

Ontwerpen met glas in hedendaagse architectuur. Capita Selecta

Koen Mersy

Studentennummer: 01500499

Promotoren: prof. dr. ir.-arch. Jan Belis, prof. dr. ir.-arch. Emiel De Kooning
Begeleider: prof. dr. Ronald De Meyer

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

Academiejaar 2019-2020



Ontwerpen met glas in hedendaagse architectuur

Capita Selecta

Koen Mersy



UNIVERSITEIT
GENT

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 bepalingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze masterproef.

Koen Mersy. 15 juni 2020

Foto op titelblad: © Filip Dujardin (fotograaf).

De foto werd genomen op 13 november 2009.

Geraadpleegd van <https://www.flickr.com/photos/visitflanders/5667178028/in/photostream/>

1. WOORD VOORAF

Mijn interesse in glas werd voor een groot deel opgewekt tijdens de lessen van het keuzevak 'Glas- en houtconstructies' waarvan prof. dr. ir.-arch. Jan Belis het deel 'Glass Structures' voor zijn rekening neemt. Ik leerde de veelzijdigheid van glas kennen en mijn fascinatie voor het materiaal heeft geleid tot het voorstellen van een eigen masterproefonderwerp waarvan de oorspronkelijke Engelstalige titel luidde *"Architecture with nothing to hide? Glass Architecture of the 21st century. Capita Selecta: an architectural and technical review"*. Later heb ik evenwel besloten om mijn eindwerk in het Nederlands te schrijven.

Na het bewandelen van enkele zijwegen en het maken van vele overwegingen van wat wél en wat niet in de masterproef zou komen, is er uiteindelijk aan het initiële idee niet veel veranderd. Ik wou vanaf de aanvang een overzicht maken van hedendaagse 'glasarchitectuur' dat als referentiewerk zou kunnen dienen voor andere ontwerpers. Daarbij mag niet gedacht worden aan de talloze glazen kantoorgebouwen. Als architect in spe wou ik nagaan hoe de vele (en vaak innovatieve) productietechnieken kunnen leiden tot het creëren van unieke architectuur. Architectuur waarin glas een cruciale rol speelt om het ontwerpconcept van de architect te kunnen waarmaken.

Eerst en vooral wil ik mijn promotor prof. dr. ir.-arch. Jan Belis, mijn copromotor prof. dr. ir.-arch. Mil De Kooning en mijn begeleider prof. dr. Ronny De Meyer bedanken voor het aanvaarden van mijn onderwerp. Ik dank hen voor het opbrengen van de nodige flexibiliteit tijdens het voorbije jaar. Zij gaven me namelijk de mogelijkheid om zelfstandig uit te zoeken hoe ik de masterproef het beste zou aanpakken. Daarbij werd er toch telkens voor gezorgd dat ik op het juiste pad bleef.

In het bijzonder wil ik professor Belis bedanken voor het aanbrengen van mogelijke gevalstudies en voor het helpen bij het vinden van contactpersonen voor de vragenlijst. Ook naar professor De Kooning is een woord van dank gericht: het is mede dankzij zijn enthousiasme tijdens het 'ontdekken' van de mogelijkheden van glas dat ik gedurende het hele proces overtuigd bleef van de relevantie van mijn masterproefonderwerp.

Daarnaast wil ik Steffen Feirabend, Richard Green, John Kooymans, Will Laufs, Tim Macfarlane, Rob Nijssse, Gijs Rikken, Jacques Raynaud, Jens Schneider, Francis Serruys en de zes andere respondenten bedanken voor het invullen van mijn online vragenlijst. Dit onderdeel betekent een grote meerwaarde voor de masterproef.

Een extra woord van dank gaat naar mijn vader voor zijn inzet bij het proeflezen van mijn teksten. Ten slotte was het fijn om te weten dat ik altijd terecht kon bij mijn ouders, mijn vriendin en mijn vrienden voor een luisterend oor.

2. ABSTRACT NEDERLANDS

Ontwerpen met glas in hedendaagse architectuur. Capita Selecta

Het gebruik van glas in hedendaagse architectuur is vanzelfsprekend. Tijdens een ontwerpproces wordt glas routinematig ingezet als een materiaal dat dankzij haar transparantie licht in een gebouw toelaat. Glas wordt daarbij vaak gezien als een tweedimensionaal opvulmateriaal. Deze masterproef onderzoekt hoe glas ook op andere manieren kan worden ingezet. Vanwege een toename in wetenschappelijke kennis en nieuwe productietechnieken, is glas vandaag één van de snelst ontwikkelende bouwmaterialen.

De masterproef is opgedeeld in drie delen. In het eerste deel wordt er aan de hand van gevalstudies een overzicht gegeven van de vele mogelijke toepassingen van glas in hedendaagse publieke architectuur. Telkens ligt er een focus op de technische kant van het project, zodat de lezer niet enkel een notie krijgt van *wat* er bestaat, maar ook *hoe* het uitgevoerd kan worden. De masterproef is bedoeld als een referentiewerk voor ontwerpers die soortgelijke concepten willen toepassen in hun projecten.

Er wordt geen volledigheid nagestreefd, vandaar ‘Capita Selecta’ in de titel. De gevalstudies worden onderverdeeld in zes thema’s: **1. Glazen metselwerk**, over het bouwen met massieve glazen bakstenen; **2. Gegolfde glaspanelen**, over de esthetische en structurele kwaliteiten van gegolfd glas; **3. Dubbel gekromde glaspanelen**, over organische vormen uit glas; **4. Koud gebogen glaspanelen**, over de mogelijkheid om glas te buigen op de bouwplaats; **5. Bedrukte glaspanelen**, over wanneer glas bewust niet als een transparant materiaal ingezet wordt; **6. Glazen draagstructuren**, over de mogelijkheden van glas als dragend materiaal.

Het tweede deel behandelt de antwoorden op een vragenlijst die in het kader van deze masterproef werd opgesteld. Een selectie van ingenieurs en architecten die professioneel bezig zijn met het materiaal glas kreeg een uitnodiging. Aan de hand van open vragen werd er onder meer gepolst naar wat voor hen het meest uitdagende glasproject was en of ze onlangs projecten hebben gerealiseerd die vijf jaar geleden nog niet mogelijk waren. Het doel van deze vragenlijst is om een beter inzicht te krijgen in wat het materiaal nog allemaal te bieden heeft. Enkele respondenten waren betrokken bij projecten die besproken worden in het eerste deel van de masterproef.

Het derde deel gaat over innovatieve glasproducten. Aan de hand van de analyses uit het tweede deel wordt er een selectie gemaakt van recente ontwikkelingen uit de glasindustrie die relevant zijn (of kunnen zijn) voor architectonische toepassingen. Sommige producten worden reeds toegepast in gebouwen (vacuüm glas, slim glas, anti-reflecterend glas, zelfreinigend glas en verwarmd glas), andere dienen nog verder te worden verkend vooraleer ze gebruiksklaar zijn voor de architectuurwereld (capillair glas, dun glas, transparante zonnepanelen en transparante antennes). Er wordt gekozen voor producten die geacht worden een meerwaarde te kunnen bieden in gebouwen en het overwegen waard zijn om te implementeren bij het ontwerpproces. Naast de visie van architecten spelen uiteraard meer randvoorwaarden (vb. kosten of brandveiligheid) een rol om te bepalen of een product kan doorbreken als volwaardig architectonisch element, maar deze vallen buiten de scope van de masterproef.

3. ABSTRACT ENGLISH

Designing with glass in contemporary architecture. Capita Selecta

The use of glass in contemporary architecture is self-evident. During a design process, glass is routinely used as a material that allows light into a building thanks to its transparency. Glass is thereby often seen as a two-dimensional filling material. This MSc thesis examines how glass can also be used in other ways. Due to an increase in scientific knowledge and new production techniques, glass is one of the fastest developing building materials today.

The MSc thesis is divided into three parts. In the first part, case studies provide an overview of the many possible applications of glass in contemporary public architecture. There is a focus on the technical side of each project, so that the reader not only gets a notion of *what* exists, but also *how* it can be carried out. The thesis is intended as a reference work for designers who want to apply similar concepts in their projects.

No completeness is sought, hence 'Capita Selecta' in the title. The case studies are divided into six themes: **1. Glass masonry**, about building with solid glass bricks; **2. Corrugated glass panels**, about the aesthetic and structural qualities of corrugated glass; **3. Double curved glass panels**, about organic forms in glass; **4. Cold bent glass panels**, about the possibility of bending glass on the construction site; **5. Printed glass panels**, about when glass is deliberately not used as a transparent material; **6. Glass structures**, about the possibilities of glass as a load bearing material.

The second part deals with the answers to a questionnaire that was drawn up in the context of this MSc thesis. A selection of engineers and architects who are professionally working with the material glass received an invitation. By means of open questions, it was examined, among other things, what was the most challenging glass project for them and whether they have recently completed projects that were not possible five years ago. The purpose of this questionnaire is to gain a better insight into what the material still has to offer. A few respondents were involved in projects discussed in the first part of the MSc thesis.

The third part is about innovative glass products. Based on the analyzes in the second part, a selection is made of recent developments in the glass industry that are (or may be) relevant for architectural applications. Some products are already used in buildings (vacuum glass, smart glass, anti-reflective glass, self-cleaning glass and heated glass), others need to be explored further before they are ready for use in the architectural world (capillary glass, thin glass, transparent solar panels and transparent antennas). Products are chosen that are considered to offer added value in buildings and are worth considering implementing in the design process. In addition to the vision of architects, of course more preconditions (e.g. costs or fire safety) play a role in determining whether a product can break through as a fully-fledged architectural element, but these do not belong to the scope of the MSc thesis.

4. OPMERKINGEN VAN DE AUTEUR

1. REFERENTIES

De bronvermeldingen van de gebruikte referenties en afbeeldingen worden telkens na het desbetreffende hoofdstuk opgesomd. In het bijzonder kunnen de gevalstudies uit DEEL I gelezen worden als ‘aparte fiches’, en zodoende waarborgt deze aanpak meer helderheid en gebruiksgemak bij de lezer.

2. KEUZE VAN DE GEVALSTUDIES

Bij elk hoofdstuk werden er twee of drie gevalstudies gekozen die van een voldoende architecturale kwaliteit zijn en die er zich toe leenden om de vele verschillende productietechnieken voor te stellen. Er werd hierbij geen chronologische volgorde gehanteerd. De projecten werden in een volgorde geplaatst die het mogelijk maakte om op de beste manier ‘het verhaal’ te kunnen vertellen en eventueel te kunnen vergelijken tussen de projecten onderling. Toch zijn de beschrijvingen zo opgevat dat elke gevalstudie eenvoudig als een aparte topic kan gelezen worden. De veertien gekozen projecten betreffen allemaal gebouwen die in de laatste vijftien jaar zijn opgeleverd (2005 tot 2020).

3. DISCLAIMER

De selectie van de projecten is op geen enkele wijze gebaseerd om bepaalde bedrijven of producten te bevoordelen. Deze masterproef kwam tot stand vanuit persoonlijke interesse en heeft in geen enkel opzicht een economisch motief. De besproken producten krijgen geen enkele voorkeur van de auteur en worden louter aangehaald om de projecten in detail te kunnen toelichten. Alle informatie over bepaalde producten of bepaalde bedrijven werd gehaald uit de referenties die telkens na het betreffende project worden meegegeven. De auteur is in geen enkel geval verantwoordelijk voor de correctheid of de volledigheid van de informatie uit deze externe pagina's.

4. ADDENDA

Achteraan de masterproef zijn er drie addenda toegevoegd: ‘het harden van glas’, ‘het breukgedrag van veiligheidsglas’ en ‘low-e coatings’. Aan de hand van deze addenda kan de lezer extra informatie vinden over zaken die vaak terugkomen in de gevalstudies.

5. INTERNETARTIKELS

Alle digitale bronnen werden in de periode tussen januari 2020 en juni 2020 geraadpleegd.

5. PREAMBULE

Invloed van coronamaatregelen op de masterproef

Oorspronkelijk was het gepland om aan de masterproef nog een extra deel toe te voegen, waarin de gekozen gevalstudies zouden vergeleken worden met 'glasarchitectuur' uit andere architectuurperiodes in de geschiedenis. Er zijn ongetwijfeld gelijkaardige concepten en visies te herkennen bij het inzetten van glas. Het zou interessant geweest zijn om de verschillende uitvoeringstechnieken met elkaar te vergelijken. Er kan bijvoorbeeld gedacht worden aan de gevel uit massieve glasblokken van Maison de Verre in Parijs (1928 – 1932), ontworpen door Pierre Chareau en Bernard Bijvoet, of aan het gebruik van gekleurd en gebogen glas tijdens de art-nouveau periode. Ook het Farnsworth House in Illinois (1946 – 1951) van Mies van der Rohe en het Glass House in Connecticut (1947 – 1949) van Philip Johnson zouden interessante vergelijkingspunten geweest zijn.

Vanwege de sluiting van de universiteitsbibliotheken was het echter moeilijk om aan voldoende en goed bronmateriaal te geraken om dergelijk architectuurkritisch onderzoek te kunnen uitvoeren. De rol van glas in niet-hedendaagse architectuur werd bijgevolg achterwege gelaten bij deze masterproef. Er werd daarom wel extra aandacht besteed aan een degelijke en uitgebreide toelichting van de hedendaagse gevalstudies, waarvan er gemakkelijker bronmateriaal te vinden is online.

Ook leefde het idee om interviews af te nemen. Vanwege de coronamaatregelen was het niet langer mogelijk om met personen in levende lijve af te spreken. Daarom werd dit onderdeel hervormd naar een online vragenlijst die naar geselecteerde personen werd gestuurd.

Het uitstel van indienen naar 15 juni 2020 gaf de mogelijkheid om de geheroriënteerde masterproef tot een goed einde te brengen.

Deze preambule werd in overleg tussen de student en de promotoren opgesteld en door alle partijen goedgekeurd.

Koen Mersy (student)

prof. dr. ir.-arch. Jan Belis (promotor)

prof. dr. ir.-arch. Mil De Kooning (copromotor)

prof. dr. Ronald De Meyer (begeleider)

6. INHOUD

1. WOORD VOORAF	I
2. ABSTRACT NEDERLANDS	II
3. ABSTRACT ENGLISH	III
4. OPMERKINGEN VAN DE AUTEUR.....	IV
5. PREAMBULE	V
6. INHOUD.....	VI

DEEL I GEVALSTUDIES..... 1

1. GLAZEN METSELWERK.....	3
1.1 CRYSTAL HOUSES • MVRDV • AMSTERDAM, NEDERLAND	3
1.2 ATOCHA HERDENKINGSMONUMENT • ESTUDIO SIC • MADRID, SPANJE.....	12
2. GEGOLFDE GLASPANELEN	18
2.1 CASA DA MÚSICA • OMA • PORTO, PORTUGAL	18
2.2 MUSEUM AAN DE STROOM • NEUTELINGS RIEDIJK • ANTWERPEN, BELGIË.....	24
3. DUBBEL GEKROMDE GLASPANELEN	29
3.1 EMPORIA SHOPPINGCENTER • WINGÅRD • MALMÖ, ZWEDEN	29
3.2 FONDATION LOUIS VUITTON • GEHRY PARTNERS • PARIJS, FRANKRIJK	35
4. KOUD GEBOGEN GLASPANELEN.....	40
4.1 IAC HOOFDKANTOOR • GEHRY PARTNERS • NEW YORK, VS.....	40
4.2 INKOM VAN GOGH MUSEUM • KISHO KUROKAWA • AMSTERDAM, NEDERLAND.....	47
4.3 INKOM STATION STRAATSBURG • DUTHILLEUL • STRAATSBURG, FRANKRIJK	60
5. BEDRUKTE GLASPANELEN.....	66
5.1 DE GLAZEN BOERDERIJ • MVRDV • SCHIJNDEL, NEDERLAND.....	66
5.2 INSTITUUT VOOR BEELD EN GELUID • NEUTELINGS RIEDIJK • HILVERSUM, NEDERLAND.....	76
6. GLAZEN DRAAGSTRUCTUREN.....	84
6.1 APPLE WINKEL FIFTH AVENUE • BOHLIN CYWINSKI JACKSON • NEW YORK, VS.....	84
6.2 GLAZEN BEHUIZING VOOR HISTORISCHE VATEN • BLUM & SCHULTZE • DRESDEN, DUITSLAND	95
6.3 MUSEUM ATELIER AUDEMARS PIGUET • BIG • LE BRASSUS, ZWITSERLAND	102

DEEL II VRAGENLIJST OVER BOUWEN MET GLAS 113

1.	OPZET VAN DE VRAGENLIJST	115
2.	RESPONDENTEN	116
3.	VRAGEN EN ANTWOORDEN	117
3.1	VRAAG 1/7: BEHEER VAN OPGEDANE KENNIS	117
3.2	VRAAG 2/7: MEEST UITDAGENDE PROJECT	120
3.3	VRAAG 3/7: MOTOR VOOR INNOVATIES	126
3.4	VRAAG 4/7: RECENTE GLASTOEPASSINGEN	129
3.5	VRAAG 5/7: VERWACHTE DOORBRAGEN IN GLAS	132
3.6	VRAAG 6/7: INVLOED VAN BOUWCODES	135
3.7	VRAAG 7/7: MOTIVATIE OM TE SPECIALISEREN	138

DEEL III INNOVATIEVE GLASPRODUCTEN 141

1.	VACUÛM GLAS	144
2.	SLIM GLAS	149
3.	ANTI-REFLECTEREND GLAS	155
4.	ZELFREINIGEND GLAS	157
5.	VERWARMD GLAS	161
6.	CAPILLAIR GLAS	166
7.	DUN GLAS	169
8.	TRANSPARANTE ZONNEPANELEN	176
9.	TRANSPARANTE ANTENNES	178

CONCLUSIE	181
-----------------	-----

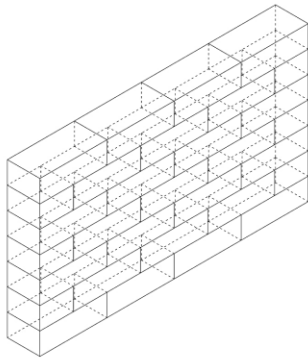
ADDENDA..... 183

ADDENDUM 1 HARDEN VAN GLAS.....	185
ADDENDUM 2 BREUKGEDRAG VAN VEILIGHEIDSGLAS	190
ADDENDUM 3 LOW-E COATINGS	194

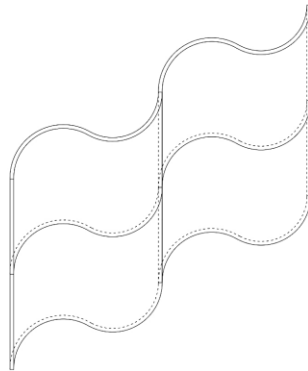
DEEL I

GEVALSTUDIES

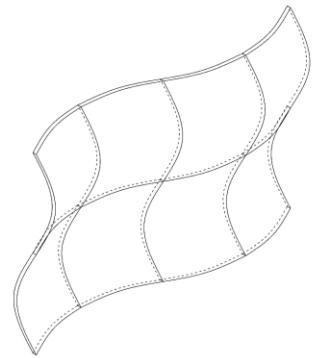
1. GLAZEN METSELWERK



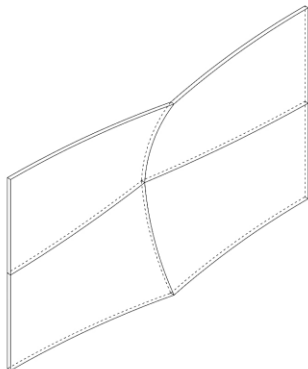
2. GEGOLFD GLAS



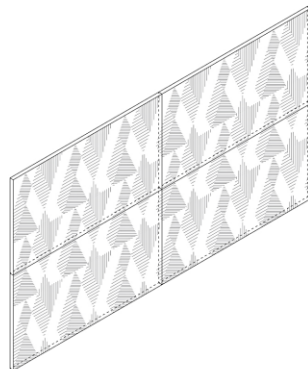
3. DUBBEL GEKROMD GLAS



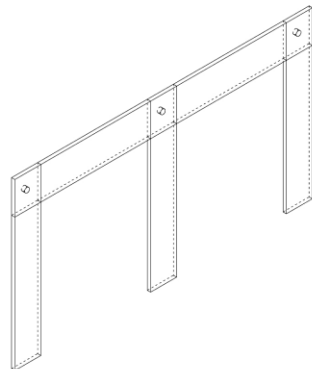
4. KOUD GEBOGEN GLAS



5. BEDRUKT GLAS



6. DRAGEND GLAS



DISCLAIMER: De benamingen van de bovenstaande hoofdstukken zijn in geen geval tot stand gekomen om bepaalde producten of productietechnieken van specifieke bedrijven te promoten. De benamingen zijn volledig door de auteur zelf gekozen en komen niet noodzakelijk overeen met de termen die gebruikt worden in patenten of bouwcodes.

1. GLAZEN METSELWERK

Het eerste hoofdstuk gaat over metselwerk uit massieve glazen bakstenen. Het is ongebruikelijk om glas in dit soort diktes (ca. zeven centimeter) te gebruiken. Aan de hand van twee unieke voorbeeldprojecten worden de driedimensionale mogelijkheden van glas verkend.

1.1 CRYSTAL HOUSES

• MVRDV • Amsterdam, Nederland

bouw: 2014 - 2016



Afb. 1.1: Crystal Houses, een unieke winkelpui in Amsterdam ontworpen door MVRDV. (© MVRDV)

In 2016 werd voor het luxemerk Chanel in de winkelstraat PC Hooftstraat in Amsterdam een unieke transparante gevel gerealiseerd. Het buitengewone project genaamd 'Crystal Houses' (Afb. 1.1) werd ontworpen door het Rotterdamse architectenbureau MVRDV.

De bestaande gevel werd volledig afgebroken. Met hulp van ingenieursbureau ABT en TU Delft werd een nieuwe façade ontworpen en gerealiseerd. Ook het bovenste deel uit conventionele kleibakstenen is nieuw. De gevel bootst de oorspronkelijke 19^e-eeuwse gevel na op vlak van

metselwerkverbanden en andere details, maar werd verticaal uitgerekt om te voldoen aan de bijgewerkte bestemmingsplannen en aan de vraag naar meer binnenruimte (Afb. 1.2). Het project biedt 620m² winkelruimte en 220m² woonruimte (bovenaan het gebouw). In 2019 werd de winkel overgenomen door Hermès.



Afb. 1.2: Het concept van Crystal Houses. (© MVRDV)

Het bovenste gedeelte van het gebouw wordt gedragen door een stalen balk die over de hele lengte van de gevel loopt en ondersteund wordt op drie punten (Afb. 1.3). Dit deel werd een half jaar voorafgaand aan de constructie van de glazen gevel gerealiseerd. Op die manier was de mortel volledig uitgehard tegen de start van de bouw van de glazen pui en was er geen gevaar meer voor een alkalische reactie tussen de mortel en het glas.

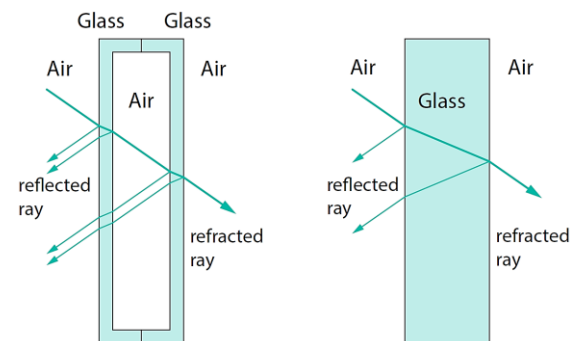


Afb. 1.3: De traditionele metselwerkmuur werd voorafgaand gebouwd. (© Uit [2])

De 10 bij 12 meter zelfdragende transparante gemetselde wand bestaat uit meer dan 6500 massieve glazen bakstenen en wordt in de dwarsrichting ondersteund door glazen steunberen. De afmetingen van de bakstenen (de meeste 210 bij 65 millimeter) zijn gebaseerd op deze van de vroegere originele façade, dit om de samenhang met de historische site te behouden. Om de originele houten deur- en raamkozijnen te imiteren, werden grote massieve gegoten glaselementen gerealiseerd. Aan de hand van een 'overgangszone' waarin zowel glazen als normale bakstenen lijken voor te komen, verdwijnt de glazen winkelpui gradueel in het traditionele metselwerk erboven.

De bakstenen zijn gemaakt uit extra helder glas ('low iron glass'). Dit soort glas heeft een betere transparantie in vergelijking met het conventionele natronkalkglas. Bovendien werd er gekozen om de glazen bakstenen massief uit te

voeren, omdat dat voor een transparanter resultaat zorgt in vergelijking met holle glazen bakstenen. Holle stenen hebben dubbel zo veel oppervlakken waarop het licht wordt gereflecteerd, wat resulteert in een minder goede optische kwaliteit (Afb. 1.4). Daarenboven zijn holle glazen bakstenen niet sterk genoeg om ingezet te worden als dragend element.

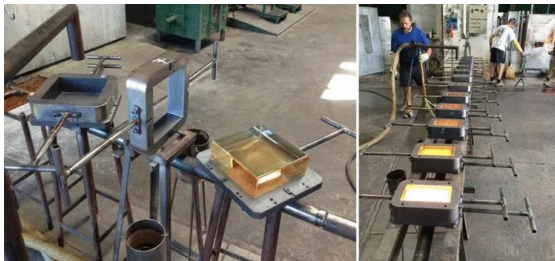


Afb. 1.4: De overgang van lichtstralen tussen glas-lucht-glas in een hol glasblok resulteert in meer optische vervorming. (© Uit [2])

In conventioneel metselwerk heeft mortel een dubbele rol: het verzekert enerzijds de verbinding tussen de stenen en anderzijds kan het de verschillen in grootte en oppervlaktekwaliteit van de bakstenen compenseren. In dit project kan de geselecteerde acrylaatlijm zich niet aanpassen aan dergelijke dimensionale verschillen tussen de stenen, wat zou kunnen leiden tot spanningsconcentraties in bepaalde glazen stenen.

Daarom werd er vastgelegd dat de boven- en onderkant van de glazen bakstenen vlak moesten worden gefabriceerd binnen een toegestane tolerantie van 0,25mm. Dat is een zeer strenge eis, maar het is de enige manier om een gelijkmatige laag lijm te garanderen. Die laag zelf wordt het best toegepast in een dikte tussen 0,2 en 0,3mm. Elke geaccumuleerde afwijking groter dan de vereiste dikte van de lijm kan leiden tot een ongelijkmatige of onvoldoende hechting. Deze strikte toleranties vragen dus uiterste precisie bij het construeren van de gevel.

Eén voor één vervaardigde het Italiaanse bedrijf Poesia de massieve glazen stenen op ambachtelijke wijze door gesmolten glas in open stalen mallen te gieten (Afb. 1.5). Na het gieten, koelt het materiaal snel af tot ongeveer 700°C.



Afb. 1.5: Links: De open stalen mallen. Rechts: De bakstenen tijdens de snelle afkoelfase van 1200 tot ca. 700°C. (© Uit [1])

De kritieke temperatuurzone, waarbij een glas-materiaal mogelijk zou kunnen uitkristalliseren in plaats van zijn amorfe moleculaire structuur te behouden, werd rap gepasseerd. Zo werd de potentiële vorming van een glas met verminderde transparantie (troebel glas) vermeden¹. Bij het verder afkoelen (Afb. 1.6), dat wil zeggen tijdens de transformatie van een vloeistof naar een vaste stof, kan natuurlijke krimp niet worden vermeden. Krimp resulteert in bakstenen met verschillende afmetingen en holle oppervlakken. Om platte stenen te verkrijgen met de gewenste nauwkeurigheid van 0,25mm, werden de glasblokken daarom iets ruimer gegoten om vervolgens de toplaag af te frezen met een CNC-machine.



Afb. 1.6: De glasstenen komen na 36 à 38 uur uit de gloei oven. (© Uit [1])

Uiteindelijk werden de boven- en ondervlakken van elke steen gepolijst om zeer gladde oppervlakken te verkrijgen die klaar waren voor het aanbrengen van de lijm op de bouwplaats. De verticale vlakken bleven onbewerkt aangezien ze het structurele systeem van de gevel niet beïnvloeden. Ten slotte werden de glazen bakstenen allemaal opgemeten met zeer nauwkeurig apparatuur om hun afmetingen te verifiëren.

De stenen werden verlijmd met Delo Photobond 4468. Dat is een één-component acrylaat geoptimaliseerd voor een hoge krachtoverdracht tussen twee glaselementen. Een belangrijke eigenschap van de geselecteerde lijm is de manier waarop ze uithardt; met UV-licht is de lijm in minimaal 40 seconden volledig uitgehard, waarbij een volledig vocht- en waterbestendige verbinding wordt gecreëerd.

Daarnaast heeft Delo Photobond 4468 enkele gunstige optische eigenschappen: het is kleurloos (en blijft dat bij blootstelling aan zonlicht) en heeft een lichtbrekingsindex die vergelijkbaar is met deze van glas. Om een goede werking van de lijm te garanderen, moest de applicatie ervan in gecontroleerde omstandigheden gebeuren. Daarom vond de hele constructie plaats achter verduisterende doeken die de UV-straling van de zon filtert. Zo werd er voorkomen dat de lijm door daglicht ongecontroleerd begon uit te harden. Tevens bood dit doek uiteraard bescherming tegen andere weersomstandigheden en stof.

Om een gecontroleerde temperatuur en vochtigheidsniveau te garanderen, werd in de tent verwarmingsapparatuur geïnstalleerd om ook tijdens de winter te kunnen doorwerken. In de

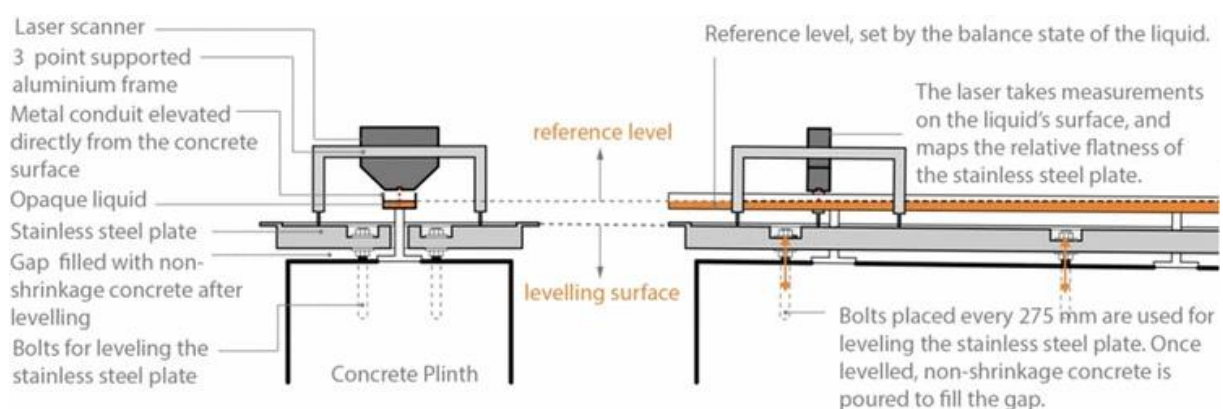
¹ Silicaglas (SiO_2) is een materiaal met een niet-kristallijne (amorphe) moleculaire structuur. Daarom is het transparant. Kwarts (SiO_2) is een kristallijn materiaal dat zowel troebel als transparant kan zijn. Microkristallen zijn meestal ondoorzichtig, terwijl macrokristallen vaak doorzichtig zijn. (© Prof. dr. M.-F. Reyniers) (© lumenlearning)

zomer, wanneer de omgevingstemperatuur hoger was dan 30°C, werd de bouw tijdelijk stilgelegd. Vanwege de beperkte ruimte op de bouwplaats werden de glazen bakstenen in een apart magazijn opgeslagen en telkens naar de locatie getransporteerd.

De basis voor het glazen metselwerk is een 60cm hoge sokkel van gewapend beton, ter bescherming van de gevel tegen een 'hard body impact' (vb. een wagen die tegen de gevel rijdt). Op de betonnen sokkel werd een 3cm dikke roestvrijstalen (RVS) plaat bevestigd, waarop de eerste glazen bakstenen werden verlijmd. Om de plint te laten passen bij de rest van de gevel werd ze bekleed met een glaslaminaat.

De RVS-plaat moest over een de totale lengte van twaalf meter worden genivelleerd met een nauwkeurigheid van 0,25mm. Een dergelijke hoge meetnauwkeurigheid leidde tot de ontwikkeling van een innovatief nivelleringssysteem. Dit gebeurde in twee opeenvolgende stappen. Door het aandraaien of losdraaien van de moeren en contramoeren van de bouten, en daarbij gebruik te maken van standaard waterpasapparatuur, werd de plaat in eerste instantie waterpas gesteld tot op een nauwkeurigheid

van 3mm. Daarna werd gebruik gemaakt van het specifiek ontwikkelde meetsysteem waarbij een open metalen buis, die steunt op het betonoppervlak, gevuld werd met een niet-transparante vloeistof (Afb. 1.7). Een vloeistof in rust heeft bijna een perfecte horizontale vlakheid en was zodoende het referentieniveau bij het kalibreren. Een laserscanner, bevestigd op een aluminium frame, werd vervolgens over een reeks opeenvolgende punten over de RVS-plaat bewogen, waarbij metingen werden uitgevoerd die in verhouding staan tot het oppervlak van de vloeistof. Als de afstand tussen de laserkop en het stilliggende vloeistofoppervlak te groot werd, zou dat zeggen dat plaat te hoog lag; als de afstand te klein werd, lag de plaat te laag. Op die manier werd de plaat over de gehele lengte in kaart gebracht en kon ze worden bijgesteld. Het gebruik van een ondoorzichtige reflecterende vloeistof (bijvoorbeeld melk) was essentieel om ervoor te zorgen dat de laserstraal alle metingen exact op hetzelfde referentieniveau uitvoerde. Met deze techniek slaagde men erin om het volledige oppervlak met de gewenste precisie te nivelleren. De resulterende opening tussen de betonnen sokkel en de RVS-plaat werd gevuld met krimpvrije mortel.



Afb. 1.7: Het nivelleringsysteem. (© Uit [1])

De eerste rij glasblokken werd rechtstreeks op de roestvrijstalen basis gelijmd met hetzelfde kleefmiddel dat werd gebruikt bij de binding tussen de glasblokken onderling. Een hulpstuk met een uitgesneden X-patroon assisteerte het aanbrengen van de lijm (Afb. 1.8). De verspreiding en de hoeveelheid lijm werd hiermee gecontroleerd. Zodra de lijm gelijkmatig verdeeld was, werd deze onmiddellijk vijf seconden blootgesteld aan UV-straling van lage intensiteit, zodat de lijm bij het op de plaats duwen van de steen al enige stabiliteit kon bieden, maar het wegvegen van eventuele overtollige lijm toch nog mogelijk bleef.

Daarnaast werd de lijm ook specifiek uitgehard aan de randen van de stenen om een capillair effect langs de verticale vlakken te voorkomen. Men wou niet dat de lijm opsteeg tussen twee bakstenen. Om een volledige uitharding te bereiken, werd er nog gedurende één tot twee minuten UV-licht van hogere intensiteit op de lijm geschenen, afhankelijk van de steengrootte. Er werden bakstenen met een hoogte-reductie van 0,5 of 1,0mm gemaakt voor het egaliseren van de muur in het geval van hoogteverschillen. Wanneer een volledige laag gemetst was, werden alle verticale voegen afgedicht, vooraleer te starten met de volgende rij (Afb. 1.9).



Afb. 1.8: Kloksgewijs: 1. Aanbrengen van de lijm met behulp van de X-vorm. 2. Gecontroleerde hoeveelheid lijm. 3. Lokale uitharding van de lijm door middel van UV-licht om capillaire werking te voorkomen. 4. Gebruik van een UV-lamp (intensiteit van 20 tot 60 mW/cm²) voor het uitharden van de lijm gedurende 60 tot 120 seconden. (© Uit [1])



Afb. 1.9: Afdichting van de reeds verlijmde stenen. (© Uit [1])

De gebogen glazen lateien boven de raamopeningen konden niet in situ worden gefabriceerd omdat de gekozen lijm slechts een gemiddelde viscositeit had en dus niet verticaal aangebracht kon worden. Daarom werden deze elementen prefab gemaakt met behulp van een stalen frame dat kon roteren zodat elke volgende verlijming horizontaal kon plaatsvinden en dat de geometrie op deze manier ook heel exact gemaakt kon worden (Afb. 1.10).



Afb. 1.10: De roterende bevestiging bij de voormontage van de lateien. (© Uit [1])

Als 'overgangslaag' tussen het traditionele en het glazen metselwerk werd door de architecten eerst voorgesteld om een metselverband te maken waarbij de twee verschillende bakstenen door elkaar gebruikt worden. Maar dat bleek niet haalbaar. De twee types stenen verschillen in sterkte en ook in toleranties (glas $\pm 0,25\text{mm}$, kleibakstenen vaak meer dan 1mm). Bovendien vereisen de twee verschillende steentypes verschillende hechtingsmiddelen, wat het risico met zich meebrengt dat ze onderling zouden vermengen. Vanwege al deze bezwaren, werd er niet doorgegaan met dat idee. Er werd beslist om het glazen metselwerk verder te zetten, maar om hier en daar glasstenen te gebruiken die vier centimeter minder breed zijn. Nadat alle glasblokken op hun plaats waren verlijmd, werden op de kortere glasblokken baksteenstrips gekleefd (Afb. 1.11). De naden rond deze 'valse bakstenen' werden afgedicht met Zwaluw Joint

Fix, dat is een voegenreparatiemiddel van een vergelijkbare textuur en kleur als de mortel in het metselwerk bovenaan.



Afb. 1.11: Links: Het aanbrengen van de strips. Rechts: Het resultaat na de afdichting. (© Uit [1])

Bovenaan is de glazen gevel niet stijf verbonden met de stalen balk, maar werd er een flexibele verbinding ontworpen. Dat was nodig om uitzetting van de glazen gevel te kunnen opvangen. Omdat keramische stroken de hele bovenste rij bedekken, zijn deze verbindingsdetails volledig verborgen (Afb. 1.12). Ook aan de zijkan- ten werd er een gelijkaardige flexibele verbinding voorzien. Enkel onderaan is de glazen wand stijf verbonden aan de staalplaat.



Afb. 1.12: De aansluiting tussen het glasmetselwerk en de stalen ligger zit verborgen. (© Uit [1])

De glazen raam- en deurkozijnen werden geplaatst na voltooiing van de glaswand. Tijdens de constructie van de glazen winkelpui werden er tijdelijk aluminium profielen geplaatst in de gevelopeningen om deze te verstevigen. De raamkaders bestaan uit massieve gegoten glaselementen, gefabriceerd door Poesia. Gesmolten glas werd gegoten in open grafietmallen (Afb. 1.13). Na afkoeling van het glas werd het bovenste oppervlak van de elementen afgeslepen om de 'krimplaag' te verwijderen. Ten slotte werd het geheel handmatig gepolijst.



Afb. 1.13: De grafieten mallen die werden gebruikt voor de fabricage van de deur- en raamkaders. (© Uit [1])

De verlijming van deze elementen gebeurde met een andere lijm die grotere toleranties toeliet. Om luchtinsluiting te voorkomen, werd het polymeer aan beide zijden gelijktijdig van onder naar boven geïnjecteerd (Afb. 1.14). Daarna werden aan de kaders nog kleinere glasstijlen gehecht, waarop de vlakglasplaten met transparante silicone konden verlijmd worden. Na deze laatste stap, was de gevel voltooid. (Afb. 1.15)



Afb. 1.14: Links: Het gelijktijdig aanbrengen van de acrylaatlijm aan beide kanten. Rechts: Het resultaat. (© Uit [1])



Afb. 1.15: De glazen winkelpui was in 2016 voltooid. (© MVRDV)

De meeste technische uitdagingen bij het maken van de gevel van Crystal Houses konden worden vergemakkelijkt door een dikkere lijm te kiezen. Dat maakt grotere toleranties in de variabele afmetingen van de stenen mogelijk. Het was een conceptuele keuze van de architecten om het originele baksteenformaat te imiteren, wat leidde tot de gemaakte keuzes.

De platte oppervlakken van de stenen zorgen ervoor dat er een lijm nodig is om ze aan elkaar te hechten. In het geval dat de geometrie van de glazen bakstenen zo is ontworpen dat de stenen in elkaar kunnen grijpen (zoals bij legoblokjes), is er geen lijm nodig (Afb. 1.16). En wanneer er geen lijm meer nodig is, heeft de architect een grotere vrijheid om verschillende afmetingen en vormen te ontwerpen die passen in één systeem. Dergelijke in elkaar grijpende gegoten massieve glasbakstenen, zijn een innovatieve toepassing die Oikonomopoulou, Bristogianni en Barou momenteel verder onderzoeken, met de bedoeling om een dragend glasmetselwerk-systeem met droge verbindingen te ontwikkelen.



Afb. 1.16: In elkaar grijpende, droog gemonteerde glasstenen ontwikkeld door Oikonomopoulou, Bristogianni en Barou voor het project 3TU.bouw Lighthouse: Restorative Glass. (© Uit [1])

In 2017, een jaar na de oplevering, vertoonden de glazen stenen barsten ter hoogte van de raamkaders (Afb. 1.17). Althans dat werd aanvankelijk gedacht. Na studie bleek het namelijk niet om barsten in het glas te gaan, maar om scheuren in de lijm waarmee de kozijnen aan de glaswand werden gekleefd. Dat was zoals vermeld

een ander type acrylaatlijm dan deze waarmee de bakstenen onderling waren verlijmd. De lijm was gekrompen en daardoor gescheurd. Door de spiegelende werking van glazen stenen lijkt het echter dat het glas zelf gebarsten is.

De scheuren ontstonden in de zone tussen het massief glazen metselwerk en de massieve glazen raamstijlen. Thermische werking, zoals bijvoorbeeld een groter verschil in uitzetting tussen de verschillende glazen elementen dan vooraf werd ingeschat, kan dit soort scheuren eventueel in de hand werken.



Afb. 1.17: Scheuren in de lijm waarmee de raamkaders in de glaswand werden bevestigd.

“Dit is het gevolg van te weinig communicatie in het gehele bouwteam. Het betreft gelukkig een secundair onderdeel van de gevel en vormt geen enkele bedreiging voor de structurele of bouwkundige integriteit van de gevel” [4], aldus Rob Nijse van ABT, het ingenieursbureau dat meewerkte aan Crystal Houses. Jan Knikker van MVRDV besluit: “Het is een innovatief ontwerp en nog niet eerder vertoond. Scheuren zijn natuurlijk nooit de bedoeling geweest, maar als je met iets nieuws werkt, houd je rekening met onvolkomenheden.” [3]

Referenties CRYSTAL HOUSES

TEKST

- **[1]** Oikonomopoulou, F., Bristogianni, T., Veer, F. A., & Nijssse, R. (2017). The construction of the Crystal Houses façade: challenges and innovations. *Glass Structures & Engineering*, 3(1), 87–108.
<https://doi.org/10.1007/s40940-017-0039-4>
- **[2]** Oikonomopoulou, F. (2019). *Unveiling the third dimension of glass* (1ste editie). Delft, Nederland: TU Delft.
- **[3]** Borren, B. (2017, 18 januari). *Barsten in glazen gevel Chanelwinkel worden niet gerepareerd*. Geraadpleegd van <https://www.parool.nl/nieuws/barsten-in-glazen-gevel-chanelwinkel-worden-niet-gerepareerd~b715ad29/>
- **[4]** Redactie Bouwwereld. (2018, 18 juni). *Bevindingen “barsten” glazen gevel*. Geraadpleegd van <https://www.bouwwereld.nl/bouwkennis/bevindingen-barsten-glazen-gevel/>

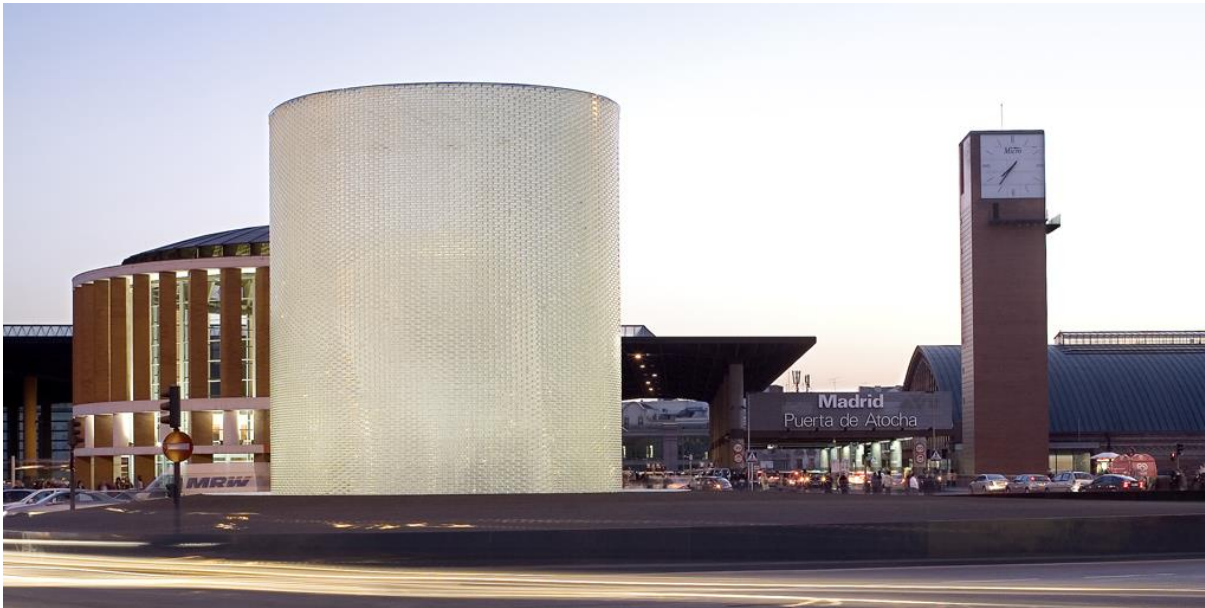
AFBEELDINGEN

- **Afb. 1.1, 1.15:** © MVRDV. Geraadpleegd van <https://www.mrvd.nl/projects/240/crystal-houses>
- **Afb. 1.3, 1.4:** Uit [2]
- **Afb. 1.2, 1.5 t.e.m. 1.14, 1.16:** Uit [1]
- **Afb. 1.17:** Geraadpleegd van <https://www.bouwwereld.nl/bouwkennis/barsten-glazen-gevel-p-c-hoofstraat/>

1.2 ATOCHA HERDENKINGSMONUMENT

- ESTUDIO SIC • Madrid, Spanje

bouw: 2006 - 2007



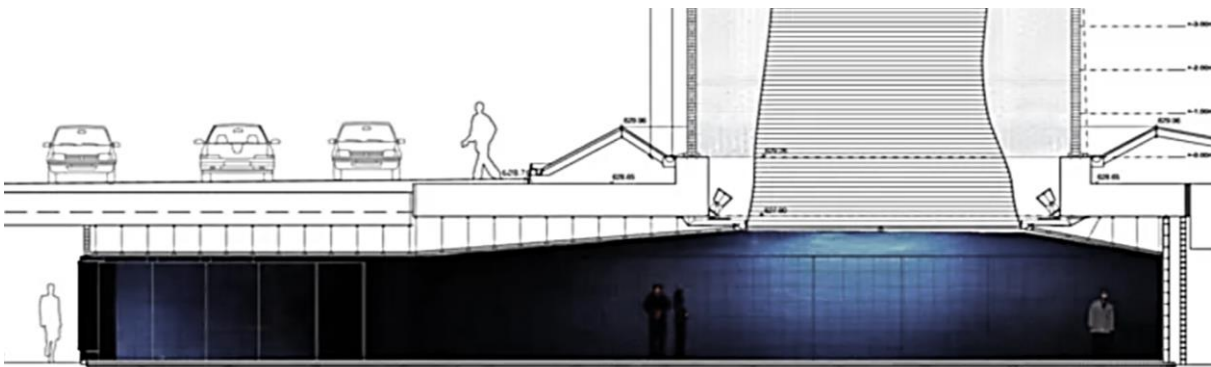
Afb. 1.19: Het herdenkingsmonument in Madrid, ontworpen door de architecten van Estudio Sic Arquitectura y Urbanismo S.L.P. (© estudiosic.es)

In 2007, drie jaar na de terroristische aanslagen in Madrid, werd voor het Atocha treinstation een gedenkteken gebouwd ter nagedachtenis aan de bijna 200 mensen die bij de treinbombarde- menten het leven lieten (Afb. 1.19). De namen van de slachtoffers zijn gegraveerd in een matgla- zen paneel dat zich bevindt tussen de toe- gangsdeuren van een ondergrondse kamer. De kamer is vanaf het station toegankelijk via een lege gang onder de straat. Vanuit de blauwe ka- mer kijken de bezoekers omhoog naar een elf meter hoge cilinder gemaakt uit massieve gla- zen stenen (Afb. 1.20).



Afb. 1.20: Bezoekers kijken omhoog. (© estudiosic.es)

De dakconstructie bestaat uit vijf glazen liggers die twaalf heel transparante glasplaten dragen. Vanbinnen is een ETFE-membraan opgeblazen. Het membraan is bedrukt met honderden rouw- berichten die door bezoekers in het station wer- den achtergelaten na de aanval (Afb. 1.22).

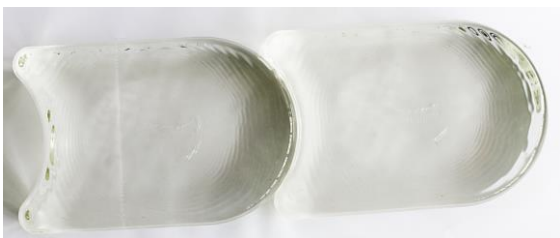


Afb. 1.21: Snede. De glazen façade steunt op betonnen elementen. (© estudiosic.es)



Afb. 1.22: De glasconstructie laat veel licht door, waardoor het mogelijk is om de boodschappen op het membraan te lezen. (© estudiosic.es)

Ten tijde van de voltooiing in 2007 was de gevel voor het Atocha-monument iets uniek. Nooit eerder werden er massieve glasblokken vastgelijmd zonder de hulp van extra staalementen. Het gebruik van een transparante acrykleeftstof volstond om de 15100 glasstenen aan elkaar te lijmen tot een zelfdragende structuur. Het glazen metselwerk heeft een gewicht van meer dan 135 ton. Om het mogelijk te maken om gekromde rijen te metselen, werden de glasblokken (200 x 300 x 70mm) gemaakt in specifieke mallen die aan de ene kant convex en aan de andere kant concaaf zijn (Afb. 1.23).



Afb. 1.23: De gebogen glasbakstenen. (© estudiosic.es)

Bij de fabricatie en uitvoering waren er nauwe toleranties van ongeveer 1 millimeter voorzien, de stenen moesten dus met grote precisie gemaakt worden. Daarnaast was bij het bouwen een grote 'temperatuurstabiliteit' van de glazen

stenen gewenst. Daarom kreeg borosilicaatglas de voorkeur voor de gevel van het herdenkingsmonument. De thermische uitzettingscoëfficiënt van borosilicaatglas is ongeveer de helft kleiner dan die van conventioneel natronkalkglas. Dat wil zeggen dat er minder natuurlijke krimp optreedt tijdens de afkoelfase van de gegoten glasbakstenen. Dit, tezamen met het gebruik van precisiedrukmallen die het glas in hun vorm persen, resulteerde in glaselementen met een hogere nauwkeurigheid. Door deze glaselementen en fabricagemethode konden de gewenste toleranties van 1mm worden bereikt zonder machinale verwerking achteraf. De lagere thermische uitzettingscoëfficiënt van borosilicaatglas heeft ook het voordeel dat de afgewerkte constructie minder zal uitzetten of inkrimpen bij wisselende temperaturen. Dat verlaagt het risico op problemen door thermische werking, hetgeen mogelijk aan de basis lag van de barsten en scheuren bij Crystal Houses.

Borosilicaatglas is duurder en heeft een hogere werkingstemperatuur, maar daar staat tegenover dat dit soort glas een minder lange afkoelingsstijd vereist, wat kan resulteren in een korter productieproces. De in het Atocha-monument gebruikte blokken uit borosilicaatglas wegen elk 8,4kg en hadden een totale gloeitijd van 20 uur, terwijl de relatief kleinere en lichtere bakstenen (7,2kg) uit natronkalkglas van Crystal Houses ongeveer 38 uur gloeitijd nodig hadden.

Er kan worden opgemerkt dat er bij Crystal Houses nog uitdagendere productietoleranties waren vooropgesteld. Dat betekende dat nabewerking van de oppervlakken van de bakstenen sowieso noodzakelijk was, zelfs al was er voor borosilicaatglas gekozen geweest (Afb. 1.24). Daarom werd er in Amsterdam geopteerd voor natronkalkglas en open mallen, om een onnodige stijging van de productiekosten te voorkomen.

