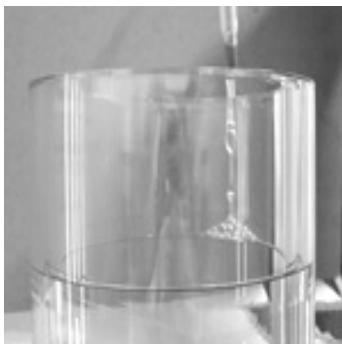
## 2. TRANSPARANTE KOLOM | ZAPPI TU DELFT \_VIII

In het raam van een onderzoeksproject werd aan de faculteit Architectuur, van de Technische Universiteit Delft een geheel transparant paviljoen gebouwd, waarbij de nadruk werd gelegd op het ontwikkelen van een ontwerpmethodiek die het veilig bezwijken van transparante structuren en het onderzoek naar de ontwerp mogelijkheden met glas, hoog in het vaandel droegen.

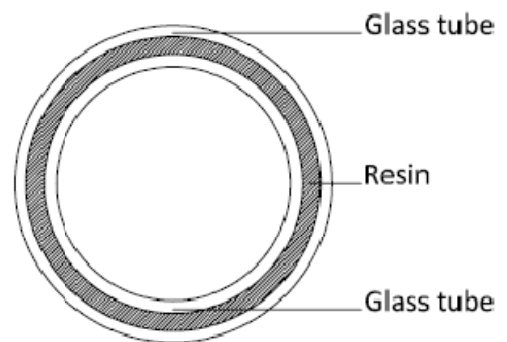
Met het doel een volledig transparante kolom te vervaardigen op een schaal die relevant was voor normale gebouwen werden tijdens dit onderzoek, twee glazen buizen gelamineerd met behulp van een transparante hars, die naast transparantie ook de nodige sterkte en veiligheid bij breuk diende te vertonen.

De uitsluitend aan druk onderworpen kolom diende de belasting verdelen over beiden concentrische buizen. Het hars op haar beurt moest scheurvorming afremmen en de scherven bij breuk samenhouden, zodat deze ook nog enige druk konden opnemen en dit tot op het moment dat delaminatie van de doorsnede over een bepaalde lengte van de kolom optrad. Onder invloed van eventuele trek of buiging zouden er echter piekspanningen ontstaan en faalt het gehele systeem, waardoor goede randvoorwaarden noodzakelijk waren bij het ontwerp van de gehele structuur en enkel drukspanningen in de kolom werden geïntroduceerd. Door de op deze wijze ontwikkelde ductiliteit van de constructie werd vluchten bij eventueel falen van de structuur mogelijk gemaakt.

Het toepassen van de transparante hars maakte het mogelijk een volledig transparante kolom te vervaardigen die voldoende ductiliteit vertoonde om bij glasbreuk veiligheid te garanderen. Tijdens het productieproces werd echter snel duidelijk dat de polymerisatiereactie, die bij het uitharden van het vloeibaar hars plaatsvond, zorgde voor een belangrijke warmteproductie waarbij het hars zwelt en later weer krimpt wat tot glasbreuk, luchtbellens (in het hars), delaminatie en andere fouten leidde die de visuele kwaliteit van de kolom nadelig beïnvloedde. Een hars, die deze nadelige eigenschappen niet vertoonde, diende daarom te worden samengesteld en vervaardigd.



Figuur 1. 12 Aanbrengen van hars tussen de twee glazen kolommen.



Figuur 1. 13 Doorsnede van gelamineerde glazen kolom.

-Bron: VAN NIEUWENHUIZEN E.J., *The glass laminated column.*-

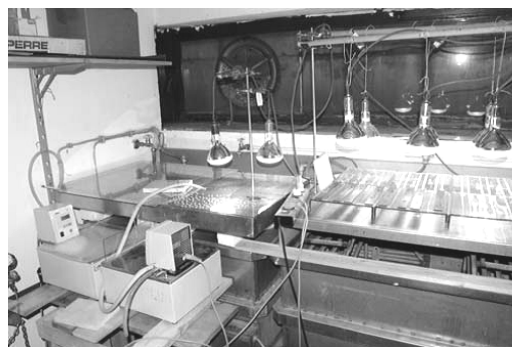
### 3. U-PROFIELGLAS MET PU-LAK \_IX

Als gevolg van het gebrekkig postdestructief gedrag van afzonderlijke glazen U-profielen werd hier naar een mogelijke oplossing gezocht in het aanbrengen van een polyurethaan 'splinter shield'-coating (dikte: 400  $\mu\text{m}$ ) op het glas, met als bijkomend doel vallende scherven bij breuk te voorkomen. De aangebrachte coating werd daarbij onderworpen aan verschillende tests om het effect van zure regen, dooizouten en detergenten van het gelakte glaselement op postdestructief gedrag te kunnen analyseren. Om mogelijke verkleuring van de coating te onderzoeken werd ook het effect van UV-stralen en zonlicht beschouwd.

Uit de proeven ter bepaling van de mechanische weerstand van het gecoate glas (DIN EN 12600, DIN EN 52337) werd duidelijk dat - zoals te verwachten was - de dikte van de polymeerlaag een belangrijke invloed had op het postdestructief gedrag van het glas.



Figuur 1. 14 Breuk van U-profielglas na impact; geen vallende scherven



Figuur 1. 15 Invloed van omgevingsfactoren: links water en UV-straling, rechts UV-straling en contact met andere materialen.

-Bron: HOF P., *Investigations on U-shaped glass with a polyurethane lacquer for splinter shield*-.

### 4. GECOATE GLAZEN BUIS \_X

Een 16 meter hoog sculptuur diende te worden samengesteld uit 58 blauw gekleurde glazen buizen. Door gebrek aan algemeen in de handel beschikbare gekleurde glazen buizen, werd echter al snel de overstap gemaakt naar traditionele ongekleurde borosilicaat buizen, die in twee de instantie hun gewenste kleur diende te verkrijgen. Met als doel een transparant blauwe kleur te geven aan deze glazen buizen, werden drie mogelijke pistes in overweging genomen, waarbij de optie om de kleuring langs buiten aan te brengen buiten beschouwing bleef vanwege de directe blootstelling aan de buitenomgeving. Zure regen, UV, nitraten,... zou immers voor een al te snelle degradatie van kleur zorgen.

Als eerste werd overwogen een metalen of plastic binnenbuis aan te brengen. Een piste die al snel werd verlaten omwille van een ongewenst kleureffect en resulterend plaatsgebrek bij het verwerken van een lichtarmatuur in de kolommen. De tweede optie waarbij een plastic folie met de binnenkant van de glazen buis zou worden verkleefd, zou dan weer hebben geleden tot een zichtbare naad, wat tevens niet was gewenst. Als derde en als enige mogelijke oplossing zou een gekleurde, zij het transparante coating aan de binnenzijde worden aangebracht. Een optie die mits het vinden van een geschikte coating en een geschikte toepassingstechniek makkelijk zou kunnen worden uitgevoerd. Als toe te passen kleurcoating werd geopteerd voor *Ormocer*<sup>®</sup>, waarmee met een geschikte pigmentatie, het gewenste resultaat kon worden bekomen. *Ormocer*<sup>®</sup> wordt in vloeibare vorm aangebracht op het glas en hardt vervolgens uit onder invloed van UV-straling en vormt daarmee een

typisch voorbeeld van een *natlak-applicatie* (Liquid Coating). Er zijn een aantal veelgebruikte technieken die kunnen worden gehanteerd om dergelijke coatings op glas en andere substraten aan te brengen, maar deze werden wegens gebrek aan apparatuur of te beperkt rendement niet toegepast. Een alternatieve techniek werd bijgevolg ontwikkeld, die omwille van de eenvoudige uitvoering en de beperkte verfhoeveelheden interessanter leek. Deze techniek zou het best kunnen worden vergeleken met het reinigen van een kanonsloop (Figuur 1. 17).

Het spreekt vanzelf dat bij uitharding van de coating, aandacht diende te worden besteed te aan de gecontroleerde ventilatie met verse lucht (om verdamping van de aanwezige solventen mogelijk te maken) en de verticaliteit van het werkstuk, zodat de uiteindelijke coating een uniforme dikte krijgt.



Figuur 1. 16 Foto van glazen sculptuur, opgebouwd uit 58 blauw gecoate glazen buizen.



Figuur 1. 17 Specifieke coatingtechniek, ontwikkeld voor het coaten van de binnenkant van glazen buizen.

-Bron:TRIER F., *Sol-Gel Coated Glass Tubes for Architectural Application.*-

## ALGEMEEN

## - Painting the future -

Coatings winnen steeds meer aan belang in diverse industrietakken, waarvan de metaalverwerkende industrie zonder meer de belangrijkste vormt. Diverse coatings beschermen metalen onderdelen immers niet alleen tegen corrosie, maar tevens tegen chemische invloeden, brand,...

In wat volgt, wordt een overzicht gegeven van de in de literatuur (Goovearts, et al. 2008) vermelde technieken die hun toepassing reeds hebben gevonden in de metaalbewerkende nijverheid. Aan de hand van de daarbij vermelde voor- en nadelen wordt het bijgevolg eventueel mogelijk een eerste beeld te vormen van welke van deze technieken ook toepasbaar zouden kunnen zijn op glas.

Als eerste wordt ingegaan op het aanbrengen van coatings door *dampfase depositie* (*vapor coating*). Hoewel deze techniek sterk verschilt van beide andere technieken, vormt ze wel één van de meest toegepaste glasbewerkingen.

## TECHNIEKEN

## - The issue of safety revised -

## 1. DAMPFASE-DEPOSITIE

De hieronder vermelde technieken kennen zowel nu als vroeger een veelvuldige toepassing op glas, het gaat hierbij over het aanbrengen van zogenaamde ‘functionele’ coatings op glas, zoals vermeld in Tabel 1. 3. De op het glas aangebrachte laag zorgt er immers voor dat bepaalde eigenschappen waaraan het glaselement aan moet voldoen verbeteren. Courante toepassingen van dergelijke functionele lagen die op het glasoppervlak worden aangebracht, zullen hier tevens per techniek worden toegelicht.

*CVD coating*<sup>1</sup> | Bij *Chemical Vapor Deposition* (*CVD*) - ook vaak omschreven als *pyrolytic coating* – wordt een zeer dunne film op het hete glasoppervlak aangebracht; vaak vindt dit plaats bij het vormen van de eigenlijke glasplaten (*on-line coating*).

Tijdens het *CVD*-proces worden de reactieproducten, hetzij onder de vorm van fijn stof, hetzij als vloeibare oplossingsdruppels verdampt, waarna het resulterende gasmengsel over het hete glasoppervlak (600°C) wordt verdeeld. Afhankelijk van de druk, fysische karakteristieken van het reactief gas,... kan deze techniek verder worden opgedeeld.

Deze *CVD*-coatings worden, vanwege de veel hogere glastemperatuur bij het aanbrengen van de coating, gekarakteriseerd door hun sterkere adhesie met het glasoppervlak in vergelijking met de hieronder *PVD*-coatings, daardoor bieden deze sterk adhesieve coatings typisch een hogere weerstand tegen mechanische, thermische en chemische invloeden en zijn zij beter in staat hun integriteit te behouden wanneer de glaselementen na het coaten worden gebogen of worden

<sup>1</sup> SANDIA NATIONAL LABORATORIES, *Coatings on Glass*, Technology Roadmap Workshop, januari 2000, pp.5-8.

gehard. Er wordt naar deze harde krasvaste coatings dan ook frequent verwezen als *hard coating*.

De CVD-techniek wordt vaak toegepast bij het aanbrengen van *Low-E* coating. Het betreft hier een transparante metallische of metaaloxide coating die het binnencomfort verhoogt door het warmteverlies via het glasoppervlak naar de omgeving te beperken, wat impliceert dat de stralingsenergie van het glas wordt gereduceerd van 90 tot ongeveer 15 percent.

Ook het zogenaamde zelfreinigende (*self-cleaning*) glas beroept zich op deze techniek bij het aanbrengen van een zeer dunne hydrofiele  $\text{TiO}_2$ -laag aan de buitenzijde van het glasoppervlak. Door absorptie van UV-licht, wordt de oxidatie bevorderd (fotokatalyse), wat betekent dat organisch materiaal wordt afgebroken en ook anorganisch vuil minder makkelijk aan het glasoppervlak hecht. Daarnaast wordt de oppervlaktespanning beperkt en zal in plaats van druppelvorming bij regen, een uniforme waterfilm het vuil van het glasoppervlak wegspoelen<sup>1</sup>. Als gevolg van deze coating blijft het glas dus langer proper dan normaal glas dat wordt blootgesteld aan regen.

Tabel 2. 1 Belangrijkste voor- en nadelen van CVD-coatingtechniek.

| Voordelen                             | Nadelen                                    |
|---------------------------------------|--------------------------------------------|
| +bevordert substraat/coating adhesie  | -uitvoering niet in-situ                   |
| +resultaat is harde krasvaste coating | -gekenmerkt door hoge temperaturen (600°C) |
| +complexe werkstukken coaten          |                                            |
| +uitvoering in lab                    |                                            |

*PVD coating*<sup>2</sup> | Eén van de voornaamste technieken die valt onder de noemer *Physical Vapor Deposition coatings* is '*magnetron sputtering*'. Tijdens het opdampproces zullen energierijke deeltjes vanuit een metallische dampfase in een reeks van vacuümkamers in dunne lagen neerslaan op het substraat. Om de goed hechtende lagen degelijk te kunnen aanbrengen moet het substraattooppervlak voldoende zuiver zijn, waardoor het oppervlak eerst en vooral dient te worden ondergedompeld in een meer-badensysteem. Bij het eigenlijke aanbrengen van de coating wordt het oppervlak van een metallische kathode gebombardeerd met ionen, die ontstaan door het aanleggen van een elektrische stroom, op het in de kamers geïnjecteerde gas. De atomen van de kathode zullen daarbij verdampen en neerslaan op het substraattooppervlak, waardoor een uniforme film wordt gevormd.

Dit type coating wordt traditioneel aangebracht op reeds bewerkte oppervlakken (*off-line*), biedt minder weerstand tegen chemische, mechanische en thermische invloeden, is zachter en minder buigzaam dan de reeds vermelde *hard coating* en wordt dan ook vaak als *soft coating* bestempeld.

Toepassingen van deze coatingstechniek zijn daardoor dan ook vaak aan de binnenkant van dubbele beglazing te vinden, onder de vorm van een zonnewerende coating. Deze edelmetaalcoating is hoofdzakelijk transparant voor zichtbaar licht maar reflecteert ultraviolet (UV) en infrarood (IR) stralen, waardoor het mogelijk is

<sup>1</sup> WURM J, *Structural Glass: Design and Construction of Self-Supporting Skins*, Birkhäuser, Basel, 2007, p.73.

<sup>2</sup> AA. VV., *BBT voor de metaalbewerkende nijverheid*, Academia Press, Gent, 2008, pp.101-103

oververhitting te minimaliseren door de warmtewinsten te beperken tot 35 percent terwijl een lichttransmissie tot 70 percent mogelijk blijft<sup>1</sup>.

Tabel 2. 2 Belangrijkste voor- en nadelen van PVD coatingtechniek.

| Voordelen                                       | Nadelen                                                |
|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| + traditioneel beperkte toepassingstemperaturen | -zachte, niet krasvaste coating<br>-zeer dunne coating |

## 2. POEDERLAKKEN \_XI,XII

*Powder coating* is momenteel ongetwijfeld één van de belangrijkste technieken die bij de bescherming van stalen elementen wordt gehanteerd; hierdoor wordt ze zelden of nooit vermeld als een techniek die uitermate geschikt is voor het coaten van glas om te voorkomen dat in geval van glasbreuk de scherven schade aan de omgeving zouden veroorzaken.

Het basisprincipe van *poederlakken* bestaat er in smeltbare poeders aan te brengen op een verhit substraattoepervlak. De tijdens het proces gebruikte materialen bestaan uit zeer fijngemalen organische thermohardende of thermoplastische<sup>2</sup> polymeren, die meestal worden aangevuld met pigmenten, bindmiddelen (fillers), versnellers en andere additieven<sup>3</sup>. Nadat de poeders op het substraat werden aangebracht, versmelten de poederdeeltjes in de oven (*moffelen*), zodat zich een continue film op het oppervlak vormt. Het proces kan verder opgedeeld worden volgens specifieke modaliteiten in: *wervelsinteren*, *elektrostatisch poederspuiten*, *vlamspuiten* en *hybride processen*. Naast de hier vermelde basistechnieken zijn er nog enkele andere methodes om kunststofpoeders op een substraat aan te brengen, die worden vermeld in 'Tabel 2. 3'.

Van de vier bovenstaande technieken lijkt het *wervelsinteren* onmiddellijk toepasbaar op glassubstraten.

Tabel 2. 3 Specifieke toepassingstechnieken van het poederlakken<sup>4</sup>.

| Technieken        | Thermohardende poeders | Thermoplastische poeders |
|-------------------|------------------------|--------------------------|
| ES poederspuiten  | x                      | x                        |
| Wervelsinteren    | x                      | x                        |
| ES wervelsinteren | x                      | x                        |
| Vlamspuiten       | x                      | x                        |
| Vlokspuiten       |                        | x                        |
| Poedersludge      |                        | x                        |

**Wervelsinteren<sup>5</sup>** | Deze techniek werd oorspronkelijk ontwikkeld voor de toepassing van thermoplastische poeders zoals *polyvinylchloride (PVC)*, *polyethyleen (PE)*, *polyamide (PA, nylon)* en blijft dan ook de meest gebruikte methode voor deze polymeren.

Het *wervelsinteren* vindt plaats in een met polymeerpoeder gevuld wervelbekken, waarvan de bodem werd voorzien van een poreus membraan, waardoor op

<sup>1</sup> WURM J, *Structural Glass: Design and Construction of Self-Supporting Skins*, Birkhäuser, 2007, p.74.

<sup>2</sup> Thermoharders harden door chemische reacties uit bij verhitting en thermoplasten verweken bij verhitting en stollen bij afkoeling.

<sup>3</sup> Tevens bevatten sommige poeders zogenaamd vloeimiddel matteringsmiddel, ontgassingsmiddel, oppervlaktehardheid verbeteraar,...

<sup>4</sup> AA. VV., *BBT voor de metaalbewerkende nijverheid*, Academia Press, Gent, 2008.

<sup>5</sup> Deze term wordt echter vaak vervangen door de Engelse benaming: Fluidized bed.

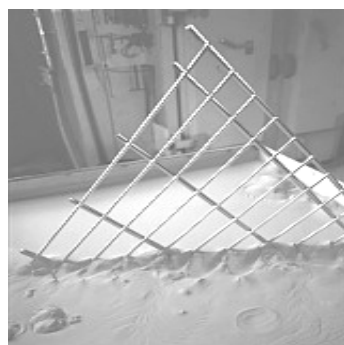
gecontroleerde wijze perslucht kan worden vermengd met het poeder. Het resultaat is een wervelbad: een poedersuspensie in lucht met enkele volumeprocenten poeder, dat van bovenaf het uitzicht heeft van een rustig kokende vloeistof, maar waarvan de temperatuur echter niet hoger is dan de omgevingstemperatuur. De toevoer van de perslucht zorgt voor een verminderde weerstand tijdens het onderdompelen van het object, waardoor een homogene coating op het substraatooppervlak kan worden gevormd.

Dit substraat dient initieel in de oven te worden voorverwarmd tot boven het smeltpunt van het poeder vooraleer het in het poederbad verdwijnt, zodat de poederdeeltjes bij onderdompelen meteen samensmelten en aan het oppervlak hechten. De coatingdikte wordt bepaald door de intrinsieke eigenschappen van het poeder, de onderdompeltijd en de initiële temperatuur van het object voor het dompelen. Afhankelijk van de warmte-inhoud van het element zal de temperatuur na onderdompeling voldoende hoog zijn om het polymeerpoeder te laten uitvloeien tot een uniforme laag, zo niet worden het terug in de oven geplaatst ( $T_{\text{oven}} > \text{smelt}T_{\text{poeder}}$ ), om vervolgens de gladde continue en uniforme film op het substraatooppervlak te bekomen (*moffelen*).

Gebruik makend van dit proces, worden traditioneel laagdiktes van 250 tot 2500  $\mu\text{m}$  bekomen. Er wordt naar deze techniek ook vaak verwezen voor het aanbrengen van *thick-film coatings*.

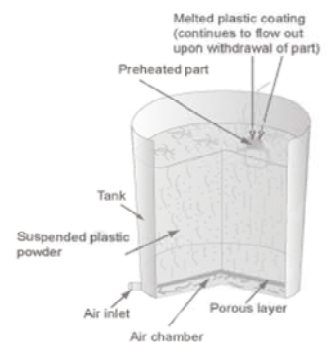
Tabel 2. 4 Belangrijkste voor- en nadelen van het *wervelsinteren*.

| Voordelen                         | Nadelen                                            |
|-----------------------------------|----------------------------------------------------|
| +weinig infrastructuur            | -grote poederhoeveelheden nodig bij groot werkstuk |
| +complexe werkstukken coaten      | - uitvoering moeilijk in-situ                      |
| +dikke functionele coating        | -moeilijk geheel uniforme coating te verkrijgen    |
| +hoge uitvoeringskwaliteit in lab |                                                    |



Figuur 2. 1 Onderdompelen van stalen element 'kokende' poedermassa tijdens het wervelsinteren.

-Bron: [www.vestosint.com](http://www.vestosint.com)-



Figuur 2. 2 Schematische voorstelling van wervelsinter- infrastructuur.

-Bron:

[www.specialchem4coatings.com](http://www.specialchem4coatings.com)-

**Elektrostatisch poederspuiten** | Deze techniek is de meest voorkomende *poederlak*-methode. Het poeder, opgeslagen in een vergaarbak naast de spuitcabine, wordt vermengd met perslucht (cfr. *wervelsinteren*), waarna het met behulp van een spuitpistool, dat de poederfracties een lading geeft bij ex-filtratie, op het gearde voorwerp wordt aangebracht. Na het aanbrengen van het poeder wordt het element in de oven *gemoffeld*.

Het *elektrostatisch poederspuiten* kan worden opgedeeld in twee specifieke uitvoeringsprocessen: het *Tribo*- en het *Corona*-procedé. Bij deze laatste zal het door een hoogspanningsgenerator negatief geladen poeder, volgens de elektrostatische veldlijnen naar het geaard substraattooppervlak bewegen. Slechts een poederlaag met beperkte dikte kan hier worden aangebracht, aangezien de reeds aangevoerde poederdeeltjes immers na adhesie met het oppervlak hun lading verliezen, waardoor er vanaf een bepaalde laagdikte geen sprake meer van enige aantrekkingskracht met nieuw aangevoerde poederdeeltjes. Poeder dat niet werd gebruikt kan worden verzameld en hergebruikt.

Een belangrijk nadeel van deze techniek bestaat in het mogelijk moeilijk aanbrengen van het poeder in scherpe hoeken als gevolg van het hoogspanningsveld dat wordt aangelegd tussen het spuitpistool en het te coaten onderdeel (*Kooi van Faraday*). Een problematiek dat bij het *Tribo*-proces wordt vermeden, aangezien de poederdeeltjes door wrijving elektrostatisch worden geladen en met behulp van de begeleidende luchtstroom op het substraattooppervlak worden aangebracht. Er is bijgevolg geen elektrisch veld aanwezig tussen het spuitpistool en het te coaten element, waardoor er geen sprake kan zijn van het *Faraday effect*.

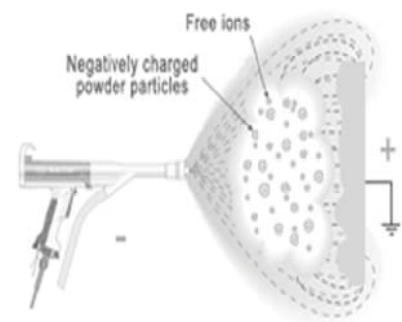
Tabel 2. 5 Belangrijkste voor- en nadelen van *elektrostatisch poederspuiten*.

| Voordelen                          | Nadelen                                                     |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| + niet voorverwarmen van werkstuk  | - Faraday effect bij complexe werkstukken ( <i>Corona</i> ) |
| + hoge uitvoeringskwaliteit in lab | - dunne decoratieve coating                                 |
|                                    | - uitvoering niet in-situ                                   |
|                                    | - moeilijk uniforme coating te verkrijgen                   |
|                                    | - noodzakelijk elektrisch geleidbaar substraat              |



Figuur 2. 3 Het coaten van stalen werkstuk met ES poederspuiten (*Tribo*-procedé).

-Bron: [www.appliedplastics.com](http://www.appliedplastics.com)-



Figuur 2. 4 Schematische voorstelling van ionisatie van poederpartikels ter hoogte van de spuitmond (*Corona*-procedé).

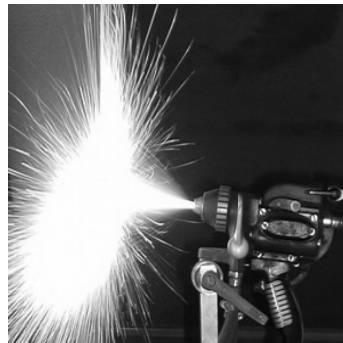
-Bron: [www.specialchem4coatings.com](http://www.specialchem4coatings.com)-

**Hybride processen** | De *hybride processen* zijn gebaseerd een combinatie van het *wervelsinteren* en het *elektrostatisch poederspuiten*. Enerzijds kan poeder door middel van een spuitpistool op een voorverwarmd element worden aangebracht. Anderzijds kan het poeder in de container bij het *wervelsinter*-proces, elektrostatisch worden geladen door toevoer van geïoniseerde perslucht, waarna het geaard object wordt ondergedompeld. Ook bij deze twee varianten dient het object telkens *gemoffeld* te worden.

Vlamspuiten | Het polymeerpoeder wordt bij exfiltratie gesmolten door een circulaire vlam ter hoogte van de spuitmond, waarna de polymeerdruppeltjes onder invloed van perslucht (of een ander inert gas) naar het substraattooppervlak worden geblazen.

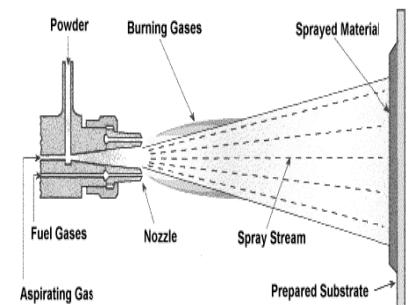
Tabel 2. 6 Belangrijkste voor- en nadelen van vlamspuiten.

| Voordelen                         | Nadelen                                  |
|-----------------------------------|------------------------------------------|
| + niet voorverwarmen van werkstuk | -moeilijk uniforme coating te verkrijgen |
| + uitvoering in situ mogelijk     | -geen 100% rendement van coating         |
| +complexe vormen coaten           | -lokale temperatuurgadiënten             |



Figuur 2. 5 Aanbrengen van polymeerpoeder op een metalen werkstuk m.b.v. vlamspuiten.

- Bron: [www.tspc.ru](http://www.tspc.ru)-



Figuur 2. 6 Schematische voorstelling van vlamspuiten.

-Bron: [www.airproducts.com](http://www.airproducts.com)-

Hoewel het *poederlakken* - zoals reeds vermeld - werd ontwikkeld vanuit de optiek stalen elementen te voorzien van een corrosiewerende polymeerlaag, kan en wordt deze techniek onder de vorm van het *wervelsinteren* evenwel reeds toegepast op glazen voorwerpen, om deze te voorzien van een polymeercoating die beschermt tegen glasbreuk. Glas weerstaat immers vrij hoge temperaturen (550-600°C), waardoor het een uitermate geschikt substraat vormt voor de thermoplastische en -hardende poeders die met deze techniek worden aangebracht en uitvloeien op een temperatuur de traditioneel veel lager is (150-350°C).

De prestatie van deze coatings wordt enerzijds bepaald door de cohesiekrachten inherent verbonden aan de eigenschappen van het coatingmateriaal als dusdanig, anderzijds door de adhesie tussen coating en glasoppervlak. Bijgevolg is het mogelijk door sterke cohesiekrachten, de omgeving te beschermen tegen glasscherven bij eventuele glasbreuk, zonder dat er hier meteen sprake is van goede hechting tussen de coating en het glas. Naast een bescherming tegen rondvliegend glas, zal bij eventuele voldoende grote adhesiekrachten een mogelijke positieve invloed op het postdestructief gedrag van glasconstructies kunnen ontstaan.

Vergeleken met andere technieken biedt de *poederlak*-technologie enkele belangrijke voordelen. De materialen, gebruikt bij het coaten zijn immers onschadelijk voor het milieu, aangezien er geen sprake is van solventen of andere schadelijke stoffen die verdampen tijdens het uitharden. Het is tevens mogelijk gebleken (hoewel niet evident) om een polymeerlaag in scherpe hoeken aan te brengen, waarbij eventueel overtollig poeder volledig kan worden hergebruikt. In vergelijking met het *natlakken* is er geen risico op het aflopen of afdruipe van de coating.

### 3. NATLAKKEN\_XIII

Er is een grote variatie aan technieken beschikbaar voor het aanbrengen van vloeibare coatings (verven en lakken). Het gaat hierbij van multi-inzetbare technieken zoals de traditionele verfröl of borstel, tot gespecialiseerde processen die werden ontwikkeld om coatings veelal op metalen elementen aan te brengen. In wat volgt, wordt een aanbod gegeven van de courante gebruikte technieken alsook de technieken die relevant lijken voor de hier vooropgestelde toepassing.

De traditionele lakken of verven (zoals ze hier worden besproken) als dusdanig zijn traditioneel samengesteld uit drie hoofdbestanddelen. Als eerste zijn er de bindmiddelen die bijdragen tot de sterkte en de samenhang van de verflaag, haar weerstand tegen omgevingsinvloeden en die instaan voor de hechting met het substraat. Daarnaast zijn er de pigmenten en vulstoffen die zorgen voor de mechanische sterkte van de verf. Als laatste bevatten verven oplos- en verdunningsmiddelen (solventen) die een gedegen verwerkbaarheid bewerkstelligen. Deze laatste zullen bij het drogen van de verf verdampen, wat vaak een belasting voor het milieu vormt. In een poging om op deze problematiek een antwoord te formuleren, wordt steeds vaker gebruik gemaakt van lakken met een oplosmiddel op waterbasis.

**Dompelen**<sup>1</sup> | Deze techniek is een eenvoudige, snelle en goedkope techniek voor het aanbrengen van verschillende verven.

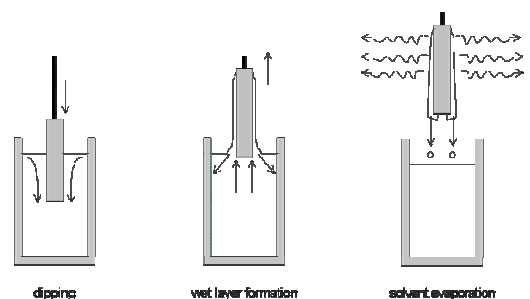
Het substraat wordt tijdens het proces ondergedompeld in de vloeibare coating, waarna overvloedig materiaal afvloeit en vervolgens het drogen en uitharden plaatsvindt. De dikte van de coating is daarbij afhankelijk van de viscositeit en de terugtreknelheid uit de oplossing. Een belangrijk nadeel van deze techniek is dat de coatingdikte kan variëren over het glasoppervlak. Toch wordt ze frequent toegepast bij de productie van antireflecterende beglazing, waarbij de interferentie-effecten van de verschillende metallische coatings zorgen voor een belangrijke reflectiereductie.

Tabel 2. 7 Belangrijkste voor- en nadelen van de dompeltechniek.

| Voordelen                  | Nadelen                                                |
|----------------------------|--------------------------------------------------------|
| +weinig infrastructuur     | -grote oplossingshoev. noodzakelijk bij groot werkstuk |
| +goedkoop                  | -mogelijke insluiting van luchtballen                  |
| +dikke functionele coating | -mogelijk afdruipting en uitlopers                     |



Figuur 2. 7 Onderdompelen van lampen .  
Bron: [www.advancedlampcoatings.com](http://www.advancedlampcoatings.com)



Figuur 2. 8 Schematische voorstelling van *dompelen* coatingtechniek  
-Bron: [www.solgel.com](http://www.solgel.com)

<sup>1</sup> Kan ook omschreven worden als *dip coating* (Eng.).

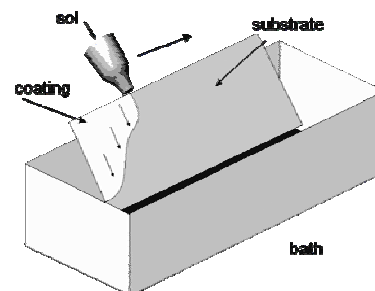
**Gieten** | De diverse gietmethoden (lakken met de slang, flowcoaten, lakgordijn,...) vertonen de aangehaalde beperkingen (Tabel 2. 7) van de traditionele *dompelen* in mindere mate. Algemeen gesteld, wordt bij deze methode het vloeibaar coatingmateriaal uit een nabijgelegen recipiënt gezogen om daarna via leidingen naar het hoogste punt van het te coaten element te worden gebracht, waar het terug over dit element naar beneden vloeit. Overtollig materiaal wordt onderaan opgevangen en hergebruikt. Ondanks het feit dat zowel de filmopbouw als de controleparameters dezelfde zijn als die van *dompelen*, is het bij het *gieten* mogelijk grotere en complexere elementen te coaten, omdat hier geen groot dompelbad moet worden voorzien. Net als bij *dompelen* zal aandacht moeten worden besteed aan het verdampen van de aanwezige solventen, met als doel een uniforme film te bekomen.

Tabel 2. 8 Belangrijkste voor- en nadelen van het *gieten*.

| Voordelen                         | Nadelen                                     |
|-----------------------------------|---------------------------------------------|
| +weinig infrastructuur            | -uitvoering in lab/niet in-situ             |
| +hoog rendement                   | -afdruijing en uitlopers mogelijk           |
| +dikke functionele coating        | -vaak weinig esthetisch resultaat           |
| +hoge uitvoeringskwaliteit in lab | -kwaliteit sterk afhankelijk van uitvoerder |



Figuur 2. 9 Het overgieten van elementen met een vloeibare coating .  
-Bron: [www.utilityservice.net](http://www.utilityservice.net)-



Figuur 2. 10 Schematische voorstelling van de *giettechniek*.  
- Bron: [www.solgel.com](http://www.solgel.com)-

**Spuiten** | De techniek is vooral bekend voor het toepassen van organische lakken op onregelmatig gevormde glaselementen en maakt daarom niet geheel toevallig deel uit van de *Hot/Cold-End Coating proces* dat hieronder wordt beschreven. Het *spuiten* kan opgedeeld worden volgens drie categorieën, namelijk het *pneumatisch spuiten*, het *warm spuiten* en het *airless spuiten*.

Het vernevelen van verf gebeurt bij het *pneumatisch spuiten* met behulp van perslucht, waarbij vanuit een beker of drukvat de verftoevoer naar het spuitpistool plaatsvindt en door de snelstromende lucht wordt verneveld.

*Warm spuiten* is een methode die werd afgeleid van het *pneumatisch spuiten*. In plaats van de viscositeit van de verf te verminderen door toevoeging van een verdunningsmiddel (zoals dat bij *pneumatisch spuiten* het geval is), zal bij *warm spuiten* hetzelfde effect bereikt worden door de verf op te warmen. De neiging tot het vormen van een sinaasappelttextuur<sup>1</sup> bij *warm spuiten*, als direct gevolg van de

<sup>1</sup> Vaak wordt naar de sinaasappelttextuur verwezen als *orange peel* (Eng.)

hogere viscositeit en dus het geringer vloeien, wordt als een belangrijk nadeel van deze techniek beschouwd.

Bij *airless spuiten* vindt verneveling plaats zonder gebruik te maken van lucht, door de verf onder zeer hoge druk door een nauwe spuittip (0,18 elektrisch aangedreven lakpompen, wat echter zorgt voor een minder fijne verneveling dan bij *pneumatisch spuiten*.

Tabel 2. 9 Belangrijkste voor- en nadelen van de *spuittechniek*.

| Voordelen                    | Nadelen                                     |
|------------------------------|---------------------------------------------|
| +weinig infrastructuur       | -veel verlies door nevelvorming             |
| +complexe werkstukken coaten | -uitvoering in lab/niet in-situ             |
| +dikke functionele coating   | -afdruijing en uitlopers mogelijk           |
| + uniforme laagdikte         | -kwaliteit sterk afhankelijk van uitvoerder |



Figuur 2. 11 Het coaten van flessen d.m.v. de *spuittechniek*(CEC).  
-Bron:www.glasschem.de-



Figuur 2. 12 Opbouw manueel pneumatisch spuitpistool.  
-Bron:www.bca.eu-

**Rollen/Borstelen** | Dit is ongetwijfeld één van de meest eenvoudige technieken die er beschikbaar zijn om een voorwerp te voorzien van verven of lakken. Het is algemeen bekend dat na het grondig reinigen van het substraat, een coating op het substraattooppervlak kan worden aangebracht met een traditionele verfborstel of -rol. Deze techniek kent uiteraard niet de precisie waarmee de andere coatings worden aangebracht. Ook hier lijkt de kunde van de uitvoerder een doorslaggevende parameter voor de kwaliteit van de coating. Mits de nodige voorbereiding is dit één van de enige technieken die makkelijk op de bouwplaats zelf uit te voeren zijn.

Tabel 2. 10 Belangrijkste voor- en nadelen van het rollen of borstelen.

| Voordelen                    | Nadelen                                     |
|------------------------------|---------------------------------------------|
| +weinig infrastructuur       | -kwaliteit sterk afhankelijk van uitvoerder |
| +complexe werkstukken coaten |                                             |
| +dikke functionele coating   |                                             |
| + hoog rendement             |                                             |

Het nadeel dat traditioneel met het *natlakken* wordt geassocieerd, is het risico op afloop- of druipresten. Tevens zijn de solventen die gebruikt zijn vaak toxisch of licht ontvlambaar. Het grote voordeel is echter dat men deze coating gemakkelijk in scherpe hoeken kan aanbrengen.

#### 4. ANDERE

Hieronder wordt de *Hot-End/Cold-End coating* vermeld die vanwege het hybride karakter buiten de drie beschouwde hoofdcategorieën valt.

*Hot-End/Cold-End coating* | Deze techniek werd ontwikkeld vanuit de ‘glass container’-industrie, die voortdurend onderzoek levert naar het verhogen van de containerweerstand tegen breuk, naar de gladheid en de barstdruk van de flessen door het aanbrengen van zelfhelende coatings, coatings die drukspanningen introduceren in het glas van de fles, energie absorberen, de impactweerstand doen toenemen, rondvliegende scherven voorkomen en die daarbij voldoende krasvast zijn. Ongetwijfeld de grootste ambitie in deze industrietak, is het ontwikkelen van een hybride coating die al de hiervoor genoemde eigenschappen verenigt.

De momenteel courant gebruikte coatings voldoen aan de door de industrie vooropgestelde eisen door typisch twee complementaire coatings aan te brengen op het glasoppervlak, een *hot-end coating* (HEC) en een *cold-end coating* (CEC). De HEC beschermt het glas tegen schade en vormt het substraat van de CEC.

De HEC bestaat meestal uit een hard ceramisch materiaal dat door middel van *Chemical Vapor Deposition* (cfr. *dampfase depositie*) wordt aangebracht, onmiddellijk na het vormen van de glazen flessen (*on-line*) en heeft een gemiddelde dikte van ongeveer 10 nm.

De CEC is een organisch materiaal dat onder vloeibare vorm (*spuiten*), of als een gas (PVD) wordt aangebracht. Deze coating heeft een dikte van 50 nm en wordt aangebracht bij een temperatuur van 135-165°C.

De uitgangspunten en doelstellingen die deze industrietak vooropstellen, lijken in een eerste opzicht zeer interessant en zouden een antwoord kunnen bieden op de veiligheidsproblematiek bij ‘Freeform Design’glasconstructies. Het zijn echter de huidige door de industrie gebruikte technieken die moeilijk verzoenbaar lijken met het hier beoogde veiligheidsconcept. De *Hot-End coating* wordt immers reeds aangebracht op het moment dat het glas wordt gevormd en de algehele oppervlaktetemperatuur van het glas ongeveer 600°C bedraagt. Het bereiken van deze temperatuur bij de beoogde glasstructuren zou echter impliceren dat het glas zijn vorm verliest, wat uiteraard niet wenselijk is.

Het enkel toepassen van *Cold-End coating* blijkt uit de literatuur<sup>1</sup> geen bevredigend resultaat op te leveren voor deze specifieke industrietak en dus mogelijk ook niet als veiligheidsconcept. Bijgevolg zullen deze coatings buiten beschouwing worden gelaten in het vervolg van deze masterproef.

De hybride coatings die de transparantie, de sterkte en weerstand tegen diverse omgevingsfactoren van organische coatings verbeteren, worden recentelijk onderzocht en ontwikkeld<sup>2</sup>. De voordelen ervan zijn toe te schrijven aan de aanwezigheid van minuscule fracties anorganisch materiaal die met de organische

<sup>1</sup> SANDIA NATIONAL LABORATORIES, *Coatings on Glass*, Technology Roadmap Workshop, 2000, pp. 8-10.

<sup>2</sup> AA. VV., *Scratch proof nanaocomposites for clear coatings*, [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).

matrix worden vermengd. De verhoogde sterkte van het glas kan worden verklaard doordat de oppervlaktescheurtjes worden gevuld, de scheurtippen worden afgerond en er drukspanning wordt gegenereerd aan het glasoppervlak.<sup>1</sup>

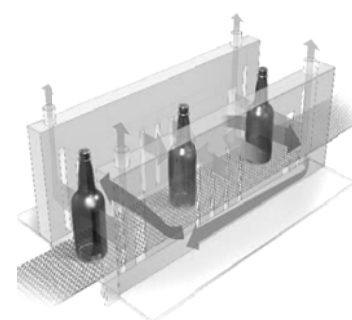
Producenten of specifieke eigenschappen van dergelijke coatings zijn moeilijk of onvindbaar, waardoor het niet aangewezen lijkt om deze verder in de masterproef op te nemen.

Tabel 2. 11 Belangrijkste voor- en nadelen van *glass container coatingtechniek(en)*.

| Voordelen                                                                                                             | Nadelen                                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| +complexe vormen coaten<br>+hoge uitvoeringskwaliteit in lab<br>+goede eigenschappen voor veiligheidsconcept van glas | -giftig voor het milieu<br>-uitvoering in lab/niet in-situ<br>-HEC bij 600°C |



Figuur 2. 13 Hot-End coating bij de productie van de flessen.  
-Bron:www.laxandshaw.com-



Figuur 2. 14 Schematische voorstelling van Cold-End coating bij flessen.  
-Bron:www.arkema-inc.com-

Tabel 2. 12 Overzicht eigenschappen coatingtechnieken<sup>2</sup>.

|                     | Rendement <sup>3</sup><br>(%) | Geschikt<br>coatingsysteem | Vorm object     | Opmerkingen                |
|---------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------|----------------------------|
| <b>poederlakken</b> |                               |                            |                 |                            |
| Wervelsinteren      | 75 - 95                       | poeder                     | geen beperking  | temperatuurbestendige obj. |
| ES Spray            | 50 - 95                       | poeder                     | geen beperking  | elektrisch geleidende obj. |
| <b>natlakken</b>    |                               |                            |                 |                            |
| Dompelen            | 75 - 95                       | 1-component                | holtes moeilijk | grote verdamping           |
| Spuiten             | 30 - 70                       | 1- en 2-component          | geen beperking  | overspray <sup>4</sup>     |
| Rollen/borstelen    | ±100                          | 1-component                | geen beperking  | grote verdamping           |

<sup>1</sup> AA. VV., *Mechanical behavior of glass reinforced with SiO<sub>2</sub> hybrid sol-gel coatings*, www.sciencedirect.com.

<sup>2</sup> Overgenomen uit: AA. VV., *BBT voor de metaalbewerkende nijverheid*, Academia Press, Gent, 2008.

<sup>3</sup> De verhouding van de totale hoeveelheid coating ten opzichte van de effectief aangebrachte coating bepaalt het rendement of de efficiëntie van de techniek.

<sup>4</sup> Overspray is lak die met de luchtstroom mee gaat, maar niet op het voorwerp neerslaat.

In wat volgt, zal worden ingegaan op de materialen die met behulp van de in *hoofdstuk 1* besproken coatingtechnieken interessant lijken om veiligheid bij 'Freeform Design' glasconstructies te waarborgen. Het gaat hierbij veelal om polymeren, hetzij thermohardende, hetzij thermoplastische, die in het verleden hun kwaliteit al hebben bewezen in andere subcategorieën van de glasindustrie als zogenaamde *anti-shatter coatings*<sup>1</sup>. Het zal dan ook via deze categorieën zijn, en niet volgens de typische chemische samenstelling, dat deze materialen -in wat volgt zullen- worden opgedeeld.

Gelieerd aan het in deze masterproef beoogde doel, gaat de aandacht eerst en vooral uit naar de coatingmaterialen die frequent worden aangebracht op gloeilampen, die tot doel hebben de directe omgeving te beschermen tegen rondvliegende glasscherven; de zogenaamde *lamp coatings*. De tweede categorie, die kan omschreven worden als *labware coatings*, kent een veelvuldige toepassing op glazen laboratorierecipiënten om te voorkomen dat bij glasbreuk eventuele toxische stoffen vrijkomen. Om de sterkte, krasvastheid, gladheid,... van glazen flessen te verbeteren, maakt de glasindustrie tevens gebruik van de reeds vermelde Hot/Cold-End coatings, die fundamenteel verschillend zijn van de *labware coatings*. Deze zullen vanwege de verwerkingsproblematiek (te hoge temperatuur bij het aanbrengen van de coating d.m.v CVD) hieronder niet meer worden vermeld.

Navolgende producteigenschappen zijn overeenkomstig met de door de fabrikanten verstrekte productinformatie. Waar nodig werden echter gemiddelde waarden genomen, maar dit zal steeds expliciet worden vermeld.



Figuur 2. 15 Lamp coating.



Figuur 2. 16 Labware coating.

-Bron: [www.shattershield.com](http://www.shattershield.com)-

<sup>1</sup> Ook vaak naar verwezen als: fragment retention, anti-spall, splinter shield coatings.

## 1. LAMP COATINGS

Diverse coatingmaterialen worden gehanteerd, met als doel de grote variatie aan lampen te beschermen, door bij breuk (vb.: exploderende gloeilampen) rondvliegende glasscherven te voorkomen. Zowel de gebruikte technieken als de materialen zijn daarbij afhankelijk van het lamptype en de concrete toepassing, met als doel een maximale transparantie en kwaliteit te verkrijgen. Naast polyethylenen en polyesters wordt bij deze toepassing hoofdzakelijk gebruik gemaakt van coatings op basis van fluoropolymere. Deze polymeerfamilie wordt vandaag vooral gehanteerd voor diverse hoogwaardige toepassingen en is beter bekend onder de naam *Teflon*<sup>®</sup> (DuPont de Nemours). Het gebruik van fluoropolymeren bij lampen wordt ingegeven vanuit de noodzaak om over een beschermingsmateriaal te beschikken dat bestand is tegen de hoge temperaturen die worden ontwikkeld bij traditionele gloei- en halogeenlampen (tot 250°C); een vereiste waaraan zowel de meeste polyethylenen als polyesters al snel niet aan lijken te voldoen.

Een algemene beschrijving van deze hoogwaardige polymeren houdt in dat in de koolstofketens, de zuurstofatomen hetzij volledig, hetzij gedeeltelijk door fluoratomen worden vervangen. Naast het feit dat ze worden gekenmerkt door hun uitstekende antikleef eigenschappen, vertonen ze typisch zeer goede thermische en chemische weerstand, die aanpasbaar is door het aandeel fluor te laten variëren. Er is dan ook een zeer uiteenlopend gamma van fluoropolymeren op de markt (*AF, FEP, PFA, MFA, ECTFE, PTFE,...*), waarbij zowel de gehanteerde technieken als de specifieke eigenschappen van het polymeer de specifieke keuze zullen bepalen.

Voor toepassingen op glas is transparantie van het aangebrachte polymeer één van de belangrijkste voorwaarde, een eigenschap waaraan enkel amorphe en (zij het in beperkte mate) semikristallijne kunststoffen lijken te kunnen aan voldoen, waardoor voor *Lamp coatings* slechts een aantal van deze hoogwaardige polymeren in aanmerking komen zoals *FEP, PFA* en *MFA*.