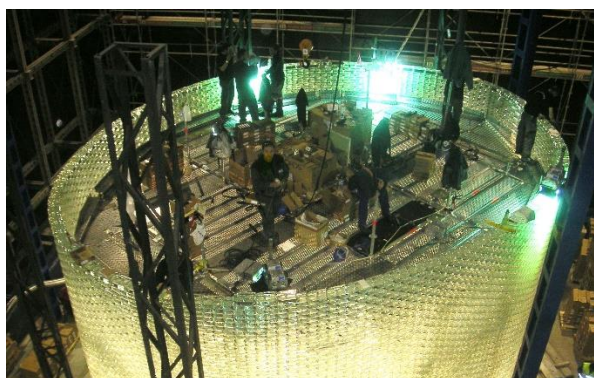


Afb. 1.24: Vergelijking van massieve glazen bakstenen. Links: Een borosilicaatglasblok gebruikt in het Atocha-monument, gemaakt met een persmal. Midden: Een natronkalkglasblok van Crystal Houses, voorafgaand aan de nabewerking. Rechts: Een natronkalkglasblok van Crystal Houses, na de machinale bewerking. (© Uit [1])

Bellapart, een Spaans bedrijf dat vertrouwd is met het bouwen van glasconstructies, had de leiding over de constructie van het monument. De opbouw van de glazen wand begon met de installatie van een stalen ring die het monument ondersteunt. De ring heeft een U-vormig sectie (geplaatst met opstaande flenzen) en bestaat uit tien delen, elk met een andere kromming. Deze secties werden ter plaatse aan elkaar gelast en door middel van chemische verankering aan een betonnen basis bevestigd (Afb. 1.21). Tussen de ring en de eerste rij glasblokken werden elastomeerkussentjes gebruikt. Deze verhinderen de horizontale beweging dankzij hun wrijving met het glas en zijn bovendien in staat om de verticale krachten (groot eigengewicht) door te geven naar de stalen ring en dus zo naar de onderliggende structuur. Om de kussentjes te beschermen tegen regen en vuil, werd de voeg tussen de glasblokken en de flenzen van de stalen ring met silicone afgedicht.

De constructie vond plaats onder een tent die het bouwwerk beschermde tegen felle zonnestraling, regen en vuil (Afb. 1.25). Net zoals bij Crystal Houses werd ook hier de temperatuur en de vochtigheid gemonitord en aangepast indien nodig. Dit om binnen de marges te blijven die werden aanbevolen door de lijmfabrikant.

Vanwege de beperkte ruimte in de tent, werden de glasblokken opgeslagen in een apart magazijn. Om de twee dagen werden ladingen met glazen stenen naar de bouwplaats vervoerd. Eén voor één werden de 15100 blokken uit de voorraad genomen en gereinigd. De lijm werd op het bovenoppervlak van de laatste rij aangebracht. De laag had een dikte van 2 millimeter (tienmaal dikker dan deze bij Crystal Houses), zodat de verschillende afmetingen van de gegoten glasblokken kon worden gecompenseerd.



Afb. 1.25: Links: De beschermde tent tijdens het bouwen. (© [5]) Rechts: De glazen ellips wordt rij per rij opgebouwd. (© [3])

Zowel bij Crystal Houses als bij dit project werd onderzocht in welk patroon de lijm op de glasblokken moest worden aangebracht om op een efficiënt manier een goede spreiding van het kleefmiddel te bekomen. Ook diende zowel de overloop van lijm als de luchtbelvorming te worden geminimaliseerd wanneer het glasblok werd aangeduwd. Voor de winkelpui in Amsterdam werden hulpstukken met een uitgesneden X-vorm toegepast. In Atocha bleek na enkele tests dat een goed resultaat werd bekomen door de lijm aan te brengen in een patroon van twaalf 'druppels' met twee verschillende diameters (Afb. 1.26). Bovendien werd de gebruikte hoeveelheid telkens gecontroleerd door de lijm-koker voor en na het verlijmen van elk blok te wegen.



Afb. 1.26: Verdeling van de lijm op de glasblokken met behulp van aluminium sjablonen. (© Bellapart)

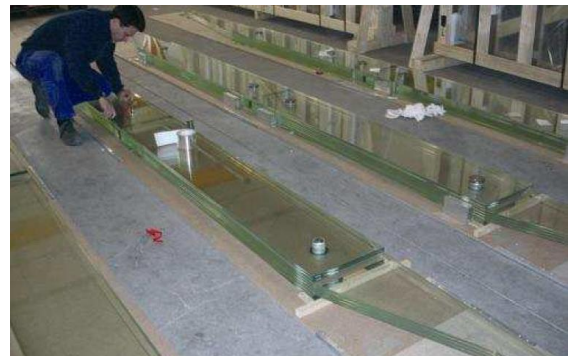


Afb. 1.27: Close-up van de transparant gebonden glasstenen. (© Uit [4])

De uitharding van de lijm was gegarandeerd na vier minuten blootstelling aan ultraviolet licht met een golflengte van 320 tot 380 nm en een intensiteit tussen 15 tot 30 mW/cm².

De intensiteit van alle lampen werd tweemaal per dag gecontroleerd en indien nodig werden de lampen vervangen. De verlijming werd uitgevoerd door acht specialisten. Er werden tot 600 blokken per dag verlijmd, zes dagen per week. Elke drie dagen werd het werkplatform verhoogd.

De dakliggers zijn opgebouwd uit drie verschillende componenten. Het middelste deel is een vierlaags gelamineerd rechthoekig glaspaneel, en de twee uiteinden bestaan uit driehoekige glaspanelen van tweelaags gelaagd glas. Deze glaslaminaten werden gefabriceerd in Oostenrijk en werden daarna in de Spaanse fabriek van Bellapart met elkaar verbonden. De uiteinden van het middelste deel overlappen met de dunner driehoekige onderdelen (Afb. 1.28). Ter hoogte van de overlap werden de componenten door middel van roestvrijstalen pinnen aan elkaar bevestigd. Om een goeie krachtoverdracht te garanderen, werd er een tweecomponentenhars in de opening tussen de pin en de glaslagen geïnjecteerd.



Afb. 1.28: Boven: Assemblage van de glazen liggers. Onder: Oplegging van een dakligger. (© Bellapart)

Bij elke ligger is het middelste onderdeel even groot. De lengte van de buitenste componenten daarentegen is telkens anders om te kunnen aansluiten bij de cilindervorm. Op de bovenkant van een ligger werd een roestvrijstalen T-vormig profiel bevestigd door middel van structurele silicone. Het T-profiel werd ondersteboven geïnstalleerd (met het 'been' omhoog) om op die manier de glazen dakpanelen te kunnen dragen (Afb. 1.28). De afgewerkte liggers werden naar de bouwplaats getransporteerd en daar bevestigd aan de glazen cilinder via stalen koppelstukken die ingewerkt waren in het glazen metselwerk (Afb. 1.29).



Afb. 1.29: De installatie van de glazen liggers. De bovenloopkraan en het dak van de tent werden voorafgaand gedemonteerd om de plaatsing mogelijk te maken.
(© Bellapart)

De gelamineerde dakpanelen (voorzien van een zonwerende folie) werden aan de T-profielen bevestigd met structurele silicone. Ook de opening tussen de dakpanelen en de bovenkant van de glazen wand, dus de perimeter van het gebouw, werd afgedicht met een dikke laag structurele silicone.

Alle voegen tussen de stenen (dus zowel de horizontale als de verticale) werden afgedicht om de waterdichtheid te garanderen. Er werd gekozen voor een transparante silicone die compatibel was met de gebruikte lijm. Men kon echter de ellips niet als een volledige gladde glaswand afwerken; er resteren nog steeds groeven en kieren. Op deze plekken kan vuil zich ophopen. Door de locatie (een rotonde waar veel verkeer passeert) en wellicht door gebrek aan onderhoud, oogt het herdenkingsmonument soms vuil en grauw.

Referenties ATOCHA HERDENKINGSMONUMENT

TEKST

- **[1]** Oikonomopoulou, F., Bristogianni, T., Veer, F. A., & Nijse, R. (2017). The construction of the Crystal Houses façade: challenges and innovations. *Glass Structures & Engineering*, 3(1), 87–108.
<https://doi.org/10.1007/s40940-017-0039-4>
- **[2]** Göppert K., Paech C., Arbós F., Teixidor C. *Glass Monument in Remembrance of the Terrorist Attacks in Madrid of March 11, 2004*. Geraadpleegd van <http://www.bellapart.com/uploads/files/entradas//glass-monument-in-remembrance-of-the-terrorist-atta.pdf>
- **[3]** Arbós Bellapart F. (2016, 15 juli). *Bellapart 2*. Geraadpleegd van <https://www.bellapart.com/uploads/files/entradas//bellapart.pdf>
- **[4]** Lomholt, I. (2019, 20 november). *Monumento Madrid Memorial Building in Spain – design by FAM Arquitectura y Urbanismo. “Madrid Train Bombings Monument, Atocha Building, Architect, Photos, Design.”* Geraadpleegd van <https://www.e-architect.co.uk/madrid/atocha-monument-madrid>
- **[5]** *Monument 11-M - Data, Photos & Plans*. (2017, 14 februari). Geraadpleegd van <https://en.wikiarquitectura.com/building/monument-11-m/#>

AFBEELDINGEN

- **Afb. 1.19 t.e.m. 1.23:** Geraadpleegd van <https://estudiosic.es/11M>
- **Afb. 1.24:** Uit [1]
- **Afb. 1.25 Links:** Uit [5]
- **Afb. 1.25 Rechts, 1.26, 1.28:** © Bellapart. Uit [3]
- **Afb. 1.27:** Uit [4]
- **Afb. 1.29:** © Bellapart, met dank aan Laura Serra

2. GEGOLFDE GLASPANELEN

In het tweede hoofdstuk wordt aangetoond dat door glas te laten golven, het materiaal op een meer expressieve manier ingezet kan worden. Maar gegolfde glaspanelen worden niet enkel omwille van hun esthetische kwaliteiten gekozen, ze hebben ook structurele voordelen.

2.1 CASA DA MÚSICA

• OMA • Porto, Portugal

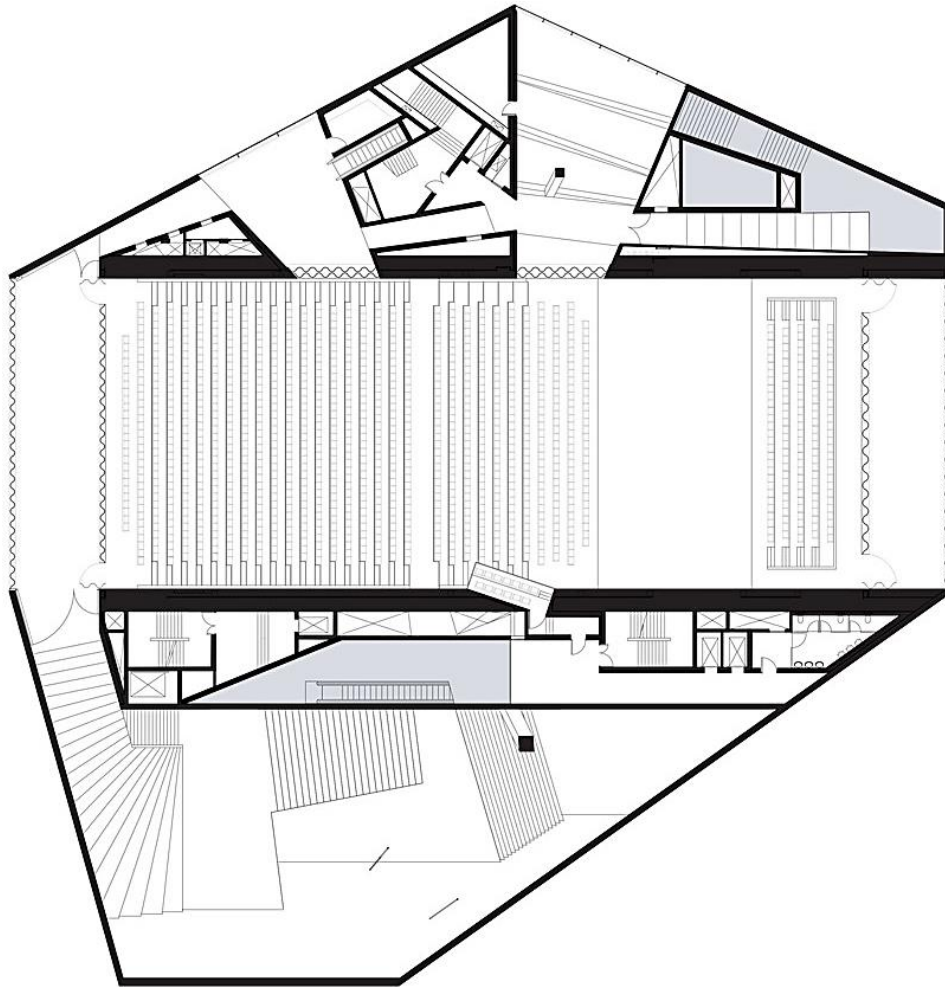
bouw: 1999 - 2005



Afb. 2.1: Casa da Música in Porto. (© Pedro Paulo Palazzo)

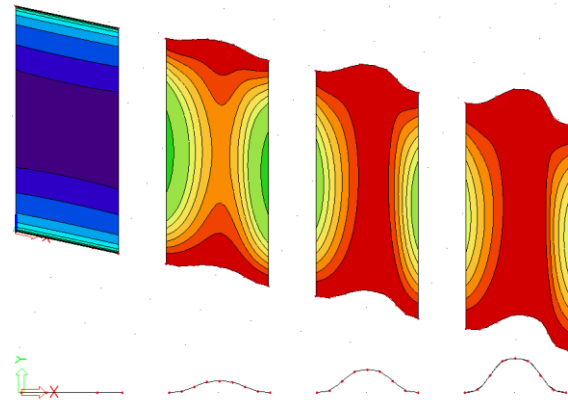
Casa da Música is het culturele centrum van de stad Porto (Portugal), ontworpen door OMA (Office for Metropolitan Architecture). Het sculpturale betonnen gebouw, gelegen op een nieuw openbaar plein in het historische Rotunda da Boavista, werd geopend in 2005 (Afb. 2.1). Binnen is er een groot auditorium van 1300 zitplaatsen, ontworpen als een balkvormige doos die als het ware door het volume geponst werd (Afb. 2.2). Casa da Música omvat ook kleinere voorstellingsruimtes, repetitieruimtes, studio's en een restaurant. De zeer grote ramen laten veel daglicht toe en bieden de bezoekers een indrukwekkend uitzicht over de stad.

De grootste gevelopening is ongeveer 25 bij 15 meter. Ingenieursbureau ABT werd aangesteld voor een ontwerp van de grote ramen. In eerste instantie stelden ze ideeën voor waarbij beglazing ondersteund werd door slanke staalkabelconstructies. De architecten hielden echter niet van 'al die stalen spaghetti rond het glas'. Rob Nijse van ABT stootte uiteindelijk op een publicatie van de Spaanse firma Cricursa over gegolfde glaspanelen die ontworpen waren voor het interieur van een winkel, en stelde voor om hetzelfde principe te gebruiken om de grote openingen te vullen.



Afb.2.2: Plan van de 4^e verdieping. (© OMA)

Door glaspanelen in deze specifieke geometrie te ontwerpen en zodoende een golvende glaswand te vormen, ontstaat er een gunstig structureel effect (Afb. 2.3). Vooreerst kan een gegolfde glaswand veel meer windbelasting opnemen in vergelijking met een vlakke glazen wand van dezelfde dikte. Er is een toename van meer dan duizend procent in draagvermogen voor belastingen loodrecht op het gevelvlak. Bovendien heeft een dergelijke gevel een veel betere weerstand tegen knik. Ten slotte zijn de gegolfde glaspanelen op zich ook een stuk stabielere dan vlakke glasplaten; deze laatste zouden sneller omkantelen. Dankzij al deze structurele voordelen was er slechts een minimaal aantal stalen elementen nodig om de glaspanelen te ondersteunen.



Afb. 2.3: Simulatie van de vervorming bij belasting op verschillende glasplaten. Paars duidt de grootste vervorming aan, rood de kleinste. Het effect van de gegolfde vorm is duidelijk: de vlakke glasplaat (links) vervormt tot 75 centimeter, terwijl de meest gegolfde glasplaat (rechts) slechts een halve centimeter vervormt onder dezelfde belasting. (© Uit [2])



Afb. 2.4: Constructie van het Casa da Música in Porto. De grote opening wordt volledig van glas voorzien. (© Uit [2])

De architecten van OMA verwelkomden het idee van de gordijnachtige glazen gevels en pasten ze onder andere toe aan elk uiteinde van het grote auditorium. Ze vormen een aantrekkelijk contrast met de gladde betonnen oppervlakken. Een groot deel van de dragende constructie van Casa da Música bestaat uit gewapend beton (Afb. 2.4). Voor de randen van de openingen waar het glas geïnstalleerd moest worden, diende de betonnen schil echter met stalen balken te worden verstevigd. De stijfheid van de randen die glaspanelen ondersteunen is namelijk cruciaal. Zonder deze ingewerkte balken zouden de vervormingen van de ribben te groot worden en zou het niet mogelijk geweest zijn om glaspanelen te gebruiken om de openingen te vullen.

Aan elke zijde van het auditorium zijn twee aan elkaar evenwijdig gegolfde glaswanden ontworpen. Er zit 6,5 meter tussen de twee glazen wanden. De buitenste neemt de windbelasting

op en zorgt voor de waterdichtheid. De andere scheidt de theaterzaal van de circulatieruimte, maar zorgt toch voor daglicht in deze zaal, iets wat eerder uniek is in concertgebouwen.

De enorme ramen zijn opgedeeld in drie rijen van op elkaar gestapelde gegolfde glaspanelen. Die opdeling was nodig omdat de productiegrootte van dergelijke glaseenheden indertijd beperkt was tot 4,5 meter. De glaspanelen worden ondersteund door stalen profielen die over de hele lengte lopen (Afb. 2.5). Deze stalen balken hebben inkepingen voor het plaatsen van de gegolfde glaspanelen. De stalen liggers maken deel uit van horizontale stalen spanten die beide parallelle glaswanden met elkaar verbinden. Deze spanten helpen de windbelasting op te nemen. Bovendien hangen de bovenste twee rijen via deze spanten op aan het dak, terwijl de onderste rij glaspanelen bevestigd is aan de vloerplaat.



Afb. 2.5: Horizontale stalen spanten ondersteunen de gegolfde glaspanelen. (© Philippe Ruault)

Glazen wanden zijn geen voor de hand liggende keuze in ruimtes waar muziek gemaakt wordt, omdat glas een hard reflecterend materiaal is. Echter, studies van een akoestisch ingenieur toonden aan dat dankzij het specifieke gegolfde oppervlak een zeer effectieve verspreiding van het geluid kon worden verkregen. Bovendien resulteerde het gebruik van de dubbele glazen wanden in een meer dan voldoende vermindering van de geluidstransmissie van binnen naar buiten en omgekeerd. Ook in de zijwanden van de zaal zijn er openingen waarin gegolfde glaspanelen werden geplaatst. Om dezelfde akoestische reden werden ook hier twee lagen glas gebruikt (Afb. 2.6).



Afb. 2.6: De spouw tussen de twee gegolfde glazen wanden helpt de overdracht van geluid te reduceren. (© Uit [2])

Gegolfd glas wordt verkregen middels een productieproces dat 'warm buigen' wordt genoemd. Een vlakke glasplaat (die precies even groot moet zijn als de gewenste driedimensionale versie) wordt daarbij op een hittebestendige mal gelegd. Het is de geometrie van de mal die de vorm zal bepalen, dus deze moet zo precies mogelijk worden gemaakt. De glasplaat en de mal bevinden zich in een oven die verwarmd wordt tot 600°C (soms 800°C). Dat is boven de glastransitietemperatuur van glas (575°C), wat wil zeggen dat het glas haar stijfheid verliest en 'rubberachtig' wordt. Daardoor bezinkt het glas in de mal onder haar eigen gewicht en neemt het glas de vorm van de mal aan. Soms wordt er nog gebruik gemaakt van een extra mal er bovenop.

Vervolgens dient het gegolfd glaspaneel zeer gestaag en gecontroleerd te worden afgekoeld om residuele spanning te vermijden die anders zou kunnen ontstaan tijdens ongelijkmatige koeling. Pas als het glaspaneel terug op kamertemperatuur is, is het in theorie even sterk als voor de start van het proces. In de praktijk is het echter zeer moeilijk om alle residuele spanningen te vermijden.

Referenties CASA DA MÚSICA

TEKST

- [1] Nijse, & R., Wenting, R. (2014). Designing and constructing corrugated glass facades. *Journal of Facade Design and Engineering*, 2(1–2), 123–131. <https://doi.org/10.3233/fde-140014>
- [2] Nijse, R. (2009). Corrugated Glass as Improvement to the Structural Resistance of Glass. *IABSE Symposium Report*, 96(14), 73–85. <https://doi.org/10.2749/222137809796068172>
- [3] Afaconsult. *The Engineering of “Casa da Musica”*. Geraadpleegd van http://www.afaconsult.com/uploads/FicheirosImprensa/2919_1_EN.pdf
- [4] Wessely, H. (2018, 17 mei). *Corrugated glas in detail*. Geraadpleegd van <https://www.detail-online.com/article/corrugated-glass-in-detail-32128/>
- [5] OMA. *Casa da Musica*. Geraadpleegd van <https://oma.eu/projects/casa-da-musica>
- [6] Belis, J. (2018). *Glass Structures*. (Academiejaar 2018–2019). E044630. Universiteit Gent

AFBEELDINGEN

- **Afb. 2.1:** © Pedro Paulo Palazzo. Geraadpleegd van <https://travel.syjic.com/nl/poi/casa-da-musica-poi:55208>
- **Afb. 2.2:** © OMA. Geraadpleegd van <https://www.archdaily.com/619294/casa-da-musica-oma>
- **Afb. 2.3, 2.4, 2.6:** Uit [2]
- **Afb. 2.5:** © Philippe Ruault. Geraadpleegd van <https://www.archdaily.com/619294/casa-da-musica-oma>

2.2 MUSEUM AAN DE STROOM

- NEUTELINGS RIEDIJK • Antwerpen, België

bouw: 2006 - 2010



Afb. 2.7: Het MAS in Antwerpen, ontworpen door Neutelings Riedijk Architecten. (© Sarah Blee)

Het Museum aan de Stroom (MAS), ontworpen door Neutelings Riedijk Architecten, is gelegen in een oude havenbuurt vlakbij het historisch centrum van Antwerpen, België (Afb. 2.7). Het museum was één van de incubators om de kwaliteit van de site 't Eilandje te verbeteren. Het zestig meter hoge museum is in 2010 voltooid en bestaat uit een inkomsokkel, acht verdiepingen ('museumdozen') en een restaurant bovenaan. De rechthoekige dozen zijn op zo'n wijze gestapeld dat ze per verdieping telkens 90 graden gedraaid zijn ten opzichte van elkaar. Op deze manier ontstaat er een spiraalvormige circulatie. Daarbij krijgen de bezoekers een mooi uitzicht over de stad.

Grote golvende glaspanelen vullen de openingen tussen de museumdozen van het MAS. De publieke circulatiezone is duidelijk zichtbaar van buitenaf dankzij deze gegolfde façade. Wanneer er vanuit verschillende invalshoeken gekeken wordt naar gegolfd glas, treft men telkens een bepaald deel van de golfvorm ongeveer loodrecht aan. Dat maakt dit soort glasgevels transparant vanuit een relatief breed gezichtsveld, dit in tegenstelling tot vlakglasgevels waarbij het glas niet langer transparant is, maar de omgeving reflecteert, wanneer er gekeken wordt vanuit een te scherpe invalshoek. Daarentegen heeft gegolfd glas wel altijd reflecties in het deel dat men niet 'loodrecht aankijkt'.

Net als bij Casa da Música was ABT de structurele adviseur voor dit project in Antwerpen. De hoogtes van de openingen van het MAS waarin golvend glas moest worden geïnstalleerd, zijn vergelijkbaar met die van Casa da Música. In de hoeken komen openingen van tweemaal de vierdiepingshoogte voor (5,5m x 2). Vanwege de beperkte afmetingen van de ovens waarin de glaspanelen worden gevormd, was het niet mogelijk om glaseenheden van 11 meter te maken. Bovendien wordt er bij het proces van het warm buigen gebruik gemaakt van vlakglas en de standaardmaat van glasplaten in de glasindustrie is beperkt tot 6 meter ('Jumbo' panelen van 6 x 3,21m). Grotere platen zijn weliswaar mogelijk, maar zijn eerder uitzonderlijk en duur. Ook omwille van transportredenen worden er vaak beperkingen opgelegd. Daarom werd er gekozen om de 11 m op te delen in twee delen. Het Italiaanse bedrijf Sunglass stond in voor de productie van de warm gebogen glaselementen.

De gegolfde glaselementen zijn boven- en onderaan geplaatst in stalen consoles die dezelfde kromming hebben (Afb. 2.8). Siliconenvoegen aan zowel de binnen- als buitenkant garanderen de waterdichtheid. De stalen elementen laten slechts zeer geringe toleranties toe. De mate van nauwkeurigheid in de productie van de glazen panelen is dan ook cruciaal. Aangezien het een proces betreft waarbij de elementen één voor één vervaardigd worden, kan er geen exacte uniformiteit worden verwacht. Er zullen altijd kleine verschillen zijn inzake de breedte, de lengte en de krommingen van de individuele elementen. Bij de installatie van de glasunits van het MAS stuitte men dan ook op problemen hiermee, waardoor sommige panelen geforceerd worden om ze te kunnen fixeren in de stalen consoles. Dergelijke panelen zijn dus ter plaatse bijkomend koud vervormd, wat zorgt voor extra onvoorziene spanningen in het glas.



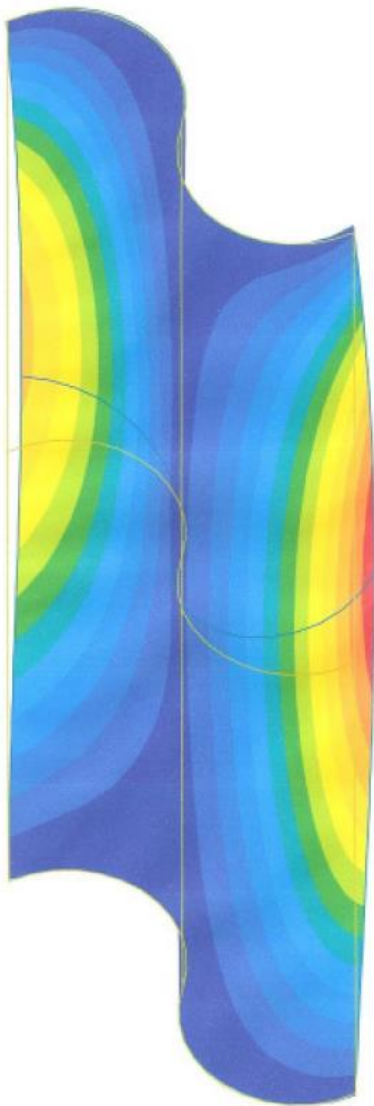
Afb. 2.8: De glaspanelen zijn bevestigd in stalen consoles. De stalen consoles zijn minder lang dan de glaspanelen, dit om problemen met de temperatuuroitzetting en het 'terugveereffect' van staal te minimaliseren. (© Jan Belis)

De glaswanden van Casa da Música in Porto zijn opgebouwd uit klokvormige glaspanelen (in de vorm van een 'Gauss-curve'). Dergelijke symmetrische vormen kregen de voorkeur, gezien er in de panelen een gelijkmatige spanningsverdeling ontstaat wanneer ze belast worden. Toch vereist het productieproces op zich geen symmetrische elementen – *"als je de gewenste gebogen vorm uit een stuk papier kunt vouwen, kan de glasindustrie het maken"* (R. Nijse) [2]. Voor de panelen van het MAS werden dan ook geen klokvormige, maar S-vormige glaspanelen gebruikt (panelen met een volledige golfvorm).

Asymmetrische doorsneden worden dus niet uitgesloten, maar de ontwerper moet zich er van bewust zijn dat asymmetrisch gegolfde glaspanelen extra spanningen in het glas teweegbrengen wanneer ze belast worden. Een paneel met een S-vorm heeft namelijk een 'bol' en een 'hol' deel, en deze twee geometrieën hebben een verschillende stijfheid. Het bolle (convex) deel is minder stijf dan het holle (concaaf) deel. Wanneer het paneel wordt belast, zal de convexe helft bijgevolg meer vervormen en de neiging hebben om 'af te platten'. De concave helft zal daarentegen meer in de oorspronkelijke curve blijven bij dezelfde belasting. Daardoor zal het gehele glaspaneel willen roteren in de richting van het convexe deel (Afb. 2.9).

De gegolfde glaspanelen zitten echter in de stalen consoles ingeklemd, en worden op die manier in hun originele curve gedwongen. De vervormingen worden voornamelijk ter hoogte van de steunpunten tegengehouden. Dat zorgt voor beduidend extra spanningen in het glas.

De verticale voegen tussen de glaspanelen zullen door dit fenomeen eveneens extra spanningen ondervinden. De theoretische uitwijking van het paneel is het grootst in het midden van de overspanning. Dit zal een trekspanning veroorzaken in de siliconenvoeg. Wanneer de spanning te groot zou worden, kan dit leiden tot scheuren en lekken van de verbinding.



Afb. 2.9: Het convex deel (rechts) is minder stijf en zal meer vervormen dan het concave deel (links). (© Uit [2])

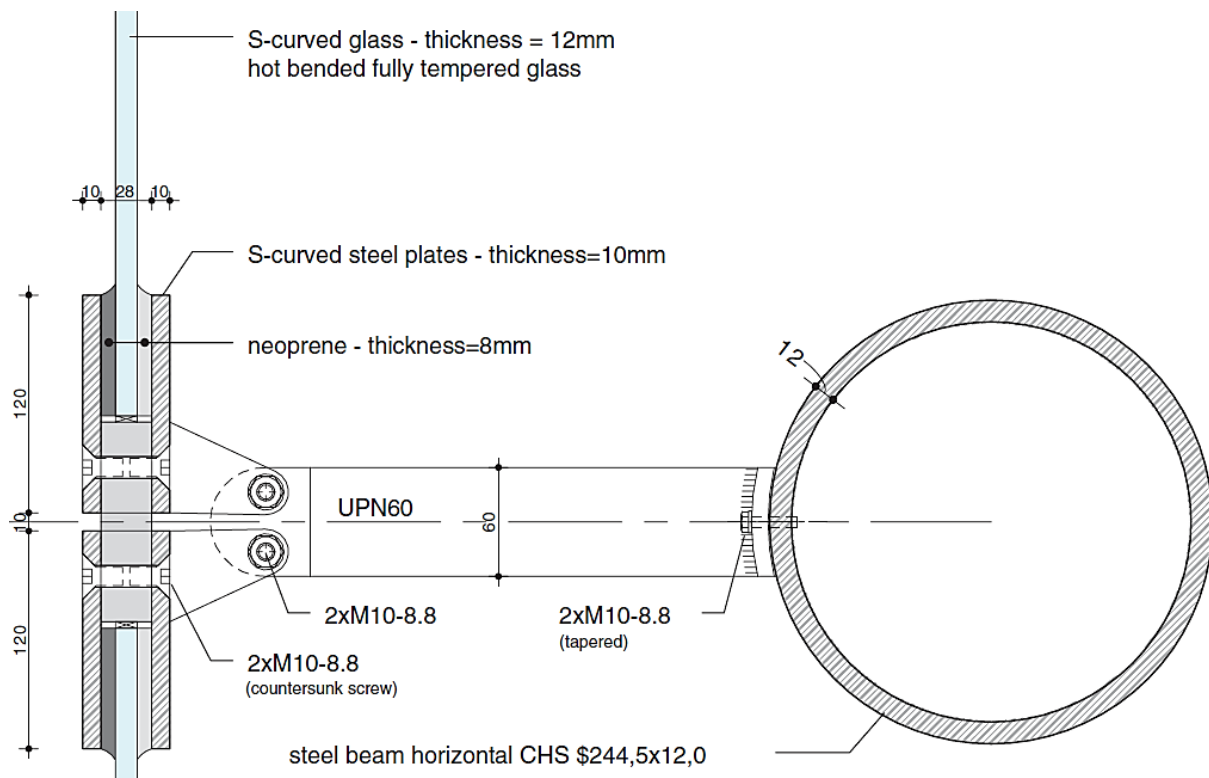
De vereiste dikte van het glas werd door ABT berekend op 12mm. Een individueel glaspaneel van het Museum aan de Stroom is S-vormig, met een breedte van 180cm en amplitudes van 30cm, dus een totale 'golfhoogte' van 60cm. Als het structureel voordeel van gegolfd glas de enige ontwerpbenadering zou geweest zijn, kon de golfhoogte kleiner ontworpen zijn. Vanaf een verhouding van ca. 1/20 tussen golfhoogte en overspanning is het structureel effect van gegolfd glas namelijk duidelijk. In dit geval zou dus voor een overspanning van 5,5 meter een golfhoogte van minder dan 30cm voldoende geweest zijn. De architect koos evenwel voor een grotere golfcurve, met als argumenten dat het zichtvervormingseffect vanop afstand minder uitgesproken is en het de bezoekers de mogelijkheid biedt om 'in' een glasgolf te staan, dicht bij de gevel (Afb. 2.10).



Afb. 2.10: Deze bezoeker staat geborgen in een glasgolf. (© Filip Dujardin)

Horizontale stalen buizen, verbonden tussen twee museumdozen, dienen als tussensteunpunt halverwege de 11 m hoogte (Afb. 2.12). De ronde stalen profielen waren oorspronkelijk

Niettemin stelden er zich vragen omtrent de robuustheid van dit constructieconcept. Het is immers noodzakelijk dat de bovenste glaspanelen op hun plaats blijven en niet naar beneden vallen in het geval dat een onderste paneel breekt of wordt vervangen. Deze overweging heeft geleid tot de beslissing om de horizontale buis toch voldoende groot te dimensioneren om het gewicht van de bovenste panelen te kunnen dragen.



Afb. 2.12: Detailsnede van de horizontale tussensteun voor de elf meter hoge golvende glasgevel (© Uit [1])

Referenties MUSEUM AAN DE STROOM

TEKST

- **[1]** Nijse, & R., Wenting, R. (2014). Designing and constructing corrugated glass facades. *Journal of Facade Design and Engineering*, 2(1–2), 123–131. <https://doi.org/10.3233/fde-140014>
- **[2]** Nijse, R. (2009). Corrugated Glass as Improvement to the Structural Resistance of Glass. *IABSE Symposium Report*, 96(14), 73–85. <https://doi.org/10.2749/222137809796068172>
- **[3]** Pit, M. (2010, 3 augustus). *MAS in Antwerpen (B) door Neutelings Riedijk Architecten*. Geraadpleegd van <https://www.dearchitect.nl/projecten/mas-in-antwerpen-b-door-neutelings-riedijk-architecten>
- **[4]** Van Heugten, R. (2015) Gestapelde glazen kolommen. *Glas in beeld*. 32–36. Geraadpleegd van <https://www.glasinbeeld.nl/wp-content/uploads/2015/07/Gestapelde-glazen-kolommen.pdf>
- **[5]** Belis, J. (2018). *Glass Structures*. (Academiejaar 2018–2019). E044630. Universiteit Gent

AFBEELDINGEN

- **Afb. 2.7:** © Sarah Blee. Geraadpleegd van <https://theculturetrip.com/europe/belgium/articles/how-the-mas-transformed-an-abandoned-antwerp-neighborhood/>
- **Afb. 2.8:** © Jan Belis. Uit [5]
- **Afb. 2.9:** Uit [2]
- **Afb. 2.10:** © Filip Dujardin. Geraadpleegd van <https://www.flickr.com/photos/visitflanders/5667178028/in/photostream/>
- **Afb. 2.11:** Uit [5]
- **Afb. 2.12:** Uit [1]

3. DUBBEL GEKROMDE GLASPANELEN

In dit hoofdstuk worden twee gebouwen met indrukwekkende gekromde glasgevels van dichterbij bekeken. Er bestaan verschillende mogelijkheden die toelaten om organisch vormgegeven glasfaçades op een performante en veilige manier uit te voeren.

3.1 EMPORIA SHOPPINGCENTER

• WINGÅRD • Malmö, Zweden

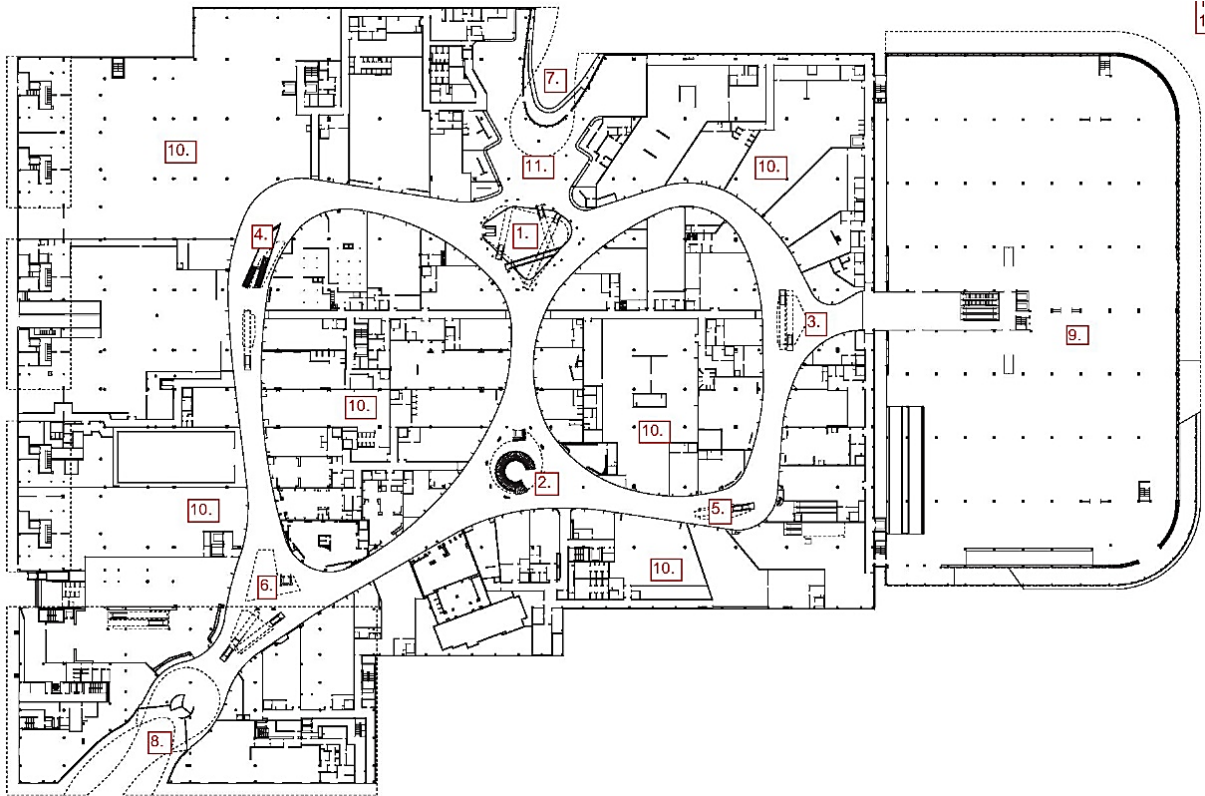
bouw: 2008 - 2012



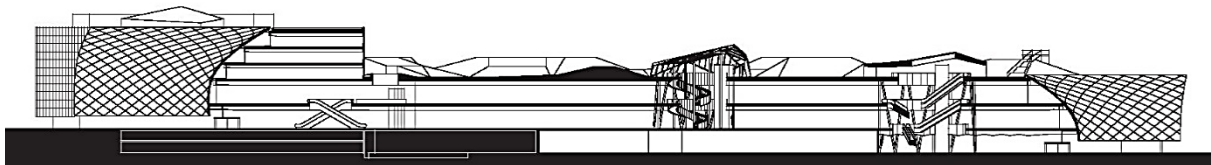
Afb. 3.1: De amberkleurige ingang van het Emporia-complex, in lijn met de recente woningbouwprojecten.
(© nordanopartners.com)

Emporia is een groot winkelcomplex in Malmö (Zweden), ontworpen door het Zweedse architectenbureau Wingård (Afb. 3.1). Het complex combineert veel functies. Men vindt er kantoren, woningen, winkels, restaurants, een grote parkeergarage en een publiek park op het dak met uitzicht op zee (Afb. 3.4). Het project werd in 2012 ingehuldigd en maakt deel uit van een masterplan om de stad nieuw leven in te blazen. Alle winkelruimtes zijn naar binnen gericht (Afb. 3.2)

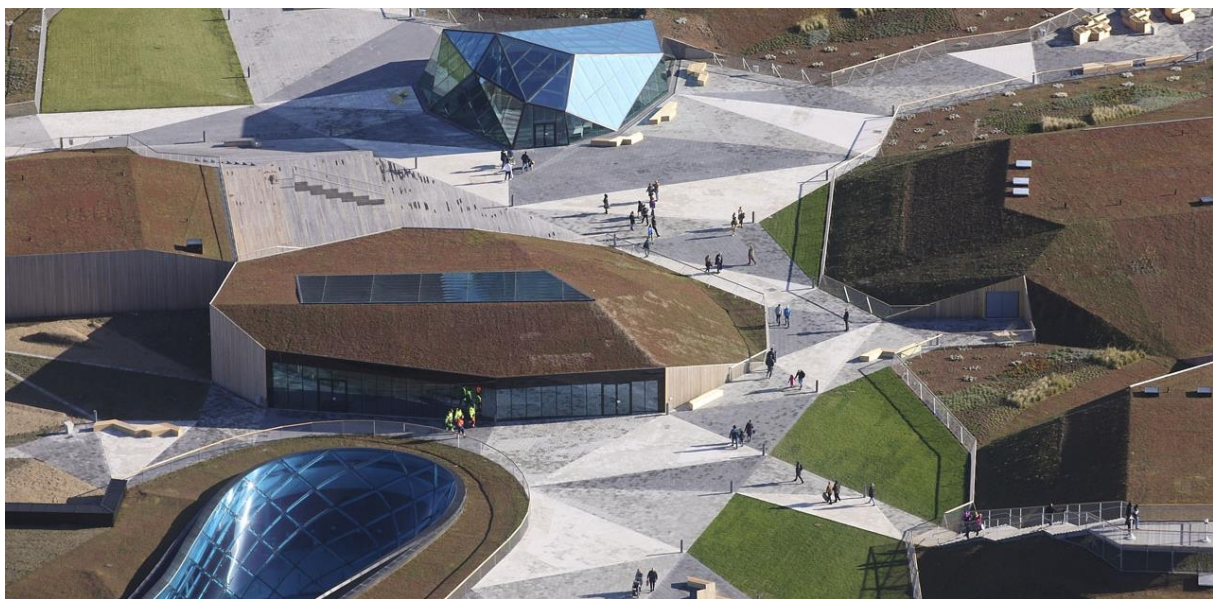
en verschuilen zich achter een rij residentiële en commerciële gebouwen, waardoor het complex beter in het weefsel van de stad wordt geïntegreerd. De hoofdingangen, waarvan één gericht naar het nabijgelegen stationsplein, snijden diagonaal door het gebouw (Afb. 3.3). Voor deze ingangen zijn spectaculaire glazen gevels met vrije vorm ontworpen met het idee bezoekers aan te trekken om binnen te komen en te winkelen.



Afb. 3.2: Plan van het gelijkvloers. De winkels zijn georganiseerd rond een interne 8-vorm. (© Wingårdhs Arkitektkontor AB)



Afb. 3.3: Snede doorheen de as van de twee grote ingangen. (© Wingårdhs Arkitektkontor AB)



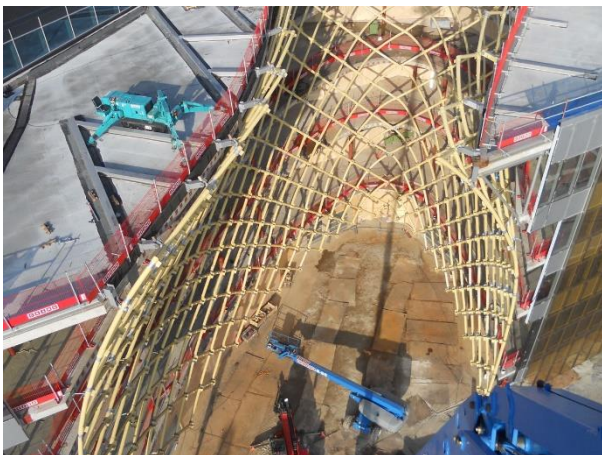
Afb. 3.4: Het park op het dak, met hellingen en paviljoens die de technische ruimtes verbergen. (© Tord-Rikard Söderström)

Om het concept van de Zweedse architecten te verwezenlijken, werd het Spaanse ingenieursbureau Folcrá aangesteld om de organische vorm op een bouwbare manier te modelleren.

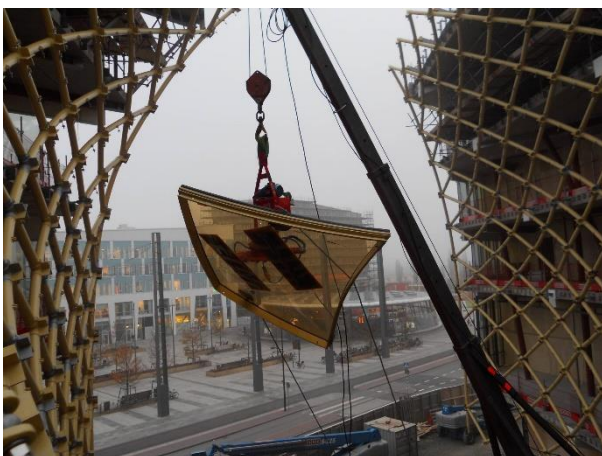
Folcrá ontwierp de staalconstructie, maakte modellen op ware grootte, dimensioneerde elk uniek dubbel gebogen gelaagd glaspaneel en leidde de uitvoering op de bouwplaats (Afb. 3.5 t.e.m. 3.7).



Afb. 3.5: Links: Bevestiging van de eerste stalen buisprofielen aan de bovenste betonnen vloerplaat. Rechts: Montage van het stalen grid. (© Folcrá)



Afb. 3.6: Links: Voltooiing van de staalconstructie. Rechts: De verpakte gelamineerde dubbel gebogen glaspanelen. (© Folcrá)



Afb. 3.7: Elk glaspaneel is door middel van acht steunpunten aan de staalconstructie bevestigd. (© Folcrá)

Een gevel met een willekeurige geometrie zoals in dit project kan worden benaderd door het vlak voldoende op te delen en gebruik te maken van enkelvoudig gekromde of vlakke glaspanelen. Dit soort gevels maken wel een ‘gefacetteerde’ indruk. Voor het Emporia-project wensten de architecten echter zo dicht mogelijk in de buurt te komen van een ‘gladde’ organische vorm (Afb. 3.8). Daarom werd er besloten om voor dubbel gekromde glaspanelen te kiezen. Opnieuw werd de Spaanse firma Cricursa, gespecialiseerd in gebogen glas, de verantwoordelijke voor de productie van de gekromde glaspanelen.

Gekromd glas kan op verschillende methodes gefabriceerd worden. Ten eerste kan het initiële vlakke glaspaneel gebogen en thermisch gehard worden op hetzelfde moment. Evenwel is dit proces enkel in staat om cilindrische vormen te bekomen. Daarom werd er niet voor deze techniek gekozen. Bovendien was gehard glas niet nodig in dit project; voor de gelamineerde glaspanelen voldeed uitgegloeid (float) glas aan alle vooropgestelde projectvereisten zoals sterkte, veiligheid, optische kwaliteit en kosten.

Omdat gehard glas niet vereist was, werd ook ‘koud’ buigen, waarbij vlakke geharde glasplaten in situ in de gewenste vorm worden geforceerd, niet overwogen. Daarnaast hadden veel glaspanelen kleine kromtestralen, wat niet mogelijk zou zijn met de koude buigmethode.

Voor het Emporia-project had warm gebogen glas de voorkeur boven de andere technieken, omdat dit proces het mogelijk maakte om elke (dubbel) gekromde vorm te creëren die Wingård en Folcrá hadden ontworpen. Cricursa produceerde bijna 600 verschillende op maat gemaakte mallen om de meer dan 800 glaspanelen te produceren.

Vanwege de grootte van sommige panelen (de grootste tot 1 m x 5,6 m), was het voor Cricursa een echte uitdaging om aan de vereiste nauwe toleranties te voldoen. Het bedrijf loste dit op door elk van de bijna 600 gebogen mallen vooraf in 3D te scannen, zodat ze zeker correct gemaakt waren. Daarna hebben ze ook een groot percentage van de voltooide gebogen panelen gescand, om te kijken in hoeverre ze van de gewenste vorm afwijken om aldus te checken of ze allemaal binnen de vooropgestelde specificaties bleven. Dat bleek in orde te zijn.

Deze op zwaartekracht gebaseerde procedure eindigt met het langzaam afkoelen van de gekromde glasplaat tot de omgevingstemperatuur. Als het glas op kamertemperatuur is, kan het lamineren van twee bij elkaar horende panelen beginnen. Gelaagd veiligheidsglas is vereist wanneer er beglazing toegepast wordt waaronder zich personen kunnen bevinden, wat hier het geval is (Afb. 3.9). Tussen twee glasplaten werd een conventionele polyvinylbutyral (PVB) tussenlaag geplaatst (een polymeer).



Afb 3.8: Dubbel gekromde gekleurde glazen enveloppen boven de hoofdingangen aan de oost- en westzijde van het Emporia-gebouw. (links: © Tord-Rikard Söderström, rechts: © Folcrá)



Afb. 3.9: De organische glasgevel creëert patio-achtige ruimtes in de tussenzone. (© John Johanson)

Bij een gebruikelijk PVB-lamineerproces voor vlakke glasplaten wordt de adhesieve verbinding tussen de lagen uitgevoerd met een autoclaaf (een combinatie van een oven en een druk-tank). Vóór het autoclaveren zijn de glaspanelen en de PVB-tussenlaag al gedeeltelijk met elkaar verbonden, meestal met behulp van het 'nip-roll' proces waarbij warme rollende wielen de lagen tegen elkaar duwen. Het geheel wordt vervolgens op een wagentje geplaatst en in de autoclaaf gereden, waar de tussenlaag vloeibaar wordt en de definitieve hechting tussen de glasplaten en de PVB-tussenlaag plaatsvindt.

Gebogen glaslaminaten kunnen worden gefabriceerd door niet één, maar meerdere vlakke glasplaten met daartussen een textiel op te warmen en zo te laten inzakken tot hun gewenste pasvorm. Na afkoeling, wordt het textiel

vervangen door een PVB tussenlaag en wordt het geheel aan elkaar gehecht in een autoclaaf. Dit gekromd gelaagd glas kan op zich gebruikt worden of dienen als paneel in een IGU ('insulating glass unit', dubbelglas).

Desalniettemin dienen voor het lamineren van gebogen glas soms andere methoden te worden toegepast, zeker bij dubbel gekromde elementen. Een voorbeeld is de 'cast in place' techniek waarbij na het afdichten van de randen een vloeibare hars tussen de glaslagen wordt gegoten die onomkeerbaar uithardt door bijvoorbeeld blootstelling aan warmte of UV-straling.

Voor dit project werd echter gekozen om een lamineerproces met vacuümzakken te gebruiken. Daarbij waren de gekromde glasplaten met de PVB-film ertussenin in een rubberen zak gestoken waaruit de lucht wordt weggepompt (zodat een vacuüm wordt gecreëerd), gevolgd door het opwarmen van het geheel in een oven om de uiteindelijke binding te creëren.

Op vraag van de architecten om de gewenste kleur en lichttransmissie te krijgen, werd er gekozen voor blauw- en amberkleurige PVB-tussenlagen (Saflex® Vanceva® Color). De keuze voor getinte tussenlagen van polyvinylbutyral heeft het voordeel dat de gevel meer zonnewerend is in vergelijking met transparante tussenlagen (g-waarden² van 0,58 voor het amberkleurige glas en 0,53 voor het blauwe glas).

² De g-waarde van beglazing is de verhouding van de hoeveelheid zonne-energie die (direct en indirect) door de beglazing binnenkomt ten opzichte van de totale hoeveelheid loodrecht op het glas vallende zonne-energie. De g-waarde is een getal tussen 0 en 1 (of in % uitgedrukt). Hoe hoger de g-waarde, hoe minder zonnewarmte er wordt tegengehouden. Conventioneel dubbelglas heeft een g-waarde van ca. 0,70. (© www.joostdevree.nl/shtmls/g-waarde.shtml)

Referenties EMPORIA SHOPPINGCENTER

TEKST

- **[1]** Archello. *Emporia / Wingårdhs Arkitektkontor AB, Green Fortune, Folcra*. Geraadpleegd van <https://archello.com/nl/project/emporia>
- **[2]** Cornachio, J. (2018, 11 augustus). *Mind-Benders: 5 Unbelievable Curved Glass Façades*. Geraadpleegd van <https://architizer.com/blog/inspiration/collections/curved-glass-facades/>
- **[3]** Belis, J. (2018). *Glass Structures*. (Academiejaar 2018–2019). E044630. Universiteit Gent

AFBEELDINGEN

- **Afb. 3.1:** Geraadpleegd van <https://www.nordanopartners.com/credentials/divestment-of-emporia-office-part-of-the-award-winning-shopping-centre-emporia/>
- **Afb. 3.2, 3.3:** © Wingårdhs Arkitektkontor AB. Uit [1]
- **Afb. 3.4, 3.8 Links:** © Tord-Rikard Söderström. Uit [1]
- **Afb. 3.5 t.e.m. 3.7, 3.8 Rechts:** © Folcrá. Emporia. Uit [1]
- **Afb. 3.9:** © John Johanson. Uit [1]

3.2 FONDATION LOUIS VUITTON

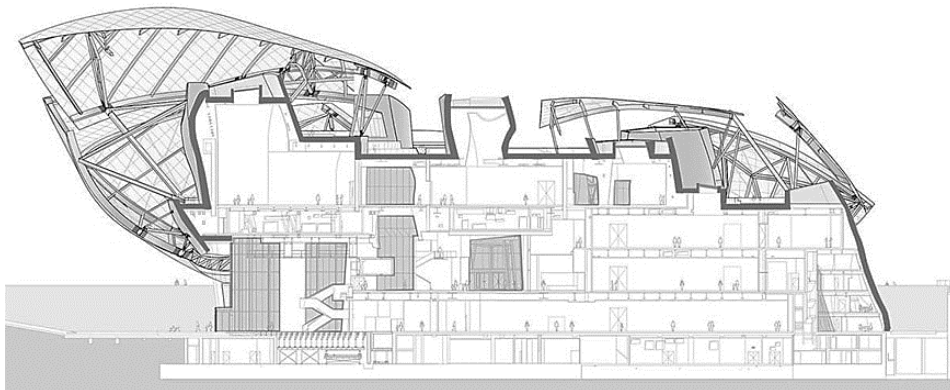
• GEHRY PARTNERS • Parijs, Frankrijk



Afb. 3.11: Louis Vuitton Fondation in Parijs, ontworpen door Gehry Partners. (© Iwan Baan)

De Fondation Louis Vuitton, voltooid in 2014, is een kunstmuseum en cultuurcentrum gelegen in het Bois de Boulogne, één van de grootste parken aan de westkant van Parijs (Afb. 3.11). Het doel van het nieuwe gebouw is om bij zoveel mogelijk (jonge) mensen de interesse voor kunst en cultuur aan te scherpen door het werk van hedendaagse kunstenaars te promoten. Het expressieve museumgebouw is ontworpen door het beroemde Amerikaanse bureau Gehry Partners. Het is vormgegeven als een reeks 'ijsbergen' die worden beschermd door twaalf enorme glazen 'zeilen'. De ijsbergen (witte sculpturale volumes bekleed met panelen van vezelversterkt beton) bevatten 4000m² aan museumruimte, elf tentoonstellingsgalerijen en een groot auditorium (Afb. 3.12).

Deze witte volumes vormen de structurele kern van het gebouw en ondersteunen de grote glazen luifels met behulp van meer dan 200 enkel en dubbel gebogen gelamineerde houten balken, vervaardigd door Hess Timber uit Duitsland. De twaalf glazen 'vleugels', elk met hun unieke geometrie, *"geven Fondation Louis Vuitton zijn transparantie en bewegingsgevoel, terwijl het gebouw het water, de bossen en de tuin weerkaatst en voortdurend verandert met het licht"* [1], aldus de architecten. Bernard Arnault, oprichter en president van Louis Vuitton Moët Hennessy, zegt dat de uitmuntendheid in het werk van Gehry overeenkomt met de professionaliteit van Louis Vuitton en noemt het gebouw een monument van 21e-eeuwse architectuur.



Afb. 3.12: Langse snede van het Fondation Louis Vuitton. (© Gehry Partners, LPP)

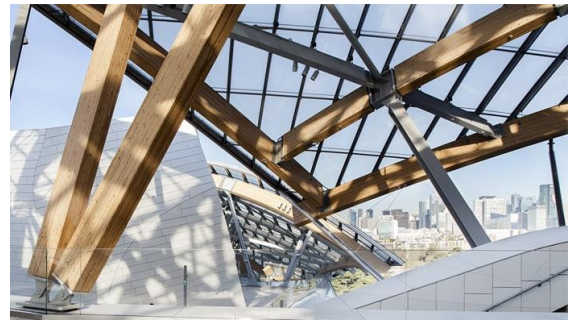
Een gelaagd glaspaneel voor het dak is gemaakt uit geharde glasplaten van 6 en 8mm dik. Als verbindende tussenlaag werd hier gekozen voor SentryGlas®, een product dat oorspronkelijk afkomstig is van DuPont de Nemours en nu opgenomen is in de Kuraray-groep. SentryGlas® is een tussenlaag die bekend staat om zijn hoge stijfheid en sterkte, waardoor het de favoriete tussenlaag is voor glaslaminaten in dragende glasstructuren of bijvoorbeeld in orkaanzones.

Een belangrijk aandachtspunt bij een laminaat uit twee geharde glasplaten, is de prestatie na breuk. Met een conventionele PVB-tussenlaag kan het laminaat, afhankelijk van de manier waarop het wordt ondersteund, naar beneden doorhangen wanneer beide glasplaten gebroken zijn (het zogenaamde ‘natte dweil effect’). Om dit effect enigszins tegen te gaan, werd er in dit project voor SentryGlas® gekozen.

Als men kiest voor een PVB-tussenlaag, is het beter om een ander type glas te gebruiken, ten minste toch voor één van de panelen. Types als thermisch versterkt glas of klassiek uitgegloeid glas zijn dan meer aangewezen om te gebruiken vanwege hun overlappend breukpatroon van beide lagen. De keuze voor uitgegloeid glas bij een PVB-tussenlaag zagen we bij het vorige project Emporia in Zweden. *(Zie addendum 2 voor meer uitleg over het breukgedrag van gelamineerd glas.)*

De SentryGlas® tussenlaag is echter veel stijver, waardoor voor beide platen gehard glas gebruikt kan worden en het toch een goede weerstand tegen doorbuigen heeft nadat het laminaat gebroken is. De samenstelling van de dakpanelen van het museum is een veilige ontwerpkeuze (Afb. 3.13), iets wat ook werd benadrukt door Jacques Raynaud van RFR/TESS, de tijdelijke samenwerking die verantwoordelijk was voor de conceptengineering.

Aan de binnenzijde van het 6mm dikke glaspaneel is zowel een reflecterende coating als een witte bedrukking van 50% dekking geïntegreerd (Afb. 3.14). Enerzijds biedt dit bescherming tegen de zon voor de bezoekers die onder de enorme glazen zeilen vertoeven en anderzijds creëert dit het visuele effect dat de architecten voor ogen hadden.

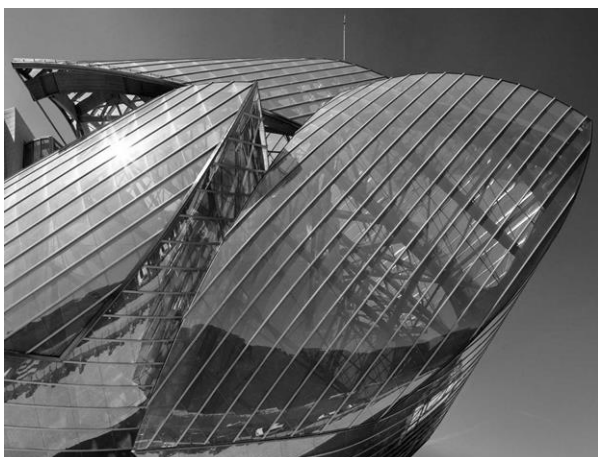


Afb. 3.13: Veiligheidsglas is vereist voor glazen luifels.
(© Felix Cornu)



Afb. 3.14: Close-up van de witte bedrukking. (© L. Bargagli)

Het Amerikaanse racejacht ‘Susanne’ uit 1911 (Afb. 3.15) diende als inspiratie voor de geometrie van de glazen zeilen van het museum. In een eerste ontwerp hadden de 3600 glaspanelen elk een andere buigradius, van bijna plat tot wel drie meter. Hierbij diende elk glaspaneel (3x1,5m) individueel te worden gevormd. Warm buigen werd onmiddellijk afgewezen omdat het te duur zou uitvallen gezien er voor elk afzonderlijk glaspaneel een unieke mal diende gemaakt te worden. Ook koud buigen was niet aan de orde omdat het niet haalbaar was om sommige panelen koud te vervormen tot de hoge krommingsgraad die was ontworpen.



Afb. 3.15: Links: De dubbel gebogen glazen luifels van het Fondation Louis Vuitton (© Todd Eberle). Rechts: 'Susanne' ontworpen door William Fife, gebouwd in 1911. (© Frank Beken)

De keuze viel op indrukwekkende buigmachines die tegelijkertijd glaspanelen kunnen buigen en thermisch harden (Afb. 3.16). Echter, zoals vermeld in het vorig project kunnen dergelijke machines de glaspanelen slechts in één krommingsrichting buigen. Daartoe werd er een nieuwe geometrie ontworpen die enkel bestond uit cilindrisch gevormde glaspanelen, waarbij natuurlijk wel werd getracht om de oorspronkelijke vorm zo goed mogelijk te benaderen.

Maar uiteindelijk slaagde Sunglass Industry, de glasspecialist uit Italië, erin om één van zijn buigovens zo te modificeren dat het toch mogelijk werd om geharde glaspanelen te fabriceren met twee verschillende graden van kromming. Door het glas tijdens het buigproces te laten 'kantelen' vanaf een bepaalde zijde is het namelijk mogelijk om (licht) dubbel gekromde geharde glasplaten te produceren.

De meeste van de in totaal 3600 panelen bleven cilindrisch, maar bepaalde grote oppervlakken konden nu worden bedekt door de dubbel gekromde panelen. De extra vrijheidsgraad resulteerde logischerwijze in een betere afstemming van de oorspronkelijke gewenste vorm.

Voor de volledigheid: gebogen glas kan ook worden gehard door meteen na het uit de oven halen, koude lucht langs beide zijden van het

paneel te blazen om zo ofwel gehard glas (zeer korte afkoelperiode) ofwel thermisch versterkt glas (iets langere afkoelperiode) te bekomen, maar hier werd er zoals vermeld niet voor gekozen om het glas warm te buigen.

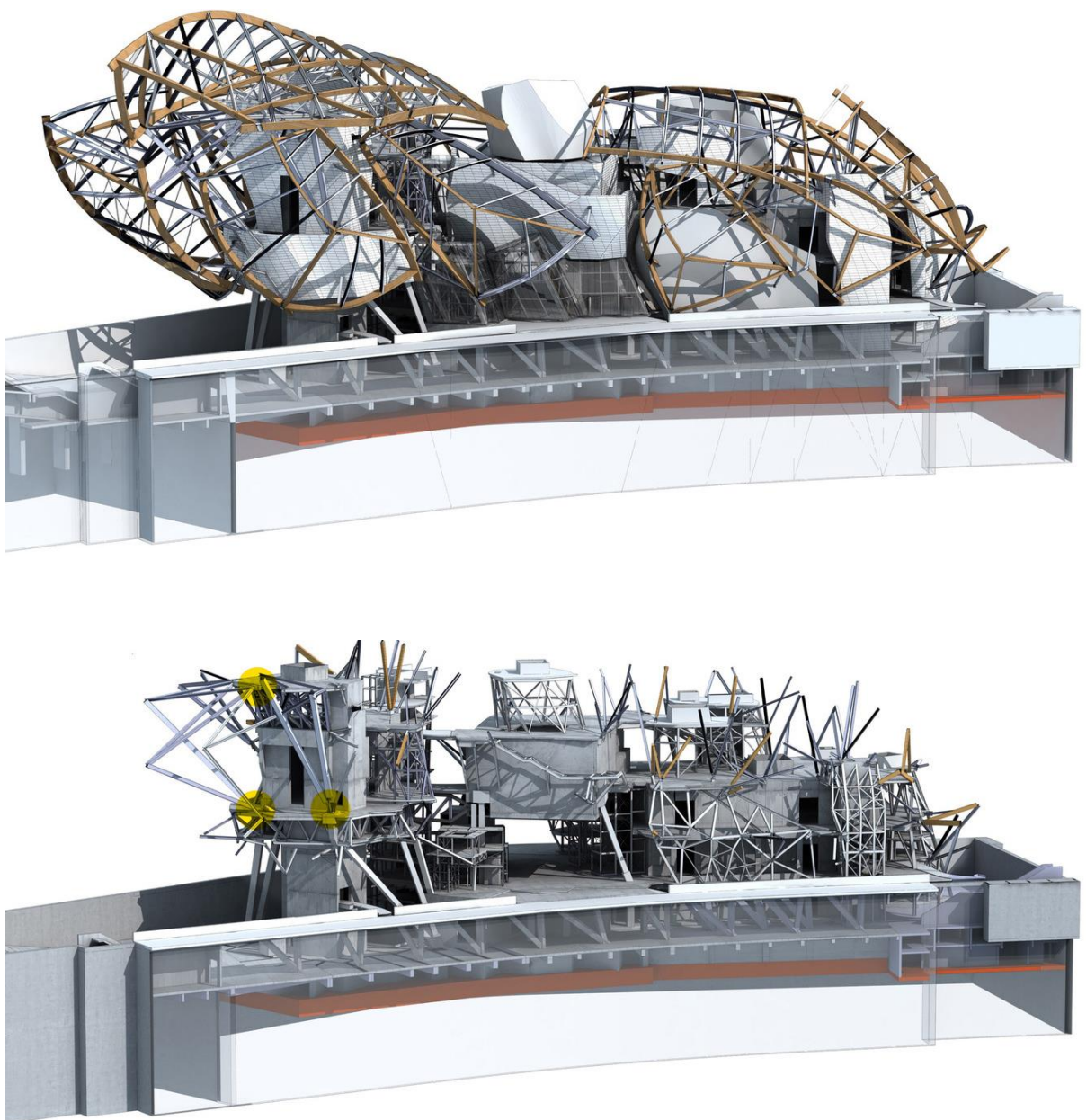


Afb. 3.16: Machine om glaspanelen warm te buigen, in combinatie met thermisch harden. (© screenshot uit 'Glaston ProBend at Glas Gasperlmaier in Austria') (niet van dit project, enkel ter illustratie)

Voor de bevestiging van de gebogen glaslaminaaten op de roestvrijstalen frames werd structurele silicone Dow Corning® 993 gebruikt. Dit product zorgt voor een sterke hechting tussen de twee materialen. Om de brede uitzettingsvoegen tussen de rijen van glaspanelen af te dichten (staal en glas hebben een verschillende thermische uitzettingscoëfficiënt), werd er een ander soort silicone uit het Dow Corning®-assortiment geselecteerd. Deze draagt bij aan de melkachtige schijn van de beglazing. Beide hebben bovendien de eigenschap dat ze chemisch compatibel zijn met het SentryGlas®-ionomeer, wat een belangrijke voorwaarde is gezien er contact is tussen de silicone en de tussenlaag.

Ian Belcher, de manager van BDS VirCon, verklaarde dat voor een dergelijke complexe structuur het niet mogelijk zou zijn geweest om deze te bouwen zonder het gebruik van 3D-modelleren en een alomvattende benadering van BIM (Afb. 3.17). BDS VirCon is het bedrijf dat onder andere het stalen hoofdfraam, de houten balken en het funderingsframe heeft gedimensioneerd. Ze leverden ook CAM-bestanden ('computer aided manufacturing') voor de walsprocessen van de gemodificeerde buigoven van Sunglass.

De gebogen glaspanelen van de zeilen worden langs hun lange zijden geklemd in roestvrijstaalen profielen met dezelfde kromming. De firma Eiffage die deze gebogen stijlen vervaardigde, was in staat om de productie van de elementen te automatiseren doordat de benodigde informatie om de machines aan te drijven uit het BIM-model kon worden gehaald.



Afb. 3.17: 3D-model van de complexe structuur van het Fondation Louis Vuitton. (© Gehry Partners, LPP)

Referenties FONDATION LOUIS VUITTON

TEKST

- **[1]** Archello. *Foundation Louis Vuitton Museum / Fondation Louis Vuitton, Sadev Architectural Glass Systems, Poltrona Frau Group Contract*. Geraadpleegd van <https://archello.com/project/foundation-louis-vuitton-museum>
- **[2]** Cornachio, J. (2018, 11 augustus). *Mind-Benders: 5 Unbelievable Curved Glass Façades*. Geraadpleegd van <https://architizer.com/blog/inspiration/collections/curved-glass-facades/>
- **[3]** SUNGLASS Industry srl. (2015, 1 december). *Louis Vuitton Fondation, Paris*. Geraadpleegd van <https://www.sunglass.it/fondation-louis-vuitton-pour-la-cration/>
- **[4]** ArchDaily. (2014, 13 oktober). *Fondation Louis Vuitton / Gehry Partners*. Geraadpleegd op 21 april 2020, van <https://www.archdaily.com/555694/fondation-louis-vuitton-gehy-partners/>
- **[5]** Äppelqvist, M. (2015, 10 september). *Bent glass: an obstacle or an opportunity?* Geraadpleegd van <https://www.glastory.net/curved-glass-an-obstacle-or-an-opportunity-in-glass-architecture/>

AFBEELDINGEN

- **Afb. 3.11:** © Iwan Baan. Uit [4]
- **Afb. 3.12:** Geraadpleegd van <https://www.inexhibit.com/wp-content/uploads/2018/06/Fondation-Louis-Vuitton-Paris-Frank-Gehry-longitudinal-section.jpg>
- **Afb. 3.13:** © Felix Cornu. Geraadpleegd van <https://www.inexhibit.com/wp-content/uploads/2018/06/Fondation-Louis-Vuitton-Paris-Frank-Gehry-exterior-09.jpg>
- **Afb. 3.14:** © L. Bargagli. Louis Vuitton. Trosifol as Laminated glass. Uit [1]
- **Afb. 3.15 Links:** © Todd Eberle. Uit [4]
- **Afb. 3.15 Rechts:** © Frank Beken. Geraadpleegd van <https://thehoworths.com/wp-content/uploads/2014/06/Susanne-1911-12204scA3sepia.jpg>
- **Afb. 3.16:** Screenshot uit 'Glaston ProBend at Glas Gasperlmaier in Austria'. Geraadpleegd van <https://www.youtube.com/watch?v=wayzXmas8IM>
- **Afb. 3.17:** © Gehry Partners, LPP. Uit [4]

4. KOUD GEBOGEN GLASPANELEN

In het vierde hoofdstuk wordt de techniek om glas 'koud' te buigen van dichtbij bekeken. Verrassend uitdagende gebogen glasgevels kunnen hiermee uitgevoerd worden, en dat vaak tegen lagere kosten in vergelijking met 'warm' gebogen glaspanelen. Tevens wordt ook het 'buigen door lamineren' besproken aan de hand van een casestudie in Frankrijk.

4.1 IAC HOOFDKANTOOR

- GEHRY PARTNERS • New York, VS

bouw: 2005 - 2007



Afb. 4.1: Het hoofdkantoor van IAC in New York City, ontworpen door Gehry Partners. (© Drew Dies)

IAC of InterActiveCorp is een intercontinentaal bedrijf dat meer dan 150 merken en producten in de media- en softwarewereld onder haar hoede heeft. Hun hoofdkantoor is gelegen op een prominente locatie langs de Hudson rivier in Manhattan, New York City.

Het sculpturale gebouw werd wederom ontworpen door architectenbureau Gehry Partners en werd in 2007 opgeleverd. Door de opdeling in acht getordeerde secties en de witte glaspanelen kan hier opnieuw het metaforisch beeld van een 'ijsberg' gebruikt worden (Afb. 4.1).

Het gebouw is horizontaal gesplitst in twee hoofdniveaus van elk vijf verdiepingen (Afb. 4.2). Het gelijkvloers is een immense lobbyruimte van ongeveer zes meter hoog. De andere verdiepingen bieden ruimte aan landschapskantoren voor de meer dan 400 IAC-medewerkers in het gebouw. Op het zesde niveau bevindt zich een groot terras, gecreëerd door het terugtrekken van het gebouw. De directeur van IAC koos voor glas als gevelmateriaal in plaats van titaniumpaten, zoals Gehry oorspronkelijk had voorgesteld. Dit was het eerste project van Gehry Partners in New York en bovendien is het de eerste vliesgevel ter wereld van dit formaat die geconstrueerd werd uit koud gebogen glas. De term 'koud gebogen' verwijst naar het proces waarbij (gelamineerde) glaspanelen eerst vlak geleverd worden op de bouwplaats en daarna bij omgevingstemperatuur in een bepaalde kromming worden gedwongen en zo bevestigd aan een structuur.

Om de glaspanelen met verschillende afmetingen en krommingen te kunnen bevestigen, werd er een geavanceerd vliesgevelsysteem uit aluminium frames ontworpen door Permasteelisa. Permasteelisa is een internationaal toonaangevend bedrijf met expertise in vliesgevels en gevelbekledingen, dat eerder al samenwerkte met Gehry Partners aan een aantal projecten. Terwijl Gehry's kantoor nog sleutelde aan de volumetrie van het gebouw, was Permasteelisa al gelijktijdig het nieuwe systeem voor de bekleding aan het ontwerpen. Om te checken of het ontwerp structureel haalbaar bleef, werkten beide kantoren nauw samen aan een gecentraliseerd 3D-model. *"Gehry is erg flexibel; hij begrijpt de beperkingen van productie en installatie"* [1], aldus De Gobbi, toenmalig hoofd van Permasteelisa North America.



Afb. 4.2: Het eerste project van Frank Gehry in New York, naast het later gebouwde '100 Eleventh Avenue'-gebouw ontworpen door Jean Nouvel. (© Reading Tom)

De gegevens uit het 3D-model van elk individueel glaspaneel werden gebruikt bij het automatisch fabricageproces. Daardoor kwamen de uitgesneden glas- en metaalcomponenten perfect overeen met het model. Van de in totaal 1450 gefabriceerde vliesgevelcomponenten zijn er ongeveer 1150 uniek.

Het vlak geproduceerde glas werd voorzien van een coating en een witte bedrukking (E: 'frit' of 'enamel') die heel bepalend is voor het uitzicht (Afb. 4.3 en 4.6). Dergelijke 'keramische inkt' bevat kleine deeltjes gemalen glas ('frit') en wordt tijdens het fabricageproces met het glas versmolten. Zo maakt de bedrukking integraal deel uit van de glasplaat en heeft het een heel goede duurzaamheid. Er zijn tegenwoordig twee manieren om dergelijke bedrukkingen aan te brengen: via zeefdruk of via digitaal printen met keramische inkt. Hier werd de zeefdruktechniek gebruikt, waarbij gekozen werd voor een patroon dat gradueel vervaagt van 100% vulling aan de uiteinden van de gevelelementen naar 0% op ooghoogte.

Het glas kan achteraf gebogen worden zonder de kwaliteit van de bedrukking aan te tasten. Daarnaast *"zijn er enkele coatings die op vlak glas kunnen worden aangebracht en vervolgens in vorm kunnen worden gebogen zonder de prestatie van de coating te verstoren"* [4], vertelt Peter Arbour, een expert in beglazing (voorheen bij ingenieursbureaus RFR en Seele, nu bij het architectuurbureau Vidaris uit New York).

Gekromd dubbelglas kan worden samengesteld uit enkele of gelaagde glaspanelen (van uitgegloeid, thermisch versterkt of gehard glas), afhankelijk van de verwachte spanningen en het gewenste gedrag na een breuk van één of meerdere glasplaten. Bij de IGU's van het IAC-gebouw werd er gekozen om ze samen te stellen uit drie glasplaten van 3/8 inch (~10mm), waarvan de twee buitenste gelamineerd zijn en de binnenste gehard is. Ze worden gescheiden door een geïsoleerde luchtsouw van een halve inch (~13mm). Als tussenlaag in koud gebogen gelamineerd glas dat gefixeerd is in een frame, wordt meestal gekozen voor een PVB-tussenlaag, hetgeen ook in dit project werd gebruikt.

De vlakke IGU's werden op voorhand verbonden aan een frame uit geëxtrudeerd aluminium profielen. Permasteelisa besloot om verbindingen te gebruiken die zowel verticale als horizontale beweging zouden toelaten, wat nodig was tijdens het krommen van de panelen. Vanwege de onregelmatige geometrieën konden de constructeurs niet één set mannelijke/vrouwelijke aansluitingen gebruiken, maar moesten er zes op maat gemaakte sets ontworpen worden. De meeste IGU's vereisten twee verticale en vier horizontale profielen. De gehelen uit glas en aluminium werden ingepakt en in vlakke toestand naar de bouwplaats verzonden.

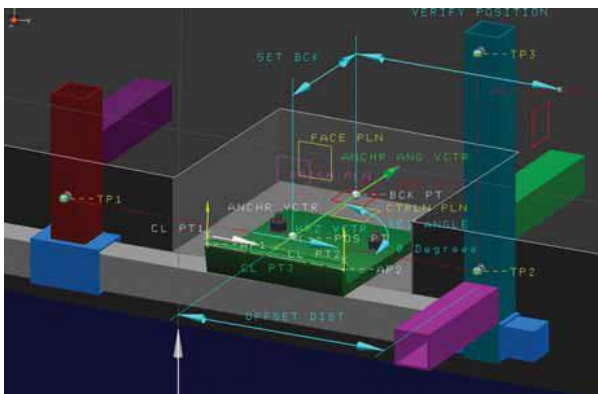


Afb. 4.3: De witte bedrukking. (© generalglass.com)

Om de gevelbekleding aan de structuur te bevestigen, werden er op de betonnen vloerplaten beugels gemonteerd. Vanwege de kleine plaat-singstoleranties van de gevelelementen, moesten deze verankeringspunten heel exact geplaatst worden. Daarom werd door Permasteelisa eerst de 'as built'-betonconstructie nauwkeurig in kaart gebracht en daarna werd gebruik gemaakt van het 3D-model om de exacte locatie van elke beugel te bepalen. X-, Y- en Z-coördinaten die uit het model werden gehaald, werden op de structuur gelokaliseerd met behulp van geavanceerde meetapparatuur. De beugels bestaan uit drie aluminium componenten die zo zijn ontworpen dat elk ankerpunt zowel omhoog en omlaag als naar rechts en naar links kan bewegen. Een centraal stuk dat op de vloerplaat is vastgeschroefd, maakt aanpassingen naar voren of naar achteren mogelijk. De beugels kunnen dus in de driedimensionale ruimte bewegen totdat ze overeenkomen met de coördinaten van het model (Afb. 4.4).

In totaal moesten er bijna 1800 beugels geplaatst worden, maar vanwege de complexiteit van hun installatie kon een team van landmeters er slechts ongeveer 15 per dag installeren. Deze tijdrovende taak was echter essentieel voor het uiteindelijke uitzicht van het project. Bovendien had men bij Permasteelisa nu een systeem in handen dat men ook voor toekomstige projecten met koud gebogen glasgevels kon gebruiken.

Dankzij dit grondige voorbereidingswerk konden de 'prefab' gevelelementen (IGU's geklemd in de lineaire aluminium kaderprofielen) eenvoudig en juist geïnstalleerd en gebogen worden (Afb. 4.5). De installateurs bevestigden eerst drie hoeken van een paneel aan de beugels om daarna de vierde hoek te buigen en te fixeren op de voorziene plaats zodra het paneel de gewenste vorm had bereikt.



Afb. 4.4: X-, Y- en Z-coördinaten werden uit het model gehaald om de beugels precies te kunnen installeren.
(© Steel Institute of New York. Uit [1])



Afb. 4.5: De gevelelementen werden in situ gebogen. Ze werden gefixeerd zodra ze de gewenste vorm hadden bereikt.
(© Steel Institute of New York. Uit [1])

Glas koud buigen op de bouwplaats heeft economische en ecologische voordelen tegenover warm gefabriceerde glaspanelen. Enerzijds zijn er geen dure mallen en lange fabricagetijden nodig die de totaalprijs van een project anders aanzienlijk kunnen opdrijven. Anderzijds zijn er bij het 'koude' proces geen ovens nodig en wordt dus de energie die vereist is om het glas te buigen drastisch verminderd. *"Koud buigen is zoveel goedkoper dan warm buigen, dat als we kunnen kiezen voor koud gebogen glas, we altijd zullen kiezen voor koud gebogen glas"* [4], zegt Sameer Kumar, directeur van de afdeling gevelontwerp bij SHoP Architects in New York en docent aan de Universiteit van Pennsylvania.

Een glasplaat heeft op zijn oppervlakken heel veel kleine (micro)scheurtjes. Door glas thermisch of chemisch te harden, komen de oppervlakken van het glaspaneel onder een drukspanning te staan, waardoor deze scheurtjes dicht gedrukt worden. Dat is voordelig voor de (trek)sterkte van het glaspaneel. *(Zie addendum 1 voor meer info over het thermisch harden van glas.)*

Gehard glas heeft zodoende ook een aanzienlijke extra vervormingscapaciteit, wat het koud buigen van glas mogelijk maakt. *"We hebben allemaal glas al eens een beetje zien buigen, en het buigt waarschijnlijk meer dan de meeste mensen denken"* [4], zegt Arbour van Vidaris. Hij schat de grenzen van het koud buigen in met een verhouding van 1 op 1000, respectievelijk tussen de dikte van het geharde glaspaneel en de kromtestraal. Dat zou bijvoorbeeld betekenen dat glas van 12mm dik gebogen kan worden tot een straal van 12m voordat het breekt.

In tegenstelling tot warm buigen, is koud buigen niet permanent. Bijvoorbeeld in dit project; als de aluminium kozijnen verwijderd zouden worden, zou het gebogen glas uit zichzelf terugkeren naar zijn oorspronkelijke vlakke staat. Glas

bij normale gebruikstemperaturen is een elastisch materiaal dat dus geen 'vervormingsgeheugen' heeft en dus geen vormen uit zichzelf vasthoudt.



Afb. 4.6: De opmerkelijke glasgevel, ontworpen door Gehry Partners. (© Peter C. Brandt)

Anderzijds betekent dat ook dat wanneer men een koud gebogen paneel op zijn plaats wil houden, een stevig frame vereist is. Daarom werkt de 'koude methode', waarbij het glas geforceerd wordt, beter bij (grotere) panelen met een niet al te kleine kromtestraal, en bij voorkeur slechts in één richting.

De afstandshouders (hier in aluminium) en de gasafdichtingen (polyisobutyleen) van een IGU kunnen bovendien een beperking zijn voor de hoeveelheid buiging die mogelijk is. Als een IGU gebogen wordt, komt er namelijk extra spanning op de randzone. Daardoor is er op lange

termijn een groter risico op het bezwijken van de perimeterafdichtingen. *“Als u de rand van een IGU zou nemen en er heel hard in zou knijpen, zou u in feite de butyl uit de rand knijpen als een tube tandpasta”* [4], waarschuwt Kumar. Dat zou het falen van de IGU betekenen omdat dan het isolerend gas kan ontsnappen uit de spouw, terwijl vocht en lucht kunnen binnendringen. *“Wanneer u een IGU koud probeert te buigen, is er maar een kleine marge waarbij u dit kunt doen terwijl u er zeker van blijft dat de butyl niet wordt uitgeknepen. Dat is de belangrijkste hindernis bij veel koud buigen van gevels”* [4], voegt Kumar toe.

Warm gebogen glas bezit door het productieproces vaak meer oneffenheden op de oppervlakken. *(Zie addendum 1 voor meer informatie over anisotropie vanwege het harden van glas.)* Bij koud buigen daarentegen wordt het glas niet opnieuw opgewarmd en staat het glas letterlijk onder spanning. Dat resulteert in een betere optische kwaliteit.

“Vlakke plaatmaterialen krijgen niet gemakkelijke dubbele krommingen en kromgetrokken hoeken zoals bij de panelen van het IAC-gebouw benaderen slechts een ‘echte’ dubbele kromming” [4], beweert Kumar. *“Onder bepaalde lichtomstandigheden zijn er onregelmatigheden zichtbaar in de gevel van de IAC”* [4], zegt hij. Dat de stelling van Kumar lijkt te kloppen, merken we aan de ongelijke weerspiegelingen van het prominent gevelpatroon van het nabijgelegen ‘100 Eleventh Avenue’-gebouw ontworpen door Ateliers Jean Nouvel (Afb. 4.7). Maar deze onregelmatige reflecties worden waarschijnlijk ook veroorzaakt door over- of onderdruk in de spouw van de IGU’s.



Afb. 4.7: De weerspiegeling van het ‘100 Eleventh Avenue’-gebouw in de gevel van het IAC-hoofdkantoor.
(© Michel Setboun)

Referenties IAC HOOFDKANTOOR

TEKST

- **[1]** Steel Institute of New York. (2017, 22 juni). Gehry-designed Building Inspires an Innovative Curtain Wall System. IAC/InterActiveCorp Headquarters, New York. *Metals in construction*. 8–13. Geraadpleegd van https://siny.org/project/iac_interactivecorp_headquarters_new_york/
- **[2]** Chicchi R. (2008, 29 september). *IAC/InterActiveCorp Headquarters. New York, NY*. Herzien masterproefvoorstel. Consultant: Dr. Thomas E. Boothby. Geraadpleegd van <https://www.engr.psu.edu/ae/thesis/portfolios/2009/rac281/tech1-pdf.pdf>
- **[3]** Pölzl, F. N. (2017). *Mechanical Behavior of Cold-Bent Insulating Glass Units*. Graz University of Technology. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20913.58729>
- **[4]** Millard, B. (2015, 29 mei). *Bending Glass in the Parametric Age*. Geraadpleegd van <http://www.enclos.com/site-info/news/bending-glass-in-the-parametric-age>
- **[5]** Cornachio, J. (2018, 11 augustus). *Mind-Benders: 5 Unbelievable Curved Glass Façades*. Geraadpleegd van <https://architizer.com/blog/inspiration/collections/curved-glass-facades/>
- **[6]** *IAC Building - Data, Photos & Plans*. (2017, 13 februari). Geraadpleegd van <https://en.wikiarquitectura.com/building/iac-building/#>

AFBEELDINGEN

- **Afb. 4.1:** © Drew Dies. Uit [5]
- **Afb. 4.2:** © Reading Tom. Geraadpleegd van <https://www.flickr.com/photos/16801915@N06/8190311065/sizes/h/>
- **Afb. 4.3:** Geraadpleegd van <http://generalglass.com/projects/iac/iac-2/>
- **Afb. 4.4, 4.5:** © Steel Institute of New York. Uit [1]
- **Afb. 4.6:** © Peter C. Brandt. Geraadpleegd van <https://gurushots.com/>
- **Afb. 4.7:** © Michel Setboun. Geraadpleegd van <https://www.setboun-photo.com/>

4.2 INKOM VAN GOGH MUSEUM

- KISHO KUROKAWA • Amsterdam, Nederland

bouw: 2014 - 2015



Afb. 4.7: Het nieuwe entreegebouw voor het Van Gogh Museum in Amsterdam. (© Ronald Tilleman)

Gerrit Rietveld maakte in 1963 een eerste ontwerp voor een museum waarin de werken van de schilder Van Gogh ondergebracht zouden worden. Rietveld overleed echter het jaar nadien en het voorlopig ontwerp werd overgenomen door zijn opvolgers. Het gebouw, gesitueerd op het Museumplein van Amsterdam, werd tien jaar later voltooid. In 1998 opende een extra tentoonstellingsvleugel die het museum meer ruimte gaf (Afb. 4.8). Daarbij werd er een verzonken vijver geïnstalleerd als overgang tussen het originele gebouw en de nieuwe vleugel. Het ontwerp kwam van de Japanse architect Kisho Kurokawa.

Mettertijd waren er twee problemen die de kop opstaken. Ten eerste waren er vaak problemen met de vijver waardoor hij leeg stond. Daarnaast werd het museum slachtoffer van zijn eigen succes en kon het de grote hoeveelheid bezoekers niet meer op een deftige manier ontvangen. Er werd daarom beslist om een nieuwe hoofdingang te bouwen. Opnieuw werd Kisho Kurokawa aangesteld als architect. De verzonken vijver verdween en werd getransformeerd in een ondergrondse toegang. Met deze ingreep slaagde het museum erin om de twee problemen tegelijk op te lossen. Het gebouw opende in 2015 (Afb. 4.7).



Afb. 4.8: Snede. Links op de snede zien we de extra vleugel ontworpen door Kurokawa en in het midden het nieuwe glazen entreegebouw, eveneens ontworpen door Kurokawa. Rechts op de snede zien we het originele museumgebouw naar het ontwerp van Rietveld. (© Hans van Heeswijk Architecten)

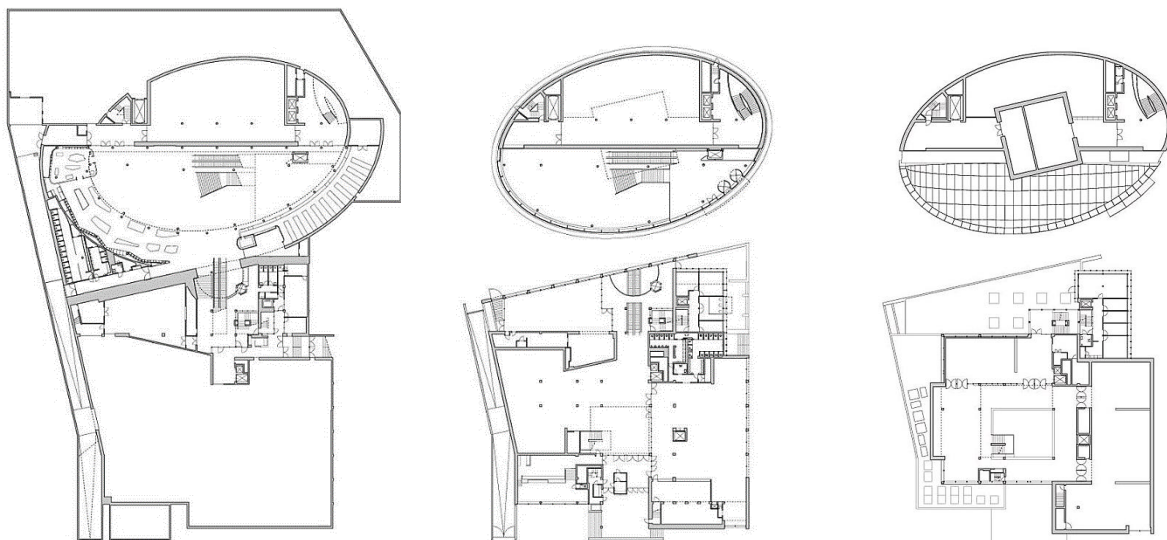
Het ontwerp van Kurokawa bestaat uit een glazen gevel en glazen dak die beide zijn eerdere ontwerp vormelijk complementeren (Afb. 4.9). Hedendaagse ondergrondse (museum)ingen- gen worden wel vaker ontworpen met glas. Ook hier was het de bedoeling dat de glasconstructie een aantrekkingskracht zou uitoefenen op de bezoekers.

Het ontwerp werd verder uitgepuurd door archi- tect Hans van Heeswijk en ingenieursbureau Oc- tatube. Kurokawa koos oorspronkelijk voor een gebouw met een stalen draagstructuur, maar dat werd aangepast naar een meer innovatief systeem waarbij de draagstructuur ook deels uit glas bestaat.

De wens van de architecten om de hoeveelheid metalen elementen zoveel mogelijk te reduce- ren, maar zonder daarvoor te beschikken over

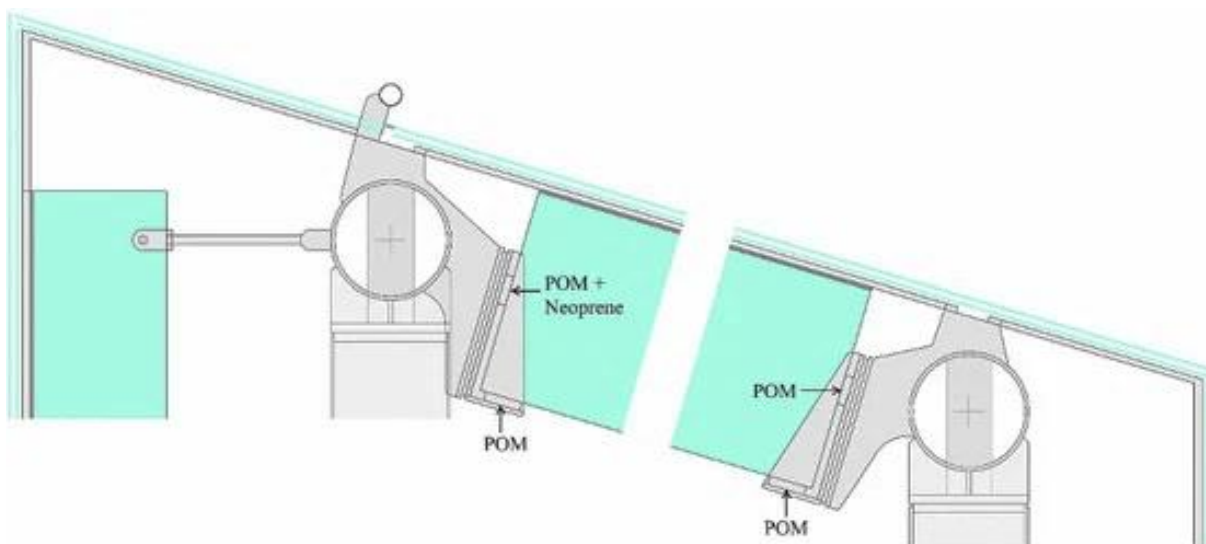
de ‘volledig-glas’ budgetten van Apple³, resul- teerde in een minimale staalconstructie be- staande uit twee ronde holle buizen van diame- ter 40cm die lopen langs de omtrek van het ge- bouw. De ene is naar beneden gekromd zodanig dat het onder de kubusvormige uitkraging van de ‘Kurokawa-vleugel’ kan passeren (laag ge- noeg om de glaspanelen te kunnen plaatsen en onderhoud mogelijk te maken); de andere is in twee richtingen gebogen. Deze buizen worden gedragen door ronde stalen kolommen.

Naast deze staalconstructie, bestaat de rest van het gebouw bijna volledig uit glas. Alle glasele- menten zijn vervaardigd uit extra helder glas (‘low iron glass’); dat is een duurdere soort, maar heeft een grotere transparantie dan het klassieke natronkalkglas, wat hier gewenst was.



Afb. 4.9: Plannen. Links: Verdieping -1. Het ondergrondse niveau maakt de verbinding naar het originele museumgebouw. Midden: Gelijkvloers. Op dit niveau komen de bezoekers de ellips binnen. Rechts: Eerste verdieping. De glasconstructie vervol- ledigt de ellipsvorm, het heeft exact dezelfde footprint als de voormalige vijver. (© Hans van Heeswijk Architecten)

³ Hiermee wordt bedoeld dat Apple veel investeert in de bouw van volledig transparante structuren. Zo bestaan in sommige Apple winkels alle architecturale elementen uit glas (gevels, dak, kolommen, liggers, trap, ...). Meer informatie hierover vindt u in hoofdstuk 6 ‘glazen draagstructuren’.

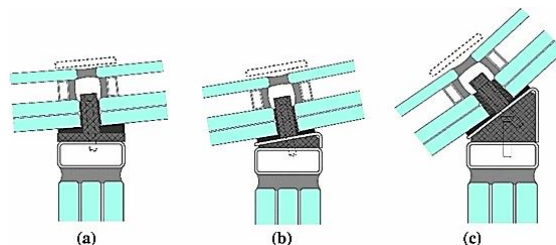


Afb. 4.10: De verbinding tussen de glasvinnen en de stalen buizen. (© Octatube. Uit [1])

De glazen dak- en geveloppervlakken zijn cruciaal om de staalconstructie te verstijven, want die is op zichzelf niet stabiel. Windkrachten op de gevel worden via gebogen IGU's doorgegeven naar verticale glazen vinnen. Deze vinnen zijn samengesteld uit drie glasplaten gelamineerd met SentryGlas® en zijn alle twintig uniek in hoogte. De verticale vinnen zijn op hun beurt mechanisch bevestigd aan de gekromde stalen buis (Afb. 4.10). Aan de hand van stalen 'schoenen' zijn ook glazen dakliggers verbonden aan de stalen buizen (Afb. 4.10 en 4.14).

Voor de oplegging van de glazen liggers werden er POM-blokjes gebruikt (polyoxymethyleen). Aan de hoogste zijde creëert dit een opening tussen het glas en het staal. Deze opening werd ter plaatste gemeten om zo het laatste en belangrijkste blokje precies te kunnen dimensioneren; een composiet van POM en neopreen. Neopreen heeft een veel kleinere stijfheid dan POM. Zo is het geheel wel stijf genoeg om krachten over te dragen, maar toch voldoende flexibel om spanningen in de glazen balken te verminderen bij thermische beweging. De liggers zelf worden versterkt met rechthoekige roestvrijstalen profieltjes.

Het geheel kan een 'staal-glas structuur' genoemd worden; op verschillende manieren is er een samenwerking tussen het glas en het staal. Zo zijn er geen stalen windverbanden nodig, wat voordelig is voor de totale transparantie van het gebouw. Dit soort gebruik van glas staat in contrast met de anders simpele toepassing van glas als opvulmateriaal.



Afb. 4.11: De aansluiting van de dakelementen op de glazen liggers. (© Octatube. Uit [1])

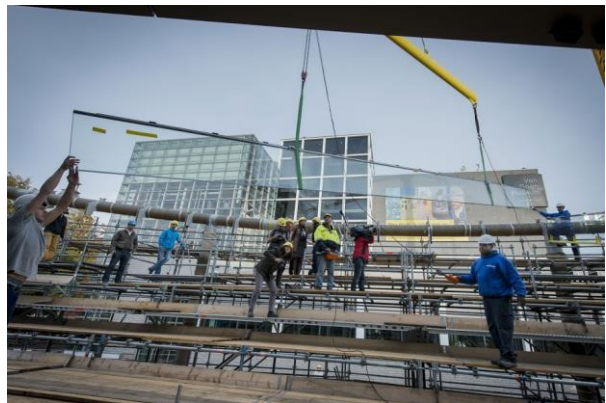
Bij een project zoals dit, waarbij glas een integraal deel uitmaakt van de draagconstructie, zijn de toegestane toleranties op foute dimensionering heel klein. Zo was er ontworpen dat de dubbelglaspanelen van het dak slechts ondersteund worden door een breedte van 15mm (Afb. 4.11). Ook de glazen liggers zelf rusten op een vrij kleine opleg (slechts 30mm voor de kortste liggers). Daarom moest de 'hart op hart'-afstand van beide staalbuizen zorgvuldig worden gecontroleerd voordat alle verbindingen erop werden gelast.

Vooraleer alles definitief aan elkaar werd gelast, werd er door Octatube eerst een proefopstelling gemaakt van de stalen hoofdconstructie (ongeveer 60m x 15m x 10m) om alles te controleren. Het verschil in geometrie tussen theorie en praktijk bleek het grootst te zijn aan de twee eindpunten van de buizen, maar dat kon worden gecompenseerd in de lasprocedures van de stalen platen.

Om het lassen van de verbindingen te vergemakkelijken, werd de structuur ondersteboven gemonteerd. Op die manier konden de meeste lassen worden gemaakt door personeel dat op de fabrieksvloer stond. Daarna werden de voorgemonteerde staalementen op de bouwplaats geïnstalleerd (Afb. 4.12 en 4.13).



Afb. 4.12: Opbouw van de structuur uit ronde holle staalprofielen. (© Jan Kees Steenman)



Afb. 4.13: Links: Staalstructuur is compleet. Rechts: Het plaatsen van de glazen dakliggers kan beginnen. (© Jan Kees Steenman)



Afb. 4.14: De slanke dakliggers worden opgelegd in stalen schoen-elementen. (© Hajar Elouarrat)

Eerst was er een gefacetteerde gevel ontworpen bestaande uit vierkante panelen met zijde 1,8m. Daarbij was de afstand tussen de verticale glasvinnen ook 1,8m. Pas later kwam het idee om een meer vloeiende gevel te maken uit grotere panelen (3,6m lengte op 1,8m hoogte). Daarbij werd beslist, na het bouwen van een model op ware grootte, dat de afstand tussen de vinnen ook 3,6 meter kon zijn en dat er geen extra steun in het midden van de panelen nodig was. De onderste rij panelen zijn slechts de helft zo hoog gedimensioneerd (0,9m i.p.v. 1,8m) om zo een onbelemmerd zicht te hebben op ooghoogte (Afb. 4.15 en 4.16).

De gevel is zestig meter lang en heeft een hoogte variërend tussen 8 en 10m. De buigradius van de gevel varieert over de lengte om zo de elliptische vorm te bekomen. De veranderlijke kromming werd uiteindelijk benaderd door verschillende bogen met een maximale afwijking van enkele millimeter. De kleinste buigradius, die resulteert in de hoogste kromming, bedraagt 11,5m. De grootste buigstraal is 42,5m.

De gevel bestaat uit koud gebogen IGU's. Zowel de buiten- als binnenbeglazing van een IGU bestaat uit twee platen van 5mm thermisch versterkt glas met daartussen vier lagen PVB. Normaal gezien wordt bij koud buigen gekozen voor gehard glas, vanwege de hogere treksterkte, maar bij dit project werd er na grondige analyse toch gekozen voor thermisch versterkt glas vanwege het betere gedrag na breuk. Zelfs wanneer alle glasplaten volledig zouden breken, blijft het geheel op zijn plaats. *(Zie addendum 2 voor meer uitleg over het breukgedrag van gelamineerd glas.)*



Afb. 4.15: De keuze voor ijzerarm glas resulteert in een zeer transparante gevel. (© Ronald Tilleman)



Afb. 4.16: De ellipsvormige glazen gevel van het Van Gogh museum in Amsterdam. (© Ronald Tilleman)

Koud gebogen glaspanelen worden meestal gefixeerd rondom rond door lineaire klemranden. Bij de gevel van de ingang voor het Van Gogh museum werd echter gekozen om bij de lange zijden van de panelen enkel lineaire elementen langs de binnenkant te gebruiken, en aan de buitenkant te werken met kleine schroefplaten. De korte zijden van de panelen daarentegen worden wel langs beide kanten lineair ondersteund. Dit gebeurt aan de hand van roestvrij-stalen profielen waarvan deze langs de binnenzijde structureel verlijmd is met de verticale glazen vinnen. Er werd gekozen voor de sterke structurele siliconenlijm Sikasil SG-550 van de firma Sika.

Om de buigprocedure, de fixatie, de geometrie, de luchtdichtheid, de reflecties en het gedrag na breuk van de IGU's te onderzoeken, werd er een model op ware grootte gebouwd door Octatube (Afb. 4.17). Twee IGU's van 3,6m x 1,8m en twee IGU's van 3,6m x 0,9m werden gebogen tot een

krommingstraal van 11,5m, de kleinste uit het project. Eerst door mankracht en later door gebruik te maken van een specifiek ontworpen 'robot'-buigmachine (Afb. 4.17 rechts). Deze machine, ontwikkeld door ViaVac uit Nederland, is een combinatie van een gewone vacuümhefmachine en een elektrisch aangedreven buigmechanisme. De verschillende buigradii werden in situ gekalibreerd om perfect te kunnen aansluiten op de glazen vinnen.

De IGU's kwamen in vlakke toestand op de bouwplaats toe. Met de buigvacuümmachine werden de IGU's opgetild om in de lucht gebogen te worden tot de gewenste kromming. Vervolgens hees een kraan de gebogen IGU, nog steeds met de buigrobot eraan bevestigd, naar zijn bestemming (Afb. 4.18). Bij de bevestiging van de gebogen IGU's aan de onderconstructie werden eerst minimaal vier klemprofielen met schroeven vastgedraaid, vooraleer de buigmachine losgelaten werd.