Het aanbrengen van de polymeerlaag gebeurt veelal door één van de *poederlak-technieken*, waarbij met de vermelde fluoropolymeren een gemiddelde laagdikte kan worden gerealiseerd van 300 µm. Bij het aanbrengen op het glasoppervlak schuilt echter een problematiek die intrinsiek gekoppeld is aan de antikleef eigenschappen die deze hoogwaardige polymeren kenmerken. De fluoropolymeren vertonen immers sterke cohesiekrachten, wat resulteert in een hoge treksterkte, maar een eerder beperkte chemische adhesie, waardoor een mogelijke binding met glas problematisch wordt. Met het doel alsnog een hechting tussen het glas en de polymeerlaag te realiseren, kan worden getracht de mechanische adhesie te maximaliseren door het substraatoppervlak te parelstralen, wat bij glas duidelijk nefast zou zijn voor de transparantie. Een intensieve reiniging met ethanol 95% maakt het glasoppervlak vetvrij, waardoor de chemische adhesie alsnog zou kunnen toenemen, maar ook deze is nog vrij beperkt en volstaat waarschijnlijk niet.

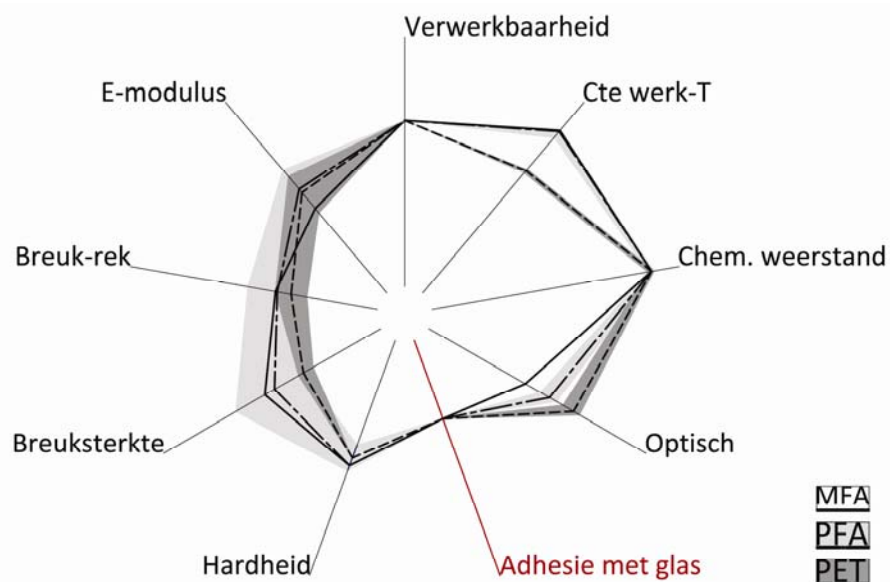
Zowel *FEP* (fluoroethyleen propyleen copolymeer), *PFA* (perfluoralkoxy fluorocarbon) als *MFA* (polytetrafluoroethyleen perfluor methylvinylether) worden eerst en vooral vanwege hun goede optische maar ook thermische en mechanische eigenschappen gebruikt om allerlei lampen te coaten en zo veiligheid te bieden bij rondvliegende scherven. Volgens de productinformatie beschikbaar gesteld door *Solvay Solexis*, bieden semikristallijne en volledig gefluoriseerde *PFA* thermoplasten typisch de hoogste temperatuur en de breedste chemische weerstand van alle

fluoropolymeren en vertonen deze tevens betere fysische eigenschappen en verminderde kruipverschijnselen in vergelijking met *FEP*. *MFA* biedt dan weer het voordeel over een lagere smelttemperatuur en verhoogde transparantie te beschikken ten opzichte van *PFA*, maar vertoont verder weinig of geen verschillen.

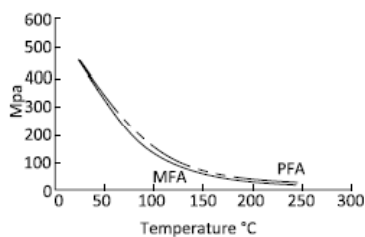
De genoemde fluoropolymeren zullen net als alle andere thermoplasten, belangrijke vervormingen (kruip) vertonen wanneer ze over een lange periode aan druk- of trekspanningen worden onderworpen. Bij voldoende hoge temperatuur (200°C) vertoont *MFA* een gelijkaardig gedrag als *PFA*, terwijl *FEP*, afhankelijk van de aangebrachte belasting en testduur, een toenemend uitgesproken bros karakter zal vertonen, wat uiteindelijk zal leiden tot scheuren met bezwijken tot gevolg. Met andere woorden zowel *MFA* als *PFA* zullen minder snel falen ten gevolge van thermische spanningsscheuren. \_XIV

De vermelde coatings worden door diverse fabrikanten (DuPont, Daikin, Solvay Solexis,...) geproduceerd. De in 'Bijlage A-lampcoatings' vermelde gegevens van de verschillende materialen zijn in overeenstemming met de door de verschillende producenten gepubliceerde data. Indien meerdere fabrikanten dezelfde producten, zij het onder een andere naam produceren, wijken de waarden van de materiaaleigenschappen slechts in zeer beperkte mate af en wordt een richtwaarde genoteerd in ('Bijlage A-lampcoatings').

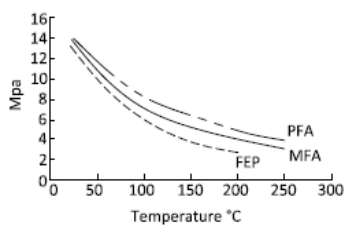
Met het oog op een nieuw veiligheidsconcept voor 'Freeform Design' glasconstructies lijken de fluoropolymeren een geschikt materiaal, hoewel niet uit het oog mag worden verloren dat de beperkte adhesie met glas ertoe leidt dat deze coating slechts een zeer beperkte invloed zal hebben op het postdestructief gedrag van de glasstructuur. Desondanks zal ze waarschijnlijk een uitermate goede bescherming van de omgeving bieden tegen vallend glas, op voorwaarde dat de polymeerlaag niet onmiddellijk scheurt. Om deze onderstellingen te toetsen, lijkt het dan ook aangewezen, deze fluoropolymeren effectief aan te brengen op glas en te testen.



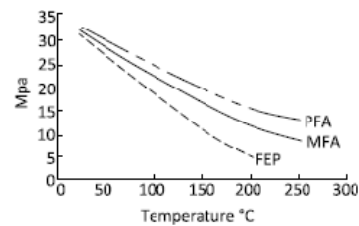
Figuur 2. 17 Vergelijking van de eigenschappen en hun spreiding bij de verschillende Lamp coatings.



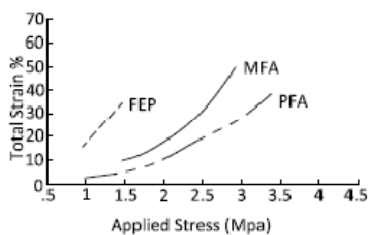
Figuur 2. 19 E-modulus (Mpa)



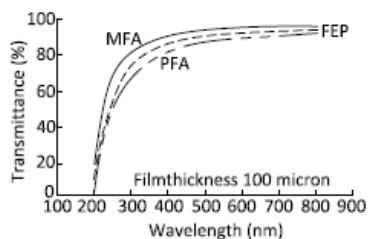
Figuur 2. 22 Vloeispanning (Mpa)



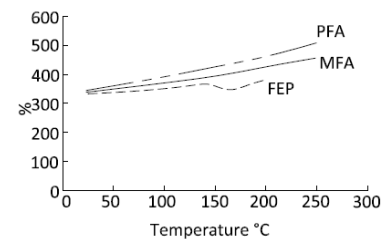
Figuur 2. 20 Breukspanning (Mpa)



Figuur 2. 18 Spanningsrek-Diagram voor 2000h @ 200°C.



Figuur 2. 23 Transmissie.



Figuur 2. 21 Breukrek (%)

Bron: SOLVAY SOLEXIS, *Hyflon MFA en PFA Design Guide*.

## 2. LABWARE COATINGS

In de chemische industrie is doorheen de jaren de nood ontstaan om breukbestendige recipiënten<sup>1</sup> te ontwikkelen, zodat de eventuele toxische inhoud niet in het milieu of de omgeving terecht zou kunnen komen en het laboratoriumpersoneel kan worden beschermd tegen rondvliegende scherven. Gedurende deze periode zijn naast plastic recipiënten, ook specifieke polymeercoatings ontwikkeld om de glazen tegenhangers te voorzien van een kunststoffen bescherming. De onder de noemer *labware coatings* opgesomde polymeren vormen hier een onderdeel van.

De ervaring toont tevens dat de bekomen kennis voor het coaten van gewone drankflessen (Hot-End/Cold-End coating) niet onmiddellijk transposeerbaar is naar laboratoriuminstrumenten, daar de vereisten voor deze laatste duidelijk hoger liggen. Denk daarbij aan sterilisatieprocedures en behandelingen in de autoclaaf die een belangrijke weerslag kunnen hebben op de transparantie en de adhesie van de polymeercoatings. De steeds strenger wordende eisen hebben er tevens voor gezorgd dat bepaalde coatings zijn vervangen door betere of werden aangepast, waardoor het huidige aanbod even groot als divers is geworden.

Een onderzoek naar de eigenschappen van de, naar alle waarschijnlijkheid, drie meest als 'Labware coating' toegepaste polymeerfamilies (PE, PVC, E/VOH<sup>2</sup>), werd in het verleden uitgevoerd in opdracht van het *Fraunhofer Institut Silicatforschung\_XV*. Er werd tijdens deze studie gepoogd inzicht te krijgen in het gecombineerd effect van polymeercoatings en adhesiepromotoren op de breukweerstand, lekveiligheid, barstdruk en implosieweerstand van glazen laboratoriummateriaal.

<sup>1</sup> Koelers, destillatiekolommen, flessen,...

<sup>2</sup> PE, PVC, E/VOH zijn de courant gebruikte afkortingen voor respectievelijk polyethyleen, polyvinylchloride, ethyleen vinyl alcohol.

Het algemeen doel van de adhesiepromotoren, bestaat erin de fysische en chemische adhesie tussen het polymeer en het glas, zowel onmiddellijk als op lange termijn, te verbeteren. Glas wordt immers omwille van de hoge kosten, zelden grondig gereinigd vóór het coaten, waardoor de adhesie eerder beperkt is en voor sommige van deze polymeren zelfs verminderd na een bepaalde periode (1-2 maanden). Met als doel dit te voorkomen, werden in het verleden diverse adhesiepromotoren<sup>1</sup> ontwikkeld. De gehanteerde adhesiepromotor is daarbij afhankelijk van de specifieke polymeersamenstelling (coating), wil een optimale chemische adhesie met het glas worden bekomen.

Uit de resultaten van deze studie blijkt het aanbrengen van dergelijke adhesiepromotoren vóór het coaten belangrijke algemene en tijdsafhankelijke verbeteringen van de breukweerstand van het glas tot gevolg heeft.

Bovendien werden enkele intrinsieke kenmerken van de coatings onderzocht zoals transparantie, UV-bestendigheid, treksterkte, slijtvastheid (schuringsweerstand), hardheid, ... De bekomen resultaten hadden tot doel hulp te bieden bij het maken van een gedegen polymeerkeuze, afhankelijk van de uiteindelijke toepassing en kunnen in het raam van deze masterproef belangrijke achtergrondinformatie bieden.

'*Bijlage A-labware coatings*' toont dat een eerste vergelijk van de polymeren gebeurde op basis van hun thermische, chemische, mechanische en optische eigenschappen alsook de uitvoeringstechniek, gemiddeld bereikbare dikte en de beperkte kennis over de adhesie met glas. Uit deze opsomming blijkt meteen dat deze vergelijking en selectie niet onmiddellijk alle parameters in rekening bracht die bij de uiteindelijke praktische toepassing op glasconstructies wel degelijke een voorname rol zullen spelen, daarbij kan gedacht worden aan de ontvlambaarheid, krasvastheid, UV-bestendigheid van de coating,...

De drie vermelde polymeerfamilies kennen bij verschillende fabrikanten verschillende productnamen met daarbij horende, licht afwijkende eigenschappen. Ook talloze andere polymeren kennen hun toepassing op (laboratorium)glas, het gaat daarbij van thermoplasten zoals polyamiden (*Vestosint*®, Evonik), ethyleen acid copolymeren (*Abcite*®, Du Pont de Nemours), polyester (*Opalfilm*®, Haverkamp), polyalkenen (*Vitroguard 12*, Plascoat),... tot thermoharders zoals polyurethanen (*Bayhydur*®, Bayer; *Rhodocoat*®, Perstorp).

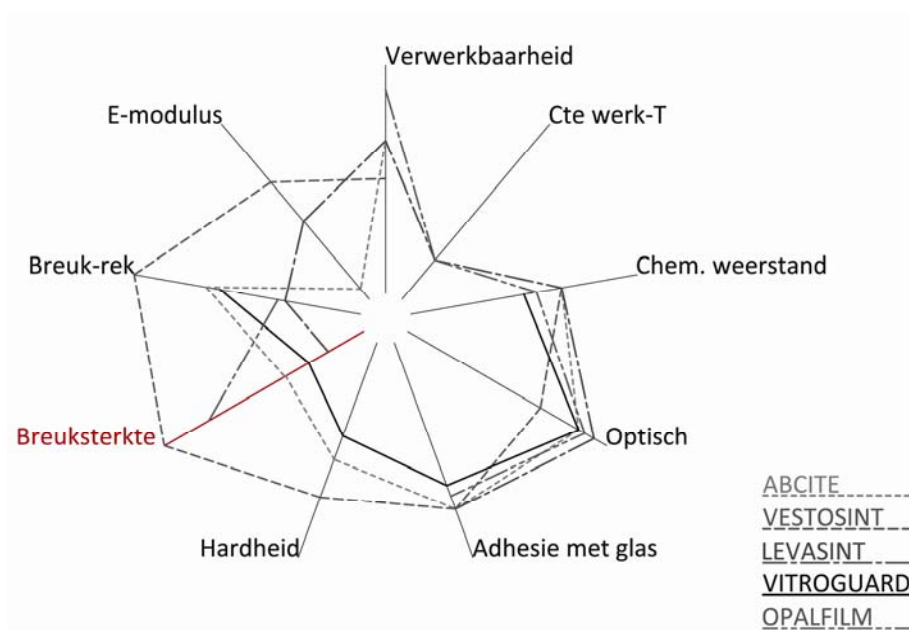
Wetende dat deze materialen toepasbaar zijn op glas, dienen ze zo objectief mogelijk te worden vergeleken op basis van de door de fabrikant vrijgegeven data (*Bijlage A-labware coatings*), zodat een onderbouwde selectie kan gebeuren met het oog op een toepassing als veiligheidsconcept voor 'Freeform Design' glasconstructies.

Het mag echter duidelijk wezen dat deze masterproef hoofdzakelijk beoogt het potentieel van deze coatings op het gedrag van glazen structurele elementen te onderzoeken, en dat de andere in het vermelde proefrapport aangehaalde polymeereigenschappen zullen worden gehanteerd als materiaalgegevens en verder niet worden onderzocht.

---

<sup>1</sup> Bijvoorbeeld: 3-Aminopropyltriethoxysilan bij PE en E/VOH coatings; N-(2-Aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilaan bij PVC coatings.

Al snel wordt duidelijk dat de technieken, gehanteerd bij het aanbrengen van deze coatings, zich hoofdzakelijk beperken tot *wervelsinteren*, *sputten*, *dompelen* en *rollen* of *borstelen*. De klaarblijkelijk eenvoudige toepasbaarheid zorgt ervoor dat het eventueel gebruik van coatings als toekomstig veiligheidsconcept, een breed spectrum van de glasindustrie zou kunnen bekleden. Er dient ook te worden opgemerkt dat sommige van deze coatings met hun bijhorende eigenschappen niet in onderstaande figuur (Figuur 2. 24) werden opgenomen. De verklaring hiervoor is de beperkte of niet transparante informatieverstrekking van de fabrikant over de betreffende coating.



Figuur 2. 24 Vergelijking van de eigenschappen van de belangrijkste labware coating.

## SELECTIE

## - Kill your Darlings -

Uit de veelheid van technieken en materialen kunnen in deze verkennende fase reeds enkele belangrijke conclusies en bedenkingen worden geformuleerd.

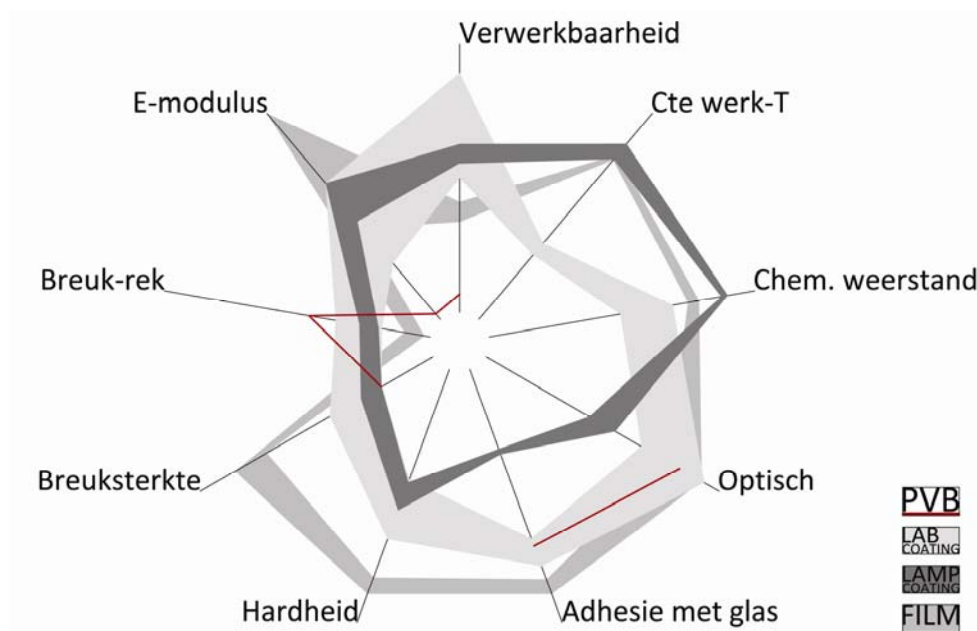
De hierboven opgesomde materialen vragen om een selectie. Deze selectie is complex en verre van rechtlijnig aangezien er met verschillende parameters rekening dient te worden gehouden. Eerst en vooral zijn er de technische productdata; door elke fabrikant opgesteld volgens bepaalde testnormen. De variatie van de gehanteerde normen laat echter niet toe een volledig objectief vergelijk te maken tussen de verschillende producten. Bijgevolg fungeren ze als richtwaarden, te hanteren om een zo goed mogelijke inschatting te maken van de intrinsieke kwaliteiten van de producten en van de te verwachten resultaten, wanneer deze op glas worden toegepast.

Vanuit een ander materiaalperspectief bekeken, moeten de zowel voor deze masterproef, als voor de praktijk relevante uitvoeringstechnieken worden geëvalueerd. Het is daarbij evident dat deze niet helemaal gelijklopend zijn. Met deze masterproef is de betrachting immers een zo groot mogelijk veld te bestrijken, waardoor het mogelijk wordt de verschillende technieken samen met hun kwaliteiten en beperkingen te beoordelen. Daarentegen zal in de bouwpraktijk vaak de voorkeur worden gegeven aan technieken die een zekere robuustheid en zekerheid met zich meebrengen,

aangezien ze nog altijd deel uitmaken van het bouwproces. Toleranties op zowel de uitgevoerde werken als op de uitvoering zelf zijn bijgevolg steeds wenselijk.

Hoewel dit geen bepalende factor zou mogen zijn in dit onderzoek, is het vanzelfsprekend dat in eerste instantie gebruik wordt gemaakt van reeds beschikbare producten en beproefde technieken. Concreet wordt verwezen naar het in het verleden *wervelsinteren* van laboratoriummateriaal met *Levasint®* in universitaire context. Ook de onmiddellijke beschikbaarheid van *Abcite®* en *Teflon®* zorgt ervoor dat deze zullen worden toegepast, ondanks alle bedenkingen en overwegingen die in bovenstaande werden gemaakt.

Wanneer (voor even) de ‘praktische’ overwegingen buiten beschouwing worden gelaten, resten er drie potentiële categorieën met hun bijbehorend productgamma, elk gekenmerkt door hun eigen voor- en nadelen, waarvan onderstaande figuur (Figuur 2. 25) een impressie weergeeft.



Figuur 2. 25 Vergelijking van de eigenschappen en hun spreiding bij *labware coatings*, *lamp coatings* en *veiligheidsfilms* bij kamertemperatuur.

De *lamp coatings*, gedomineerd door de fluoropolymeren, gekenmerkt door hun zeer goede chemische weerstand, hoge werktemperatuur maar ook door de beperkte adhesie en transparantie, vertonen mechanische eigenschappen die weinig verschillen van de traditionele *labware coatings* en kennen een beperkte spreiding tussen de verschillende types, waardoor een specifieke keuze tussen FEP, MFA, PFA niet op basis van de verkregen tabellen en informatie kan geschieden, maar in nauwe samenwerking met de producent dient te gebeuren.

Een grote variatie is op te merken in de eigenschappen van de *labware coatings*. Bijgevolg zal een eerste selectie hier wel dienen te geschieden vanuit de beschikbaar gestelde informatie.

Het gebruik van *Levasint®*, ondanks zijn beperkte kwaliteiten en productiestop, wordt ingegeven door de voorradigheid van dit product in de universitaire omgeving.

Vanwege de excellente mechanische eigenschappen lijkt *Vestosint*<sup>®</sup> een aan te wenden product, mits het gebruik van een hybride polymeerprimer als adhesiepromotor<sup>1</sup> en waarvan de eigenlijke samenstelling kan wijzigen, afhankelijk van de specifieke toepassing. De aanpasbaarheid van de primer betekent een groot voordeel indien *Vestosint*<sup>®</sup> als veiligheidscoating verder zou worden ontwikkeld.

In bovenstaande figuur (Figuur 2. 25) wordt al snel duidelijk dat de *veiligheidsfilms* over zeer goede eigenschappen beschikken, echter kunnen ze slechts in beperkte mate worden gebruikt voor 'freeform' glasconstructies. Het lijkt dan ook interessant om deze films vanuit deze problematiek te testen en de limieten van hun toepasbaarheid als bescherming van vrij vormgegeven structuren te onderzoeken.

In wat volgt, zullen de beschikbare polymeerproducten (*Abcite*<sup>®</sup>, *Levasint*<sup>®</sup> en *Teflon*<sup>®</sup>) worden getest. In een eerste fase wordt hun toepasbaarheid op vlak glas getest. Aan de hand van de beschikbare informatie, worden ze met de geschikte techniek aangebracht op vlak glas, waarbij de procesparameters worden onderzocht, geoptimaliseerd en vastgelegd.

---

<sup>1</sup> ICS, *Development of a shatter protection coating for laboratory glass articles*,  
[http://www.isc.fraunhofer.de/k\\_u\\_t\\_hybrid\\_sch\\_sys\\_detailans+M52557d25f0a.html](http://www.isc.fraunhofer.de/k_u_t_hybrid_sch_sys_detailans+M52557d25f0a.html), geconsulteerd op: 28 augustus 2008.

## ALGEMEEN

## - A new beginning -

De titel van deze masterproef: “Een innovatief veiligheidsconcept voor ‘Freeform Design’ glasconstructies” stelt meteen scherp dat er ter bescherming van vrij vormgegeven glasconstructies weinig of geen data, proeven of gegevens beschikbaar zijn om op terug te vallen of om op verder te bouwen tijdens het onderzoek. Het betekent evenmin dat van nul dient te worden vertrokken. Een basis, ontwikkeld vanuit de coatingindustrie, biedt dankzij gestandaardiseerde testmethodes, een eerste houvast om enkele belangrijke parameters van coatings te onderkennen en eventueel te beoordelen.

Tabel 3. 1 Testmethoden voor *poedercoatings* toegepast op metaal<sup>1</sup>. De gekleurde vakken bevatten testmethoden mogelijk toepasbaar wanneer de coating op glas wordt aangebracht

| Testmethode        | ISO            | DIN     | ASTM  |
|--------------------|----------------|---------|-------|
| Filmdikte          | 2360           |         | D1440 |
|                    |                |         | D1005 |
|                    | 2178           |         | D1186 |
|                    | 2808           |         |       |
| Glans              | 2813           | 6730    | D523  |
| Kleur              | visueel        |         |       |
|                    | colorimetrisch |         | D2244 |
| Adhesie            | 2409           | 53-232  | D2197 |
|                    | 4624           |         |       |
|                    |                | 58196-6 | D3359 |
| Impactweerstand    | 6272           |         | D2794 |
| Randdekking        |                |         | 296   |
| Krasweerstand      | 1518           | 52347   | D2793 |
| HB-Hardheid        |                |         | D3363 |
| Vochtbestendigheid | 6270           | 5017    |       |
| Zoutspray test     | 9227           | 50021   | B117  |
| Schuurweerstand    | 7784-1/2       | 52347   | D4060 |

De uitvoering van deze testen vergt vaak gespecialiseerde apparatuur, waardoor voor de hier als ‘inleidende testcase’ omschreven proeven werd overgestapt naar een eenvoudige, meer algemene testprocedure, waarbij werd getracht om op kwalitatieve basis een eerste inzicht in de verschillende parameters te krijgen en eventuele pijnpunten aan het licht te brengen. Het gaat om kleinschalige testen (250x50mm) op vlak glas, die na het coaten met de geselecteerde polymeren door middel van een vervorminggestuurde vierpuntsbuigproef destructief zullen worden getest. De evaluatie betreft een visuele waarneming van het materiaalgedrag, een meting van de belasting met de daarbij horende doorbuiging en een beoordeling van de gehanteerde coatingtechniek met de bijbehorende

<sup>1</sup> AKZO NOBEL, *Complete Guide to Powder Coatings*, Issue 1, November 1999, p.21.

parameters. Het is dit laatste dat in onderhavig hoofdstuk uitvoerig zal worden besproken. De destructieve testen zullen bijgevolg voorwerp uitmaken van *hoofdstuk 4*.

De belangrijkste parameters die de geschiktheid van de coating als veiligheidsconcept voor 'Freeform Design' glasconstructies zullen bepalen zijn:

\_Toepassingstechniek (hoofdstuk 3):

Dikte van de coating

Uniformiteit van coating

Textuur van coating (microbelletjes, bruine verkleuring, orange peel<sup>1</sup>)

\_Coatingmateriaal (hoofdstuk 2):

Mechanische eigenschappen (treksterkte, breuk-rek, E-modulus, impact weerstand, ...)

Optische eigenschappen

Chemische eigenschappen

Thermische eigenschappen (constante werktemperatuur)

Tijdsafhankelijke eigenschappen (kruip, adhesieverlies, verlies aan elasticiteit, ...)

\_Interface:

Adhesie tussen coating en glasoppervlak (bepaald door de oppervlaktegesteldheid van het glas, adhesieve eigenschappen van het coatingmateriaal, gebruikte adhesiepromotoren, ...)

Terwijl een aantal van deze parameters de esthetische kwaliteit van het gecoat glaselement bepalen (transparantie, druipresten, textuur,...) zullen andere een belangrijke invloed uitoefenen op de duurzaamheid (scheurvorming bij uitharding, UV-bestendigheid, chemische weerstand,...) en het eigenlijke gedrag bij (over)belasting (kruip, adhesie, treksterkte van coating, ...). In het raam van deze masterproef werd getracht het licht te laten schijnen op de belangrijkste van deze parameters met als bijzonder punt het gedrag tijdens en na glasbreuk.

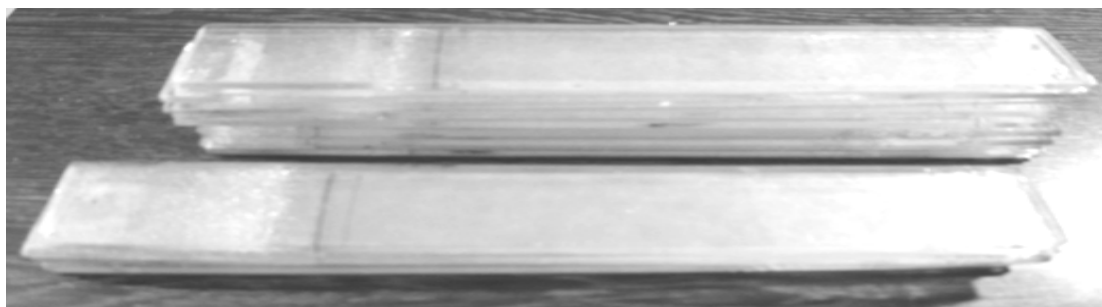
## TEST CASE

- Levasint® -

De eerste experimenten vielen onder de noemer: 'verkennend onderzoek'. Weinig praktische voorkennis over het coatingmateriaal (*Levasint®*) en de toepassingstechniek (*wervelsinteren*) domineerden deze fase, waarbij initieel beroep werd gedaan op de kunde van het personeel aan de faculteit Wetenschappen van de Universiteit Gent.

Deze proeven hadden tot doel kennis te maken met de gang van zaken en de moeilijkheden en kwaliteiten bloot te leggen, zodat deze in een latere fase verder zouden kunnen worden ontwikkeld en geoptimaliseerd.

<sup>1</sup> Bij *poedercoatings* die onvoldoende vloeien, zal op het substraat een polymeerlaag worden gevormd waarvan de oppervlaktetextuur vergelijkbaar is met die van een sinaasappel.

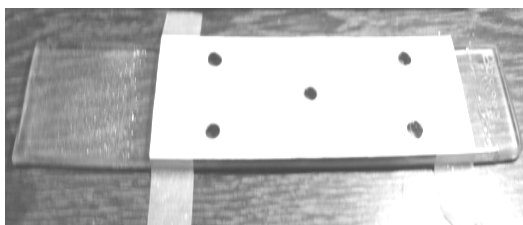


Figuur 3. 1 Gecoate glaselementen met de afmetingen 230x50x2mm

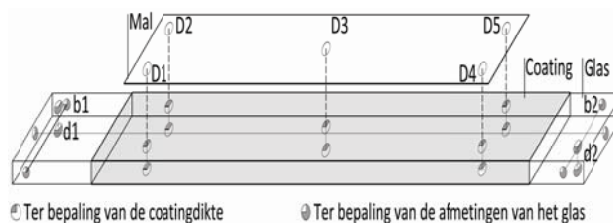
## 1. VOORBEREIDING

Een eerste testreeks bestond uit vlakke glazen elementen, enerzijds bestaande uit natronkalkglas, anderzijds uit borosilicaatglas. De elementen werden versneden met een traditionele glassnijder tot proefstukken met beperkte afmetingen, waarvan de exacte waarden zijn terug te vinden in 'Bijlage B-test case'. Er dient te worden opgemerkt dat deze elementen werden versneden uit recuperatiemateriaal, waardoor op het glasoppervlak nog lijmresten waren terug te vinden van een beschermingsfolie<sup>1</sup>, aangebracht tijdens vorige proeven. Waar sprake was van overdadig veel lijm, werd deze met aceton verwijderd. De andere teststukken werden niet gereinigd of behandeld vóór het coaten.

Alle glaselementen dienden stuk voor stuk te worden opgemeten met grote nauwkeurigheid (1/100mm) om een latere diktebepaling van de coating en tevens een inschatting van de breukbelasting te kunnen maken. De verschillende diktes werden steeds opgemeten met een micrometer ter hoogte van de uiteinden van elk glaselement (Figuur 3. 2), wat resulteerde in twee diktematen die terug te vinden zijn in de reeds vermelde bijlage. Uit deze opmeting bleek tevens dat het nemen van slechts twee maten volstond, aangezien deze kleine glaselementen over hun totale lengte ( $\pm 250\text{mm}$ ), slechts beperkte dikteafwijkingen ( $\Delta t_{\text{max}} = 0,04\text{mm}$ ) vertoonden. Tevens werden steeds twee breedtes bepaald (met een schuifmaat, nauwkeurig tot 2/100mm). Bijgevolg werd het mogelijk de rekenkundige gemiddelde breedte en dikte van elk element te berekenen. Als laatste werd de lengte van de elementen gemeten. Deze was louter indicatief, aangezien niet de lengte van het proefstuk, maar wel de eigenlijke afstand tussen de twee steunpunten bij de proefopstelling van belang was ter bepaling van de bezwijkbelasting. Deze laatste werd berekend met de klassieke formules uit de elasticiteitsleer (voor lineair elastisch materiaal) en was van belang om een geschikte keuze van de meetcel<sup>2</sup> te kunnen maken.



Figuur 3. 3 Gecoat glaselement met opmetingsmal.



Ter bepaling van de coatingdikte

Ter bepaling van de afmetingen van het glas

Figuur 3. 2 De verschillende op te nemen maten van vlak glas, voor en na het coaten.

<sup>1</sup> Het betreffen beperkt klevende polymeerfilms, die rond de glazen elementen werden gewikkeld om de glasscherven na glasbreuk samen te houden.

<sup>2</sup> Een meetcel meet steeds de belasting die tijdens de vervormingsgestuurde buigproef op het glaselement werd uitgeoefend en heeft een maximumbereik met een daarbij horende nauwkeurigheid. Beide zijn van belang, wil een correcte meting en een nauwkeurig resultaat worden bekomen (hoofdstuk 4).

## 2. COATEN

Bij het eigenlijke coaten van de proefstukken dienden twee fundamentele keuzes te worden gemaakt: de te gebruiken coating en de best passende toepassingstechniek, zowel in het opzicht van de coating als van het substraat. Voor de eerste reeksen werd steeds geopteerd proeven uit te voeren met *Levasint*<sup>®</sup>. Het onder poedervorm beschikbare<sup>1</sup> thermoplastische polymeer liet zich het best op glas aanbrengen door middel van de in *hoofdstuk 2* reeds besproken *wervelsinter*-techniek (*Powder Coating*). Bij het hanteren van deze methode werd in de literatuur<sup>2</sup> vermeld dat hoofdzakelijk drie parameters de uiteindelijke kwaliteit van de aangebrachte coating bepalen:

- o Temperatuur en tijd tijdens opwarming van het werkstuk in de oven.
- o Dompeltijd of dompelcyclus (= het aantal keer onderdompelen) van werkstuk in poederbad.
- o Temperatuur en tijd tijdens nabehandeling van het werkstuk in de oven (= *moffel*temperatuur en *moffel*tijd).

Het *wervelsinteren* gebeurde steeds in de centrale werkplaats van de faculteit Wetenschappen (de glasblazerij), waar zowel een wervelbekken als een elektrische stralingsoven beschikbaar waren en waar in het verleden frequent laboratoriummateriaal werd gecoat met *Levasint*<sup>®</sup> (ook *Abcite*<sup>®</sup> en een niet nader bepaald *Teflon*<sup>®</sup>-poeder waren ter beschikking). Er dient te worden opgemerkt dat deze poeders, vóór gebruik, niet in gesloten verpakking zaten, maar gedurende onbekende periode waren blootgesteld aan schommelingen van zowel temperatuur als luchtvochtigheid<sup>3</sup>, wat mogelijke nefaste gevolgen zou kunnen hebben gehad op de kwaliteit van het poeder en van de aangebrachte coating.

Het coaten gebeurde in overeenstemming met de in *hoofdstuk 2* vermelde techniek, waarbij werd vooropgesteld dat de verschillende proefelementen de verschillende behandelingsprocedures dienden te ondergaan.

Bij vier proefstukken werd doelbewust afgeweken van de traditionele werkwijze. Het afwijkend coatingproces liet een kwalitatieve evaluatie van beide uitvoeringsmethodes toe. De vier werkstukken, voorzien van een coating, volgden gedeeltelijk de standaardprocedure, maar nadat ze voor de tweede keer in de oven verdwenen, werden ze opnieuw in het poeder gedompeld en *gemoffeld*. In de tabel (in *Bijlage B-test case*) werd dit genoteerd onder de vorm: '6+6 extra', duidend op het aantal keer dat het element werd ondergedompeld respectievelijk voor- en nadat het de tweede keer (de eerste keer was ter voorverwarming van het werkstuk) in de oven werd geplaatst.

Hoewel het denkbaar is dat ook de omgevingstemperatuur en de relatieve luchtvochtigheid tijdens het *wervelsinteren* een (zij het eerder beperkte) invloed zouden kunnen hebben op de kwaliteit van de coating, werden deze nog niet in rekening gebracht tijdens de inleidende testen.

<sup>1</sup> Ondanks dat dit polymeerpoeder niet meer wordt geproduceerd, was het wel nog beschikbaar in de glasblazerij van de faculteit Wetenschappen aan de Universiteit Gent.

<sup>2</sup> AA. VV., *Encyclopedia of Polymer Science and Technology Vol.5, Coating Methods, Powder Technology*, Interscience, New York, 1964, pp.570-603.

<sup>3</sup> De poeders werden opgeslagen in de kelder van het gebouw S4-bis, Campus Sterre, Krijgslaan 281, 9000 Gent.

De temperatuur en de tijd tijdens voorverwarming van het werkstuk in de oven bepaalden in belangrijke mate de oppervlaktetemperatuur van het werkstuk bij onderdompeling in het polymeerpoeder. Deze temperatuur diende in eerste instantie hoger te zijn dan de smelttemperatuur van *Levasint*®, om het polymeerpoeder aan het glasoppervlak te smelten.

Bij gebrek aan productinformatie over *Levasint*®, werd de oventemperatuur door de heer *Verwimp* (verantwoordelijke voor o.a. het coaten van glazen laboratoriummateriaal van de Universiteit Gent) bepaald op 235°C, wat impliceerde dat de glaselementen een oppervlaktetemperatuur hadden die, hetzij gelijk, hetzij beperkt lager was dan 235°C<sup>1</sup>.



Figuur 3. 5 Stralingsoven ter beschikking gesteld door de faculteit Wetenschappen van de Universiteit Gent.



Figuur 3. 4 Elementen rusten op vuurvaste stenen tijdens voorverwarming.

De *dompeltijd* werd tijdens het dompelen niet opgemeten, aangezien de coating werd aangebracht door het hete werkstuk ( $\leq 235^\circ\text{C}$ ) een aantal keer in en uit het poeder te halen. Omwille van deze afwijkende techniek werd, in plaats van de tijd te meten, geteld hoeveel keer het stuk werd ondergedompeld. Het ging dus om een relatieve tijdsindicatie, gedefinieerd door het aantal keer dat het werkstuk ‘snel’ werd ondergedompeld (# opeenvolgende coatings). In het vervolg van deze masterproef zal daarom gesproken worden over de *dompelcyclus* in plaats van de *dompeltijd*.

Er werd verwacht dat er weinig verschil zou zijn in dikte en kwaliteit van de coating bij het hanteren van deze licht afwijkende dompeltechniek. De gevolgde redenering stelde dat enerzijds het *cyclisch* onderdompelen er voor zou zorgen dat het werkstuk sneller zou afkoelen, vanwege het op en neer bewegen. Hierdoor zou een dunnere polymeerlaag worden verkregen voor het *cyclisch* ondergedompeld glaselement in vergelijking tot het *continu* ondergedompelde werkstuk.

Anderzijds zou bij elke terugtrekking uit het wervelbekken tijdens het *cyclisch* dompelen, het poeder de kans krijgen te smelten, waardoor een nieuw kleefvlak kon gevormd worden waaraan het poeder bij de volgende onderdompeling kon hechten. Dit effect zou bij het *continu* ondergedompeld werkstuk niet kunnen plaatsvinden,

<sup>1</sup> Later bleek uit de temperatuursmetingen met een multimeter *Dynatek D9600* (d.m.v thermokoppel, K-type) dat de door de oven aangegeven oventemperatuur, steeds lager was dan de ‘werkelijke’ (door de multimeter opgemeten) oventemperatuur t.h.v. de proefstukken. Deze temperatuursverschillen konden oplopen tot 70°C, maar waren niet constant.

waardoor in dit geval bij het *cyclisch* onderdompelen een hogere polymeerdikte zou kunnen worden verwacht.

Wanneer de hierboven vermelde overwegingen in acht werden genomen, kon worden gesteld dat voor beide uitvoeringstechnieken eenzelfde polymeerdikte te verwachten was.



Figuur 3. 6 Wervelbekken ter beschikking gesteld door de faculteit Wetenschappen van de Universiteit Gent.



Figuur 3. 7 Glaselement onmiddellijk na onderdompelen in polymeerbak zonder *moffelen*.

*Moffeltemperatuur en -tijd van het werkstuk* diende nauwlettend in het oog te worden gehouden. Te hoge en te lange baktijden resulteerden immers, met hoogste waarschijnlijkheid, in verbranding van de coating. De maximumtemperatuur werd vastgelegd (door de heer *Verwimp*) op 200°C<sup>1</sup>.

Verder moet worden opgemerkt dat alle proefelementen liggend, met de uiteinden steunend op twee kalkstenen, in de oven werden geplaatst.



Figuur 3. 8 De op twee stenen rustende proefstukken worden tijdens het bakproces gecontroleerd of ze voldoende lange tijd hebben *gemoffeld*.



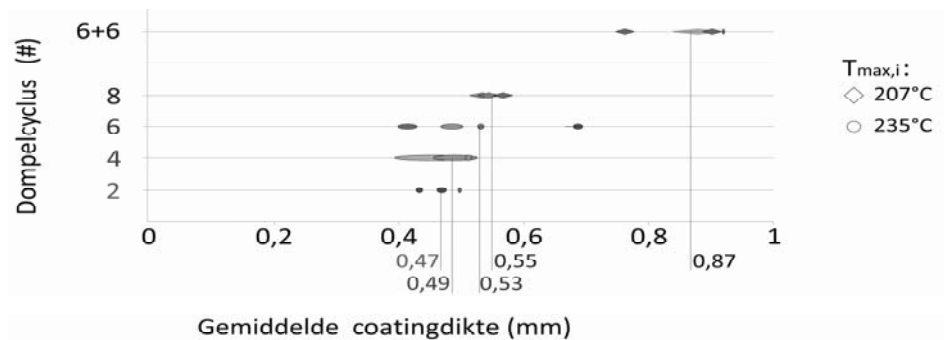
Figuur 3. 9 De gecoate plaatjes worden te droge gelegd op twee kalkstenen.

De afkoeling (bij kamertemperatuur) van de werkstukken gebeurde op twee steunpunten om de nog vloeibare coating niet verder te beschadigen, waarna de coatingdikte werd bepaald uit het verschil tussen de reeds opgemeten glasdikte en een nieuwe meting. Het gaat hierbij dus om de totale coatingdikte, zijnde de som van de coatinglagen aan beide glasoppervlakken; de dikte van

<sup>1</sup> Later bleek uit de temperatuursmetingen met een multimeter *Dynatek D9600* (d.m.v thermokoppel, K-type) dat de door de oven aangegeven oventemperatuur, verschilde van de 'werkelijke' (door de multimeter opgemeten) oventemperatuur t.h.v. de proefstukken. Deze temperatuursverschillen konden oplopen tot 70°C, maar waren niet constant.

één laag was immers onmogelijk op te meten met een micrometer. Een benaderende laagdikte kan worden gevonden door de in de bijlage vermelde waarde steeds te halveren.

Om een indicatie te krijgen over de uniformiteit van de coating, werd de coatingdikte op vijf verschillende punten langsheen het later belaste oppervlak (tussen de steunpunten) van het glaselement gemeten (Figuur 3. 2). Het meten van deze diktes gebeurde met behulp van een micrometer met een nauwkeurigheid van 1/100 mm, waarvan de resultaten in onderstaande grafiek werden weergegeven.



Figuur 3. 10 De spreiding en de gemiddelde coatingdikte bereikt voor glaselementen met een verschillende dompelcyclus en voorverwarmingstemperatuur.

### 3. BEVINDINGEN

Op basis van de bekomen resultaten was het mogelijk om een aantal eerste basishypotheses te formuleren met betrekking tot de invloed van de klaarblijkelijk belangrijkste uitvoeringsparameters op de kwaliteit van de coating. Het vooropstellen van deze hypothesen liet toe, in een volgend stadium doelgerichter te werk te gaan, ze onmiddellijk te toetsen aan de resultaten en ze waar nodig bij te sturen.

#### *Temperatuur en tijd tijdens voorverwarming van het werkstuk in de oven*

Het leek enigszins logisch, maar moeilijk afleidbaar uit deze eerste reeks, dat een groter verschil tussen de temperatuur van het glas en de smelttemperatuur van het polymeerpoeder (*Levasint®* in dit geval), een dikkere polymeerlaag tot gevolg zou hebben bij proefstukken die eenzelfde *dompelcyclus* ondergingen.

De *dompelcyclus* leek, naast de oppervlaktetemperatuur van het substraat, een belangrijke invloed uit te oefenen op de coatingdikte. Experimenteel bleek dit effect uit de resultaten van deze eerste proefreeksen. Hoewel er steeds sprake was van een zekere spreiding, was in Figuur 3. 10 een indicatief lineair verband waar te nemen tussen de coatingdikte en de *dompelcyclus*.

De betrekkelijk grotere spreiding, opgemerkt tussen de coatingdiktes van de werkstukken die zes keer werden ondergedompeld, was uitgaande van deze resultaten moeilijk te verklaren.

Tevens werd opgemerkt dat voor de profelementen met een afwijkende dompelcyclus (*intermediair verwarmd*) een licht hogere coatingdikte werd verkregen dan zou worden verwacht wanneer naar de andere diktes werd gekeken, waardoor zou kunnen worden gesteld dat deze methode tot dikkere coatings kan leiden.

*De moffeltemperatuur en -tijd van het werkstuk leek initieel een belangrijke invloed te hebben gehad op de optische/esthetische kwaliteit van de coating. Te hoge maximumtemperaturen leidde al snel tot een oranje-bruine verkleuring van de anders transparante coating. Tevens vormden er zich in sommige proefstukken minuscule luchtbelletjes. Dit laatste kon niet onmiddellijk in verband worden gebracht met het temperatuurverloop en de maximale temperatuur tijdens het moffelen.*

Uit de meting van de coatingdiktes volgde tevens dat de meeste van deze coatings niet geheel uniform werden aangebracht op het liggend in de oven geplaatste vlakke glassubstraat. Enerzijds kon worden vermoed dat de oorzaak hiervan te wijten was aan het niet horizontaal zijn van de ondergrond in de oven, waardoor het poeder niet uniform kon uitvloeien. Anderzijds zou het afkoelen van de glaselementen vóór het coaten een belangrijke factor kunnen zijn geweest.

#### 4. BEMERKINGEN

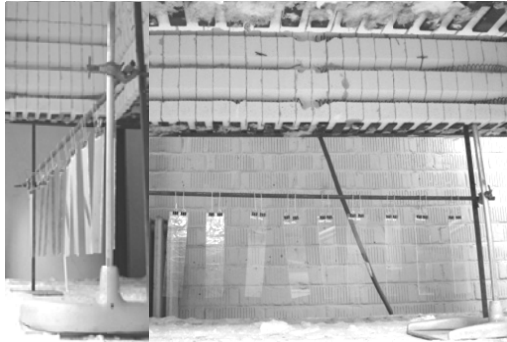
Deze resultaten vormden de basis voor het nemen van enkele belangrijke beslissingen tijdens de tweede fase. Niet alleen zouden proefstukken worden opgehangen, tevens leek de spreiding van de gehanteerde *dompelcycli* te beperkt om later tot interessante resultaten bij de buigproeven te komen. Vandaar werd bij de volgende stap met een grotere variatie van de *dompelcycli* (2, 8, 6+6) gewerkt.

Verschillende testreeksen van *Levasint*®, *Abcite*® en *Teflon*® werden uitgevoerd met de ambitie vergelijkbare en aanvullende informatie over de gehanteerde techniek en het gedrag van de polymeerpoeders tijdens het eigenlijke coaten te verkrijgen. Dit maakte het mogelijk de vooropgestelde hypothesen te toetsen en waar nodig aan te passen.

#### 1. VOORBEREIDING

Uit een plaat (850x1150x2mm) borosilicaatglas werden 62 glazen elementen ( $\pm 230 \times 50$ mm) gesneden met een glassnijder, geschikt voor het snijden van dun glas. Een twintigtal glaselementen werden telkens gebruikt voor het uitvoeren van deze vergelijkende studie. Zoals hierboven vermeld, werden de verschillende dimensies van de werkstukken opgemeten (*Bijlage B-vergelijk*) met behulp van dezelfde meetapparatuur (micrometer, schuifmaat).

Om de algemene coatingkwaliteit te verbeteren werd geopteerd om de glaselementen verticaal op te hangen in de oven door middel van metalen klemmetjes en een haakje. Als belangrijkste voordeel werd initieel aan het voorkomen van contaminatie van de coating gedacht, wat het gevolg was van de oplegging van de gecoate glaselementen op vuurvaste stenen tijdens het moffelen bij de vorige opstelling (*Test case*).



Figuur 3. 11 In de oven opgehangen glaselementen.



Figuur 3. 12 Glaselementen hangen te drogen.

Gaandeweg werden nog andere, zij het eerder uitvoeringstechnische wijzigingen (vb: temperatuursmeting door multimeter, gelijktijdig coaten van glaselementen, ...) doorgevoerd met als doel het coatingproces te optimaliseren en beter te beheersen.