Afb. 4.17: Links: Model op ware grootte. Midden: De gebogen IGU waarvan alle vier de glasplaten zijn gebroken om het gedrag na breuk te testen. Rechts: Vacuümmachine. (© Octatube. Uit [1])



Afb. 4.18: Ter plaatse buigen, controleren, verplaatsen en installeren van koudgebogen glaseenheden. (© Octatube. Uit [1])



Afb. 4.19: Het transparante dak wordt ondersteund door glazen liggers. (© Michael van Oosten)

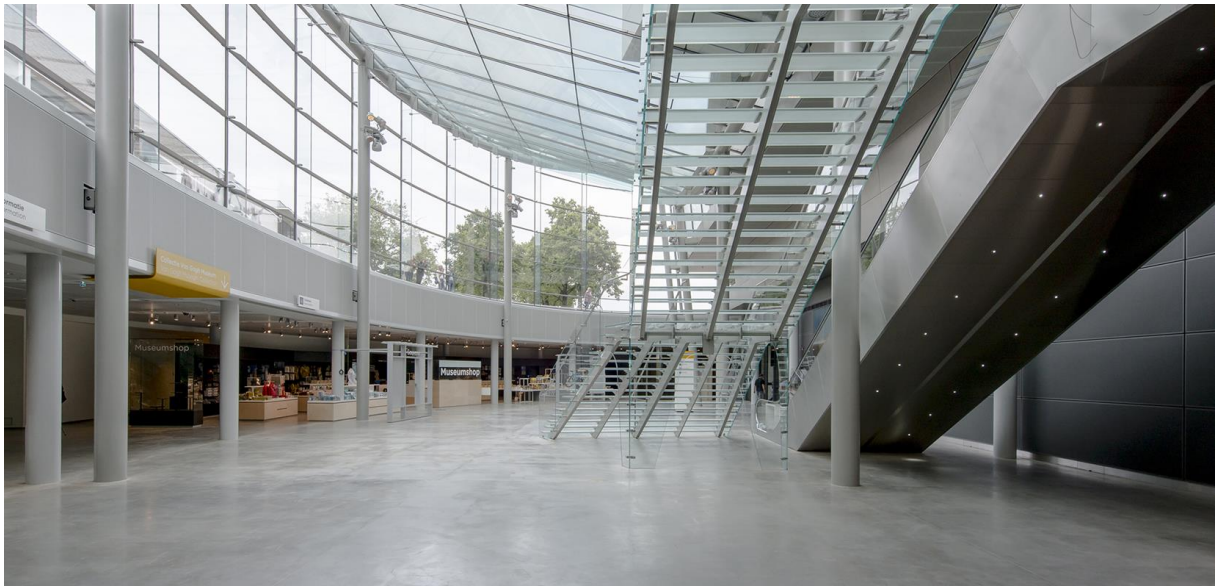
Het gekromde dakoppervlak ontstond door de sferische dakvorm van de bestaande vleugel te spiegelen (Afb. 4.19). Het dak bestaat uit gelaagd dubbelglas dat ondersteund wordt door dertig drievoudig gelaagde glazen liggers met Sentry-Glas® tussenlagen.

Alle liggers zijn geoptimaliseerd en uniek in lengte en hoogte, de grootste is 12 meter lang en 70 centimeter hoog. Ze zijn allemaal onder een hoek van 16,5 graden geplaatst en parallel aan elkaar. Echter verschillen de oplegpunten van de liggers in hoogte ten opzichte van elkaar om de vorm te kunnen maken. De samenstelling van de IGU's is 8/15/1010.4. Dat betekent dat het buitenste glaspaneel 8mm dik is, de luchtspouw 15mm bedraagt en dat het binnenste glaspaneel bestaat uit gelaagd glas van tweemaal 10mm, gelamineerd door 4 tussenlagen.

Het buitenste paneel van de IGU bestaat uit gehard glas omdat het grote lasten zoals een dik sneeuwpakket moet kunnen dragen. Op deze glasplaat is er een zonwerende coating aangebracht, deze laat het licht binnen, maar houdt de meeste warmte buiten.

De PVB-gelamineerde, thermisch versterkte glasplaten aan de binnenzijde van de IGU zorgen ervoor dat als één of meer van de drie glaspanelen breken, er geen enkele glasscherf naar beneden kan vallen. De binnenste van de twee gelamineerde glasplaten draagt bovendien ook bij aan het stabiliseren van de glazen liggers. Om het uitknikken van de op druk belaste bovenzijde van een ligger te voorkomen, moet deze namelijk zijdelings worden ondersteund (in dit project berekend op ondersteuning om de 80 centimeter). Hoe langer de balken, hoe belangrijker deze ondersteuning.

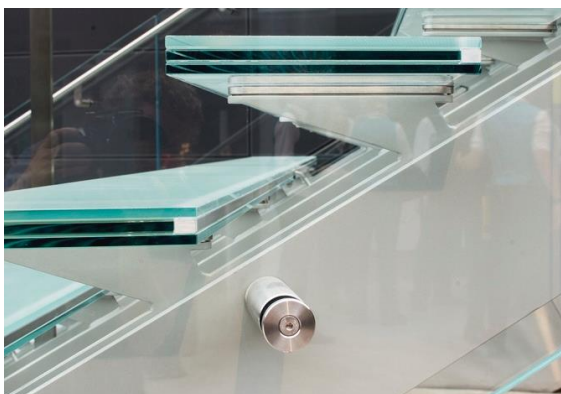
Langs de omtrek van het gebouw resteert er nog een 1,3m brede zone tussen de stalen buizen en de gevel. In deze randzone van het dak moesten de dubbelglaspanelen nog extra koud getordeerd worden om goed aan te sluiten op de gevel. Deze elementen zijn iets kleiner gedimensioneerd en bestaan uit een licht gewijzigde samenstelling. De binnenzijde bestaat hier uit een thermisch versterkte glaslaminaat van 88.2 in plaats van 1010.4. De maximale vervorming bij het koud buigen bedroeg ongeveer 70mm.



Afb. 4.20: Het lichtrijke nieuwe entreegebouw. (© Jan-Kees Steenman)

De glazen trap, ontworpen door Hans van Heeswijk, verbindt de entree op het niveau van het Museumplein met de ondergrondse ingang (Afb. 4.20). De trap bestaat uit drievoudig gelaagde geharde glazen treden met ingebouwde LED's, zestien dubbel gelamineerde geharde glazen balustrade-elementen en twee drievoudig gelamineerde geharde glazen portaalframes. Deze frames ondersteunen en stabiliseren de trap.

Om de treden en de platformen te dragen, werden er stalen kokerprofielen gebruikt (Afb. 4.21). In principe hadden deze kunnen worden vervangen door glazen balken die bijvoorbeeld geïntegreerd zijn in de balustrade, zoals bij de trappen in de Apple Stores, maar dit zou hier allicht te veel hebben gewogen op de projectkosten.



Afb. 4.21: De glazen treden worden ondersteund door stalen profielen (© Luuk Kramer)

In 2008 werd er, eveneens in Amsterdam, een gelijkaardig project met koud gebogen IGU's gerealiseerd, zijnde het **JinSo paviljoen** (Afb. 4.22). Het ovaalvormige gebouw is ontworpen door het architectenbureau Cepezed uit Delft en betreft een uitbreiding van het originele restaurant dat ook door hen werd ontworpen. De gevel bestaat uit tweehonderd IGU's die ter plekke bij omgevingstemperatuur werden gebogen. De afmetingen van de panelen (1,5m hoog op 3,5m breed) zijn vergelijkbaar met deze van de inkom van het Van Gogh Museum (1,8m hoog op 3,6m breed). In beide projecten worden de glaspanelen vastgehouden door lineaire klemlijsten.



Afb. 4.22: Het JinSo paviljoen in Amsterdam uit 2008, ontworpen door Cepezed. (© Cepezed)

Om het koud buigen van de gevelpanelen van het JinSo project mogelijk te maken, werd gebruik gemaakt van een 'zuigmachine' ontwikkeld door BRS Building Systems (Nederland). Dit is ook het bedrijf dat de glasunits aanleverde, onder de naam Freeformglass®. De IGU's zijn voorzien van geharde glasplaten (waarvan één zijde een gelaagd paneel is) en flexibele afstandshouders in de spouw die kunnen meebuigen en die de spanningen kunnen accommoderen. Freeformglass® is een verderzetting van de door Movares ontwikkelde techniek om gelaagd glas koud te buigen.

De buigmachine van BRS Building Systems heeft drie zuigers: de twee buitenste zijn bevestigd aan verschuifbare elementen en kunnen dus op verschillende plaatsen op het glas aangebracht worden. De middelste zuiger heeft een vaste positie en is verbonden met de apparatuur van het buigmechanisme. Het is via de combinatie van deze drie zuigers en extra wieltjes op de uiteinden van de uitschuifbare stukken dat, eenmaal het paneel voor de gewenste plaats van de gevel hangt, het krommen van het glaspaneel kan gebeuren.

De machine die later ontwikkeld werd door ViaVac uit Nederland en die door Octatube gebruikt werd bij het plaatsen van de gevelpanelen van het Van Gogh museum (Afb. 4.23), is heel gelijkwaardig aan de BRS buigmachine. ViaVac modificeerde hiervoor één van zijn standaard vacuümhefmachines (CladBoy CB5). Het toegevoegde elektrisch aangedreven buigmechanisme werd gebruiksvriendelijk ontworpen; met een druk op de groene knop wordt het glas gebogen, met een druk op de rode knop keert het glas terug naar zijn vlakke toestand. Deze machine maakt ook gebruik van hefbomen met wieltjes aan de uiteinden om het glas in de gevraagde radius te kunnen krommen.



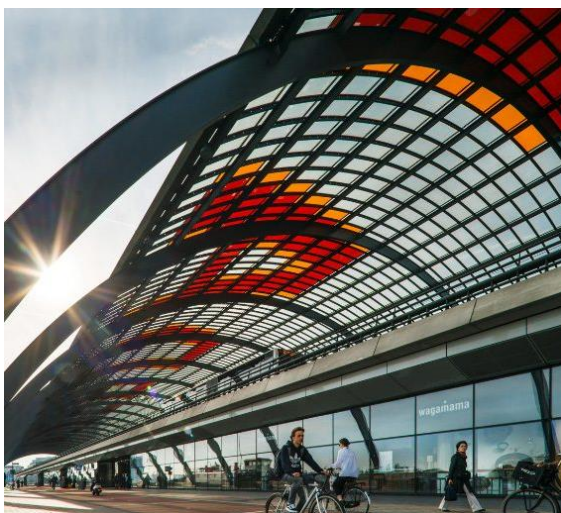
Afb. 4.23: De gemodificeerde zuigmachine CladBoy CB5 die gebruikt werd bij de installatie van de gevelpanelen van het Van Gogh museum in Amsterdam.
(© BRS Building Systems)

De buigmachine die ingezet werd bij de gevel van het Jinso paviljoen was eveneens elektrisch aangedreven. Andere modellen van buigmachines ontwikkeld door BRS Building Systems werken echter met een manuele aandrijving. Met mankracht wordt daarbij aan een kruissleutel gedraaid totdat het glaspaneel de juiste kromming heeft (Afb. 4.24). Dat gebeurt voordat het glaspaneel de lucht in gehesen wordt.



Afb. 4.24: Freeformglass®-panelen worden op de bouwplaats gekromd. (© BRS Building Systems)

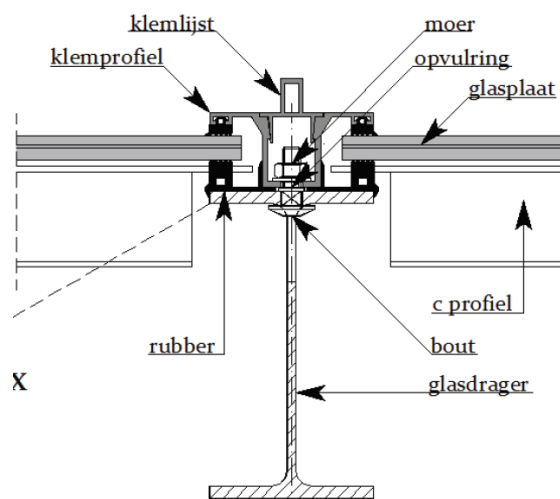
Tot slot verdient een andere gevalstudie het om vermeld te worden bij deze bespreking. Het betreft eveneens een Amsterdams project dat in 2015 voltooid werd, namelijk de overkapping van het **busstation IJsei** dat grenst aan het station Amsterdam Centraal (Afb. 4.25). De grote lufel bestaat uit koud gebogen gelaagde glaspanelen die gedragen worden door een staalconstructie. Het ontwerp komt voort uit een samenwerking tussen Benthem Crouwel Architects en het ingenieursbureau Movares.



Afb. 4.25: Overkapping van de bushalte IJsei in Amsterdam. (© Benthem Crouwel Architects)

De voornaamste voordelen van koud gebogen glas worden nog eens toegelicht door László Vákár, raadgevend ingenieur bij Movares: *“Een groot voordeel is dat de glasplaten dun zijn. Minder glas betekent dat het glas zelf goedkoper is. Naast het feit dat er minder grondstoffen nodig zijn, en rechte ruiten eenvoudiger te transporteren zijn dan kromme, is de productie ervan ook goedkoper. Waar warm gebogen glas bij een hoge temperatuur van circa 600°C in een mal moet worden gebogen, wordt bij koud gebogen glas alleen warmte gebruikt bij de folie, die als een soort van lijm wordt verhit tot 135 graden in een autoclaaf. En ook de mal wordt uitgespaard.”* [3] En verder: *“Door de halvering van het gewicht van het glas, kan de staalconstructie ook een stuk goedkoper uitgevoerd worden.”* [3]

De draagconstructie van de 360m lange overkapping bestaat uit bogen die door middel van gordingen met elkaar verbonden zijn. Bovenop de gordingen werden gekromde profielen geplaatst waarop de koud gebogen glaspanelen (3m op 1,1m) werden bevestigd. Deze bevestiging bestaat uit een klemprofiel dat de glaspanelen ter hoogte van hun lange zijden op de stalen glasdragers duwt. Door middel van bouten en moeren kan de klemkracht gevarieerd worden (Afb. 4.26).



Afb. 4.26: Snede. De gebogen glaslaminaten werden gedrukt tegen de gebogen stalen glasdragers. (© Welink M.)

Door middel van kleine roestvrijstalen C-profielen worden de glaspanelen ook langs hun korte zijden lineair ondersteund. Een vierzijdige oplegging was in dit project vereist vanwege de brandveiligheid. De glaspanelen mogen namelijk niet naar beneden vallen bij brand. Daarbovenop mogen de panelen bij brand ook niet te sterk ongelijkmatig opwarmen, want dat zou leiden tot breuk van de glasplaten. Daarom ontwierp het ingenieursbureau Movares slechts smalle opleggingen en werd er gebruik gemaakt van warmtegeleidende rubbers zodat de warmte beter verspreid wordt, ook in de randen van de glasplaat.

Bij de gevel van het Van Gogh museum werden de glaspanelen enkel volledig lineair ingeklemd in roestvrijstalen profielen langs de korte randen. Deze profielen werden dan door Octatube via structurele verlijming aan verticale glazen vinnen bevestigd. Het gebogen glazen gevelopervlak van het museum werd bovendien ingezet om de staalconstructie stabiel te houden. Bij de overkapping van het busstation IJsei is dat niet het geval; de glasplaten vervullen daar geen constructieve rol. De volledige draagstructuur bestaat uit staal en de stabiliteit wordt verzekerd door centraal gepositioneerde windverbanden vervaardigd uit stalen buisprofielen.

Reeds in juli 1997 kreeg Movares een octrooi voor het idee van koud gebogen glas (de internationale versie). Het principe werd in dat jaar voor het eerst toegepast in de luifels van het station in 's-Hertogenbosch (Nederland). Hoewel deze toepassing als geslaagd werd bevonden, heeft het nog een lange tijd geduurd vooraleer koud gebogen glas werd ingezet in grotere gebouwen zoals de overkapping van het busstation IJsei in Amsterdam.

Naast de ondertussen meerdere octrooien van Movares bestaan er nog vele andere octrooien die ook de techniek van koud gebogen glas behandelen (zoals deze van Saint-Gobain uit 2011 voor het koud buigen van isolatieglas). Als ontwerper is het van belang om te beseffen dat bepaalde technieken niet vrij toepasbaar zijn zonder toestemming. De meeste octrooien zijn geldig in het merendeel van de Europese landen. Vaak bestaan er afzonderlijke patenten die van toepassing zijn in de Verenigde Staten.

Referenties INKOM VAN GOGH MUSEUM

TEKST

- **[1]** Bijster, J., Noteboom, C., & Eekhout, M. (2016). Glass Entrance Van Gogh Museum Amsterdam. *Glass Structures & Engineering*, 1(1), 205–231. <https://doi.org/10.1007/s40940-016-0022-5>
- **[2]** Octatube. *Van Gogh Museum*. Geraadpleegd van https://www.octatube.nl/en_GB/project-item.html/projectitem/38-van-gogh-museum
- **[3]** Vaillant, D. (2014, 1 december). *Het glas dat een revolutie ontketende*. Geraadpleegd van <https://www.noordzuidlijnkennis.net/het-glas-dat-een-revolutie-ontketende/>
- **[4]** Thun, P. (2011, 23 oktober). BRS Building Systems. Historisch overzicht koud gebogen glas. *Glas in Beeld*. 28–31. Geraadpleegd van <https://www.glasinbeeld.nl/wp-content/uploads/Constructief-glas-Koud-gebogen-glas-2.pdf>
- **[5]** Viavac. *Projecten gebogen glas. Montage koud gebogen glas Van Gogh Museum*. Geraadpleegd van <https://www.viavac.nl/projecten-gebogen-glas/>
- **[6]** BRS Groep. (2013). *BRS Freeformglass, cold-bent glass: an affordable solution for curved glass constructions*. [Videobestand]. *Vimeo*. Geraadpleegd van <https://vimeo.com/52142082>
- **[7]** Vollebregt, R. (2009) Vrije vormen met koud gebogen glas. *Glas in Beeld*. 54–55. Geraadpleegd van <https://www.glasinbeeld.nl/wp-content/uploads/Jinso-Paviljoen-Amsterdam.pdf>
- **[8]** Welink, M. (2015, 31 mei). *Stabiliteit van staalconstructies ontleend aan rechte en koud gebogen glas-platen: experimenteel en numeriek onderzoek op een rechte en koud gebogen in-het-vlak-belaste glas-plaat verbonden aan een staalconstructie met een acrylaatlijm*. <https://research.tue.nl/en/studentTheses/stabiliteit-van-staalconstructies-ontleend-aan-rechte-en-koud-geb>
- **[9]** Debets, C. (2017, 26 januari). *Slanke staalconstructie met koud gebogen glas*. Geraadpleegd van <https://www.bouwtotaal.nl/2017/01/slanke-staalconstructie-met-koud-gebogen-glas/>
- **[10]** Ir. Vákár, L.I. (2019). Duurzaam overkappen door toepassing van koud-gebogen gelaagd glas. Movares. *Building Holland 2019*. <https://movares.nl/wp-content/uploads/2019/06/Building-Holland-2019-Duurzaam-overkappen-met-koud-gebogen-glas-1.pdf>
- **[11]** Vákár, L.I. (1996). *Method for the production of curved glazing*. W01998001649A1. <https://patents.google.com/patent/W01998001649A1/>
- **[12]** Saint Gobain Glass France SAS. (2011). Levasseur, F., Decourcelle, R., & Swiderski, C. (2012). *Cold-bent insulating glazing*. <https://patents.google.com/patent/US20170217131A1/>

AFBEELDINGEN

- **Afb. 4.7, 4.15, 4.16:** © Ronald Tilleman. Geraadpleegd van <https://www.archdaily.com/772991/van-gogh-museum-hans-van-heeswijk-architects/>
- **Afb. 4.8, 4.9:** © Hans van Heeswijk Architecten. Geraadpleegd van <https://www.archdaily.com/772991/van-gogh-museum-hans-van-heeswijk-architects/>

- **Afb. 4.10, 4.11, 4.17, 4.18:** © Octatube. Uit [1]
- **Afb. 4.12, 4.13 Links:** © Jan-Kees Steenman. Geraadpleegd van https://www.octatube.nl/en_GB/nieuws-item/newsitem/138-steel-structure-new-entrance-van-gogh-museum.html
- **Afb. 4.13 Rechts:** © Jan-Kees Steenman. Geraadpleegd van <https://www.vangoghmuseum.nl/en/news-and-press/news/longest-glass-fin-ever-installed-in-the-new-entrance-roof?v=1>
- **Afb. 4.14:** © Hajar Elouarrat. Geraadpleegd van https://www.octatube.nl/en_GB/nieuws-item/news-item/142-installation-largest-glass-fins-in-the-netherlands-for-van-gogh-museum.html
- **Afb. 4.19:** © Michael van Oosten. Geraadpleegd van https://www.octatube.nl/en_GB/nieuws-item/newsitem/157-groundbreaking-glass-structure-van-gogh-museum.html
- **Afb. 4.20:** © Jan-Kees Steenman. Geraadpleegd van <https://thespaces.com/van-gogh-museum-debuts-its-new-entrance/>
- **Afb. 4.21:** © Luuk Kramer. Uit [2]
- **Afb. 4.22:** © Cepezed. Geraadpleegd van <https://www.cepezed.nl/nl/project/jinso-paviljoen/23977/>
- **Afb. 4.23:** © BRS Building Systems. Uit [4]
- **Afb. 4.24:** © BRS Building Systems Freeformglass®. Snapshot. Geraadpleegd van <https://vimeo.com/52142082>
- **Afb. 4.25:** © Benthem Crouwel Architects. Uit [2]
- **Afb. 4.26:** © Welink M. Uit [8]

4.3 INKOM STATION STRAATSBURG

- DUTHILLEUL • Straatsburg, Frankrijk

bouw: 2006 - 2007



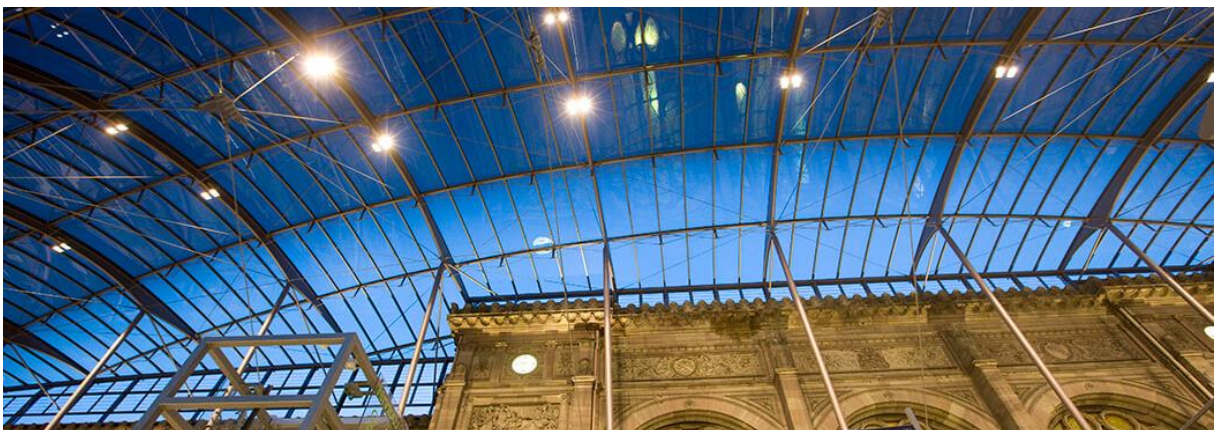
Afb. 4.27: Het nieuwe glazen ingangsbouw voor het station Straatsburg, ontworpen door Duthilleul. (© David Iliff)

Als een gigantische cocon wikkelt de nieuwe glazen gevel zich rond het historisch stationsgebouw van Straatsburg in Frankrijk (Afb. 4.27). In samenwerking met ingenieurbureaus RFR en Seele ontwierp de Franse architect Jean-Marie Duthilleul het glazen entreegebouw dat moest dienen als verbinding tussen de treinsporen, de metro, de trams, de bussen en de taxi's. Duthilleul werkt al sinds 1986 samen met SNCF (de Franse nationale spoorwegmaatschappij) en legde zo de basis voor de creatie van vele nieuwe grote stations in Frankrijk en daarbuiten.

Vanwege een hoogte van 25 meter lijkt de glazen hal op het eerste zicht geen contact te maken met het monumentale gebouw; een maximaal respect en zicht op het bestaande gebouw was dan ook het uitgangspunt van de architect.

De draagstructuur bestaat uit zestien stalen bogen op een onderlinge afstand van negen meter, met daartussen horizontale secundaire stalen balken op een tussenafstand van 4,5m. De structuur wordt verstijfd door staalkabels. Op het hoofdframe zijn gekromde stalen T-profielen geplaatst, in de verticale richting (Afb. 4.28). Parallel daarop zijn aluminium steunen gemonteerd waaraan de glaspanelen zijn bevestigd.

De nieuwe stationshal uit 2007 was een baanbrekend project op het vlak van gebogen glasconstructies. Voor het eerst werd er voor dergelijk groot oppervlak (ongeveer 6000m²) gebruik gemaakt van glaspanelen die gefabriceerd werden door middel van het 'koud buigen tijdens lamineren'-procedé.



Afb. 4.28: De stalen draagstructuur. (© Seele/Obertreis)

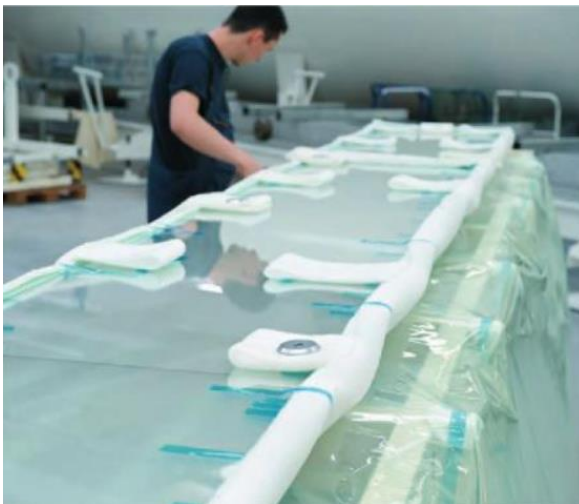
‘Koud buigen tijdens lamineren’ is een nieuwe methode om glas koud te krommen. Het grootste verschil met de andere techniek die we zagen bij de vorige projecten, is dat dit procedé het mogelijk maakt om glaspanelen op voorhand in de fabriek ‘koud’ te vervormen, in plaats van panelen achteraf te buigen op de bouwplaats. Het voorafgaand koud buigen van glas in de fabriek vereist minder kracht om de uiteindelijke kromming te bereiken en de panelen te bevestigen ter plaatse, gezien de glaspanelen in een ‘voorgebogen’ toestand aankomen (Afb. 4.29). Bovendien kunnen leuning, metalen elementen en afdichtingen reeds in de fabriek aan het glas worden verlijmd, wat de procedures ter plaatse verder vereenvoudigt.



Afb. 4.29: Gebogen glaslaminaat tijdens de montage.
(© Uit [1])

De techniek van ‘koud buigen tijdens lamineren’ gaat als volgt. Eerst wordt aan het geheel van vlakke glasplaten en tussenlagen een eerste hechting gegeven via een vacuümproces (‘vacuum bagging’) (Afb. 4.30 links). Daarna wordt het pakket koud gebogen over een mal die iets meer gekromd is dan de uiteindelijk gewenste kromtestraal van het paneel. Vóór het lamineren in een autoclaaf wordt het geheel dus eerst elastisch op een mal gebogen en vastgeklemd; daarom wordt er typisch gebruikt gemaakt van gehard glas. Vervolgens krijgt de gekromde ‘voorgelamineerde verpakking’ zijn permanente onderlinge hechting in een autoclaaf (gecontroleerde temperatuur- en drukomstandigheden) (Afb. 4.30 rechts). Uiteindelijk wordt het laminaat uit de autoclaaf gehaald en gelost van de mal. De gekromde vorm wordt behouden door de schuifweerstand die de tussenlaag kan bieden tegen de buigspanning van het glas dat terug naar de vlakke toestand wilt.

In een autoclaaf is de temperatuur ca. 140° C en dus niet voldoende hoog om het glas in rubberachtige toestand te brengen; het blijft dan ook stijf (elastisch). Aangezien het buigproces gebeurt zonder weekmaking van het glas, zorgt dat ervoor dat de techniek ook als ‘koud buigen’ wordt beschouwd.



Afb. 4.30: Links: Voor het lamineren worden de glasplaten vacuümverpakt. Rechts: De speciaal ontwikkelde luchtkussenbaan waarop het glaspaneel in de autoclaaf geschoven wordt. (© Uit [3])

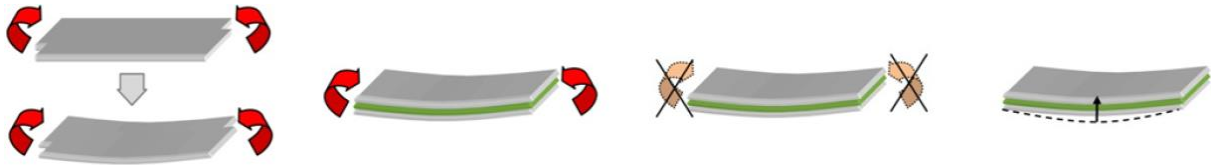
Echter, na het loslaten van het laminaat uit de mal, neemt de kromming toch terug af (Afb. 4.31). De uiteindelijke vorm wordt dus pas verkregen ná – en niet voor – het lamineren. Ten eerste is er een onmiddellijke elastische terugvering ('springback') en ten tweede is er het fenomeen van relaxatie op lange termijn. De mate van dit relaxatiegedrag hangt voornamelijk samen met de visco-elastische⁴ eigenschappen van de tussenlaag. Daarom wordt het stijvere SentryGlas® vaak gebruikt om dit fenomeen onder controle te krijgen. Voor de gevelpanelen van dit project in Straatsburg werd er evenwel toch gekozen om te werken met het soepelere PVB. Dat was mogelijk aangezien de panelen bevestigd worden aan de gekromde aluminium profielen.

Het gebruik van een 'niet volledig afschuifbestendige' tussenlaag (zoals PVB) voor de productie van koud gebogen laminaten, wordt soms 'vormondersteunende laminering' genoemd. De tussenlaag 'assisteert' hierbij de gebogen geometrie, maar om de vorm permanent te behouden, worden de glaspanelen best nog stevig bevestigd aan een onderconstructie. Toch is er een groot verschil met het koud buigen in situ, zoals bij de twee andere projecten in dit hoofdstuk, waarbij het behouden van de vorm uitsluitend wordt gegarandeerd door de panelen stevig te fixeren op een ondersteunend frame. Hier wordt de gebogen vorm wel degelijk hoofdzakelijk vastgehouden door de werking in de tussenlaag. Bij gebruik van een 'afschuifbestendige' folie daarentegen (zoals SentryGlas®),

wordt er gesproken van 'vormgevende laminering'. De geometrie wordt daarbij uitsluitend gegarandeerd door de schuifstijfheid van de folie. Na het autoclaafproces behoudt de geproduceerde gelaagde glasplaat zo goed als permanent de geometrische kromming, zonder dat er een substructuur met dezelfde vorm vereist is. Een belangrijke bedenking bij het gebruik van PVB voor de toepassing van koud gebogen laminaten, is dat dergelijke tussenlaag sneller stijfheid kan verliezen bij gebruik in hete regio's. De langdurige relaxatie is naast tijd-, ook temperatuurafhankelijk en de relaxatie zal des te groter zijn bij hogere temperaturen. Gelukkig is voor dit gebied in Frankrijk de klimatologische invloed beperkt.

De glasfabrikant Sedak was een pionier op het gebied van koud buigen tijdens lamineren, hetgeen eerst gedemonstreerd werd met een gebogen glazen brug en vervolgens in Straatsburg. *"Het feit dat ons bedrijf ontwikkelings- en productiefaciliteiten combineert, is een groot voordeel gebleken bij het ontwikkelen van innovatieve oplossingen. Vanuit abstracte ideeën worden producten gemaakt waarvan we weten dat ze geproduceerd kunnen worden en waarvan we de prestaties intensief kunnen testen in ons eigen bedrijfslaboratorium"* [3], verklaart Bruno Kassnel-Henneberg, ingenieur die tot 2009 werkte bij Seele als constructief ontwerper op het gebied van glasconstructies en sindsdien verantwoordelijk is voor productontwikkeling en marketing bij het dochterbedrijf Sedak.

⁴ Visco-elasticiteit is de term die gebruikt wordt voor het gedrag van materialen die bij belasting zowel viskeuze (uitgestelde vervorming) als elastische (onmiddellijke vervorming) eigenschappen vertonen. Tussenslagen hebben visco-elastisch vervormingsgedrag bij temperaturen rond hun glastransitietemperatuur (SentryGlas® ca. 50°C, PVB ca. 30°C), dus bij temperaturen waarbij ze een deel van hun stijfheid verliezen.



Afb. 4.31: De procedure van 'koud buigen tijdens lamineren'. 1. Het geheel mechanisch gebogen en in die vorm vastgehouden, er is nog geen werking van de tussenlaag. 2. Het lamineren van het gebogen paneel. 3. Na het lamineren, wordt het buigkoppel weggenomen. Het paneel behoudt zijn kromming door de activatie van de tussenlaag die schuifkrachten opneemt. 4. Directe terugvering en de start van de relaxatie op lange termijn. (© Uit [1])

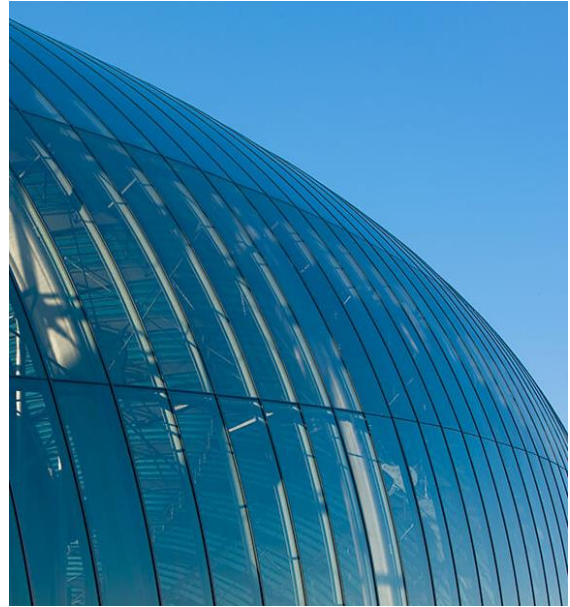
Een voordeel van het glas niet opnieuw op te warmen, is, naast de verlaging van de productiekosten, het vermijden van oneffenheden die een negatieve invloed hebben op de visuele kwaliteit. Thermisch behandeld glas (harden of warm buigen) heeft vanwege het productieproces een grotere kans op anisotropie (optische vervormingen). Een koud gevormd glaspaneel zal een homogener oppervlak hebben in vergelijking met een gelijkaardig glaspaneel dat warm gebogen werd. Minimalisatie van reflecties en een maximaal zicht op het bestaande gebouw was dan ook de vereiste van Duthilleul (Afb. 4.32).



Afb. 4.32: Het stationsgebouw in Straatsburg maakte gebruik van de koude laminaatbuigingstechniek. Zo werd het gewenste effen en uniforme uitzicht bereikt, terwijl ook energie en kosten werden verlaagd. (© Sedak)

'Koud gebogen gelaagd veiligheidsglas' is de meest correcte beschrijving voor de glaspanelen (4,5m op 1,5m) van het nieuwe ingangsbouw in Straatsburg. Het gelamineerd glas bestaat uit twee thermisch geharde glasplaten van 6mm, gebonden door PVB-tussenlagen. Een voordeel van koud buigen is dat op de initieel vlakke glasplaten gemakkelijk alle mogelijkheden op het gebied van bedrukte patronen en zonwerende coatings kunnen worden toegepast, zonder aangepaste machines nodig te hebben. Op de buitenste glasplaat werden twee gestippelde patronen via zeefdruk aangebracht; een zwarte aan de binnenzijde en een witte aan de buitenzijde. Op de andere glasplaat werd een low-e coating aangebracht. (Zie addendum 3 voor meer info over low-e coatings.) Hierbij kan opgemerkt worden dat tijdens het lamineren van de gebogen unit, de omstandigheden in de autoclaaf geen invloed hebben op de kwaliteit van de glascoatings vanwege de lage temperatuur. Ook de PVB-tussenlaag werd op maat aangepast; er werd namelijk een speciaal gemodificeerde composiet gemaakt waar naast het polyvinylbutyral (PVB) ook een zonwerende folie geïntegreerd werd (XIR® van Southwall). Al deze ingrepen zijn genomen met de bedoeling om de opbouw van warmte in de hal tegen te gaan (broeikaseffect van glas).

Door de specifieke vorm van het oppervlak, namelijk een sectie van een ‘verwongen’ torus, waren er panelen van verschillende kromtestralen nodig. Er werd beslist om een geometrie uit te werken waarin er gebruik gemaakt wordt van vier verschillende buigstralen, variërend tussen twaalf en dertig meter, afhankelijk van de hoogte waarop het element moet worden gemonteerd (Afb. 4.33). Bij koud buigen zijn grote radii gemakkelijker te bereiken dan kleine, gewoonlijk tot uiterlijk 3m, afhankelijk van de glasdikte. Hoe dunner de glasplaten in het laminaat, hoe strakker de krommingstraal die gehaald kan worden. Bij hogere krommingen, of als er lokaal scherpere bochten gewenst zijn, zijn warm gebogen glaspanelen de gebruikelijke oplossing.



Afb. 4.33: Het gekromde geveloppervlak.
(© Seele/Matthias Reithmeier)

Referenties INKOM STATION STRAATSBURG

TEKST

- **[1]** Fildhuth, T., & Knippers, J. (2014). *Recovery behaviour of laminated cold bent glass - numerical analysis and testing*. Uit: Louter, C., Bos, F., Belis, J., & Lebet, J. P. (2014). *Challenging Glass 4 & COST Action TU0905 Final Conference*. Abingdon, Verenigd Koninkrijk: Taylor & Francis. ISBN 978-1-138-00164-0. Geraadpleegd van https://www.researchgate.net/publication/267024855_Recovery_behaviour_of_laminated_cold_bent_glass_-numerical_analysis_and_testing
- **[2]** Belis, J., Inghelbrecht, B., Van Impe, R., & Callewaert, D. (2007). Cold bending of laminated glass panels. *Heron*, 52(1–2), 123–146. Geraadpleegd van <http://heronjournal.nl/52-12/6.pdf>
- **[3]** Kassnel-Henneberg, Pölzl B. *Innovative Processes in the All-Glass Sector*. Uit het boek: Behling, S., Brensing, C., Fuchs, A., & Ingenhoven, C. (2013). *Innovative Design and Construction*. Uitgever: Walter de Gruyter. ISBN: 3955531716, 9783955531713
- **[4]** Pölzl, F. N. (2017). *Mechanical Behavior of Cold-Bent Insulating Glass Units*. Graz University of Technology. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20913.58729>
- **[5]** Datsiou, K. (2017). *Design and Performance of Cold Bent Glass*. 10.17863/CAM.15628. https://www.researchgate.net/publication/321179618_Design_and_Performance_of_Cold_Bent_Glass/
- **[6]** Millard, B. (2015, 29 mei). *Bending Glass in the Parametric Age*. Geraadpleegd van <http://www.enclos.com/site-info/news/bending-glass-in-the-parametric-age>
- **[7]** Seele. *Strasbourg Railway Station*. Geraadpleegd van <https://seele.com/references/strasbourg-railway-station>

AFBEELDINGEN

- **Afb. 4.27:** © David Iliff. Licentie: CC BY-SA 3.0.
- **Afb. 4.28:** © Obertreis. Uit [7]
- **Afb. 4.29, 4.31:** Uit [1]
- **Afb. 4.30:** Uit [3]
- **Afb. 4.32:** © Sedak. Uit [6]
- **Afb. 4.33:** © Matthias Reithmeier. Uit [7]

5. BEDRUKTE GLASpaneelen

Hoofdstuk 5 belicht twee unieke projecten waar glas werd ingezet om een verhaal te vertellen. Het glas is daarbij allesbehalve 'afwezig en transparant', maar 'spreekt' tot de gebruikers van het gebouw. In beide projecten werd er samengewerkt met een kunstenaar, wat verder bijdraagt aan de specifieke identiteit van de gebouwen. Uiteraard wordt in dit hoofdstuk ook stilgestaan bij de verschillende (nieuwe) printtechnieken.

5.1 DE GLAZEN BOERDERIJ

• MVRDV • Schijndel, Nederland

bouw: 2012 - 2013



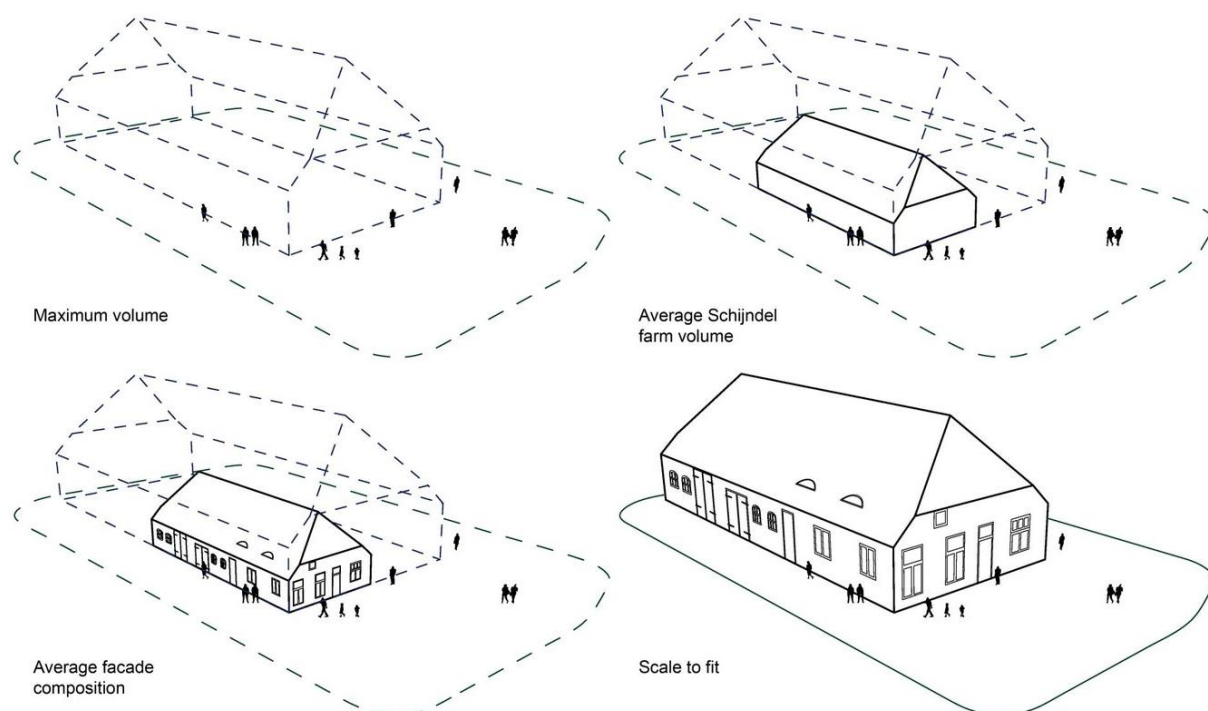
Afb. 5.1: De Glazen Boerderij op het marktplein van Schijndel, ontworpen door MVRDV. (© MVRDV)

Het Rotterdamse architectenbureau MVRDV ontwierp een opmerkelijk openbaar gebouw in Schijndel (Nederland), namelijk 'de Glazen Boerderij' (Afb. 5.1).

Door bombardementen tijdens de Tweede Wereldoorlog had het marktplein van de Noord-Brabantse gemeente zware schade opgelopen en sindsdien tal van uitbreidingen en verbouwingen ondergaan, maar toch bleef het altijd heel open. Al in 1980 schreef de toen 21-jarige Schijndelnaar Winy Maas (de M in MVRDV) een brief aan de gemeente met het idee om een

nieuwe structuur te plaatsen op het plein. Pas bij de eeuwwisseling accepteerde de gemeenteraad het idee. MVRDV heeft sindsdien verschillende ontwerpen voorgesteld die de leemte op dit ongewoon grote dorpsplein zouden kunnen vullen, zoals bijvoorbeeld een theater. Het idee om een glazen schuur te plaatsen was al het zevende voorstel. Het gebouw kwam er uiteindelijk in 2013, drieëndertig jaar na de eerste brief.

De volledig met glas beklede 'boerderij' heeft voorzieningen zoals restaurants (Afb. 5.8), winkels en een wellness.



Afb. 5.2: Het concept van de Glazen Boerderij. (© MVRDV)

Toevallig had de maximale enveloppe die door de stedenbouwkundigen was vastgelegd de vorm van een traditionele boerderij die zo kenmerkend is voor de streek. Het had wel de vorm, maar niet de schaal van dergelijk traditioneel schuurgebouw. Met dit gegeven gingen de architecten aan de slag en kwamen op het idee om de vorm bewust 1,6 keer groter te verschaalen (Afb. 5.2), om zo een monument voor het traditionele gebouw te creëren en de groei van het dorp tot een stad te symboliseren.

Alle overgebleven traditionele boerderijen van dit type in de regio werden gefotografeerd. In samenwerking met kunstenaar Frank van der Salm werd vervolgens een collage van de 'typische boerderij' samengesteld. Deze collage is gedrukt op de glazen omhulling van het gebouw en volgt door de schaalvergroting het idee van de 'uitgebreide' geschiedenis. Wanneer volwassene tegenover het gebouw staan, zijn ze opnieuw zo klein als een kind in verhouding tot het gebouw; de 'boerderijdeur' is bijvoorbeeld vier meter hoog. Dit creëert mogelijks nostalgische herinneringen bij een bezoek aan de 'boerderij'.

De geprinte ramen zijn geen echte ramen; de interactie tussen binnen en buiten gebeurt door transparant gelaten zones. De afdruk varieert op verschillende plaatsen in doorschijnendheid, afhankelijk van de vereisten voor licht en uitzicht. 's Nachts wordt de structuur van binnenuit verlicht en ontstaat er een effect dat lijkt op de glas-in-loodramen van een kathedraal.

De schil van het gebouw bestaat in totaal uit zo'n 1000 stukken glas, variërend van 8m² tot 0,05m². Voor de wanden werd er dubbelglas samengesteld, bestaande uit 8mm gehard glas als buitenste paneel, voorzien van een low-e coating, en een 8mm gehard glaspaneel met print langs de binnenzijde, gescheiden door een isolerende spouw. Bij de dakpanelen bestaat het binnenblad van de IGU uit gelaagd glas 88.2 (twee glasplaten van 8mm gelamineerd door twee tussenlagen). De grootste IGU in het dak heeft afmetingen van 3,13 op 2,23m. Onderdelen zoals deuren, ventilatieroosters en schoorstenen moesten zo minimaal mogelijk aanwezig zijn en werden bedekt met glasplaten die het beeld van de print laten doorlopen (Afb. 5.3).



Afb. 5.3: Links: Verlijming van bedrukt glas op een dakrooster (© [3]). Rechts: De roosters zijn mooi geïmplementeerd in het dakvlak dankzij de doorlopende print. (© VIDEO: AGC - De Glazen Boerderij (Glass Farm) - Artlite Digital)

Hoewel het beeld van de print traditioneel is, was de hiervoor gebruikte printtechniek dat allesbehalve. Er werd gekozen voor de techniek van 'Digital Ceramic Printing'. Digitaal keramisch printen (keramisch slaat op het feit dat het om een 'emailtechniek' gaat) bestond nog niet op deze manier toen MVRDV het concept van de Glazen Boerderij aan het ontwikkelen was. In het begin werd geprobeerd om het resultaat te behalen met de klassieke zeefdruktechniek. Daarbij worden achtereenvolgens sjablonen ('zeven') over de glasplaat gelegd, waarbij de uitsparing telkens de gewenste figuur is voor de kleur van de inkt die over de zeef wordt gesmeerd. Het was moeilijk om het gewenste effect te bereiken met deze printtechniek. Het was te eentonig van kleur en patroon, gezien er veel herhaling werd gebruikt in het totaalbeeld om kosten op verschillende zeefpatronen te verminderen. De zeefdrukmethode heeft als grootste beperking de capaciteit van verschillende kleuren die kunnen gebruikt worden (meestal maximaal vier), wat de ontwerpvrijheid erg beperkt. Bovendien waren de toleranties in dit project heel klein, alles moest precies passen, en ook dat was niet evident met zeefdruk.

Toen nam AGC Mirodan Bouwglas uit Heule (België) een sprong in het diepe door een nieuw alternatief voor te stellen waar gebruik gemaakt wordt van een digitale printtechnologie van Dip-Tech. Hiermee kon een veel breder kleurbereik gehaald worden en waren er dus ook geen zeefpatronen of herhalende elementen meer nodig waren wat de ontwerpvrijheid ten goede kwam en de vaste kosten verlaagde. AGC Mirodan Bouwglas is een onderdeel van AGC Glass Europe, en Dip-Tech is het bedrijf dat de printers, inkt en software produceert die werden gebruikt bij het proces. De digitale printmachine heeft 24 printkoppen die met een uitzonderlijke nauwkeurigheid heen en weer bewegen over de glasplaat om zo de bedrukking in hoge resolutie aan te brengen (Afb. 5.4).

Deze techniek bleek de ideale oplossing te zijn voor de productie van glasplaten met verschillende achtereenvolgende motieven. Gezien de totale schil bestaat uit ongeveer duizend verschillende stukken glas, was het DTP-werk vooraleer het printen kon starten enorm groot - een paar terabytes. Met DTP-werk ('desktop publishing') wordt hier bedoeld het proces waarbij de digitale fotocollage tot een 'printklare versie' per paneel wordt verwerkt.



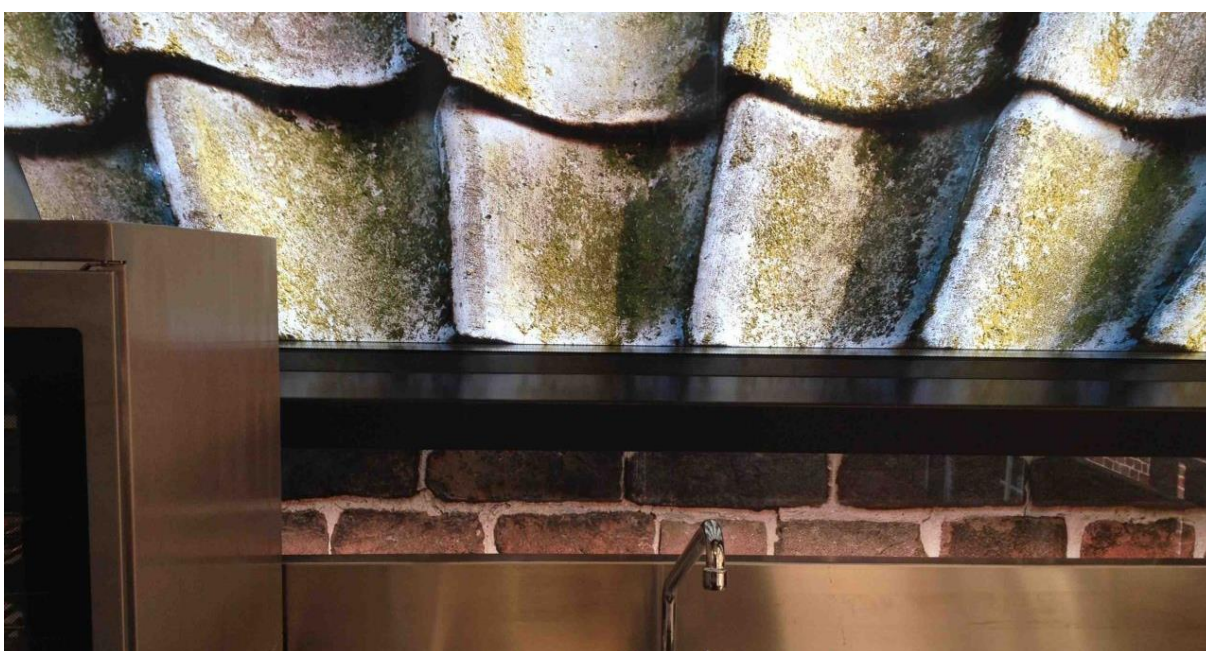
Afb. 5.4: Links: De print wordt aangebracht via een digitale printtechniek. Rechts: Alle bedrukte glaspanelen worden visueel gecontroleerd op onregelmatigheden. (© AGC Mirodan, VIDEO: AGC - De Glazen Boerderij (Glass Farm) - Artlite Digital)

Als de printer zijn job had voltooid, werd de inkt in het glas gesmolten tijdens de procedure van het thermisch harden van het glaspaneel; dat zijn twee vliegen in één klap. Het digitale keramische printproces verandert niets aan de prestatie-eigenschappen van het glas. Bovendien kunnen andere glasprocessen zoals lamineren, isoleren, coaten en buigen nog steeds probleemloos worden toegepast zoals bij onbedrukt glas.

De éénwording van inkt en glas ('emailtechniek') zorgt ervoor dat de bedrukking bestand is tegen weersinvloeden, schurende stoffen, slijtage en de tand des tijds. Dit in tegenstelling tot de andere digitale printtechniek waarbij inkt door UV-

straling wordt uitgehard als een ultradunne laag bovenop het glas in plaats van met het glas te worden versmolten. Daardoor is bij de techniek met UV-straling de duurzaamheid en krasbestendigheid een pak slechter, en daarom werd dit niet gekozen voor de panelen van de Glazen Boerderij.

Vaak wordt een bedrukking aangebracht met oog op het verminderen van de warmtewinst en het tegengaan van verblinding. Dat was in dit project ook wel van toepassing, maar dat was uiteraard ondergeschikt aan het idee om de printtechniek in te zetten om het gewenste beeld van een boerderij te kunnen creëren (Afb. 5.5).



Afb. 5.5: De hoogwaardige kwaliteit van de print zorgt voor een waarheidsgetrouw beeld van een boerderijgevel. (© MVRDV)

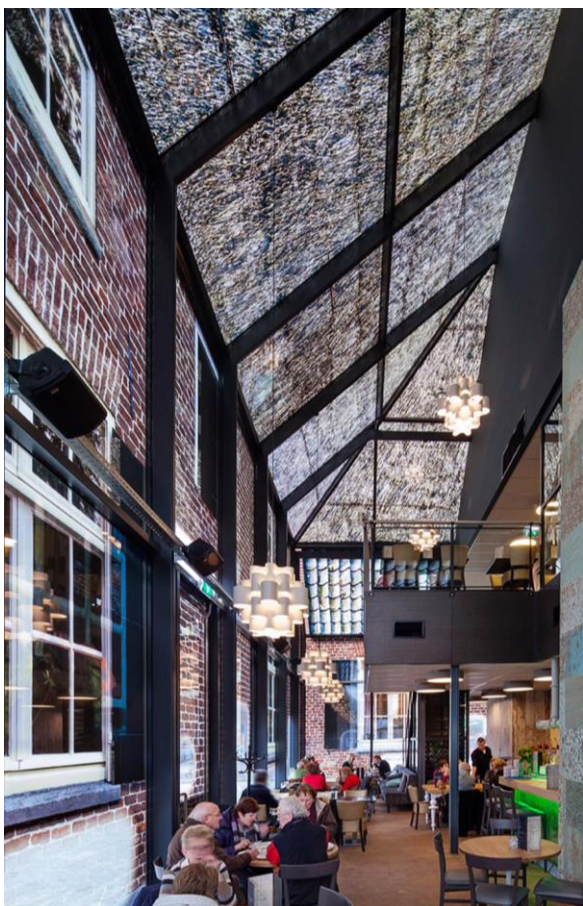
Het op deze wijze geproduceerd glas dat aangeboden wordt door AGC Glass Europe heet in hun assortiment 'Artlite Digital glas'. Met Artlite Digital glas kan je verschillende gradaties van doorzichtigheid bereiken door te variëren in het aantal lagen dat over elkaar wordt aangebracht. Bij 'nul' lagen is het glas transparant en bij het maximum van vier lagen is het glas opaak en komt de print volledig tot uiting (Afb. 5.6). Van deze mogelijkheid werd gebruik gemaakt voor de Glazen Boerderij; de print verloopt gradueel van 100% naar 0% op plaatsen waar de architecten het nodig vonden, bijvoorbeeld om het restaurant van 'ramen' te voorzien (Afb. 5.7).



Afb. 5.6: Met Artlite Digital glas van AGC kan je verschillende niveaus van doorschijnendheid bereiken. (© [11])



Afb. 5.7: Een geprint traditioneel raam met bloembak versus een transparant gelaten deel in de print. (© MVRDV)

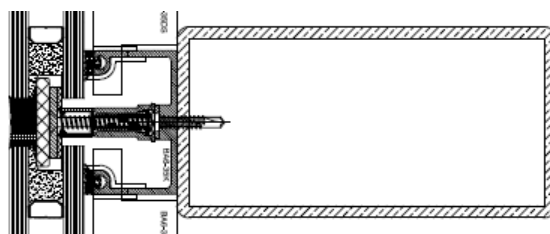


Afb. 5.8: Interieurbeelden genomen vanuit het restaurant. (© MVRDV)

De stalen draagstructuur van de Glazen Boerderij heeft geen windverbanden gezien de stabiliteit wordt verkregen door de centrale stijve wanden van het trappenhuis. Op dit stalen frame zijn aluminiumprofielen van 35mm gemonteerd waaraan de glaspanelen kunnen worden bevestigd. De tolerantie die de firma Brakel Atmos (nu Kingspan Light+Air) uit Uden had voor het plaatsen van deze profielen was slechts 5 millimeter.

De uitdrukkelijke vraag van MVRDV was om langs de buitenzijde geen grote elementen te hebben die het beeld van de print zouden verstoren. Dat betekende dat er geen stijlen werden gebruikt zoals bij een klassieke gordijngevel, maar gekozen werd voor een structureel verlijmd beglazingssysteem. Daarbij wordt enkel de binnenste glasplaat van de IGU bevestigd aan de staalstructuur. Dit gebeurt aan de hand van aluminium klemstrips die het glaspaneel

langs de vier zijden op de aluminiumprofielen drukt. De buitenste glasplaat is structureel verbonden met de binnenste via een 'terugliggende' siliconen afdichting, een zogenaamde Siltal-voeg. Bij dergelijke voeg is een extra groef voorzien om de ruimte te hebben om de binnenste glasplaten te kunnen klemmen tegen een structuur (Afb. 5.9 en 5.11). Ten slotte wordt de opening tussen de IGU's water- en luchtdicht afgedicht aan de hand van een siliconenkit. Aan de buitenkant zijn enkel deze zwarte kitvoegen zichtbaar en dus geen componenten zoals afdeklijsten.

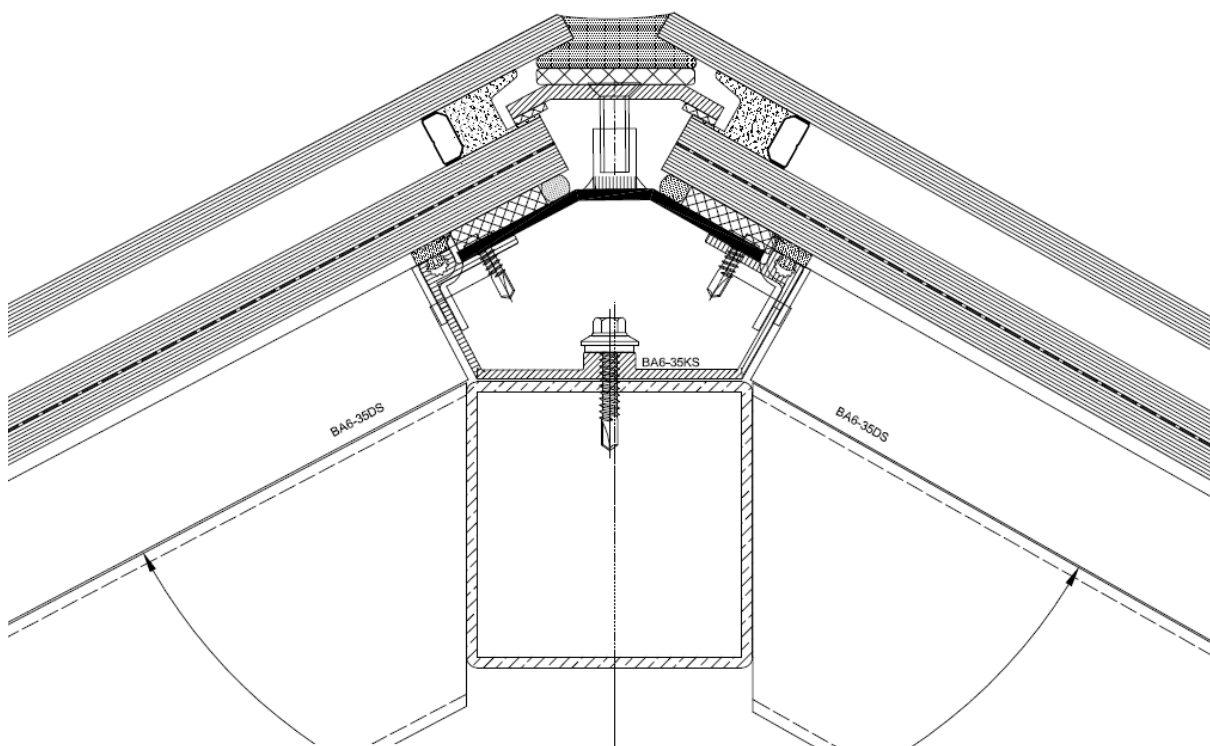


Afb. 5.9: Het structureel beglazingssysteem kent een vierzijdige inklemming. (© [2])



Afb. 5.10: De 20mm brede afdichtingsvoeg. (© MVRDV)

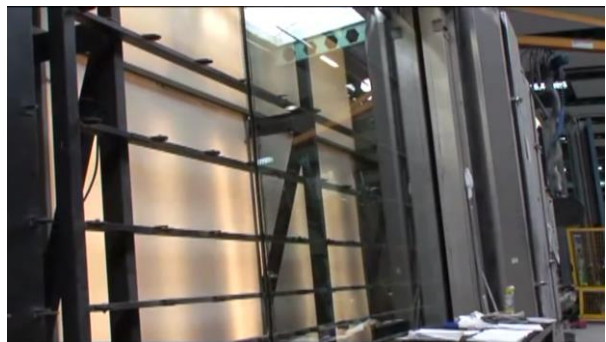
Aanvankelijk en normaliter bij dit systeem was de breedte van zo'n afdichtingsvoeg tussen twee gevelpanelen 25 millimeter. Om de glasplaten definitief op hun plaats te kunnen monteren, moet iemand met zijn vingers tussen de opening van twee glasplaten kunnen reiken. Deze handmatige procedure definieerde de 25 millimeter breedte van de openingen en zodoende dus ook de siliconen naad die de afwerking van die opening zou zijn. De architecten vonden dat dit toch nog te veel het totaalbeeld brak en probeerden de voeg te minimaliseren. Gijs Rikken, projectleider van de Glazen Boerderij, vertelt: *"Dus vroegen we of er iemand was met dunnere vingers, misschien kleinere handen? We wilden 20 millimeter en vroegen Brakel Atmos of dat mogelijk was. Ze aarzelden eerst, maar vonden toen een manier waarop een arbeider met kleine handen het aankon. En nu zijn de naden 20 millimeter en ze zien er fantastisch uit!"* [8] (Afb. 5.10)



Afb. 5.11: Bij de IGU's in het dak werd het binnenste paneel gelamineerd. In knooppunten waar verschillende hellingen samenkomen zoals hier in de nok is de kitnaad 30 millimeter dik. (© [2])

De fabriek AGC Westland uit Maasdijk had een aparte assemblagelij opgezet om deze manier van dubbel glas te kunnen maken. Eerst werden de glasplaten (de transparante en de bedrukte) machinaal gewassen rechtopstaand op de lijn (Afb. 5.12). Daarna werden aluminium afstandshouders ('spacers') aangebracht op de bedrukte plaat langs de kant van de print. Daarbij werd elektronisch gemeten of de afstandshouders op de juiste afstand van de glasrand waren geplaatst; dat was immers belangrijk voor de

Siltal-voeg die nog moest komen. Van zodra dit juist gekalibreerd was, werd de transparante glasplaat geplaatst om zo de IGU te vormen (Afb. 5.12). Als de assemblage op de lijn klaar was, werd de spouw van de IGU handmatig gevuld met argongas. Tot slot werd de Siltal-voeg aangebracht die de platen structureel samenhoudt, gezien het dubbelglas dus niet in een kader wordt geplaatst (Afb. 5.13). Deze voeg dient ook als 'secundaire' waterafdichting.



Afb. 5.12: Links: De bedrukte glasplaat wordt gewassen op de lijn. Rechts: Ook de transparante, gecoate 'tegenruit' wordt gewassen op de lijn. (© AGC Westland, VIDEO: AGC - De Glazen Boerderij (Glass Farm) - Artlite Digital)



Afb. 5.13: Links: Afstandshouder aanbrengen op de bedrukte glasplaat. Rechts: De tweede glasplaat wordt gepositioneerd en bevestigd. (© AGC Westland, VIDEO: AGC - De Glazen Boerderij (Glass Farm) - Artlite Digital)



Afb. 5.14: Links: De IGU wordt handmatig gevuld met argongas. Rechts: Aanbrengen van structurele Siltal-voeg. (© AGC Westland, VIDEO: AGC - De Glazen Boerderij (Glass Farm) - Artlite Digital)

De montage van de glazen schil met een totale oppervlakte van 1700m² gebeurde van boven naar beneden en werd gedirigeerd door het bedrijf Brakel Atmos (Afb. 5.16 en 5.17). Vanwege de print is ieder 'puzzelstuk' uniek. Daarom werd er bij elke bedrukking een serienummer aangebracht om de 'puzzel' tot een goed einde te kunnen brengen (Afb. 5.15). Om de installatie te vergemakkelijken, werd er vooraf een plan uitgewerkt welke panelen wanneer op de bouwplaats moesten aankomen. Volgens dat plan werden de panelen in de fabriek in de juiste volgorde op de glasbok geplaatst, om een vlotte voortgang te garanderen.



Afb. 5.15: Puzzelstuk ZW-G-04. (© MVRDV)



Afb. 5.16: Constructie van de Glazen Boerderij. (links: © [12], rechts: © [3])



Afb. 5.17: Het unieke gebouw in Schijndel, bij het vallen van de nacht. (© MVRDV)

Referenties DE GLAZEN BOERDERIJ

TEKST

- [1] Groothof, M. (2012, 27 juni). Complete schil uit 1.000 geprinte puzzelstukjes. Boerderij van glas. Spraakmakend. *GLAS IN PROJECT*. 51. Geraadpleegd van www.glasinbeeld.nl.
- [2] Groothof, M. (2012, 29 augustus). De Glazen Boerderij (2). Glasconstructie glazen. Daken en gevels. *GLAS IN DETAIL*. 23–25. Geraadpleegd van www.glasinbeeld.nl.
- [3] Groothof, M. (2012, 9 oktober). De Glazen Boerderij (3). Verlijming glas klaar, montage in volle gang. *GLAS IN DETAIL*. 27–28. Geraadpleegd van www.glasinbeeld.nl.
- [4] Heeren, R. (2013, 17 april). *Glazen Boerderij in Schijndel: gevels en dak geprint op glas*. Geraadpleegd van architectura.be/nl/nieuws/4668/glazen-boerderij-in-schijndel-gevels-en-dak-geprint-op-glas
- [5] Bouwend Nederland Vakgroep Glas. *AGC Flat Glass Nederland B.V. - Glazen Boerderij*. Geraadpleegd van <https://www.glasbrancheorganisatie.nl/projecten/?page=detail&id=19>
- [6] Architectuurgids.org. *Glazen Boerderij*. Geraadpleegd van https://www.architectuur.org/bouw-werk/608/Glazen_Boerderij.html
- [7] MVRDV. *Glass Farm*. Geraadpleegd van <https://mvrdiv.nl/projects/119/glass-farm>
- [8] Stott, R. (2015, 11 maart). *Material Minds: Digital Ceramic Printing in MVRDV's Glass Farm*. Geraadpleegd op 15 april 2020, van <https://www.archdaily.com/607925/material-minds-digital-ceramic-printing-in-mvrdiv-s-glass-farm/>
- [9] Dip-Tech. (2018a, 23 april). *Demystifying Fritted Glass. What is fritt glass*. Geraadpleegd van <https://www.dip-tech.com/cn/press-releases/demystifying-fritted-glass>
- [10] Dip-Tech. (2018b, 3 mei). *Glass print options: Digital printing vs screen printing. Solutions for printing on glass*. Geraadpleegd van <https://www.dip-tech.com/press-releases/glass-print-options-digital-printing-vs-screen-printing>
- [11] AGC Glass Europe. (2013). *ARTLITE DIGITAL®. Functional patterns by Alain Berteau*
- [12] AGC Glass Europe. (2013). *AGC - De Glazen Boerderij (Glass Farm) - Artlite Digital* [Videobestand]. *YouTube*. Geraadpleegd van <https://www.youtube.com/watch?v=Z6U3IfWo3TQ>

AFBEELDINGEN

- Afb. 5.1, 5.7, 5.8, 5.17: © MVRDV. Uit [7]
- Afb. 5.2, 5.5, 5.10, 5.15: © MVRDV. Geraadpleegd van www.archdaily.com/321503/glass-farm-mvrdiv-2
- Afb. 5.3 Links, 5.16 Rechts: Uit [3]
- Afb. 5.3 Rechts, 5.4, 5.12, 5.13, 5.14, 5.16 Links: Uit [12]
- Afb. 5.6: Uit [11]
- Afb. 5.9, 5.11: Uit [2]

5.2 INSTITUUT VOOR BEELD EN GELUID

- NEUTELINGS RIEDIJK • Hilversum, Nederland

bouw: 2004 - 2006

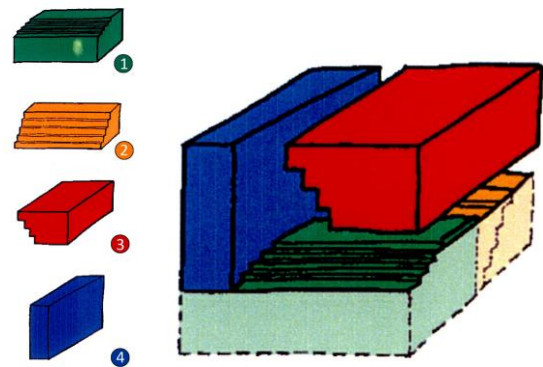


Afb. 5.18: Het Nederlands Instituut voor Beeld en Geluid, gesitueerd in het Media Park te Hilversum. (© drupsteen.nl)

Op het Media Park in Hilversum (Nederland) staat sinds eind 2006 het nieuwe gebouw van het Nederlands Instituut voor Beeld en Geluid (Afb. 5.18). Dit gebouw brengt de zes voorgaande locaties onder in één centrale plek. De taak is *“het Nederlandse audiovisuele erfgoed te behe- ren, te conserveren en toegankelijk te maken voor een breed publiek”* (Beeld en Geluid) [6]. Het ontwerp van het kleurrijke gebouw komt van Neutelings Riedijk Architecten uit Rotterdam.

Het Nederlands Instituut voor Beeld en Geluid heeft één gemeenschappelijke ingang voor alle gebruikers, waarmee je in het hart van het ge- bouw toekomt. Vanwege de maximaal toege- stane hoogte, ligt het kubusvormige gebouw voor de helft onder het maaiveld (Afb. 5.23). On- dergronds bevinden zich de archieven van de radio- en televisieopnames uit Nederland, en

een ruimte waar bezoekers dit archiefmateriaal kunnen opvragen en raadplegen. Bovengronds is er een museum en een kantoorgebouw. De architecten brachten elke gevraagde functie on- der in duidelijk te onderscheiden volumes (Afb. 5.19).



Afb. 5.19: 1. Ondergrondse archief- en depotruimte 2. Ar- chiefruimte waar bezoekers materiaal kunnen opvragen en raadplegen. 3. Museumgedeelte. 4. Kantoorgebouw. (© Neutelings Riedijk Architects. Uit [1])

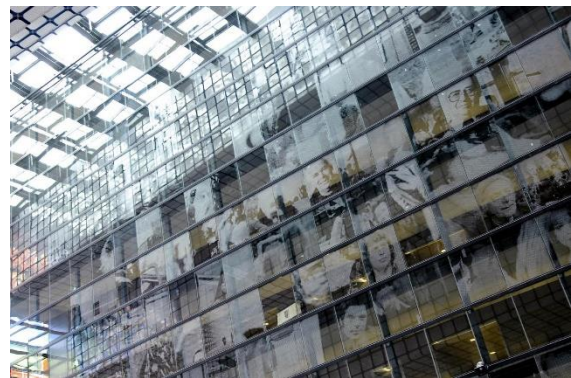
Het archiefdeel is een 'ravijn' dat trapsgewijs kleiner wordt. Opmerkelijke oranje gangen met open ramen geven toegang tot de collectie en loopbruggen overspannen de vide. Vanwege de stabielere temperatuur was het een logische keuze om het depot en het archief ondergronds te situeren. Zo wordt de installatie die de temperatuur en luchtvochtigheid in stand moet houden minder belast.

Door middel van een brede trap komt de bezoeker in het museumgedeelte terecht dat in totaal ongeveer 3300m² expositieruimte biedt. Qua volumetrie is het museum het inverse van het archiefdeel. Als een omgekeerde ziggoerat zweeft dit deel boven de grote centrale ruimte. Een stalen vakwerk, dat verwerkt zit in de voorlaatste 'trede', ondersteunt dit gebouwdeel. Het getrapte volume is bekleed met vierkante aluminium paneeltjes van 55 op 55 centimeter. Deze weerspiegelen het binnenvallende gekleurde licht tot diep in de ruimte (Afb. 5.20).



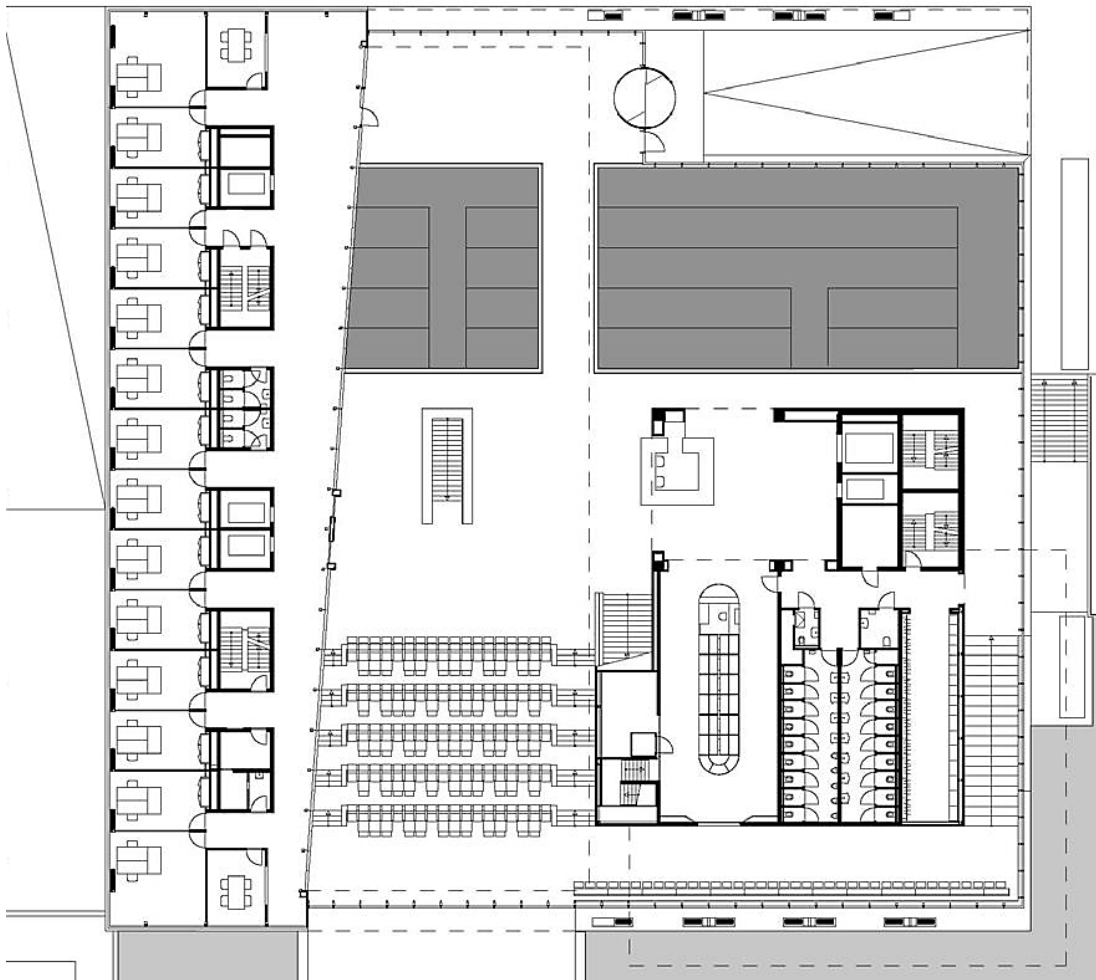
Afb. 5.20: Wanneer de zon op het zuiden zit, valt er tot diep in het gebouw kleurrijk licht binnen. (© drupsteen.nl)

Recht tegenover het museum, aan de westzijde, bevindt zich een tapvormig kantoorgebouw (Afb. 5.22). Ondergronds maakt dit gebouw de verbinding met het archiefgedeelte. Bovengronds worden de kantoorgangen afgesloten van de centrale hal door middel van een wand die bestaat uit bedrukte glazen panelen. Aan de hand van zwart-witte portretfoto's worden er jaarlijks nieuwe mediapersoonlijkheden toegevoegd aan deze 'Wall of Fame' (Afb. 5.21).

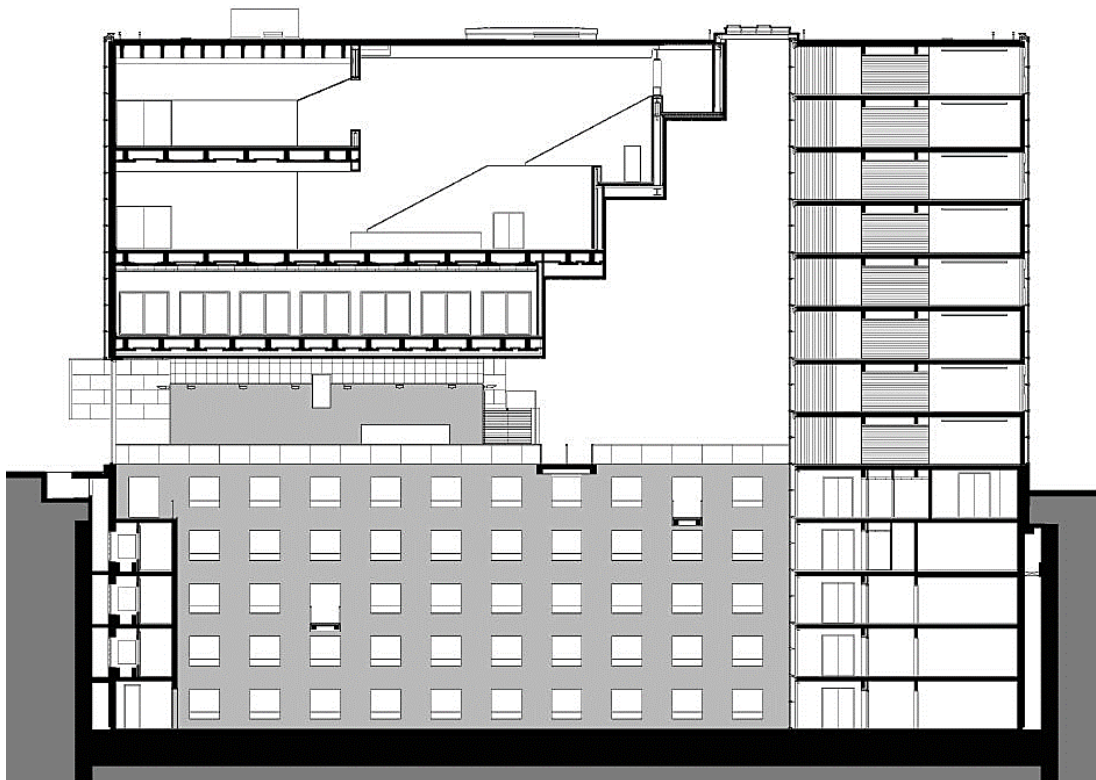


Afb. 5.21: De 'Wall of Fame'. (© Beeld en Geluid)

Deze drie gebouwdelen (het ravijn, de ziggoerat en de wig) zijn op een zodanige manier geschikt dat ze een grote 'contraruimte' ontsluiten. Deze 'verbindende leegte' legt de link tussen alle onderdelen en zorgt voor een indrukwekkende ruimtebelevens. Als men op de bovenste loopbrug van het archief staat, overziet men haast het hele gebouw: van de 16 meter diepe bodem van het ravijn tot aan het glazen dak van de hal op 26 meter hoogte (Afb. 5.24). De publieke centrale hal dient als inkom, café en atrium voor media-evenementen en prijsuitreikingen (Afb. 5.22).



Afb. 5.22: Plan van het gelijkvloers. (© Neutelings Riedijk Architects. Uit [1])

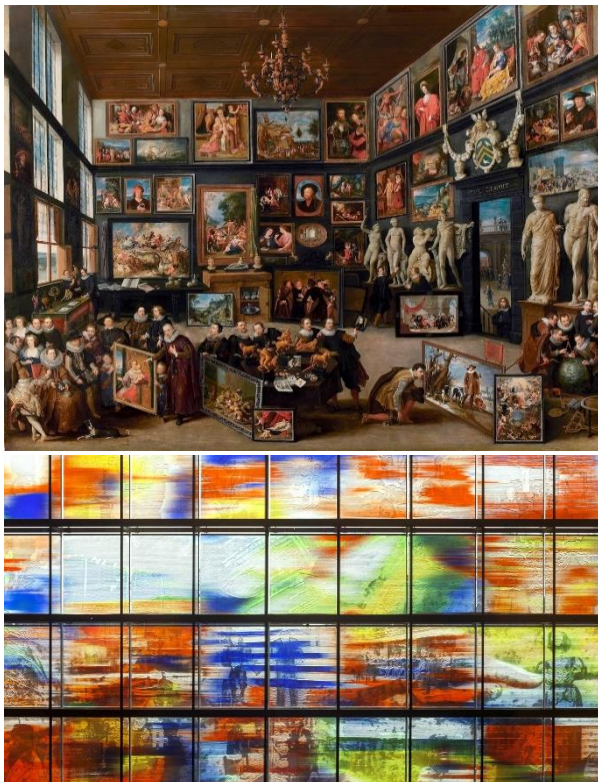


Afb. 5.23: Snede parallel met het ravijn. (© Neutelings Riedijk Architects. Uit [1])



Afb. 5.24: De indrukwekkende 'contraruimte'. (© Beeld en Geluid)

Dankzij een glasgevel die rondom rond de verschillende volumes loopt, wordt er een kubusvormig geheel gevormd. Om de uitstraling van het gebouw te laten aansluiten bij de functie ervan, werd er een schil ontworpen die bestaat uit glaspanelen waarop gekende fragmenten uit de Nederlandse televisiegeschiedenis worden afgebeeld. Dit idee vond zijn inspiratie in het schilderij 'De kunstkamer van Cornelis van der Geest', geschilderd in 1628 door de Vlaamse schilder Willem van Haecht (Afb. 5.25 boven).



Afb. 5.25: Boven: 'De kunstkamer van Cornelis van der Geest' van Willem van Haecht. (© rubenshuis.be) Onder: De glasgevel van het Nederlands Instituut voor Beeld en Geluid. (© Scagliola Brakkee)

Het ontwerp voor het gevelmozaïek komt van kunstenaar Jaap Drupsteen, in samenwerking met Neutelings Riedijk Architecten. Er werden bijna 800 fragmenten uit de collectie van Beeld en Geluid geselecteerd. De beelden moesten volgens de kunstenaar niet individueel herkenbaar zijn, maar dienden in totaal één nieuwe grote weergave te vormen van het nationale collectieve geheugen. Dankzij een abstrahering van de illustraties en door de kleuren wazig te laten doorlopen over de panelen heen, werd het beeld van een opdringerige kiosk voorkomen (Afb. 5.25 onder).

Drupsteen wenste in elk glaspaneel reliëf te gebruiken om de beelden weer te geven. Er werd gekozen voor CREA-LITE glas, een product van Saint-Gobain. Het betreft een uitgegloeid glas dat op een zandbed wordt geplaatst waarin een 3D-afdruk werd gemaakt aan de hand van een houten mal. In een oven wordt het glas week en zinkt het in de reliëfstructuur van dit zandbed. Om de mallen voor dit project te kunnen maken, werd er software ontwikkeld die de kleurbeelden van Drupsteen omzette naar gradaties van zwart. De intensiteit van het zwart bepaalde de diepte waarmee het MDF machinaal uitgefreesd diende te worden (Afb. 5.26). De maximale diepte van de afdruk die bij deze techniek haalbaar was, bedroeg iets meer dan een centimeter. In totaal werden er voor de gevel van het Nederlands Instituut voor Beeld en Geluid 2244 glaspanelen gemaakt van 1170 op 1442 millimeter, elk met een uniek reliëf.



Afb. 5.26: Links: Het reliëf uitgefreesd in MDF. (© drupsteen.nl) Rechts: Het resultaat van het reliëf in het glas. (© [1])

Naast reliëf, diende er zoals vermeld ook kleur te worden gebruikt om de beelden tot leven te brengen. Het resultaat moest vergelijkbaar zijn met het effect van gekleurd glas-in-lood. Maar de eeuwenoude techniek hiervoor, brandschilderen, werd niet gebruikt omdat men de computerbeelden rechtstreeks wilde inzetten om de print op het glas te kunnen maken.

Het zeefdrukproces werd evenmin gebruikt omdat het resultaat niet transparant genoeg zou zijn. Vanwege de onvoldoende duurzaamheid, werd ook printen op een folie niet gekozen. Om aan de eisen op het vlak van esthetiek en duurzaamheid te voldoen, heeft Saint-Gobain Glass Solutions, samen TNO Eindhoven, een nieuwe printtechniek met poeder (in plaats van inkt) ontwikkeld (Afb. 5.27).

Daarbij werd er via trillingen gekleurd keramisch poeder (deels bestaande uit fijne glaskorrels) op de vlakke glasplaat aangebracht. TNO ontwikkelde software die uit de afbeeldingen van Drupsteen het aandeel cyaan, magenta en geel (die anders ook gebruikt worden bij een 'normaal' printprocedé) omzette naar doseringen van rood, blauw en geel glaspoeder. Via verschillende specifieke frequenties bij het trillen konden de gewenste patronen bereikt worden. De met poeder bedekte glasplaat werd daarna voorzichtig op het reliëfzandbed gepositioneerd en verhit tot ongeveer 800°C. In de oven versmelt het gekleurde poeder met de bovenlaag van het uitgegloeid glas. Het gaat dus om een emailtechniek en levert een duurzaam resultaat op. Erna werd het glaspaneel gehard.

Het printen en vormgeven van één enkel glaspaneel duurde ongeveer een uur. Saint-Gobain produceerde de meer dan 2200 glaspanelen in een half jaar tijd via ploegendiensten. De panelen vormen samen een unieke gevel met een oppervlakte van ongeveer 4200m².



Afb. 5.27: Boven: Een speciale printkop verwerkt poeders in plaats van inkt. (© [2]) Onder: Via trillingen valt het poeder op de glasplaat. (© drupsteen.nl)

De glaspanelen werden op elke gevelzijde van het Nederlands Instituut voor Beeld en Geluid toegepast. Enkel voor de gelijkvloerse verdieping en aan de westzijde (met de kantoren) werd er daarnaast ook conventionele beglazing gebruikt om deze ruimtes van voldoende daglicht te voorzien.

De glaspanelen zijn langs de boven- en onder-rand in U-profielen geplaatst. Deze profielen zijn roterend bevestigd aan horizontale stalen liggers die verankerd zijn aan de betonnen wanden van de verschillende volumes. De panelen kunnen opendraaien indien dit gewenst is voor het onderhoud. De glazen schil is niet wind-, regen- of luchtdicht. Elk volume heeft zijn eigen performante wandopbouw en de gekleurde glasgevel werd achteraf als een jurk over het geheel gedrapeerd (Afb. 5.28). Voor het deel van de gevel dat zichtbaar is vanuit de hal, werden er extra horizontale stalen vakwerken ontworpen die windbelasting opnemen (Afb. 5.29).



Afb. 5.28: Links: De volumes worden geconstrueerd alsof het aparte gebouwen zijn. Midden: Betongevel, hiertegen komt later de gekleurde glasgevel. Rechts: De glasgevel houdt de gebouwonderdelen samen. (© Neutelings Riedijk Architects. Uit [1])



Afb. 5.29: Links: De gekleurde glasgevel tegen een gebouwonderdeel met achterliggend schrijnwerk. Rechts: De gekleurde glasgevel ten hoogte van de centrale hal. (© drupsteen.nl)

Referenties NEDERLANDS INSTITUUT VOOR BEELD EN GELUID

TEKST

- **[1]** Peters, J., & Sprangers, J. (z.d.). *Production & Parts. Assignment One – Details. GLASS VS BRICK*. Geraadpleegd van <https://docplayer.net/21061563-Production-parts-assignment-one-details-glass-vs-brick-j-c-sprangers-0548253-j-m-e-f-peters-0556061.html>
- **[2]** TNO. (2007). *Industrie en Techniek. Glaspoederprinter*.
- **[3]** Stekelenburg, E. (2006, 30 november). *Archined. Media in Architectuur*. Geraadpleegd van <https://www.archined.nl/2006/11/media-in-architectuur/>
- **[4]** Architectenweb. (2006, 27 oktober). *Crea-lite wint GBO glas innovatie award '06*. Geraadpleegd van <https://architectenweb.nl/nieuws/artikel.aspx?id=8242>
- **[5]** Glassolutions Saint-Gobain. *Beeld en Geluid, Hilversum*. Geraadpleegd van <https://glassolutions.nl/nl/projecten/beeld-en-geluid-hilversum> + Glassolutions Saint-Gobain. *CREA-LITE*. Geraadpleegd van <https://glassolutions.nl/nl/producten/crea-lite> + Glassolutions Saint-Gobain. *Glasdesign met reliëf en kleuren*. Geraadpleegd van <https://glassolutions.nl/nl/producten/glasdesign-met-reliëf-en-kleuren>
- **[6]** Beeld en Geluid. *Gebouw. Wat is er te doen*. Geraadpleegd van <https://www.beeldengeluid.nl/bezoek/wat-er-te-doen/gebouw>
- **[7]** Neutelings Riedijk Architects. *Netherlands Institute for Sound and Vision*. Geraadpleegd van <https://www.neutelings-riedijk.com/institute-for-sound-and-vision>
- **[8]** Drupsteen, J. *Glasgevel Beeld en Geluid*. Geraadpleegd van <https://www.drupsteen.nl/Glasgevel-Beeld-en-Geluid>

AFBEELDINGEN

- **Afb. 5.18, 5.20, 5.26 Links, 5.27 Onder, 5.29:** © drupsteen.nl. Uit [8]
- **Afb. 5.19, 5.22, 5.23, 5.26 Rechts, 5.28:** © Neutelings Riedijk Architects. Uit [1]
- **Afb. 5.21 en 5.24:** © Beeld en Geluid. Uit [6]
- **Afb. 5.25 Boven:** Geraadpleegd van <https://www.rubenshuis.be/nl/pagina/vlaams-topstuk-van-willem-van-haecht-restauratie>
- **Afb. 5.25 Onder:** © Scagliola Brakkee (Daria Scagliola en Stijn Brakkee). Uit [6]
- **Afb. 5.27 Boven:** Uit [2]

6. GLAZEN DRAAGSTRUCTUREN

In dit hoofdstuk worden drie projecten met een transparante draagstructuur besproken. Aangezien de ontwikkeling van structurele glastoepassingen nog maar ongeveer dertig jaar geleden op gang gekomen is, is het een zeer jong domein vergeleken met dat van meer traditionele bouwmaterialen zoals gewapend beton, staal of metselwerk.

6.1 APPLE WINKEL FIFTH AVENUE

- BOHLIN CYWINSKI JACKSON • New York, VS

bouw: 2004 – 2006, 2011, 2019



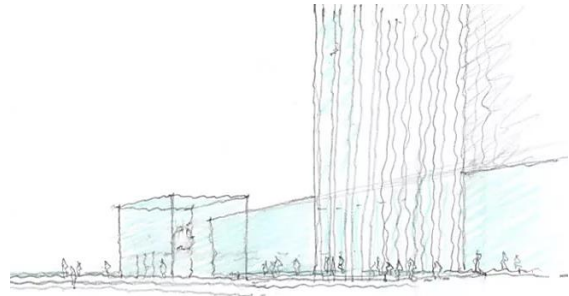
Afb. 6.1: De eerste versie van de 'Apple Cube', ontworpen door BCJ en gerealiseerd in 2006. (© en.wikiarquitectura.com)

De ingang van de Apple winkel gelegen in de 5th Avenue in Manhattan (New York) is een exemplarisch voorbeeld waarbij er gestreefd werd naar een extreme transparantie in architectuur (Afb. 6.1). Het project is gesitueerd op het plein voor het 50 verdiepingen tellende General Motors-kantoorgebouw (Afb. 6.2). Het Amerikaanse architectenbureau Bohlin Cywinski Jackson situeerde de eigenlijke winkel ondergronds om het plein zo open mogelijk te houden. Enkel een bomenrij en twee vierkante ondiepe vijvers geven het plein vorm. Vanaf het plein heeft men uitzicht op de zuidoostelijke hoek van Central Park. Om de ondergrondse winkel te bekronen, ontwierp het bureau een unieke constructie waarbij

de draagstructuur, de gevel en het dak volledig uit glas bestaan. De bouw startte in 2004 en de winkel opende uiteindelijk in 2006. De winkel is ontsloten via een glazen brug die leidt naar een glazen wenteltrap en een glazen cilindrische lift (Afb. 6.3), beiden centraal gesitueerd in de 'glazen kubus', onder het grote Apple-logo. Dankzij de glazen kubus die functioneert als een lantaarn ervaart de bezoeker in de winkel geen ondergronds gevoel. Het is de glazen kubus die het herkenningspunt werd van de winkel en die dankzij de vooruitstrevende architectuur symbool staat voor het innovatieve karakter van het technologiebedrijf Apple Inc.

Elke zijde van de kubus (10 op 10 meter) bestaat uit 18 gevelpanelen van ongeveer 3,35 op 1,70 meter (verhouding 2:1). Enkel bij de voor-gevel werden de twee middelste panelen van de onderste rij weggelaten om een vierkante deuropening te creëren. De glasopbouw van een paneel bestaat uit drie lagen thermisch versterkt glas van 10mm dikte, gelamineerd door PVB. Verbindingsstukken op de horizontale voegen tussen de gevelpanelen zorgen ervoor dat de 18 gevelpanelen samenwerken als één stijve wand en zodoende kan deze fungeren als windverband. Het verlangen naar transparantie houdt namelijk in dat men probeert om zo weinig mogelijke verschillende elementen te gebruiken. Dat leidt tot het ontwerpen van glasconstructies waarbij de schil een structurele functie krijgt. Zo worden bijvoorbeeld extra stalen kabels vermeden.

De gevelpanelen worden ondersteund door twintig glazen kolommen (of vinnen), vijf aan elke zijde. De verticale glazen vinnen zijn geplaatst op een tussenafstand van ongeveer 1,7 meter en zijn elk een halve meter breed en tien meter hoog (Afb. 6.4). Vanwege de deuropening diende één vin hierboven te stoppen. De belasting van deze vin wordt via een speciaal ontworpen verbindingstuk op de aangrenzende panelen overgebracht. De buitenste glaspanelen van de kubus zijn afgekit met een siliconenvoeg.



Afb. 6.2: Schets van het General Motors plein met de glazen kubus. (© en.wikiarquitectura.com)

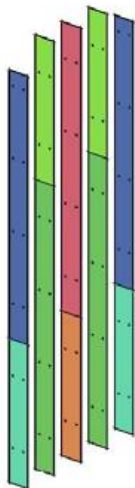


Afb. 6.3: De glazen leuning en de glazen liftschacht nemen de belastingen op de trap op. (© architizer.com)



Afb. 6.4: De gevelpanelen zijn langs de lange zijden bevestigd aan tien meter hoge glazen vinnen. (© sedak.com. Uit [4])

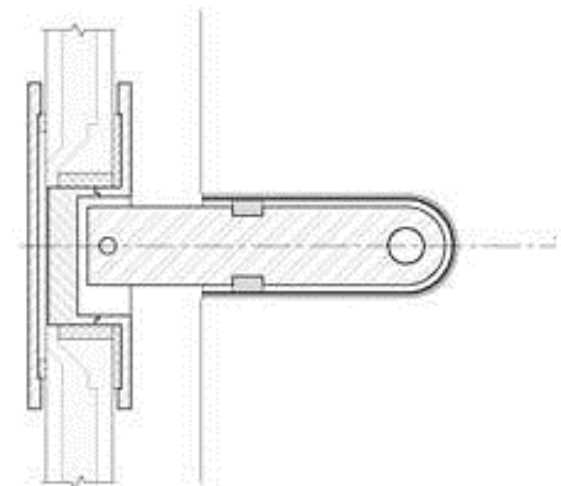
De vinnen zijn opgebouwd uit vijf lagen thermisch versterkt glas van 12mm dikte. De productie van deze buitenmatig grote glazen vinnen was echter enkel mogelijk door de 'splice lamination' techniek te gebruiken. Geen enkel van de vijf lagen loopt over de volledige lengte van 10 meter, maar bestaat uit twee ongelijke stukken (Afb. 6.5). Destijds was het thermisch harden van glas namelijk beperkt tot glaselementen van ca. 6m. De voegen tussen de verschillende glasplaten van één laag overlappen met doorlopende glasplaten van de naburige lagen, zodat er nergens twee voegen naast elkaar liggen. De vijf lagen werden zowel aan elkaar geschroefd als gelamineerd met SentryGlas®.



Afb. 6.5: Opbouw van een glazen vin. (© uit [1])

Het werd door Seele en Bischoff Glass Technologies (de glasleverancier) technisch haalbaar geacht om alle tien glasplaten van een vin samen te lamineren, maar dat vereiste dan wel een autoclaaf van een omvang die niet beschikbaar was binnen de glasindustrie. Seele en BGT hebben dit probleem opgelost door zich te bedienen van een autoclaaf die gebruikt wordt bij de fabricage van vliegtuigvleugels. Het principe om monolithische structurele glaselementen te maken door middel van 'splicing' en lamineren was niet nieuw, maar het bekomen formaat was ongezien. De glazen vinnen waren toen de grootste die ooit waren gemaakt.

De windbelasting op de wandpanelen wordt puntsgewijs overgedragen naar de glazen kolommen. Dat gebeurt aan de hand van pennen die bevestigd zijn aan de beugels waarin het glas vastgehouden wordt (Afb. 6.6). Deze montagepennen dienen verbonden te worden met een roestvrijstalen koppelstuk dat werd gelamineerd in de glazen vin. Daarmee wordt bedoeld dat het koppelstuk mee geïntegreerd werd in de glasopbouw van de vin. De middelste glasplaat van de vin werd hiervoor lokaal verkleind. Door verbindingstukken *in* een glazen element te lamineren, wordt het zicht minder verstoord in vergelijking met plaatachtige verbindingstukken die *op* het glas komen. De beugel zelf is wel duidelijk zichtbaar (Afb. 6.7).



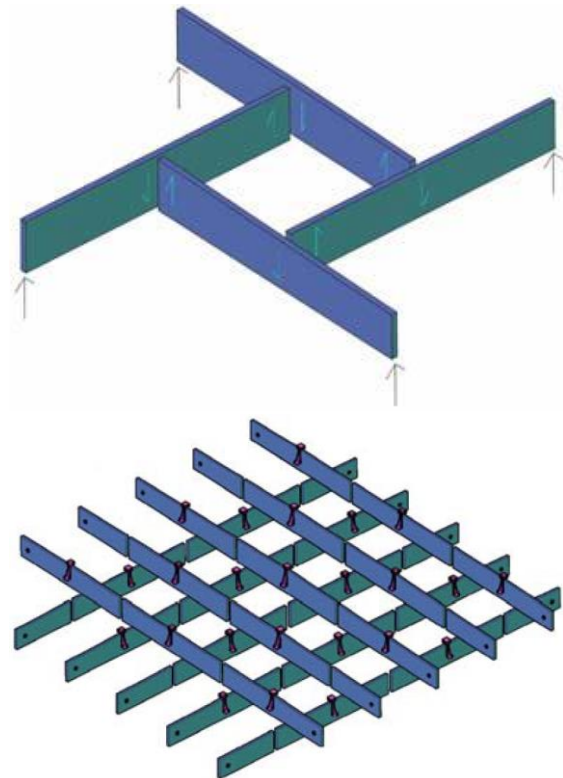
Afb. 6.6: Detail van de verbinding. De pen zit vastgeklemd in het ingebed koppelstuk. (© uit [1])



Afb. 6.7: Verbinding tussen gevelpanelen en vinnen. (© galinsky.com)

Het koppelstuk is lichtjes overgedimensioneerd zodat de ingevoegde beugel vrij kan draaien rond de montagepen om plaatsingstolerantie en differentiële beweging tussen de vin en het gevelglas mogelijk te maken. Om twee structurele glaselementen op deze manier te bevestigen, moet men kunnen vertrouwen op een heel stevig ingebed koppelstuk; het mag er niet gemakkelijk uit te trekken zijn. Dat werd mogelijk gemaakt door de onderdelen te lamineren met een ionomeer (SentryGlas®) in plaats van het toen gebruikelijke PVB. Dankzij de goede hechting (en grote sterkte en stijfheid) van deze tussenlaag heeft het koppelstuk een uittreksterkte die vergelijkbaar is met die van een volledig geschroefde verbinding.

De tien vinnen ondersteunen een rooster van kruisende glazen balken die de dakpanelen dragen. De glazen liggers overspannen niet de hele lengte in één keer, maar werden verdeeld in balksecties van ongeveer 3,3m. Ze zijn, net zoals de glazen vinnen, opgebouwd uit vijflaags gelamineerd glas. De balken zijn op een zodanige manier geschikt dat ze een rooster vormen waarbij ze elkaar ondersteunen en belastingen kunnen overbrengen tot de uiteinden van het grid. Elke balksectie wordt verbonden met een andere door middel van een pinverbinding, en de uiteinden van de buitenste balken worden verbonden met de bovenkant van de verticale vinnen, eveneens met een pinverbinding. Daar worden de reacties van de totale dakconstructie verzameld en doorgegeven (Afb. 6.9). Via het zogenaamd 'reciprocal frame' constructieprincipe (Afb. 6.8) was het mogelijk om met korte balken langere overspanningen te maken.



Afb. 6.8: Constructieprincipe van het dakrooster. (© uit [1])



Afb. 6.9: Constructie van het dak. (© uit [1])

Voor het dak werden 36 vierkante panelen met zijde 1,7m gebruikt. De dakpanelen bestaan uit twee lagen van 12mm thermisch versterkt glas, gelamineerd met PVB-tussenlaag. Deze panelen worden in elke hoek ondersteund door roestvrijstalen elementen die bevestigd zijn aan het koppelstuk eronder dat de dakbalken onderling verbindt. Voor een goede waterafvoering, werden er subtiele hellingen in het dak voorzien, in de vorm van een piramide. Dat betekende dat de bepaalde panelen langs hun diagonaal 'gevouwen' dienden te worden om de nok te kunnen maken. Deze gebogen glaspanelen werden gefabriceerd in Spanje door Cricursa.

De ondergrondse winkel en de glazen inkom werden ondertussen al tweemaal opnieuw gebouwd, in 2011 en in 2019. Bij beide nieuwe versies is de geometrische vorm van de zogenaamde 'Apple Cube' identiek gebleven. Vaak bieden innovaties uit het onderzoeksveld kansen voor nieuwe architectonische ontwikkelingen. Maar soms gaat het ook andersom en vertrekt een innovatie vanuit een architecturale wens. (Zie ook vraag 3 in DEEL II over de motor voor innovaties.) De visie van de bouwheer en ontwerpers stimuleren dan de industrie om het beter of anders te doen. Voor de renovatie van de Apple Store in Manhattan was dat het geval (Afb. 6.11). De vraag om veiligheidsglas in grotere formaten te leveren, kwam van Steve Jobs, oprichter van Apple Inc., en het ingenieurbureau Eckersley & O'Callaghan uit Londen, die het technisch ontwerp van de glazen inkom voor hun rekening nam. Het gebruiken van 'oversized' glaspanelen is namelijk dé manier om het ontwerp minimaal te houden, en zodoende de glazen constructie nog transparanter te maken. Zo weinig mogelijk naden die het zicht kunnen verstoren, dat was het verlangen van ontwerper en bouwheer.

Lange tijd waren de dimensies van veiligheidsglas beperkt tot de afmetingen van de klassieke autoclaven waarin de glasplaten gelamineerd worden. Door de sprong te maken naar het gebruik van veel grotere glaspanelen, werd met dit project uit 2011 een mijlpaal in het bouwen met glas bereikt. De originele glazen kubus (Afb. 6.10 links) had 106 panelen, 20 glazen vinnen en 250 verbindingstukken. Dat werd teruggebracht tot 15 panelen, 8 glazen vinnen en 40 verbindingstukken (Afb. 6.10 rechts). Elke gevel bestaat slechts uit drie panelen van 3,3 op 10,3m die over de hele hoogte lopen. Ook het ontwerp van het dak werd geminimaliseerd, van 36 naar slechts 3 glaspanelen. Ook de roosterstructuur van het dak werd vereenvoudigd naar vier glazen balken die de volledige lengte overspannen. Dat alles toont aan hoe snel de fabricagemogelijkheden voor veiligheidsglas en constructieglas (harden en lamineren) zijn geëvolueerd in slechts vijf jaar tijd. De vooruitgang in technieken vertaalt zich in een verbetering van de transparantie van de inkom van de Apple winkel. Deze twee aspecten zijn dus sterk gelinkt aan elkaar.