Let wel dat deze uitvoeringstechnische aanpassingen hoofdzakelijk als doel hadden de reproduceerbaarheid van de coating (dikte, optische kwaliteit, ...) te bewerkstelligen. Dit betekent bijgevolg niet dat voor het eerste geteste polymeerpoeder (*Levasint*<sup>®</sup>), vanwege de nog beperkt ingevoerde optimalisatiemaatregelen in het coatingproces, noodzakelijk slechtere resultaten te verwachten vielen dan voor de later in deze masterproef uitgevoerde coatings (*Abcite*<sup>®</sup>, *Teflon*<sup>®</sup>).

De optimalisatiemaatregelen zullen in het vervolg van de masterproef steeds samen met de respectievelijke verantwoording worden vermeld.

Voor zowel de oventemperatuur bij het voorverwarmen als bij het *moffelen* werden steeds de door de fabrikanten beschikbaar gestelde materiaalgegevens, als referentie beschouwd. Een aantal proefstukken werden steeds gebruikt om deze data te vertalen naar de werkelijk toepasbare oventemperaturen. Het mag immers duidelijk zijn dat deze 'optimale' oventemperaturen, naast de polymeersamenstelling, sterk afhankelijk zullen zijn van de glasdikte, de glassoort, de omgevingstemperatuur, het oventype, ...

## 2. COATEN

### Levasint<sup>®</sup> |

**DOELSTELLING:** De beperkte informatie beschikbaar over *Levasint*<sup>®</sup>, maakte het grotendeels mogelijk de hierboven beschreven procedure te volgen (*Test case – Levasint*-).

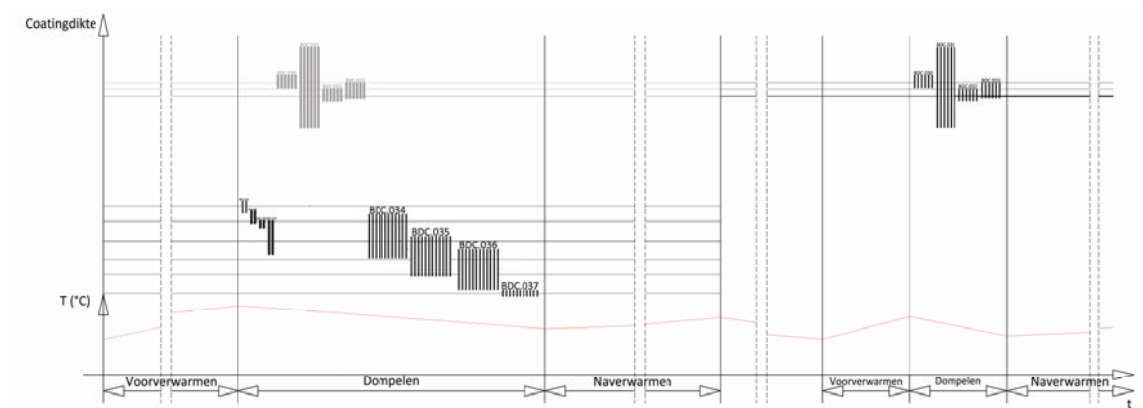
Tijdens het coaten werd bijzondere aandacht besteed aan de dompelsequentie, zijnde de volgorde waarmee de verschillende proefstukken in het polymeerpoeder werden gedompeld. De gekende volgorde zou immers toelaten een beter inzicht te krijgen in het mogelijke effect van de oppervlaktetemperatuur op de coatingdikte en de uniformiteit van de coating.

**UITVOERING:** De 20 proefstukken werden opgedeeld, zodat het aanbrengen van polymeerlagen in twee opeenvolgende verwarmingscyclussen kon plaatsvinden zoals uit onderstaande tekening (Figuur 3. 13) blijkt.

Hierin werd op de horizontale as een tijdsindicatie gegeven die een beeld schetst van de duur van de verschillende processtappen.

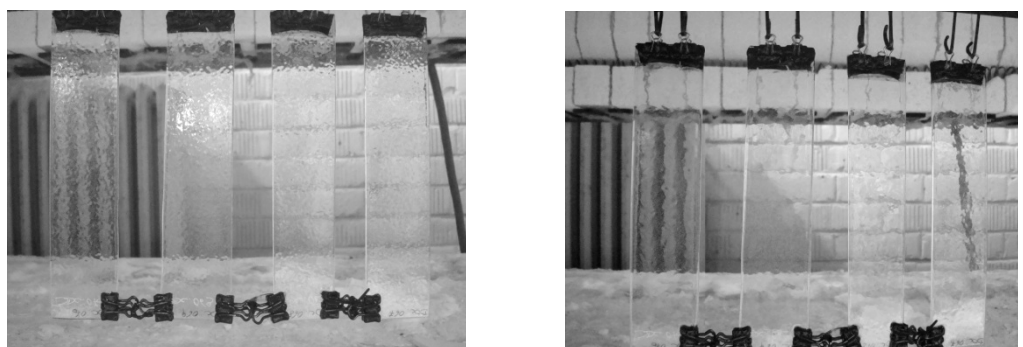
Op de verticale as werd onderaan het verloop van de oventemperatuur indicatief weergegeven. Deze vormde immers een interpretatie van de werkelijkheid, aangezien uit een alternatieve temperatuursmeting<sup>1</sup> bleek dat de door de oven aangeduide temperatuur vaak in belangrijke mate afweek van de ‘werkelijke’ temperatuur.

Elk element werd gekenmerkt door het moment waarop het werd ondergedompeld (positie op de horizontale as), het aantal keer dat het werd gedompeld (aantal verticale streepjes), de gemiddelde coatingdikte die werd bereikt op het einde van het hele proces (positie op de verticale as) en de uniformiteit van de coating (grote diktespreiding langsheen glasoppervlak = grote streepjes).



Figuur 3. 13 Partituur van het coatingproces.

**BEVINDINGEN:** Uit Figuur 3. 13 bleek dat de tijd die verliep tussen het openen van de oven en het effectieve ‘dompelen’ van fundamenteel belang was aangezien deze, naast de oventemperatuur ook de werkstuktemperatuur bepaalde. Te lange tijdspannes vóór het coaten van de proefstukken zorgden immers voor een grote afkoeling van de glaselementen, wat niet alleen in een gebrekkige, niet uniforme polymeerlagen resulteerde, maar ook in een verminderde invloed van de oventemperatuur ( $T_{max,i}$ ) en de *dompelcycli* op de coatingdikte.



Figuur 3. 14 Het langzaam uitvloeien van de coating tijdens het bakproces van 4 simultaan gedompelde glaselementen.

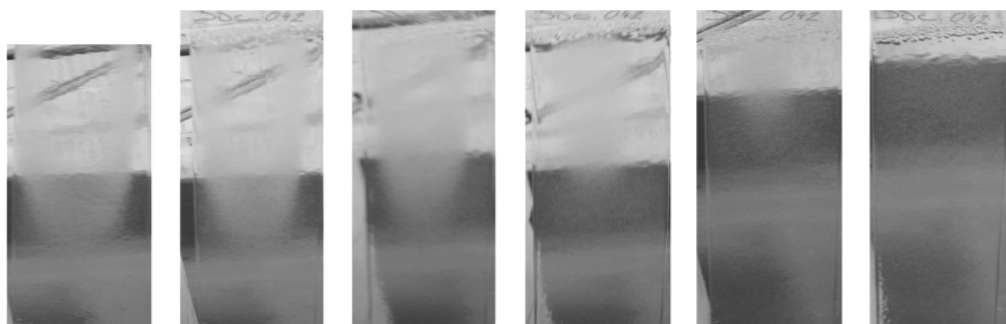
<sup>1</sup> Multimeter Dynatek D9600

Zoals in de vorige fase werd de coatingdikte van elk element na afkoeling op vijf punten gemeten, waardoor ook indicatief de uniformiteit van de coating kon worden bepaald. De resultaten van deze metingen zijn terug te vinden in de *Bijlage B-vergelijk*. Hier werd duidelijk dat de substraattemperatuur een niet te onderschatten rol speelde in het bekomen van de gewenste uniformiteit van de coating. Hoe lager de temperatuur van het glaselement op het dompelmoment, hoe kleiner de zones met een betrekkelijk normale (de te verwachten) coatingdikte. Deze zone volgde klaarblijkelijk de vorm van het afkoelingsfront dat in Figuur 3. 15 zichtbaar werd en had tot resultaat dat de coating soms sterk in dikte verschilde tussen de rand en het centrum van het glasoppervlak.

Opvallend was dat nog steeds het leeuwendeel van de glaselementen microbelletjes vertoonden. Een oorzakelijk verband kon hier echter niet meteen worden afgeleid.

Tabel 3. 2 Gekende parameters en hun invloed op verschillende coatingeigenschappen na het aanbrengen van *Levasint*®.

| Parameters    | Keuze                   | Invloed op                            |
|---------------|-------------------------|---------------------------------------|
| Voorverwarmen | $T_{\max,i}$ (glasopp.) | laagdikte<br>uniformiteit van coating |



Figuur 3. 15 Afkoelingsevolutie bij vlakglas zorgt voor niet uniforme coating na een kritische tijdsparre tussen voorverwarmen en dompelen.

## Abcite® |

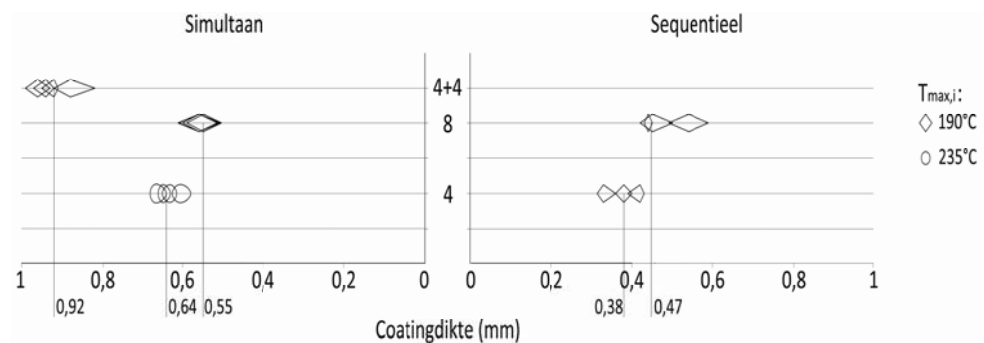
**DOELSTELLING:** Het coaten met *Abcite*® gebeurde in overeenstemming met de door de fabrikant beschikbaar gestelde gegevens.

Er werd bij het coaten tevens gepoogd het coatingproces beter beheersbaar te maken, zowel voor wat betreft de esthetische kwaliteit (microbelletjes, *orange peel*, bruine verkleuring) als voor de coatingdikte.

Om deze doelstelling te verwezenlijken, was een nauwkeurige meting van de oventemperatuur van fundamenteel belang.

**UITVOERING:** Om de coatingdikte beter in de hand te kunnen houden, werden steeds vier proefstukken simultaan gedompeld, waardoor deze elementen niet alleen een gelijke afkoeling ondergingen vóór het dompelen maar ook eenzelfde behandeling kregen tijdens en na het dompelen.

Praktisch werd dit gerealiseerd door de vier elementen aan eenzelfde staaf te hangen en ze met behulp van afstandshouders van elkaar te scheiden, zodat werd voorkomen dat de elementen aan elkaar kleefden tijdens het onderdompelen, *moffelen* en drogen.



Figuur 3. 16 Invloed op de dikte en de uniformiteit van de coating op glas bij verschillende uitvoeringstechnieken.

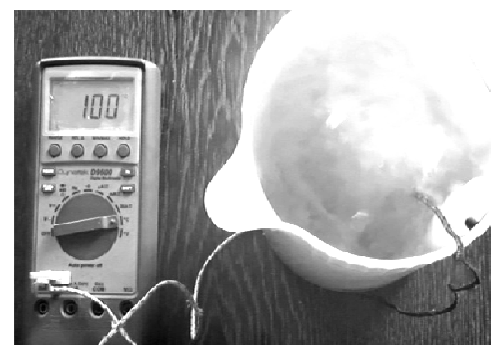
Om de esthetische kwaliteit te verbeteren, werd een reeks individuele elementen verwarmd, gecoat en *gemoffeld*. Uit de resultaten van deze eerste vijf elementen konden echter geen nieuwe uitspraken worden gedaan over de invloedsparameters, aangezien de optimale oventemperatuur voortdurend leek te veranderen. De contradictorische resultaten werden verondersteld voort te vloeien vanuit de onnauwkeurigheid van de temperatuursmeting.

Met de ambitie een betere en nauwkeurigere meting van de oventemperaturen te bekomen, werd het noodzakelijk een alternatieve temperatuursmeting uit te voeren. Het gebruikte uitleestoestel was een multimeter *Dynatek D9600*<sup>1</sup> die standaard voorzien wordt met een thermokoppel (K-type). Een ijking van het toestel geschiedde door een temperatuursmeting uit te voeren van zowel ijswater (typisch 0°C) als kokend water (typisch 100°C), waarbij geen afwijking werd opgemeten door de multimeter. Er zou vervolgens kunnen worden verwacht dat bij uitbreiding van het meetbereik (tot 400°C) er zich tevens geen of zeer kleine afwijkingen zouden voordoen.

Deze onderstelling werd bevestigd door herhaaldelijke temperatuursmetingen (400°C) uit te voeren in verschillende ovens. De uitgelezen temperaturen door de temperatuursmeters van de ovens, toonden na verloop van tijd (ongeveer 1 uur) vergelijkbare waarden als bij de multimeters.



Figuur 3. 17 Ijswater (0°C) als referentiepunt voor ijking van de multimeter.



Figuur 3. 18 Kokend water (100°C) als referentiepunt voor ijking van de multimeter.

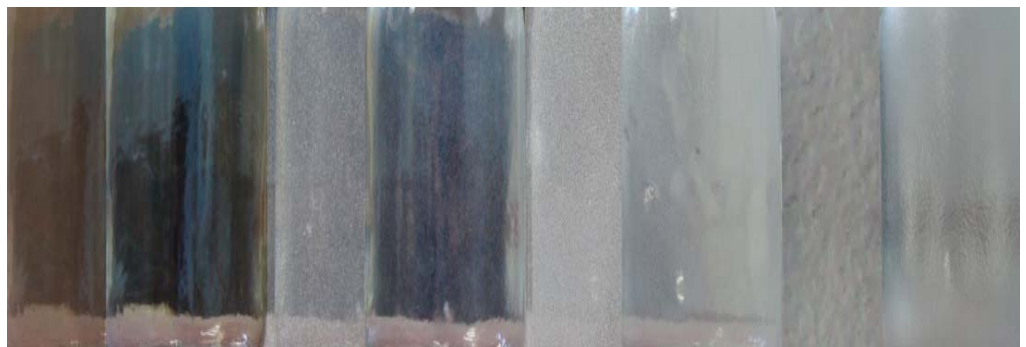
<sup>1</sup> Deze meetapparatuur werd ter beschikking gesteld door de centrale werkplaats aan de *faculteit Wetenschappen* van de *Universiteit Gent*.

BEVINDINGEN: Uit Figuur 3. 16 bleek dat als gevolg van het simultaan dompelen van proefstukken, opmerkelijk kleinere verschillen in de coatingdikte werden waargenomen dan wanneer de elementen na elkaar werden gedompeld. Hoewel de controle op de coatingdikte door dit ingrijpen in belangrijke mate werd verbeterd, werd ze nog niet helemaal beheersbaar.

De *dompelcyclus* had slechts een beperkte invloed op de coatingdikte. Een verklaring van dit gereduceerd effect kon worden gevonden in de afkoeling van het werkstuk. Tijdens het dompelen koelde het glaselement immers zodanig af dat er weinig of geen verder aangroeien van de polymeerlaag plaatsvond. Een oplossing voor dit zelfregulerende effect kan eventueel worden gezocht in de hogere voorverwarmingstemperaturen (toename 0,01mm/3°C) of door onderdompelen in twee fases (voorverwarmen-dompelen-*moffelen*-dompelen-*moffelen*).

Beide alternatieven zorgen echter voor een verhoogd risico op microbelletjes in de coating. Deze laatste worden gevormd bij oventemperaturen die zich boven de 190-195°C bevinden. Indien wordt gedompeld in twee fases, wordt tijdens de eerste *moffelperiode* een temperatuur van 210°C bereikt wil de coating uniform uitvloeien over het glasoppervlak. Wanneer het glaselement bij deze temperatuur nogmaals in het polymeerpoeder wordt gedompeld, zijn microbelletjes (die ontstaan vanaf 190-195°C) in de tweede aangebrachte laag moeilijk te vermijden. Een korte afkoelingsperiode zou voor het aangehaalde probleem mogelijk een oplossing bieden.

Een maximale *moffel*temperatuur van 210°C liet toe dat de coating voldoende tijd kreeg om uit te vloeien<sup>1</sup>, zonder daarbij bruin te verkleuren of een *orange peel* textuur te vormen. Regelmatige controle van de toestand van de coating tijdens het *moffelen* bleef echter een absolute noodzaak.



Figuur 3. 19 Kwaliteitsproblemen bij het wervelsinteren van glas: bruine kleur (verbranden van de coating), beperkte microbelletjes, grotere luchtbelletjes, orange peel textuur.

Het spreekt vanzelf dat de hier vermelde temperaturen direct gerelateerd zijn aan de oven, de glasdikte, de glassoort,... en dus niet als absolute waarde mogen gehanteerd worden, maar eerder als indicatie.

<sup>1</sup> De gehanteerde *moffeltijd* en -temperatuur is sterk afhankelijk van de gebruikte oven. Het *moffelen* gebeurde niet onder ideale omstandigheden, aangezien de oven afkoelde tijdens het dompelen. De tijd die de oven nodig had om 210°C te bereiken kan hier als de *moffeltijd* worden beschouwd en is dus variabel. Wanneer visueel echter bleek dat de coating gedurende deze periode niet in staat was geweest voldoende te vloeien, werd de temperatuur constant gehouden. Regelmatige controle liet toe vast te stellen wanneer het gewenste resultaat werd bereikt.

Tabel 3. 3 Gekende parameters en hun invloed op verschillende coatingeigenschappen na het aanbrengen van *Abcrite*<sup>®</sup>.

| Parameters    | Keuze                                                     | Invloed op                                                     |
|---------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Voorverwarmen | $T_{\max,i}$ (glasopp.)                                   | laagdikte<br>uniformiteit van coating<br>(micro)luchtbelletjes |
| Dompelen      | dompelcyclus<br>(=aantal keer dompelen)<br>dompeltechniek | laagdikte                                                      |
| Moffelen      | $T_{\max,t}$ tijd                                         | verbranden van coating<br>orange peel                          |

## Teflon<sup>®</sup> |

**DOELSTELLING:** Uit literatuuronderzoek in het vorige hoofdstuk (*Lamp coatings*) blijkt al snel dat omwille van de uitstekende antikleef eigenschappen van *Teflon*<sup>®</sup>, de adhesie met glas enigszins moeilijk te verwezenlijken zal zijn. Een bijkomende moeilijkheid werd ingegeven door het ter beschikking gestelde *Teflon*<sup>®</sup>-poeder. Een beperkte hoeveelheid van dit poeder was reeds beschikbaar in de glasblazerij van de faculteit Wetenschappen. De specificaties ontbraken echter, waardoor het moeilijk werd de gewenste oventemperatuur in te stellen in functie van de smelttemperatuur van het polymeerpoeder.

In een eerste fase diende, met summiere voorkennis over dit hoogwaardig polymeer en de specifieke uitvoeringsmodaliteiten, een beperkt onderzoek te geschieden naar de toepasbaarheid van de *wervelsinter*-techniek bij het aanbrengen van *Teflon*<sup>®</sup> op glas. In een tweede fase zou dan naar een verhoogde procesbeheersing en optimalisatie van de coatingdikte kunnen worden gezocht.

**UITVOERING:** Een stapsgewijs zoeken naar de geschikte processtappen kenmerkte het uitvoeringsproces. Initieel werd vertrokken van een coatingproces dat sterk vergelijkbaar was met dat van *Levasint*<sup>®</sup> en *Abcrite*<sup>®</sup>. Aangezien uit de literatuur echter blijkt dat *Teflon*<sup>®</sup> (260-310°C)<sup>1</sup> een veel hogere smelttemperatuur kent dan beide andere polymeren, werd het niet voorbehandelde glaselement voorverwarmd tot 400°C.

Het was opvallend dat ondanks deze relatief hoge oventemperaturen in vergelijking met de verwachte smelttemperatuur van *Teflon*<sup>®</sup>, tijdens het dompelen weinig of geen hechting van polymeerpoeder aan het glasoppervlak kon worden waargenomen. Het vermoeden werd bevestigd wanneer na het *moffel*proces slechts een zeer beperkte laagdikte werd bekomen.

Ondanks de hoge voorverwarmingstemperaturen, rees vanwege de beperkte hechting aan het glas tijdens het dompelen, de vraag of deze temperaturen daadwerkelijk hoog genoeg waren om het *Teflon*<sup>®</sup>-poeder te doen smelten. In een poging een antwoord op deze vraag te formuleren, werd over het oppervlak van een

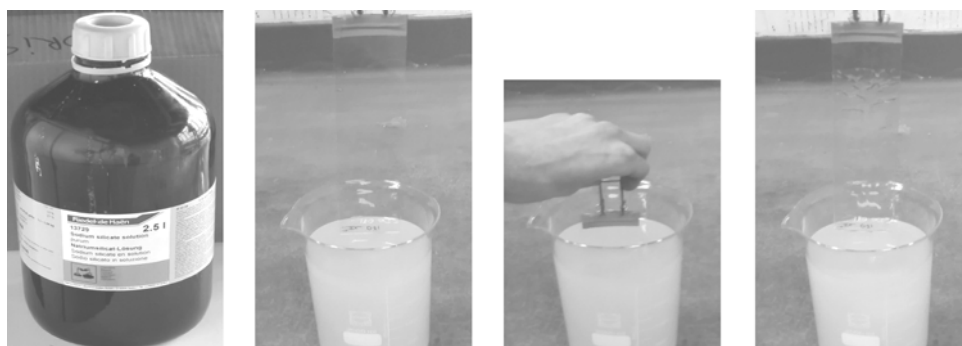
<sup>1</sup> Zie Bijlage A: *Productinformatie*

glaselement een hoeveelheid poeder gestrooid. Vervolgens werd het horizontaal in de oven geplaatst en onder gelijkaardige temperaturen opgewarmd. Als resultaat werd een niet uniforme, maar wel gesmolten massa op het glasoppervlak verkregen, wat deed vermoeden dat de gehanteerde temperaturen wel degelijk volstonden om het poeder te laten smelten tijdens het dompelen.

Uitgaande van deze vaststellingen werd vermoed dat het probleem niet zozeer bij de gehanteerde voorverwarmingstemperatuur lag, maar bij de beperkte adhesie die bij *Teflon*® te verwachten was.

Met als doel de adhesie tussen *Teflon*® en glas te verbeteren, werd het glasoppervlak vetvrij gemaakt met aceton, waarna het reeds besproken coatingproces werd doorlopen. Het resultaat vertoonde ingevolge de voorbehandeling echter geen opmerkelijke toename van de coatingdikte als gevolg van een mogelijke verbetering van de adhesie, waardoor heil werd gezocht bij alternatieve voorbehandelingsmiddelen. Het aanbrengen (*gieten, cfr. natlakken*) van zowel een zuivere natriumsilicaat-oplossing (*glaslijm*) als een mengsel met 10% gedemineraliseerd water, leverde geen zichtbare verbetering van de adhesie op tijdens het dompelen.

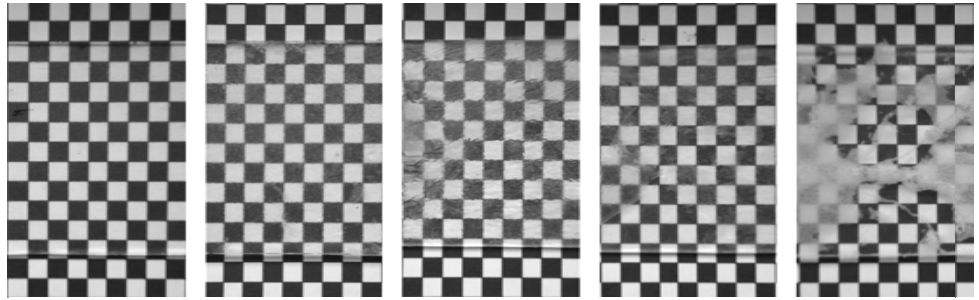
Als laatste alternatief, werden de glaselementen nat gedompeld, wat wil zeggen dat ze de hiervoor vermelde voorbehandeling ondergingen en onmiddellijk werden gedompeld (zonder voorverwarmen), maar ook deze techniek faalde, wanneer het poeder samen met de vloeibare oplossingen van het glasoppervlak droop.



Figuur 3. 20 Onderdompelen van werkstuk in natriumsilicaatoplossing (glaslijm).

**BEVINDINGEN:** Er zouden op basis van deze negatieve resultaten een aantal onderstelling kunnen gedaan worden, maar het spreekt vanzelf dat deze bevindingen eerder een gevoel weergeven dan effectief gestaafd kunnen worden op basis van deze beperkte ervaring. Zeker is wel dat de gebruikte combinaties van technieken en middelen niet tot het gewenste resultaat leiden.

In tegenstelling tot de voorgaande polymeren, laat het *wervelsinteren* met *Teflon*® niet onmiddellijk toe de procesparameters empirisch te bepalen. Enkel mits de nodige voorkennis en ervaring lijkt het mogelijk deze coating aan te brengen op glas, maar dan nog is de invloed van deze coating op het breuk- en postdestructiefgedrag van glas niet gekend. Intense samenwerking met de industrie lijkt hier aangewezen. Vanwege de ongunstige bekomen resultaten zal in het vervolg van deze masterproef niet meer met *Teflon*® gewerkt worden.



Figuur 3. 21 Het resultaat van de met verschillende voorbehandelingstechnieken en -middelen op glas aangebrachte Teflon coating.

## CONCLUSIES

## - Source of discussion -

Enkele eerste voorzichtige conclusies kunnen worden getrokken op basis van de bekomen resultaten uit beide fases met betrekking tot de kwaliteit van de coating in functie van de toepassingsparameters tijdens het *wervelsinteren*:

### *De temperatuur en de tijd tijdens voorverwarming van het werkstuk in de oven*

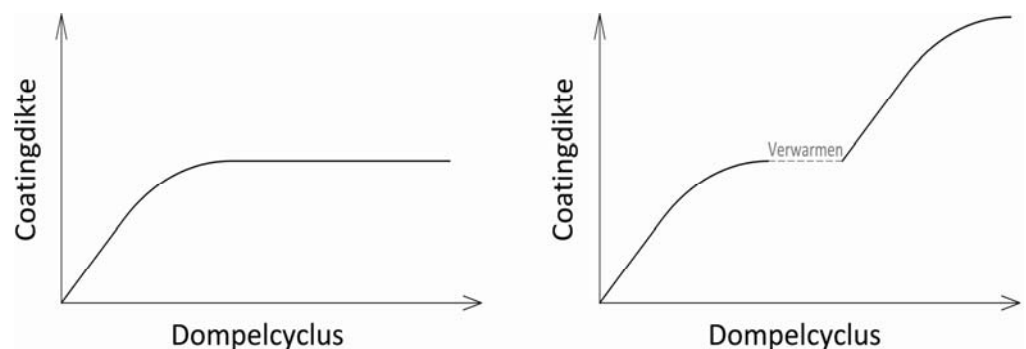
De voorverwarmingstemperatuur van het glas is zonder meer de belangrijkste parameter tijdens het aanbrengen van de polymeerlaag door middel van *wervelsinteren*. Als eerste processtap, bepaalt de temperatuur niet enkel in belangrijke mate de coatingdikte, maar tevens ook de esthetische kwaliteit, met name de luchtbelvorming. Dit laatste bleek tijdens de proeven (waarbij oventemperatuur met de multimeter werd opgemeten) het gevolg te zijn van te hoge oventemperaturen tijdens de opwarming van het glas. De mate van de luchtbelvorming stond daarbij klaarblijkelijk in verhouding met de afwijking van de 'ideale' voorverwarmingstemperatuur die voor *Abcite®*  $\pm 190^{\circ}\text{C}$  en voor *Levasint®*  $\pm 195^{\circ}\text{C}$  bedroeg. Hoe groter de overschrijding van deze 'ideale' oventemperatuur, hoe groter de luchtbelletjes zijn en hoe talrijker de luchtbelletjes per oppervlakte-eenheid zijn. Anderzijds zorgen te lage temperaturen voor niet uniforme polymeerlagen met beperkte dikte. De dikte van de polymeerlaag wordt mogelijk beperkt door afkoeling van het glas voor het dompelen of te lage oventemperaturen tijdens het voorverwarmen. Onder een bepaalde temperatuur smelt de coating immers niet meer aan het glasoppervlak; het ongelijk afkoelingsfront in het glas zorgt daarbij voor een niet-uniforme polymeerlaag, die veel dikker wordt aangebracht op de nog warme glasdelen (typisch in het centrum van het glasoppervlak), dan op de reeds afgekoelde glasdelen (typisch de randen).

Uitgaande van de gestelde bevindingen, mag duidelijk wezen dat nauwkeurige controle en weergave van de oventemperatuur onontbeerlijk zijn voor het bekomen van het gewenste resultaat. Ook een reductie van het tijdsinterval tussen het voorverwarmen en het dompelen van het glaselement en de invloed van de omgevingstemperatuur zijn in dit licht van cruciaal belang, omdat zij naast de intrinsieke eigenschappen van het glaselement ( de vorm, de samenstelling, de dikte, ...) de afkoelingsgraad van het element gaan bepalen.

De *dompelcyclus* bleek naast de oppervlaktetemperatuur van het glassubstraat invloed uit te oefenen op de coatingdikte. De dompelcycli kunnen bij gecontroleerde omstandigheden (omgevingstemperatuur, oventemperatuur, glasdikte,...), bepalend zijn voor de coatingdikte, maar zijn tevens steeds beperkt als gevolg van de afkoeling van het glaselement tijdens het dompelen, waardoor de coatingdikte (bij gegeven omstandigheden) asymptotisch tot een bepaalde waarde nadert (Figuur 3. 22).

Hogere coatingdiktes kunnen bij toepassing van het *wervelsinteren* niet bereikt worden door hogere oventemperaturen (cfr. luchtbelletjes). Een oplossing voor deze beperking werd tijdens de proeven gevonden door *intermediair* verwarmd te dompelen, waarbij het element telkens weer wordt verwarmd tussen twee dompelcycli.

Het beperken van de afkoeling voor en tijdens het dompelen door hogere omgevingstemperaturen te hanteren of eliminatie van de tijdspanne tussen het verwarmen en dompelen zouden eventueel als alternatieve maatregelen kunnen worden gehanteerd om de laagdikte te doen toenemen.



Figuur 3. 22 Coatingdikte neemt bij grotere dompelcycli niet meer toe door afkoeling van het werkstuk tijdens het dompelen. Door het werkstuk terug op te warmen kan men toch hogere coatingdiktes bekomen.

De *moffeltemperatuur en -tijd van het werkstuk* heeft een belangrijke invloed op de optische/esthetische kwaliteit van de coating. Te hoge maximumtemperaturen leiden al snel tot een oranje-bruine verkleuring van de anders transparante coating. Ook het bekomen van *orange peel* kan toegeschreven worden aan ongunstige *moffel*temperaturen, waarbij onvoldoende vloeien van het polymeerpoeder plaatsvindt.

Tabel 3. 4 Belangrijkste parameters van het wervelsinteren en hun invloed op een aantal coatingeigenschappen.

| Parameters    | Keuze                                                      | Invloed op                                                     |
|---------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Voorverwarmen | $T_{\max,i}$ (glasopp.)                                    | laagdikte<br>uniformiteit van coating<br>(micro)luchtbelletjes |
| Dompelen      | dompelcyclus<br>(= aantal keer dompelen)<br>dompeltechniek | laagdikte                                                      |
| Moffelen      | $T_{\max,t}$ , tijd                                        | verbranden van coating<br><i>orange peel</i>                   |

Concluderend kan worden gesteld dat de oppervlaktetemperatuur bij onderdompeling de beheersbaarheid van het proces, met name de coatingdikte, in belangrijke mate bepaalt. Deze temperatuur wordt zowel beïnvloed door de tijd als de glasdikte en de omgevingstemperatuur. Kleine wijzigingen van deze parameters impliceerden tijdens de proeven immers grote gevolgen voor de coatingkwaliteit.

Slechts indien de voorgaande parameters volledig controleerbaar zouden zijn, vormt de dompelcyclus een bepalende invloed op de coatingdikte.

De *moffeltijd* en -temperatuur domineren de esthetische kwaliteit van de coating tijdens het *wervelsinteren*. Bruine verkleuringen en *orange peel* lijken bij toepassing van deze techniek de meest voorkomende esthetische pijnpunten.

Uit de eerste proefcoatings die hierboven werden beschreven, wordt het duidelijk dat deze manuele uitvoering een beperking vormde voor de reproduceerbaarheid en de kwaliteit van de coating. Het is evenwel zo dat, vanuit de metaalnijverheid, het *wervelsinteren* al is geautomatiseerd en geoptimaliseerd. Aangezien dit proces weinig afhankelijk is van het substraat, zou in de toekomst gebruik kunnen worden gemaakt van de reeds beschikbare geïndustrialiseerde uitvoeringstechnieken.

In het raam van deze masterproef werd het polymeerpoeder echter steeds manueel aangebracht, waarbij stelselmatig naar een optimum werd gestreefd en waardoor een betere voeling met het coatingproces en de verschillende bijhorende parameters werd ontwikkeld.

Het toont tevens de relatieve eenvoud van de bewerkingen tijdens het coaten aan, wat met het oog op een eventuele toepassing in de bouwpraktijk als een duidelijk voordeel kan worden beschouwd.

Alternatieve poedercoatingstechnieken, zoals beschreven in het vorige hoofdstuk, zouden vanwege het uitsluiten van de voorafgaande warmtebehandeling van het substraat, belangrijke voordelen kunnen bieden voor de coatingdikte, de uniformiteit en de esthetische en optische kwaliteit van de coating,..., maar ook aan deze alternatieve technieken zullen naar alle waarschijnlijkheid nadelen verbonden zijn.

## ALGEMEEN

## - Short introduction -

Waar vorig hoofdstuk inzicht tracht te bieden in het gehanteerde coatingproces samen met de bijbehorende procesparameters, die niet enkel de esthetische maar mogelijk ook de fysische kwaliteit van de polymeerlaag zouden kunnen gaan bepalen, zal om op deze laatste onderstelling een antwoord te formuleren, in *hoofdstuk 4* worden gepoogd het gedrag van de verschillende op glas aangebrachte polymeren waar te nemen en te beoordelen tijdens en na het uitvoeren van destructieve proeven. De bekomen resultaten zouden het mogelijk moeten maken een evaluatie en eventuele tweede selectie door te voeren van de in de vorige fase gehanteerde polymeerpoeders (*Levasint*®, *Abcite*®). Het spreekt vanzelf dat met de resultaten die in het vorige hoofdstuk werden bekomen met *Teflon*®, geen destructieve testen kunnen worden uitgevoerd. Het betekent evenwel niet dat *Teflon*® ongeschikt zou zijn als veiligheidsconcept voor 'Freeform Design' glasconstructies.

Het is belangrijk te melden dat tijdens de vergelijkende studie (*Levasint/Abcite*) zowel de belangrijke kenmerken van de glasgeschiedenis als van het coatingproces in rekening werden gebracht, met als doel een voldoende genuanceerd beeld te scheppen van de bekomen waarden en resultaten tijdens de uitgevoerde buigproeven. Zowel de belangrijkste bewerkingen en invloeden die het glas heeft ondergaan als de omstandigheden waaraan het polymeerpoeder en de coating werden onderworpen, kunnen immers hun weerslag hebben gehad op de testresultaten en werden daarom hieronder kort samengevat.

- \_Glasgeschiedenis: Oorsprong van de glaselementen  
(belastingsgeschiedenis, oppervlaktegesteldheid,...)
- Omgevingscondities tijdens versnijden van de glasplaat  
(temperatuur, luchtvochtigheid, ondergrond, ...)
- Behandelingswijze bij het versnijden van de glasplaat  
(uitvoerder, glassnijder, snijvloeistof,...)
- Kerfzijde  
(in relatie tot de belastingswijze)
- \_Coatinggeschiedenis: Bewaarcondities van het poeder  
(tijd, luchtvochtigheid, temperatuur, UV,...)
- Voorbehandeling van het glas  
(adhesiepromotoren, reinigingsmiddelen)
- Coatingproces - Procesparameters  
( $T_{\max,i}$ , dompeltijden/dompelcycli,  $T_{\max,t}$ )<sup>1</sup>
- Bewaarcondities van het gecoate glaselement  
(tijd, UV, luchtvochtigheid,...)

<sup>1</sup> De waarde van deze parameters zijn onder andere kenmerkend voor microbelletjes, bruine verkleuring, uniformiteit van de coating en zouden tevens een invloed kunnen uitoefenen op het (post)destructief gedrag van het glaselement. Vanwege de directe relatie tussen beiden werd in het vervolg van de masterproef enkel nog naar de procesparameters verwezen als invloedsfactoren op het mechanische gedrag van het gecoate glaselement bij belasting.

Aangezien zowel de glasverwerking als coatingbehandeling persoonlijk werden uitgevoerd, kon worden gesteld dat gedegen kennis over het leeuwendeel van bovenvermelde invloedsparameters bestond en dat deze voor de vergelijkende testreeksen (*Levasint/Abcite*) meestal sterk overeen kwamen. Waar afwijkingen optraden (denk daarbij aan de procesparameters tijdens het *wervelsinteren*, de relatie tussen de kerfzijde aangebracht tijdens het snijden van het glas en de aangebrachte belasting en de bewaarcondities van het polymeerpoeder), werden en worden deze expliciet vermeld in het verloop van de masterproef. Bijgevolg werden ook de mogelijk variabele invloedsparameters van de glas- en coatinggeschiedenis (procesparameters, kerfzijde) beschouwd in de onderstaande bevindingen, met betrekking tot het gedrag van het gecoate glaselement tijdens en na het uitvoeren van de vervormingsgestuurde buigproeven. Uitzondering hierop vormden de bewaarcondities van het polymeerpoeder. Zoals reeds vermeld, werden beide polymeerpoeders bewaard in de kelder van het gebouw S4-bis<sup>1</sup>. Veronderstellingen over de bewaartijd, de luchtvochtigheid en de temperatuur waaraan de polymeerproducten onderhevig zijn geweest, zouden louter gebaseerd zijn op gissingen. De onderstelling dat beide polymeerpoeders aan quasi dezelfde omgevingsfactoren werden blootgesteld, zou als correcter en misschien zelfs als interessanter kunnen worden beschouwd.

## TEST CASE

## - No sound of falling glass -

In het raam van deze masterproef werden destructieve testen uitgevoerd op met polymeren gecoate glaselementen, bij buiging om hun zwakke as. De proeven hadden tot doel een eerste, algemene en kwalitatieve beoordeling van de op het glas aangebrachte coating uit te voeren, in de zoektocht naar een geschikt veiligheidsconcept voor 'freeform' glasconstructies. Om de geschikte proefomstandigheden van de 'vergelijkende performantietesten' te bepalen, werden eerst inleidende proeven uitgevoerd op enkele met *Levasint*<sup>®</sup> gecoate proefstukken. Zowel de afmetingen als het ondergane coatingproces werden reeds in *hoofdstuk 3* toegelicht (*Test case -Levasint-*). De kwalitatieve evaluatie van zowel inleidende als vergelijkende proeven, behelsde een visuele waarneming van het gedrag van de coating tijdens en na glasbreuk en een meting van de corresponderende krachten en vervormingen (kracht-verplaatsingsdiagram).

In tegenstelling tot wat bij de vergelijkende proeven gebeurde, werd bij de inleidende proeven geen aandacht besteed aan de relatie tussen de kerfzijde van het glas en de aangebrachte belasting (cfr. *Bemerkingen* p.58), aangezien niet enkel deze, maar ook andere onbekende parameters het gedrag tijdens de proeven zouden kunnen beïnvloeden (vb.: belastingsgeschiedenis en bewaaromstandigheden van het glas,...).

### 1. PROEFOPSTELLING

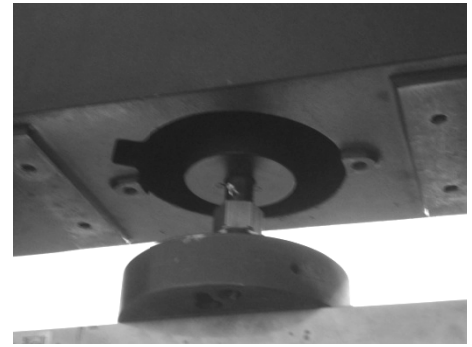
De vierpuntsbuigproeven werden uitgevoerd met een vervormingsgestuurde INSTRON-proefbank die beschikbaar werd gesteld door de vakgroep Toegepaste Materiaalwetenschappen van de Universiteit Gent<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Faculteit Wetenschappen, Campus Sterre, Krijgslaan 281, 9000 Gent.

<sup>2</sup> Labo Soete, St-Pietersnieuwstraat 41, 9000 Gent.



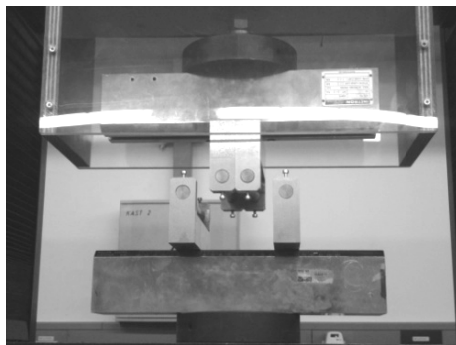
Figuur 4. 1 INSTRON proefbank



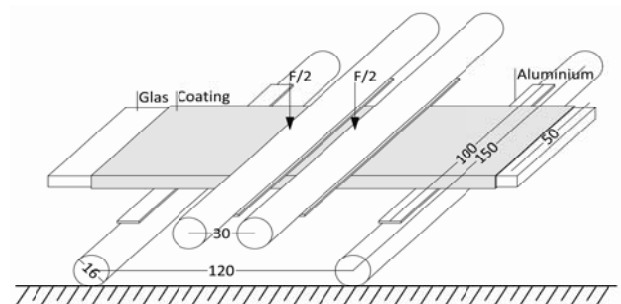
Figuur 4. 2 Detail meetcel (1kN)

De vierpuntsbuigproef werd niet uitgevoerd met de standaard door de fabrikant beschikbaar gestelde opstelling, omdat de dimensies van de proefstukken de afmetingen van deze opstelling overschreden. Een alternatieve opstelling die toeliet bredere proefstukken (50mm) te testen werd daarom gebruikt voor deze en volgende proeven. De belastingssnelheid bedroeg steeds 2mm/minuut en liet een goede waarneming van het gedrag van zowel het glas als van de polymeerlaag toe.

Tijdens de eerste proeven werd een plexiglazen scherm voorzien ter bescherming van de directe omgeving en aluminium plaatjes ter hoogte van de contactpunten tussen het glaselement en de stalen rollen van de proefbank, wat zou toelaten de contactspanningen over het glasoppervlak te verdelen. Beide bleken al snel weinig functioneel te zijn tijdens de proeven, want vallend glas werd vermeden dankzij de coating en de aluminium strips konden glasbreuk ter hoogte van de contactpunten niet voorkomen. Ook de initiële meetcel met een maximum bereik van 10kN bleek snel te groot, derhalve werd ze vervangen door een andere met een meetbereik tot 1kN.



Figuur 4. 3 Vierpuntsbuigproefopstelling op INSTRON proefbank.



Figuur 4. 4 Schematische voorstelling van de proefopstelling en de afmetingen.

## 2. PROEFSTUKKEN

De eerste gecoate glaselementen met variërende dikte (natronkalkglas, dikte: 3-6mm), werden onderworpen aan buigingsproeven om de zwakke as. Slechts acht van de zeventien beschikbare proefstukken werden getest. Aangezien het om een oriënterende en niet om een vergelijkende test ging, werd het uitvoeren van de proeven op meerdere glaselementen als overbodig beschouwd. Het ging bijgevolg steeds om proefstukken die omwille van hun voldoende hoge coatingkwaliteit en hun onderling uitgesproken of eerder beperkte variatie in coatingdikte zich van de andere elementen wisten te onderscheiden.

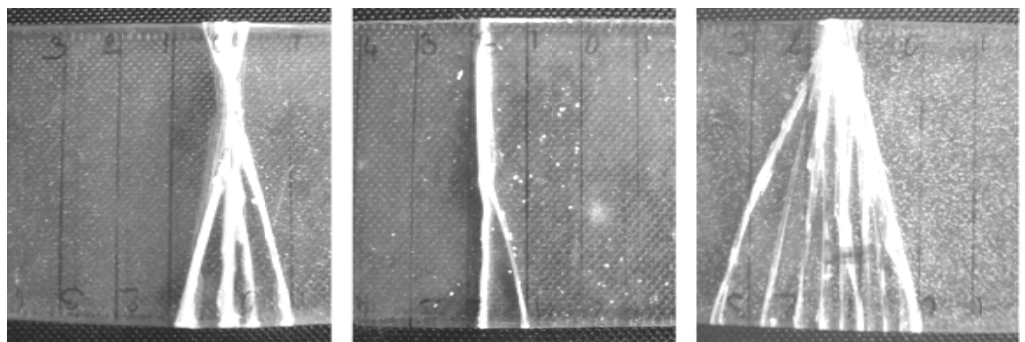
De buigproeven werden uitgevoerd twintig weken nadat de *Levasint*<sup>®</sup>-coating werd aangebracht. De proefstukken werden gedurende deze periode afgeschermd van directe UV-straling en onder vrij constante temperatuur en relatieve luchtvochtigheid bewaard<sup>1</sup>.

### 3. TESTEN

*Visuele waarneming* | De introductie van de lijnlasten op het glasoppervlak, resulteerde reeds bij geringe doorbuiging in glasbreuk. Dit werd bij zes proefstukken gekenmerkt door een V-vormig breukpatroon. Het langsheen de glasrand ontstane breukpatroon kwam zowel tussen als ter hoogte van de oplegpunten voor. Bij de andere twee proefstukken werd enerzijds een X-vormige glasbreuk waargenomen en anderzijds een 'lineaire breuk met zijtak'.

Onmiddellijk na glasbreuk werd er geen visuele beschadiging van de polymeerlaag opgemerkt. Naarmate een grotere vervorming werd opgelegd, gaf dit aanleiding tot een scheur in de coating die initieerde aan de trekzijde (onderzijde) van het glaselement. De scheurinitiatie werd gekenmerkt door een afname van het restdraagvermogen, waardoor het mogelijk was te stellen dat deze typisch plaatsvond bij een vervorming van  $L/15^2$ . Bij de V-vormige en de 'lineaire met zijtak' glasbreuk ontstond de scheur ter hoogte van de glasrand. In het andere geval (X-vormig), startte de scheur ter hoogte van het snijpunt van de X.

Een toenemende opgelegde vervorming, resulteerde in een toename van de scheurlengte en –breedte van de polymeerlaag.

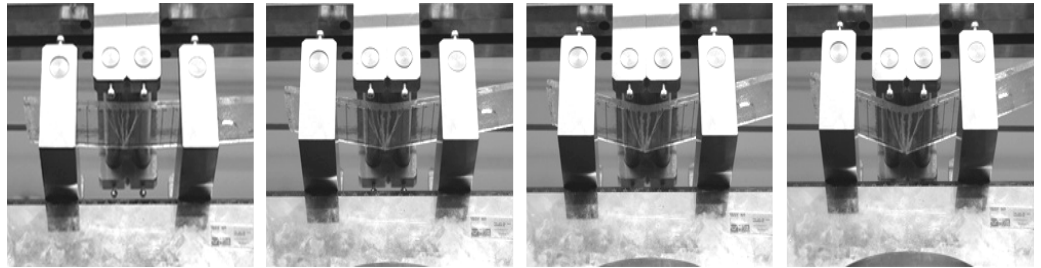


Figuur 4. 5 Waargenomen breukpatronen: v.l.n.r. X-vormig, lineair met zijtak en V-vormig.

Bij de eerste twee elementen werd de proef gestopt wanneer een maximale vervorming ( $L/4$ ) werd bereikt en het proefstuk contact maakte met de proefbank. Op dit moment was nog steeds een restdraagvermogen waarneembaar en was geen sprake van vallend glas. Vervolgens werd voor de andere proefstukken besloten de proef te beëindigen bij een doorbuiging van 20mm ( $L/6$ ). Bij ontlasting van de proefstukken nam de opgelegde vervorming in belangrijke mate af. Dit (visco-)elastisch gedrag kon toegeschreven worden aan de aanwezigheid van de elastische polymeerlaag.