Afb. 6.10: Na vijf jaar werd de glazen kubus al gerenoveerd. Het volume bleef hetzelfde, maar het aantal glaselementen daalde drastisch. Links: De 'Apple Cube' uit 2006. (© en.wikiarquitectura.com). Rechts: De 'Apple Cube' uit 2011. (© Peter Aaron)



Afb. 6.11: De inkom van de Apple winkel voor het gebouw van General Motors, New York. (© Peter Aaron)

Alle nieuwe gevel- en dakpanelen bestaan uit drieluigend gelaagd veiligheidsglas met Sentry-Glas®-tussenlagen. De dakpanelen werden subtiel in twee richtingen koud gebogen voor de afvoer van regenwater. De stabiliteit van de constructie werd wederom verzekerd door de stijfheid van de zijwanden. Opnieuw werden inzetstukken (uit titanium) in de glasopbouw van de vinnen gelamineerd, maar ook de koppelstukken werden deze keer gelamineerd in de glasopbouw van de gevelpanelen (Afb. 6.12). De methode om met ingebedde verbindingen structurele glaselementen te connecteren, evolueerde snel in de vijf jaar tijd tussen de twee kubussen door hun toepassing in verschillende andere Apple winkels wereldwijd. Voor de glazen kubus uit 2011 werden de verbindingstukken verfijnd tot nog kleinere en volledig ingebedde elementen. Enkel de volledig glazen wenteltrap en de lift uit de originele versie uit 2006 werden behouden.



Afb. 6.12: Elke 'vleugel' van het verbindingstuk werd gelamineerd in de glasopbouw. (© Uit [5])

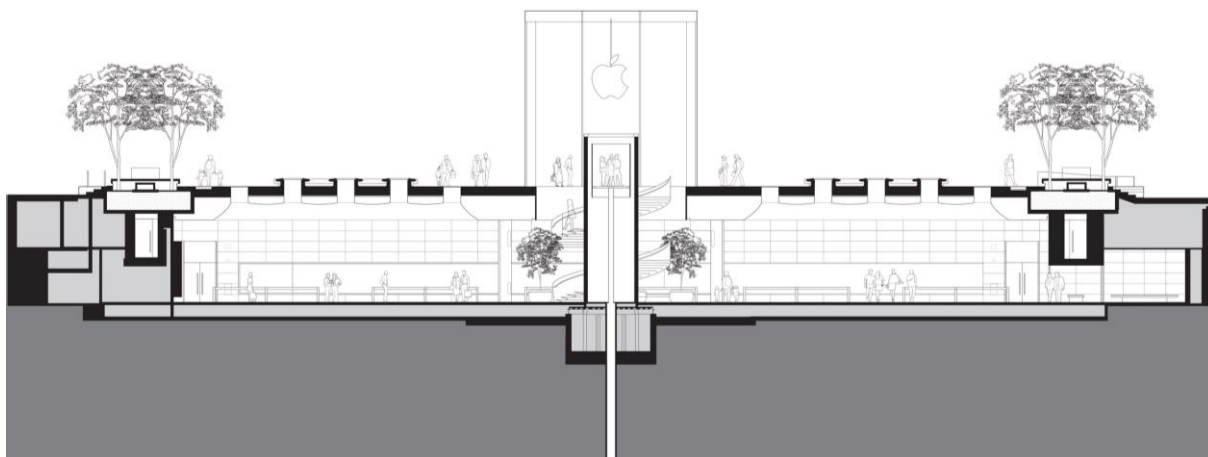
Het was vooral het ingenieurbureau Eckersley O'Callaghan dat de fabrikanten aanmoedigde om apparatuur te ontwikkelen die in staat is om veel grotere glaspanelen te kunnen harden en lamineren. Dankzij grotere autoclaven kunnen fabrikanten zoals Sedak (dochterbedrijf van Seele) tegenwoordig glas lamineren tot 20m lang en 3,6m breed (Afb. 6.13 en 6.14). Deze indrukwekkende 'oversized' laminaten zijn op de markt beschikbaar onder de merknaam Sedak GlasCobond®. Dankzij het gebruik van Sentry-Glas-tussenlagen en het 'vacuum bag'-principe als voorbereiding op het lamineren in de autoclaaf worden performante structurele glaslaminaaten bereikt. De mechanische eigenschappen zijn bijna gelijk aan die van monolithisch glas met dezelfde dikte. Bovendien resulteert dit proces in goed afgewerkte randen, een voordeel wanneer de randen van gelaagde glaspanelen blootgesteld worden aan weersomstandigheden.



Afb. 6.13: Grote autoclaven worden de laatste jaren ingezet in de glasindustrie, met Seele als pionier. (© Uit [8])



Afb. 6.14: Slechts enkele bedrijven in de wereld, waaronder Sedak, kunnen dergelijke formaten produceren. (© sedak.com)



Afb. 6.15: De derde versie van de Apple winkel op 5th Avenue. (© Foster+Partners. Uit [9])

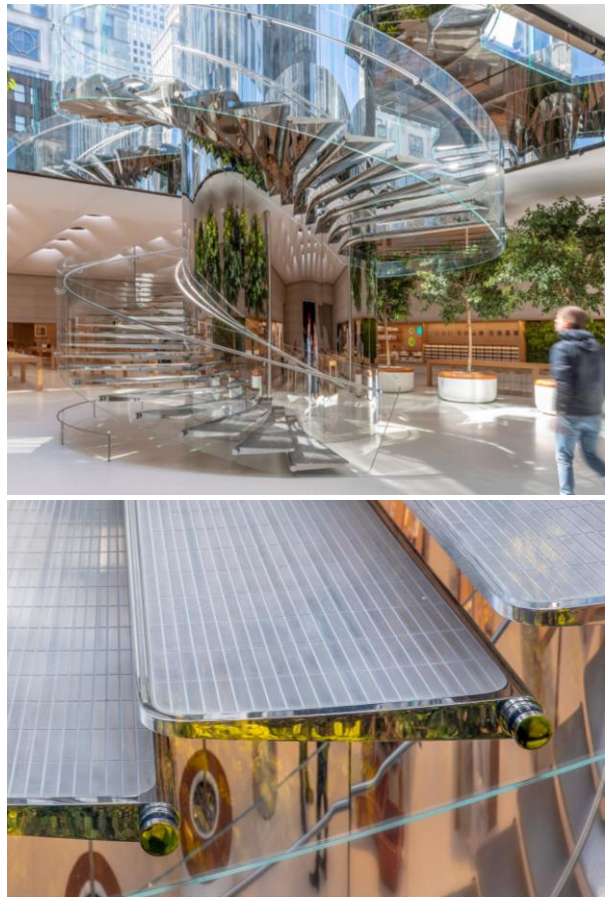
In 2019 werd de ondergrondse Apple winkel aan de 5th Avenue verbouwd. Het ontwerp kwam van het architectenbureau Foster+Partners (Afb. 6.15). De grootste interventie was het verlagen van de kelderverdieping om de winkel meer vrije hoogte te geven en om meer opslagruimte te creëren. Dat had als gevolg dat er ook een nieuwe trap en een nieuwe lift diende te worden geïnstalleerd om te kunnen aansluiten bij de nieuwe, diepere winkel. Bij het ontwerp van de nieuwe wenteltrap werd ervoor gekozen om de glazen treden en bordessen te vervangen door roestvrijstalen versies (Afb. 6.17). Een eventuele verklaring hiervoor is dat roestvrijstaal veel gebruikt wordt bij de nieuwe Apple-producten en dat het bedrijf dit materiaal mogelijk ook wou integreren in de nieuwe winkel. Bij het ontwerp was er alleszins een nauwe samenwerking tussen het architectenbureau en Jonathan Ive, voormalig Chief Design Officer bij Apple. Het principe van de leuning bleef wel overeind, namelijk gekromd chemisch gehard veiligheids-glas dat deels de belasting van de trap opneemt. Foster+Partners ontwierp ook een nieuw plein. Zo kwamen er onder meer 80 dakramen, strak geschikt in een raster op het plein, die de winkel van een overvloed aan natuurlijk licht voorzien.

Om de bouw van de nieuwe winkel mogelijk te maken, diende de glazen kubus afgebroken te worden en opnieuw te worden opgebouwd. Deze bleef evenwel precies zoals hij was, met vijftien glasplaten, acht glazen vinnen en vier glazen balken die het dak dragen.

Opnieuw werd gevelbouwspecialist Seele aangesteld om de volledig glazen omhulling met een totale oppervlakte van 500m² te realiseren. Vanwege een strakke planning moest de 'Apple Cube 3.0' vóór de plaatsing van de trap worden gebouwd. Daartoe werd het middelste dakpaneel pas als laatste geïnstalleerd, om nog een opening te hebben waardoor de trommel van de trap kon worden neergelaten. Er was slechts ongeveer 7cm vrije ruimte aan alle kanten, dus het installeren van de trapkoker diende met grote nauwkeurigheid te gebeuren (Afb. 6.16).



Afb. 6.16: Installatie van de trapkoker. (© Uit [10])



Afb. 6.17: Links: De volledig glazen (gepatenteerde) wenteltrap die gebruikt werd bij de twee eerste versies van de winkel (2006 en 2011). (© Peter Aaron). Rechts: De nieuwe wenteltrap met stalen treden en weerspiegelende liftkoker, naar het ontwerp van Foster+Partners. (© Aaron Hargreaves)

In zijn slechts vijftienjarige bestaan, heeft de Apple winkel in Manhattan al een opmerkelijke geschiedenis achter de rug. Het gebouw werd continu aangepast om blijvend geassocieerd te worden met de strategie van het bedrijf, namelijk het streven naar een hoogtechnologische elegantie op alle niveaus. Deze winkel is bovendien geen uitzondering en past in het geheel van alle Apple winkels wereldwijd. Zo heeft Foster+Partners in Milaan het jaar ervoor (2018) ook een inkom voor een winkel van Apple volledig uit glas gerealiseerd (Afb. 6.18). Heel vaak is glas prominent aanwezig bij de ontwerpen van de Apple winkels. Het materiaal wordt aangewend om de 'state of the art' te tonen en een 'wow-gevoel' op te wekken. De 'Apple Store' is herkenbaar en is haast een archetype geworden van de hedendaagse glasarchitectuur.



Afb. 6.18: Apple winkel in Milaan uit 2018, ontworpen door Foster+Partners en EOC. (© Foster+Partners)

Referenties APPLE WINKEL FIFTH AVENUE

TEKST

- **[1]** O'Callaghan, J., & Coult, G. (2008). An All Glass Cube in New York City. *Structures Congress 2008*, 1–6. [https://doi.org/10.1061/41016\(314\)74](https://doi.org/10.1061/41016(314)74)
- **[2]:** Kassnel-Henneberg, Pölzl B. *Innovative Processes in the All-Glass Sector*. Uit het boek: Behling, S., Brensing, C., Fuchs, A., & Ingenhoven, C. (2013). *Innovative Design and Construction*. Uitgever: Walter de Gruyter. ISBN: 3955531716, 9783955531713
- **[3]** Doulkari, K. (2013). *The Transparent Facade of the Future. Design strategies for maximizing transparency with self-supporting glass facade systems*. TU Delft. Promotoren: Dr. Ing. Tillmann Klein, Prof. ir. Rob Nijse en Dr. ir. Fred A. Veer.
- **[4]** Bohlin Cywinski Jackson. *Apple Store, Fifth Avenue, New York*. Geraadpleegd van <https://www.bcj.com/projects/apple-store-fifth-avenue-new-york>
- **[5]** Eckersley O'Callaghan Engineers. *Apple Fifth Avenue Mark II*. Geraadpleegd van <https://www.eocengineers.com/en/projects/apple-fifth-avenue-mark-ii-100>
- **[6]** Vinnitskaya, I. (2011, 15 augustus). *Apple Reveals Plans for Fifth Avenue Cube*. Geraadpleegd op 24 mei 2020, van <https://www.archdaily.com/160138/apple-reveals-plans-for-fifth-avenue-cube/>
- **[7]** Sedak. *Apple Cube, 5th Ave, New York. Realization of visions*. Geraadpleegd van <https://www.sedak.com/en/applications/architecture>
- **[8]** Mara, F. (2013, 20 maart). *Cladding & Curtain Walling. Architect's Journal*. Geraadpleegd van <https://www.architectsjournal.co.uk/buildings/specification/cladding-and-curtain-walling/8644419.article>
- **[9]** Cogley, B. (2019, 26 september). *Foster + Partners restores "iconic" glass Apple Fifth Avenue*. Geraadpleegd van <https://www.dezeen.com/2019/09/26/apple-fifth-avenue-foster-partners-new-york/>
- **[10]** Seele. *Apple Retail Store 5th Avenue New York*. Geraadpleegd van <https://seele.com/references/apple-retail-store-5th-avenue-new-york>
- **[11]** Sedak GmbH & Co. KG. *Production skills*. (2020, 16 maart). Geraadpleegd van https://www.sedak.com/fileadmin/user_upload/pdf/Deutsch/Fertigungskompetenzen/20200316_production_capabilities_interlay_EN.pdf

AFBEELDINGEN

- **Afb. 6.1, 6.2, 6.10 Links:** Geraadpleegd van <https://en.wikiarquitectura.com/building/apple-store-fifth-avenue/#>
- **Afb. 6.3:** Geraadpleegd van <https://architizer.com/projects/apple-store-fifth-avenue/>
- **Afb. 6.4:** Uit [7]
- **Afb. 6.5, 6.6, 6.8, 6.9:** Uit [1]

- **Afb. 6.7:** Geraadpleegd van <http://www.galinsky.com/buildings/applefifthavenue/>
- **Afb. 6.10 Rechts, 6.11, 6.17 Links:** © Peter Aaron. Uit [4]
- **Afb. 6.12:** Uit [5]
- **Afb. 6.13:** Uit [8]. Geraadpleegd van [https://www.architectsjournal.co.uk/pictures/980x653fitpad\[31\]/1/3/6/1325136_seele_Autoclave.jpg](https://www.architectsjournal.co.uk/pictures/980x653fitpad[31]/1/3/6/1325136_seele_Autoclave.jpg)
- **Afb. 6.14:** Geraadpleegd van <https://www.sedak.com/en/skills/laminating/>
- **Afb. 6.15:** © Foster+Partners. Uit [9]
- **Afb. 6.16:** Uit [10]
- **Afb. 6.17 Rechts:** © Aaron Hargreaves. Uit [9]
- **Afb. 6.18:** Geraadpleegd van <https://www.fosterandpartners.com/projects/apple-piazza-liberty/>

6.2 GLAZEN BEHUIZING VOOR HISTORISCHE VATEN

- BLUM & SCHULTZE • Dresden, Duitsland

bouw: 2009



Afb. 6.19: Het glaspaviljoen voor historische drukvaten in Dresden, ontworpen door Blum & Schultze Architecten.
(© unnewehr-packbauer)

Voor de hoofdingang van het Leibniz Institute for Solid State and Material Research in Dresden (Duitsland) staat sinds 2009 een volledig glazen behuizing (Afb. 6.19). De tien cilindrische drukvaten en het toevoercircuit die deels zichtbaar zijn, zijn een onderdeel van een grotere installatie om helium vloeibaar te maken. Vloeibaar helium wordt door het instituut gebruikt bij onderzoek naar supergeleiders en magnetische materialen. Het grootste deel van de zes meter hoge vaten bevindt zich ondergronds in een betonnen kuip (Afb. 6.20 links). De historische ruwe staalvaten zijn van grote waarde en het was de wens van de klant om deze objecten in de kijker te plaatsen. Daaruit volgde het idee om een zo transparant mogelijke schil te maken die deze

vaten tentoonstelt en beschermt. Een glazen behuizing werd gemonteerd bovenop het uitstekend deel van de betonnen bak. Het ontwerp komt van Blum & Schultze Architecten uit Dresden.

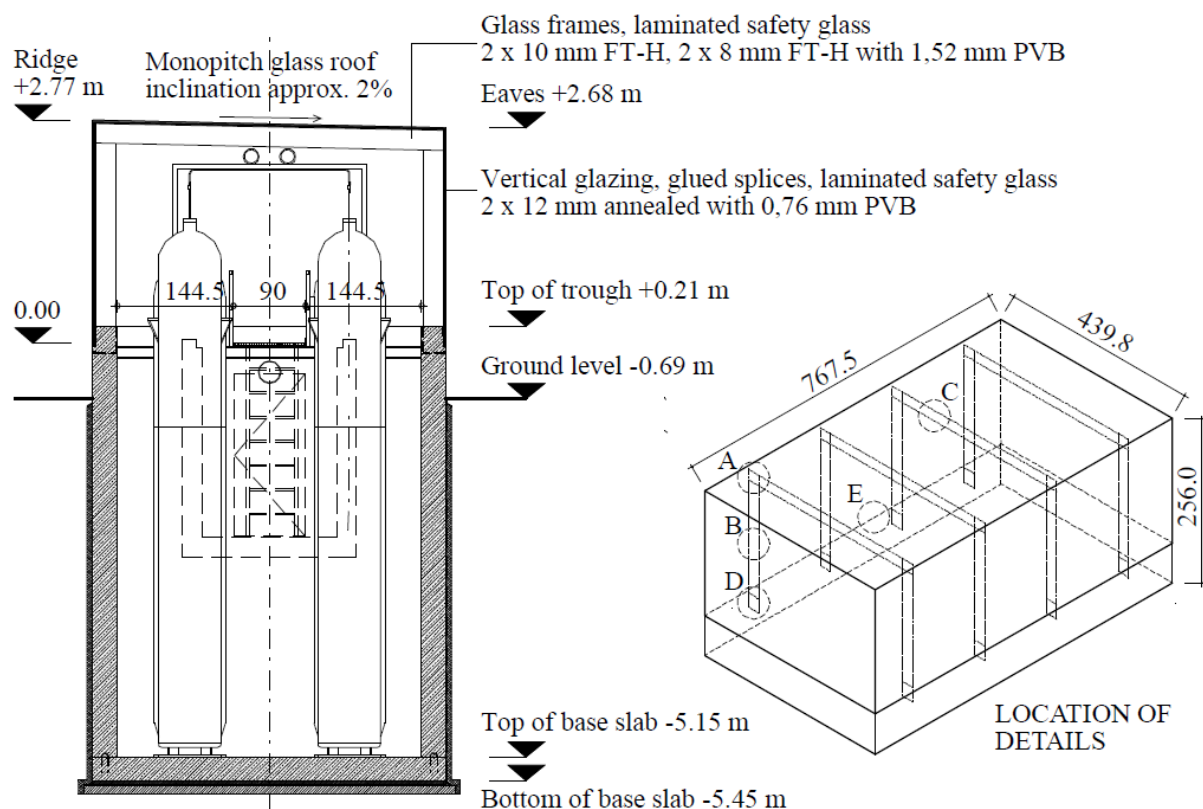
Het unieke aan het project is dat alle glazen componenten (kolommen, liggers, gevel- en dakpanelen) onderling verbonden zijn zonder dat er één metaal element aan te pas kwam. Er werd enkel structurele silicone en transparante structurele lijm gebruikt. Nergens zijn er bouten of klemmen die het zicht verstoren. Bovendien is het interieur van de glazen overkapping niet toegankelijk voor het publiek en daarvoor was er geen nood aan een onderbreking in de gevel voor een deur.

De glazen structuur is ongeveer 7,7m lang op 4,4m breed en 2,5m hoog. Vier portieken uit glas werden geplaatst met een tussenafstand van 1,9m en deze dragen de glazen gevelpanelen en het glazen dak (Afb. 6.20 rechts). De portieken zorgen voor de stabiliteit bij zijdelingse krachten op de grote zijkanten. Bij belasting op het vlak van een korte zijde, neemt de grote laterale beglazing de rol van 'windverband' op. De gevel is dus een onderdeel van het gehele structurele systeem.

De volledige schil bestaat uit veiligheidsglas van twee (ongeharde) glasplaten met 12mm dikte, gelamineerd door PVB (Afb. 6.21). De wand van elke zijde van het gebouw bestaat uit één glaspaneel. Voor de grootste zijkanten werden er dus glaspanelen van bijna acht meter lang

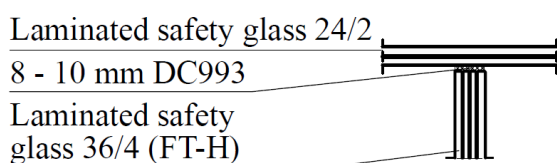
gefabriceerd, beduidend groter dan de standaardafmetingen van vlakglas. De beglazing van het in één richting hellend dak is echter verdeeld in drie elementen.

De verticale beglazing moet voorkomen dat mensen in de betonnen kuip vallen. Daarom werd de slagvastheid van deze panelen geanalyseerd. Zoiets gebeurt gebruikelijk aan de hand van een 'pendulum test'. Voor dit project werd deze proef echter via een computerprogramma gesimuleerd. Een simulatie van de impact van een slinger op een bepaald glaspaneel levert achteraf meer gegevens op om een diepgaandere beoordeling te maken. Bovendien biedt het ook een economisch voordeel, gezien er geen model op ware grootte dient gemaakt te worden.

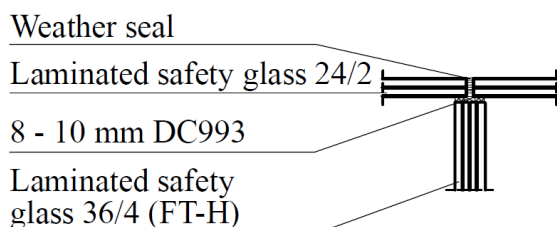


Afb. 6.20: Links: Dwarsdoorsnede van het hele gebouw. Rechts: isometrie van de volledig glazen behuizing, met aanduidingen van welke bouwknopen er detailtekeningen werden gemaakt. (© Blum & Schultze Architekten)

DETAIL B



DETAIL C



Afb. 6.21: Detail B: Aansluiting van de verticale beglazing met de kolom van een glasportiek. Detail C: Aansluiting van de dakpanelen met de ligger van een glasportiek. (© Blum & Schultze Architekten)

GSK (Glas Statik Konstruktion) uit Dresden is het ingenieursbureau dat verantwoordelijk was voor het ontwerp en de berekeningen van het constructief glas. Elk onderdeel van een portiek (kolom of ligger) bestaat uit veiligheidsglas van vier lagen, gelamineerd met PVB-tussenlagen. De twee buitenste glaslagen zijn 10mm dik, de twee binnenste 8mm (Afb. 6.21). Elke laag is gehard en onderging een heat-soak procedé.

Een heat-soak procedé wordt uitgevoerd bij thermisch gehard glas voordat het als constructief onderdeel zal worden ingezet. Soms zit er namelijk een minuscuul deeltje nikkelsulfide (meestal niet zomaar zichtbaar met het blote oog) ingesloten in een glasplaat. Bij bepaalde temperaturomstandigheden kan dit deeltje overgaan naar een andere fase, wat gepaard gaat met een uitzetting. Wanneer de nikkelsulfide zich in de trekzone van de doorsnede van het geharde glas bevindt (i.e. nabij het midden van de doorsnede), kan de volumevermeerdering van het deeltje problematisch worden en tot schijnbaar spontane breuk van het glas leiden (Afb. 6.22). Dat kan gevaarlijk zijn wanneer het glas lasten moet dragen en overbrengen.

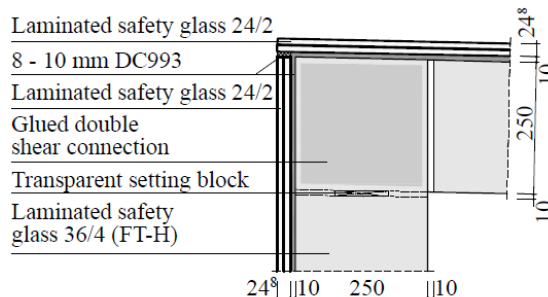
Bij een heat-soak procedé worden thermisch geharde glasplaten in een heat-soak oven geplaatst. Deze oven simuleert de omstandigheden waarbij een nikkelsulfidedeeltje van fase verandert. Breekt een glaspaneel tijdens de test, dan bevatte het een dergelijk kritiek deeltje. Breken er geen panelen, dan is het meer betrouwbaar om ze in te zetten als dragende elementen, hoewel er nooit 100% uitsluitel kan gegarandeerd worden na het 'heat-soaken'.



Afb. 6.22: Typisch breukpatroon van breuk door de uitzetting van een nikkelsulfidedeeltje. (© Bear Glass Blog)

Op de hoek van een portiek overlappen de buitenste glaslagen van de kolommen met de twee binnenste glaslagen van de liggers (Afb. 6.23). In de twee vlakke voegen die hierdoor ontstaan, werd een transparante acrylaatlijm aangebracht om de kolom en de ligger met elkaar te verbinden. De dikte van de lijmvverbinding wordt bepaald door de dikte van de PVB-tussenlaag, in dit geval 1,9mm. De lijm werd aangebracht met behulp van een lange platte spuitmond die tussen de smalle opening paste (Afb. 6.24 links).

DETAIL A



Afb. 6.23: Detail A: Hoek van een glasportiek. (© Blum & Schultze Architekten)

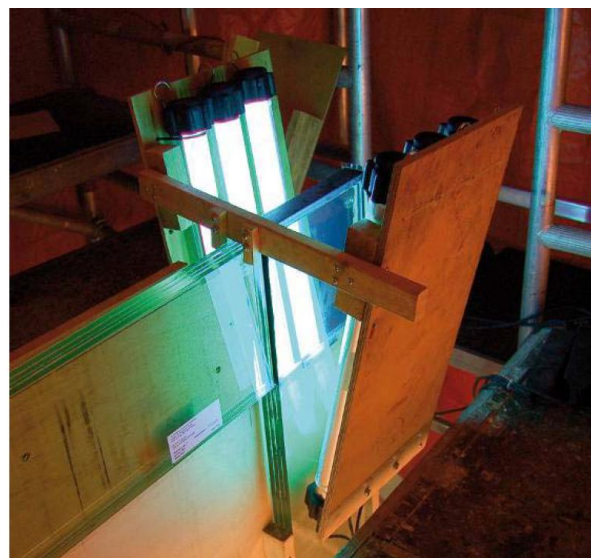
Het verlijmen van glasonderdelen heeft voordelen tegenover geklemde of boutverbindingen. Het biedt de mogelijkheid om een meer homogeen verspreide belastingoverdracht te verkrijgen tussen twee glascomponenten. Dat resulteert in een aanzienlijke vermindering van lokale spanningspieken in het glas, die wel aanwezig zijn bij boutverbindingen. Daarbij wordt de belasting overgedragen ter hoogte van de zwakste plek van de glasplaat, namelijk bij de randen van de gaten die geboord werden. Thermisch gehard glas is dan ook vaak vereist bij boutverbindingen. Bij gelijmde verbindingen dienen er geen gaten geboord te worden, waardoor niet altijd gehard glas vereist is.

De gekozen acrylaatlijm komt van de fabrikant DELO Industrial Adhesives, zoals deze die werd gebruikt bij de verlijming van de glasblokken van Crystal Houses in Amsterdam. Acrylaatlijmen worden vaker gebruikt bij punt- of lineaire verbindingen. In dit project diende de lijm aangebracht te worden in grote vlakke voegen, en dat bracht uitdagingen met zich mee.

Eenzijds diende het nauwkeurig aangebracht te worden zonder dat er luchtballen ingesloten werden. Ook nadien, tijdens het uithardingsproces, kunnen luchtballen een probleem vormen.

Dat komt omdat de lijm krimpt bij het uitharden, en een afname in volume leidt tot het aanzuigen van lucht in de voeg. Oneffenheden en luchtballen verzwakken de verbinding, dus zo iets wordt liever vermeden. Verschillende tests werden uitgevoerd om de aanpak van het lijmen te kunnen bepalen. Het krimpgedrag kon enigszins worden tegengegaan door de uitharding in tussenpozen te laten gebeuren. Ook werd er extra lijm aangebracht langs de randen tijdens het uithardingsproces. Na testen werd er bijvoorbeeld ook beslist om de glaselementen op te warmen omdat dit de vloeibaarheid van de lijm verbeterde.

Anderzijds is het een uitdaging om een homogene uitharding te bereiken van dergelijke relatief grote hoeveelheid lijm. Een gelijkmatige uitharding is belangrijk voor zowel de visuele als de structurele eigenschappen van de verbinding. De gekozen lijm hardt uit door middel van UV-straling, maar ook deels door zichtbaar licht. Daarom gebeurde de productie van de portieken in gecontroleerde omstandigheden en werden de hoeken van de portiek afgedekt. Dat verminderde het risico op een ongecontroleerde uitharding door daglicht (Afb. 6.24 rechts).

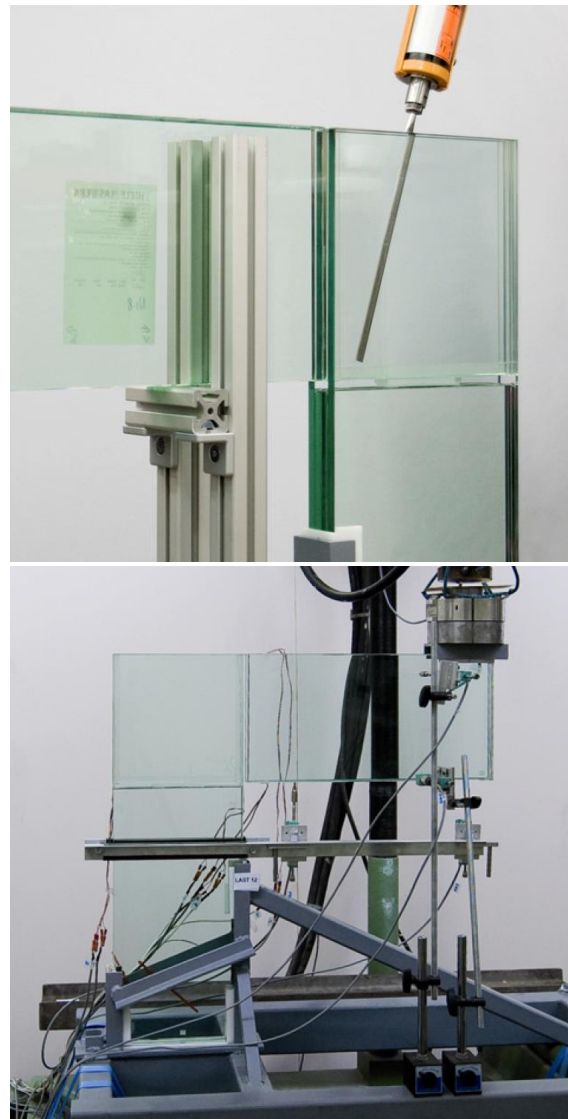


Afb. 6.24: Fabricage van de lijmverbinding. Links: Aanbrengen van lijm. Rechts: Uitharden met UV-licht. (© uit [2])

Naast de nefaste invloed van vocht, is de sterkte van acrylaten ook afhankelijk van de temperatuur. Dit maakt dat acrylaatlijmen niet altijd helemaal betrouwbaar zijn in buitenomstandigheden. Een siliconen verlijming daarentegen blijft bijvoorbeeld veel constanter bij verschillende temperaturen. Bij een hoge temperatuur zal de acrylaatlijm minder sterk en stijf zijn. Dat beïnvloedt de flexibiliteit van de verlijmde hoekverbindingen. Daarom werd er beslist om bij elke hoek een transparant blokje uit kunststof te ontwerpen dat de verticale belasting kan dragen en overbrengen, in het geval de lijm zou falen. Bovendien verhindert het blok het kruipgedrag van de verbinding (i.e. toename van de vervorming in de tijd, bij een gelijkblijvende spanning), hetgeen anders bij te grote vervormingen zou kunnen leiden tot ongewenst glas-glascontact.

Om van de bouwautoriteit in Duitsland een goedkeuring te krijgen voor het constructief principe van de verlijmde portiekhoeken dienden er verschillende tests uitgevoerd te worden. Er werden onder andere tests gedaan naar het draagvermogen en naar de hechting van (kunstmatig) verouderde glasmonsters. Gelukkig kon er heel wat tijd bespaard worden dankzij kennis uit eerder uitgebreide onderzoek van glasmetaalverbindingen met acrylaatlijmen. De afmetingen (en de glasopbouw) van de proefopstelling weerspiegelden die van het hoekdetail zoals het in het effectieve ontwerp zou uitgevoerd worden (Afb. 6.25). De belasting die op het einde van het liggersegment werd aangebracht was het equivalent van het kritieke moment dat in werkelijk zou kunnen plaatsvinden op de hoek. De belasting werd stapsgewijs opgevoerd tot driemaal de karakteristieke ontwerpbelasting. Alle zes de geteste opstellingen doorstonden deze belasting zonder enige breuk van de lijmverbinding of het glas.

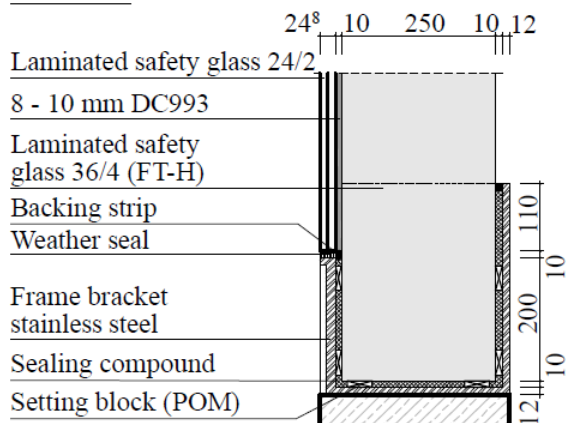
Bij verdere tests op de gelijmde portiekhoeken bleek dat de lijmverbinding intact bleef terwijl het glas faalde. Wanneer de verbinding sterker is dan het glas zelf, is dat de meest veilige wijze van falen, gezien de glassterkte verondersteld gekend is. Via berekeningen kan dan het ontwerp vastgelegd worden.



Afb. 6.25: Boven: Aanbrengen van de lijm op het proefstuk met behulp van het lange vlakke mondstuk. Onder: proefopstelling voor de verificatie van het draagvermogen. (© uit [1])

De vier geprefabriceerde portieken werden als eerste op de bouwplaats geïnstalleerd (Afb. 6.27 boven). Acht roestvrijstalen U-vormige beugels werden daartoe eerst bovenop de betonnen kuip gemonteerd. Daarin werden de 'poten' van de glasportieken vastgeklemd (Afb. 6.26). Stelblokjes zorgden ervoor dat de portieken op hun exacte plaats konden gezet worden. De blokjes zorgen er ook voor dat het glas niet rechtstreeks het staal raakt. De voeg tussen glasportiek en stalen beugel werd afgedicht met een kit.

DETAIL D



Afb. 6.26: Detail D: Verankering van de glasportieken aan de betonnen kuip. (© Blum & Schultze Architekten)

Na de montage van de portieken, werden alle gevel- en dakpanelen bevestigd. Vanwege de grote dimensies van de panelen was de handling ervan en het verbinden met de portieken een uitdagende taak (Afb. 6.27 onder). De glaspanelen werden over de volle lengte aan de portieken vastgelijmd door gebruik te maken van structurele silicone. De kleinere zijkanten werden met dezelfde silicone rond hun volledige perimeter structureel verlijmd aan de andere zijpanelen (Afb. 6.28).



Afb. 6.27: Boven: Montage van de glazen portieken. Onder: Installatie van de grote zijpanelen. (© uit [1])



Afb. 6.28: Het eindresultaat. (© unnewehr-packbauer)

Referenties GLAZEN BEHUIZING VOOR HISTORISCHE VATEN

TEKST

- **[1]** Weller B., Nicklisch F., Prautzsch V., Döbbel F., & Rücker S. (2010, 20 mei). *All Glass Enclosure with Transparently Bonded Glass Frames*. 205–214. Uit: Bos, Louter, Veer (Eds.). *Challenging Glass 2 – Conference on Architectural and Structural Applications*. TU Delft. ISBN 978-90-8570-524-6. <https://journals.open.tudelft.nl/cgc/article/view/2319>
- **[2]** Weller, B., & Nicklisch, F. (2010). Bonding of Glass - Latest Trends and Research. *Structures Congress 2010*. [https://doi.org/10.1061/41130\(369\)229](https://doi.org/10.1061/41130(369)229)
- **[3]** Belis, J. (2018). *Glass Structures*. (Academiejaar 2018–2019). E044630. Universiteit Gent

AFBEELDINGEN

- **Afb. 6.19, 6.28:** Geraadpleegd van <https://unnewehr-packbauer.com/architekturfotografie/geklebte-ganzglaskonstruktion-ifw-dresden>
- **Afb. 6.20, 6.21, 6.23, 6.26:** © Blum & Schultze Architekten. Uit [1]
- **Afb. 6.22:** Geraadpleegd van <http://bearglassblog.com/factors-influencing-annealing-glass-breakages/>
- **Afb. 6.24:** Uit [2]
- **Afb. 6.25, 6.27:** Uit [1]

6.3 MUSEUM ATELIER AUDEMARS PIGUET

- BIG • Le Brassus, Zwitserland

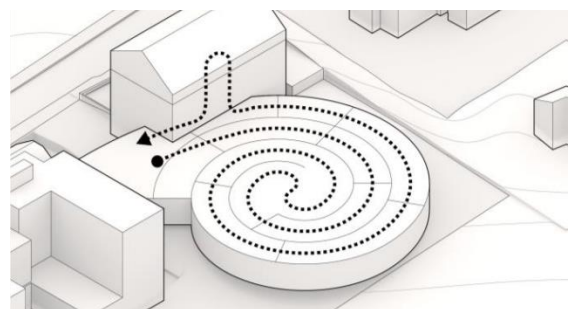
bouw: 2017 - 2020



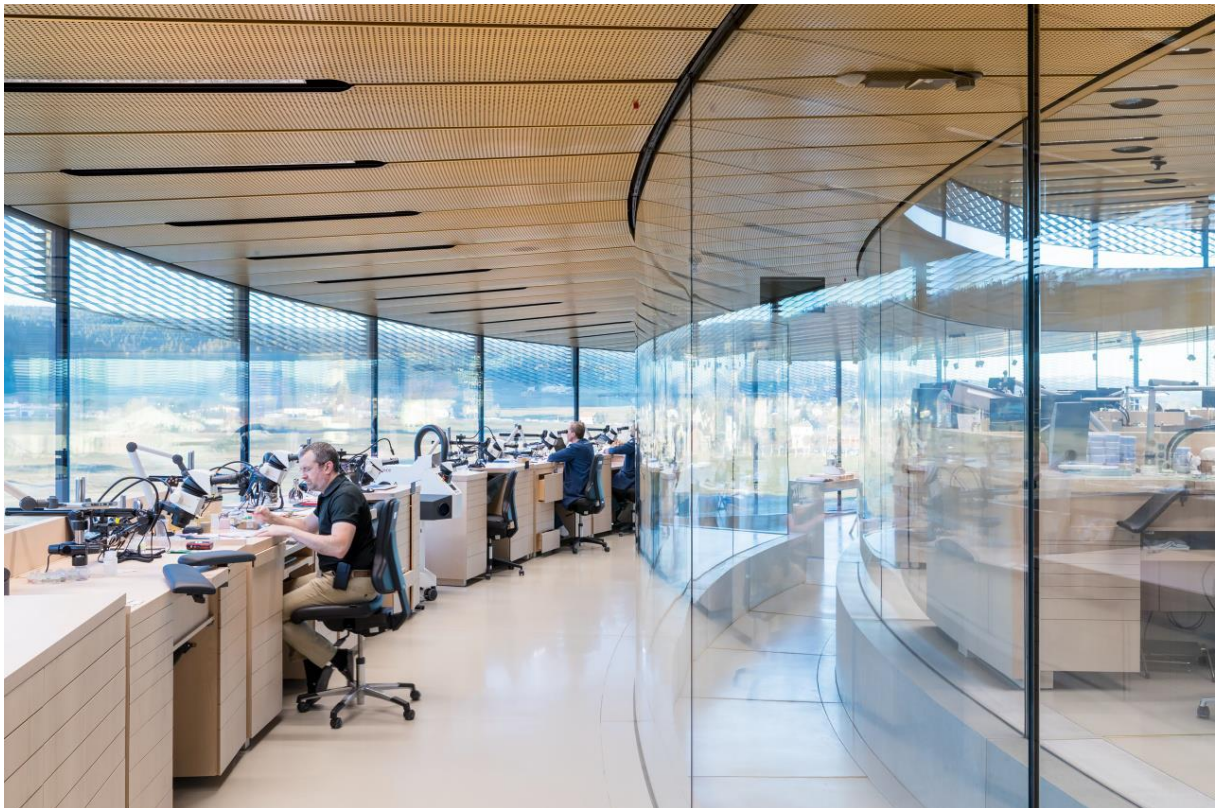
Afb. 6.29: Het museum 'Atelier Audemars Piguet', ontworpen door Bjarke Ingels Group, is mooi ingewerkt in de glooiing van het lokale landschap. (© Iwan Baan)

Dit jaar (2020) werd de nieuwe uitbreiding voor het museum 'La Maison des Fondateurs' voltooid (Afb. 6.29 en 6.43). Het project ligt in Le Brassus, Zwitserland en is de thuisbasis van het Zwitserse luxe horlogemerkt Audemars Piguet. De inspiratiebron voor het ontwerp van het nieuwe deel genaamd 'Le Musée Atelier Audemars Piguet', was dan ook de mechanica van een horloge, wat leidde tot een dubbel spiraalvormig gebouw. Het ontwerp komt van BIG (Bjarke Ingels Group) uit Denemarken en werd gerealiseerd met de hulp van het lokale architectenbureau CCHE. De 'in elkaar grijpende' spiralen en een nieuwe hal langs de straatkant, bevinden zich tussen de historische gebouwen van het bedrijf die voorheen al gedeeltelijk als een museum werden ingezet. Onder het spiraalvormige gebouw met een diameter van ca. dertig

meter, bevindt zich een kelderverdieping die dienst doet als parkeergarage, archief- en technische ruimte. De bezoekers worden geleid naar het hart van de spiraal en komen via de tweede spiraal uiteindelijk terug uit bij het originele Audemars Piguet gebouw (Afb. 6.30). Langs deze route is er een opeenvolging van tentoonstellingsruimten, winkels en 'workshops' waarin medewerkers van het bedrijf aan het werk zijn (Afb. 6.31).



Afb. 6.30: De museumroute. (© Lüchinger Meyer)

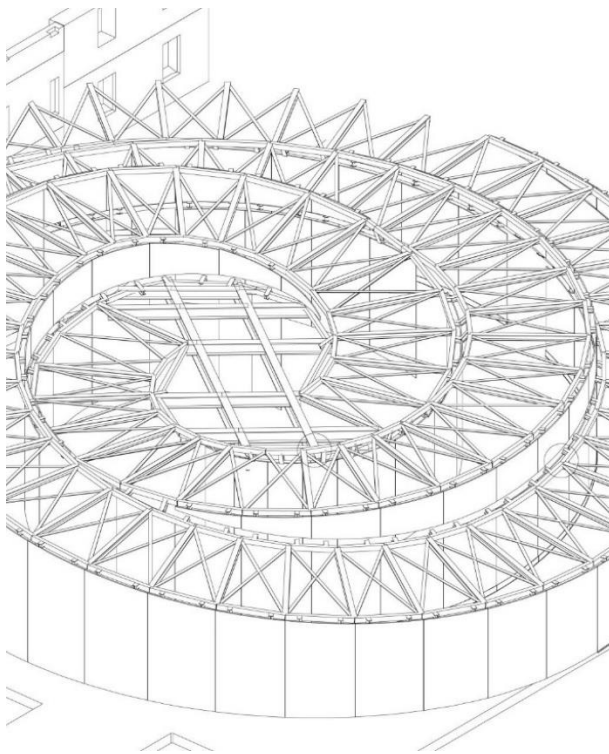


Afb. 6.31: De nieuwe werkplekken voor de horlogemakers. (© Iwan Baan)



Afb. 6.32: Het interieur van het museum toont een analogie met het radarwerk van een horloge. (© Iwan Baan)

Het was de wens van de bouwheer en de architecten om een heel transparant gebouw te realiseren. Het paviljoen heeft daarom geen enkele volle muur en is kolomvrij (Afb. 6.32). Dat werd mogelijk gemaakt door de gebogen gevel uit isolatieglas, evenals de gebogen glazen binnenwanden, in te zetten als dragende structuur van het gebouw. Alle verticale en horizontale belastingen worden volledig door de glazen panelen naar de onderliggende betonstructuur van de kelder overgebracht, waardoor massieve kolommen en wanden overbodig werden. De afstand tussen twee glazen wanden is 4,7 meter; dat zijn relatief kleine overspanningen en daardoor kon er een lichte stalen dakconstructie worden ontworpen. Enkel in het midden van de spiraal was er een zwaardere staalconstructie vereist voor een overspanning van ongeveer 13 meter (Afb. 6.33). Alle stalen liggers brengen het gewicht van de dakopbouw over op de 140 glaspanelen. De breedte van de gebogen glaspanelen is 2,46m en de hoogte varieert van een halve meter tot ongeveer zes meter.



Afb. 6.33: Isometrie van de structuur. In het midden is er een zwaardere constructie. (© Lüchinger Meyer)

De IGU's moeten als een performante isolerende schil functioneren, aangezien de temperaturen lager dan -20°C kunnen gaan in Le Brassus. Er werd vooropgesteld om minimaal aan het Minergie-label te voldoen. Minergie is een Zwitsers label dat de energie-efficiëntie beoordeelt, maar ook aandacht besteedt aan het gebruikerscomfort. Daarom werd er gekozen om drievoudig isolatieglas (dus met twee spouwen) toe te passen. Zo werd er een U-waarde van $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ bereikt. De lage U-waarde, in combinatie met verwarmingselementen onder de beglazing, moet zorgen voor het comfort van de horlogemakers en bezoekers. Bovendien werden de grote glasoppervlakken enigszins gecompenseerd door de sterk geïsoleerde groendaken. Een low-e coating (die resulteerde in een lage g-waarde van 23%) en zonneweringen moeten oververhitting tijdens de warmere seizoenen voorkomen (Afb. 6.34). Daarnaast werd er van de glasunits ook hoogwaardige optische prestaties verwacht. Eén van de beslissingen om dat resultaat te verkrijgen was de keuze van de low-e coating. Soms is er namelijk sprake van een licht 'spiegeleffect' van een coating, wat hinderlijk is voor de transparantie. Er werd daarom gekozen voor SunGuard® SNX 60 van Guardian Glass; deze heeft een transparantere kleur en creëert minder reflectie dan sommige andere gelijkaardige coatings.



Afb. 6.34: De zonneweringen doen hun job. (© Giovanni Emilio Galanello)

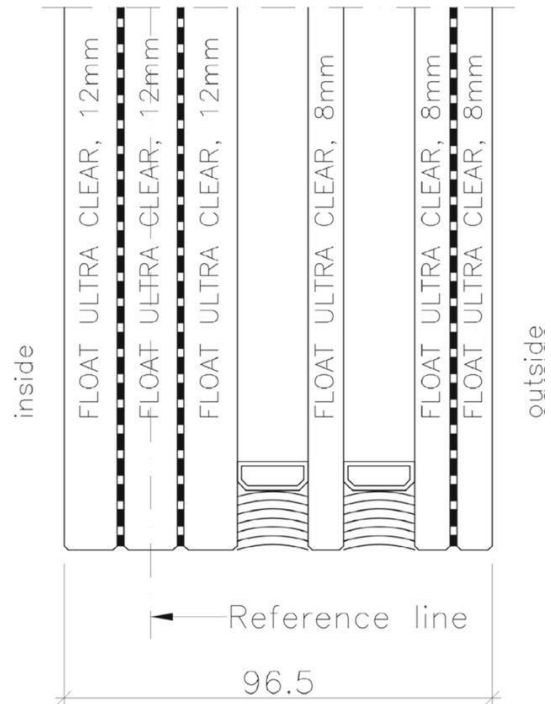
Het middelste paneel van de IGU is een enkelvoudige glasplaat van 8mm uitgegloeid glas (Afb. 6.36). Omdat het buitenste paneel de windbelastingen (druk en trek) moet kunnen opnemen, en ook vanwege de veiligheid, werd voor deze laag een gelaagd glaspaneel gebruikt (2 x 8mm uitgegloeid glas). Er werd beslist om de binnenste laag van de IGU als constructief element te ontwerpen. Dit deel moet grote lasten kunnen weerstaan: naast het eigen gewicht van de dakconstructie, diende er ook rekening gehouden te worden met grote wind- en sneeuwbelastingen. Het specifieke gebied van het project kent namelijk een extreme sneeuwval, gaande tot belastingen van 10kN/m² (een ton per vierkante meter). Een glasopbouw van drie lagen van 12mm uitgegloeid glas, gelamineerd met SentryGlas®-tussenlagen, kreeg de voorkeur (Afb. 6.35 en 6.36). Een ionomeertussenlaag is sterker en stijver dan PVB, maar ook iets transparanter, wat in dit project een argument was bij de keuze.

Het concept van de constructieve glazen scheidingswanden binnenin is exact hetzelfde, namelijk een laminaat bestaande uit drie lagen van 12mm uitgegloeid glas, gelamineerd met SentryGlas®-tussenlagen (Afb. 6.37). Voor binnenwanden die zich meer in het centrum van de spiraal bevinden, werd de glasopbouw echter aangepast. Door de grotere lasten in het midden van het gebouw, was er nood aan vijf lagen 12mm uitgegloeid glas.

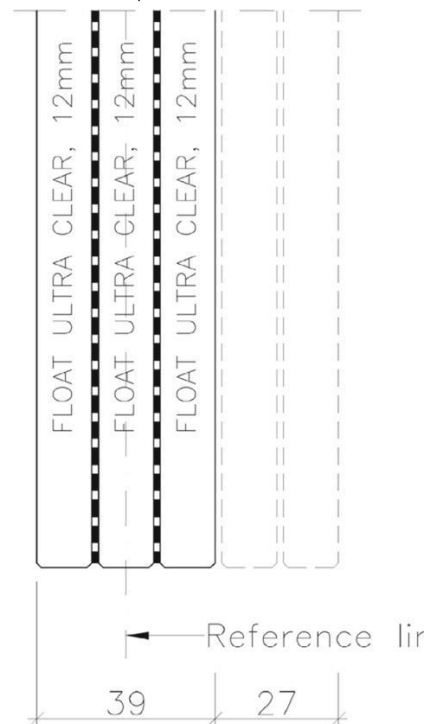
De keuze voor standaard uitgegloeid glas is opmerkelijk. Er wordt namelijk bijna altijd voor gehard (of thermisch versterkt) glas gekozen wanneer glaspanelen als structureel element worden ingezet, vanwege het grotere draagvermogen. Thermisch gehard glas heeft bijna een driemaal hogere karakteristieke buigsterkte dan uitgegloeid glas. (Zie addendum 1 voor meer info over gehard glas.)



Afb. 6.35: De afdichtingsvoeg van de spouwen van een IGU werd overvloedig aangebracht. (© Lüchinger Meyer)



Afb. 6.36: Glasopbouw van een IGU. (© Uit [1])



Afb. 6.37: Glasopbouw van een dragende binnenwand. (© Uit [1])

De motivatie om toch voor uitgegloeid glas te kiezen was omdat dit type glas de beste oppervlakteconditie heeft. Ondanks de zware glasopbouw van een IGU (in totaal zes glasplaten), was er in dit project haast een 'dematerialisatie' van het glas gewenst. De architect wou dat er 'niets' was dat de bezoeker scheidt van het exterieur of van een andere ruimte. Bij het thermisch harden van glas (het glas opnieuw opwarmen en daarna afschrikken) worden er bewust spanningen in de glasplaat geïntroduceerd om het glas te versterken. Dit proces laat soms vervormingen achter; het oppervlak is dan niet langer even vlak als voor het hardingsproces. Deze zogenaamde oppervlakteanisotropieën verhinderen de transparantie vanwege de vervormde reflecties op het glas die ze teweegbrengen.

De beslissing om uitgegloeid (float) glas te gebruiken voor alle lagen van de drieduidige IGU's en de glazen binnenwanden, beïnvloedt de mogelijke buigingstechnieken. Hoewel het voor de gewenste cilindrische krommingen kon zorgen, werd de techniek waarbij glasplaten gekromd en gehard worden in één keer, niet gebruikt. Ook het koud buigen van glas (zowel koud forceren ter plaatse of koud buigen tijdens lamineren in de fabriek) vereist gehard glas en werd dus niet toegepast. Er werd gekozen voor de klassieke techniek van warm buigen waarbij het glas inzakt onder de zwaartekracht en de vorm aanneemt van de onderliggende substructuur. Na het aannemen van de vorm werd de gekromde glasplaat opnieuw traag afgekoeld, wat moest zorgen voor de best mogelijke 'uitgegloeide' oppervlakteconditie die het dichtst aansloot bij de beloofde transparantie.