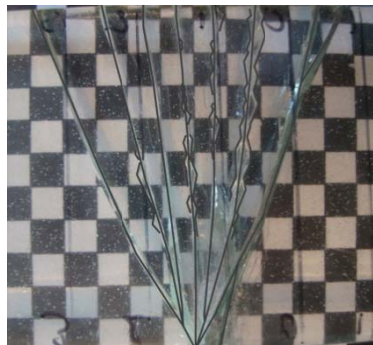
<sup>1</sup> De proefstukken werden bewaard in een gesloten kartonnen doosje bij een 'normaal' binnenklimaat (ongeveer 19°C en rel. vochtigheid van 60%).

<sup>2</sup> Het spreekt vanzelf dat er een zekere spreiding van deze resultaten werd opgemeten. 'L' is een maat voor de overspanning van het glaselement tussen de steunpunten en bedroeg hier 120mm.



Figuur 4. 6 Waargenomen gedrag na glasbreuk.

Na visueel onderzoek van de beproefde glaselementen, werd in sommige van de gevallen aan de drukzijde (bovenzijde) afschilferend glas, klevend aan de coating, waargenomen in de zone rond de glasbreuk (Figuur 4. 8). Er kon dus voorzichtig gesteld worden dat adhesie tussen de polymeerlaag en het glas voldoende groot was om glasschilfers te onttrekken aan het gebroken glas. Aan de trekzijde werd een zaagtandvorm waargenomen langsheen de breukassen (Figuur 4. 7).

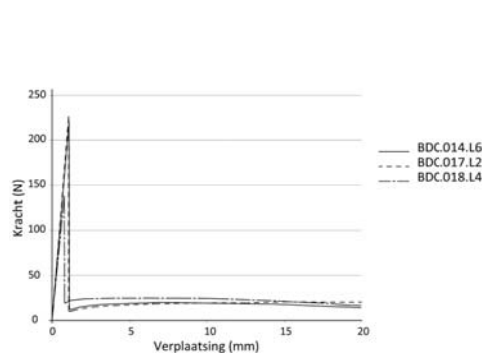


Figuur 4. 7 Links en rechts van de breuklijnen werden in de trekzone regelmatig zaagtandvormige secundaire breuken waargenomen.

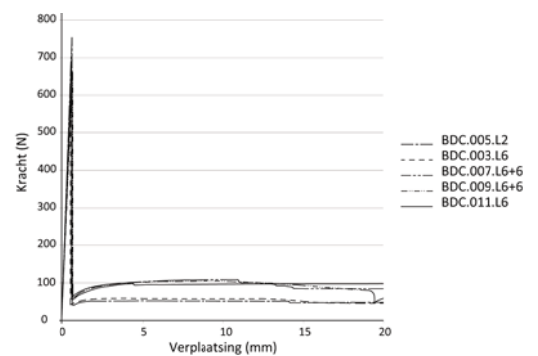


Figuur 4. 8 In de drukzone, t.h.v. breukassen, lokaal losgekomen glasschilfers kleefden in de polymeerlaag.

– Kracht-Verplaatsingsdiagramma | Er zijn drie grote fasen te onderscheiden in het kracht-verplaatsingsdiagram van de verschillende proefstukken:



Figuur 4. 9 Kracht-verplaatsingsdiagram van natronkalkglaselementen 3mm dik.



Figuur 4. 10 Kracht-verplaatsingsdiagram van natronkalkglaselementen 6mm dik.

- o Steile rechte: lineair elastisch gedrag van glas
- o Quasi verticale lijn: glasbreuk
- o Quasi horizontale lijn: postdestructief gedrag door samenwerking van polymeercoating (trek) en glas (druk)

Extreme belastingswaarden die met elk van deze fases corresponderen, werden in onderstaande tabel (Tabel 4. 1) opgenomen.

Tabel 4. 1 Gegevens van de aan vierpuntsbuigproeven onderworpen glaselementen<sup>1</sup>.

| Naam               | Gemiddelde coatingdikte (mm) | Glasbreuk (plaats)             | Breukpatroon           | $F_{\max}$ (N) | $\sigma_{\max}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | Gemiddeld restdraagvermogen (N) |
|--------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------|----------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| BDC.014.L6 (3mm)   | 0.41                         | thv belastingspt.              | V-vormig               | 221            | 65.3                                 | 19.6                            |
| BDC.017.L2 (3mm)   | 0.44                         | centraal tss. 2 belastingsptn. | V-vormig               | 226            | 64.6                                 | 19.4                            |
| BDC.018.L4 (3mm)   | 0.45                         | thv belastingspt.              | Lijnvormig uit centrum | 138            | 43.7                                 | 24.2                            |
| BDC.005.L2 (6mm)   | 0.47                         | centraal tss. 2 belastingsptn. | V-vormig               | 755            | 53.7                                 | 52.6                            |
| BDC.003.L6 (6mm)   | 0.53                         | centraal tss. 2 belastingsptn. | X-vormig               | 585            | 44.6                                 | 56.3                            |
| BDC.007.L6+6 (6mm) | 0.88                         | centraal tss. 2 belastingsptn. | V-vormig               | 647            | 50.9                                 | 101.4                           |
| BDC.009.L6+6 (6mm) | 0.90                         | thv belastingspt.              | V-vormig               | 663            | 52.6                                 | 101.9                           |
| BDC.011.L6+6 (6mm) | 0.92                         | centraal tss. 2 belastingsptn. | V-vormig               | 706            | 52.6                                 | 96.5                            |

#### *Steile rechte: lineair elastisch gedrag van glas*

Aangezien de gebruikte proefstukken werden vervaardigd uit dezelfde glasoort, mag het duidelijk zijn dat de elasticiteitsmodulus, zijnde een materiaalkenmerk, voor alle elementen vergelijkbare waarden vertoonde. In de kracht-vervormingsdiagramma vertaalde zich dit bijgevolg in vergelijkbare hellingen in de eerste fase van de proefprocedure.

De maximaal bekomen belastingswaarden waren een maat voor de sterkte van het gecoate glaselement. Aangezien tijdens deze inleidende test gebruik werd gemaakt van recuperatiemateriaal, waarvan het belastingsverleden en de algemene geschiedenis onbekend was, was het moeilijk, zo niet onmogelijk, om een geldige uitspraak te formuleren met betrekking tot de invloed van de polymeerlaag op de breukweerstand van het glas. In een volgende fase bestond deze mogelijkheid wel, aangezien alle gebruikte elementen werden versneden uit een maagdelijke bororsilicaat-plaat.

In tegenstelling tot wat hier boven werd vermeld, kon voor de proefstukken BDC.018.L4 en BDC.003.L6 een eerder uitzonderlijk lage belastingswaarde worden opgemerkt. Het was dan ook niet toevallig dat voor beide proefstukken een

<sup>1</sup> Elk element wordt gekenmerkt door een rangnummer (BDCxxx), een letter (L=Levasint, A=Abcite), en een verwijzing naar hoeveel keer en hoe het werd gedompeld (BDCxxx.A/L.x)

alternatief breukpatroon werd vastgesteld, dat gekenmerkt werd door centraal in het glasoppervlak optredende breukinitiatie. Aangezien de randen normaliter het zwakste punt van het glasoppervlak vormen, kon ondersteld worden dat het centrum danig was verzwakt (vb.: beschadigd door krassen), zodat reeds bij een geringe belasting de centrale zone bezweek met het beschouwde breukpatroon tot gevolg.

*Quasi horizontale rechte:*

Na glasbreuk (verticale in Figuur 4. 9 & Figuur 4. 10) werd een eerder beperkt restdraagvermogen opgebouwd, dat gedurende de toenemende opgelegde vervorming een vrij constante waarde aanhield. Een licht verval was evenwel merkbaar als gevolg van de toenemende scheurlengte van de polymeerlaag.

Kijkend naar de waarden van het bekomen restdraagvermogen voor de verschillende gevallen, konden een aantal eerste bevindingen worden geformuleerd.

De resultaten in Tabel 4. 1 geven blijk van een lineair verband, zij het indicatief tussen de coatingdikte en het gemiddelde restdraagvermogen na breuk. Als gevolg van deze bevinding werd tijdens de vergelijkende proeven niet enkel de invloed van de polymeerdikte op het restdraagvermogen, maar ook de productafhankelijkheid nader bekeken.

Tevens kon gesteld worden dat de glasdikte een invloed uitoefende op het bekomen restdraagvermogen. Tabel 4. 2 toont echter aan dat deze invloed eerder beperkt was. Bij een verdubbeling van de glasdikte werd immers maar een vermindering van 15% van het restdraagvermogen in verhouding tot de breukbelasting opgemeten bij behoud van coatingdikte<sup>1</sup>. Dit doet vermoeden dat het schaaleffect wel degelijk een rol zal spelen, wil deze coating voldoende ductiliteit introduceren in glazen constructies. Op basis van deze gegeven is het echter nog te vroeg om de impact ervan in te schatten.

Tabel 4. 2 De invloed van de glasdikte op verhouding van de breukbelasting en het restdraagvermogen.<sup>2</sup>

| Naam                      | Coatingdikte<br>(mm) | Glasdikte    | Breukbelasting    |
|---------------------------|----------------------|--------------|-------------------|
|                           |                      | Coatingdikte | Restdraagvermogen |
| <b>BDC.014.L6 (3mm)</b>   | 0.41                 | 7.3          | 11.3              |
| <b>BDC.017.L2 (3mm)</b>   | 0.44                 | 6.8          | 11.7              |
| <b>BDC.018.L4 (3mm)</b>   | 0.45                 | 6.7          | 5.7               |
| <b>BDC.005.L2 (6mm)</b>   | 0.47                 | 12.8         | 14.4              |
| <b>BDC.003.L6 (6mm)</b>   | 0.53                 | 11.3         | 10.4              |
| <b>BDC.007.L6+6 (6mm)</b> | 0.88                 | 6.8          | 6.4               |
| <b>BDC.009.L6+6 (6mm)</b> | 0.90                 | 6.7          | 6.5               |
| <b>BDC.011.L6+6 (6mm)</b> | 0.92                 | 6.5          | 7.3               |

<sup>1</sup> Aan de hand van de gegevens werd indicatief berekend dat voor de 6mm dikke glasplaatjes een coatingdikte van 0.6mm noodzakelijk zou zijn om tot eenzelfde breukbelasting-restdraagvermogen verhouding van de 3mm dikke glasplaatjes te komen.

<sup>2</sup> De waarden van twee proefstukken werden grijs weergegeven, aangezien de opvallend lage breukbelasting een verkeerd beeld zou kunnen scheppen van de gestelde verhoudingen.

#### 4. BEMERKINGEN

In de volgende fase dienden een aantal aandachtspunten indachtig te worden gehouden, wou een grondig vergelijk van de polymeerproducten en hun invloed op de breukweerstand en restdraagvermogen mogelijk zijn.

Wanneer de mogelijke invloed van de polymeerlaag op de breukspanning wordt onderzocht, is het van fundamenteel belang gebleken om de relatie tussen de kerfzijde - ontstaan tijdens het vervaardigen van de glaselementen - en de proefopstelling te kennen. Een mogelijk nefaste invloed op de glassterkte viel immers te verwachten wanneer de kerfzijde, ten gevolge van de lokaal toegenomen glasimperfecties die toelaten het glas te breken, zich in de trekzone bevond tijdens uitvoering van de buigproeven. Met de kennis van deze belangrijke invloedparameter<sup>1</sup>, zou in de vergelijkende fase een eventueel (rand)versterkend effect van de verschillende op het glas aangebrachte polymeerlagen kunnen onderzocht worden. Het was daarom aangewezen tevens gebruik te maken van ongecoate glaselementen als referentiestukken die met eenzelfde kennis over de relatie van de kerfzijde en de proefopstelling worden getest.

LEVASINT® | ABCITE®

- Survival of the fittest -

Om het gedrag van twee op glas aangebrachte producten (*Levasint*® en *Abcrite*®) onderworpen aan vierpuntsbuiging om de zwakke as te kunnen vergelijken, zal hieronder een beschrijving worden gegeven van de visuele waarnemingen en de kracht-verplaatsingsdiagramma, bekomen tijdens vormgestuurde proeven op de hierboven beschreven INSTRON trekbank.

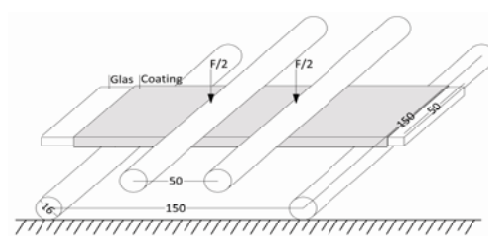
#### 1. PROEFOPSTELLING

De eigenlijke opstelling week voor beide producten slechts weinig af van degene die reeds werd vermeld (*Test case \_Proefopstelling*). De wijzigingen beperkten zich bijgevolg tot een toename van de overspanning en de afstanden tussen de drukpunten (Figuur 4. 12)<sup>2</sup>. De afstand tussen de steunpunten bedroeg tijdens het uitvoeren van deze proeven 150mm en de afstand tussen de drukpunten 50mm.

Er dient opgemerkt te worden dat tijdens het beproeven van zowel de gecoate als de ongecoate glaselementen, de ene helft van de proefstukken met de kerfzijde in de trekzone werd gepositioneerd en de andere helft met de kerfzijde in de drukzone. Dit vormde een belangrijk onderscheid dat ook tijdens de beoordeling van de resultaten werd doorgevoerd.



Figuur 4. 11 Proefopstelling vierpuntsbuiging op INSTRON proefbank.



Figuur 4. 12 Schematische voorstelling van de proefopstelling en de afmetingen.

<sup>1</sup> Aangezien de glaselement uit de volgende proeven werden versneden uit één en dezelfde glasplaat, tijdens één sessie, met behulp van hetzelfde materiaal en dezelfde uitvoerder en de glaselementen onder dezelfde condities werden bewaard en behandeld, zijn andere invloedsparameters, die directe gevolgen zouden kunnen hebben op de glassterkte (met uitzondering van de aangebrachte polymeerlaag), waarschijnlijk minder dominant.

<sup>2</sup> Deze wijzigingen waren mogelijk omdat de coatingkwaliteit aan de randen van de proefstukken dit toeliet, in tegenstelling tot wat bij de proefstukken voor de oriënterende testen het geval was

## 2. PROEFSTUKKEN

In totaal werden 41 glazen proefstukken onderworpen aan vierpuntsbuiging om de zwakke as. 37 van de proefstukken werden voorzien van een polymeerlaag (zie *hoofdstuk 3*) en vier glaselementen waren ongecoat, zodat een indicatie van de eventuele invloed van de polymeerlaag op de breuksterkte kon worden bekomen. De helft van de glaselementen (18) werd gecoat met *Levasint*®, de andere helft (19) met *Abcite*®. Geen van deze elementen werden gereinigd of kregen een voorbehandeling met adhesiepromotoren.

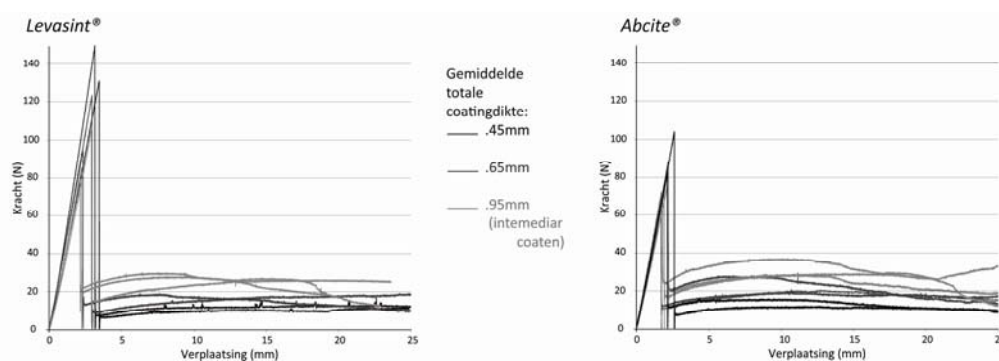
Tabel 4. 3 Overzichtstabel van de proefstukken.

| Naam         | Productnaam       | Gemiddelde breedte (mm) | Gemiddelde dikte (mm) | Gemiddelde Coatingdikte (mm) |
|--------------|-------------------|-------------------------|-----------------------|------------------------------|
| BDC.035.L12  | <i>Levasint</i> ® | 50.15                   | 2.00                  | 0.31                         |
| BDC.045.L8   | <i>Levasint</i> ® | 40.41                   | 2.03                  | 0.32                         |
| BDC.044.L8   | <i>Levasint</i> ® | 54.03                   | 2.01                  | 0.36                         |
| BDC.036.L12  | <i>Levasint</i> ® | 50.02                   | 2.02                  | 0.27                         |
| BDC.034.L12  | <i>Levasint</i> ® | 49.08                   | 2.01                  | 0.36                         |
| BDC.042.L8   | <i>Levasint</i> ® | 48.49                   | 2.00                  | 0.46                         |
| BDC.043.L8   | <i>Levasint</i> ® | 60.03                   | 2.02                  | 0.43                         |
| BDC.026.L2   | <i>Levasint</i> ® | 49.82                   | 2.01                  | 0.46                         |
| BDC.038.L8   | <i>Levasint</i> ® | 50.80                   | 2.02                  | 0.69                         |
| BDC.039.L8   | <i>Levasint</i> ® | 51.81                   | 2.00                  | 0.62                         |
| BDC.031.L6+6 | <i>Levasint</i> ® | 53.10                   | 2.01                  | 0.76                         |
| BDC.032.L6+6 | <i>Levasint</i> ® | 50.17                   | 2.03                  | 0.76                         |
| BDC.033.L6+6 | <i>Levasint</i> ® | 51.23                   | 2.03                  | 0.77                         |
| BDC.030.L6+6 | <i>Levasint</i> ® | 49.84                   | 2.03                  | 0.79                         |
| BDC.080.L4+4 | <i>Levasint</i> ® | 49.54                   | 2.00                  | 0.91                         |
| BDC.081.L4+4 | <i>Levasint</i> ® | 51.80                   | 2.01                  | 0.91                         |
| BDC.082.L4+4 | <i>Levasint</i> ® | 50.21                   | 2.01                  | 0.92                         |
| BDC.083.L4+4 | <i>Levasint</i> ® | 49.44                   | 2.01                  | 0.92                         |
| BDC.060.A8   | <i>Abcite</i> ®   | 50.15                   | 2.02                  | 0.42                         |
| BDC.061.A8   | <i>Abcite</i> ®   | 49.77                   | 2.02                  | 0.45                         |
| BDC.064.A4   | <i>Abcite</i> ®   | 50.10                   | 2.02                  | 0.42                         |
| BDC.065.A8   | <i>Abcite</i> ®   | 49.64                   | 2.02                  | 0.54                         |
| BDC.056.A8   | <i>Abcite</i> ®   | 50.21                   | 2.02                  | 0.55                         |
| BDC.058.A8   | <i>Abcite</i> ®   | 49.91                   | 2.02                  | 0.55                         |
| BDC.059.A8   | <i>Abcite</i> ®   | 49.36                   | 2.02                  | 0.55                         |
| BDC.057.A8   | <i>Abcite</i> ®   | 51.61                   | 2.02                  | 0.56                         |
| BDC.047.A4   | <i>Abcite</i> ®   | 49.86                   | 2.02                  | 0.61                         |
| BDC.048.A4   | <i>Abcite</i> ®   | 48.99                   | 2.02                  | 0.63                         |
| BDC.053.A8   | <i>Abcite</i> ®   | 50.56                   | 2.03                  | 0.63                         |
| BDC.051.A8   | <i>Abcite</i> ®   | 49.74                   | 2.00                  | 0.64                         |
| BDC.054.A4   | <i>Abcite</i> ®   | 50.30                   | 2.02                  | 0.65                         |
| BDC.055.A4   | <i>Abcite</i> ®   | 49.73                   | 2.02                  | 0.67                         |
| BDC.046.A8   | <i>Abcite</i> ®   | 50.71                   | 2.02                  | 0.86                         |
| BDC.052.A8   | <i>Abcite</i> ®   | 50.45                   | 2.03                  | 0.87                         |
| BDC.068.A4+4 | <i>Abcite</i> ®   | 47.83                   | 2.02                  | 0.92                         |
| BDC.069.A4+4 | <i>Abcite</i> ®   | 50.34                   | 2.02                  | 0.96                         |
| BDC.070.A4+4 | <i>Abcite</i> ®   | 49.85                   | 2.02                  | 0.94                         |
| BDC.085      |                   | 49.62                   | 2.01                  |                              |
| BDC.076      |                   | 50.32                   | 2.00                  |                              |
| BDC.086      |                   | 50.36                   | 2.01                  |                              |
| BDC.78       |                   | 49.97                   | 2.00                  |                              |

### 3. VERGELIJK

Als gevolg van het vooropgestelde vergelijk van de testresultaten van de met *Levasint*<sup>®</sup> en de met *Abcite*<sup>®</sup> gecoate glaselementen, werd hieronder geen afzonderlijke beschrijving gegeven van de respectievelijke testreeksen, maar werd er onmiddellijk overgegaan tot een vergelijkende studie van zowel de visuele waarnemingen als het verloop van de kracht-verplaatsingsdiagramma. Een enkele beschrijving bood immers weinig bijkomende informatie aan de hierboven beschreven vaststellingen, aangezien het globaal gedrag van beide producten weinig van elkaar verschilden. Het is belangrijk gebleken om in deze fase van het onderzoek een onmiddellijke wisselwerking tussen de visuele waarnemingen en de resultaten van de vervormingsgestuurde vierpuntsbuigproeven te laten plaatsvinden. Daarom werden de verschillende fases in de krachtverplaatsingsdiagramma van beide polymeercoatings niet alleen met elkaar vergeleken, maar werden ze tevens getoetst aan visuele waarnemingen tijdens en na de proeven.

#### Kracht-verplaatsingsdiagramma & visuele waarneming |



Figuur 4. 13 Vergelijk van de kracht-verplaatsingsdiagramma van de met *Abcite*<sup>®</sup> en *Levasint*<sup>®</sup> gecoate glaselementen in functie van enkele vergelijkbare coatingdiktes.

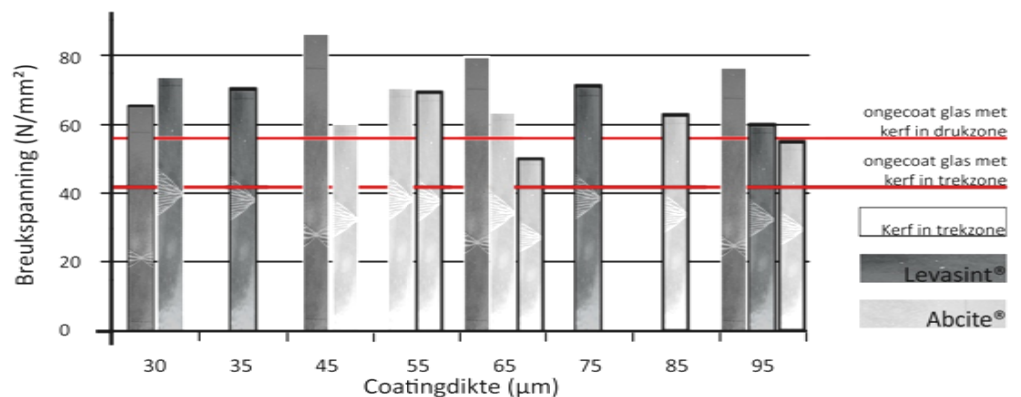
De beide diagramma lieten toe een eerste globaal vergelijk te maken tussen beide producten, waarbij de gehanteerde grijswaarden, de invloed van de laagdikte van beide producten (0,45mm, 0,65mm, 0,95mm) op de bezwijkbelasting en het restdraagvermogen schetste. Het zijn deze twee elementen die met het oog op veiligheid bij glasbreuk van fundamenteel belang zijn. De exacte waarden die voor de bezwijkbelasting en het gemiddeld restdraagvermogen (*RDV*) werden bekomen tijdens de uitvoering van de proeven, zijn in 'Bijlage C-test case' terug te vinden.

#### *Bezwijkbelasting:*

De bezwijkbelasting werd, bij beide proefreeksen en bij glas in het algemeen, gekenmerkt door een plotse breuk na het doorlopen van een lineair elastische fase. Wanneer voor beide testreeksen het lineair elastisch gedrag (wat zich vertaalde in de steile rechte, vertrekkende uit de oorsprong) werd vergeleken, werden er weinig of geen verschillen opgemerkt, met als belangrijke uitzondering de bezwijkbelasting. Het was opmerkelijk dat ondanks het gebruik van vergelijkbare glaselementen voor beide polymeertypes (versneden uit eenzelfde glasplaat, bewaard onder dezelfde omgevingscondities, ...) en een quasi zelfde geschiedenis van de proefelementen vóór het uitvoeren van de destructieve testen, een duidelijk hogere bezwijkbelasting

waar te nemen was in de grafieken (Figuur 4. 13) bij *Levasint*<sup>®</sup> dan bij *Abcite*<sup>®</sup>. Een lichte nuance bij deze bevinding diende echter gemaakt te worden. Zoals reeds vermeld zou de invloed van de kerfzijde in verhouding tot de belastingswijze een prominente rol kunnen hebben gespeeld.

Om deze nuance zo scherp mogelijk te stellen, maakte ze (onder andere) voorwerp uit van volgende figuur (Figuur 4. 14), die niet alleen onderscheid maakt in de gebruikte producten of de oriëntatie van de kerf, maar tevens een associatie biedt met het breukpatroon en de breukbelasting van ongecoat glas.

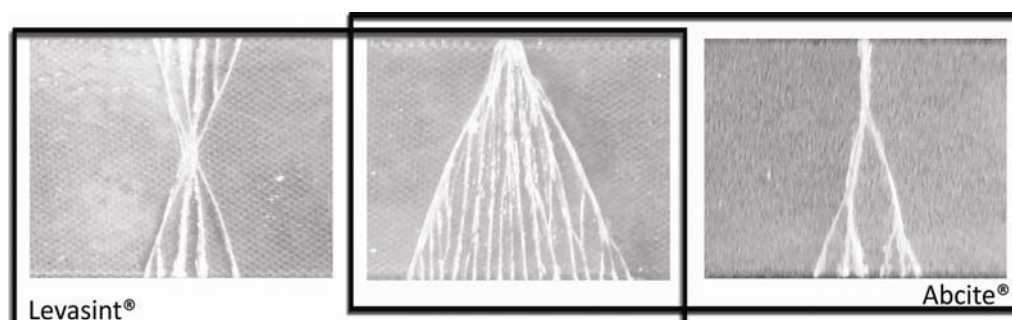


Figuur 4. 14 De breukspanning in functie van de coatingdikte, het breukpatroon en het polymeertype.

Op basis van deze gegevens zou kunnen worden gesteld dat de resultaten van de breukspanning werden gedomineerd door de wijze van oplegging in verhouding tot de kerfzijde van het glas. Echter wanneer deze parameter in beschouwing werd gebracht, zou gemiddeld nog steeds een hogere bezwijkbelasting bekomen worden met *Levasint*<sup>®</sup> gecoat glas dan met *Abcite*<sup>®</sup> het geval was (Tabel 4. 4).

Een mogelijk antwoord voor de hogere bezwijkbelasting bekomen bij *Levasint*<sup>®</sup>, zou kunnen geformuleerd worden vanuit een eventueel randversterkende werking van dit product. Het was immers opvallend dat voor de helft van de met *Levasint*<sup>®</sup> gecoate proefstukken een X-vormig breukpatroon werd geregistreerd en dat met dit breukpatroon vaak de hoogste bezwijkspanningen correleerden. Indien *Levasint*<sup>®</sup> immers een randversterkende werking zou hebben, is het mogelijk dat niet de randen maar het glascentrum de zwakste plek vormden, wat het X-vormig breukpatroon zou kunnen verklaren. Een alternatieve redenering, waarbij het X-vormig breukpatroon was gerelateerd aan de positionering van de kerfzone tijdens de buigproeven, werd vanuit de bekomen resultaten als weinig plausibel beschouwd. Bij *Abcite*<sup>®</sup> werd immers enkel een V-vormige of een lichte variant opgemerkt, maar nergens een X-vormig breukpatroon, zelfs al was de positie van de kerfzijde dezelfde als bij *Levasint*<sup>®</sup>.

Het dient waarschijnlijk niet gezegd dat deze onderstelling met de nodige omzichtigheid moet worden behandeld, aangezien ze is gebaseerd op een eerder beperkte testreeks. Ook op de vraag waarom bij *Levasint*<sup>®</sup> dan nog een V-vormig breukpatroon optrad, kan niet sluitend worden geantwoord, wat er op wijst dat naar alle waarschijnlijkheid nog niet alle invloedsfactoren zijn gekend.



Figuur 4. 15 Meest voorkomende breukpatronen bij de aan vierpuntsbuiging onderworpen gecoate glaselementen.

Zoals uit dezelfde figuur blijkt (Figuur 4. 14), was de breukbelasting onderhevig aan fluctuaties die niet onmiddellijk konden worden gerelateerd aan het gebruikte product of de kerfzijde. De mogelijke oorzaken van deze fluctuaties waren bijgevolg niet onmiddellijk afleidbaar en zijn waarschijnlijk even talrijk als divers. Ondersteld werd dat lokale glasimperfecties, contaminatie van het glasoppervlak voor het coaten,... aan de basis zouden kunnen hebben gelegen voor deze schommeling, maar dit kon niet worden bevestigd door de beschikbare gegevens.

Tabel 4. 4 Invloed van de kerfzijde in relatie tot de belastingswijze op de gemiddelde breukspanning.  
(aantal proefstukken)

| Gemiddelde breukspanning (N/mm <sup>2</sup> ) | ongecoat glas | Levasint® | Abcite®    |
|-----------------------------------------------|---------------|-----------|------------|
| $\sigma_{\max}$ met kerf in trekzone          | 42<br>(2)     | 67<br>(9) | 59<br>(9)  |
| $\sigma_{\max}$ met kerf in drukzone          | 56<br>(2)     | 79<br>(9) | 65<br>(10) |
| Gem. breukspanning in vgl. met ongecoat glas  | 100%          | 150%      | 130%       |

De procesparameters van het *wervelsinteren* vertoonden geen onmiddellijke invloed op de breukbelasting. Zelfs het aanbrengen van twee opeenvolgende polymeerlagen (vb: 4+4) gaf geen opmerkelijke wijziging in vergelijking met de andere polymeerlagen.

#### *Restdraagvermogen:*

Na glasbreuk (de verticale op de grafieken, Figuur 4. 13), werd voor beide producten in de meeste gevallen een beperkt maar vrij constant (horizontale op de grafieken) restdraagvermogen waargenomen, dat als gevolg van een goede samenwerking tussen de gebroken glasscherven en de polymeerlaag tot stand kwam.

Bij enkele van de proefstukken scheurde de polymeerlaag na beperkte vervorming volledig door langsheen de trekzijde van het belaste glaselement (Tabel 4. 5). Dit resulteerde in een zeer beperkt restdraagvermogen, dat hoofdzakelijk voortvloeide uit de intrinsieke treksterkte van de coating, waarbij het glas enkel dienst deed als dode massa. Uit de gegevens van onderstaande tabel blijkt tevens dat de mogelijkheid tot doorscheuren van de polymeerlaag aan de trekzijde bij grotere doorbuiging plaats vond naarmate de polymeerdikte toenam.

Hoewel de scheurinitiatie zich steeds aan de punt van de V-vormige glasbreuk en aan het snijpunt van X-vormige glasbreuk voordeed, kon de oorzaak van het doorscheuren van de polymeerlaag niet worden gekoppeld aan het breukpatroon. Net als de soms beperkt gerealiseerde randdekking tijdens het coaten nefast werd gedacht voor de scheurinitiatie, kon deze veronderstelling niet worden bevestigd door de resultaten.

Met betrekking tot het doorscheuren van de coating na glasbreuk, was het enigszins markant te noemen dat in vergelijking met de 'inleidende test case', waar in het meeste van de gevallen een veel hogere bezwijkbelasting en restdraagvermogen werd genoteerd dan tijdens deze vergelijkende studie, geen van de coatings volledig doorscheurde tijdens de toenemende opgelegde vervormingen. Aangezien de testreeksen niet werden opgesteld om een direct vergelijk mogelijk te maken, was het moeilijk, zo niet onmogelijk, hiervoor een sluitende verklaring te vinden. Toch kan niet worden nagelaten hier een aantal mogelijke en belangrijke invloeden voor dit positief effect op te sommen. Vooreerst zou de glassoort een belangrijke parameter kunnen zijn. Andere glassoorten kennen immers een andere binding met het polymeer. Anderzijds wordt naar de ouderdom van de gecoate glaselementen op moment van beproeving verwezen en de invloed van UV-stralen voor beproeving. De inleidende testreeks werd immers gedurende twintig weken bewaard, afgeschermd van UV-stralen, daar waar de vergelijkende testen gedurende drie weken wel degelijk aan UV-stralen werden blootgesteld.

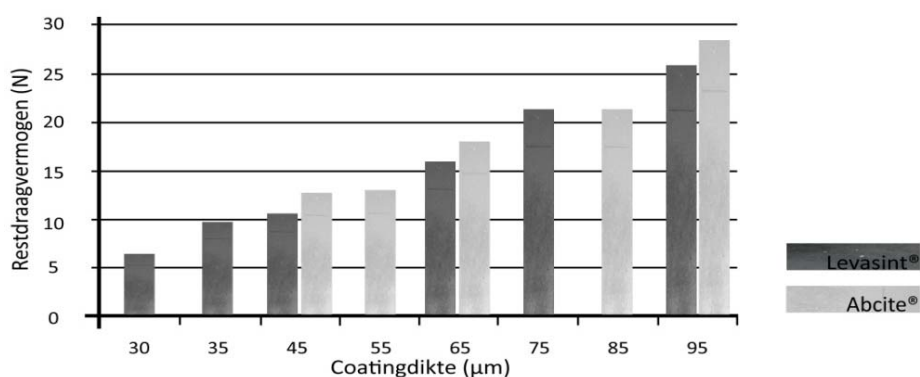
Tabel 4. 5 Overzicht van de volledig doorgescheurde (enkel langs trekzijde) en ongescheurde glaselementen na beproeving, in functie van de doorbuiging en met indicatie van de coatingdikte.

|                              | intact | gescheurd na (mm doorbuiging) |                    |                 |               |
|------------------------------|--------|-------------------------------|--------------------|-----------------|---------------|
|                              |        | L/30<br>(5mm)                 | L/15<br>(10mm)     | L/10<br>(15mm)  | L/6<br>(25mm) |
| <i>Levasint</i> <sup>®</sup> | 14     | 1<br>(d: .35mm)               | 1<br>(d: .35mm)    | 1<br>(d: .45mm) | 1<br>(d:1mm)  |
| <i>Abcite</i> <sup>®</sup>   | 16     |                               | 2<br>(d:.45/.55mm) | 1<br>(d:.65mm)  |               |

Met het oog op het restdraagvermogen van de ongescheurde<sup>1</sup> proefstukken werden voor de twee polymeerproducten gelijkaardige waarden waargenomen, die relatief klein bleken te zijn in verhouding tot de bekomen breukspanningen. Het restdraagvermogen werd gedacht te worden bekomen vanuit de samenwerking tussen polymeer en de glasscherven, waarbij de polymeerlaag een membraan vormt rondom de glasscherven. Dit membraan voorkomt dat scherven vallen en houdt ze samen, zodat ter hoogte van de drukzone belangrijke drukspanningen kunnen worden opgenomen, zij het bij grote vervormingen. De polymeerlaag die zich in de uiterste vezel van de trekzone bevindt, dient bijgevolg de compenserende trekspanningen op te nemen. Deze samenwerking tussen polymeermembraan en

<sup>1</sup> De term 'ongescheurd' verwijst naar het niet volledig doorscheuren van de coating ter hoogte van de trekzijde, waarbij nog een beperkt restdraagvermogen kon worden waargenomen. Het mag duidelijk zijn dat gedurende het verloop van de proeven de polymeerlaag in alle gevallen wel degelijk scheurde, zij het slechts over een beperkte lengte. Naarmate de scheurlengte toenam, nam het restdraagvermogen af.

glas leidde tijdens het uitvoeren van de proeven tot een lineair verband tussen het restdraagvermogen en de coatingdikte.



Figuur 4. 16 Lineaire relatie tussen de coatingdikte en het restdraagvermogen voor zowel *Levasint®* als *Abcite®*.

Uit de eerder geringe fluctuaties van de lineaire verhouding tussen coatingdikte en restdraagvermogen die in bovenstaande figuur (Figuur 4. 16) werden opgetekend, werd de dominante invloed duidelijk van de laagdikte. Bijgevolg kon worden besloten dat andere afwijkingen in de procesparameters tijdens het *wervelsinteren* een eerder beperkte invloed hadden op het restdraagvermogen, wat niet wil zeggen dat ze dienen te worden verwaarloosd.

## CONCLUSIES

## - the Same... Same but Different -

Op basis van de bekomen resultaten, wordt het mogelijk enkele belangrijke conclusies te formuleren met betrekking tot de mogelijke toepassing van de vergeleken polymeren als veiligheidsconcept voor 'freeform design' glasconstructies.

Het traditioneel veiligheidsconcept zoals het werd gedacht vanuit de glaslaminatie-filosofie, waarbij vallend glas wordt vermeden en de scherven worden samengehouden, waardoor (zij het onder belangrijke vervormingen) nog een relatief groot restdraagvermogen kan worden bekomen na glasbreuk, vormt een referentiekader waaraan de polymeercoatings kunnen worden getoetst.

Uit de gerealiseerde proeven is gebleken dat het polymeermembraan in staat was om vallend glas bij glasbreuk te vermijden. Zelfs bij grote opgelegde vervormingen, waarbij de coating gedeeltelijk scheurde, werden nooit loskomende scherven waargenomen.

De samenwerking tussen de glasscherven en het omhullend polymeermembraan zorgde er tevens voor dat er na glasbreuk sprake was van restdraagvermogen. Het genoteerde restdraagvermogen was voor de aan vierpuntsbuiging onderworpen glazen plaatjes (om de zwakke as) echter vrij beperkt in vergelijking met de bekomen bezwijkbelasting. Verder onderzoek toonde aan dat tussen het restdraagvermogen en de coatingdikte een lineair verband bestond, wat zou toelaten de coatingdikte te laten toenemen om het gewenste restdraagvermogen te genereren. Deze stelling stuit in praktijk echter op problemen aangezien de coating slechts met een beperkte dikte kan worden aangebracht (max:  $\pm 3\text{mm}$ ).

Het mag echter duidelijk wezen dat de bekomen resultaten niet veralgemeend mogen worden en sterk afhankelijk zijn van de belastingssituatie, zoals blijkt uit volgend hoofdstuk.

Een belangrijke eigenschap die aan aanwezigheid van de polymeerlaag kan worden toegeschreven, is hun invloed op de breukweerstand van glas. Voor zowel de met *Abcite*® als de met *Levasint*® gecoate glaselementen werd immers een hogere breukweerstand bekomen dan bij ongecoate glaselementen, ongeacht de dikte van de polymeerlaag. Een hogere breukweerstand betekent dat de veiligheidsmarges voor de glasconstructie toenemen, zonder dat dit leidt tot een grote toename van de dimensies van de constructie.

Uit de resultaten van de proeven kon geen onmiddellijke invloed worden waargenomen van de variërende procesparameters die tijdens het *wervelsinteren* optraden. Dit betekent dat zowel de bruine verkleuring, alsook de microbelletjes aanwezig in de coating een hoofdzakelijk esthetisch probleem vormden. Ook het '*intermediair* verwarmen' tijdens het coatingproces, wat toeliet een hogere laagdikte te bekomen zonder esthetische problemen, had geen directe invloed op het destructief en postdestructief gedrag van het gecoate element. Dit laat toe, indien nodig, zeer dikke polymeerlagen aan te brengen, waarvan de maximale dikte voornamelijk wordt ingegeven door het coatingproces.

Het mag duidelijk zijn dat de bekomen resultaten voor deze testen met *Levasint*® en *Abcite*®, niet kunnen worden veralgemeend naar andere polymeerproducten en dat het gebruik van eventuele adhesiepromotoren deze resultaten positief zouden kunnen beïnvloeden, zoals onderzoek uitgevoerd door het *Fraunhofer Institut Silicatforschung*<sup>1</sup> reeds lijken te indiceren.

---

<sup>1</sup> AA.VV., «*Untersuchung von Kunststoffbeschichtungen auf Laborgeräten und Chemikalienflaschen aus Glas*», Rapport Nr. : 9757, 1996.

*"It is not just the transparency, but the sense of wonder by which architects and engineers are inspired to use glass in unconventional ways"*  
MVRDV/Jacob van Rijs

## ALGEMEEN

## - Co-operation -

Dit hoofdstuk geschiedde in samenwerking met *Sofie Van Goethem*. Haar masterproef: *"Constructief ontwerp van een hyperslanke stalen kolom in een elegant glazen jasje"* had tot doel een hyperslanke stalen kolom te ontwerpen en te dimensioneren op basis van het vloeien van de dwarsdoorsnede onder axiale druk. Als oplossing voor het optredende knikprobleem, werd gebruik gemaakt van een glazen omhullende buis, waarin de dunne stalen kolom werd gesteund door een aantal verschillende afstandhouders (Figuur 5. 1).

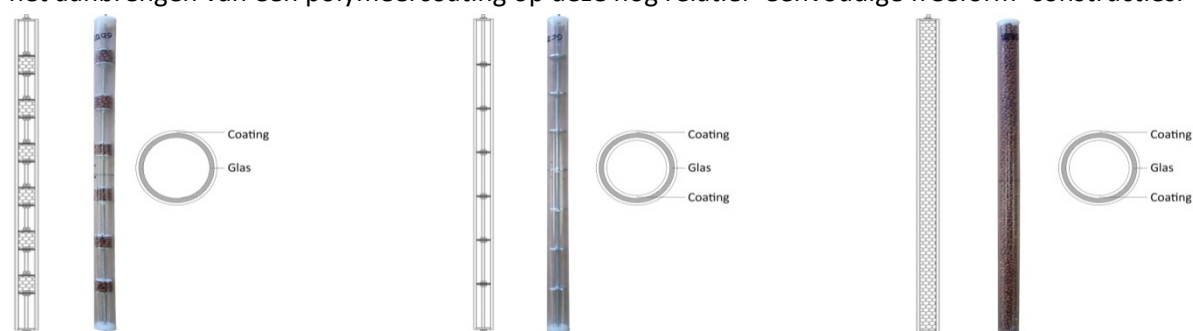
Aan de hand van een gevalstudie (het recentelijk gerealiseerde fotomuseum in Charleroi) werden de noodzakelijke berekeningen en ontwerpbeslissingen gemaakt. Op basis van deze gegevens werden vervolgens een aantal schaalmodellen (1:10) vervaardigd en beproefd.

De samenwerking had tot doel een polymeerlaag (*Levasint®*) op de op schaal uitgevoerde glazen knikstabilisator aan te brengen. Deze polymeerlaag zou in geval van glasbreuk in staat moeten zijn zowel een bescherming tegen rondvliegend glas te bieden als de glasscherven samen te houden. Hierdoor werd plots uitknikken van de stalen kolom voorkomen en kon dus ductiliteit in de gehele constructie worden geïntroduceerd. Naast de te realiseren veiligheidseis, diende zowel bij de voorbereiding als tijdens het coaten van de glazen knikstabilisator rekening te worden gehouden met de reeds genomen ontwerpbeslissingen voor de stalen kolom. Als gevolg van deze randvoorwaarden, ontstonden twee mogelijke opties voor het aanbrengen van de coating.

In het eerste geval liet het ontwerp toe de polymeerlaag zowel aan het binnen- als buitenoppervlak van de glazen buis aan te brengen, aangezien deze geen hinder vormde voor de nadien te introduceren afstandhouders. Omwille van de grote lengte-diameter verhouding (650/32) van de buis diende echter de vraag te worden gesteld of het binnenoppervlak van deze glazen buis wel degelijk kon worden gecoat met behulp van de *wervelsinter*-techniek.

Bij de tweede optie werd de coating aan de binnenzijde van de glazen buis geweerd. De aangebrachte polymeerlaag heeft immers door het *wervelsinteren*, geen geheel uniforme dikte. Het werd daardoor moeilijk of zelfs onmogelijk de passende aluminium schijven die deel uitmaken van het steunconcept (Figuur 5. 1), aan te brengen in de buisholte.

Deze gegevens gaven een eerste indicatie van de beperkingen en eisen waarmee werd geworsteld bij het aanbrengen van een polymeercoating op deze nog relatief 'eenvoudige freeform' constructies.



Figuur 5. 1 Overzicht van de verschillende uitgewerkte steunconcepten voor een stalen hyperslanke kolom met aanduiding van de coatingoppervlakken en de werkelijke uitvoering op schaal.

Er werd geopteerd om als polymeerproduct *Levasint*<sup>®</sup> aan te brengen op enkele glazen buizen. De resultaten uit voorgaand hoofdstuk (*hoofdstuk 4*), deden immers vermoeden dat de aanwezigheid van dit product op het glasoppervlak een positieve invloed zou kunnen uitoefenen op zowel restdraagvermogen als breukbelasting van de glazen knikstabilisator.

Aangezien de kolom werd ontworpen als potentiële drager van een bestaand gebouw, werd in onderstaande niet enkel naar de invloed van de coating op het structureel gedrag van de glazen kolom gekeken. Er werd tevens, bij wijze van inleiding, aandacht geschonken aan andere randvoorwaarden waaraan een polymeercoating (*Levasint*<sup>®</sup> in het bijzonder) als mogelijk veiligheidsconcept voor glazen bouwconstructies diende te voldoen. Denk daarbij aan het gedrag bij brand, oplosbaarheid door reinigingsmiddelen, UV- en weersinvloeden,...

Daaropvolgend werd een beeld geschetst van het specifiek coatingprocedé en de te nemen overwegingen als gevolg van het ontwerp en de uitvoering.

Als laatste volgde de realisatie van de schaalmodellen in relatie tot de aangebrachte coating en een kwalitatieve beoordeling van de aangebrachte coating tijdens het uitvoeren van de drukproeven.

## PRODUCTINFORMATIE

- *Levasint*<sup>®</sup> -

Zowel in *hoofdstuk 2* als in 'Bijlage A' werd al enige productinformatie over *Levasint*<sup>®</sup> gegeven. Deze informatie beperkte zich veeleer tot de mechanische eigenschappen van het product. Wil *Levasint*<sup>®</sup> echter algemeen toepasbaar zijn als veiligheidsconcept, dient het tevens aan andere eigenschappen te voldoen. In wat volgt, wordt een kort overzicht gegeven van enkele van de belangrijkste eigenschappen waaraan een polymeercoating dient te voldoen om als veiligheidsconcept voor glasconstructies te kunnen worden ingezet, met vermelding van de gegevens die voor *Levasint*<sup>®</sup> ter beschikking werden gesteld door de voormalige producent<sup>1</sup> en de resultaten uit het testrapport beschikbaar gesteld door het *Fraunhofer Institut Silicatforschung*<sup>2,3</sup>.

### 1. PARAMETERS

**Brandgedrag<sup>4</sup>** | Aangezien polymeercoatings op het glasoppervlak worden aangebracht, is hun gedrag bij brand een niet te verwaarlozen parameter. Hoewel de gebruikte thermoplastische polymeren meestal reeds bij geringe temperaturen verweken, dient de nodige aandacht te worden besteed aan het mogelijk ontstaan van vallende druppels gesmolten polymeer tijdens de brand en de toxiciteit van eventuele geproduceerde rook.

Productgegevens, waaronder deze van *Levasint*<sup>®</sup>, geven meestal aan de hand van de bekomen resultaten tijdens de uitvoering van normprocedures, een goed beeld over het gedrag bij brand van de coating. Volgens de testprocedure DIN 53 438, wordt

<sup>1</sup> Technische informatie over *Levasint*<sup>®</sup> S 31 werd verschaft door Henk van Dijk, directeur bij het bedrijf Kersten Kunststof(f)coating en betreft datasheets van *Levasint*<sup>®</sup> afkomstig van de voormalige producent Bayer.

<sup>2</sup> AA.VV., «*Untersuchung von Kunststoffbeschichtungen auf Laborgeräten und Chemikalienflaschen aus Glas*», Rapport Nr. : 9757, 1996.

<sup>3</sup> De door de fabrikant verschaft materiaalgegevens van *Levasint*<sup>®</sup> waren vaak beduidend hoger dan deze uit het testrapport, hoewel gebruik werd gemaakt van dezelfde genormeerde uitvoeringswijze.

<sup>4</sup> Het spreekt vanzelf dat coatings die doorgaans slechts enkele micrometer dik zijn, weinig of geen weerstand tegen brand vertonen, en het bijgevolg niet relevant is hier te vermelden.

*Levasint*® als niet ontsteekbaar beoordeeld. Een andere test geeft zelfs blijk van een zelfdovende werking (ASTM D635).

Er zou op basis van deze resultaten voorzichtig kunnen worden gesteld dat *Levasint*® geen of een geringe bijdrage levert tot brand. Het spreekt vanzelf dat deze stelling dient te worden gestaafd aan de hand van gestandaardiseerde testprocedures<sup>1</sup>.

*Weerstand tegen chemische producten & solventen* | Het is belangrijk voor coatings dat deze zowel bestand zijn tegen solventen die in reinigingsmiddelen kunnen zitten, als aan chemische stoffen waarmee ze in contact kunnen komen wanneer ze worden toegepast in de buitenomgeving (vb: olie, chloriden, nitraten, sulfiden,...). Niet alleen hebben deze stoffen mogelijke invloed op de transparantie van de coating, ook kan dit leiden tot verlies in adhesie tussen glas en polymeer, wat geenszins toelaatbaar is. *Levasint*® werd volgens de fabrikant gedurende 30 dagen ondergedompeld in een uiteenlopend gamma aan zuren, basen en zouten bij verschillende temperaturen. Uit de resultaten blijkt dat enkel bij hogere temperaturen (60°C) belangrijke veranderingen in kleur en adhesie worden waargenomen.

*Slijtvastheid & hardheid* | Tijdens de levensloop van een als veiligheidsconcept aangebrachte polymeercoating, wordt deze niet enkel onderworpen aan traditionele slijtage, maar is deze tevens een makkelijk doelwit voor vandalisme. De krasweerstand en hardheid van dergelijke polymeren is dan ook van fundamenteel belang. De mogelijkheid tot het aanbrengen van belangrijke krassen in de coating, zou niet alleen tot verminderde transparantie kunnen leiden, maar in geval van glasbreuk, zou de door krassen verzwakte zone onmiddellijk aanleiding kunnen geven tot scheuren, waardoor de veiligheid niet meer kan worden verzekerd.

De slijtvastheid van de coating wordt in de norm ASTM D1044 getest met een schaaftwiel dat al draaiend, met een zekere kracht, tegen het polymeerooppervlak wordt gedrukt, waarna de hoeveelheid weggeschraapte polymeer een maat vormt voor de slijtvastheid.

Bij hardere polymeren, waar *Levasint*® een voorbeeld van vormt, kan de hardheid van het polymeer worden weergegeven door een Shore-D waarde. Deze waarde vormt de maat voor het gemak waarmee een penetratielichaam in het proefstuk wordt gedrukt en ligt tussen 0 en 100. Hoe hoger deze waarde hoe harder het materiaal. Bij *Levasint*® werd een waarde van 49 gevonden tijdens onderzoek door *Fraunhofer Institut Silicatforschung*, terwijl de technische productdata van *Bayer* een hardheid 58 weergeeft.

*UV- en weersbestendigheid* | In openlucht ondergaan coatings naast luchtvochtigheids- en temperatuurswisselingen tussen dag en nacht en winter en zomer, tal van andere invloeden, waarvan UV-straling ongetwijfeld één van de belangrijkste is. Lange periodes van blootstelling aan UV-stralen uit de omgeving resulteren bij polymeren doorgaans in een beduidend brosser karakter, verkleuring en vervorming van het polymeer en *Levasint*® vormt hier geen uitzondering op.

---

<sup>1</sup> Er werd geen *Euroklasse* voor *Levasint*® beschikbaar gevonden.

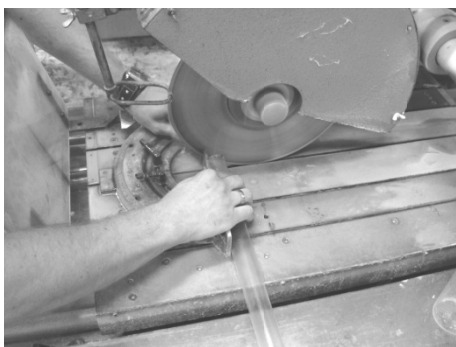
Het spreekt vanzelf dat veel van deze problemen uit de weg worden gegaan wanneer de gecoate glasconstructies zich in een binnenomgeving bevinden. Dit zou echter een beperking vormen voor de algemene toepasbaarheid, waarvan alleszins niet wordt uit gegaan. Daarentegen zou ook ontwerpmatig op de gevoeligheid van de meeste coatings voor diverse omgevingsinvloeden kunnen worden ingespeeld, wat duidelijk wordt aan de hand van de gehanteerde gevalsstudie. Indien het mogelijk wordt 'Freeform Design' glasconstructies, indien niet monoliet, niet enkel aan de buitenkant maar ook aan de binnenkant te voorzien van een polymeerlaag, vormt de buitenste polymeerlaag een directe bescherming van de omgeving tegen mogelijke rondvliegende glasscherven. Het achterliggend glas beschermt op haar beurt de onderliggende polymeerlaag tegen directe omgevingsinvloeden. Deze beschermingsfilosofie zorgt voor een zekere redundantie en verhoogt de toepasbaarheid van het veiligheidsconcept drastisch. Als belangrijkste voorbeeld kan naar de UV-gevoeligheid van de coating worden verwezen. Indien de polymeercoating zowel aan de buiten- als binnenzijde van de glazen kolom wordt aangebracht, vormt de buitenste polymeerlaag een eerste en belangrijke bescherming in geval van glasbreuk ondanks niet te vermijden degradatie. De degradatie van de tweede polymeerlaag wordt echter in grote mate vertraagd, vanwege absorptie en reflectie van een belangrijk aandeel van de totale hoeveelheid UV-straling door de glaswand.

## COATEN

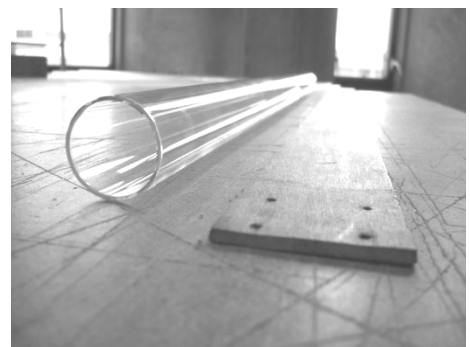
## - The fine art of surfacing -

### 1. PROEFSTUKKEN

Tien glazen buisjes die dienst deden als schaalmodel van de knikstabilisator voor de hyperslanke kolom werden door de heer *Verwimp* vervaardigd in de glasblazerij van de Universiteit Gent<sup>1</sup>. Het zijn standaard beschikbare glazen borosilicaatbuizen<sup>2</sup> met een diameter van 32mm en een wanddikte van 1.4mm, die op een lengte van 650mm diende te worden gesneden. Het snijden gebeurde met behulp van een watergekoelde cirkelzaagmachine, waarna de buizen al draaiend werden gesmolten in open vlam. De exacte afmetingen van deze buizen zijn terug te vinden in *Bijlage D-buizen afmetingen*.



Figuur 5. 2 Het op maat snijden van de glazen buisjes met behulp van de watergekoelde cirkelzaagmachine.



Figuur 5. 3 De op maat gezaagde glazen buisjes waarvan de randen werden uitgegloeid in open vlam.

Met als doel het aangehecht vuil te verwijderen werd zowel de binnen- als de buitenzijde van de drie te coaten glazen buizen gereinigd met aceton. Deze behandeling had tot gevolg dat de

<sup>1</sup> Campus Sterre, gebouw S4-bis, Krijgslaan 281, 9000 Gent.

<sup>2</sup> [www.schott.com/tubing/](http://www.schott.com/tubing/)

binnenzijden van deze buizen vetvrij was voor het coaten, wat een eventuele betere hechting tussen het glas en de polymeerlaag tot gevolg kon hebben. De buitenzijde werd niet vetvrij gehouden, aangezien handcontact met de buizen na de acetonbehandeling nog herhaaldelijk plaatsvond. Geen van de zeven andere glazen buizen onderging een dergelijke, voorafgaande reiniging.

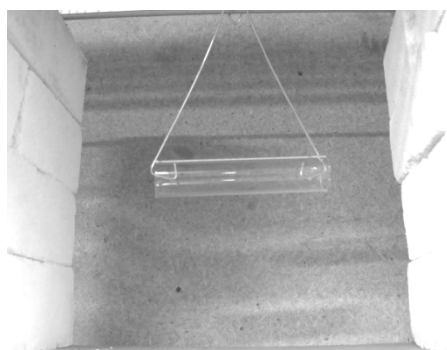
## 2. UITVOERINGSPARAMETERS

Het aanbrengen van de polymeerlaag diende op de glazen buizen te gebeuren met behulp van het reeds besproken *wervelsinter*-procedé. Aangezien zowel de vorm, als de afmetingen fundamenteel verschilden van de gehanteerde glasplaatjes uit *hoofdstuk 3 & 4*, diende de procesparameters opnieuw te worden bepaald en het ophangstelsel te worden herdacht. In onderstaande worden enkele van de belangrijkste praktische overwegingen opgesomd, die voor het coaten, diende te worden genomen :

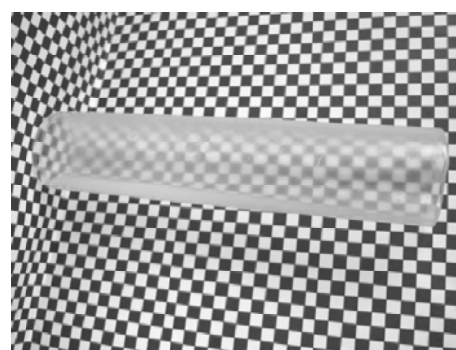
*Oriëntatie van de buizen in de oven* | De keuze tussen het horizontaal of verticaal ophangen van de buizen in de oven, gebeurde hoofdzakelijk op experimentele basis.

Met voorkennis van de beperkte hoogte van de oven (700mm) in verhouding tot de lengte van de proefstukken (650mm), ging de voorkeur echter uit naar het horizontaal ophangen van de glazen elementen. Het testen van de horizontale opstelling gebeurde aan de hand van een glazen buisje dat dezelfde diameter had dan de effectieve proefstukken ( $d: 32\text{mm}$ ), maar veel korter was ( $l: 150\text{mm}$ ). Dit korte buisje werd aan beide uiteinden opgehangen met een metalen haakje. Als voordeel van het ophangstelsel werd gedacht aan de tot een minimum herleide contactpunten tussen glas en metaal, waardoor discontinuïteiten van de gerealiseerde polymeerlaag beperkt konden worden gehouden.

Tijdens het coaten van dit glazen element, werd tevens bijzondere aandacht besteed aan de voor- en naverwarmingstemperaturen in de oven. Deze temperaturen zouden - hoewel het element beduidend korter was - al een eerste indicatie kunnen geven van de ideale verwarmingsomstandigheden voor de eigenlijke proefstukken. Na het coatingproces met succes te hebben doorlopen, bleek echter dat als gevolg van de horizontale positie in de oven, de vloeibare coating tijdens het *moffelen* langs binnen- en buitenzijde naar beneden vloeide, wat resulteerde in een lokaal zeer dikke polymeerlaag aan de onderzijde van de buis.



Figuur 5. 4 Glazen buisje, horizontaal opgehangen in de oven.

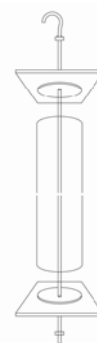
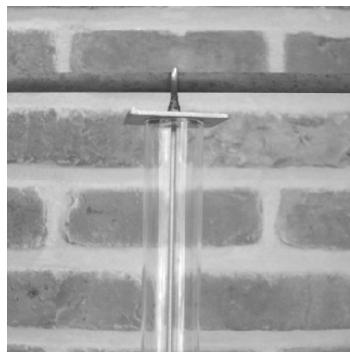


Figuur 5. 5 Gecoat glazen buisje, met een beduidend hogere polymeerdikte onderaan.

Aangezien dit effect niet wenselijk en zelfs ontoelaatbaar was, werd besloten de buizen verticaal op te hangen. Dit stelde niet enkel moeilijkheden omwille van de beperkte speling tussen de oven en de glazen buis, maar het betekende ook dat zich over de lengte van de buis een temperatuurgradiënt voordeed tijdens het voor- en naverwarmen van het glas. Het verschil in temperatuur tussen de onder- en bovenzijde van de kolom zou hoofdzakelijk voor het *moffelen* zeer nadelige gevolgen kunnen hebben, aangezien dit zou impliceren dat de hetere bovenkant reeds bruin begint te verkleuren, terwijl aan de onderzijde het poeder nog onvoldoende is gesmolten. Om dit effect zo goed mogelijk te compenseren, werd gedacht aan een lange en constante voorverwarmingsperiode, zodat niet alleen het glas, maar ook de oven zo uniform mogelijk werd opgewarmd en het temperatuurgradiënt bijgevolg zo beperkt mogelijk was tijdens het coatingproces.

*Mogelijkheid tot het openen/sluiten van de buisholte* | Aangezien vanuit het ontwerp de noodzaak ontstond om zowel aan de binnen- en buitenkant als enkel aan de buitenkant van de buis van een polymeerlaag te voorzien, werden in functie van deze eis twee systemen ontwikkeld. Naast de beoogde afsluitbaarheid, was er een streven naar een minimaal contactoppervlak tussen het glas en de metalen steunen.

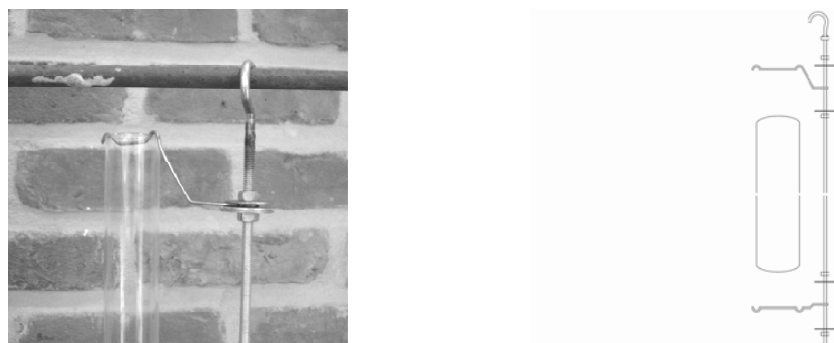
Het eerste ophangstelsel liet toe de buisuiteinden af te sluiten zodat poederinfiltratie werd vermeden. *Figuur 5. 6* geeft de algemene principes van deze opstelling goed weer. Er valt te vermelden dat op de metalen plaatjes die werden gebruikt om de buisuiteinden af te sluiten, een metalen ring werd gelast. Deze ring voorkwam dat als gevolg van de thermische uitzetting van het in de oven verwarmde metalen ophangstelsel, de glazen buis vrij zou gaan bewegen rondom de draadstang, met poederinfiltratie tijdens het dompelen als gevolg.



*Figuur 5. 6* Een schematische voorstelling van de samenstellende onderdelen en het effectief gerealiseerd 'gesloten' ophangstelsel. De metalen plaatjes aan beide buisuiteinden voorkomen dat het polymeerpoeder aan binnenzijde van glazen buis wordt aangebracht tijdens het dompelen.

Een tweede systeem had tot doel het mogelijk te maken de glazen buizen verticaal in de oven op te hangen, de infiltratie van het polymeerpoeder in de buisholte met minimale weerstand te laten geschieden en de manipulatie van de buis tijdens het coaten te laten gebeuren zonder handcontact met het glas. De minimale infiltratieweerstand van polymeerpoeder was ongetwijfeld één van de belangrijkste te realiseren eisen. De ongunstige lengte-diameter van de buis (650/32) zorgde

immers voor lokale afwezigheid van perslucht tijdens het horizontaal dompelen, wat er toe zou kunnen leiden dat het poeder niet in het buislif beweegt.



Figuur 5. 7 Een schematische voorstelling van de samenstellende onderdelen en het effectief gerealiseerd 'open' ophangstelsel, dat toelaat dat zowel de binnen- als buitenzijde worden gecoat.

*De oventemperatuur tijdens het voor- en naverwarmen in de oven* | Om een idee te kunnen vormen van de optimale oventemperaturen voor het coaten van de buizen, deed ook hier het reeds vermelde 15cm lange glazen buisje dienst. Hoewel de lengte beduidend kleiner was dan die van de uiteindelijke glazen buizen, zou toch al een indicatie van de geschikte oventemperaturen worden bekomen. Nadat het buisje gedurende 60 minuten in de oven werd verwarmd tot 190°C werd het ondergedompeld in het wervelbekken, waarna het gedurende 20 minuten en met een maximale temperatuur van 210°C werd *gemoffeld*. Het resultaat was een coating zonder microbelletjes en zonder bruine verkleuring waardoor de gehanteerde temperaturen als richtinggevend zouden kunnen worden gebruikt voor het *wervelsinteren* van de eigenlijke proefstukken.

### 3. UITVOERING

Drie glazen kolommen dienden te worden gecoat met *Levasint*®. Zowel de afmetingen van het wervelbekken als de hoeveelheid beschikbaar *Levasint*®-poeder, geboden de relatief lange proefstukken (650mm) quasi horizontaal te dompelen.

Aangezien de kolommen niet simultaan konden worden gecoat, wijken de procesparameters waaraan de drie kolommen werden blootgesteld tijdens het *wervelsinteren*, onderling licht van elkaar af. Het lijkt enigszins weinig relevant het hele proces dat elke kolom afzonderlijk onderging volledig te beschrijven. Om zodoende toch een beeld te vormen van de specifieke coatingomstandigheden, werden de waarden van de karakteristieke procesparameters van elk proefstuk in Tabel 5. 1 vermeld.

Tabel 5. 1 Specifieke waarden van de belangrijkste coatingparameters van elke glazen buis<sup>1</sup>.

| Naam   | Coatingoppervlak | T <sub>max,i</sub><br>(°C) | Tijd in de<br>oven (min) | Dompelcycli<br>(#xdompelen) | T <sub>max,t</sub><br>(°C) | Tijd in de<br>oven (min) | Coatingdikte<br>(buiten/binnen) |
|--------|------------------|----------------------------|--------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| GB III | binnen/buiten    | 190                        | 60                       | 5                           | 210                        | 15                       | 0.4 / 0.2                       |
| GC III | buiten           | 193                        | 90                       | 5+5                         | 195+213                    | 10+15                    | 0.7 / 0                         |
| GD III | binnen/buiten    | 196                        | 60                       | 5                           | 216                        | 25                       | 0.4 / 0.3                       |

<sup>1</sup> De vermelde oventemperaturen werden ook hier steeds gemeten met een K-thermokoppel. De waarden werden uitgelezen met de *Dynatek D9600* multimeter.

Een enkele bemerking diende over de kwaliteit en de uniformiteit van de polymeerlaag aan de binnenzijde van de glazen buis te worden gemaakt. Uitgaande van de specifieke afmetingen van de glazen buizen, was het moeilijk om het polymeerpoeder aan te brengen met behulp van het *wervelsinter*-procedé. Het door perslucht in suspensie gebrachte polymeerpoeder, was immers niet meer in staat te wervelen binnenin het buislif, waardoor geen controle kon worden uitgeoefend op het al dan niet aanwezig zijn van het polymeerpoeder aan de binnenwand, laat staan op de uniformiteit van de coatinglaag. Door de buis onder te dompelen in het poederbad en deze vervolgens heen en weer te bewegen, werd getracht het polymeerpoeder zo uniform mogelijk aan te brengen.



Figuur 5. 8 Verticaal dompelen: het polymeerpoeder bereikt nooit het midden van de glazen buis.



Figuur 5. 9 Horizontaal dompelen: het in suspensie gebracht polymeerpoeder bereikt moeilijk de binnenwand van de glazen buis.

De in Tabel 5. 1 vermelde waarden voor de coatingdikte aan de binnenzijde van de buis werden opgemeten met behulp van een driepuntsmicrometer (Figuur 5. 11) en zijn bijgevolg eerder indicatief te interpreteren. Deze micrometer liet immers enkel toe de coatingdikte langsheen het binnenoppervlak te meten over een lengte van 10cm vanaf de buisuiteinden, waardoor geen informatie kon worden bekomen over de laagdikte over een lengte van 45cm. In dergelijke gevallen was het echter aangewezen om met behulp van een ultrasoon meettoestel (Figuur 5. 10), de coatingdikte op elke gewenste plaats met hoge nauwkeurigheid op te meten, maar deze was niet beschikbaar.



Figuur 5. 10 Ultrasone diktemeter  
-bron: [www.olympus-ims.com](http://www.olympus-ims.com)-



Figuur 5. 11 Met een micrometer werd lokaal de coatingdikte aan het binnenoppervlak van de glazen buis gemeten.

#### 4. RESULTATEN

Algemeen beschouwd kon het coaten van de drie kolommetjes met *Levasint*<sup>®</sup> door middel van het *wervelsinter*-procedé als een succes worden beschouwd. De drie kolommetjes vertoonden een relatief transparante polymeerlaag waarvan de totale dikte (hetzij binnen+buiten, hetzij enkel buiten) kon geschat worden op 0.7mm, wat de helft van de wanddikte van de glazen buisjes was.

Door beheersing van de procesparameters konden tevens de in *hoofdstuk 3* vermelde esthetische problemen (microbelletjes, bruine verkleuring,...) worden vermeden. Ondanks de lange voorverwarmingstijden, was een temperatuurgradiënt over de lengte van de kolommetjes in de oven tijdens het *moffelen* niet te vermijden. Dit vertaalde zich in een beperkt gesmolten polymeerpoeder onderaan en een neiging tot bruine verkleuring bovenaan.

In wat volgt worden kort de specifieke beperkingen en moeilijkheden die elke kolom kenmerkte toegelicht.

*GC III* | Als enige glazen buis die enkel langs de buitenzijde werd gecoat, was deze opmerkelijk transparanter dan beide andere buizen. Het coaten van de buis in twee opeenvolgende fases, leek een positieve invloed te hebben gehad op de uniformiteit van de polymeerlaag over de gehele omtrek en lengte van de buis. Als gevolg van het tweede dompelproces, werden de discontinuïteiten in de eerste laag immers geëgaliseerd. Het bleek tevens aangewezen het overtollige poeder, voor het *moffelen*, onder lage druk van het proefstuk te blazen om de uniformiteit van de polymeerlaag te verbeteren.

Het 'ontkisten' van deze buis gebeurde met behulp van een lokale vlam. Aangezien de afsluitplaatjes samen met de buis werden gecoat, diende met een vlam ter hoogte van deze plaatjes het thermoplastisch polymeer plaatselijk te worden verweekt waardoor de stalen plaatjes konden worden losgetrokken. Kort nadat de warmtebron werd verwijderd, stolde het polymeer opnieuw.

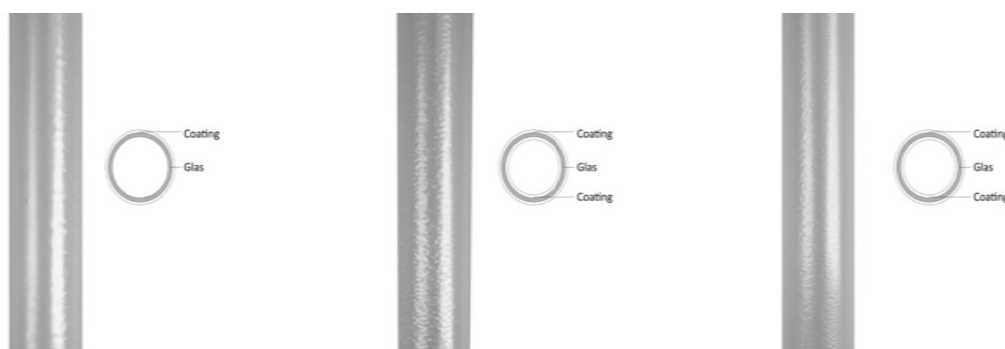
Een alternatieve methode bestond er in de randen los te snijden met een mes, met het risico dat het glas werd beschadigd of in het ergste geval brak.

*GB III* | Voor deze zowel langs binnen als langs buiten gecoate buis, werd niet alleen een verminderde transparantie vastgesteld, maar bleek tevens de textuur van de coating langsheen de binnenwand een belangrijk pijnpunt. Visuele analyse toonde aan dat de in het buislif aangebrachte polymeerlaag onderaan opmerkelijk ruwer was dan bovenaan. Verschillende verklaringen worden in onderstaande kort aangehaald, maar geen van deze kon worden geverifieerd.

Enerzijds werd gedacht aan een dikker aangebrachte polymeerlaag als gevolg van het beperkt wervelen van het poeder in het buislif tijdens het dompelen. Anderzijds zou kunnen worden verwezen naar de beperkte temperatuur onderaan in de oven, waardoor goed vloeien van de coating werd verhinderd.

Tijdens het 'ontkisten' werden de koperen haakjes verhit door een vlam, waardoor de coating lokaal verweekte en de buis kon worden verwijderd van het metalen frame.

**GD III** | Ook deze buis werd zowel aan de binnen- als buitenkant gecoat. De coating vertoonde dezelfde gebreken als hierboven bij **GB III** werd vermeld. Deze buis werd echter gekenmerkt door problemen tijdens het ‘ontkisten’. Aangezien slechts één koperen haakje tegelijkertijd kon worden verwarmd en losgetrokken, introduceerde het tweede nog *vastgecoate* haakje lokaal glasbreuk aan het andere buisuiteinde. Om de schade te beperken werd de buis met behulp van de watergekoelde cirkelzaagmachine ingekort. Dit impliceerde echter dat één zijde van deze buis een niet uitgegloeide, licht verbrijzelde rand vertoonde en tevens 8mm korter was. Deze twee beperkingen dienden bijgevolg tijdens de vervaardiging van de schaalmodellen zo goed mogelijk te worden gecompenseerd.



Figuur 5. 12 Een vergelijk in coatingkwaliteit tussen de verschillende buizen. (v.l.n.r.: *GC III*, *GB III*, *GD III* ).

Bovenstaande had tot doel een beeld te schetsen van de moeilijkheden en beperkingen die gepaard gingen met het realiseren van een polymeerlaag op de als schaalmodel fungerende glazen buisjes. Uitgaande van de aangehaalde problematiek, mag het duidelijk wezen dat wanneer deze elementen op schaal 1:1 zouden worden uitgevoerd, een confrontatie met de geïllustreerde moeilijkheden meer dan waarschijnlijk zal zijn.

Wanneer de moeilijkheid om 6.5m lange glazen buizen te bekomen<sup>1</sup> buiten beschouwing wordt gelaten, dienen deze buizen tevens te worden voorzien van een polymeerlaag. Vanuit de oppervlaktebehandelingsindustrie zijn dergelijke grote wervelbekkens en *moffelovens* reeds beschikbaar, maar het probleem van het beperkt *wervelen* van het polymeerpoeder in het buislif van grote glazen buizen blijft een moeilijk te overwinnen obstakel, vooral omdat glazen buizen van dergelijke afmeting minder makkelijk te manipuleren zijn tijdens het dompelen. Vanwege de voortdurende ontwikkelingen in deze industrie, wordt het echter wel mogelijk geacht te stellen dat voor de meeste ‘freeform’ glasconstructies wel een gepaste uitvoeringstechniek bestaat<sup>2</sup>.

Een belangrijker probleem dat zich stelt bij de geïllustreerde schaalvergroting, is de daarbij horende nood aan dikkere polymeerlagen. Het mag immers duidelijk zijn dat niet alleen de technieken maar ook de polymeren het maar moeilijk toelaten de laagdiktes te extrapoleren. Zeer dikke polymeerlagen zijn immers niet alleen moeilijk uniform aan te brengen, ook de transparantie van de steeds dikker wordende laag zou als nefaste invloed voor de glazen constructie kunnen worden beschouwd.

<sup>1</sup> Standaard buislengtes bedragen 1500mm, echter op maat gemaakte buizen zijn ook verkrijgbaar. De optie bestaat tevens om verschillende glazen buizen aan elkaar te lassen.

<sup>2</sup> In: TRIER F., «*Sol-Gel Coated Glass Tubes for Architectural Application*», Glass Processing Days 2001, pp. 808-810., worden enkele mogelijke technieken vermeld die kunnen toegepast worden om vloeibare coatings aan de binnenzijde van een glazen buis aan te brengen. Algemeen gesteld gaat het om een spuit- en giettoepassing.

Ter beoordeling van de ontworpen kolom met bijbehorende knikstabilisator en afstandhouders en de ter beveiliging aangebrachte polymeercoating, werden de 10 uitgevoerde schaalmodellen beproefd. Tijdens deze proeven werd een axiale belasting rechtstreeks op de hyperslanke kolom aangebracht. Als gevolg van de axiale belasting vertoonde deze laatste de neiging tot uitknikken, waardoor via de afstandhouders belangrijke spanningen werden geïntroduceerd in het glas. Wanneer deze spanningen te groot werden, bezweek het glas en daarmee ook de gehele constructie. Om dit laatste te voorkomen werd telkens één, uit elke reeks van drie identiek uitgevoerde kolommen, voorzien van een polymeercoating. Op het moment dat de glasspanningen te groot werden brak het glas, maar werd de scheurgroei beperkt door de coating, zodat de krachten, geïntroduceerd door de afstandhouders nog altijd konden worden opgenomen en de stalen kolom dus niet plots uitknikte. Het waren niet zo zeer de kwaliteiten van de verschillende steunconcepten die hier werden beschouwd<sup>1</sup>, aangezien deze studie hoofdzakelijk deel uitmaakte van de masterproef van *Sofie Van Goethem*. De aandacht werd hier daarentegen verschoven naar de mogelijke invloed van de polymeercoating op het bezwijkgedrag van de kolom in het algemeen en de knikstabilisator in het bijzonder.

Onderstaande tekst tracht een inzicht te bieden in de realisatie van de verschillende schaalmodellen, met bijzondere aandacht voor wijzigingen in de uitvoeringsmethode, die het gevolg waren van de aanwezige coating. Als tweede wordt de proefopstelling kort toegelicht, waarna een evaluatie volgt van de invloed van de op drie van de kolommen aangebrachte coating. De andere zeven kolommen doen hierbij eigenlijk dienst als referentiestukken<sup>2</sup>.

## 1. PROEFSTUKKEN

De tien op schaal 1:10 uitgevoerde modellen van een hyperslanke kolom met bijbehorende knikstabilisator en afstandhouders werden ontworpen in het raam van de masterproef van *Sofie Van Goethem*. Ze werden steeds samengesteld uit vier basiscomponenten: de hyperslanke stalen kolom, de afstandhouders, de glazen knikstabilisator en de PMMA-dopjes verlijmd met beide uiteinden van de knikstabilisator. Aan de hand van de verschillende uitgewerkte afstandhouders onderscheidde er zich drie kolomtypes. De afmetingen van elk van deze kolommen en hun samenstellende onderdelen zijn terug te vinden in *Bijlage D buizen afmetingen*.

De uitvoering van de basiscomponenten en de specifieke afstandhouders werd in onderstaande tekst besproken. De aandacht ging daarbij naar de uitvoeringstechnische problemen, in het bijzonder in relatie met de reeds aangebrachte coating.

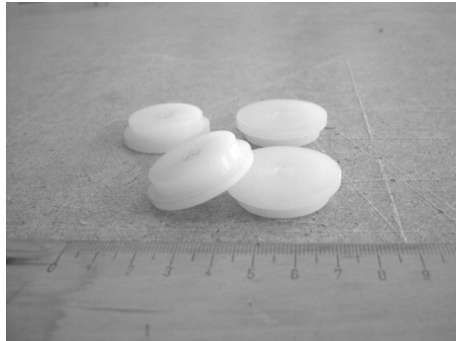
### *Basiscomponenten* |

- o Een stalen draadstang met een gemiddelde lengte van 680mm en een kerndiameter van 4mm deed dienst als stalen kolom.
- o Glazen buisjes, waarvan drie gecoat met *Levasint*®, fungeerden als knikstabilisator voor de draadstang. (650x32x1.4mm). De totale coatingdikte kon steeds geschat worden op 0.7mm.

<sup>1</sup> Deze wordt uitgebreid beschreven in de masterproef van *Sofie Van Goethem*: “Constructief ontwerp van een hyperslanke stalen kolom in een elegant glazen jasje”, masterproef, UGent, 2009.

<sup>2</sup> De zeven ongecoate kolommen werden gerealiseerd door *Sofie Van Goethem*.

- O Twee passende PMMA-dopjes sloten onder- en bovenkant van de glazen buis af en centreerden de stalen draadstang. Om te voorkomen dat ze zich tijdens de proeven te veel zouden verplaatsen, werden ze steeds uitgevoerd met een kraagje van 3mm en werden ze verlijmd met de glazen buizen (*Loctite®*).



Figuur 5. 13 Beeld van de PMMA-dopjes (totale hoogte 8mm), voorzien van een kraagje (3mm).



Figuur 5. 14 Op maat vervaardigen van PMMA-dopjes op metaaldraaibank.

#### UITVOERING:

Bij de realisatie van de kolommen dienden de passende PMMA-dopjes op maat te worden vervaardigd op een metaaldraaibank in de werkplaats van het *Laboratorium voor Modelonderzoek*<sup>1</sup>.

De verlijming met de glazen buis kon echter pas plaatsvinden nadat de stalen draadstang en de bijbehorende afstandshouders werden geïntroduceerd in het buislif. Wanneer het geheel was gemonteerd, werden langs beide uiteinden van de draadstang tevens twee moertjes aangebracht die tot doel hadden de kniklengte van de draadstang-uiteinden te beperken.

#### BEMERKINGEN

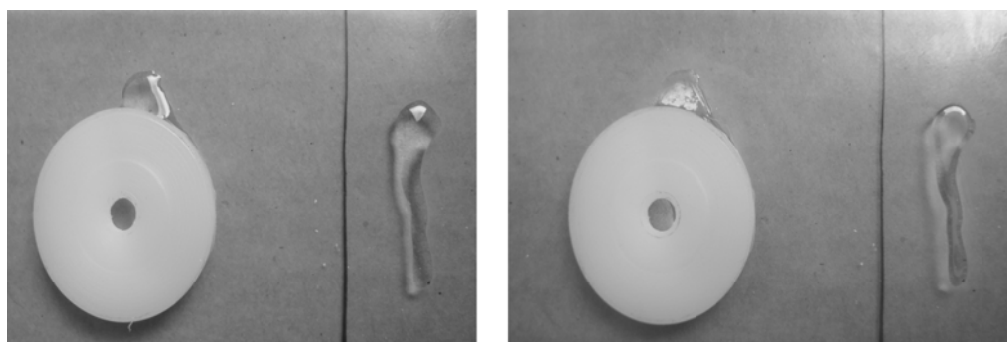
De stalen draadstang vertoonde in sommige gevallen reeds initiële vervormingen en beschadigingen aan de schroefdraad. Beide zouden dan ook een invloed kunnen hebben gehad op de testresultaten, met name op de bezwijkbelasting van de kolom.

Het gebruik van de sneldrogende lijm ter bevestiging van de PMMA-dopjes, zorgde er bij enkele kolommen (*GB I, GB III & GB IV*) voor dat het PMMA dopje niet volledig in de buis kon worden gebracht, omwille van het te snel uitharden van de lijm.

Vanwege de aanwezigheid van de polymeercoating aan de binnenzijde van twee van de tien kolommen, diende onderzoek te worden geleverd naar de reactie van lijm op deze polymeerlaag. Lokale aantasting van de polymeerlaag door de aanwezigheid van de lijm, of globaal verminderde adhesie tussen het glas en de polymeerlaag als gevolg van lijmdampen die zitten opgesloten in het buislif na montage, zijn immers ontoelaatbaar.

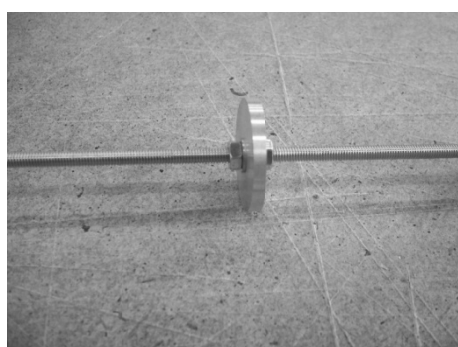
<sup>1</sup> Deze onderzoeksgroep is een onderdeel van de vakgroep Bouwkundige Constructies van de Universiteit Gent, *Technologiepark-Zwijnaarde 904, 9052 Gent*

Na beperkt onderzoek, waarbij een hoeveelheid lijm werd aangebracht op een gecoate glazen plaatje, werden geen van de vernoemde problemen waargenomen, wel zorgde de lijm steeds voor een lokale witte verkleuring van de polymeerlaag.



Figuur 5. 15 Reactie van de lijm op de coating onmiddellijk na aanbrengen en na 1 dag.

*Reeks GC* | Bij drie van de kolommen werden de afstandshouders uitgevoerd als zeven passende aluminium schijven die met behulp van moertjes op hun plaats werden gehouden.



Figuur 5. 16 Het aanbrengen van de passende aluminium schijfjes op de draadstang met behulp van twee moertjes.



Figuur 5. 17 De drie gerealiseerde kolommen met passende aluminium schijfjes, waarbij *GC III* werd gecoat aan de buitenzijde.

#### UITVOERING

De aluminium schijfjes werden op de metaal draaibank in de werkplaats van het Laboratorium voor Modelonderzoek van de Universiteit Gent vervaardigd. De positie van deze aluminium schijfjes op de draadstang bleek een moeilijk controleerbaar element, waardoor de afstand tussen de schijfjes onderling en tussen de verschillende met dit type steun uitgevoerde kolommen afweek. De effectieve afmetingen zijn ook hier weer terug te vinden in *Bijlage D-buizen reeks GC*.

#### BEMERKINGEN

De uitvoeringstoleranties bij het draaien van de aluminium schijfjes en de toleranties op de binnendiameter van de glazen buizen zorgden ervoor dat er steeds sprake was van speling tussen het glas en de schijfjes. De speling, noodzakelijk om de schijfjes in de glazen buizen te kunnen schuiven zonder belangrijke beschadigingen aan te brengen aan de binnenwand, was echter voor de drie kolommen nooit gelijk. Deze

uitvoeringstoleranties zouden bijgevolg beperkte invloed kunnen hebben gehad op de testresultaten.

Omwille van de beperkte toleranties die dit steunconcept kenmerken, werd tevens besloten enkel een coating op het buitenoppervlak van de glazen buis aan te brengen. Dit besluit werd ingegeven door beperkte uniformiteit van de reeds gerealiseerde coating aan de binnenwand van de andere twee proefstukken (*GD III* & *GB III*). De polymeerlaag die aan de buitenwand van dit proefstuk werd gerealiseerd vertoonde een dikte (0.7mm).

*Reeks GB* | De afstandshouders van vier<sup>1</sup> kolommen bestonden uit gedroogde bonen ('maple peas'). Deze werden in de holte tussen de binnenwand van de glazen buis en de draadstang aangebracht.



Figuur 5. 18 De gedroogde bonen (*maple peas*) die als afstandshouder worden gebruikt in *reeks GB*.



Figuur 5. 19 De drie gerealiseerde kolommen met gedroogde bonen, waarbij *GB III* werd gecoat aan de binnen- en buitenzijde.

#### UITVOERING

Nadat de stalen draadstang was gepositioneerd in het midden van de glazen buis, werd de buisholte opgevuld met bonen. Regelmatig werden deze bonen handmatig aangetrild om een dense pakking van de bonen te verwezenlijken.

#### BEMERKINGEN

Tijdens het vulproces kon de centrale positie van de draadstang over de gehele lengte van de buis moeilijk worden gewaarborgd. De draadstang vertoonde bijgevolg steeds een lichte vorm van scheefstand of een algemene lichte uitbuiging.

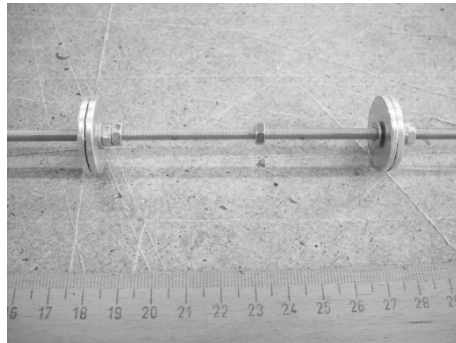
Het spreekt vanzelf dat het regelmatig aantrillen van de korrels tijdens het vullen, voor de drie kolommen geen zelfde pakkingdichtheid tot gevolg had, wat tot beïnvloeding van de testresultaten zou kunnen leiden.

In vergelijking met de drie ongecoate kolommen kende de gecoate variant geen afwijkend uitvoeringspatroon. Enkel het aantrillen van de korrels geschiedde op een licht alternatieve wijze. Het zacht tikken van de met een PMMA-dopje beschermde buiskop tegen de ondergrond voorkwam eventuele beschadigingen van de op de buitenwand aangebrachte coating. Dit laatste vormde immers een reëel gevaar

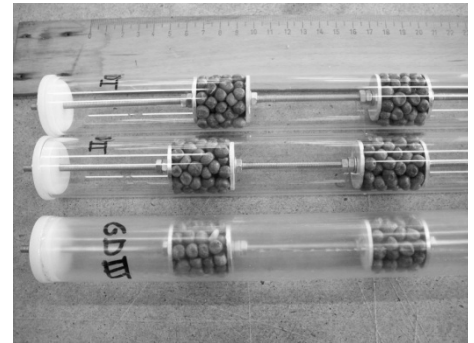
<sup>1</sup> *Reeks GB* telde eigenlijk slechts 3 proefstukken, maar aangezien kolom GR met hetzelfde steunconcept en onder dezelfde omstandigheden werd vervaardigd, werd deze hier opgenomen in *reeks GB*. De naam van deze kolom werd in het vervolg van deze masterproef daarom veranderd naar *GB IV*.

wanneer de verdichting zou worden bewerkstelligd door het aantikken van de kolomwand met een houtblok, wat bij de andere kolommen wel de gehanteerde techniek was.

*Reeks GD* | De afstandhouders van deze laatste drie kolommen werden gerealiseerd door op zes plaatsen in de glazen buis, de eerder vermelde gedroogde bonen lokaal te persen tussen twee aluminium schijfjes.



Figuur 5. 20 Steeds twee aluminium schijfjes vormde de persvlakken voor de gedroogde bonen.



Figuur 5. 21 De drie gerealiseerde kolommen met de tussen de aluminium schijfjes geperste bonen, waarbij *GD III* werd gecoat aan de binnen- en buitenzijde.

#### UITVOERING

Het vullen van de glazen buis vormde een delicaat proces. De bonen dienden immers tijdens het inbrengen van de draadstang, tussen het eerste paar schijfjes te worden aangebracht, waarna het schroefje boven het schijfje werd aangedraaid waardoor de bonen tegen de glaswand werden gedrukt. Vervolgens diende de stalen draadstang met de eerste gerealiseerde afstandshouder verder naar beneden te worden geduwd, waarna de tweede afstandshouder kon worden gevuld met bonen. Dit proces stopte wanneer de draadstang volledig in de buis was gezakt en elke afstandshouder op zijn plaats zat.

Om dit proces mogelijk te maken, werden de eerste (onderste) bonen minder hard samengeperst dan de volgende, aangezien anders te snel, te grote wrijving ontstond tussen de samengeperste bonen en de glaswand, waardoor de stalen draadstang niet meer volledig in het buislif was te krijgen.

#### BEMERKINGEN

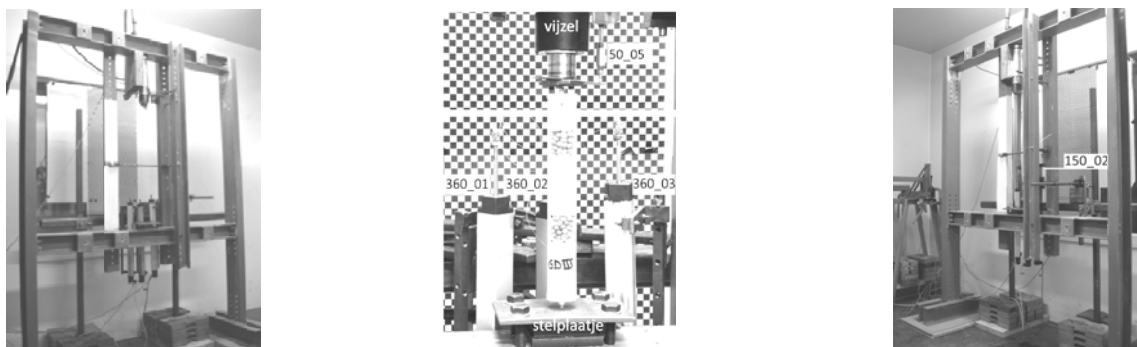
Ook voor dit steunconcept kon na realisatie van de kolommen geen absolute uitspraak worden gedaan over de mate waarmee de bonen telkens werden samengeperst. Wel was het belangrijk op te merken dat voor de gecoate kolom de bonen opvallend minder werden samengedrukt dan bij de ongecoate variant. Dit was het directe gevolg van de verhoogde wrijvingsweerstand die werd ondervonden wanneer de samengeperste bonen in de gecoate kolom naar beneden werden geduwd.

Het was tevens deze gecoate kolom die door glasbreuk tijdens het 'ontkisten' met 8mm werd ingekort. Om deze verminderde lengte te compenseren werd de kraag van de PMMA-dopjes aan beide uiteinden met 2mm verhoogd, om de totale afwijking in lengte te beperken tot 4mm.

## 2. PROEFOPSTELLING

De ontworpen en uitgevoerde schaalmodellen van de ‘hyperslanke kolom in een glazen jasje’ werden onderworpen aan een drukkracht in de as van de kolom, waarbij de kolom scharnierend werd verbonden met de omgeving. Een sterk vergelijkbare proefopstelling werd reeds gerealiseerd door *Sofie Van Goethem* in het raam van haar masterproef ter uitvoering van voorgaande proeven. Bijgevolg zullen hier kort de algemene principes en aandachtspunten, noodzakelijk voor een goede interpretatie van de resultaten, worden toegelicht.

Als basis voor de proefopstelling, werd beroep gedaan op een stalen raamwerk dat in het *Laboratorium voor Modelonderzoek*<sup>1</sup> werd samengesteld (in het raam van andere proeven) waarop aan de bovenste portiekbalk een vijzel werd gemonteerd. Elke toevoeging die verder aan het basisframe werd aangebracht, geschiedde om de axialiteit van de belasting op de kolom zo goed mogelijk te waarborgen en om een goede meting te kunnen uitvoeren van de verplaatsingen van de kolom, zowel axiaal als lateraal.



Figuur 5. 22 Overzicht van de proefopstelling: het stalen raamwerk, de verplaatsingsmeters, de stelplaatjes en de vijzel.

Twee stalen plaatjes, centraal ingeboord en uitgeschuind, vormden de contactpunten tussen de kolom en de omgeving. Deze conusvormige inkeping in beide stalen plaatjes, zorgde ervoor dat de kolom zich niet verplaatst tijdens het uitvoeren van de proeven en bewerkstelligde de scharnierende oplegging van de kolom met de omgeving. Het bovenste plaatje werd rechtstreeks op de vijzel aangebracht met behulp van twee boutjes. Het onderste stalen plaatje werd met behulp van vier niet passende bouten aangebracht op de onderste portiekbalk van het stalen frame. Aangezien de boutgaten groter werden uitgevoerd dan de lijfdiameter van de bouten, was beperkt nastellen van de kolom mogelijk.

De drie verticaal gemonteerde balken, dienden eigenlijk enkel om de geleiders van de verplaatsingsmeters aan te bevestigen. Deze geleiders zorgen voor de correcte oriëntatie van het draadje dat tussen het midden van de kolom en het bewegend deel van de verplaatsingsmeter werd gespannen. Met behulp van deze ‘constructie’ was het mogelijk de laterale verplaatsing in het midden van de kolom op te meten en te controleren door de vier verplaatsingsmeters paarsgewijze onder een hoek van 90° te plaatsen. Bijgevolg kon voor elk meter-koppel (vb: 360\_01 & 360\_03<sup>2</sup>) de verplaatsingsvector worden bepaald.

<sup>1</sup> Deze onderzoeksgroep is een onderdeel van de vakgroep Bouwkundige Constructies van de Universiteit Gent, *Technologiepark-Zwijnaarde 904, 9052 Gent Technologiepark-Zwijnaarde 904, 9052 Gent*

<sup>2</sup> De cijfercombinatie vormt het kenteken van een verplaatsingsmeter.

Een vijfde verplaatsingsmeter (50\_05) mat de verticale verplaatsing van de vijzel tijdens de proeven.