Om de kosten voor de mallen voor het warm gebogen glas te verlagen, werden de twee in tegengestelde richting draaiende spiralen zodanig ontworpen dat er slecht vier verschillende buigstralen zijn. De kleinste radius is 4,7m en de

grootste 18,8m. Toch is de algemene vorm van elke plaat uniek; dat komt omdat de bovenrand van de glaspanelen de op en neer gaande dakrand volgt. Deze dakrand volgt uit de gewenste geometrie van de gehele museumuitbreiding, maar dient ook om overal een goede afwatering mogelijk te maken.

Vanwege de ongewone keuze om ongehard glas te gebruiken als dragend materiaal, waren tests op de werkelijke draagcapaciteit van de gebogen glaspanelen extra belangrijk. De testopstelling bestond uit proefstukken op ware grootte (Afb. 6.38), waarop stapsgewijs de belasting werd opgevoerd in overeenstemming met de belastingniveaus in de verschillende berekende belastinggevallen. Gezien het dragende deel van het isolatieglas zich aan de binnenzijde bevindt, is de kans op beschadiging reëel. Daarom werd bij een tweede test de binnenste glasplaat over de volledige lengte bewust gebroken, als representatie van een situatie waarbij een middelgroot voorwerp het glas stevig zou raken. Deze test ging tot aan het berekende limietniveau van de belasting dat eventueel in werkelijkheid zou kunnen voorkomen. Het paneel bleek dit te weerstaan.

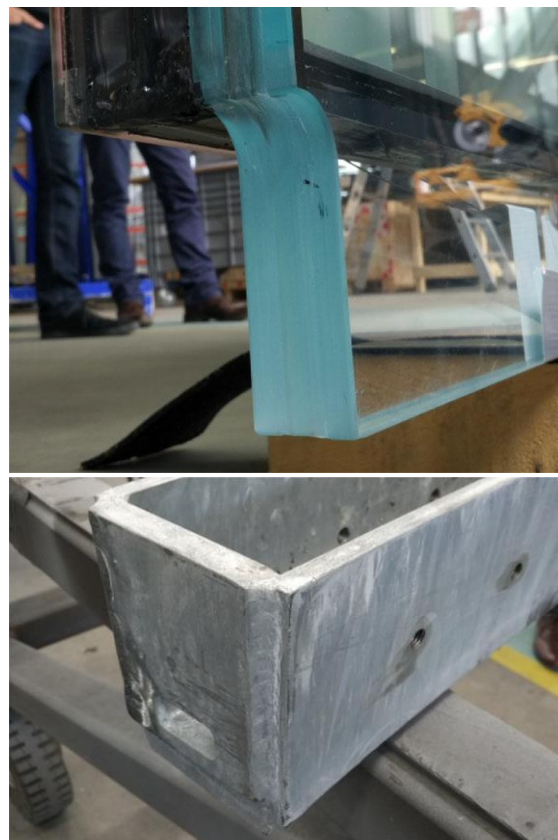
Ten slotte werd voor de derde test ook de glasplaat aan de andere kant van het laminaat bewust beschadigd. Deze keer werd het belastingniveau verder dan de ontwerpwaarde opgedreven. Hieruit bleek dat zelfs met maar één intacte dragende laag het glaspaneel de vereiste sterkte waarde overtrof met een factor 4. Bij de test op een binnenwand van vijfslaags gelamineerd glas werd er zelfs gegaan tot een geconcentreerde puntbelasting van 80 ton (dat is het gewicht van een hedendaagse locomotief). Deze testen gaven een goede indicatie dat de panelen voldoende draagkracht hebben en bij breuk voldoende reserves hebben om de belasting op te vangen totdat een vervangunit beschikbaar is.



Afb. 6.38: Test op het draagvermogen van een binnenwand. A) Testopstelling met glaspanelen op ware grootte en realistische steunpunten. B) Bewust aangebrachte schade over de gehele breedte van het glas. C) Meerdere gebroken glaslagen. (© Uit [1])

De gebogen glasunits zijn langs de boven- en onderrand geklemd in stalen consoles, die via koppelstukken bevestigd zijn aan de dakconstructie of de onderliggende constructie (Afb. 6.40 en 6.41). De belastingen worden via deze stalen 'schoenen' in het glas overgebracht. De verbinding tussen een beugel op het dak en de console is enkel vastgepind. Dit zorgt ervoor dat buigmomenten niet van het dak naar het glaspaneel worden doorgegeven en dat het paneel vrij naar buiten kan buigen wanneer dat nodig is.

Om een glaspaneel stevig in de stalen schoen te klemmen en om mooi aan te sluiten bij de naburige panelen, werden er inkepingen voorzien in het dragende glaslaminaat (Afb. 6.39). Deze inkepingen sluiten mooi aan bij de staalplaatjes die aan de korte zijden van de consoles werden bevestigd. Op deze plekken werd de voeg tussen het glas en het staal gevuld met Hilti Hit injectiemortel.



Afb. 6.39: Boven: Inkeping in het dragende glas. Onder: Stalen schoen. (© Uit [1])

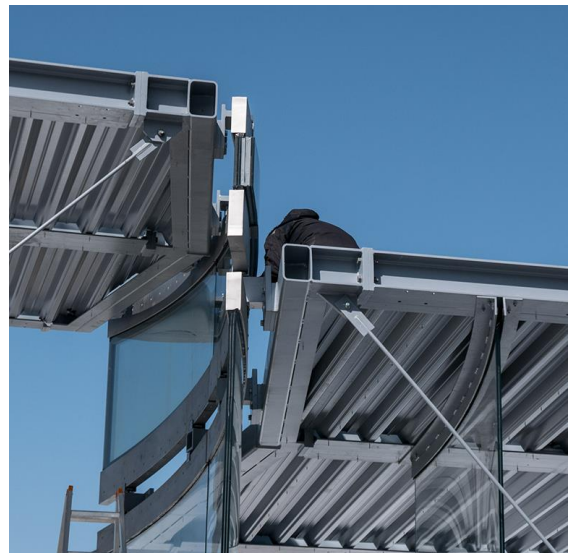
Om de glasunits te verankeren over de volledige lengte van de stalen schoenen werd er structurele verlijming met silicone (Sikasil SG-500) gebruikt. Een verlijmingsprocedure had het voordeel dat de fabricagetoleranties van de gebogen onderdelen gemakkelijker gecompenseerd konden worden en dat de verbindingen reeds in de fabriek gemaakt konden worden.

Aan de hand van de berekeningen bleek dat de structurele lijmvverbinding een breedte van ongeveer 20cm vereiste, aan beide zijden van de schoen. Deze afmetingen maakte de lijmtoe-passing uitdagend. Het uithardingsproces van een dergelijke 2-componenten silicone genereert namelijk bijproducten die uit de voeg in de lucht moeten worden vrijgegeven om goede hechting te garanderen. Wanneer de toegang tot lucht beperkt is tot slechts één zijde van het verbindingstuk, wordt de maximale voegdiepte best beperkt tot 5cm om volledige eliminatie van bijproducten mogelijk te maken.

Om dit probleem op te lossen, werd er een alternatieve methode voor het aanbrengen van de lijn ontwikkeld. Er werden in de lange platte zijden van de stalen schoenen op regelmatige afstand gaten geboord (Afb. 6.39 onder). In plaats van het gebruikelijke opvullen vanaf de open zijde, kon de lijn nu door deze gaten geïnjecteerd worden. Het proces in de fabriek ging als volgt: de injectie werd gestart vanaf het eerste gat, en wanneer er lijn zichtbaar was in de aangrenzende gaten werd er vanaf daar opnieuw verder geïnjecteerd, en zo voort tot de hele lengte was gevuld. De viscositeit van de gekozen silicone liet dit procedé toe. Met deze techniek was er rond de geïnjecteerde silicone steeds voldoende lucht om de bijproducten te laten ontsnappen.



Afb. 6.40: Model op ware grootte. Elke IGU heeft twee steunpunten onderaan en twee bevestigingspunten met de dakconstructie bovenaan. De belasting van het dak wordt via druk doorheen het glaspaneel doorgegeven aan de steunpunten. (© CCHE Lausanne SA)



Afb. 6.41: Alle verbinden werden op voorhand getest aan de hand van een model op ware grootte. (© CCHE Lausanne SA)

Op de bouwplaats werd eerst de stalen dakconstructie gerealiseerd en daarna werden de glazen draagmuren geïnstalleerd. Daaraan voorafgaand was de stalen onderconstructie van de glasunits reeds geplaatst in de bekisting en zodoende gefixeerd in het beton van de kelderderdieping. De glasunits werden met een vacuümzuiger of met een kraan opgetild en op de juiste positie gebracht. De grotere panelen moesten nog 90 graden worden gedraaid omdat ze niet rechtop konden worden vervoerd. Elke glazen unit is uniek, niet enkel qua vorm, maar ook in die zin dat er van alle panelen slechts één exemplaar werd vervaardigd. Dus als één ervan onnauwkeurig bleek te zijn of beschadigd raakte tijdens transport of ter plaatse, moest het opnieuw worden gemaakt vanaf nul.

Het weer beïnvloedde het bouwproces. Door de extreme koude en de zware sneeuwval in de winter was het lastig voor de arbeiders om verder te werken (Afb. 6.42). Daarnaast was het overigens gedurende een lange periode onmogelijk om de afdichtingswerken uit te voeren, omdat de producten niet konden worden toegepast bij de zeer lage temperaturen van Le Brassus.



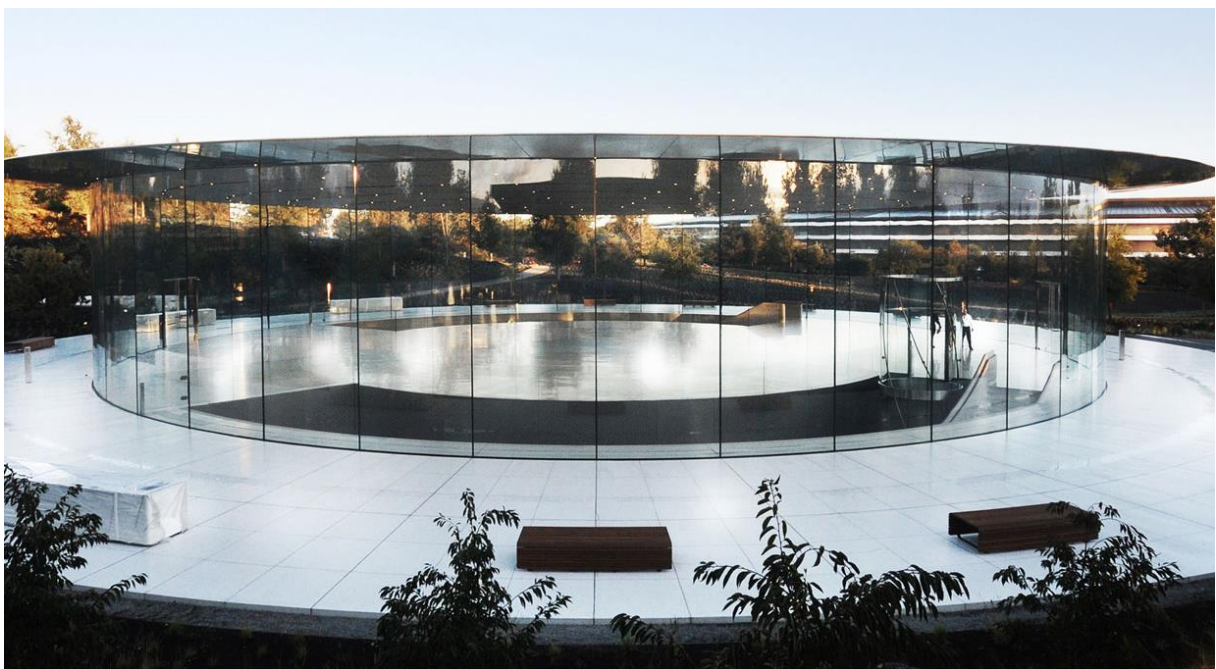
Afb. 6.42: Barre omstandigheden tijdens de werf.
(© Le Temps)



Afb. 6.43: Het nieuwe museum ligt ten noorden van het originele gebouw van Audemars Piguet. (© CCHE Lausanne SA)

Ten slotte kan er vergeleken worden met een ander project waarbij ook gebogen glaspanelen inzet werden om een lichtgewicht dak te dragen, met name het **Steve Jobs Theater** uit 2017 in Cupertino (Californië, VS) (Afb. 6.44). Het cirkelvormige paviljoen is ontworpen door het architectenbureau Foster+Partners in samenwerking met Eckersley O'Callaghan. Het dak uit koolstofvezel rust op een glazen cilinder met een diameter van ca. 40m en een hoogte van ongeveer 7 meter.

Net zoals bij het museum Atelier Audemars Piguet, werden er in het Steve Jobs Theater geen extra metalen ondersteuningën voorzien. De lasten worden volledig opgenomen door de gebogen glaspanelen, elk bestaande uit vier lagen van 12mm dikte. Nog een gelijkenis is dat ook in dit project de glaspanelen onderaan met silicone structureel werden verlijmd in stalen consoles. Dat bleek de beste bevestigingsmethode om de energie te kunnen opnemen bij seismische activiteit, hetgeen vaak voorkomt in Cupertino.



Afb. 6.44: Het Steve Jobs Theater, ontworpen door Foster+Partners. (© Uit [6])

Referenties MUSEUM ATELIER AUDEMARS PIGUET

TEKST

- **[1]** Villiger, J., Willareth, P., Doebbel, F., et al. (2019). Interlocking glass spiral as building structure of the watch museum “La Maison des Fondateurs”. *Glass Struct Eng* 4, 3–16. <https://doi.org/10.1007/s40940-018-0077-6>
- **[2]** Glass on Web. (2020, 11 mei). *La Maison des Fondateurs – Load Bearing Interlocking Glass Spiral as Building Structure*. Geraadpleegd van <https://www.glassonweb.com/article/la-maison-des-fondateurs-load-bearing-interlocking-glass-spiral-building-structure>
- **[3]** Glass on Web. (2020, 14 mei). *Guardian Glass Project: Maison des Fondateurs Audemars Piguet*. Geraadpleegd van <https://www.glassonweb.com/news/guardian-glass-project-maison-des-fondateurs-audemars-piguet>
- **[4]** CCHE. (2020, 22 april). *Fin de la construction du Musée Atelier Audemars Piguet*. Geraadpleegd van <https://cche.ch/generales/fin-de-la-construction-du-musee-atelier-audemars-piguet/>
- **[5]** Architizer. *La Maison Des Fondateurs*. Geraadpleegd van <https://architizer.com/projects/la-maison-des-fondateurs/>
- **[6]** Eckersley O’Callaghan Engineers. *Projects. Steve Jobs Theater*. Geraadpleegd van <https://www.eocengineers.com/en/projects/steve-jobs-theater-293>

AFBEELDINGEN

- **Afb. 6.29, 6.31, 6.32:** © Iwan Baan. Geraadpleegd van <https://www.archdaily.com/938537/atelier-audemars-piguet-museum-big/>
- **Afb. 6.30, 6.33, 6.35:** Uit presentatie: Lüchinger Meyer. (2017, 30 juni). *La Maison des Fondateurs Load Bearing Interlocking Glass Spiral. Glass Performance Days, Tampere*.
- **Afb. 6.34:** © Giovanni Emilio Galanello. Geraadpleegd van <https://www.archdaily.com/938537/atelier-audemars-piguet-museum-big/>
- **Afb. 6.36, 6.37, 6.38, 6.39:** Uit [1]
- **Afb. 6.40, 6.41, 6.43:** © CCHE Lausanne SA. Geraadpleegd van <https://www.luechingermeyer.ch/en/project/museum-audemars-piguet-apc-le-brassus/>
- **Afb. 6.42:** Geraadpleegd van <https://www.letemps.ch/lifestyle/architecture-nouveaux-temples-lhorlogerie>
- **Afb. 6.44:** Uit [6]

DEEL II

VRAGENLIJST OVER BOUWEN MET GLAS

1. OPZET VAN DE VRAGENLIJST

Voor het tweede deel van de masterproef werd er een online vragenlijst over de engineering en het ontwerpen van glasconstructies opgesteld. Dertig ingenieurs en architecten kregen een uitnodiging om de enquête in te vullen. Allemaal zijn ze op een of andere wijze professioneel bezig met het materiaal glas. Aan de hand van zeven (Engelstalige) open vragen werd er gepolst naar wat voor hen het meest uitdagende glasproject was, wat volgens hen de belangrijkste motor voor innovaties in glas is en of ze onlangs projecten hebben gerealiseerd die vijf jaar geleden nog niet mogelijk waren. Ook werd er gevraagd welke doorbraken ze verwachten in de komende vijf jaar, hoe men opgedane kennis beheert en op welke manier bouwvoorschriften over glas hun ontwerpen hebben beïnvloed. De vragenlijst eindigt met de vraag naar wat hun persoonlijke motivatie was om zich te verdiepen in glas.

Het doel van deze enquête was om een beter inzicht te krijgen in wat de uitdagingen zijn bij het bouwen met glas en wat het materiaal nog allemaal te bieden heeft. Een deel van de respondenten waren betrokken bij gevalstudies die besproken werden in DEEL I van de masterproef. De vragenlijst hielp ook bij het opstellen van DEEL III waarin enkele innovatieve glasproducten worden toegelicht.

2. RESPONDENTEN

Zestien geadresseerden hebben de volledige vragenlijst beantwoord. De groep van respondenten bestaat uit (ingenieur-)architecten, ingenieurs, academici en personen uit de industrie. De respondenten komen uit tien verschillende landen, namelijk België, Nederland, Duitsland, Spanje, Italië, Verenigd Koninkrijk, Zwitserland, Zweden, Canada en de Verenigde Staten.

Het merendeel van de geënquêteerden zijn zaakvoerder van, of werken bij, toonaangevende bureaus zoals ABT, AGC Glass Europe, Bellapart, GlaSS Consulting Engineers, Green Facades LCC, Laufs Engineering Design, MVRDV, RJC Engineers, Saint Gobain Glass, Sunglass of Werner Sobek AG.

De respondenten die bij naam genoemd worden, zijn: Steffen Feirabend, Richard Green, John Kooymans, Will Laufs, Tim Macfarlane, Rob Nijse, Gijs Rikken, Jacques Raynaud, Jens Schneider en Francis Serruys. De zes andere respondenten wensten niet vermeld te worden in deze opsomming of prefereerden dat hun antwoorden niet gelinkt werden aan hun naam. Deze zes personen worden bij de antwoorden aangeduid met 'anoniem'.

3. VRAGEN EN ANTWOORDEN

3.1 VRAAG 1/7: BEHEER VAN OPGEDANE KENNIS

“How do you manage the know-how built up during previous projects and how do you ensure that you and your colleagues can build further on it in future projects?”

WILL LAUFS

“Personal conversations; using previous drawing details and structural glass calculation documents again for reference; team reviews.”

JENS SCHNEIDER

“Through publications, lectures and education.”

ANONIEM

“We use two main strategies:

- At the end of every project there is a *de taules* presentation to all the engineering team with all lessons learned on it.
- We have a Wikipart to search for specific information related to our specific knowledge.”

FRANCIS SERRUYS

“A CRM (Salesforce) is used for the project business (i.e. project follow up from specification till project completion).

Continuous training for people involved in the project business.”

JOHN KOOYMANS

“We always have several designers included in the design process for any project and have brainstorming sessions to discuss ideas and options. Each individual learns from this collaborative design effort within our own team and can use it as a continuation of their education in glass engineering.”

JACQUES RAYNAUD

“One interesting aspect in the conception of architectural buildings is that every new project is potentially completely different from previous ones, so that the engineer must find new solutions and reinvent his know-how continuously. Of course, having a significant experience is useful for avoiding common errors, but it can be also a hindrance for finding new interesting solutions, so it must not be considered as an absolute quality. What is maybe more important is to review the work of others, successful or not, because the capacity of invention of a community is far more important than the one of an individual, even very talented. Knowing the state of the art is also permitting to understand if some work can be interesting for the community, and if it is, one should make the effort of publishing it, which is an excellent way to formalize it for future reference.”

GIJS RIKKEN

“Knowledge was gathered through extensive testing and prototyping, using previous studies as starting points. An important part after finishing the project is the proper sharing of information with peers, so further evolution does not stall.”

ANONIEM

"If expectation is that know-how is only related to the project, only the project information will be stored. If the know-how seems to be more structural, then it will be integrated in daily systems and structures. In case that the know-how is very hot, actions with my team will be planned."

ANONIEM

"We keep all the information confidential."

STEFFEN FEIRABEND

"Several aspects are taken into account: key words are documentation of the know-how built up during projects with the relevant details/info in a common database, internal working groups on specific topics, internal oral presentation and info in intranet informing all staff members, also invited experts/industry giving inhouse presentation, networking on conferences/organisations, etc."

ROB NIJSSE

"Basically it is all in my head. I talk each project over with the responsible calculating structural engineers very carefully within ABT. Furthermore I gave lectures at conferences, published a book "Glas in Structures" at Birkhauser Verlag in Basel in 2003 and wrote many articles in technical magazines. I give at the TU Delft a course to the master students of the Faculty of Civil Engineering called "Structural Glass", code CIE 4285."

RICHARD GREEN

"For the past 8 years I have been chairing an initiative to create an ASTM standard that will provide guidance to glass designers. My experience on past projects, as well as the experience of the members of the committee help guide the recommendations and requirements in the document. By distilling the experience into critical rules, principles and philosophies help me, my team and all to take a more consistent and well-founded approach to glass design."

TIM MACFARLANE

"As a small practice we have regular reviews of projects in process and a final review when complete, so knowledge is shared and disseminated. We also publish papers on topics that are new and of interest making acquired information available to a wider audience."

ANONIEM

"Scientific publication."

ANONIEM

"Documents are saved in folders that are saved on a high-security server. Brief personal know-how is spread to colleagues via seminars. Public reports and publications are added to a national research database."

ANONIEM

"We undertake regular internal meeting to share the design process of one particular project to all the team. All the knowledge generated for every single project is shared."

ANALYSE VRAAG 1

“Hoe beheert u de knowhow die bij eerdere projecten werd opgebouwd en hoe zorgt u ervoor dat u en uw collega's er bij toekomstige projecten verder op kunnen bouwen?”

Het merendeel geeft aan dat de opgedane kennis uit een specifiek project op één of andere manier gedeeld wordt met de rest van het bureau. Dat gebeurt via verschillende vormen van ‘educatie’, er worden bijvoorbeeld interne presentaties, trainingen, lezingen of seminars georganiseerd. Algemeen kan gesteld worden dat de documentatie uit vorige projecten goed bijgehouden en hergebruikt wordt. Zes personen wijzen bovendien op het belang van wetenschappelijke publicaties. Daarentegen vertellen enkele personen dat de documentatie beveiligd en vertrouwelijk blijft. Enkele respondenten geven ook aan op welke manier de kennisoverdracht gebeurt tijdens een lopend project en spreken hierbij over brainstormingsessies, vergaderingen en ‘team reviews’.

Ten slotte heeft Green het over hoe hij als voorzitter van de ASTM-norm zijn ervaring uit eerdere projecten probeert om te zetten in regels en principes in de bouwcodes, om zo andere glasontwerpers te begeleiden bij toekomstige projecten.

3.2 VRAAG 2/7: MEEST UITDAGENDE PROJECT

“What was the most challenging glass project you have worked on, and why?”

WILL LAUFS

“Hudson Yards Observation deck - expert review for confidential glass guard rail failure during construction.”



Afb. 1: Het Hudson Yards Observation Deck in New York.
(© Related-Oxford)

ANONIEM

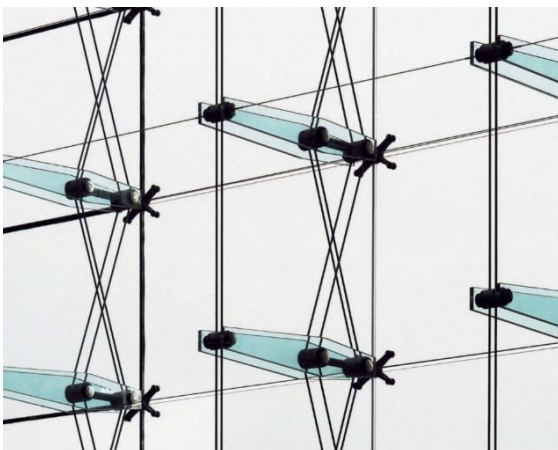
“The Bombay Sapphire Greenhouses. The free 3D glass surfaces could not be tempered and hot-bended and the cold bending alternative limited the glass thickness.”



Afb. 3: Eén van de twee ‘Bombay Sapphire Greenhouses’ in het Verenigd Koninkrijk. (© Iwan Baan)

JENS SCHNEIDER

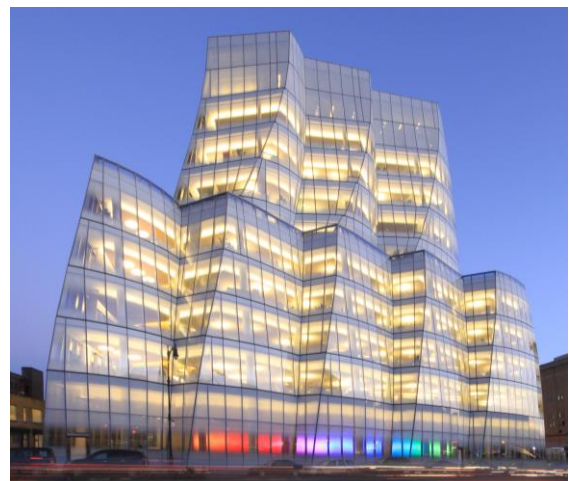
“Berlin Main Station Facade with glass beams.”



Afb. 2: Ontdubbelde glasliggertjes werken samen met staalkabels om de voorgevel van het station in Berlijn te ondersteunen. (© Marcus Bredt)

FRANCIS SERRUYS

“Specialised in special architectural projects, each project has its own challenges. Whether it is technical, process and/or logistics. Example of projects Interactive Corp. (NY); Sports City Center (Doha); Lakhta Tower (St. Petersburg); Saint-Gobain Tower (Paris).”



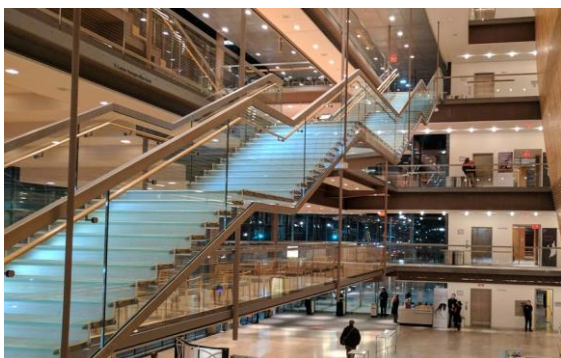
Afb. 4: Het hoofdkantoor van IAC. (© Drew Dies)



Afb. 5: De recent opgeleverde 'Tour Saint Gobain' in Parijs.
(© Arthur Weidmann)

JOHN KOOYMANS

"I would have to say the glass staircase at the Four Seasons Centre for the Performing Arts in Toronto (Canada). It was one of my first experiences designing in glass and the long span staircase had several challenges as it was hung in place and large pieces of glass were not available at the time, so the splicing details were critical as was the lateral stability of the entire structure."



Afb. 6: Het 'Four Seasons Centre for the Performing Arts'.

JACQUES RAYNAUD

"The most challenging project I had to collaborate is the glass roof of the Fondation Louis Vuitton in Paris Bois de Boulogne because it was an unprecedented combination of geometrical complexity and project size."



Afb. 6: Fondation Louis Vuitton in Parijs, ontworpen door Gehry Partners. (© Iwan Baan)

GIJS RIKKEN

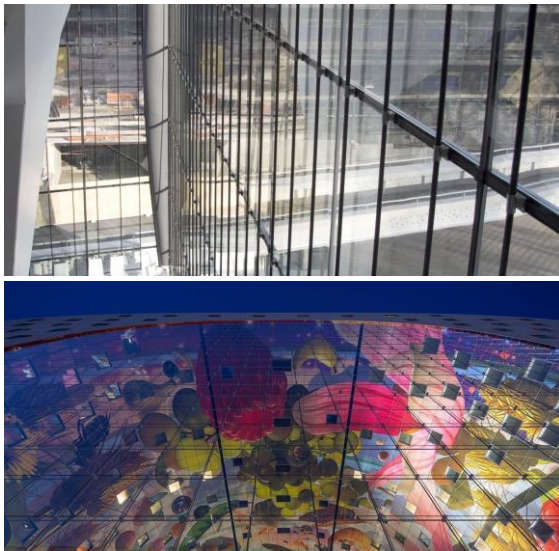
"Crystal Houses, Amsterdam. The techniques required to (almost) seamlessly and invisibly bond solid glass volumes, was not put in practice in this shape or size before and needed to be discovered."



Afb. 7: Crystal Houses in Amsterdam. (© MVRDV)

ANONIEM

“Hogeschool in Delft. Hogeschool also produces special carbon-fibres for ESA-rockets. The challenge was to design a facade where these cables were integrated in the DGU as a hanging construction. We used this technology (simplified) in the project Markthal in Rotterdam.”



Afb. 8: Boven: Hogeschool INHolland in Delft, ontworpen door Rietveld Architects. Onder: De Markthal in Rotterdam, ontworpen door MVRDV. (© Octatube)

ANONIEM

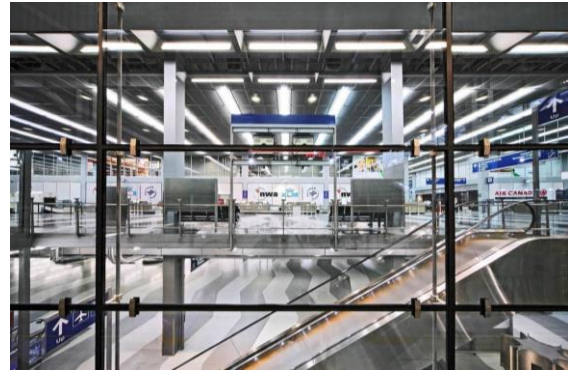
“Louis Vuitton Foundation and Astana Expo 2017.”



Afb. 9: De spectaculaire glasgevel rondom het Nationaal Paviljoen "NUR ALEM" op de Astana Expo in Kazachstan. (© Evolute)

STEFFEN FEIRABEND

“O'Hare Airport, Chicago cable facade was the most challenging due to the fact that it was the first single cable facade project with IG units and during the design phase there was the additional requirements of bomb blast due to 9/11.”



Afb. 10: De glasgevel van de internationale O'Hare-luchthaven in Chicago. (© Rainer Viertböck, Gauting/Germany)

ROB NIJSSE

“Crystal Houses in Amsterdam, first application of massive glass bricks in outside conditions in a real facade.”

RICHARD GREEN

“Every project has its own challenges.

The Seattle Space Needle includes 11 glass systems with the challenges ranging from revolving glass floors and structural glass barriers to a 500 ft drop, to ultra high optical quality windows with anti-reflective coatings, while still meeting challenging energy performance criteria.

The project is also a global icon with a very high profile and a historic listing requiring the best possible detailing under the most intense scrutiny.

The unique conditions and critical applications required applying many existing test methods, and inventing a few others to test service conditions. More importantly, testing the post-damage conditions for appropriate modes of behavior should one or more plies (including all) of the plies break.”



Afb. 11: De Space Needle in Seattle. (© olsonkundig)

TIM MACFARLANE

“Yurakucho Cantilever Glass canopy at the Tokyo Forum in Japan. We were looking at the capacity of bolted connections in glass to carry high shear loads and there was little or no prior information on this topic.”



Afb. 12: Yurakucho Canopy in Tokyo. (© glasslimited.com)

ANONIEM

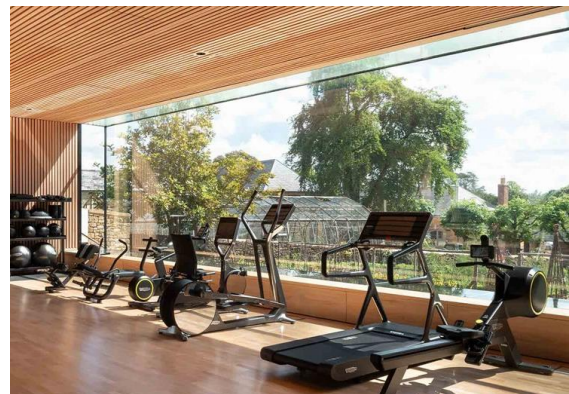
“Glasstec projects, most innovative.”

ANONIEM

“The most challenging glass project is confidential. The second most challenging was about strengthening of glass to make 1 mm thermally strengthened glass. It was experimentally very challenging but challenging projects also gives much knowledge and experience.”

ANONIEM

“A cantilever glass box for a gym in Castle Cary, UK. It was challenging because we used a single glass panel 13.5m long x 3.2m high supported on stainless steel fins cantilevering from a concrete wall.”



Afb. 13: Het 'Newt Hotel Gymnasium'. (© Cantifix)

ANALYSE VRAAG 2

“Wat was het meest uitdagende glasproject waaraan u heeft gewerkt en waarom?”

Logischerwijze levert deze vraag veel verschillende antwoorden op. Er worden uiteenlopende projecten uitgekozen, kleine en grote. Het varieert van een observatieplatform, een glazen trap, bepaalde specifieke gevels tot grote publieke gebouwen en skyscrapers. We herkennen bij de antwoorden ook drie gevalstudies uit DEEL I van de masterproef: de hoofdkantoren van IAC (2007), tweemaal het Fondation Louis Vuitton (2014) en ook tweemaal Crystal Houses (2016). Het interessantste deel van deze vraag is de argumentatie waarom het gekozen project uitdagend was. Voor de meeste respondenten zat de uitdaging in de gebruikte techniek om de gewenste glasconstructie te realiseren.

Kooymans vertelt dat grote stukken glas nog niet beschikbaar waren tijdens het ontwerp van de glazen trap in de hal van het Four Seasons Centre for the Performing Arts (2006). De verbindingsdetails tussen de glaselementen onderling waren dus van cruciaal belang. Het was bovendien één van zijn eerste ervaringen met ontwerpen in glas, waardoor het voor hem blijft als een uitdagend project. Een andere respondent vertelt daarentegen over een gigantische glasplaat van 13,5 op 3,2 meter die op uitkragende vinnen moest worden geïnstalleerd. Afmetingen van glaselementen kunnen dus in beide richtingen tot uitdagende projecten en oplossingen leiden.

Voor Schneider was het een hele opgave om de glazen liggers voor de gevel van het station van Berlijn (2006) te ontwerpen. Ook voor Macfarlane waren de glazen balken van de Yurakucho luifel (1996) uitdagend, gezien de boutverbindingen hoge schuifbelastingen moesten kunnen weerstaan, en er toen nog amper voorafgaande info beschikbaar was over dergelijke connecties. Iemand anders spreekt dan weer over de complexiteit die de vrije vorm oppervlakken van The Bombay Sapphire Greenhouses (2014) met zich meebrachten. Het glas kon namelijk niet gehard én warm gebogen worden. De alternatieve keuze om het glas koud te buigen, beperkte de bruikbare glasdiktes. Een andere respondent vertelt over zijn uitdagend experimenteel onderzoek naar het thermisch harden van glas met een dikte van slechts 1mm. Door deze antwoorden wordt het duidelijk hoe de vorm, de dikte, de afmetingen, ... van een glaspaneel gelinkt zijn aan de technieken die mogelijk zijn.

Twee respondenten kiezen voor projecten met glasgevels die ondersteund worden door kabelsystemen. Iemand vertelt over kabels met speciale koolstofvezels (die ook gebruikt worden in raketten) die de dubbelglasunits van de gevel van de Hogeschool in Delft (2009) dragen. Feirabend heeft het over een project in Chicago waarbij voor het eerst isolatieglas gedragen werd door enkelvoudige kabels. Zowel voor Rikken als Nijse is Crystal Houses (2016) het meest uitdagende glasproject uit hun carrière. Ze benadrukken beiden het feit dat de technieken die nodig waren om de massieve glasblokken (bijna) naadloos te verbinden nooit eerder in deze vorm of grootte in de praktijk waren gebracht. Nieuwe technieken dienden dus ontwikkeld te worden.

Green spreekt onder meer over de veiligheidsuitdagingen die de Seattle Space Needle (1962) met zich meebracht. Zo dienden er nieuwe testen ontwikkeld te worden om de weerstand van het glas te verifiëren bij bepaalde condities, zoals bij breuk van alle glaslagen. Het glas moet de bezoekers namelijk ten alle tijde beschermen tegen een val van meer dan 150 meter. Green (en Serruys) antwoordden wel eerst

algemeen en zeggen dat elk project zijn eigen uitdagingen kent, maar geven daarna toch voorbeelden van grote projecten. Dat sluit enigszins aan bij het antwoord van Raynaud die het Fondation Louis Vuitton (2014) uitkiest vanwege de geometrische complexiteit en projectgrootte.

Een verscheidenheid aan uitdagingen werden genoemd bij projecten waarin glas prominent aanwezig is. Er kan besloten worden dat de uitdagingen van het materiaal niet onder één noemer te plaatsen zijn. Het uitdagend karakter van glas is contextueel, concreet en genuanceerd.

3.3 VRAAG 3/7: MOTOR VOOR INNOVATIES

“What do you think is the main driver for innovations with glass in buildings?

The architect’s vision, the client’s dream, energy requirements, increasing scientific knowledge, other?”

WILL LAUFS

“Structural applications have been pretty much all built by now; current/next innovation I see switchable glazing combined with smart building technology, more in the domain of energy/adaptive skin. What is required next is CO₂ tracking cradle-to-cradle becoming standard for energy calculations as related to glazing.”

JENS SCHNEIDER

“The architects’ vision and engineering knowledge.”

ANONIEM

“Architect’s vision.”

FRANCIS SERRUYS

“In the first place it is the architect’s vision. Second, the Apple stores and campus brought a strong push in (optical) quality and increased dimensions.”

JOHN KOOYMANS

“This answer is twofold. Firstly, the drive to create very transparent spaces for aesthetic reasons. Secondly, a renewed passion for energy efficiency. These two drivers often compete against each other and have created needs for innovation in glass products.”

JACQUES RAYNAUD

“Maybe a convergence of the architect and client visions of the future: it is interesting to note that the glass is very often associated with the progress and a futuristic humanity; this must have something to do with its close relationship with light that is still a great mystery of the universe.

Of course, more prosaically, new industrial capabilities are needed to create new ways of building with glass, as the float process has been an important one. Those are often only technological, but new scientific discoveries could be great game changers as well.

But all this is conditioned by a positive evolution of the society which is unfortunately not at all what we are seeing at the moment!”

GIJS RIKKEN

“The full range of possibilities of glass as a building material are yet to be discovered. A project such as Crystal Houses pushes the boundaries when trying to build a world in which barriers become less visible and a seamless transition between inside and outside can be achieved. A necessity when thinking about the increasing density of cities and the possible feeling of being too enclosed within them.”

ANONIEM

“The main drivers will be related to the transformation of energy, materials and health. All the other drivers will be depending on these main drivers.”

ANONIEM

"What is the leader in innovation, sci-fi or technician? Sci-fi imagine and technician make it feasible."

STEFFEN FEIRABEND

"The vision and dream of many to develop something very unique. The desire to do something beautiful and completely different to the established solutions – there came one and made possible something that everyone said it would be impossible."

ROB NIJSSE

"For me an engineering's dream to make structures out of this strong, beautiful and durable, but also dangerous, material."

RICHARD GREEN

"There are many advances happening at once which are contributing to innovation, and I do not think it is a single thing that is driving innovation. Innovation is taking the advances in production capacity and improvements in interlayer to create advances in size of units and structural assemblies. Advances in research, design principles and connection details are finding better ways to utilize the bigger capacity. Improved coatings, edge spacers and sealants allow us to have bigger glass insulating units without penalty in the energy demand. As people see visionary usage, it inspires clients, architects and engineers to strive for even greater sophistication in the use of glass.

The use of glass is limited only by the controlling parameters: there are many, so as one aspect advances the challenge moves to another. A truly innovative and successful design requires great commitment and will from all parties, including: clients, architects, engineers, fabricators, installers and product suppliers. Their combined imagination to fully utilize new technology as it becomes available (which in itself is a contributing achievement) is helping to drive forward glass innovation."

TIM MACFARLANE

"There is design innovation where architectural and engineering consultants proceed with their imagination and the best modelling tools available to provide society with a vision of what is possible. And there is innovation in the manufacture and fabrication of glass where innovation answers the how to questions raised by societies visionaries."

ANONIEM

"Glass is complex and inspiring."

ANONIEM

"Smart functionalities."

ANONIEM

"Definitely the client's dream. If the client is willing to invest and research in uncommon solution, then the fun starts!"

ANALYSE VRAAG 3

“Wat is volgens u de belangrijkste motor voor innovaties met glas in gebouwen? De visie van de architect, de droom van de klant, energie-eisen, toenemende wetenschappelijke kennis, andere?”

De helft van de respondenten geeft op één of andere manier aan dat de visie van de architect en het streven naar meer transparantie de drijfveren zijn achter ontwikkelingen in glas. Raynaud heeft het zelfs over het mysterieuze van glas en is van mening dat glas vaak wordt geassocieerd met de vooruitgang en een futuristische mensheid.

Terwijl Rikken antwoordt dat het volledige scala aan mogelijkheden van glas als bouw materiaal nog moet worden ontdekt, zegt Laufs daarentegen dat op vlak van structureel glas het meeste al gebouwd is. Laufs vermoedt, samen met drie andere respondenten, daarom dat de verdere innovatie in glasproducten eerder ligt in een verbeterde energie-efficiëntie. Hierbij gaat het over ‘slim glas’: bijvoorbeeld beglazing die automatisch van kleurtint verandert naargelang de omstandigheden. Er wordt ook eenmaal aangehaald dat nieuwe wetenschappelijke ontdekkingen de motor kunnen zijn voor nieuwe glastoepassingen in gebouwen.

Green is van mening dat er niet één ding is dat innovatie stimuleert, maar dat een nieuw product een wil van alle partijen vereist om succesvol te zijn. Hij haalt voorbeelden aan waarbij individuele verbeteringen van producten samen leiden tot de toepassing van betere of grotere glaselementen. Zo zegt hij bijvoorbeeld dat de verbeterde coatings, de ontwikkeling van nieuwe spacers en afdichtingsmiddelen hebben geleid tot de mogelijkheid om grotere IGU's te maken zonder verlies in energie-efficiëntie.

Vier personen duiden ook op het belang van de droom van de klant. Serruys heeft het expliciet over hoe Apple zorgde voor een sterke duw in optische kwaliteit en grotere afmetingen van glaspanelen. En zoals Kooymans vertelt, is het inderdaad misschien net de tegenstelling tussen de energie-eisen en de esthetische wens die tot nieuwe producten kan leiden.

3.4 VRAAG 4/7: RECENTE GLASTOEPASSINGEN

“Are there glass applications that you realized recently that were not possible five years ago, and if so, which one(s) and why?”

WILL LAUFS

“We calculated and 1:1 tested glass columns for built Rheinbach Pavilion in the late 1990ties already; we 1:1 tested built 15m tall glass fins for Charles de Gaulles airport around 2000 already; I'd say current research is niche only and no longer really relevant for culture of Architecture or the mass market - time to move on to new horizons.”

JENS SCHNEIDER

“Yes, due to available larger glass sizes, new inter-layers and new design methodology for glued structures. Examples: Clock Tower TU Darmstadt, Glass balustrade FLAT by Glass Trösch, Cold bent glass B. Braun staircase, Glued structure Futurium Berlin.”

ANONIEM

“I think all of them were already possible.”

FRANCIS SERRUYS

“Mainly increased dimensions (i.e. beyond 6m which is longer than the standard float size (which is 3.21m x 6.00m). The basic principles including “glass used as a structural element*” haven't changed a lot over the years.

*I gave a presentation in 1997 on “glass as a structural element” following applications of glass as a column (St. Germain en Laye); as beams; a bridge and a glass stair.”

JOHN KOOYMANS

“There are certainly more glass sizes available as a coated, heat-treated, or laminated assembly than in the past. This allows designers more freedom with designs by eliminating splice details.”

JACQUES RAYNAUD

“I would respond on a bigger time scale as I am involved at the moment in the refurbishment of a project with insulating glasses of 13m high that was a world record in the seventies with audacious technical innovations. Now it is almost a standard one as there are a few companies that are able to produce those kinds of glasses and this is fortunate for the project because in 50 years, the ambition of the client has been much reduced...”

GIJS RIKKEN

“Crystal Houses. See q. 2.”

ANONIEM

“A few examples: BIPV integrated in the spacer (Physee). Soon we will start a project where BIPV is integrated in Colorbel. We call this: no compromis architecture. And VIG (Vacuum glazing => less materials, better performances).”

ANONIEM

“No, except oversize.”

STEFFEN FEIRABEND

"Laminated bended curved IG units with 17m length like the Messeturm in Frankfurt we designed together with JAHN built by the facade contractor Seele with glass made by Sedak was impossible 5 years ago. key words here are - oversized IG, curved/bended, etc."

ROB NIJSSE

"Yes, again the Crystal Houses."

RICHARD GREEN

"The usage of glass is being driven by two things: what is possible and what is required. As energy codes are demanding lower energy buildings, the performance requirements for the glass are steadily improving. One approach is to reduce the amount of vision glass, the other is to improve the performance. Larger glass units have less perimeter for a given area of glass and consequently have better performance. The economics of what is sensible basic design for a building is changing what we need from glass and how to get there. The technology exists, in its highest performing configuration, where glass is the solution to the problem, not the problem. As super high performing glass has greater use and the cost drops, it will have a strong influence on the common uses. The ability to be the solution to the energy problem is still developing. It is in part the evolution of the technology and in part the commercial accessibility to the highest quality technology that make advanced glass applications available on mass.

While the heroic glass application get the glory, it is the every day energy performance advances that have a bigger influence on our built environment and the effect of the built environment on the planet."

TIM MACFARLANE

"Finally we have vacuum glass which has been manufactured in a vacuum chamber – a long promised solution which offers larger panel sizes and no air extraction pipette visible on the surface."

ANONIEM

"Thin glass, limited availability."

ANONIEM

"Not what I can think of."

ANONIEM

"The use of transparent spacers in IGU and the size of glass panels."

ANALYSE VRAAG 4

“Zijn er glastoepassingen die u recentelijk heeft gerealiseerd die vijf jaar geleden nog niet mogelijk waren, en zo ja, welke en waarom?”

Bij deze vraag zien we een tweedeling. Enerzijds geeft een kleine helft van de respondenten al dan niet expliciet aan dat de meeste van hun projecten ook al grotendeels mogelijk waren vijf jaar geleden. Bovendien bespreken Laufs, Serruys en Raynaud projecten van voor de eeuwwisseling, om aan te tonen dat deze nog steeds relevant zijn. Anderzijds wordt er door de andere (grotere) helft van de respondenten opgemerkt dat er vandaag zaken zijn die vijf jaar geleden niet evident waren. Een vaak terugkomend antwoord (zesmaal) gaat over het formaat van glasplaten: gecoat glas, gehard glas, gelamineerd glas, geïsoleerd glas en gebogen glas zijn nu in grotere afmetingen beschikbaar dan voorheen.

Ook worden er enkele specifieke zaken aangehaald. Zo heeft Schneider het over de komst van nieuwe tussenlagen en een nieuwe ontwerpmethodiek voor verlijmd glasconstructies. Iemand anders spreekt dan weer over BIPV (Building Integrated PhotoVoltaics) en vacuüm isolatieglas als hot topics. Ook Macfarlane heeft het over vacuüm glas, namelijk een nieuw type dat in een kamer vacuüm gezogen kan worden.

Rikken en Nijse hebben het over de realisatie van Crystal Houses in Amsterdam als innovatieve ontwikkeling van massief gegoten glas. Daarentegen wordt er ook eenmaal gesproken over dun glas, namelijk dat het vandaag ruimer beschikbaar is dan vijf jaar geleden. Ten slotte worden transparante spacers aangehaald als een nieuwe ontwikkeling. Laufs is echter van mening dat dergelijk onderzoek alleen nog maar een niche is en dat het niet langer relevant is voor de architectuurscultuur of de massamarkt. Ook Green sluit zijn antwoord enigszins op deze manier af: hij zegt dat terwijl de ‘heroïsche’ glastoepassingen de glorie krijgen, het de verbeteringen van de energieprestaties zijn die de grootste invloed hebben op de bebouwde omgeving en de planeet.

3.5 VRAAG 5/7: VERWACHTE DOORBRAGEN IN GLAS

“Which breakthroughs in glass do you expect in the next five years?”

Which breakthroughs would you be dreaming of?”

WILL LAUFS

“For mankind, most important would be to simply replace millions of old windows with bad U-values and urgently replace with low-e coated triple IGU – not too sexy but way more important to lower energy footprint than entire gimmick research European universities seem to be involved with these days – stop funding those Liebhaber research topics.”

JENS SCHNEIDER

“Thin glass lightweight and cold bent structures, multifunctional glass (e.g. combination of switchable and vacuum glass and heat glass).

New glass applications for virtual reality in better 3D quality for rooms to allow virtual meetings almost feeling real.”

ANONIEM

“May be the availability of bigger and affordable electrochromic glasses.

Functional coatings ranging from video displays to antiviral touch glass surfaces.”

FRANCIS SERRUYS

“As sustainability and the consequent certification schemes (e.g. Leed; Breeam) are becoming more and more important, active glazing (electrochromic; photochromic; etc.) will become more common.

Looking at the facade, double skin facades will become more widely used where fairly simple glass compositions (i.e. no need for triple silver coated glass) combined with a solar shading in the cavity will replace the single skin facades with the complex coated solar control coated glass.”

JOHN KOOYMANS

“The ability to create free-form glass shapes that are heat-strengthened, coated, laminated, etc readily available in the marketplace would be great to have.”

JACQUES RAYNAUD

“My vision of the future is too dark to see great progresses, but my technical dream is a glass intrinsically ductile that would allow using it as steel.”

GIJS RIKKEN

“Glass that can be a digital screen, a light emitting source, a barrier against cold/heat and a sensor driven and deformable surface in one.”

ANONIEM

"New applications with VIG (vacuum). More integration of BIPV in facades (not visible). Extra thin glass application (Falcon, Spool, LEOFLEX etc.). This glass is 10 times stronger than normal glass (the same glass for your iPad). My dream is growing 2-dimensional materials (for example graphene) on glass."

ANONIEM

"Hologram..."

STEFFEN FEIRABEND

"Switchable glazing with aesthetic and energetic performance in large formats reliable and affordable. Relative thin vacuum glass instead of thick insulating glass units in large formats reliable and affordable to minimize the glass mass/weight (grey energy) and optimize the aesthetic."

ROB NIJSSE

"Adhesives and the casting of structural glass objects will play an important role in this."

RICHARD GREEN

"The options for Low-E coatings that are able to be used in a hermetically sealed cavity are wide. The number of coatings that can be exposed to the interior or a closed cavity facade (fed with desiccated air) are few. I would like to see development of more robust coatings with good SHGC performance.

To reduce the reflectivity of triple glaze units, it would be great to see a low cost anti-reflective coating for the central lite in IGU's.

Improvements in the availability and clarity for the design procedures of vacuum insulating glass units.

Non-viscous interlayers that can prevent crack propagation: i.e. elastic-plastic rather than visco-elastic."

TIM MACFARLANE

"Glass solutions where we use glass in the most environmentally friendly way getting greater energy efficiency with fewer plastics and chemical coatings."

ANONIEM

"Thin glass applications."

ANONIEM

"That's a big question. But here are a few examples: Thin thermally strengthened glass. Non-destructive measurement of glass strength. High performance coatings for scratch resistance. Remanufacturing glass windows and facades."

ANONIEM

"The first step will be a crystal clear structural silicone for a facade fully transparent. No limits in widths, especially for the coatings."

ANALYSE VRAAG 5

“Welke doorbraken in glas verwacht u in de komende vijf jaar? Van welke doorbraken droomt u?”

Deze vraag leverde diverse antwoorden op. De drie meest aangehaalde zaken zijn de verwachte doorbraak van dun glas, vacuümglas als de nieuwe vorm van isolatieglas, en de opkomst van grotere (en betaalbare) actieve beglazing. Actief of ‘slim’ kan door middel van een elektrische spanning van kleurtint veranderen om zo de doorgang van licht en warmte te verhinderen. (Zie hoofdstuk 2 van DEEL III voor meer informatie over actieve beglazing.) Daarnaast worden er nog veel andere doorbraken verwacht in de nabije toekomst, zoals structuren uit koud gebogen glas, meer dubbelwandige glasgevels, stijgend gebruik van BIPV en een verdere ontwikkeling in gegoten structurele glasobjecten. Maar ook betere, meer krasbestendige coatings worden tweemaal aangehaald. Verder wordt er over uiteenlopende zaken nagedacht, zoals de ontwikkeling van glasheldere structurele silicone, onbeperkte dimensies voor coatings, en niet-destructieve metingen van de sterkte van glas.