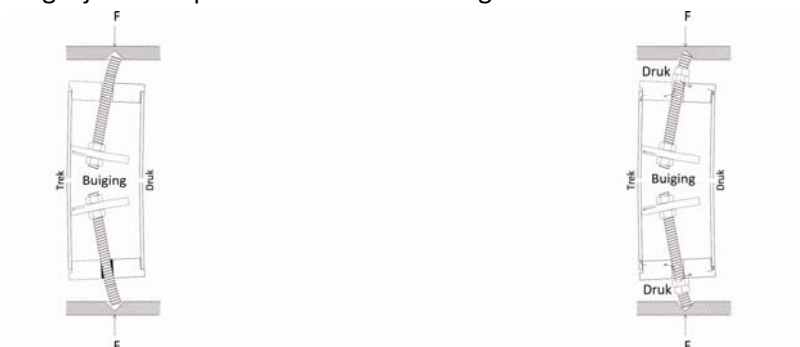
Om de kracht uitgeoefend door de vijzel op de kolom te kunnen meten, werd een drukdoos met een maximaal bereik van 20kN tussen de vijzel en de bovenbalk van het raamwerk geklemd. Wanneer de vijzel werd uitgedraaid, werd de drukdoos harder ingedrukt. De druk uitgeoefend door de vijzel op de drukdoos, vormde bijgevolg een maat voor de aangebrachte belasting.

### 3. BEMERKINGEN

Als gevolg van de uitvoeringsmodaliteiten van de tien te beproeven kolommen, werd verwacht dat de krachtwerking van de gerealiseerde schaalmodellen licht zou kunnen afwijken van het vooropgestelde en hierboven geschetste, krachtverloop.

Het voorzien van schroefjes aan de draadstang-uiteinden boven de PMMA-dopjes, zou er immers voor kunnen zorgen dat als gevolg van de vervormingen van de draadstang onder invloed van de axiale belasting, niet enkel buigspanningen in het glas worden geïntroduceerd (door verplaatsing van de afstandshouders). De doorbuiging van de draadstang betekende immers een verminderde afstand tussen de uiterste punten, waardoor de axiale belasting via de schroefjes kon worden overgedragen naar de PMMA-dopjes, die op hun beurt de krachten rechtstreeks overdroegen op het glas, waardoor de glazen buis niet enkel op buiging zou worden belast maar mogelijk ook op druk volgens de langsas.

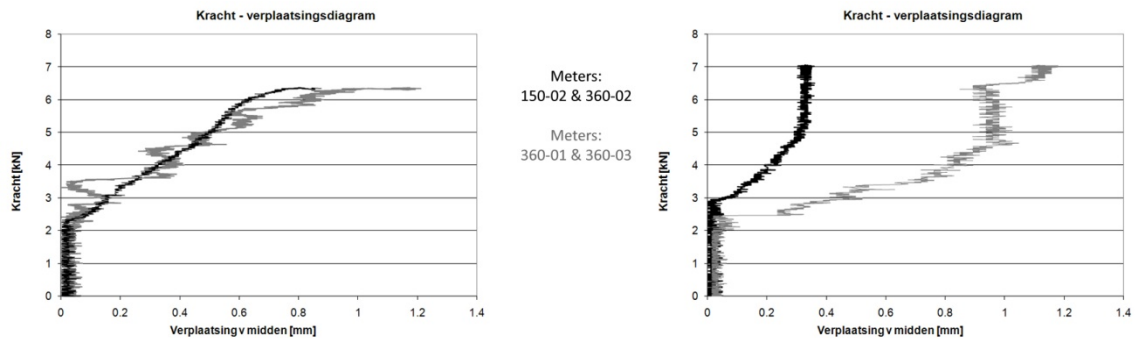
Aangezien zowel gecoate als ongecoate kolommen op deze wijze werden uitgevoerd, was het nog wel steeds mogelijk om de prestaties van de coating te beoordelen.



Figuur 5. 23 De invloed van de aanwezigheid van moertjes t.h.v. de PMMA-dopjes op het krachtverloop in de kolom.

Bij het verwerken van de proefresultaten, werden tegenstrijdige meetgegevens bekomen voor de laterale verplaatsing van de in paar geplaatste verplaatsingsmeters. Niet alleen vertoonde het meterpaar '360-01' & '360-03' sterke opgemeten verplaatsingsfluctuaties in vergelijking met het andere meterpaar, ook werden door beide meterkoppels vaak sterke verschillende laterale verplaatsingen opgemeten (Figuur 5. 24). Deze stelling dient echter licht te worden genuanceerd, aangezien de maximale laterale verplaatsingen die de glazen kolommen in het midden ondergingen nooit de 1.5mm bereikte.

Aangezien de proefopstelling niet toeliet verplaatsingsmeting van meter '150-02' in hetzelfde horizontaal vlak van de andere meters uit te voeren, konden enigszins grotere afwijkingen op de resultaten van het meterkoppel '150-02 & 360-02' worden verwacht. Bijgevolg werd voor verdere analyse van de resultaten gebruikt gemaakt van de metingen verricht door koppel '360-01 & 360-03'. Het mag duidelijk zijn dat besluiten gebaseerd op deze metingen met een zekere voorzichtigheid dienden te worden gehanteerd.



Figuur 5. 24 Een vergelijking van de door de beide meterkoppels geregistreerde verplaatsingen.

## VERGELIJK

## - Nothing compares -

In wat volgt werd niet zozeer gepoogd een vergelijking en evaluatie van de verschillende steunconcepten te realiseren, wel werd getracht het gedrag van de op de buizen aangebrachte polymeercoating bij eventuele glasbreuk kwalitatief te beoordelen. De resultaten van de twee ongecoate kolommen voorzien van hetzelfde type afstandhouders werden daarbij steeds als referentie genomen.

### 1. ANALYSE

Hieronder werd per proefreeks de invloed van de coating toegelicht. In de begeleidende tabellen werd daarbij notie gemaakt van de 'belasting bij breukinitiatie'. Het ontstaan van initiële breuken in het glas waren immers vaak enkel visueel (of door geluid) waarneembaar tijdens de proeven. Er was dus geen vertaling van deze breuken in de bekomen kracht-verplaatsingsdiagramma (van de kolommen). Vermits tijdens de proeven de belastingswaarden op regelmatige basis werden meegedeeld, was het mogelijk om een goede inschatting te maken van wanneer (bij welke belasting) deze initiële breuken in het glas ontstonden.

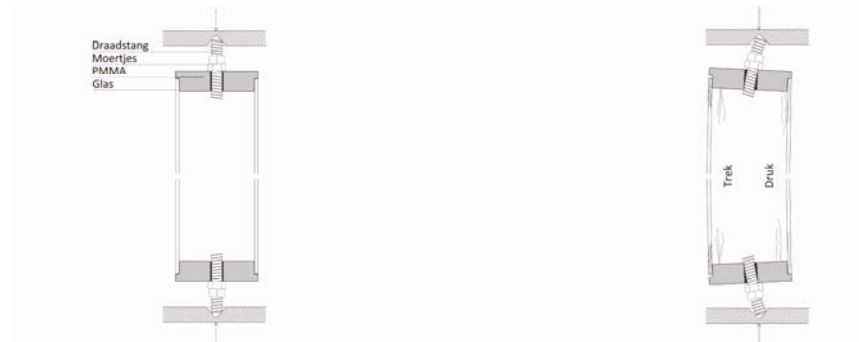
*Algemeen* | Tijdens de proeven viel op te merken dat ondanks de verschillende types van afstandhouders, de glasbreuk in de knikstabilisator steeds initieerde aan de kolomuiteinden ter hoogte van de PMMA-dopjes. Deze breukinitiatie vond plaats na het aanbrengen van een belangrijk aandeel van de uiteindelijke bezwijkbelasting (zie Tabel 5. 2, Tabel 5. 3 & Tabel 5. 4) en was waarschijnlijk het gevolg van een aantal factoren.

Eerst en vooral kon worden ondersteld dat als gevolg van de vervormingen van de draadstang tussen de afstandhouders, buiging in de glazen buis werd geïntroduceerd. Deze buigspanningen verklaarden enigszins, waarom breuken ontstonden aan de boven- en onderkant van de kolom die vaak op één lijn lagen.

Deze zelfde vervormingen van de stalen draadstang, konden er tevens voor gezorgd hebben dat de verlijming tussen de PMMA-dopjes en het glas werd verbroken en dat het PMMA-dopje als gevolg tevens schuin ging zitten. De scheefstand van dit PMMA-dopje zou de aanzet kunnen hebben gegeven tot belangrijke scheuren. Deze scheuren zouden zich zowel in de druk- als trekzone van de op buiging belaste kolom kunnen bevinden (Figuur 5. 25). Er werd daarbij opgemerkt dat het hier als drukzone

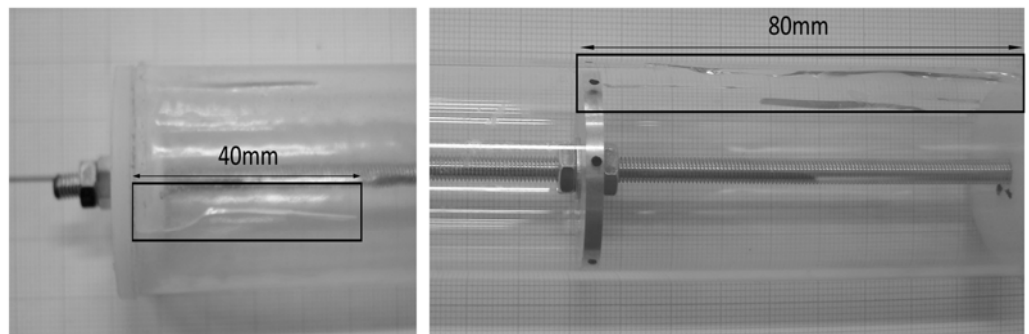
geschetste deel van de kolom eerder verticale breukpatronen vertoonde, terwijl de trekzone werd gekenmerkt door V-vormige scheuren.

Wanneer de hechting tussen het PMMA-dopje en het glas echter lokaal zeer sterk was, kon het aanleiding geven tot spanningsconcentraties in het glas ter hoogte van het hechtingspunt. Deze spanningsconcentraties zouden aanleiding kunnen hebben gegeven tot glasbreuk op plaatsen die zich niet in de trekzone bevonden. Er wordt nogmaals onderstreept dat het hier om onderstellingen gaat die worden geponereerd vanuit de beperkte fysische verschijnselen. Om deze eerste hypothesen te kunnen staven zou immers een veel uitgebreidere proefreeks moeten worden uitgevoerd.



Figuur 5. 25 Hypothese over het ontstane breukpatroon ten gevolge van belasting.

**Reeks GC** | Zoals hierboven algemeen beschreven, initieerde glasbreuk van de glazen knikstabilisator aan de uiteinden van de glazen kolom. Deze breukinitiatie werd enkel voor kolom GC // visueel opgemerkt, maar vertaalde zich niet onmiddellijk in veranderingen in het draagvermogen van de kolom (Figuur 5. 27). Onder de steeds toenemende belasting, breidde de ‘verticale’ breuklijnen zich steeds verder uit, tot een maximale belasting werd bereikt. Opvallend was dat met deze maximale belasting een glasbreuk correspondeerde, waarvan de scheurtip samenviel met de laatste afstandshouder aan één van beide uiteinden van de buis. Uitgaande van deze bevinding werd vermoed dat de afstandshouder onvoldoende steun kreeg van de gebarsten glaswand, waardoor het uitbuigen van de draadstang lokaal niet meer geschiedde en het draagvermogen afnam.

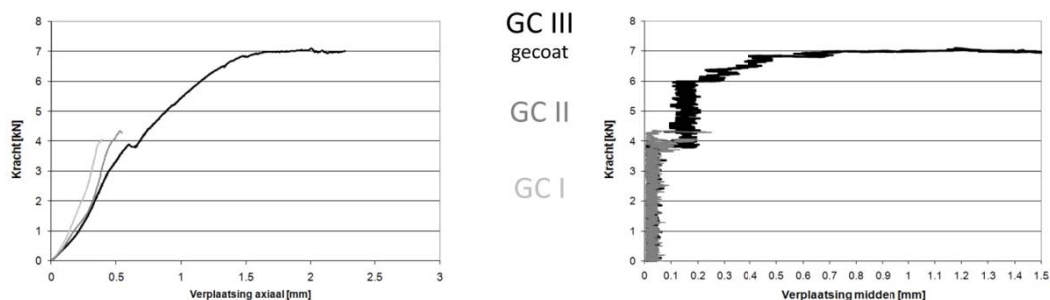


Figuur 5. 26 Vergelijk van de scheurlengte tussen de gecoate en ongecoate buis.

Bij de aan de buitenzijde gecoate kolom *GC III* kon tevens niet worden voorkomen dat er glasbreuk plaatsvond aan de uiteinden van de kolom bij quasi dezelfde belasting als de bezwijkbelasting van de ongecoate variant als gevolg van de bovenvermelde effecten (cfr: *Algemeen*). De invloed van de coating werd echter duidelijk bij hogere belastingswaarden, waar de polymeerlaag instond voor de beperking van de scheurlengte onder de toenemende belasting. Dit scheurstoppend effect was van die aard dat bij een belasting die 70% groter was dan de bezwijkbelasting van de ongecoate kolommen, de gecoate kolom bezweek onder het lokaal uitknikken van de draadstanguiteinden boven de PMMA-dopjes. De draadstanguiteinden buiten beschouwing gelaten, was de kolom bijgevolg in staat minstens een belasting van 7.1kN te dragen.

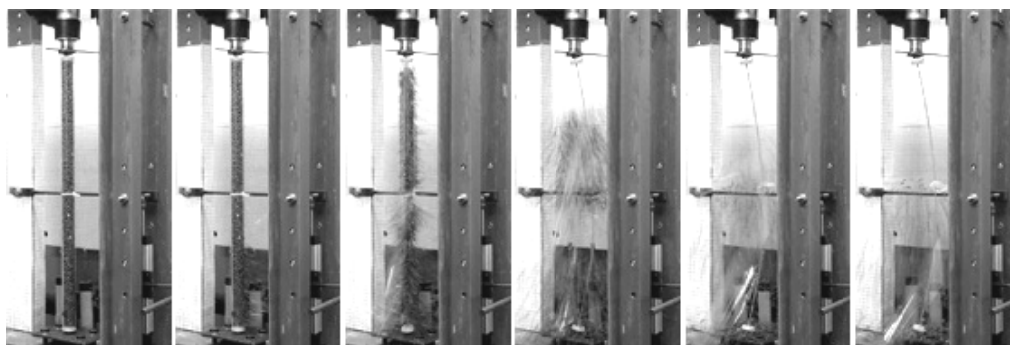
Tabel 5. 2 Overzicht van de belangrijkste gegevens van reeks GC.

| Naam | Belasting breukinitiatie (kN)        | $F_{max}$ (kN) | Restdraagvermogen (kN) | Breukpatroon onderaan | Breukpatroon bovenaan |
|------|--------------------------------------|----------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| GCI  |                                      | 4.4            |                        | lineair verticaal     | lineair verticaal     |
| GCI  | 3.1<br>(kraken, niet visueel)        | 4.1            |                        |                       | V                     |
| GCI  | 3.8<br>(breuk: lineair verticaal+ V) |                | >7.1                   | lineair verticaal + V | lineair verticaal     |



Figuur 5. 27 Vergelijk van het gedrag van reeks GC met een gecoate en ongecoate glazen knikstabilisator.

**Reeks GB** | De kolommen die volledig werden gevuld met gedroogde bonen, werden gekenmerkt door een zeer explosief gedrag bij glasbreuk. Dit impliceerde dat bij overbelasting van de kolom het glas plots brak met een regen van glasscherven en gedroogde bonen tot gevolg. De explosiviteit van de breuk viel naar alle waarschijnlijkheid te verklaren door het aantrillen van de bonen bij het vullen van de kolom. Vanwege deze actie, ontstond in de glazen buis immers een radiaal naar buitengerichte drukkracht. Wanneer ook hier weer de axiaal aangebrachte belasting aanleiding gaf tot breukinitiatie aan één van de kolomuiteinden, spatte de kolom open door de reeds aanwezige radiale drukkrachten.



Figuur 5. 28 Beeldsequentie van het explosief bezwijken van een ongecoate kolom, type GB.

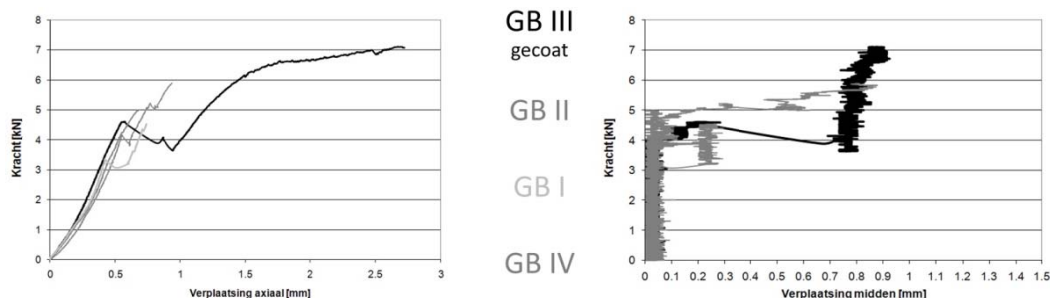
Bij de gecoate kolom ontstond tevens aan de kolomuiteinden glasbreuk. Het was echter opvallend te noemen dat de breukinitiatie plaatsvond bij hogere belastingswaarden dan bij de ongecoate kolommen. Dit effect kon niet onmiddellijk aan de coating toegeschreven worden aangezien bijvoorbeeld ook een andere pakkingsdichtheid van de bonen, als gevolg van de alternatieve triltechniek, hierop ook een belangrijke invloed zou kunnen hebben uitgeoefend.

Nadat glasbreuk ontstond, was de aan de binnen- en buitenzijde van de glazen buis aangebrachte coating wel in staat te voorkomen dat een explosief bezwijken van de kolom plaatsvond. Het eigenlijke bezwijken van de gehele kolom werd weer gekenmerkt door het lokaal uitknikken van één van de draadstanguiteinden boven een PMMA-dopje.

Er werd echter wel een belangrijke belastingsterugval genoteerd in de belastingsdiagramma voor zowel de twee ongecoate en de gecoate kolom. Deze belastingsval was niet terug te brengen naar het ontstaan van belangrijke breuken in het glas. Wel kan verwezen worden naar het plots inschuiven van slecht gemonteerde PMMA-dopjes bij het onthechten van de lijm.

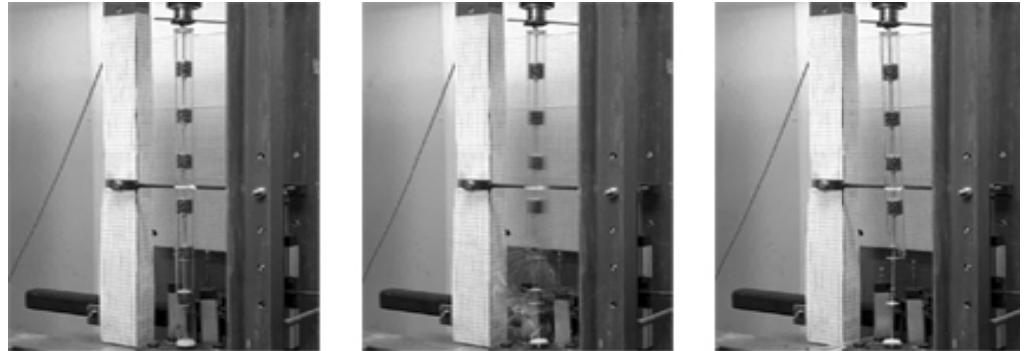
Tabel 5. 3 Overzicht van de belangrijkste gegevens van reeks GB

| Naam               | Belasting<br>breukinitiatie (kN) | $F_{max}$<br>(kN) | Restdraagvermogen<br>(kN) | Breukpatroon<br>onderaan          | Breukpatroon<br>bovenaan |
|--------------------|----------------------------------|-------------------|---------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| GBI                | 3.3                              | 4.5               |                           | explosief grote lineaire scherven |                          |
| (breuk: verticaal) |                                  |                   |                           |                                   |                          |
| GBII               |                                  | 5                 |                           | explosief grote lineaire scherven |                          |
| GRI                | 4.2                              | 5.8               |                           | explosief grote lineaire scherven |                          |
| GBIII              | 4.5                              |                   | >7.1                      | lineair verticaal +V              | uitgebreid               |
| (breuk: lineair)   |                                  |                   |                           |                                   |                          |



Figuur 5. 29 Vergelijk van het gedrag van reeks GB met een gecoate en ongecoate glazen knikstabilisator.

**Reeks GD** | De resultaten bekomen voor de twee ongecoate kolommen worden gekenmerkt door een grote spreiding van de testresultaten. De bezwijkbelasting van *GD II* lag immers niet alleen 85% hoger dan die van *GD I*, maar was tevens 10% groter dan de aan de draadstanguiteinden bezweken gecoate kolom.



Figuur 5. 30 Beeldsequentie van het explosief bezwijken van een ongecoate kolom, *type GD*.

Een verklaring werd gedacht te worden gevonden in de mate waarmee de bonen werden samengeperst.

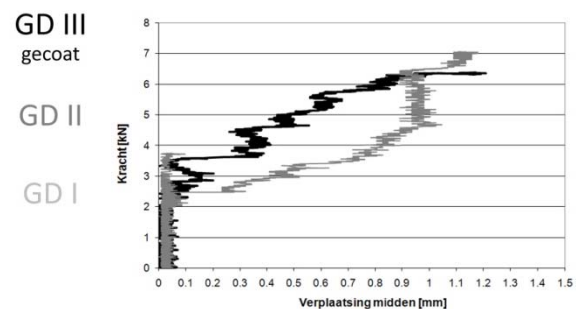
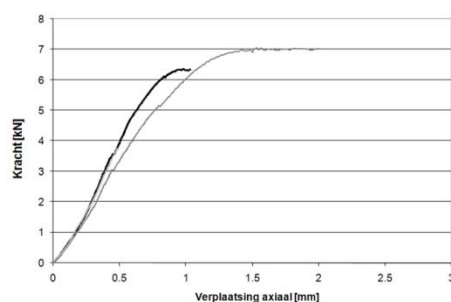
Wanneer een aan de buisuiteinden ontstane glasbreuk immers één van de afstandshouders bereikt, bood (zoals in *reeks GC*) de gebroken glaswand onvoldoende ondersteuning aan deze afstandshouder waardoor de draadstang kon uitbuigen en de kolom bezweek.

Hoe harder de bonen werden samengedrukt tussen de schijven, hoe hoger de radiale drukken in de kolom, hoe makkelijker de kolom opensplijt bij breukinitiatie en dus hoe lager de bezwijkbelasting.

De resultaten van de gecoate kolom konden bijgevolg weer als bevredigend worden beschouwd aangezien deze standhield, tot op het moment dat één van beide draadstanguiteinden bezweek.

Tabel 5. 4 Overzicht van de belangrijkste gegevens van *reeks GD*.

| Naam  | Belasting breukinitiatie<br>(kN) | $F_{max}$<br>(kN) | Restdraagvermogen<br>(kN) | breukpatroon<br>onderaan | Breukpatroon<br>bovenaan |
|-------|----------------------------------|-------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| GDI   | 3.7                              | 3.8               |                           | lineair verticaal        | lineair verticaal        |
| GDII  | 5.1                              | 7.1               |                           | lineair verticaal        | lineair verticaal        |
| GDIII | 3.4<br>(kraken, niet visueel)    |                   | >6.4                      | lineair verticaal        | V                        |



Figuur 5. 31 Vergelijk van het gedrag van *reeks GD* met een gecoate en ongecoate glazen knikstabilisator.

## 2. BEVINDINGEN

Algemeen beschouwd, kon het aanbrengen van een polymeerlaag als veiligheidsconcept op de beschouwde kolommen als een succes worden beschouwd. In alle drie de reeksen zorgde de aanwezigheid van de coating ervoor dat op een belangrijk restdraagvermogen kon worden gerekend. De bekomen resultaten lieten echter niet onmiddellijk toe dit restdraagvermogen te begroten, aangezien de kolom steeds bezweek door het vroegtijdig uitknikken van de draadstanguiteinden. Op het moment van dit lokaal bezwijken was in geen van de gevallen sprake van visuele schade aan de coating. Achterliggende glasbreuklijnen waren zelfs niet met de hand voelbaar aan het polymeeroppervlak.

Het onderscheid tussen één- en tweezijdig gecoate buizen werd niet opgemerkt in het gedrag van de buizen tijdens of na glasbreuk. Naast het vermelde coatingverschil, was er immers ook een verschil in steunconcept, wat een uitspraak over het effect van één of tweezijdige coating nog verder bemoeilijkte. Het viel te veronderstellen dat de buis die enkel aan de buitenzijde werd gecoat, eerder zou gaan bezwijken dan een buis die aan de twee zijden werd voorzien van een coating, indien hetzelfde steunconcept zou worden toegepast.

De dikte van de polymeerlaag ( $\pm 0.7\text{mm}$ ) die in de bovenstaande schaalmodellen werd gehanteerd als beschermingslaag voor de glazen knikstabilisator bedroeg ongeveer 50% van de wanddikte van de buis (1.4mm). Wanneer deze kolom zou worden uitgevoerd op werkelijke schaal, zou niet alleen de glasdikte, maar bijgevolg waarschijnlijk ook de dikte van de polymeerlaag dienen toe te nemen. Deze laatste is met de gehanteerde coatingtechniek echter beperkt tot 2-3mm, afhankelijk van het gebruikte polymeerpoeder. Daarbij komt nog een eis naar transparantie en uniformiteit van de polymeerlaag die dient vervuld te worden en die moeilijk te rijmen valt met een toenemende laagdikte.

## CONCLUSIES

### - Size does matter -

Uit deze gevalsstudie is gebleken dat het aanbrengen van transparante polymeercoatings niet alleen mogelijk is op 'Freeform Design' glasconstructies, maar dat tevens positieve resultaten zijn te verwachten met betrekking tot het veilig bezwijken van deze constructies.

Hoewel de specifieke vorm het moeilijk maakte het polymeerpoeder aan te brengen in het buislif met behulp van de *wervelsinter*-techniek, werd het ondanks de beperkte kwaliteit van de polymeerlaag toch mogelijk geacht.

Deze gecoate buizen die als knikstabilisator fungeerden voor drukproeven op enkele schaalmodellen van een hyperslanke kolom, gaven blijk van een belangrijk restdraagvermogen als gevolg van de op het glas aangebrachte coating. Bij het breken van het glas werd waargenomen dat de coating de lengte van de scheuren in het glas - zelfs bij explosieve glasbreuk - wist te beperken, waardoor de kolom niet bezweek. Het maximaal restdraagvermogen was eerder een maat voor de knikbelasting van de ongesteunde kolomuiteinden, dan voor het versterkend effect van de coating.

De resultaten bekomen voor deze schaalmodellen (schaal 1:10) zijn dan ook zonder meer positief te noemen. Het is echter belangrijk deze resultaten enigszins te nuanceren. Een polymeercoating,

aangebracht op 'Freeform Design' glasconstructies die op schaal van het gebouw (schaal 1:1) worden vervaardigd, worden immers niet alleen onderworpen aan de uitvoeringstechnische moeilijkheden van het coatingproces, maar ze dienen ook in alle omstandigheden in staat te zijn aan de veiligheidseisen te voldoen. Deze laatste vraagt bijzondere inspanningen, waarvan het nog onduidelijk is of coating deze kan leveren. Zoals hierboven werd geïllustreerd aan de hand van enkele schaalmodellen, dient een polymeerlaag voldoende dik en uniform te worden aangebracht om in geval van glasbreuk, ductiliteit van de structuur te bewerkstelligen, waarbij het belangrijk is dat ze gedurende de levensloop van de constructie deze veiligheid kan garanderen. Om aan deze eis te voldoen moet de coating duurzaam zijn en bestand zijn tegen verschillende omgevingsinvloeden waaraan ze rechtstreeks of onrechtstreeks zal worden blootgesteld. Uit de gestelde gevalstudie blijkt echter, dat indien ontwerpmatig rekening wordt gehouden met deze gevoeligheid van de coating voor externe invloedsfactoren, hiervoor een oplossing kan worden gezocht.

## HOOFDSTUK 6 SAMENVATTING & BESLUIT

*Freeform, like free love, is a highly controversial subject.*

*Architectural Forum 4/49*

### SAMENVATTING

- Retrospective -

Geïnspireerd door de transparantie en de vorm van vallende waterdruppels worden nieuwe vormen geïntroduceerd in de wereld van glas. Hierbij kan verwezen worden naar exotisch gevormde parfumflacons, voluptueuze waterflessen en zelfs naar verbeeldingstartende laboratorium instrumenten.

Wanneer het vrij vormgegeven glas wordt vertaald naar de bouwconstructies (vb. gelaste glazen buisstructuren) ontstaat er onder meer een belangrijk veiligheidsprobleem. Deze zogenaamde 'Freeform Design' glasconstructies kunnen immers niet gelamineerd worden met de traditionele adhesieve polymeertussenlagen (vb.: SentryGlas, PVB,...), aangezien het lassen van de samenstellende elementen van de 'freeform' glasconstructie onherroepelijk tot verbranding van de tussenliggende polymeerlaag (indien deze überhaupt al zou kunnen worden aangebracht) zou leiden. Vanuit deze problematiek kwam de masterproef tot stand, met als doel een geschikt veiligheidsconcept voor 'Freeform Design' glasconstructies uit te denken, uit te voeren en te beoordelen.

Al snel werd duidelijk dat dit veiligheidsconcept niet enkel het voorkomen van rondvliegende glasscherven in geval van plots bezwijken van de constructie behelsde, maar ook het bewerkstelligen van een belangrijk restdraagvermogen vooropgestelde. Als mogelijke oplossingen voor de gestelde problematiek werd er naar gezocht om één of meerdere beschermingslagen op het glasoppervlak aan te brengen, wat hoofdzakelijk leidde tot twee mogelijke opties.

Als eerste vormde de vaak op autoruiten aangebrachte *veiligheidsfilms* een bron van inspiratie. Deze thermoplastische polymeerfilms worden gekenmerkt door een zeer hoge sterkte en krasvastheid, maar leken moeilijk toepasbaar op 'Freeform Design' glas. De films worden immers als vlakke, weinig vervormbare folies aangeleverd, dus wanneer een 'freeform' glasconstructie sterke krommingen vertoont, wordt het moeilijk om deze film correct aan te brengen. Een zoeken naar de eigenlijke limiet van deze 'freeform'-toepasbaarheid maakte echter geen voorwerp uit van de masterproef.

Een alternatief voor de veiligheidsfilms, werd gevonden in de diverse coatings die als beschermlaag tegen glasbreuk worden aangebracht op glazen laboratoriummateriaal, gloeilampen en drankflessen. De gehanteerde producten worden aangebracht met de courant beschikbare applicatietechnieken die globaal onderverdeeld kunnen worden in: dampfase-depositie (vapor coating), poederlakken (powder coating) en natlakken (liquid coating). Deze laatste twee technieken worden veelal toegepast om polymeren, hetzij in poedervorm, hetzij vloeibaar op laboratoriummateriaal (labware coatings) of gloeilampen (lampcoatings) aan te brengen. De specifieke technieken die daarbij frequent worden gehanteerd zijn onder andere het *wervelsinteren*, *het spuiten*, *het borstelen* en *het dompelen*.

Dampfase-depositie, met name Chemical Vapor Deposition, maakt dan weer fundamenteel deel uit van het coatingproces van drankflessen (bottle coating). Omwille van de hoge temperaturen die zich tijdens dit proces ontwikkelen, lijkt het echter niet onmiddellijk mogelijk om deze op de beoogde glasconstructies aan te brengen.

De als veiligheidsconcept te hanteren polymeerproducten zijn even uitgebreid als divers, maar kunnen per toepassingsonderdeel worden gekenmerkt door enkele dominante polymeerfamilies. Als eerste kan voor de *lamp coatings* worden verwezen naar de fluoropolymeren (*Teflon*<sup>®</sup>). Deze hoogwaardige polymeren, laten zich kenmerken door hun uitstekende antikleef eigenschappen, waardoor het moeilijk wordt deze aan te brengen op glas zonder mechanische (zandstralen) en chemische (95% ethanol, fluorwaterstof, gedistilleerd water) voorbehandeling van het glasoppervlak. Een eerste poging om *Teflon*<sup>®</sup> op glas aan te brengen zonder de vermelde voorbehandeling, faalde dan ook.

De labware coatings kenden een veelheid aan polymeerfamilies waarvan PA, PE, PVC, E/VOH en PU waarschijnlijk de meest courante zijn en bijgevolg de basis vormen voor een aantal coatingproducten (*Abcite*<sup>®</sup>, *Levasint*<sup>®</sup>, *Vestosint*<sup>®</sup>,...). Een belangrijk voordeel van enkele van deze producten, was de beschikbaarheid van adhesiepromotoren. Deze laatste zijn in staat een positieve invloed uit te oefenen op het postdestructief gedrag van het gecoate glaselement.

Aan de hand van de bekomen product informatie en aangezien beschikt werd over de nodige *wervelsinter*-infrastructuur, was het mogelijk om zowel *Abcite*<sup>®</sup> als *Levasint*<sup>®</sup> op glazen proefstukken (borosilicaat, 230x50x2mm) aan te brengen met als doel de uitvoeringsmogelijkheden en -parameters van deze techniek te onderkennen en de invloed van de coating op (post)destructief gedrag van het glaselement te onderzoeken

Algemeen wordt het *wervelsinter*-procedé gekenmerkt door drie belangrijke procesparameters: de voorverwarmingstemperatuur, de dompeltijd of –cyclus van het werkstuk in het wervelend poederbad en de *moffel*temperatuur en -tijd. Als één van de dominante parameters van dit specifieke coatingprocedé, kan verwezen worden naar de temperatuur van het werkstuk op het moment van het dompelen.

Proefondervindelijk werd duidelijk dat deze temperatuur in belangrijke mate de coatingdikte, de uniformiteit van de coating en de mogelijke aanwezigheid van microbelletjes in de coating bepaalde. Te lage temperaturen zorgden immers voor geen of een beperkte hechting van het polymeerpoeder aan het glasoppervlak. Te hoge temperaturen gaven dan weer aanleiding tot het vormen van microbelletjes in een zeer dik aangebrachte polymeerlaag. Als gevolg hiervan diende voor deze glaselementen en het gebruikte polymeerproduct de ideale voorverwarmingstemperatuur te worden bepaald die voor *Levasint*<sup>®</sup> 195°C was en voor *Abcite*<sup>®</sup> 190°C<sup>1</sup> bedroeg. Enkel indien goede temperatuurscontrole werd gerealiseerd, kon de dompeltijd/dompelcyclus als bepalende factor optreden voor de uiteindelijke coatingdikte. Als laatste processtap werden de in polymeerpoeder ondergedompelde glaselementen in de oven naverwarmd om een egale en uniforme polymeerlaag te bekomen (*moffelen*). Tijdens het *moffelen* diende de oventemperatuur voor voldoende lange tijd voldoende hoog te zijn. Te lange en te hoge *moffel*temperaturen resulteerden echter wel in een bruine verkleuring (verbranden) van de coating, terwijl te lage temperaturen zorgden voor beperkt vloeien van de coating met een oneffen transluscent oppervlak tot gevolg. Het bleek echter moeilijk te zijn een specifieke *moffel*temperatuur en -tijd voor elk polymeerproduct vast te leggen, aangezien de oven tijdens het dompelen afkoelde en bijgevolg tijdens bij het *moffelen* eerst op temperatuur moest worden gebracht; nooit werd daarbij echter een maximale oventemperatuur van 210°C overschreden.

---

<sup>1</sup> Voor *Teflon*<sup>®</sup> kon de *wervelsinter*-techniek niet met succes worden toegepast, vandaar dat geen ideale voorverwarmingstemperatuur werd vermeld voor dit product.

Het werd tevens mogelijk geacht meerdere polymeerlagen boven elkaar aan te brengen, wat toeliet een zeer dikke en tevens uniforme coating te bekomen.

Algemeen kon het aanbrengen van zowel *Levasint*® als *Abcite*® door middel van het *wervelsinter*-procedé als succesvol worden beschouwd. Het *wervelsinter*-proces liet toe, mits een goede procescontrole, beide polymeerproducten uniform en transparant op het glas aan te brengen.

Aangezien zowel *Levasint*® als *Abcite*® met succes werden aangebracht op de vlakke glazen plaatjes, was het mogelijk deze gecoate plaatjes te onderwerpen aan een vervormingsgestuurde vierpuntsbuigproef om de zwakke as. Deze proeven lieten een eerste kwalitatieve evaluatie van de polymeerproducten toe, met betrekking tot hun invloed op het (post)destructief gedrag van de glazen plaatjes. De resultaten van deze testen toonden, als gevolg van de aanwezigheid van de coating op het glasoppervlak, een verhoogde breukweerstand van het glas. Deze verhoogde breukweerstand werd bij beide producten waargenomen, hoewel deze voor *Levasint*® (x1.5) iets hoger was dan voor *Abcite*® (x1.3). Na glasbreuk waren voor beide producten de polymeerlagen steeds intact; slechts bij belangrijke vervormingen begonnen deze langzaam door te scheuren in de trekzone.

Het resulterende restdraagvermogen was echter vrij beperkt in verhouding tot de breukbelasting van het vlak glazen plaatjes. Dit deed vermoeden dat veel hogere polymeerdiktes nodig zijn, wil een restdraagvermogen van enig belang worden gegenereerd bij deze aan buiging om de zwakke as onderworpen glasplaatjes.

Als eerste veiligheidstoepassing van coatings op 'Feeform Design' glasconstructies, werden in samenwerking met *Sofie Van Goethem*, drie schaalmodellen van de voor haar masterproef ontwikkelde hyperslanke kolom, voorzien van een gecoate glazen knikstabilisatoren (650mmx32mmx1.4mm). De knikstabilisatoren samen met de drie types afstandhouders, dienden te voorkomen dat een stalen kolom die werd berekend op basis van vloeien van de dwarsdoorsnede onder invloed van axiale druk uitknikte. De *Levasint*®coating had bijgevolg tot doel er voor te zorgen dat bij overbelasting van de knikstabilisator, de gehele kolom niet onmiddellijk zou bezwijken.

Zowel de genomen ontwerpbeslissingen voor de afstandhouders als de specifieke vorm van de glazen kolom, geboden enkele uitvoeringstechnische details te wijzigen tijdens het coatingproces. De verschillende types aan afstandhouders zorgden er voor dat één glazen buis enkel aan de buitenzijde diende te worden gecoat, terwijl de andere twee buizen zowel langs binnen als buiten moesten worden voorzien van een polymeerlaag. Vooral deze laatste twee kolommen vormde een uitdaging tijdens het *wervelsinter*-proces, aangezien het moeilijk was de coating aan de binnenzijde van het buislif uniform aan te brengen, wat zich vertaalde in een verminderde transparantie van glazen element.

Tijdens de proeven van de aan axiale druk onderworpen schaalmodel, bleek de *Levasint*®-coating een positief effect te hebben op het bezwijkgedrag van de kolom. Er werden immers niet alleen rondvliegden glasscherven vermeden, ook het draagvermogen van de gehele kolom bleef bewaard na glasbreuk. De aangebrachte coating bleek daarbij zo sterk dat de kolom bezweek door lokaal het uitknikken van de ongesteunde draadstanguiteinden, eerder dan bezwijken van de gecoate knikstabilisator.

Naast deze gerealiseerde veiligheidseis, werden nog enkele belangrijke parameters onder de loep genomen waaraan deze coating dient te voldoen. Aangezien ze wordt aangebracht op het

glasoppervlak, wordt een dergelijke coating immers gedurende lange periode blootgesteld aan verschillende omgevingsinvloeden. Onder deze omstandigheden mogen de polymeercoatings geenszins degraderen, om als veiligheidsconcept algemeen toepasbaar te zijn. De voornaamste zwakheden die bij dergelijke polymeercoatings ter sprake kwamen, waren de gering UV-bestendigheid, en beperkte krasvastheid. Deze pijnpunten zouden echter in belangrijke mate worden verminderd, wanneer de coating ook degelijk aan de binnenkant van de glazen buis zou kunnen worden aangebracht.

## BESLUIT

- Every end is a new beginning -

In het verloop van deze masterproef werd een algemeen beeld geschetst van enkele mogelijke veiligheidsoplossingen voor 'Freeform Design' glasconstructies. De nadruk werd hierbij gelegd op het aanbrengen van diverse polymeercoatings op het glasoppervlak. De verschillende beschikbare technieken en producten laten immers niet alleen toe de naar vormvrijheid gestelde eisen te beantwoorden, maar ook op zoek te gaan naar de geschikte producten in functie van de specifieke esthetische overwegingen, veiligheidseisen, ontwerpmatige randvoorwaarden, ... Het effectief aanbrengen van enkele van deze producten op het glasoppervlak liet toe het potentieel, de specifieke aandachtspunten en zelfs de mogelijke pijnpunten van deze veiligheidsfilosofie aan het licht te brengen.

De *wervelsinter*-techniek waarmee zowel *Abcite*® als *Levasint*® werd aangebracht, liet toe een vrij uniforme en dikke polymeerlagen op een zowel vlak als sterk gebogen glasoppervlak te bekomen. Bijzondere aandacht voor de uitvoeringsparameters is daarbij van fundamenteel belang gebleken, wil de hoge kwaliteit van de coating gegarandeerd worden. Als omwille van de specifieke vorm (vb.: holtes) van de glasconstructie, het wervelen van het polymeerpoeder op bepaalde plaatsten echter onmogelijk wordt, wordt het moeilijk om bij manuele manipulatie van het werkstuk, een uniforme en esthetische coating te bekomen.

Hoewel afwijkingen van de procesparameters tijdens het coaten een weerklank zouden kunnen hebben op de performantie van de coating bij glasbreuk, werd bij de uitgevoerde destructieve testen op deze gecoate elementen steeds een niet te onderschatten invloed van de coating op het (post)destructief gedrag waargenomen. Niet alleen vermeerde de aanwezige polymeercoating vallende scherven vermeden, ook was er steeds sprake van een -in meer of mindere mate- belangrijk restdraagvermogen. De eerste resultaten van deze gecoate proefstukken met beperkte afmetingen kunnen bijgevolg als succesvol en op zijn minst hoopgevend worden beschreven. Het spreekt echter vanzelf dat de bevindingen en gegevens bekomen tijdens de realisatie van deze masterproef maar een opstap vormen naar een mogelijk veel uitgebreider en diepgaander onderzoek, waarbij niet alleen een schaalvergroting, maar tevens een nauwe samenwerking met de industrie noodzakelijk worden geacht. Beide vormen immers een kritiek punt voor polymeercoatings wanneer ze in de toekomst als veiligheidsconcept willen worden ingezet.

De gesuggereerde schaalvergroting zou inzicht kunnen bieden in de haalbaarheid van dit veiligheidsconcept op de schaal van bouwconstructies. Deze schaalvergroting geeft immers naar alle waarschijnlijkheid aanleiding tot algemeen toenemende coatingdiktes. Als dit inderdaad het geval is, dient onderzocht te worden of voldoende dikke coatings kunnen worden aangebracht met de bestaande coatingtechnieken en of dit verzoenbaar is met de vooropgestelde transparantie. Het

spreekt vanzelf dat een nauwe samenwerking met de industrie noodzakelijk is om een coating van hoge kwaliteit op grootschalige elementen te kunnen aanbrengen.

Tijdens de ontwikkeling van dit veiligheidsconcept werden slecht drie producten uit een uitgebreid gamma van coatingproducten aangebracht. Aangezien dit niet steeds met het verhoopte succes gebeurde of omdat sommige van deze producten niet meer beschikbaar zijn, wordt het belangrijk geacht verregaand en gestructureerd onderzoek uit te voeren naar de meest geschikte polymeerproducten voor beschouwde toepassing, waarbij tevens de invloed van eventuele adhesiepromotoren niet over het hoofd mag worden gezien. Het is hierbij van belang dat geen te eng eisenpakket aan de potentiële polymeerproducten wordt opgelegd. Naast de te vervullen veiligheidseisen vormen duurzaamheid en eventuele reparatiemogelijkheid van de coating immers niet te verwaarlozen parameters.

Hoewel deze masterproef de nadruk legde op coatings, mogen de vermelde *Veiligheidsfilms* niet uit het oog worden verloren. Gekenmerkt door hun krasvaste toplaag en goede mechanische eigenschappen, maar ook een eerder beperkte 'freeform'-toepasbaarheid lijkt het interessant naast de verificatie van hun kwaliteiten als veiligheidsconcept, ook onderzoek te voeren naar hoe ver kan worden gegaan met de vormvrijheid van de glasconstructie vooraleer de betreffende films hun limiet bereiken.

# BIJLAGEN

BIJLAGE A

- Productinformatie -

BIJLAGE B

- Coaten vlakglas -

BIJLAGE C

- Testen vlakglas -

BIJLAGE D

- Buizen afmetingen -

## BIJLAGE A PRODUCTINFORMATIE

VEILIGHEIDSFILMS

- Tabel -

|                              |               |                   |                             |            |
|------------------------------|---------------|-------------------|-----------------------------|------------|
| Algemeen                     |               |                   |                             |            |
| Naam                         | Hostaphan® GN | Teijin® Teton®    | Teijin® Teonex®             | Armorcoat® |
| Fabrikant                    | Mitsubishi    | Dupont            | Dupont                      | Bekaert    |
| Beschrijving                 | PET           | PET               | PEN                         | PET        |
| Materiaaleig.                |               |                   |                             |            |
| Thermisch eigenschappen      |               |                   |                             |            |
| Smeltpunt °C                 |               | 258               | 269                         | 260        |
| Constante werktemperatuur °C |               | 105               | 160                         |            |
| Mechanische eigenschappen    |               |                   |                             |            |
| E-modulus 23°C (Mpa)         | 3900 _ 4900   |                   | 1220                        |            |
| Breukspanning (Mpa)          | 175 _ 230     | 190 _ 250         | 250 _ 270                   | 200        |
| breuk-rek (%)                | 120 _ 190     | 130 _ 200         | 100 _ 110                   | 170        |
| Hardheid D                   |               |                   |                             |            |
| Chemische eigenschappen      |               |                   |                             |            |
| Chemische Weerstand          | excellent     | excellent         | excellent                   | excellent  |
| Optische eigenschappen       |               |                   |                             |            |
| Transparantie                | 91%           | super transparant | 87% zichtb licht (JIS 7361) | 82%        |
| Coating eigenschappen        |               |                   |                             |            |
| Gem. dikte (µm)              | 50_ 250       | 50_ 188           |                             | 100_ 350   |
| Adhesie                      | excellent     | excellent         | excellent                   | excellent  |
| Technieken                   |               |                   |                             |            |
| Squeegee                     | x             | x                 | x                           | x          |

# BIJLAGE A PRODUCTINFORMATIE

LAMP COATINGS

- Tabellen -

| Algemeen                       |                                                           |  |                         |              |                       |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------------|--|-------------------------|--------------|-----------------------|
| Naam                           | Teflon® FEP                                               |  | Teflon® FEP 106N        | Neoflon® FEP | FEP                   |
| Fabrikant                      | DuPont de Nemours                                         |  | Dupont de Nemours       | Daikin       |                       |
| Beschrijving                   | copolymeer van tetrafluoroethyleen en hexafluoropropyleen |  |                         |              | gemiddelde            |
| Materiaaleig.                  |                                                           |  |                         |              |                       |
| Thermische eigenschappen       |                                                           |  |                         |              |                       |
| Smeltpunt °C                   | 260 _ 280 (ASTM D-3418(DTA))                              |  | 255 (ASTM-D4591 /D3418) |              | 265                   |
| Constante werktemperatuur (°C) | (- 240) 205                                               |  | 205                     |              | 203                   |
| Mechanische eigenschappen      |                                                           |  |                         |              |                       |
| E-modulus 23°C (Mpa)           | 480 (ASTM-D882)                                           |  | 655 (ISO 178)           |              | 539 _ 637 (ASTM-D790) |
| Breuksterkte (Mpa)             | 21 (ASTM-D882)                                            |  | 20 (ISO 12086)          |              | 19 _ 22 (ASTM-D638)   |
| breuk-rek (%)                  | 300 (ASTM-D882)                                           |  | 300 (ISO 12086)         |              | 250 _ 330 (ASTM-D638) |
| Hardheid D                     |                                                           |  | 55 (ISO 868)            |              | 55                    |
| Chemische eigenschappen        |                                                           |  |                         |              |                       |
| Chemische Weerstand            | excellent                                                 |  | excellent (ASTM-D543)   |              | excellent             |
| Optische eigenschappen         |                                                           |  |                         |              |                       |
| Transparantie                  | transparant                                               |  | transparant             |              | transparant           |
| Coating eigenschappen          |                                                           |  |                         |              |                       |
| Gem. coatingdikte (µm)         | 0,2_0,3                                                   |  | 0,2_0,3                 |              | 0,2_0,3               |
| Adhesie                        | beperkt                                                   |  | beperkt                 |              | beperkt               |
| Technieken                     |                                                           |  |                         |              |                       |
| Poederlakken                   |                                                           |  |                         |              |                       |
| Wervelsinteren                 |                                                           |  |                         |              |                       |
| Elektrostatisch poederspuiten  | x                                                         |  | x                       |              | x                     |
| Vlamspuiten                    |                                                           |  |                         |              |                       |
| Natlakken                      |                                                           |  |                         |              |                       |
| Dompelen                       |                                                           |  |                         |              |                       |
| Spuiten                        |                                                           |  |                         |              |                       |
| Rollen/borstelen               |                                                           |  |                         |              |                       |
| Dampfase depositie             |                                                           |  |                         |              |                       |
| CVD coating                    |                                                           |  |                         |              |                       |
| PVD coating                    |                                                           |  |                         |              |                       |

| Algemeen                      |                                                                 |  |                          |                          |                    |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--|--------------------------|--------------------------|--------------------|
| Naam                          | Teflon® PFA                                                     |  | Hyflon® PFA              | Neoflon® PFA SH          | PFA                |
| Fabrikant                     | DuPont de Nemours                                               |  | Solvay Solexis           | Daikin                   |                    |
| Beschrijving                  | copolymeer van tetrafluoroethyleen en perfluoroalkylvinylethers |  |                          |                          | gemiddelde         |
| Materiaaleig.                 |                                                                 |  |                          |                          |                    |
| Thermische eigenschappen      |                                                                 |  |                          |                          |                    |
| Smeltpunt °C                  | 302 _ 310 (ASTM-D3418 (DTA))                                    |  | 300 _ 310 (ASTM-D3307)   | 302 _ 310                | 306                |
| Cte werkt temperatuur (°C)    | (-240 )260                                                      |  | 250                      | 260                      | 257                |
| Mechanische eigenschappen     |                                                                 |  |                          |                          |                    |
| E-modulus 23°C (Mpa)          | 480 (ASTM-D882)                                                 |  | 500 _ 600                | 647 _ 686 (ASTM D790)    | 590                |
| Breuksterkte (Mpa)            | 21 (ASTM-D882)                                                  |  | 28 _ 32                  | 27 _ 35 (ASTM D638)      | 27                 |
| breuk-rek (%)                 | 300 (ASTM-D882)                                                 |  | 310 _ 360                | 280 _ 400 (ASTM D638)    | 325                |
| Hardheid D                    |                                                                 |  | 55 _ 60                  | 60                       | 58                 |
| Chemische eigenschappen       |                                                                 |  |                          |                          |                    |
| Chemische Weerstand           | excellent                                                       |  | excellent                | excellent                | excellent          |
| Optische eigenschappen        |                                                                 |  |                          |                          |                    |
| Transparantie                 | transparant_transluscent                                        |  | transparant_transluscent | transparant_transluscent | transpar.translusc |
| Coating eigenschappen         |                                                                 |  |                          |                          |                    |
| Gem. coatingdikte (µm)        | 0,2_0,3                                                         |  | 0,2_0,3                  | 0,2_0,3                  | 0,2_0,4            |
| Adhesie                       | beperkt                                                         |  | beperkt                  | beperkt                  | beperkt            |
| Technieken                    |                                                                 |  |                          |                          |                    |
| Poederlakken                  |                                                                 |  |                          |                          |                    |
| Wervelsinteren                |                                                                 |  |                          |                          |                    |
| Elektrostatisch poederspuiten | x                                                               |  | x                        | x                        | x                  |
| Vlamspuiten                   |                                                                 |  |                          |                          |                    |
| Natlakken                     |                                                                 |  |                          |                          |                    |
| Dompelen                      |                                                                 |  |                          |                          |                    |
| Spuiten                       |                                                                 |  |                          |                          |                    |
| Rollen/borstelen              |                                                                 |  |                          |                          |                    |
| Dampfase depositie            |                                                                 |  |                          |                          |                    |
| CVD coating                   |                                                                 |  |                          |                          |                    |
| PVD coating                   |                                                                 |  |                          |                          |                    |

| Algemeen      | MFA                            |             |                     |
|---------------|--------------------------------|-------------|---------------------|
|               | Naam                           | FEP         | PFA                 |
| Materiaaleig. | Fabrikant                      |             |                     |
|               | Beschrijving                   |             |                     |
|               | Thermische eigenschappen       |             |                     |
|               | Smeltpunt °C                   | 265         | 306                 |
|               | Constante werktemperatuur (°C) | 203         | 257                 |
|               | Mechanische eigenschappen      |             |                     |
|               | E-modulus 23°C (Mpa)           | 575         | 590                 |
|               | Breuksterkte (Mpa)             | 21          | 27                  |
|               | breuk-rek (%)                  | 297         | 325                 |
|               | Hardheid D                     | 55          | 58                  |
| Technieken    | Chemische eigenschappen        |             |                     |
|               | Chemische weerstand            | excellent   | excellent           |
|               | Optische eigenschappen         |             |                     |
|               | Transparantie                  | transparant | transpar._translusc |
|               | Coating eigenschappen          |             |                     |
|               | Gem. coatingdikte (µm)         | 0,2_0,3     | 0,2_0,3             |
|               | Adhesie                        | beperkt     | beperkt             |
|               | Poederlakken                   |             |                     |
|               | Wervelsinteren                 |             |                     |
|               | Elektrostatisch poederspuiten  | x           | x                   |
|               | Vlamspuiten                    |             |                     |
|               | Natlakken                      |             |                     |
|               | Dip coating                    |             |                     |
|               | Spray coating                  |             |                     |
|               | Rollen/borstelen               |             |                     |
|               | Dampfase depositie             |             |                     |
|               | CVD coating                    |             |                     |
|               | PVD coating                    |             |                     |
|               |                                |             |                     |
|               |                                |             |                     |

BIJLAGE A

PRODUCTINFORMATIE

LABWARE COATINGS

- Tabellen -

|                                  |                                |                                |                             |                      |
|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|----------------------|
| <b>Algemeen</b>                  | Naam                           | Levasint® S31                  | Abcite® 585/Surlin® 8670 FP | Vestosint® 1111      |
|                                  | Fabrikant                      | in het verleden: Bayer         | DuPont de Nemours           | Evonik/Degussa       |
|                                  | Beschrijving                   | ethyleen vinyl alc. copolymeer | ethyleen acid copolymeer    | polyamide 12 (Nylon) |
|                                  | <b>Materiaaleig.</b>           |                                |                             |                      |
| <b>Thermische eigenschappen</b>  |                                |                                |                             |                      |
|                                  | Smeltpunt °C                   | 105_108 (ASTM-D2117)           | 100 (ASTM-D3418)            | 176 (ISO 3146)       |
|                                  | Constante werktemperatuur (°C) |                                | 70                          |                      |
| <b>Mechanische eigenschappen</b> |                                |                                |                             |                      |
|                                  | E-modulus 23°C (Mpa)           | 500 (ASTM-D638)                | 159 (ASTM-D790)             | 700 (= σvl / εvl)    |
|                                  | Breuksterkte (Mpa)             | 13 (ASTM-D638)                 | 23 (ASTM-D638)              | 49 ( ISO 527-1/2)    |
|                                  | breuk-rek (%)                  | 70_300 (ASTM-D638)             | 494 (ASTM-D638)             | 311 (ISO 527-1/2)    |
|                                  | Hardheid D                     | 58 (ASTM-D2240)                | 60                          | 75 (ISO 868)         |
| <b>Chemische eigenschappen</b>   |                                |                                |                             |                      |
|                                  | Chemische Weerstand            | excellent                      | excellent                   | excellent            |
| <b>Optische eigenschappen</b>    |                                |                                |                             |                      |
|                                  | Transparantie                  | transparant                    | transparant                 | transluscent         |
| <b>Coating eigenschappen</b>     |                                |                                |                             |                      |
|                                  | Gem. coatingdikte (µm)         | 300_600                        | 300_600                     | 350_2000             |
|                                  | Adhesie                        | geen adhesiepromotor nodig     | geen adhesiepromotor nodig  | hybr. polym. primer  |
| <b>Technieken</b>                | <b>Poederlakken</b>            |                                |                             |                      |
|                                  | Wervelsinteren                 | x                              | x                           | x                    |
|                                  | Elektrostatisch poederspuiten  | x                              | x                           |                      |
|                                  | Vlamspuiten                    | x                              |                             | x                    |
|                                  | <b>Natlakken</b>               |                                |                             |                      |
|                                  | Dompelen                       |                                |                             |                      |
|                                  | Spuiten                        |                                |                             |                      |
|                                  | Rollen/borstelen               |                                |                             |                      |
|                                  | <b>Dampfase depositie</b>      |                                |                             |                      |
|                                  | CVD coating                    |                                |                             |                      |
|                                  | PVD coating                    |                                |                             |                      |

| Algemeen                       |                    |  |                    |                      |  |
|--------------------------------|--------------------|--|--------------------|----------------------|--|
| Naam                           | Vitroguard 12      |  | Glaze -Tech        | Opalfilm®            |  |
| Fabrikant                      | Plascoat           |  | Thortex            | Haverkamp            |  |
| Beschrijving                   | polyalkenen        |  | polyurethaan       | polyester            |  |
| Materiaaleig.                  |                    |  |                    |                      |  |
| Thermische eigenschappen       |                    |  |                    |                      |  |
| Smeltpunt °C                   | 90                 |  | 90                 |                      |  |
| Constante werktemperatuur (°C) |                    |  |                    |                      |  |
| Mechanische eigenschappen      |                    |  |                    |                      |  |
| E-modulus 23°C (Mpa)           | 17 (ISO 527)       |  | 21 (ASTM D412)     | 41.4 (DIN 53455-7-3) |  |
| Breuksterkte (Mpa)             | 450 (ISO 527)      |  | 200 (ASTM D412)    | 306 (DIN 53455-7-3)  |  |
| breuk-rek (%)                  | 46                 |  |                    |                      |  |
| Hardheid D                     |                    |  |                    |                      |  |
| Chemische eigenschappen        |                    |  |                    |                      |  |
| Chemische weerstand            | goed/zwak          |  |                    |                      |  |
| Optische eigenschappen         |                    |  |                    |                      |  |
| Transparantie                  | transparant        |  | transparant        | transparant          |  |
| Coating eigenschappen          |                    |  |                    |                      |  |
| Gem. coatingdikte (µm)         | 300_750            |  | 150_250            | 300                  |  |
| Adhesie                        | gereinigd glasopp. |  | gereinigd glasopp. | gereinigd glasopp.   |  |
| Technieken                     |                    |  |                    |                      |  |
| Poederlakken                   |                    |  |                    |                      |  |
| Wervelsinteren                 | x                  |  |                    |                      |  |
| Elektrostatisch poederspuiten  |                    |  |                    |                      |  |
| Vlamspuiten                    |                    |  |                    |                      |  |
| Natlakken                      |                    |  |                    |                      |  |
| Dompelen                       |                    |  |                    |                      |  |
| Spuiten                        |                    |  |                    |                      |  |
| Rollen/borstelen               |                    |  | x                  | x                    |  |
| Dampfase Depositie             |                    |  |                    |                      |  |
| CVD coating                    |                    |  |                    |                      |  |
| PVD coating                    |                    |  |                    |                      |  |

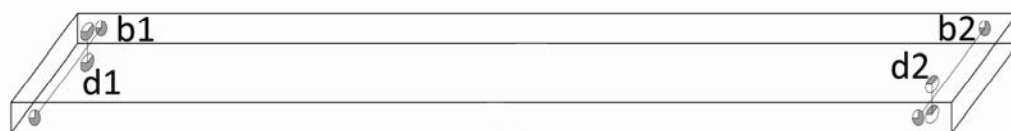
| Algemeen                        |                         |  |                  |                            |
|---------------------------------|-------------------------|--|------------------|----------------------------|
| Naam                            | Glas-lok® GLS           |  | Plasti-dip®      | Decothane Clearglaze       |
| Fabrikant                       | Innotek                 |  | Performix        | Liquid Plastics            |
| Beschrijving                    | polyethyleen copolymeer |  |                  | polycarbonaat polyurethaan |
| Materiaaleig.                   |                         |  |                  |                            |
| Thermische eigenschappen        |                         |  |                  |                            |
| Smeltpunt °C                    |                         |  |                  |                            |
| Constante werkteemperatuur (°C) |                         |  | (-35) _ 95       | 80                         |
| Mechanische eigenschappen       |                         |  |                  |                            |
| E-modulus 23°C (Mpa)            | 15,2 (ASTM D 638)       |  | 25,7(ASTM D638)  | 25 (TB 385 DCG)            |
| Breuksterkte (Mpa)              | 305 (ASTM D 638)        |  | 430( ASTM D 638) | 250 (TB 385 DCG)           |
| breuk-rek (%)                   |                         |  |                  |                            |
| Hardheid D                      | 50 (ASTM D2240)         |  |                  |                            |
| Chemische eigenschappen         |                         |  |                  |                            |
| Chemische Weerstand             |                         |  |                  |                            |
| Optische eigenschappen          |                         |  |                  |                            |
| Transparantie                   | transparant             |  |                  | transparant                |
| Coating eigenschappen           |                         |  |                  |                            |
| Gem. coatingdikte (µm)          | 203 _ 253               |  |                  | 300 _ 600                  |
| Adhesie                         | gereinigd glasopp.      |  |                  | gereinigd glasopp.         |
| Technieken                      |                         |  |                  |                            |
| Poederlakken                    |                         |  |                  |                            |
| Wervelsinteren                  | x                       |  |                  |                            |
| Elektrostatisch poederspuiten   | x                       |  |                  |                            |
| Vlamspuiten                     |                         |  |                  |                            |
| Natlakken                       |                         |  |                  |                            |
| Dompelen                        |                         |  | x                |                            |
| Spuiten                         |                         |  | x                | x                          |
| Rollen/borstelen                |                         |  | x                | x                          |
| Dampfase depositie              |                         |  |                  |                            |
| CVD coating                     |                         |  |                  |                            |
| PVD coating                     |                         |  |                  |                            |

## BIJLAGE B

## COATEN VLAKGLAS

TEST CASE

- afmetingen -



| Naam           | Glastype   | b 1<br>(mm) | b 2<br>(mm) | d1<br>(mm) | d2<br>(mm) | Gem. Dikte (mm) | Gem. breedte (mm) |
|----------------|------------|-------------|-------------|------------|------------|-----------------|-------------------|
| <b>BDC.003</b> | Natronkalk | 48.52       | 49.82       | 5.86       | 5.86       | 5.86            | 49.17             |
| <b>BDC.004</b> | Natronkalk | 50.52       | 49.50       | 5.85       | 5.85       | 5.85            | 50.01             |
| <b>BDC.005</b> | Natronkalk | 52.18       | 53.24       | 5.86       | 5.86       | 5.86            | 52.71             |
| <b>BDC.006</b> | Natronkalk | 46.98       | 46.02       | 5.86       | 5.86       | 5.86            | 46.5              |
| <b>BDC.007</b> | Natronkalk | 47.72       | 47.56       | 5.86       | 5.85       | 5.86            | 47.64             |
| <b>BDC.008</b> | Natronkalk | 47.66       | 47.58       | 5.86       | 5.85       | 5.86            | 47.62             |
| <b>BDC.009</b> | Natronkalk | 47.98       | 46.56       | 5.86       | 5.87       | 5.87            | 47.27             |
| <b>BDC.010</b> | Natronkalk | 52.32       | 52.46       | 5.86       | 5.87       | 5.87            | 52.39             |
| <b>BDC.011</b> | Natronkalk | 50.12       | 50.60       | 5.86       | 5.86       | 5.86            | 50.36             |
| <b>BDC.012</b> | Natronkalk | 48.20       | 49.78       | 5.86       | 5.86       | 5.86            | 48.99             |
| <b>BDC.013</b> | Natronkalk | 50.82       | 51.24       | 2.91       | 2.91       | 2.91            | 51.03             |
| <b>BDC.014</b> | Natronkalk | 50.48       | 51.08       | 2.91       | 2.91       | 2.91            | 50.78             |
| <b>BDC.015</b> | Natronkalk | 52.40       | 52.14       | 2.91       | 2.91       | 2.91            | 52.27             |
| <b>BDC.016</b> | Natronkalk | 47.30       | 47.92       | 2.90       | 2.90       | 2.90            | 47.61             |
| <b>BDC.017</b> | Natronkalk | 52.76       | 52.14       | 2.91       | 2.90       | 2.91            | 52.45             |
| <b>BDC.018</b> | Natronkalk | 47.62       | 47.02       | 2.91       | 2.90       | 2.91            | 47.32             |
| <b>BDC.019</b> | Natronkalk | 46.14       | 46.58       | 2.91       | 2.91       | 2.91            | 46.36             |
| <b>BDC.020</b> | Natronkalk | 46.28       | 45.62       | 2.90       | 2.90       | 2.90            | 45.95             |

| Naam           | Treksterkte<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | Treksterkte<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | Overspanning<br>(mm) | Bezwijkbelasting<br>4puntsbuigproef (N) | Bezwijkbelasting<br>4puntsbuigproef (N) |
|----------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
|                | MIN                                 | MAX                                 |                      | MIN                                     | MAX                                     |
| <b>BDC.003</b> | 30                                  | 120                                 | 120                  | 375.22                                  | 1500.87                                 |
| <b>BDC.004</b> | 30                                  | 120                                 | 120                  | 380.33                                  | 1521.30                                 |
| <b>BDC.005</b> | 30                                  | 120                                 | 120                  | 402.23                                  | 1608.92                                 |
| <b>BDC.006</b> | 30                                  | 120                                 | 120                  | 354.84                                  | 1419.37                                 |
| <b>BDC.007</b> | 30                                  | 120                                 | 120                  | 362.92                                  | 1451.69                                 |
| <b>BDC.008</b> | 30                                  | 120                                 | 120                  | 362.77                                  | 1451.08                                 |
| <b>BDC.009</b> | 30                                  | 120                                 | 120                  | 361.33                                  | 1445.34                                 |
| <b>BDC.010</b> | 30                                  | 120                                 | 120                  | 400.47                                  | 1601.89                                 |
| <b>BDC.011</b> | 30                                  | 120                                 | 120                  | 384.30                                  | 1537.19                                 |
| <b>BDC.012</b> | 30                                  | 120                                 | 120                  | 373.84                                  | 1495.38                                 |
| <b>BDC.013</b> | 30                                  | 120                                 | 120                  | 96.03                                   | 384.11                                  |
| <b>BDC.014</b> | 30                                  | 120                                 | 120                  | 95.56                                   | 382.23                                  |
| <b>BDC.015</b> | 30                                  | 120                                 | 120                  | 98.36                                   | 393.45                                  |
| <b>BDC.016</b> | 30                                  | 120                                 | 120                  | 88.98                                   | 355.91                                  |
| <b>BDC.017</b> | 30                                  | 120                                 | 120                  | 98.36                                   | 393.44                                  |
| <b>BDC.018</b> | 30                                  | 120                                 | 120                  | 88.74                                   | 354.96                                  |
| <b>BDC.019</b> | 30                                  | 120                                 | 120                  | 87.24                                   | 348.96                                  |
| <b>BDC.020</b> | 30                                  | 120                                 | 120                  | 85.88                                   | 343.50                                  |

## BIJLAGE B

## COATEN VLAKGLAS

TEST CASE

- Coatingproces -

| <b>Naam</b>    | <b>Coating</b>  | <b>T-verl. in oven (°C)</b> | <b>Tijd in oven (min)</b> | <b># opeenvolgende coatings</b> |
|----------------|-----------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| <b>BDC.001</b> | <i>Levasint</i> | 134->207                    | 52                        | 6                               |
| <b>BDC.002</b> | <i>Levasint</i> | 134->208                    | 52                        | 6                               |
| <b>BDC.003</b> | <i>Levasint</i> | 134 -> 235 (6°C/min)        | 17                        | 6                               |
| <b>BDC.004</b> | <i>Levasint</i> | 130 -> 207 (13°C/min)       | 6                         | 8                               |
| <b>BDC.005</b> | <i>Levasint</i> | 134 -> 235 (6°C/min)        | 17                        | 2                               |
| <b>BDC.006</b> | <i>Levasint</i> | 134 -> 235 (6°C/min)        | 17                        | 6                               |
| <b>BDC.007</b> | <i>Levasint</i> | 134 -> 235 (6°C/min)        | 17                        | 6+6 EXTRA                       |
| <b>BDC.008</b> | <i>Levasint</i> | 130 -> 207 (13°C/min)       | 6                         | 8                               |
| <b>BDC.009</b> | <i>Levasint</i> | 134 -> 207 (13°C/min)       | 17                        | 6+6 EXTRA                       |
| <b>BDC.010</b> | <i>Levasint</i> | 134 -> 235 (6°C/min)        | 17                        | 4                               |
| <b>BDC.011</b> | <i>Levasint</i> | 134-> 235 (6°C/min)         | 17                        | 6+ 6 EXTRA                      |
| <b>BDC.012</b> | <i>Levasint</i> | 130 -> 207 (13°C/min)       | 6                         | 8                               |
| <b>BDC.013</b> | <i>Levasint</i> | 134 -> 235 (6°C/min)        | 17                        | 4                               |
| <b>BDC.014</b> | <i>Levasint</i> | 134 -> 235 (6°C/min)        | 17                        | 6                               |
| <b>BDC.015</b> | <i>Levasint</i> | 134 -> 235 (6°C/min)        | 17                        | 6                               |
| <b>BDC.016</b> | <i>Levasint</i> | 134 -> 235 (6°C/min)        | 17                        | 2                               |
| <b>BDC.017</b> | <i>Levasint</i> | 134-> 235 (6°C/min)         | 17                        | 2                               |
| <b>BDC.018</b> | <i>Levasint</i> | 134-> 235 (6°C/min)         | 17                        | 4                               |
| <b>BDC.019</b> | <i>Levasint</i> | 130 -> 207 (13°C/min)       | 6                         | 8                               |
| <b>BDC.020</b> | <i>Levasint</i> | 134-> 235 (6°C/min)         | 17                        | 6+ 6 EXTRA                      |
| <b>BDC.021</b> | <i>Levasint</i> | 134->207                    | 52                        | 6                               |
| <b>BDC.022</b> | <i>Levasint</i> | 134->208                    | 52                        | 6+ 6 EXTRA                      |
| <b>BDC.023</b> | <i>Levasint</i> | 134->209                    | 52                        | 6+ 6 EXTRA                      |
| <b>BDC.024</b> | <i>Levasint</i> | 134->210                    | 52                        | 6+ 6 EXTRA                      |
| <b>BDC.025</b> | <i>Levasint</i> | 134->211                    | 52                        | 6+ 6 EXTRA                      |

| Naam    | T-verl. bij bakken | Tijd in oven (min) | # Extra coatings | T-verl. Bij bakken (°C) |
|---------|--------------------|--------------------|------------------|-------------------------|
| BDC.001 | D                  | 19                 |                  |                         |
| BDC.002 | D                  | 19                 |                  |                         |
| BDC.003 | A                  | 45                 |                  |                         |
| BDC.004 | B                  | 12                 |                  |                         |
| BDC.005 | A                  | 45                 |                  |                         |
| BDC.006 | A                  | 45                 |                  |                         |
| BDC.007 | C                  | 52                 | 6                | D                       |
| BDC.008 | B                  | 12                 |                  |                         |
| BDC.009 | C                  | 52                 | 6                | D                       |
| BDC.010 | A                  | 45                 |                  |                         |
| BDC.011 | C                  | 52                 | 6                | D                       |
| BDC.012 | B                  | 12                 |                  |                         |
| BDC.013 | A                  | 45                 |                  |                         |
| BDC.014 | A                  | 45                 |                  |                         |
| BDC.015 | A                  | 45                 |                  |                         |
| BDC.016 | A                  | 45                 |                  |                         |
| BDC.017 | A                  | 45                 |                  |                         |
| BDC.018 | A                  | 45                 |                  |                         |
| BDC.019 | B                  | 12                 |                  |                         |
| BDC.020 | C                  | 52                 | 6                | D                       |
| BDC.021 | D                  | 19                 |                  |                         |
| BDC.022 | D                  | 19                 |                  |                         |
| BDC.023 | D                  | 19                 |                  |                         |
| BDC.024 | D                  | 19                 |                  |                         |
| BDC.025 | D                  | 19                 |                  |                         |

## Test case

### T-verl. bij bakken

---

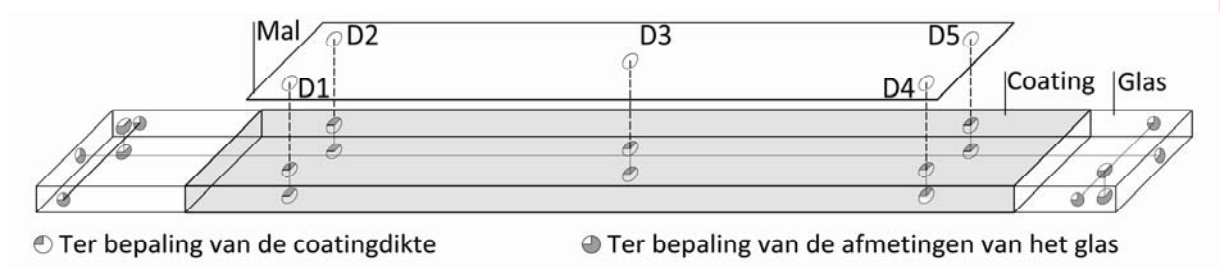
- A** 0 -> 8min: 134 -> 168°C (4°C/min)  
oven openen: belletjes zichtbaar in transparante gel, troebeling  
T daalt tot 156°C  
9 -> 13min: 156 -> 171 °C (4°C/min)  
oven openen: belletjes zichtbaar in transparante gel, troebeling  
T daalt tot 161°C  
14 -> 23min: 161 -> 184°C (3°C/min)  
oven openen: belletjes zichtbaar in transparante gel, troebeling  
T daalt tot 172°C  
24 -> 32min: 172 -> 189°C (2°C/min)  
oven openen: belletjes zichtbaar in transparante gel, troebeling  
T daalt tot 172°C  
33 -> 45min: 172 -> 200°C (2°C/min)  
oven openen: meeste belletjes verdewenen en helder transparant oppervlak  
elementen worden uit oven gehaald en koelen af bij 14°C.
- B** 0 -> 7min: 132 -> 200°C (10°C/min)  
oven openen: belletjes zichtbaar in transparnate gel, troebeling  
T daalt tot 180°C  
8 -> 12min: 190 -> 223°C (10°C/min)  
oven openen: meeste belletjes verdewenen en helder transparant oppervlak met bruine tint  
elementen worden uit oven gehaald en koelen af bij 14°C.
- C** 0 -> 8min: 134 -> 168°C (4°C/min)  
oven openen: belletjes zichtbaar in transparante gel,  
troebeling  
T daalt tot 156°C  
9 -> 13min: 156 -> 171°C (4°C/min)  
oven openen: belletjes zichtbaar in transparnate gel, troebeling  
T daalt 161°C  
14 -> 23min: 161 -> 184°C (3°C/min)  
oven openen: belletjes zichtbaar in transparnate gel, troebeling  
T daalt tot 172°C  
24 -> 32min: 172 -> 189°C (2°C/min)  
oven openen: belletjes zichtbaar in transparnate gel, troebeling  
T daalt tot 172°C  
33 -> 45min: 172 -> 200°C (2°C/min)  
oven openen: belletjes zichtbaar in transparnate gel, troebeling  
Tdaalt tot 130°C  
46 -> 52min: 130 -> 207°C (13°C/min)  
oven openen: meeste belletje verdewenen en helder transparant oppervlak  
6X onderdompelen in poeder  
elementen worden uit oven gehaald en koelen af bij 14°C.
- D** 0 -> 7min: 132 -> 200°C (10°C/min)  
oven openen: belletjes zichtbaar in transparante gel, troebeling  
T daalt 180°C  
14 -> 19min: 190 -> 223°C (10°C/min)  
oven openen: meeste belletjes verdewenen en helder transparant oppervlak met bruine tint  
elementen worden uit oven gehaald en koelen af bij 14°C.

## BIJLAGE B

## COATEN VLAKGLAS

### TEST CASE

- coatingdiktes -



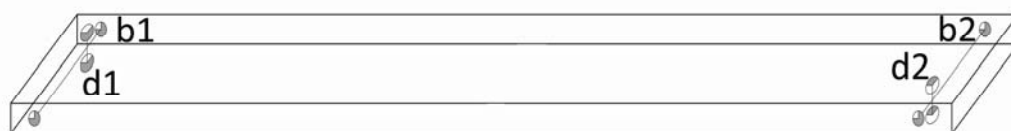
| Naam    | Gemiddelde coatingdikte<br>(mm) | # Opeenvolgende coatings | Voorverwarmingstemperatuur |
|---------|---------------------------------|--------------------------|----------------------------|
| BDC.017 | 0.44                            | 2                        | 235°C                      |
| BDC.018 | 0.45                            | 4                        | 235°C                      |
| BDC.005 | 0.47                            | 2                        | 235°C                      |
| BDC.015 | 0.48                            | 6                        | 235°C                      |
| BDC.013 | 0.49                            | 4                        | 235°C                      |
| BDC.016 | 0.50                            | 2                        | 235°C                      |
| BDC.010 | 0.51                            | 4                        | 235°C                      |
| BDC.003 | 0.53                            | 6                        | 235°C                      |
| BDC.004 | 0.54                            | 8                        | 207°C                      |
| BDC.008 | 0.55                            | 8                        | 207°C                      |
| BDC.012 | 0.57                            | 8                        | 207°C                      |
| BDC.006 | 0.69                            | 6                        | 235°C                      |
| BDC.020 | 0.76                            | 6+6EXTRA                 | 235°C                      |
| BDC.007 | 0.88                            | 6+6EXTRA                 | 235°C                      |
| BDC.009 | 0.90                            | 6+6EXTRA                 | 235°C                      |
| BDC.011 | 0.92                            | 6+6EXTRA                 | 235°C                      |

## BIJLAGE B

## COATEN VLAKGLAS

VERGELIJK LEVASINT

- Afmetingen -



| <b>Naam</b>    | <b>Glastype</b> | <b>b 1<br/>(mm)</b> | <b>b 2<br/>(mm)</b> | <b>d1<br/>(mm)</b> | <b>d2<br/>(mm)</b> | <b>Gem. Dikte (mm)</b> | <b>Gem. breedte (mm)</b> |
|----------------|-----------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|------------------------|--------------------------|
| <b>BDC.026</b> | Borosilicaat    | 50.50               | 49.14               | 2.01               | 2.00               | 2.01                   | 49.82                    |
| <b>BDC.027</b> | Borosilicaat    | 49.72               | 48.16               | 2.03               | 2.03               | 2.03                   | 48.94                    |
| <b>BDC.028</b> | Borosilicaat    | 49.42               | 50.60               | 2.03               | 2.03               | 2.03                   | 50.01                    |
| <b>BDC.029</b> | Borosilicaat    | 49.62               | 50.90               | 2.00               | 2.02               | 2.01                   | 50.26                    |
| <b>BDC.030</b> | Borosilicaat    | 50.38               | 49.30               | 2.03               | 2.03               | 2.03                   | 49.84                    |
| <b>BDC.031</b> | Borosilicaat    | 52.56               | 53.64               | 2.02               | 2.00               | 2.01                   | 53.1                     |
| <b>BDC.032</b> | Borosilicaat    | 51.02               | 49.32               | 2.02               | 2.03               | 2.03                   | 50.17                    |
| <b>BDC.033</b> | Borosilicaat    | 51.68               | 50.78               | 2.03               | 2.02               | 2.03                   | 51.23                    |
| <b>BDC.034</b> | Borosilicaat    | 50.72               | 47.44               | 2.01               | 2.00               | 2.01                   | 49.08                    |
| <b>BDC.035</b> | Borosilicaat    | 50.04               | 50.26               | 1.99               | 2.01               | 2.00                   | 50.15                    |
| <b>BDC.036</b> | Borosilicaat    | 50.72               | 49.32               | 2.02               | 2.02               | 2.02                   | 50.02                    |
| <b>BDC.037</b> | Borosilicaat    | 50.38               | 50.04               | 2.02               | 2.02               | 2.02                   | 50.21                    |
| <b>BDC.038</b> | Borosilicaat    | 51.52               | 50.08               | 2.02               | 2.02               | 2.02                   | 50.8                     |
| <b>BDC.039</b> | Borosilicaat    | 50.60               | 53.02               | 2.00               | 1.99               | 2.00                   | 51.81                    |
| <b>BDC.040</b> | Borosilicaat    | 49.92               | 51.34               | 2.00               | 2.00               | 2.00                   | 50.63                    |
| <b>BDC.041</b> | Borosilicaat    | 52.00               | 50.00               | 2.00               | 1.99               | 2.00                   | 51                       |
| <b>BDC.042</b> | Borosilicaat    | 47.06               | 49.92               | 2.00               | 1.99               | 2.00                   | 48.49                    |
| <b>BDC.043</b> | Borosilicaat    | 59.46               | 60.60               | 2.02               | 2.02               | 2.02                   | 60.03                    |
| <b>BDC.044</b> | Borosilicaat    | 52.86               | 55.20               | 2.01               | 2.00               | 2.01                   | 54.03                    |
| <b>BDC.045</b> | Borosilicaat    | 40.40               | 40.42               | 2.03               | 2.02               | 2.03                   | 40.41                    |

| Naam           | Treksterkte (N/mm <sup>2</sup> ) | Treksterkte (N/mm <sup>2</sup> ) | Bezwijkbelasting    | Bezwijkbelasting    |
|----------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------|---------------------|
|                |                                  |                                  | 4puntsbuigproef (N) | 4puntsbuigproef (N) |
|                | MIN                              | MAX                              | MIN                 | MAX                 |
| <b>BDC.026</b> | 30                               | 120                              | 40.055              | 142.419             |
| <b>BDC.027</b> | 30                               | 120                              | 40.335              | 143.415             |
| <b>BDC.028</b> | 30                               | 120                              | 41.217              | 146.550             |
| <b>BDC.029</b> | 30                               | 120                              | 40.610              | 144.391             |
| <b>BDC.030</b> | 30                               | 120                              | 41.077              | 146.052             |
| <b>BDC.031</b> | 30                               | 120                              | 42.905              | 152.550             |
| <b>BDC.032</b> | 30                               | 120                              | 41.145              | 146.295             |
| <b>BDC.033</b> | 30                               | 120                              | 42.015              | 149.386             |
| <b>BDC.034</b> | 30                               | 120                              | 39.460              | 140.303             |
| <b>BDC.035</b> | 30                               | 120                              | 40.119              | 142.645             |
| <b>BDC.036</b> | 30                               | 120                              | 40.820              | 145.139             |
| <b>BDC.037</b> | 30                               | 120                              | 40.975              | 145.690             |
| <b>BDC.038</b> | 30                               | 120                              | 41.457              | 147.402             |
| <b>BDC.039</b> | 30                               | 120                              | 41.241              | 146.634             |
| <b>BDC.040</b> | 30                               | 120                              | 40.504              | 144.014             |
| <b>BDC.041</b> | 30                               | 120                              | 40.596              | 144.341             |
| <b>BDC.042</b> | 30                               | 120                              | 38.598              | 137.237             |
| <b>BDC.043</b> | 30                               | 120                              | 48.989              | 174.184             |
| <b>BDC.044</b> | 30                               | 120                              | 43.440              | 154.454             |
| <b>BDC.045</b> | 30                               | 120                              | 33.141              | 117.835             |

## BIJLAGE B

## COATEN VLAKGLAS

VERGELIJK LEVASINT

- Coatingproces -

| Naam                    | T-verl. in oven (°C) | Tijd in oven (min) | # opeenvolgende coatings |
|-------------------------|----------------------|--------------------|--------------------------|
| <b>2/mrt</b>            |                      |                    |                          |
| <b>BDC.026</b> Levasint | 36 -> 243 (17°C/min) | 12                 | 2                        |
| <b>BDC.027</b> Levasint | 36 -> 243 (17°C/min) | 12                 | 2                        |
| <b>BDC.028</b> Levasint | 36 -> 243 (17°C/min) | 12                 | 2                        |
| <b>BDC.029</b> Levasint | 36 -> 243 (17°C/min) | 12                 | 2                        |
| <b>BDC.030</b> Levasint | 36 -> 243 (17°C/min) | 12                 | 6+ 6 EXTRA               |
| <b>BDC.031</b> Levasint | 36 -> 243 (17°C/min) | 12                 | 6+ 6 EXTRA               |
| <b>BDC.032</b> Levasint | 36 -> 243 (17°C/min) | 12                 | 6+ 6 EXTRA               |
| <b>BDC.033</b> Levasint | 36 -> 243 (17°C/min) | 12                 | 6+ 6 EXTRA               |
| <b>BDC.034</b> Levasint | 36 -> 243 (17°C/min) | 12                 | 12                       |
| <b>BDC.035</b> Levasint | 36 -> 243 (17°C/min) | 12                 | 12                       |
| <b>BDC.036</b> Levasint | 36 -> 243 (17°C/min) | 12                 | 12                       |
| <b>BDC.037</b> Levasint | 36 -> 243 (17°C/min) | 12                 | 12                       |
| <b>BDC.038</b> Levasint | 230                  | 90                 | 8                        |
| <b>BDC.039</b> Levasint | 230                  | 90                 | 8                        |
| <b>BDC.040</b> Levasint | 230                  | 90                 | 8                        |
| <b>BDC.041</b> Levasint | 230                  | 90                 | 8                        |
| <b>BDC.042</b> Levasint | 230                  | 90                 | 8                        |
| <b>BDC.043</b> Levasint | 230                  | 90                 | 8                        |
| <b>BDC.044</b> Levasint | 230                  | 90                 | 8                        |
| <b>BDC.045</b> Levasint | 230                  | 90                 | 8                        |

| Naam    | T-verl. bij bakken | Tijd in oven (min) | # Extra coatings | T-verl. Bij bakken (°C) |
|---------|--------------------|--------------------|------------------|-------------------------|
| BDC.026 | A                  | 12                 |                  |                         |
| BDC.027 | A                  | 12                 |                  |                         |
| BDC.028 | A                  | 12                 |                  |                         |
| BDC.029 | A                  | 12                 |                  |                         |
| BDC.030 | A                  | 12                 | 6                | B                       |
| BDC.031 | A                  | 12                 | 6                | B                       |
| BDC.032 | A                  | 12                 | 6                | B                       |
| BDC.033 | A                  | 12                 | 6                | B                       |
| BDC.034 | A                  | 12                 |                  |                         |
| BDC.035 | A                  | 12                 |                  |                         |
| BDC.036 | A                  | 12                 |                  |                         |
| BDC.037 | A                  | 12                 |                  |                         |
| BDC.038 | C                  | 12                 |                  |                         |
| BDC.039 | C                  | 12                 |                  |                         |
| BDC.040 | C                  | 12                 |                  |                         |
| BDC.041 | C                  | 12                 |                  |                         |
| BDC.042 | C                  | 12                 |                  |                         |
| BDC.043 | C                  | 12                 |                  |                         |
| BDC.044 | C                  | 12                 |                  |                         |
| BDC.045 | C                  | 12                 |                  |                         |

## Reeks levasint

---

### T-verl. bij bakken

- A** 0 -> 5 min: 146 -> 187°C (8°C/min)  
oven openen: wit transluscent, poederachtig  
T daalt tot 170°C  
6 -> 12 min: 170 -> 198 °C (5°C/min)  
oven openen: meeste belletjes verdwenen en helder transparant oppervlak met bruine tint  
elementen worden uit oven gehaald en koelen af bij 14°C.
- B** 0 -> 11 min: 141 -> 190°C (5°C/min)  
oven openen: meeste belletjes verdwenen, transparant oppervlak, sterk bruine verkleuring  
elementen worden uit oven gehaald en koelen af bij 14°C.
- C** 0 -> 4 min: 170 -> 189°C (5°C/min)  
oven openen: wit transluscent, poederachtig  
T daalt tot 186°C  
5 -> 7 min: 186 -> 196°C (5°C/min)  
oven openen: belletjes zichtbaar in  
transparante gel, troebeling  
T daalt tot 194°C  
8 -> 10 min: 194 -> 204°C (5°C/min)  
oven openen: meeste belletjes verdwenen en helder transparant oppervlak met bruine tint  
elementen worden uit oven gehaald en koelen af bij kamertemperatuur

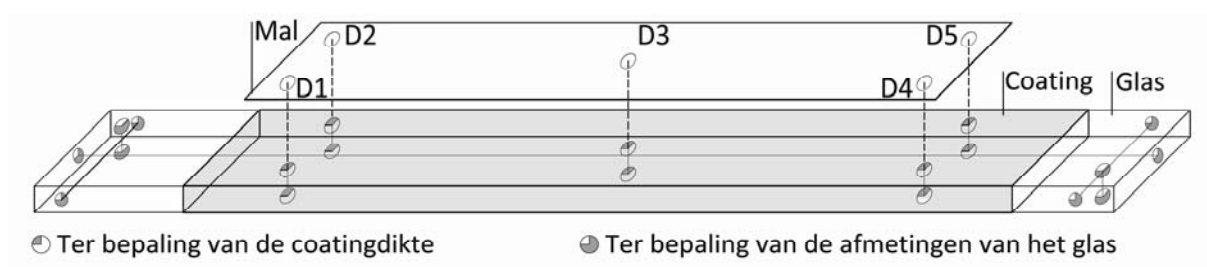
| <b>Naam</b>    | <b>Verkleuring</b> | <b>Microbelletjes</b> | <b>Puntsgewijs niet gecoat</b> | <b>Randdekking</b> |
|----------------|--------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------|
| <b>BDC.026</b> | XXX                | XXXX                  | XXXXX                          | XXXXX              |
| <b>BDC.027</b> | XXX                | XXXX                  | XXXXX                          | XXXXX              |
| <b>BDC.028</b> | XXX                | XXXX                  | XXX                            | XXXXX              |
| <b>BDC.029</b> | XXX                | XXXXX                 | XX                             | XXXXX              |
| <b>BDC.030</b> | X                  | XXXX                  | XXXXX                          | XXXXX              |
| <b>BDC.031</b> | X                  | XXXXX                 | XXXXX                          | XXXXX              |
| <b>BDC.032</b> | X                  | XXXXX                 | XXXXX                          | XXXXX              |
| <b>BDC.033</b> | X                  | XXXXX                 | XXXXX                          | XXXXX              |
| <b>BDC.034</b> | XXX                | XXXXX                 | XXXX                           | XXXXX              |
| <b>BDC.035</b> | XXX                | XXXXX                 | XXX                            | XXXXX              |
| <b>BDC.036</b> | XXX                | XXXXX                 | XX                             | X                  |
| <b>BDC.037</b> | XXXX               | XXX                   | X                              | X                  |
| <b>BDC.038</b> | XXXX               | X                     | XXXXX                          | XXXXX              |
| <b>BDC.039</b> | XXXX               | X                     | XXXXX                          | XXXXX              |
| <b>BDC.040</b> | XXXX               | X                     | XXXXX                          | XXXXX              |
| <b>BDC.041</b> | XXXX               | X                     | XXXXX                          | XXXXX              |
| <b>BDC.042</b> | XXXX               | XX                    | XXXXX                          | XXXXX              |
| <b>BDC.043</b> | XXXX               | XXX                   | XXXXX                          | XXXXX              |
| <b>BDC.044</b> | XXXX               | XXX                   | XXX                            | XXXXX              |
| <b>BDC.045</b> | XXXX               | XX                    | XX                             | XX                 |

## BIJLAGE B

## COATEN VLAKGLAS

VERGELIJK LEVASINT

- Coatingdiktes -



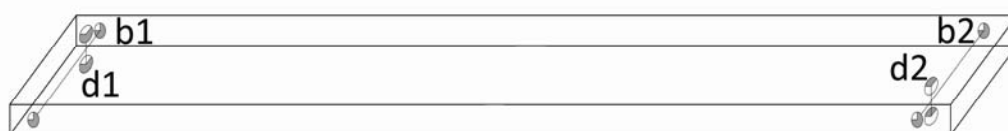
| Naam                | Glastype     | Gem Coating dikte<br>(mm) | # opeenvolgende<br>coatings | Voorverwarmingstemperatuur |
|---------------------|--------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| <b>BDC.026.L2</b>   | Borosilicaat | 0.46                      | 2                           | 243                        |
| <b>BDC.027.L2</b>   | Borosilicaat | 0.42                      | 2                           | 243                        |
| <b>BDC.028.L2</b>   | Borosilicaat | 0.41                      | 2                           | 243                        |
| <b>BDC.029.L2</b>   | Borosilicaat | 0.36                      | 2                           | 243                        |
| <b>BDC.030.L6+6</b> | Borosilicaat | 0.79                      | 6+6extra                    | 243                        |
| <b>BDC.031.L6+6</b> | Borosilicaat | 0.76                      | 6+6extra                    | 243                        |
| <b>BDC.032.L6+6</b> | Borosilicaat | 0.76                      | 6+6extra                    | 243                        |
| <b>BDC.033.L6+6</b> | Borosilicaat | 0.77                      | 6+6extra                    | 243                        |
| <b>BDC.034. L12</b> | Borosilicaat | 0.36                      | 12                          | 243                        |
| <b>BDC.035.L12</b>  | Borosilicaat | 0.31                      | 12                          | 243                        |
| <b>BDC.036.L12</b>  | Borosilicaat | 0.27                      | 12                          | 243                        |
| <b>BDC.037.L12</b>  | Borosilicaat | 0.22                      | 12                          | 243                        |
| <b>BDC.038.L8</b>   | Borosilicaat | 0.69                      | 8                           | 230                        |
| <b>BDC.039.L8</b>   | Borosilicaat | 0.62                      | 8                           | 230                        |
| <b>BDC.040.L8</b>   | Borosilicaat | 0.54                      | 8                           | 230                        |
| <b>BDC.041.L8</b>   | Borosilicaat | 0.52                      | 8                           | 230                        |
| <b>BDC.042.L8</b>   | Borosilicaat | 0.46                      | 8                           | 230                        |
| <b>BDC.043.L8</b>   | Borosilicaat | 0.43                      | 8                           | 230                        |
| <b>BDC.044.L8</b>   | Borosilicaat | 0.36                      | 8                           | 230                        |
| <b>BDC.045.L8</b>   | Borosilicaat | 0.32                      | 8                           | 230                        |

## BIJLAGE B

## COATEN VLAKGLAS

VERGELIJK ABCITE

- Afmetingen -



| Naam           | Glastype     | b1<br>(mm) | b 2<br>(mm) | d1<br>(mm) | d2<br>(mm) | Gem. Dikte (mm) | Gem. breedte (mm) |
|----------------|--------------|------------|-------------|------------|------------|-----------------|-------------------|
| <b>BDC.046</b> | Borosilicaat | 51.18      | 50.24       | 2.02       | 2.02       | 2.02            | 50.71             |
| <b>BDC.047</b> | Borosilicaat | 50.00      | 49.74       | 2.02       | 2.02       | 2.02            | 49.87             |
| <b>BDC.048</b> | Borosilicaat | 47.98      | 50.00       | 2.03       | 2.01       | 2.02            | 48.99             |
| <b>BDC.049</b> | Borosilicaat | 49.52      | 48.44       | 1.99       | 2.00       | 2.00            | 48.98             |
| <b>BDC.050</b> | Borosilicaat | 49.72      | 51.04       | 1.99       | 2.00       | 2.00            | 50.38             |
| <b>BDC.051</b> | Borosilicaat | 50.16      | 49.32       | 1.99       | 2.00       | 2.00            | 49.74             |
| <b>BDC.052</b> | Borosilicaat | 50.70      | 50.20       | 2.03       | 2.03       | 2.03            | 50.45             |
| <b>BDC.053</b> | Borosilicaat | 50.08      | 51.04       | 2.03       | 2.02       | 2.03            | 50.56             |
| <b>BDC.054</b> | Borosilicaat | 50.22      | 50.38       | 2.02       | 2.01       | 2.02            | 50.30             |
| <b>BDC.055</b> | Borosilicaat | 49.74      | 49.72       | 2.01       | 2.02       | 2.02            | 49.73             |
| <b>BDC.056</b> | Borosilicaat | 50.70      | 49.72       | 2.03       | 2.01       | 2.02            | 50.21             |
| <b>BDC.057</b> | Borosilicaat | 51.18      | 52.04       | 2.02       | 2.01       | 2.02            | 51.61             |
| <b>BDC.058</b> | Borosilicaat | 49.82      | 50.00       | 2.02       | 2.01       | 2.02            | 49.91             |
| <b>BDC.059</b> | Borosilicaat | 48.90      | 49.82       | 2.02       | 2.01       | 2.02            | 49.36             |
| <b>BDC.060</b> | Borosilicaat | 50.02      | 50.28       | 2.02       | 2.01       | 2.02            | 50.15             |
| <b>BDC.061</b> | Borosilicaat | 49.72      | 49.82       | 2.02       | 2.02       | 2.02            | 49.77             |
| <b>BDC.062</b> | Borosilicaat | 50.74      | 50.04       | 2.00       | 2.00       | 2.00            | 50.39             |
| <b>BDC.063</b> | Borosilicaat | 49.62      | 50.30       | 2.04       | 2.02       | 2.03            | 49.96             |
| <b>BDC.064</b> | Borosilicaat | 50.58      | 49.62       | 2.03       | 2.01       | 2.02            | 50.10             |
| <b>BDC.065</b> | Borosilicaat | 49.72      | 49.56       | 2.03       | 2.01       | 2.02            | 49.64             |
| <b>BDC.067</b> | Borosilicaat | 50.06      | 49.62       | 2.02       | 2.03       | 2.03            | 49.84             |
| <b>BDC.068</b> | Borosilicaat | 49.62      | 46.04       | 2.02       | 2.02       | 2.02            | 47.83             |
| <b>BDC.069</b> | Borosilicaat | 50.06      | 50.62       | 2.02       | 2.02       | 2.02            | 50.34             |
| <b>BDC.070</b> | Borosilicaat | 50.00      | 49.70       | 2.02       | 2.02       | 2.02            | 49.85             |

| Naam    | Treksterkte<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | Treksterkte<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | Bezwijkbelasting<br>4puntsbuigproef (N) | Bezwijkbelasting<br>4puntsbuigproef (N) |
|---------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
|         | MIN                                 | MAX                                 | MIN                                     | MAX                                     |
| BDC.046 | 30                                  | 120                                 | 41.383                                  | 147.141                                 |
| BDC.047 | 30                                  | 120                                 | 40.698                                  | 162.792                                 |
| BDC.048 | 30                                  | 120                                 | 39.979                                  | 159.915                                 |
| BDC.049 | 30                                  | 120                                 | 38.988                                  | 155.952                                 |
| BDC.050 | 30                                  | 120                                 | 40.102                                  | 160.410                                 |
| BDC.051 | 30                                  | 120                                 | 39.593                                  | 158.372                                 |
| BDC.052 | 30                                  | 120                                 | 41.580                                  | 166.320                                 |
| BDC.053 | 30                                  | 120                                 | 41.465                                  | 165.861                                 |
| BDC.054 | 30                                  | 120                                 | 40.846                                  | 163.382                                 |
| BDC.055 | 30                                  | 120                                 | 40.383                                  | 161.531                                 |
| BDC.056 | 30                                  | 120                                 | 40.974                                  | 163.897                                 |
| BDC.057 | 30                                  | 120                                 | 41.909                                  | 167.638                                 |
| BDC.058 | 30                                  | 120                                 | 40.529                                  | 162.116                                 |
| BDC.059 | 30                                  | 120                                 | 40.082                                  | 160.329                                 |
| BDC.060 | 30                                  | 120                                 | 40.724                                  | 162.895                                 |
| BDC.061 | 30                                  | 120                                 | 40.616                                  | 162.465                                 |
| BDC.062 | 30                                  | 120                                 | 40.312                                  | 161.248                                 |
| BDC.063 | 30                                  | 120                                 | 41.175                                  | 164.700                                 |
| BDC.064 | 30                                  | 120                                 | 40.885                                  | 163.538                                 |
| BDC.065 | 30                                  | 120                                 | 40.509                                  | 162.037                                 |
| BDC.067 | 30                                  | 120                                 | 40.875                                  | 163.499                                 |
| BDC.068 | 30                                  | 120                                 | 39.033                                  | 156.132                                 |
| BDC.069 | 30                                  | 120                                 | 41.081                                  | 164.326                                 |
| BDC.070 | 30                                  | 120                                 | 40.682                                  | 162.726                                 |

## BIJLAGE B

## COATEN VLAKGLAS

VERGELIJK ABCITE

- Coatingproces -

| Naam           | polymeerporduct | T-verl. in oven (°C) | Tijd in oven (min) | # opeenvolgende coatings |
|----------------|-----------------|----------------------|--------------------|--------------------------|
| 18/mrt         |                 |                      |                    |                          |
| <b>BDC.046</b> | Abcite          | 222                  | 46                 | 8                        |
| <b>BDC.047</b> | Abcite          | 240*                 | 40                 | 4                        |
| <b>BDC.048</b> | Abcite          | 240*                 | 40                 | 4                        |
| <b>BDC.049</b> | Abcite          | 235                  | 5                  | 8                        |
| <b>BDC.050</b> | Abcite          | 180                  | 90                 | /                        |
| <b>BDC.051</b> | Abcite          | 180                  | 90                 | 8                        |
| <b>BDC.052</b> | Abcite          | 180                  | 5                  | 8                        |
| <b>BDC.053</b> | Abcite          | 235                  | 5                  | 8                        |
| <b>BDC.054</b> | Abcite          | 240*                 | 40                 | 4                        |
| <b>BDC.055</b> | Abcite          | 240*                 | 40                 | 4                        |
| <b>BDC.056</b> | Abcite          | 198*                 | 30                 | 8                        |
| <b>BDC.057</b> | Abcite          | 198*                 | 30                 | 8                        |
| <b>BDC.058</b> | Abcite          | 198*                 | 30                 | 8                        |
| <b>BDC.059</b> | Abcite          | 198*                 | 30                 | 8                        |
| <b>BDC.060</b> | Abcite          | 190* (3e)            | 20                 | 8                        |
| <b>BDC.061</b> | Abcite          | 190* (2e)            | 20                 | 8                        |
| <b>BDC.062</b> | Abcite          | 190*(3e)             | 25                 | 4                        |
| <b>BDC.063</b> | Abcite          | 190*(2e)             | 25                 | 4                        |
| <b>BDC.064</b> | Abcite          | 190*(1e)             | 25                 | 4                        |
| <b>BDC.065</b> | Abcite          | 190*(1e)             | 20                 | 8                        |
| <b>BDC.067</b> | Abcite          | 190*                 | 45                 | 4+4                      |
| <b>BDC.068</b> | Abcite          | 190*                 | 45                 | 4+4                      |
| <b>BDC.069</b> | Abcite          | 190*                 | 45                 | 4+4                      |
| <b>BDC.070</b> | Abcite          | 190*                 | 45                 | 4+4                      |

\* GEMETEN MET MULTIMETER TER HOOGTE VAN DE GLASELEMENTEN

|  |                         |
|--|-------------------------|
|  | werden simultaan gecoat |
|  | werden simultaan gecoat |
|  | werden simultaan gecoat |

| Naam    | T-verl. bij bakken | Tijd in oven (min) | # Extra coatings | T-verl. Bij bakken (°C) |
|---------|--------------------|--------------------|------------------|-------------------------|
| BDC.046 | H                  | 15                 |                  |                         |
| BDC.047 | I*                 |                    |                  |                         |
| BDC.048 | I*                 |                    |                  |                         |
| BDC.049 | D                  | 1.5                |                  |                         |
| BDC.050 | /                  | /                  |                  |                         |
| BDC.051 | E                  | 2                  |                  |                         |
| BDC.052 | F                  | 2                  |                  |                         |
| BDC.053 | G                  | 1                  |                  |                         |
| BDC.054 | I*                 |                    |                  |                         |
| BDC.055 | I*                 |                    |                  |                         |
| BDC.056 | K*                 |                    |                  |                         |
| BDC.057 | K*                 |                    |                  |                         |
| BDC.058 | K*                 |                    |                  |                         |
| BDC.059 | K*                 |                    |                  |                         |
| BDC.060 | L*                 |                    |                  |                         |
| BDC.061 | L*                 |                    |                  |                         |
| BDC.062 | J*                 |                    |                  |                         |
| BDC.063 | J*                 |                    |                  |                         |
| BDC.064 | J*                 |                    |                  |                         |
| BDC.065 | L*                 |                    |                  |                         |
| BDC.067 | M*                 |                    | 4                | N*                      |
| BDC.068 | M*                 |                    | 4                | N*                      |
| BDC.069 | M*                 |                    | 4                | N*                      |
| BDC.070 | M*                 |                    | 4                | N*                      |

## Reeks Abcite

---

### T-verl. bij bakken

- D** 0 ->1 min 30s: 207 -> 225°C (8°C/min)  
oven openen:2 zijden microbelletjes  
elementen worden uit oven gehaald en koelen af bij 14°C.
- E** 0 ->2 min: 153 -> 200°C (25°C/min)  
oven openen:2 zijden microbelletjes  
elementen worden uit oven gehaald en koelen af bij 14°C.
- F** 0 ->2 min: 170 -> 190°C (10°C/min)  
oven openen:2 zijden microbelletjes  
elementen worden uit oven gehaald en koelen af bij 14°C.
- G** 0 ->1 min: 207 -> 215°C (8°C/min)  
oven openen:2 zijden microbelletjes  
elementen worden uit oven gehaald en koelen af bij 14°C.
- H** 0 ->5 min: 186 -> 188°C (.5°C/min)  
oven openen: microbelletjes aanwezig, troebel transparant.  
T daalt tot 179°C  
6->8 min: 179-> 185°C (3°C/min)  
oven openen: microbelletjes aanwezig.  
T daalt tot 183°C  
9->11 min: 183-> 185°C (1°C/min)  
oven openen: microbelletjes aanwezig.  
T daalt tot 178°C  
12->15 min: 178-> 186°C (3°C/min)  
elementen worden uit oven gehaald en koelen af bij kamertemperatuur
- I** 0 ->3 min: 203-> 209°C (2°C/min)  
oven openen: microbelletjes aanwezig, troebel transparant.  
T daalt tot 204°C  
4 ->6 min: 204-> 206°C (1°C/min)  
oven openen: microbelletjes aanwezig  
T daalt tot 201°C  
7 ->9 min: 201-> 204°C (1°C/min)  
oven openen: microbelletjes aanwezig  
elementen worden uit oven gehaald en koelen af bij kamertemperatuur

## Reeks Abcite

### T-verl. bij bakken

---

- J** 0 ->5 min: 180-> 200°C (4°C/min)  
oven openen: wit troebel transluscent.  
T daalt tot 195°C  
6 ->9 min: 195-> 202°C (2°C/min)  
oven openen: troebel transparant.  
T daalt tot 197°C  
10 ->13 min: 197-> 203°C (2°C/min)  
oven openen: transparant.  
T daalt tot 200°C  
14 ->17 min: 200-> 210°C (3°C/min)  
oven openen: transparant.  
T daalt tot 205°C  
18 ->22 min: 205-> 216°C (3°C/min)  
oven openen: transparant.  
T daalt tot 210°C  
23 ->27 min: 210-> 218°C (2°C/min)  
oven openen: transparant, zacht gele vlekuring  
elementen worden uit oven gehaald en koelen af bij kamertemperatuur
- K** 0 ->4 min: 190-> 215 (6°C/min)  
oven openen: wit troebel transluscent.  
T daalt tot 206°C  
5 ->11 min: 206-> 211°C (1°C/min)  
oven openen:weinig microbelletjes, troebel transparant.  
T daalt tot 206°C  
12 ->15 min: 206-> 212°C (2°C/min)  
oven openen:weinig microbelletjes, transparant.  
elementen worden uit oven gehaald en koelen af bij kamertemperatuur
- L** 0 ->8 min: 170-> 202 (4°C/min)  
oven openen:weinig microbelletjes, troebel transparant.  
T daalt tot 197°C  
9 ->15 min: 197-> 206°C (1.5°C/min)  
oven openen:weinig microbelletjes, troebel transparant.  
T daalt tot 202°C  
16 ->20 min: 202-> 215°C (3°C/min)  
oven openen:weinig microbelletjes, transparant.  
elementen worden uit oven gehaald en koelen af bij kamertemperatuur
- M** 0 ->10 min: 170-> 196 (3°C/min)  
oven openen: troebel transparant.  
T daalt tot 185°C  
11 ->14 min: 185-> 200°C (5°C/min)  
oven openen: troebel transparant.
- N** 0 ->7 min: 180-> 200 (3°C/min)  
oven openen:weinig microbelletjes, troebel transparant  
T daalt tot 190°C  
8 ->12 min: 190-> 210°C (5°C/min)  
oven openen: weinig microbelletjes, troebel transparant.  
elementen worden uit oven gehaald en koelen af bij kamertemperatuur

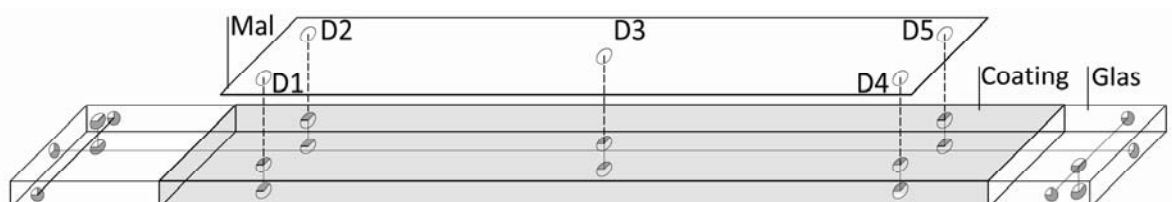
| <b>Naam</b>    | <b>Verkleuring</b> | <b>Microbelletjes</b> | <b>Puntsgewijs niet gecoat</b> | <b>Randdekking</b> |
|----------------|--------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------|
| <b>BDC.046</b> | XXXX               | X                     | XXXX                           | XXXX               |
| <b>BDC.047</b> | XXXX               | XX                    | XXXX                           | XXXX               |
| <b>BDC.048</b> | XXXX               | XX                    | XXXX                           | XXXX               |
| <b>BDC.049</b> | XXXX               | XX                    | XXXX                           | XXXX               |
| <b>BDC.050</b> | /                  | /                     | /                              | /                  |
| <b>BDC.051</b> | X                  | XX                    | XXXX                           | XXXX               |
| <b>BDC.052</b> | XXXX               | X                     | XXXX                           | XXXX               |
| <b>BDC.053</b> | XXXX               | X                     | XXXX                           | XXXX               |
| <b>BDC.054</b> | XXXX               | XX                    | XXXX                           | XXXX               |
| <b>BDC.055</b> | XXXX               | X                     | XXXX                           | XXXX               |
| <b>BDC.056</b> | XXXX               | XX                    | XXXX                           | XXXX               |
| <b>BDC.057</b> | XXXX               | XX                    | XXXX                           | XXXX               |
| <b>BDC.058</b> | XXXX               | XX                    | XXXX                           | XXXX               |
| <b>BDC.059</b> | XXXX               | XX                    | XXXX                           | XXXX               |
| <b>BDC.060</b> | XXXX               | XXX                   | XXXX                           | XXXX               |
| <b>BDC.061</b> | XXXX               | XXX                   | XXXX                           | XXXX               |
| <b>BDC.062</b> | XXXX               | XXXX                  | XXX                            | XXXX               |
| <b>BDC.063</b> | XXXX               | XXXX                  | XXX                            | XXXX               |
| <b>BDC.064</b> | XXXX               | XXXX                  | XXXX                           | XXXX               |
| <b>BDC.065</b> | XXXX               | XXX                   | XXXX                           | XXXX               |
| <b>BDC.067</b> | XXXX               | XX                    | XXXX                           | XXXX               |
| <b>BDC.068</b> | XXXX               | XX                    | XXXX                           | XXXX               |
| <b>BDC.069</b> | XXXX               | XX                    | XXXX                           | XXXX               |
| <b>BDC.070</b> | XXXX               | XX                    | XXXX                           | XXXX               |

## BIJLAGE B

## COATEN VALKGLAS

VERGELIJK ABCITE

- Coatingdiktes -



● Ter bepaling van de coatingdikte

● Ter bepaling van de afmetingen van het glas

| Naam         | Glastype     | Gem Coating<br>dikte (mm) | # opeenvolgende<br>coatings | Voorverwarmingstemperatuur |
|--------------|--------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| BDC.046.A8   | borosilicaat | 0.86                      | 8                           | 222                        |
| BDC.047.A4   | borosilicaat | 0.61                      | 4 240*                      |                            |
| BDC.048.A4   | borosilicaat | 0.63                      | 4 240*                      |                            |
| BDC.049.A8   | borosilicaat | /                         | 8                           | 235                        |
| BDC.050      | borosilicaat | /                         | /                           | 180                        |
| BDC.051.A8   | borosilicaat | 0.64                      | 8                           | 180                        |
| BDC.052.A8   | borosilicaat | 0.87                      | 8                           | 180                        |
| BDC.053.A8   | borosilicaat | 0.63                      | 8                           | 235                        |
| BDC.054.A4   | borosilicaat | 0.65                      | 4 240*                      |                            |
| BDC.055.A4   | borosilicaat | 0.67                      | 4 240*                      |                            |
| BDC.056.A8   | borosilicaat | 0.55                      | 8 198*                      |                            |
| BDC.057.A8   | borosilicaat | 0.56                      | 8 198*                      |                            |
| BDC.058.A8   | borosilicaat | 0.55                      | 8 198*                      |                            |
| BDC.059.A8   | borosilicaat | 0.55                      | 8 198*                      |                            |
| BDC.060.A8   | borosilicaat | 0.42                      | 8 190* (3e)                 |                            |
| BDC.061.A8   | borosilicaat | 0.45                      | 8 190* (2e)                 |                            |
| BDC.062.A4   | borosilicaat | 0.33                      | 4 190*(3e)                  |                            |
| BDC.063.A4   | borosilicaat | 0.38                      | 4 190*(2e)                  |                            |
| BDC.064.A4   | borosilicaat | 0.42                      | 4 190*(1e)                  |                            |
| BDC.065.A8   | borosilicaat | 0.54                      | 8 190*(1e)                  |                            |
| BDC.067.A4+4 | borosilicaat | 0.88                      | 4+4 190*                    |                            |
| BDC.068.A4+4 | borosilicaat | 0.92                      | 4+4 190*                    |                            |
| BDC.069.A4+4 | borosilicaat | 0.96                      | 4+4 190*                    |                            |
| BDC.070.A4+4 | borosilicaat | 0.94                      | 4+4 190*                    |                            |

## BIJLAGE C TESTRESULTATEN VLAKGLAS

TEST CASE

- Tabel -

| Naam               | Gemiddelde coatingdikte (mm) | Glasbreuk (plaats)            | Fmax (N) | Fmax/A (N/mm <sup>2</sup> ) | Breukpatroon                      |
|--------------------|------------------------------|-------------------------------|----------|-----------------------------|-----------------------------------|
| BDC.003.L6 (6mm)   | 0.53                         | centraal tss 2 belastingsptn. | 585      | 1.98                        | X-vormig                          |
| BDC.014.L6 (3mm)   | 0.41                         | thv belastingspt.             | 221      | 1.45                        | V-vormig                          |
| BDC.005.L2 (6mm)   | 0.47                         | centraal tss 2 belastingsptn. | 755      | 2.39                        | V-vormig                          |
| BDC.017.L2 (3mm)   | 0.44                         | centraal tss 2 belastingsptn. | 226      | 1.44                        | V-vormig                          |
| BDC.007.L6+6 (6mm) | 0.88                         | centraal tss 2 belastingsptn. | 647      | 2.26                        | V-vormig                          |
| BDC.009.L6+6 (6mm) | 0.90                         | thv belastingspt.             | 663      | 2.34                        | V-vormig                          |
| BDC.011.L6+6 (6mm) | 0.92                         | centraal tss 2 belastingsptn. | 706      | 2.34                        | V-vormig                          |
| BDC.018.L4 (3mm)   | 0.45                         | thv belastingspt.             | 138      | 0.97                        | lijnvormig vetrekt vanuit centrum |

## BIJLAGE C TESTRESULTATEN VLAKGLAS

VERGELIJK LEVASINT

- Tabel -

| Naam         | Gem Coating<br>dikte (mm) | Fmax/A<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | Fmax<br>(N) | RDV (N)       | locatie breuk             | breukvorm |
|--------------|---------------------------|--------------------------------|-------------|---------------|---------------------------|-----------|
| BDC.035.L12  | 0.31                      | 0.86                           | 64.86       | 8.30          | thv oplegging             | X         |
| BDC.045.L8   | 0.32                      | 0.99                           | 74.10       | doorgescheurd | buiten oplegging          | V*        |
| BDC.044.L8   | 0.36                      | 0.86                           | 64.69       | doorgescheurd | thv oplegging             | V         |
| BDC.036.L12  | 0.27                      | 0.98                           | 73.15       | 6.37          | 2 keer thv<br>oplegging   | V         |
| BDC.034.L12  | 0.36                      | 1.00                           | 74.70       | 9.56          | centraal tss<br>oplegging | V         |
| BDC.042.L8   | 0.46                      | 0.95                           | 71.00       | doorgescheurd | centraal tss<br>oplegging | X         |
| BDC.043.L8   | 0.43                      | 1.23                           | 92.46       | 11.20         | tss oplegging             | X         |
| BDC.026.L2   | 0.46                      | 1.31                           | 98.19       | 9.29          | centraal tss<br>oplegging | V         |
| BDC.038.L8   | 0.69                      | 1.20                           | 90.24       | 14.44         | centraal tss<br>oplegging | X         |
| BDC.039.L8   | 0.62                      | 0.91                           | 68.50       | 16.76         | centraal tss<br>oplegging | X         |
| BDC.031.L6+6 | 0.76                      | 0.99                           | 74.14       | 19.57         | centraal tss<br>oplegging | V         |
| BDC.032.L6+6 | 0.76                      | 0.78                           | 58.46       | 23.10         | centraal tss<br>oplegging | V*        |
| BDC.033.L6+6 | 0.77                      | 0.99                           | 74.62       | 16.42         | centraal tss<br>oplegging | V         |
| BDC.030.L6+6 | 0.79                      | 0.99                           | 74.22       | 26.04         | thv oplegging             | X         |
| BDC.080.L4+4 | 0.91                      | 1.07                           | 80.25       | 22.24         |                           | X         |
| BDC.081.L4+4 | 0.91                      | 0.82                           | 61.50       | 26.71         |                           | V         |
| BDC.082.L4+4 | 0.92                      | 0.96                           | 72.00       | 26.95         | centraal tss<br>oplegging | V         |
| BDC.083.L4+4 | 0.92                      | 0.81                           | 60.75       | 26.50         | centraal tss<br>oplegging | V         |

kerfzijde in  
trekzone

## BIJLAGE C TESTRESULTATEN VLAK GLAS

VERGELIJK ABCITE

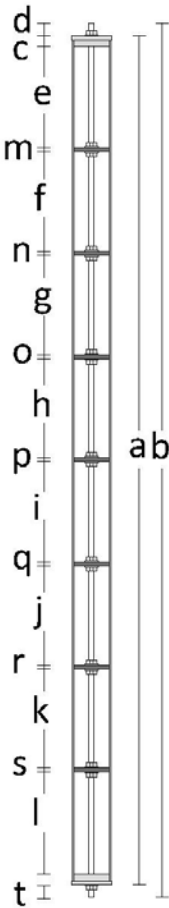
- Tabel -

| Naam         | Gem. Coating<br>dikte (mm) | Fmax/A<br>(N/mm) | Fmax<br>(N) | RDV (N)       | locatie breuk             | breuk<br>vorm  |
|--------------|----------------------------|------------------|-------------|---------------|---------------------------|----------------|
| BDC.060.A8   | 0.42                       | 1.02             | 76.87       | 10.72         | centraal tss<br>oplegging | V              |
| BDC.061.A8   | 0.45                       | 0.82             | 61.44       | 14.57         | thv oplegging             | V              |
| BDC.064.A4   | 0.42                       | 0.79             | 59.00       | doorgescheurd | thv oplegging             | V*             |
| BDC.065.A8   | 0.54                       | 0.80             | 60.37       | 15.04         | centraal tss<br>oplegging | V              |
| BDC.056.A8   | 0.55                       | 0.64             | 48.26       | 16.28         | thv oplegging             | X              |
| BDC.058.A8   | 0.55                       | 1.09             | 82.06       | 11.72         | thv oplegging             | V              |
| BDC.059.A8   | 0.55                       | 1.39             | 104.06      | 7.98          | over hele<br>middenzone   | combinati<br>e |
| BDC.057.A8   | 0.56                       | 0.75             | 55.97       | doorgescheurd | thv oplegging             | lineair        |
| BDC.047.A4   | 0.61                       | 1.10             | 82.44       | doorgescheurd | thv oplegging             | V*             |
| BDC.048.A4   | 0.63                       | 0.89             | 66.97       | 24.81         | thv oplegging             | V              |
| BDC.053.A8   | 0.63                       | 0.61             | 45.77       | 43.19         | thv oplegging             | V*             |
| BDC.051.A8   | 0.64                       | 0.73             | 54.99       | 19.83         | thv oplegging             | V*             |
| BDC.054.A4   | 0.65                       | 0.71             | 53.41       | 17.38         | centraal tss<br>oplegging | V*             |
| BDC.055.A4   | 0.67                       | 0.69             | 51.47       | 17.22         | centraal tss<br>oplegging | V*             |
| BDC.046.A8   | 0.86                       | 0.92             | 68.89       | 22.28         | dubbele breuk             | X              |
| BDC.052.A8   | 0.87                       | 0.75             | 56.13       | 20.21         | centraal tss<br>oplegging | V*             |
| BDC.068.A4+4 | 0.92                       | 0.79             | 59.62       | 25.75         | centraal tss<br>oplegging | V*             |
| BDC.069.A4+4 | 0.96                       | 0.67             | 49.97       | 33.55         | thv oplegging             | V*             |
| BDC.070.A4+4 | 0.94                       | 0.72             | 54.13       | 25.86         | centraal tss<br>oplegging | V*             |

kerfzijde in  
trekzone

BIJLAGE D BUIZEN AFMETINGEN

REEKS GC - Tabel -



**Reeks GC      Opvullen met 7 schijven: Aluminium diam 25,3 mm**

| <b>C I</b>                | <b>Afmetingen:</b> |            | <b>Opmerkingen</b>                                                                                                                   |
|---------------------------|--------------------|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| glas                      | a =                | 650 mm     | aan zijde met tekst is rand niet vlak<br>dopjes ok<br>langs beide zijden 2 moertjes<br>schroefdraadafdruk op glas: krasje of vuil??? |
|                           | d <sub>ea</sub> =  | 32.00 mm   |                                                                                                                                      |
|                           | d <sub>ia</sub> =  | 29.02 mm   |                                                                                                                                      |
|                           | d <sub>ima</sub> = | 29.25 mm   |                                                                                                                                      |
|                           | d <sub>eb</sub> =  | 32.00 mm   |                                                                                                                                      |
|                           | d <sub>ib</sub> =  | 28.66 mm   |                                                                                                                                      |
|                           | d <sub>imb</sub> = | 28.84 mm   |                                                                                                                                      |
| staal                     | draadstang 4mm     | b = 680 mm |                                                                                                                                      |
| PMMA schijf               | c =                | 5 mm       |                                                                                                                                      |
|                           | d =                | 12.2 mm    |                                                                                                                                      |
| Ruimte tussen de schijven | e =                | mm         |                                                                                                                                      |
|                           | f =                | 75.9 mm    |                                                                                                                                      |
|                           | g =                | 77.0 mm    |                                                                                                                                      |
|                           | h =                | 77.2 mm    |                                                                                                                                      |
|                           | i =                | 78.1 mm    |                                                                                                                                      |
|                           | j =                | 78.3 mm    |                                                                                                                                      |
|                           | k =                | 77.1 mm    |                                                                                                                                      |
|                           | l =                | mm         |                                                                                                                                      |
| Aluminium schijven        | m =                | 3.3 mm     |                                                                                                                                      |
|                           | n =                | 3.3 mm     |                                                                                                                                      |
|                           | o =                | 3.4 mm     |                                                                                                                                      |
|                           | p =                | 3.4 mm     |                                                                                                                                      |
|                           | q =                | 3.3 mm     |                                                                                                                                      |
|                           | r =                | 3.1 mm     |                                                                                                                                      |
| PMMA schijf               | s =                | 3.2 mm     |                                                                                                                                      |
|                           | t =                | 11.8 mm    |                                                                                                                                      |

**Reeks GC      Opvullen met 7 schijven: aluminium diameter 25,3 mm**

| <b>C II</b>               | <b>Afmetingen:</b>                                                                                                                                                                                               | <b>Opmerkingen</b>                                                                                                                                                          |
|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| glas                      | $a = 652 \text{ mm}$<br>$d_{ea} = 32.26 \text{ mm}$<br>$d_{ia} = 28.82 \text{ mm}$<br>$d_{ima} = 29.16 \text{ mm}$<br>$d_{eb} = 32.00 \text{ mm}$<br>$d_{ib} = 29.00 \text{ mm}$<br>$d_{imb} = 29.17 \text{ mm}$ | aan zijde met tekst is de rand niet overal glad<br>dopjes OK<br>slechts 1 moertje langs kant met tekst<br>ook hier schroefdraadafdruk<br>verticale krasjes langs buitenkant |
| staal                     | draadstang 4mm $b = 680 \text{ mm}$                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                             |
| PMMA schijf               | $c = 5 \text{ mm}$<br>$d = 11.7 \text{ mm}$                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                             |
| Ruimte tussen de schijven | $e = 77.5 \text{ mm}$<br>$f = 76.6 \text{ mm}$<br>$g = 77.6 \text{ mm}$<br>$h = 77.7 \text{ mm}$<br>$i = 77.3 \text{ mm}$<br>$j = 77.7 \text{ mm}$<br>$k = 77.0 \text{ mm}$                                      |                                                                                                                                                                             |
| Aluminium schijven        | $l = 79.4 \text{ mm}$<br>$m = 3.1 \text{ mm}$<br>$n = 3.3 \text{ mm}$<br>$o = 3.0 \text{ mm}$<br>$p = 3.5 \text{ mm}$<br>$q = 3.4 \text{ mm}$<br>$r = 3.3 \text{ mm}$<br>$s = 3.1 \text{ mm}$                    |                                                                                                                                                                             |
| PMMA schijf               | $t = 10.0 \text{ mm}$                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                             |

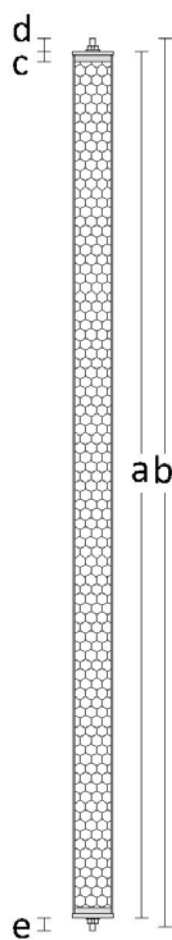
**Reeks GC      Opvullen met 7 schijven: Aluminium diameter 25,3 mm**

| C III                     |                | Afmetingen:                   |          | Opmerkingen                                                           |
|---------------------------|----------------|-------------------------------|----------|-----------------------------------------------------------------------|
| glas                      | ongecoat       | a =                           | 649 mm   | 2 moertjes langs elke kant<br>3 lagen gecoat!<br>coating enkel buiten |
|                           |                | d <sub>ea</sub> =             | 32.22 mm |                                                                       |
|                           |                | d <sub>i<sub>a</sub></sub> =  | 29.00 mm |                                                                       |
|                           |                | d <sub>i<sub>ma</sub></sub> = | 29.00 mm |                                                                       |
|                           |                | d <sub>eb</sub> =             | 32.20 mm |                                                                       |
|                           |                | d <sub>i<sub>b</sub></sub> =  | 29.20 mm |                                                                       |
|                           |                | d <sub>i<sub>mb</sub></sub> = | 29.20 mm |                                                                       |
|                           |                |                               |          |                                                                       |
|                           |                | d <sub>ea</sub> =             | 33.54 mm |                                                                       |
|                           |                | d <sub>i<sub>a</sub></sub> =  | 29.00 mm |                                                                       |
|                           |                | d <sub>i<sub>ma</sub></sub> = | 29.00 mm |                                                                       |
|                           |                | d <sub>eb</sub> =             | 33.56 mm |                                                                       |
|                           |                | d <sub>i<sub>b</sub></sub> =  | 29.20 mm |                                                                       |
|                           |                | d <sub>i<sub>mb</sub></sub> = | 29.20 mm |                                                                       |
|                           |                |                               |          |                                                                       |
| staal                     | draadstang 4mm | b =                           | 680 mm   |                                                                       |
|                           |                |                               |          |                                                                       |
| PMMA schijf               |                | c =                           | 5 mm     |                                                                       |
|                           |                | d =                           | 12.1 mm  |                                                                       |
|                           |                |                               |          |                                                                       |
| Ruimte tussen de schijven |                | e =                           | 78.7 mm  |                                                                       |
|                           |                | f =                           | 77.0 mm  |                                                                       |
|                           |                | g =                           | 76.8 mm  |                                                                       |
|                           |                | h =                           | 76.9 mm  |                                                                       |
|                           |                | i =                           | 77.5 mm  |                                                                       |
|                           |                | j =                           | 76.8 mm  |                                                                       |
|                           |                | k =                           | 75.9 mm  |                                                                       |
|                           |                |                               |          |                                                                       |
| Aluminium schijven        |                | l =                           | 80.7 mm  |                                                                       |
|                           |                | m =                           | 3.1 mm   |                                                                       |
|                           |                | n =                           | 3.5 mm   |                                                                       |
|                           |                | o =                           | 3.3 mm   |                                                                       |
|                           |                | p =                           | 2.7 mm   |                                                                       |
|                           |                | q =                           | 3.2 mm   |                                                                       |
|                           |                | r =                           | 3.6 mm   |                                                                       |
|                           |                |                               |          |                                                                       |
| PMMA schijf               |                | s =                           | 3.2 mm   |                                                                       |
|                           | tekst          | t =                           | 11.9 mm  |                                                                       |

## BIJLAGE D BUIZEN AFMETINGEN

REEKS GB

- Tabel -



**Reeks GB      *Opvullen met bolletjes: bonen "meaple peas"***

| <b>GB I</b> | <b>Afmetingen</b>                                                                                                                                                                                                | <b>Opmerkingen</b>                                                                                                                                            |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| glas        | $a = 649 \text{ mm}$<br>$d_{ea} = 32.20 \text{ mm}$<br>$d_{ia} = 29.00 \text{ mm}$<br>$d_{ima} = 29.27 \text{ mm}$<br>$d_{eb} = 32.10 \text{ mm}$<br>$d_{ib} = 29.00 \text{ mm}$<br>$d_{imb} = 29.27 \text{ mm}$ | dopje a werd schuin verkleefd met buiswand<br>aan beide zijden werden 2 moertjes aangebracht<br>korrels zitten betrekkelijk vast<br>getrild met houten blokje |
| staal       | $b = 680 \text{ mm}$<br>$d = 12.0 \text{ mm}$<br>$e = 11.3 \text{ mm}$                                                                                                                                           |                                                                                                                                                               |
| PMMA schijf | $d_a = 28.94 \text{ mm}$<br>$d_b = 29.27 \text{ mm}$<br>$c = 5 \text{ mm}$                                                                                                                                       |                                                                                                                                                               |

**Reeks GB      *Opvullen met bolletjes: bonen "meaple peas"***

| <b>GB II</b> | <b>Afmetingen</b>                                                                                                                                                                                                | <b>Opmerkingen</b>                                                                                   |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| glas         | $a = 649 \text{ mm}$<br>$d_{ea} = 32.00 \text{ mm}$<br>$d_{ia} = 28.72 \text{ mm}$<br>$d_{ima} = 28.82 \text{ mm}$<br>$d_{eb} = 32.22 \text{ mm}$<br>$d_{ib} = 29.00 \text{ mm}$<br>$d_{imb} = 29.37 \text{ mm}$ | twee moertjes aan beide kanten<br>dopjes ok<br>(bijna) geen korrels los<br>getrild met houten blokje |
| staal        | $b = 680 \text{ mm}$<br>$d = 12.2 \text{ mm}$<br>$e = 11.7 \text{ mm}$                                                                                                                                           | staal werd manueel uitgebogen                                                                        |
| PMMA schijf  | $d_a = 28.70 \text{ mm}$<br>$d_b = 28.98 \text{ mm}$<br>$c = 5 \text{ mm}$                                                                                                                                       |                                                                                                      |

**Reeks GB      Opvullen met bolletjes: bonen "meaple peas"**

| <b>GB III</b> | <b>Afmetingen</b>           | <b>Opmerkingen</b>                                                                                                                                                                   |
|---------------|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| glas          | a = 649 mm                  | gecoat binnen/buiten<br>dopje aan kant niet tekst niet volledig tot tegen het glas<br>enkel aan kant tekst 2 moertjes<br>betrekkelijk goed gevuld<br>getrild door te tikken op tafel |
|               | d <sub>ea</sub> = 32.00 mm  |                                                                                                                                                                                      |
|               | d <sub>ia</sub> = 29.20 mm  |                                                                                                                                                                                      |
|               | d <sub>ima</sub> = - mm     |                                                                                                                                                                                      |
|               | d <sub>eb</sub> = 32.10 mm  |                                                                                                                                                                                      |
|               | d <sub>ib</sub> = 29.10 mm  |                                                                                                                                                                                      |
|               | d <sub>imb</sub> = - mm     |                                                                                                                                                                                      |
|               |                             |                                                                                                                                                                                      |
|               | d <sub>ea</sub> = 32.90 mm  |                                                                                                                                                                                      |
|               | d <sub>ia</sub> = 28.70 mm  |                                                                                                                                                                                      |
|               | d <sub>ima</sub> = 28.90 mm |                                                                                                                                                                                      |
|               | d <sub>eb</sub> = 32.80 mm  |                                                                                                                                                                                      |
|               | d <sub>ib</sub> = 28.80 mm  |                                                                                                                                                                                      |
|               | d <sub>imb</sub> = 28.70 mm |                                                                                                                                                                                      |
| staal         | b = 680 mm                  | tekst                                                                                                                                                                                |
|               | d = 8.6 mm                  |                                                                                                                                                                                      |
|               | e = 12.2 mm                 |                                                                                                                                                                                      |
| PMMA schijf   | c = 5 mm                    |                                                                                                                                                                                      |

**Reeks GB      Opvullen met bolletjes: bonen "meaple peas"**

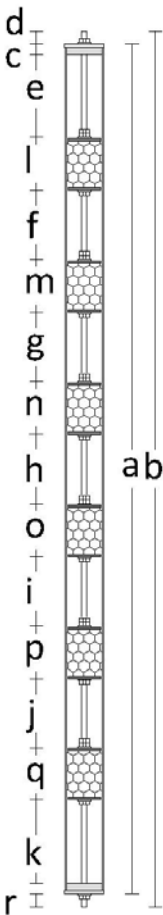
**GB.IV.**

|             |            |                             |                                                                                               |
|-------------|------------|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| glas        |            | a = 651 mm                  | stalen staaf niet tegen gewrongen<br>staaf niet centraal<br>aan kant met tekst slechts 1 moer |
|             |            | d <sub>ea</sub> = 32.04 mm  |                                                                                               |
|             |            | d <sub>ia</sub> = 28.54 mm  |                                                                                               |
|             |            | d <sub>ima</sub> = 28.86 mm |                                                                                               |
|             |            | d <sub>eb</sub> = 32.14 mm  |                                                                                               |
|             |            | d <sub>ib</sub> = 29.14 mm  |                                                                                               |
|             |            | d <sub>imb</sub> = 29.38 mm |                                                                                               |
| staal       | draadstang | b = 679 mm                  |                                                                                               |
|             |            | d = 11.2 mm                 |                                                                                               |
|             |            | e = 10 mm                   |                                                                                               |
| PMMA schijf |            | c = 5 mm                    |                                                                                               |

BIJLAGE D

BUIZEN AFMETINGEN

REEKS GD - Tabel -



**Reeks GD      Opvullen met bolletjes: bonen "meaple peas" tussen aluminium schijven**

| GD I                              | Afmetingen         |              | Opmerkingen                                                                                                                                          |
|-----------------------------------|--------------------|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| glas                              | a =                | 649 mm       | zeer hard moeten drukken om in buis te krijgen<br>stalen staaf niet centraal en Al schijfjes soms bijna tot tegen glas<br>2 moertjes langs elke kant |
|                                   | d <sub>ea</sub> =  | 32.14 mm     |                                                                                                                                                      |
|                                   | d <sub>ia</sub> =  | 29.10 mm     |                                                                                                                                                      |
|                                   | d <sub>ima</sub> = | 29.35 mm     |                                                                                                                                                      |
|                                   | d <sub>eb</sub> =  | 32.00 mm     |                                                                                                                                                      |
|                                   | d <sub>ib</sub> =  | 28.88 mm     |                                                                                                                                                      |
|                                   | d <sub>imb</sub> = | 29.30 mm     |                                                                                                                                                      |
| staal                             | draadstang 4mm     | b = 680.0 mm |                                                                                                                                                      |
| PMMA schijf                       | c =                | 5 mm         |                                                                                                                                                      |
|                                   | d =                | 12.8 mm      |                                                                                                                                                      |
| Aluminium schijven                | dikte              | 2 mm         |                                                                                                                                                      |
|                                   | diameter           | 25 mm        |                                                                                                                                                      |
| Lege ruimte tussen de schijven    | e =                | 56.0 mm      |                                                                                                                                                      |
|                                   | f =                | 63.0 mm      |                                                                                                                                                      |
|                                   | g =                | 64.0 mm      |                                                                                                                                                      |
|                                   | h =                | 61.0 mm      |                                                                                                                                                      |
|                                   | i =                | 66.0 mm      |                                                                                                                                                      |
|                                   | j =                | 66.0 mm      |                                                                                                                                                      |
|                                   | k =                | 73.0 mm      |                                                                                                                                                      |
| Gevulde ruimte tussen de schijven | l =                | 32.0 mm      |                                                                                                                                                      |
|                                   | m =                | 31.0 mm      |                                                                                                                                                      |
|                                   | n =                | 30.0 mm      |                                                                                                                                                      |
|                                   | o =                | 32.0 mm      |                                                                                                                                                      |
|                                   | p =                | 29.0 mm      |                                                                                                                                                      |
|                                   | q =                | 29.0 mm      |                                                                                                                                                      |
| tekst                             | r =                | 11.2 mm      |                                                                                                                                                      |

**Reeks GD      Opvullen met bolletjes: bonen "meaple peas" tussen aluminium schijven**

| GD II                             |                    | Afmetingen |       | Opmerkingen                                       |
|-----------------------------------|--------------------|------------|-------|---------------------------------------------------|
| glas                              | a =                | 649        | mm    |                                                   |
|                                   | d <sub>ea</sub> =  | 32.14      | mm    |                                                   |
|                                   | d <sub>ia</sub> =  | 29.10      | mm    |                                                   |
|                                   | d <sub>ima</sub> = | 29.35      | mm    | aan zijde met tekst is de rand niet volledig vlak |
|                                   | d <sub>eb</sub> =  | 32.00      | mm    | staal zit meer centraal dan bij GC I              |
|                                   | d <sub>ib</sub> =  | 28.88      | mm    | korrels veel minder vast                          |
|                                   | d <sub>imb</sub> = | 29.30      | mm    | 2 moertjes langs elke kant                        |
| staal                             | draadstang 4mm     | b =        | 680.0 | mm                                                |
| PMMA schijf                       | c =                | 5          | mm    |                                                   |
|                                   | d =                | 12.6       | mm    |                                                   |
| Aluminium schijven                | dikte              | 2          | mm    |                                                   |
|                                   | diameter           | 25         | mm    |                                                   |
| Lege ruimte tussen de schijven    | e =                | 65.0       | mm    |                                                   |
|                                   | f =                | 61.0       | mm    |                                                   |
|                                   | g =                | 61.0       | mm    |                                                   |
|                                   | h =                | 62.0       | mm    |                                                   |
|                                   | i =                | 61.0       | mm    |                                                   |
|                                   | j =                | 62.0       | mm    |                                                   |
|                                   | k =                | 60.0       | mm    |                                                   |
| Gevulde ruimte tussen de schijven | l =                | 35.0       | mm    |                                                   |
|                                   | m =                | 32.0       | mm    |                                                   |
|                                   | n =                | 33.0       | mm    |                                                   |
|                                   | o =                | 31.0       | mm    |                                                   |
|                                   | p =                | 33.0       | mm    |                                                   |
|                                   | q =                | 33.0       | mm    |                                                   |
|                                   | tekst              | r =        | 12.2  | mm                                                |

**Reeks GD Opvullen met bolletjes: bonen "meaple peas" tussen alumium schijven**

**GD III**

|                                   |                |                    |       |    |                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----------------------------------|----------------|--------------------|-------|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| glas                              | ongecoat       | a =                | 642   | mm | staal zit meer centraal dan bij GC I<br>korrels veel minder vast, minder dan GCII<br>2 moertjes langs elke kant<br>glas aan zijde tekst stuk verbrijzeld (werd afgezaagd)<br>dubbele moer niet aan tekstzijde<br>gecoat binnen en buiten |
|                                   |                | d <sub>ea</sub> =  | 32.00 | mm |                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                   |                | d <sub>ia</sub> =  | 29.10 | mm |                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                   |                | d <sub>ima</sub> = | -     | mm |                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                   |                | d <sub>eb</sub> =  | 32.10 | mm |                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                   |                | d <sub>ib</sub> =  | 29.20 | mm |                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                   |                | d <sub>imb</sub> = | -     | mm |                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                   | gecoat         | d <sub>ea</sub> =  | 33.00 | mm |                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                   |                | d <sub>ia</sub> =  | 28.40 | mm |                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                   |                | d <sub>ima</sub> = | 28.20 | mm |                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                   |                | d <sub>eb</sub> =  | 32.66 | mm |                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                   |                | d <sub>ib</sub> =  | 28.75 | mm |                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                   |                | d <sub>imb</sub> = | 28.70 | mm |                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                   |                |                    |       |    |                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                   |                |                    |       |    |                                                                                                                                                                                                                                          |
| staal                             | draadstang 4mm | b =                | 677.0 | mm |                                                                                                                                                                                                                                          |
| PMMA schijf                       |                | c =                | 7     | mm |                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                   |                | d =                | 13.3  | mm |                                                                                                                                                                                                                                          |
| Aluminium schijven                |                | dikte              | 2     | mm |                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                   |                | diameter           | 25    | mm |                                                                                                                                                                                                                                          |
| Lege ruimte tussen de schijven    |                | e =                | 70.0  | mm |                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                   |                | f =                | 68.0  | mm |                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                   |                | g =                | 68.0  | mm |                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                   |                | h =                | 65.0  | mm |                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                   |                | i =                | 70.0  | mm |                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                   |                | j =                | 65.0  | mm |                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                   |                | k =                | 56.0  | mm |                                                                                                                                                                                                                                          |
| Gevulde ruimte tussen de schijven |                | l =                | 26.0  | mm |                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                   |                | m =                | 27.0  | mm |                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                   |                | n =                | 30.0  | mm |                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                   |                | o =                | 26.0  | mm |                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                   |                | p =                | 30.0  | mm |                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                   |                | q =                | 30.0  | mm |                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                   |                | r =                | 12.5  | mm |                                                                                                                                                                                                                                          |

## BIBLIOGRAFIE

*"It is not just the transparency, but the sense of wonder by which architects and engineers are inspired to use glass in unconventional ways"*  
MVRDV/Jacob van Rijs

---

<sup>I</sup> KADRI I., «*Adding Freeform to Contemporary Architecture with Resin Glass Laminates*», Glass Processing Days 2003, Conference Proceedings Book, pp. 444-448.

<sup>II</sup> BELIS J., «*Kipsterkte van monolithische en gelamineerde glazen liggers*», doctoraatsthesis, Universiteit Gent, 2005.

<sup>III</sup> AA.VV., «*Structural Use of Glass*», IABSE, Zürich, 2008.

<sup>IV</sup> WTCB, «*Glas en glasproducten, functies van beglazing*», Technische Voorlichting 214, december 1999.

<sup>V</sup> WURM J., «*Glass structures: design and construction of self-supporting skins*», Birkhäuser, Basel, 2007.

<sup>VI</sup> SIMONIS F., «*Coatings op glas: recente ontwikkelingen*», uit NVG , nr. 1, februari 1990, pp.2-7.

<sup>VII</sup> BOS F., «*Hybrid glass-acrylic façade struts*», Glass Performance days 2007, 2007, pp. 222-226.

<sup>VIII</sup> VAN NIEUWENHUIJZEN E.J., «*The Laminated Glass Column*», Glass Processing Days, 2005.

<sup>IX</sup> HOF P., «*Investigations on U-shaped glass with a polyurethane lacquer for splinter shield*», Glass Performance days 2007, 2007, pp. 314-316.

<sup>X</sup> TRIER F., «*Sol-Gel Coated Glass Tubes for Architectural Application*», Glass Processing Days 2001, pp. 808-810.

<sup>XI</sup> AKZO NOBEL, «*Complete Guide to Powder Coatings*», Issue 1, November 1999.

<sup>XII</sup> AA. VV., «*Encyclopedia of Polymer Science and Technology Vol.5*», Coating Methods, Powder Technology, Interscience, New York, 1964, pp.570-603.

<sup>XIII</sup> AA. VV., «*BBT voor de metaalbewerkende nijverheid*», Academia Press, Gent, 2008.

<sup>XIV</sup> SOLVAY SOLEXIS, «*Hyflon MFA en PFA Design Guide*», 2002.

<sup>XV</sup> AA.VV., «*Untersuchung von Kunststoffbeschichtungen auf Laborgeräten und Chemikalienflaschen aus Glas*», Rapport Nr. : 9757, 1996.