Op de vraag waarvan er gedroomd wordt, merken we hier en daar ‘corona-getinte’ antwoorden. Een respondent spreekt namelijk over antivirale aanraakschermen, Schneider denkt na over de rol van glas bij VR-toepassingen om online vergaderingen als echt te laten aanvoelen en nog iemand anders heeft het zelfs over hologrammen. Raynaud ziet de toekomst voorlopig te somber in om grote vooruitgang te zien gebeuren; wel droomt hij van ‘ductiel glas’ dat als staal zou kunnen ingezet worden. Laufs zorgt opnieuw voor de kritische noot en droomt er eerder van dat er wereldwijd miljoenen oude ramen met slechte U-waarden vervangen zouden worden door performantere IGU’s. Hij vindt het belangrijk om de energetische voetafdruk van de mensheid te verlagen en stoort zich aan de vele niche-onderzoeken over glas die niet met de grote problemen bezig zijn. Ook Macfarlane hoopt op glasoplossingen waarbij glas op een meer milieuvriendelijke manier zal gebruikt worden.

3.6 VRAAG 6/7: INVLOED VAN BOUWCODES

“How have building codes on structural glass influenced your design of glass structures?”

WILL LAUFS

“New German DIN code and also EUROCODE is way too complicated, too theoretical – stop using time-dependent strength approach for heat-strengthened and fully toughened glass, sorry but given long-term thermal compressive pre-stress we do not need any fracture mechanics here, even though theoretical folks have been spending their time on it for decades. Proper detailing for tolerances, install, movements and understanding of all the various building aspects are way, way more important than funny code load duration factors.”

JENS SCHNEIDER

“They give the main direction but do not influence the creativity too much.”

ANONIEM

“A huge part of our projects are out of existing codes. Codes are always good roads to follow but to discover new places we shall walk on the “least travelled path, and that has made all the difference” (Robert Frost, I guess).

Hopefully we are going to get the Glass Eurocode soon.”

FRANCIS SERRUYS

“If meant by glass 'structures' the glass composition, this is clearly influenced by the building codes. E.g. the U-value combined with the g-value have led to the development of triple silver coated glass with a selectivity > 2.

Building codes brought back the use of triple glazing.

The application of safety and security glazing (e.g. laminated safety glass; fire resistant or bomb blast resistant glazing) are heavily influenced by the building codes. E.g. glass used for balustrades.”

JOHN KOOYMANS

“Building codes in Canada are outdated and very frustrating at times to use. As engineers in Canada, we have to rely on and be aware of several design codes (ASTM and Euro) to ensure we are being responsible. The introduction of post-breakage behaviour as a code requirement has certainly driven our designs more and more now.”

JACQUES RAYNAUD

“It just helps in simple cases as complex ones are not covered by codes.”

GIJS RIKKEN

“Safety regulations ask for thicker panes of glass than aesthetically desired. Glass needs to become stronger and thinner.”

ANONIEM

"The main problem of building codes is that you always get the lowest quality possible. It's only securing a minimum level. Better is to describe the real condition which you have to prove. In this way more creativity pops up."

ANONIEM

"We have to follow the code, but understand them perfectly and the aim of those code."

STEFFEN FEIRABEND

"Codes are good guidelines even if the glass design is not fully covered by the given glass codes of a country. (I have worked on several projects not covered by the local codes). But as approximately 95% of the projects are covered by the design codes given, it is essential to have established good structural glass codes for the mass application."

ROB NIJSSE

"None: and I am happy for this. Codes only forbids things and I always have been able to prove by testing in the laboratory of the TU Delft on models scale 1 to 1 the structural capacity of innovative applications of glass."

RICHARD GREEN

"In the United States there are relatively few cases that are covered explicitly. These typically cover floors balustrades and hurricane glazing. Because of the lack of good standards and the corresponding lack of ways to specify appropriate levels of performance is driving my aspiration to have a good standard published."

TIM MACFARLANE

"We tend to have always worked ahead of the codes so not a lot but it's reassuring that someone is taking the time to compile them."

ANONIEM

"Limiting."

ANONIEM

"I work with R&D so I do not really follow building codes."

ANONIEM

"A little actually. There are no codes but just recommendation. The most things that you design are based on experience and research."

ANALYSE VRAAG 6

“Hoe hebben bouwcodes over structureel glas uw ontwerp van glasconstructies beïnvloed?”

Wat opvalt bij de antwoorden op deze vraag, is de negatieve connotatie die vaak terugkomt. Een kleine helft van de respondenten belicht de belemmerende aspecten die de bouwcodes met zich meebrengen. De scherpste kritiek komt wederom van Laufs; hij vindt de huidige bouwvoorschriften onnodig ingewikkeld en te theoretisch. Nijse is van mening dat bouwcodes over structureel glas alleen maar dingen verbieden en de professor is blij dat hij telkens de structurele capaciteit van innovatieve glastoepassingen heeft kunnen bewijzen in het laboratorium aan de hand van modellen op ware grootte. Iemand anders beweert dat men door de bouwcodes telkens de laagst mogelijke kwaliteit verkrijgt. Anderen zijn gematigder; zo zegt een respondent bijvoorbeeld dat de glascode de hoofdrichting geven, maar de creativiteit niet te veel beïnvloeden. Een bevroegde vindt dat men de bouwvoorschriften moet begrijpen, volgen en ook het doel ervan inzien.

Opmerkelijk is dat er meermaals aangehaald wordt dat enkel eenvoudige projecten geholpen zijn door de bouwcodes en dat hun complexe projecten uit de boot vallen. Feirabend stelt daarbij dat het toch essentieel is om goede voorschriften op te stellen aangezien ongeveer 95% van de projecten wél onder de bestaande ontwerpcode valt. Hoewel redelijk wat respondenten dus lijken te suggereren dat de bouwcodes over structureel glas hun ontwerpen weinig beïnvloeden, geeft Serruys enkele voorbeelden op welke manieren dat wel gebeurt. Hij zegt bijvoorbeeld dat de toepassing van veiligheidsbeglazing sterk beïnvloed wordt door de voorschriften over glas en denkt hierbij aan de keuze van glas dat gebruikt wordt in balustrades. Ook Kooymans geeft aan dat vereisten uit de normen (zoals over post-breukgedrag) zijn ontwerpen van glasconstructies beïnvloeden.

Kooymans vindt het dan ook vervelend dat de bouwcodes in zijn land verouderd zijn. Hij beweert dat je als ingenieur in Canada op de hoogte moet zijn van andere ontwerpcode (ASTM en Eurocodes) om ervoor te zorgen dat er verantwoordelijk gewerkt wordt. Dat komt overeen met het antwoord van Green. Hij zegt dat hij, vanwege het gebrek aan goede normen en manieren om de juiste prestatieniveaus te specificeren, ernaar streeft om een goede ontwerpstandaard te publiceren. Green is technisch voorzitter van de ASTM over structureel glas (Amerikaanse standaardisatieorganisatie) en heeft onder andere een adviserende rol bij de Eurocode over structureel glas. Macfarlane vindt het geruststellend dat er personen zijn die de tijd nemen om deze codes op te stellen. En iemand anders hoopt dat de Eurocode over glas er binnenkort komt.

3.7 VRAAG 7/7: MOTIVATIE OM TE SPECIALISEREN

“What was your personal motivation to specialise in glass structures?”

WILL LAUFS

“In the early 1990ties at RWTH Aachen Germany we were asked to consult many real-world load-carrying glass structures all still new at the time, so we did testing, helped with FEM calculations and other innovations (such as SJ Mepla software by Dirk or my scattered light laser measurement set-up) which back then were actually still really required by the practical world to give answers to open questions.”

JENS SCHNEIDER

“My experiences in a glazier’s shop during school holidays.”

ANONIEM

“I’ve always liked what is not evident and glass has surprised me every day since I met it in 1982.”

FRANCIS SERRUYS

“Working in the glass industry for more than 30 years I became passionate by glass and its applications.”

JOHN KOOYMANS

“I found the material very interesting and always enjoyed architecture and wanted a way to assist architects in realizing unique designs. My main focus was to understand the material so that we, as engineers, could protect the architect’s vision and help ensure the elements were buildable.”

JACQUES RAYNAUD

“Glass is a fascinating material by itself and which requires a lot of finesse in studies, which corresponds to my vision of projects.”

GIJS RIKKEN

“None specifically. It is one of many fields in which the boundaries of materials need to be pushed.”

ANONIEM

“Before I entered the glass industry, I was assistant of a Dutch architect for nearly 12 years. Commodities where not really my piece of cake.”

ANONIEM

“45 years ago I have read an article on the chemical toughen glass... same mechanical resistance as steel...”

STEFFEN FEIRABEND

“The beauty of building envelops and elegant structures with glass.”

ROB NIJSSE

“It is a beautiful, sustainable and potential strong material.”

RICHARD GREEN

“Structural use of glass is part of a tool box to design exquisite facades. It is an element that is often underutilized when it has capacities beyond its common uses.

The ability of glass to transmit and capture light has a mystique that is almost unique among building products. Its ability to define and control a built environment while still providing a visual connection with nature is unrivaled. The conundrum of solid and transparent with the ability to stand on something you can't see. The ability to simultaneously control the interior environment while seeing and reflecting the exterior world gives glass an enchanting quality and a beauty that is unrivaled.”

TIM MACFARLANE

“Curiosity and working in close collaboration with architects with the aspiration to use glass in ever more adventurous ways.”

ANONIEM

“Triggering material, engineering challenge.”

ANONIEM

“My specialty is not glass structures but more glass technology in broad term. Anyway, my motivation was that it is a fascinating material which a rather small community and still a lot to develop.”

ANONIEM

“The constant improvement in the knowledge of the material and the desire to push the boundary and remove the stereotype of ‘weak’ material.”

ANALYSE VRAAG 7

“Wat was uw persoonlijke motivatie om u te specialiseren in glasconstructies?”

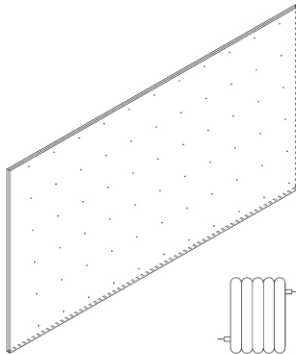
Bijna iedereen geeft op één of andere wijze aan dat zijn interesse gewekt werd dankzij het unieke en uitdagende karakter van het materiaal. Ze geraakten gepassioneerd door het mooie bouw materiaal en zijn verrast door de mogelijkheden die het biedt. De ambitie is er dan ook vaak om de grenzen te blijven verleggen.

Enkele respondenten gaan er wat dieper op in en geven een persoonlijk verhaal mee. Bij Schneider ontstond zijn passie voor glas tijdens zijn ervaringen in een glaswerkplaats. Laufs vertelt dat het glasavontuur voor hem begon begin jaren 90 wanneer hij werd gevraagd om dragende glasconstructies te onderzoeken die toen nog allemaal nieuw waren. Kooymans vertelt dat hij op zoek was naar een manier om architecten te helpen bij het realiseren van unieke ontwerpen. Hij wou het materiaal glas volledig begrijpen, zodat hij, als ingenieur, de visie van de architect kon waarborgen en ervoor kon zorgen dat de glaselementen ‘bouwbaar’ waren.

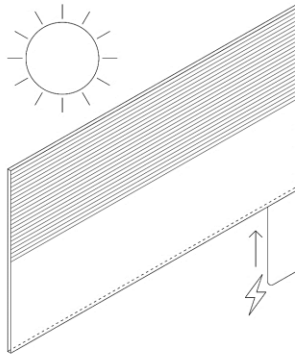
DEEL III

INNOVATIEVE GLASPRODUCTEN

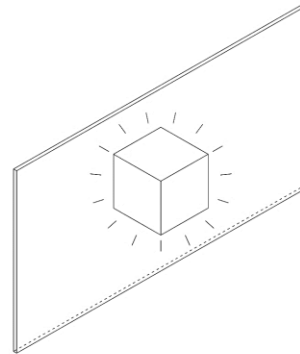
1. VACUUM GLAS



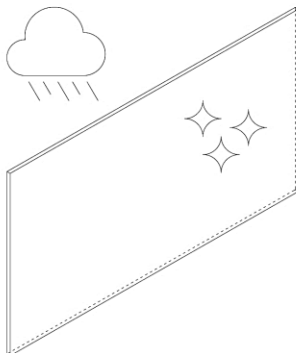
2. SLIM GLAS



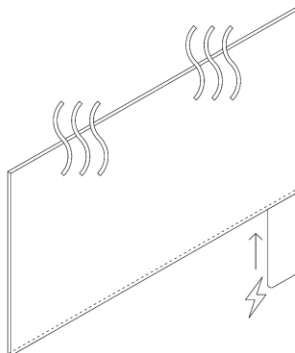
3. ANTIREFLECTEREND GLAS



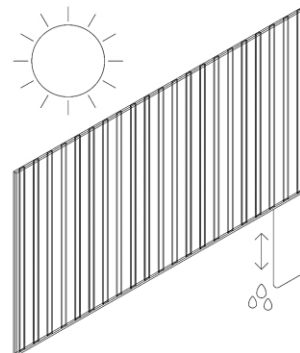
4. ZELFREINIGEND GLAS



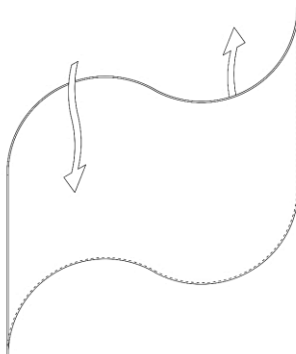
5. VERWARMD GLAS



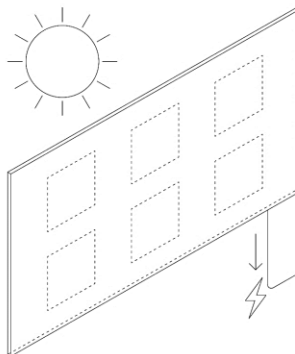
6. CAPILLAIR GLAS



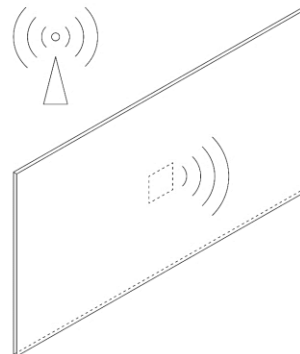
7. DUN GLAS



8. TRANSPARANTE BIPV



9. TRANSPARANTE ANTENNE



DISCLAIMER: De benamingen van de bovenstaande hoofdstukken zijn in geen geval tot stand gekomen om bepaalde producten of productietechnieken van specifieke bedrijven te promoten. De benamingen zijn volledig door de auteur zelf gekozen en komen niet noodzakelijk overeen met de termen die gebruikt worden in patenten of bouwcodes.

INLEIDING

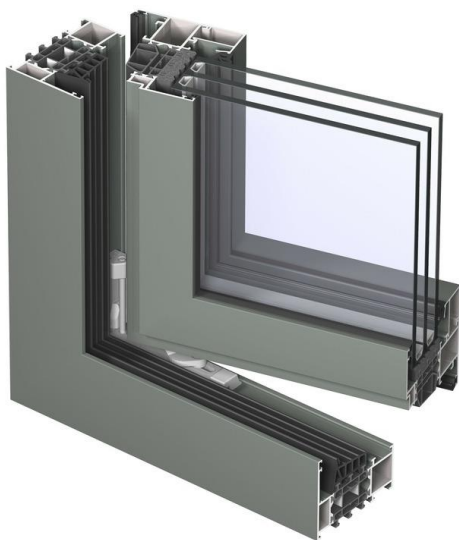
Als laatste grote deel van deze masterproef wordt een selectie van glasproducten toegelicht. Naast de verschillende productietechnieken en de mogelijkheden van bouwen met glas die werden besproken in DEEL I, bestaan er namelijk nog veel andere glastoepassingen. Deze glasproducten worden hier in een apart deel besproken omdat ze niet op een even volwaardige manier uitgelegd kunnen worden aan de hand van een voorbeeldproject, hetgeen wel mogelijk was in het eerste deel van de masterproef.

De antwoorden uit het tweede deel van de masterproef hielpen om de selectie van producten vast te leggen. Zo konden bijvoorbeeld vacuüm glas, slim glas en dun glas niet ontbreken in dit overzicht. Er werd uiteindelijk gekozen voor negen producten die geacht worden een meerwaarde te kunnen bieden in gebouwen en die het overwegen waard zijn om te implementeren in het ontwerpproces. Het merendeel van de producten heeft een link met het comfort van de gebruiker. Sommige producten worden reeds toegepast in gebouwen (vacuüm glas, slim glas, anti-reflecterend glas, zelfreinigend glas en verwarmd glas), andere dienen nog verder te worden verkend vooraleer ze gebruiksklaar zijn voor de architectuurwereld (capillair glas, dun glas, transparante zonnepanelen en transparante antennes).

De lijst is allesbehalve exhaustief en werd niet tot stand gebracht om enkele producten te promoten. Dit deel van de masterproef heeft enkel de bedoeling om de lezer te informeren over welke functies beglazing allemaal op zich kan nemen.

1. VACUÛM GLAS

De isolatie-eisen die opgelegd worden bij nieuwbouw en renovatie worden steeds strenger. In Vlaanderen mag de U-waarde van een raam niet hoger liggen dan $1,50 \text{ W/m}^2\text{K}$. Voor het glas op zich gelden nog strengere eisen; met name een maximale U-waarde van $1,10 \text{ W/m}^2\text{K}$. Vanwege de alsmaar strenger wordende normen, staat de ontwikkeling van meer performante beglazingsystemen niet stil. Zo is er enerzijds een transitie aan de gang in de keuze van afstandshouders. Vanwege de kleinere warmteverliezen, nemen kunststof afstandshouders (de zogenaamde 'warm edge spacers') het over van de aluminium versies. Anderzijds kan door het gebruik van een low-e coating de warmte grotendeels terug in de ruimte gereflecteerd worden, wat leidt tot een beter isolerend raam met een lagere U-waarde. Daarnaast is er ook de opkomst van drie- en viervoudige isolerende beglazing (Afb. 1.1). Door in een IGU meerdere spouwen te voorzien, verhoogt de weerstand tegen warmtetransmissie. Maar ook de dikte van de glasplaten, de breedte van de spouw(en) en de keuze van het gas in de spouw hebben een invloed op de isolatiewaarde van beglazing.



Afb. 1.1: Drievoudig glas. (© Reynaers Aluminium)

Het is echter geen optie om beglazingen nog dikker te maken met het oog op betere isolerende eigenschappen. Vanaf meer dan viervoudig isolatieglas heeft een extra spouw een verwaarloosbare invloed op de U-waarde. Bovendien heeft drievoudig isolatieglas reeds enkele nadelen. Vanwege de extra laag zijn er zwaardere kaders nodig om het glas te kunnen dragen. Dit extra gewicht kan ook zorgen voor een minder evidente toepassing in bijvoorbeeld schuiframen. Aan gewicht gerelateerde problemen kan eventueel tegemoetgekomen worden door de middelste glasplaat te vervangen door een plastieken film. Hoe dan ook is een toenemende dikte van IGU's nefast voor de lichttransmissie, en dus de transparantie van het raam.

Vacuüm glas kan aan deze problemen het hoofd bieden (Afb. 1.2). Vacuüm isolerend glas (wordt benoemd als VIG) is in weze een IGU: twee vlakke glasplaten worden gescheiden door afstandshouders en worden aan de rand afgesloten. Er zijn echter twee fundamentele verschillen. Ten eerste wordt er bij vacuüm glas geen zwaar gas ingespoten zoals bij klassiek dubbelglas, maar wordt de spouw vacuüm gezogen. Een vacuüm is een heel goede isolator. Als voorbeeld kan gedacht worden aan het principe van een thermoskan. Ten tweede de diktes: bij vacuümglas heeft de spouw een dikte van slechts 0,2mm of minder, en zijn de glasplaten 3 tot 5mm dik.

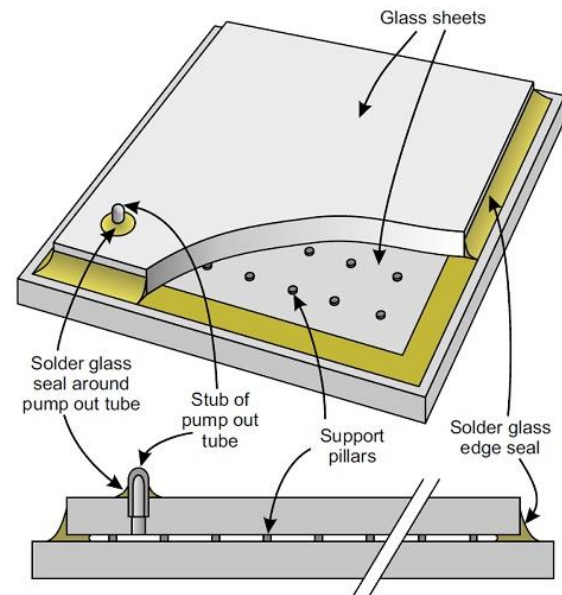


Afb. 1.2: Vacuüm isolerend glas. (© AGC Glass Europe)

Bij conventionele isolerende beglazing kan er in de spouw nog steeds ‘gasvormige’ geleiding van warmte of convectie optreden, en des te meer als het glaspaneel in een helling is geplaatst. De ‘luchtledige’ laag bij VIG's elimineert dit soort types warmteoverdracht, wat resulteert in een hoog niveau van thermische isolatie. Bovendien wordt bij vacuüm glas heel vaak een low-e coating gebruikt waardoor de warmteoverdracht door straling ook heel erg beperkt wordt, maar dat is op zich niet uniek aan vacuüm glas. De huidige commercieel verkrijgbare VIG's die gebruik maken van standaard uitgegloeid glas kunnen een U-waarde halen van $0,60 \text{ W/m}^2\text{K}$ in een structuur van één centimeter dik. Het is ook mogelijk om VIG's in te zetten in ‘hybride’ beglazingen, waarmee bedoeld wordt dat het vacuüm glas als één van de panelen in een IGU gebruikt wordt. Met een dergelijke configuratie kunnen er nog betere isolatiewaarden behaald worden.

De twee glasplaten worden uit elkaar gehouden door middel van heel kleine ‘steunpilaartjes’ die gerangschikt zijn in een patroon met vaste tussenafstanden (Afb. 1.3). Door het grote verschil tussen de druk in de spouw en de atmosferedruk, ondervindt een VIG veel druk op de buitenoppervlakken. De atmosferedruk duwt op de glasoppervlakken. Uitgerekend komt dit neer op krachten van ongeveer tien ton per vierkante meter. De kleine afstandshouders moeten deze grote krachten kunnen weerstaan en tegelijk de scheiding tussen de twee glasplaten kunnen blijven verzekeren. Hoe minder afstandshoudertjes er gebruikt worden, hoe groter de doorbuiging van de glasplaten tussen de steunpunten. Als er te veel spanning aangehouden wordt, kan dat zelfs leiden tot falen van het glas. Er moeten dus zeker voldoende afstandshouders gebruikt worden. Anderzijds wordt er door deze pilaartjes wel warmte doorgegeven. Er moet

een soort compromis gevonden worden tussen de warmteverliezen doorheen de afstandshoudertjes en de spanningen in het glas ten gevolge van de druk. Er worden tot op vandaag verschillende schikkingspatronen en verschillende materialen voor de steunpilaartjes getest.

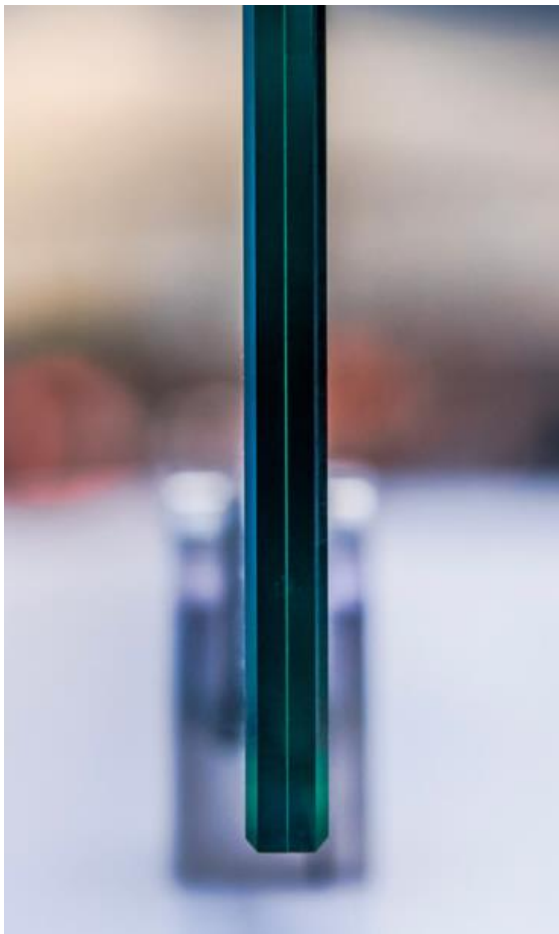


Afb. 1.3: Schematische weergaves van een VIG. (© Uit [2])

VIG's worden niet afgedicht met butyl (als primaire dichting) en silicone (als tweede afdichting) zoals dat gebeurt bij klassieke IGU's. Het butyl zou namelijk in de spouw gezogen worden bij het vacuümtrekken en siliconen voegen zijn niet voldoende gasdicht. Daarom wordt er bij vacuüm isolerend glas op een andere wijze afgedicht. De meest gebruikte methode is deze van het soldeerglas. Daarbij wordt de voeg tussen de twee glasplaten met gesmolten glas hermetisch afgesloten. Dergelijke glasafdichting moet instaan voor een perfecte, lekvrije perimeterafdichting zodat het vacuüm niet verloren gaat. Als de afdichting het begeeft, faalt namelijk het hele VIG-systeem. Om een goede aanbreng mogelijk te maken is de rand vaak ‘getrapt’ door één glasplaat iets kleiner te dimensioneren dan de andere (Afb. 1.3).

Een 'glasvoeg' is veel stijver dan de andere genoemde klassieke afdichtingsmiddelen. Dit gebrek aan soepelheid kan ervoor zorgen dat de glasvoeg faalt wanneer er te veel spanning op komt, bijvoorbeeld door een te groot temperatuurverschil tussen de twee glasplaten. Tegenwoordig zijn de meeste problemen hieromtrent wel opgelost en wordt de hermetische randafdichting van een VIG net als een troef gespeeld tegenover ander conventionele IGU's die een minder betrouwbare afdichting hebben.

Door middel van een kleine tube waarop een vacuümsysteem wordt aangesloten, wordt het glaspaneel vacuümgetrokken. De 'ontluchtingstube' zit vast in het glaspaneel en wordt eveneens met soldeerglas hermetisch afgesloten om luchtlekken te vermijden. Deze tube wordt in de hoek gepositioneerd om het zicht niet te veel te hinderen (Afb. 1.3).



Afb. 1.4: Fineo® vacuüm glas. (© AGC Glass Europe)

Het concept van vacuüm isolatieglas werd reeds in 1913 voor het eerst beschreven door A. Zoller in een Duits octrooi. Daarna was er een buitengewoon lange periode tussen dit patent en de eerste 'realisatie in het laboratorium' in 1989. Nadien werd relatief snel (1996) het eerste commerciële VIG-product gelanceerd en verkocht in Japan door Nippon Sheet Glass Group (NSG Group). Toch begint de technologie pas de laatste jaren internationaal door te breken en daardoor kan er nog gesproken worden van een 'innovatief' product binnen het landschap van isolatieglas.

Voorbeelden van aanbieders zijn onder andere LandGlass met LandVac®, Pilkington (onder de NSG Group) met Spacia®, Guardian Glas met Guardian Vacuum IG™ en AGC met Fineo® (Afb. 1.4). In vergelijking met de productie van conventionele IGU's, zijn er nog maar weinig fabrikanten die VIG's produceren en verkopen. Daardoor blijft de prijs van vacuümgeïsoleerde beglazing voorlopig vrij hoog in vergelijking met de alternatieven op de markt.

Hoewel VIG ondertussen een vrij gevestigde technologie is, blijft er nog ruimte voor verdere ontwikkeling. Bijvoorbeeld bij de versies met gehard glas zijn er nog uitdagingen. Enerzijds is de vlakheid van de glasplaten belangrijk, opdat de belasting als gevolg van atmosferische druk gelijkmatig over de steunpunten zou worden verdeeld. Deze vlakheid is eveneens gewenst zodat de steunpunten mooi op hun plaats geklemd kunnen blijven zitten. Vanwege het hardingsproces is het echter geen sinecure om erg vlakke oppervlakken te behouden bij gehard glas. Anderzijds heeft het soldeerglas waarmee de rand van de VIG wordt dichtgemaakt bij voorkeur een niet te hoge smelttemperatuur. Bij een te hoge temperatuur tijdens het proces is er namelijk gevaar op 'ontharding' van het glas door het opnieuw opwarmen.

Daarnaast gaat ook de ontwikkeling van afstandhouders verder, zo wordt er onder andere verder getest met isolerende materialen of wordt de mogelijkheid onderzocht om de verbinding te maken door kleine gebieden op de glasplaat te smelten. Tegenwoordig is het ook mogelijk om de randafdichting van een VIG aan te brengen binnen een vacuümkamer, waardoor er niet langer een hinderlijke pompuitlaat nodig is. Op deze manier wordt onder ander Fineo® vacuüm glas van AGC gemaakt.

Fineo® is beschikbaar in diktes van 6,7 millimeter tot 11,7 millimeter. De vacuümruijnte is erg dun, in dit geval een tiende van een millimeter, dus de totale dikte van de structuur is telkens slechts iets groter dan de gecombineerde dikte van de twee glasplaten. Niettegenstaande deze zeer slanke beglazing, wordt er een U-waarde

van 0,4 tot 0,7 W/m²K bereikt. Vacuüm glas is ongeveer vier keer dunner en een derde lichter dan drievoudige beglazing, maar kan het qua thermische isolerende eigenschappen opne-men tegen drievoudige IGU's (die vaak in de range van 0,7 tot 0,9 W/m²K zitten). Ook qua geluidsisolatie moet vacuüm glas trouwens niet onder doen voor drievoudige beglazing. Ten slotte is dankzij de slankheid van vacuüm glas de doorlating van licht beter.

De combinatie van hoogwaardig thermisch isolerende maar toch ranke beglazing opent mogelijkheden voor renovatie- en restauratietoepassingen. Enkelglas kan bijvoorbeeld vernieuwd worden zonder dat het raamkader moet vervangen worden. Dat kan handig zijn wanneer het beeld van een historische gevel dient be-waard te blijven.

Referenties VACUÛM GLAS

TEKST

- **[1]** Belis, J. (2018). *Glass Structures*. (Academiejaar 2018–2019). E044630. Universiteit Gent
- **[2]** *Vacuum Insulating Glass – Past, Present and Prognosis*. (2019, 19 maart). Geraadpleegd van <https://www.glassonweb.com/article/vacuum-insulating-glass-past-present-and-prognosis>
- **[3]** Yost, P. (2018, 22 oktober). *R-10 Vacuum-Insulated Glazing. For real this time?* Geraadpleegd van <https://www.buildinggreen.com/blog/r-10-vacuum-insulated-glazing>
- **[4]** AGC Glass Europe. (2018, 15 oktober). *AGC Glass Europe investeert in vacuüm beglazing met zeer hoge isolatieprestaties*. Geraadpleegd van <https://www.agc-glass.eu/nl/news/press-release/agc-glass-europe-investeert-vacuum-beglazing-met-zeer-hoge-isolatieprestaties>
- **[5]** AGC Glass Europe. (2020). *FINEO Glass*. Productfiche

AFBEELDINGEN

- **Afb. 1.1:** © Reynaers Aluminium. Geraadpleegd van <https://www.reynaers.be/nl-BE/architecten/producten/ramen/masterline-8-hi-0?specs=1>
- **Afb. 1.2:** © Jean-Michel Byl, & © AGC Glass Europe. ID: 10893. Naam: Fineo Vacuum Double Glazing. 2018. België. Onderschrift: “*As the fruit of a joint development agreement between AGC and Panasonic, AGC Glass Europe is to invest in production of vacuum glazing at its plant in Lodelinsart (Belgium), a technology that offers very high energy performance.*” Onderschrift 2: “*Press release on www.agc-glass.eu.*”. Uit [4]
- **Afb. 1.3:** Uit [2]
- **Afb. 1.4:** © AGC Glass Europe. Geraadpleegd van <https://www.fineoglass.eu/nl/>

2. SLIM GLAS

Een efficiënte bescherming tegen het doorlaten van warmte is belangrijk voor het thermisch comfort van een gebouw. In de winter wordt er verwacht dat de opgewekte warmte afgeschermd wordt en in de ruimte blijft, niet enkel voor het comfort van de gebruikers, maar ook om de stookkosten te reduceren. Ook in de zomer kan het doorlaten van warmte, in dit geval van buitenaf, voor discomfort zorgen. Zeker bij glasgevels moet opgelet worden voor oververhitting. Een degelijke bescherming wordt dan ook gevraagd door de gebruiker, en dit evengoed met het oog op het minimaliseren van de koellasten. Het gebruik van low-e coatings kan hierbij helpen (zie *addendum 3*). Daarnaast kunnen zonweringen ingezet worden om de zonnestralen te blokkeren vooraleer ze op het glas kunnen komen.

Vaste zonweringen hebben soms het nadeel dat het zicht belemmerd wordt en dat ze dus als vervelend kunnen worden ervaren wanneer de gebruiker ze niet nodig heeft (Afb. 2.1). Als reactie hierop zijn er verschillende soorten beweegbare zonweringen die (eventueel automatisch) tijdelijk voor de nodige schaduw op de gewenste plekken kunnen zorgen en zo een bescherming tegen verblinding of oververhitting kunnen bieden. Toch zijn zonweringen niet altijd even vanzelfsprekend bij hoogbouw of voor gevels in gebieden met hoge windsnelheden.



Afb. 2.1: Vaste 'structurele' zonwering worden boven of voor glaspartijen geplaatst. (© solyscreen.nl)

Een mogelijk alternatieve manier om de gestelde problematiek aan te pakken, is door gebruik te maken van slim glas. Slim glas is de verzamelnaam voor beglazingen waarbij de tint van het glas kan veranderen. Door het glas minder transparant te laten worden, kan het aandeel zon- en daglicht dat het raam penetreert gecontroleerd worden. Het gebruik van slimme of 'dynamische' ramen in een gevel heeft als twee grootste doelen het verhinderen van verblinding en het regelen van de hoeveelheid warmte dat door de beglazing gaat. Op deze manier kan er enerzijds aan de comfortbehoeftes voldaan worden en anderzijds bespaard worden op energieverbruik. Gezien slim glas van kleur verandert, wordt het ook ingezet in binnenwanden om bepaalde ruimtes te kunnen afschermen.

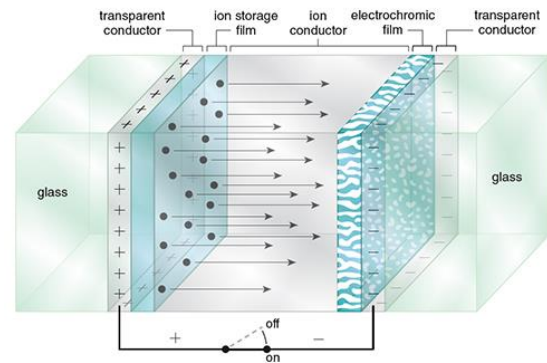
Er zijn twee grote types slimme beglazingen. De eerste categorie is *passief* slim glas. Passief glas reageert automatisch op niet-elektrische prikkels. Er bestaat enerzijds fotochromisch glas dat van kleur wijzigt als de lichtinval wijzigt (foto: 'licht', chromisch: 'van kleur wijzigen'), en anderzijds thermochromisch glas dat van kleur wijzigt wanneer de buitentemperatuur verandert (Afb. 2.2). Passief slim glas heeft het nadeel dat het niet handmatig kan worden bediend of gecontroleerd.



Afb. 2.2: Thermochromisch glas verdonkert automatisch naarmate de warmtebelasting toeneemt (links). Het raam keert terug naar een meer heldere staat naarmate het zonlicht afneemt (rechts). (© Pleotint®, PPG Industries)

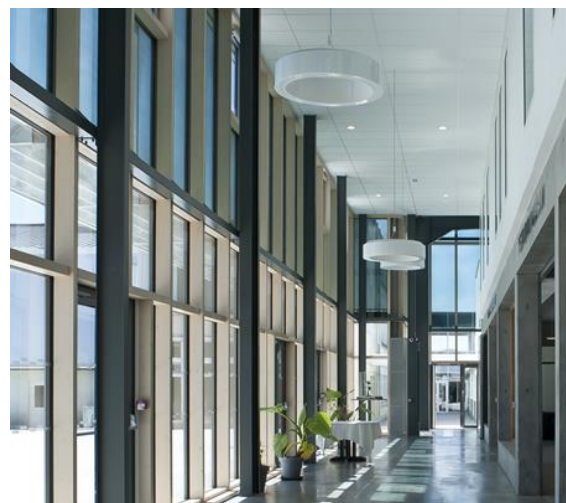
De tweede soort is *actief* slim glas. Actief slim glas reageert op een elektrische stimulus en is handmatig of automatisch te bedienen. Er dient een spanning aangelegd te worden om het glas van tint te laten veranderen. Er zijn drie verschillende types actief glas: elektrochromisch glas, polymer dispersed liquid crystal devices (PDLC's) en suspended particle devices (SPD's). Gezien in deze categorie de meeste ontwikkelingen en toepassingen plaatsvinden, wordt met slim glas vaak actieve beglazing bedoeld. De drie types actieve beglazing worden hierna verder besproken.

Elektrochrome beglazing bestaat uit twee glasplaten die allebei voorzien zijn van een indiumtinoxide-coating (Afb. 2.3). De glasplaten zijn met hun gecoate zijde naar elkaar gericht en worden op korte tussenafstand van elkaar geplaatst. De coatings dienen als geleidende films en zijn uiterst dun zodat je erdoor kunt kijken, zoals bij alle coatings op glas overigens. Bovenop de coatings worden elektrodes aangebracht: op de binnenste glasplaat de 'actieve' elektrode wolframoxide (WO_3) en op de andere glasplaat de 'tegenelektrode' lithium-vanadiumoxide (type $\text{Li}_x\text{V}_y\text{O}_z$). Tussen deze twee elektrodes kunnen elektronen van kant wisselen naargelang de spanning. Daar is wel een transparante polymeroplossing met lithiumionen (Li^+) voor nodig. Als er een spanning op de contacten (geleidende coatings) wordt aangebracht, zullen de lithiumionen bewegen van de ene elektrode op de binnenste glasplaat naar de andere elektrode op de buitenste glasplaat. Op deze zijde vindt er dan een chemische reactie plaats. Om de ladingneutraliteit te herstellen, zal de wolframoxide (WO_3) namelijk de lithiumionen (Li^+) opnemen in zijn kristalrooster. Deze gevormde laag van Li_xWO_3 reflecteert licht en warmte. Daardoor oogt het glas donkerder.



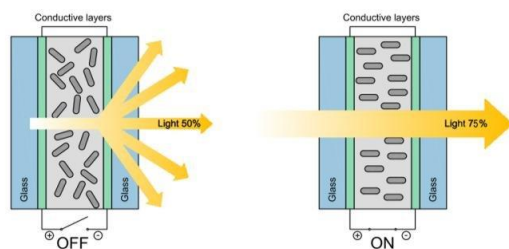
Afb. 2.3: De opbouw van een elektrochrom glaspaneel. (© americanscientist.org)

De lithiumionen blijven op deze plek totdat de spanning wordt omgekeerd, wat in dit geval betekent tot wanneer het circuit wordt verbroken. Dan zullen de ionen zich terug naar hun initiële plek begeven en zal het glas opnieuw transparant ogen. Bij elektrochrom glas is er geen stroom nodig om de ramen in hun heldere of donkere staat te behouden, alleen om ze van de ene naar de andere modus te veranderen. Elektrochrom glas is transparant wanneer er geen spanning op staat. Er kan gevarieerd worden met de hoeveelheid spanning die wordt aangelegd om zo het aantal vrijgekomen elektronen te regelen. Zo is er een controle van de intensiteit van de kleurverandering mogelijk (van lichtere tot donkere blauwtinten) en bijgevolg verschillende mate van zonwering (Afb. 2.4).



Afb. 2.4: Het Lycée Sainte Catherine in Frankrijk maakt gebruik van elektrochromisch glas. Op deze foto is de bovenste rij ramen verduisterd. (© Saint-Gobain SageGlass)

Het tweede type actieve beglazing, PDLC's, maakt gebruik van vloeibare kristallen. Deze bevinden zich in een transparante polymeermatrix tussen twee glasplaten. Opnieuw is elke glasplaat voorzien van een geleidende coating om elektrodes te vormen. Als er een circuit gesloten wordt tussen deze twee elektrodes vormt er zich een elektrisch veld tussen de glasplaten. Dan staat het raam 'aan' en zullen de vloeibare kristallen zich richten volgens dat elektrisch veld. Door deze uitlijning kan het licht zonder problemen door het glaspaneel passeren. In de 'uit'-stand daarentegen, dus wanneer er geen stroom voorzien wordt, zijn de vloeibare kristallen willekeurig gericht. Daardoor wordt het invallende licht verstrooid en is het slim glaspaneel ondoorzichtig (Afb. 2.5).



Afb. 2.5: Werking van een PDLC-glaspaneel. (© M. Casini)

De moleculen van de vloeibare kristallen hebben een bepaalde mate van uitlijning. Daardoor hebben ze een anisotroop karakter. Dat wil zeggen dat hun eigenschappen afhankelijk zijn van de richting waarin ze worden bekeken, wat niet gebruikelijk is bij vloeistoffen. De mate van lichttransmissie doorheen de vloeibare kristallen hangt af van de kant van waaruit het licht komt.

Moleculair gezien kunnen vloeibare kristallen zich bovendien op diverse manieren oriënteren. Er zijn drie verschillende fases: de nematische fase, de smectische fase en de cholesterische fase, respectievelijk opgesomd volgens naar een meer geordende moleculaire schikking. Bijvoorbeeld bij de cholesterische fase vormen de moleculen van de vloeibare kristallen een vlak-spiraal, wat tot gevolg heeft dat het licht er

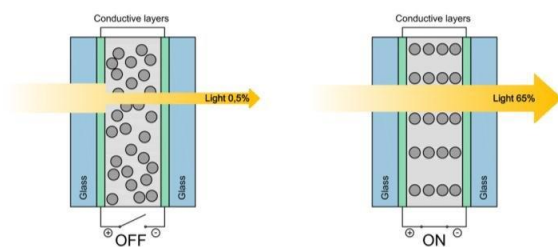
nog moeilijk door kan. Bij de moleculaire structuur van de kristallen is het principe dus 'omgekeerd': hoe meer geordend, hoe minder transparant. In slim glas wordt er gebruik gemaakt van nematische kristallen omdat deze het minst moleculair geordend en dus het meest transparant zijn. De schikking van de moleculaire structuur mag niet verward worden met de algemene schikking van de vloeibare kristallen, die zich volgens de richting van het elektrisch veld oriënteren wanneer het raam 'aan' staat.

Bij elektrochromisch glas is het in de donkere stand nog steeds mogelijk om door het glas te kijken. PDLC's hebben daarentegen een meer opaak resultaat. Daarom, en samen met de uiterst snelle omschakeltijd van transparant naar opaak, wordt slim glas met vloeibare kristallen vaak ingezet in ruimtes waar snel privacy gewenst is, zoals in ziekenhuiskamers of vergaderruimtes (Afb. 2.6).



Afb. 2.6: Boven: De schuifdeur is volledig opaak. Onder: Enkel het onderste paneel is verduisterd. (© Polytronix)

Het laatste type van actieve slimme beglazing, namelijk SPD, is qua werkingsprincipe vrij gelijkwaardig aan deze met de vloeibare kristallen. SPD staat voor suspended particle device. Ook bij deze techniek ‘zweven’ er deeltjes willigkeurig rond die, wanneer er geen stroom op het raam zit, het licht verstrooien en absorberen, en daardoor het raam ondoorzichtig maken. Wanneer er een spanning wordt aangelegd, worden de zwevende deeltjes uitgelijnd en kan het licht door (Afb. 2.7).

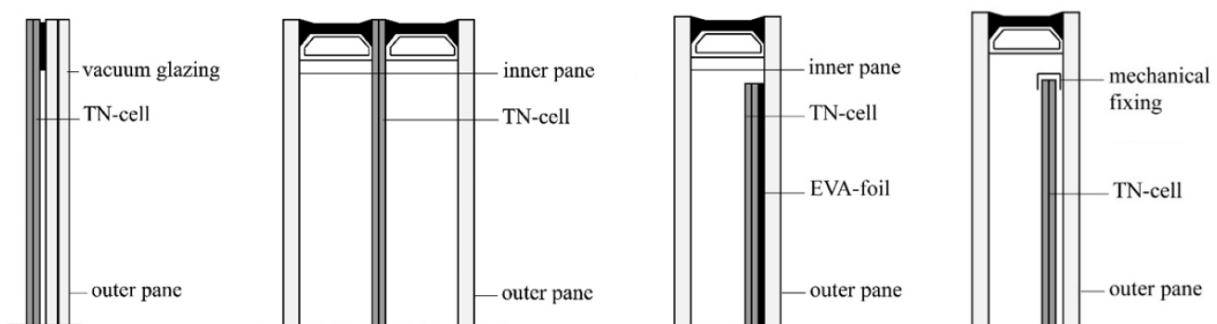


Afb. 2.7: Werking van een SPD-glaspaneel. (© M. Casini)

Door de spanning van de film te variëren, varieert ook de oriëntatie van de zwevende deeltjes, waardoor de tint van de beglazing en de hoeveelheid doorgelaten licht kan worden gereguleerd. Dat kan een voordeel zijn in vergelijking met de technologie van de vloeibare kristallen. Bij PDLC's heb je namelijk slechts twee standen en gaat het raam dus steeds van het ene uiterste naar het andere.

Elektrochromisch glas heeft twee voordelen in vergelijking met haar tegenhangers. Ten eerste het feit dat de transparante ‘modus’ deze is wanneer het raam ‘uit’ staat, dus wanneer er geen elektriciteit verbruikt wordt. Ten tweede is er ook geen energie vereist om een bepaalde modus aan te houden, wat wel het geval is met de andere systemen. Daarentegen duurt het bij elektrochrome beglazing enkele minuten om te switchen van kleurtint, terwijl het bij de andere systemen een kwestie is van enkele seconden, tot zelfs milliseconden. Bovendien levert elektrochromisch glas het minst opake resultaat op, en kan het bijgevolg de minste privacy bieden.

Slimme glaspanelen kunnen als het middelste paneel in een drievoudige IGU geplaatst worden, ofwel gekleefd of mechanisch bevestigd worden tegen de binnenkant van één van de glasplaten in een IGU. Een slim glaspaneel kan ook op vacuüm glas bevestigd worden, maar dan is het minder goed beschermd (Afb. 2.8).

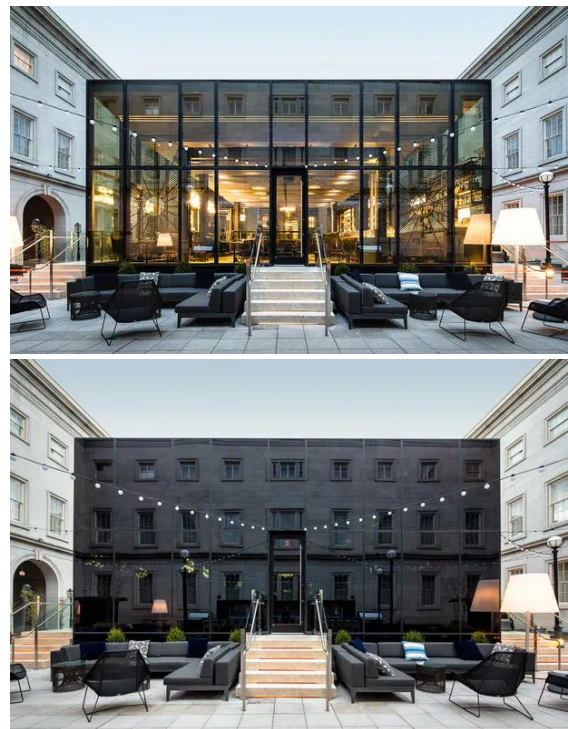


Afb. 2.8: Mogelijke integratiemethoden van slim glas in isolerende beglazingseenheden. TN-cell staat voor ‘twisted nematic cell’. Op deze tekeningen betreft het dus de techniek met vloeibare kristallen. (© M. Husser, ILEK. Uit [2])

Het principe van slim glas bestaat al tientallen jaren, maar tot op vandaag gebeuren er nog steeds verbeteringen, aanpassingen of toevoegingen aan de systemen. In 2016 bijvoorbeeld werd er door M. Husser, W. Haase, P. Hoß en W. Sobek verder gewerkt op het principe van slim glas met vloeibare kristallen. Ze ontwikkelden een versie waarbij het mogelijk is om de slimme beglazing op te delen in kleine gebieden (zogenoemde pixels) die individueel schakelbaar zijn. De doorlatendheid van elke pixel kan onafhankelijk geregeld worden en dus ook de hoeveelheid licht en warmte die er doorkomt. Het voordeel van de snelle schakeltijd van vloeibare kristallen blijft in dit systeem uiteraard van toepassing. Dit systeem heeft vanuit architecturaal standpunt als grootste voordeel dat er meer gericht kan verblind worden zonder een verdeling van meerdere glasplaten in een raam te moeten maken.

Een ander voorbeeld is het onderzoek van Mark Allen en Alessandra Luna-Navarero (onder leiding van dr. Mauro Overend) aan de Universiteit van Cambridge. Zij doen experimenten naar hoe men via de registratie van gelaatsuitdrukkingen de kleur van glas automatisch kan laten veranderen. Bij verblinding hebben mensen namelijk een typische mimiek die herkend zou kunnen worden, waarbij het dan de bedoeling is om het glas automatisch te laten aanpassen aan de noden.

Ten slotte kan er gesteld worden dat wanneer slim glas in een gevel gebruikt wordt, er steeds een compromis moet gezocht worden tussen het tegengaan van warmte en verblinding enerzijds en voldoende daglichttoetreding anderzijds. In het ontwerp wordt er best voor gezorgd dat niet alle glaspanelen van een gevel in één keer verduisterd worden. Als slimme beglazingssystemen verstandig worden ingezet, namelijk een gerichte verblinding van de glasgevel op de plaatsen waar het gewenst is, kunnen deze misschien voorzichtig de ‘gordijnen van de toekomst’ genoemd worden (Afb. 2.9).



Afb. 2.9: Het Dirty Habit Restaurant in Washington D.C. maakt gebruik van elektrochrom glas. Boven: Alle panelen in de meest transparante modus. Onder: Alle panelen in de donkerste modus. (© archinect.com)

Referenties SLIM GLAS

TEKST

- **[1]** Reyniers, M.-F. (2018). *Building Chemistry. Part 3. Inorganic polymeric construction materials*. (Academiejaar 2018–2019). E052730. Universiteit Gent
- **[2]** Husser M., Haase W., Hoß P., & Sobek W. New Possibilities of Sun and Glare Protection with a Structured Switchable Glazing. Belis, Bos & Louter. (2016) *Challenging Glass 5 – Conference on Architectural and Structural Applications of Glass*. UGent. ISBN 978-90-825-2680-6
- **[3]** GPD Glass Performance Days. (2020). *Rebecca Hartwell | User-centred Control of Automated Shading for Intelligent Glass Facades* [Videobestand]. *YouTube*. Geraadpleegd van <https://www.youtube.com/watch?v=6RcuCey4S3M>

AFBEELDINGEN

- **Afb. 2.1:** Geraadpleegd van <https://www.solyscreen.nl/buitenzonwering/structurele-zonwering>
- **Afb. 2.2:** Geraadpleegd van <https://ceramics.org/ceramic-tech-today/ppg-to-offer-thermochromic-window-system-with-pleotints-sunlight-responsive-interlayer>
- **Afb. 2.3:** Geraadpleegd van <https://www.americanscientist.org/article/switching-colors-with-electricity>
- **Afb. 2.4:** © Saint-Gobain SageGlass. Geraadpleegd van <https://www.sageglass.com/fr/references/lycee-sainte-catherine-france>
- **Afb. 2.5, 2.7:** © M. Casini. Uit: Casini, M. Smart windows for energy efficiency of buildings. *International Journal of Civil and Structural Engineering – IJCSE Volume 2: Nummer 1*. [ISSN: 2372-3971]
- **Afb. 2.6:** © Polytronix, Inc. Geraadpleegd van <https://continuingeducation.bnppmedia.com/courses/polytronix-inc/smart-glass-solutions-for-interior-commercial-structures/4/>
- **Afb. 2.8:** © M. Husser, ILEK. Uit [2]
- **Afb. 2.9:** Geraadpleegd van <https://archinect.com/firms/project/150100806/glass-box-in-dc/150100811>

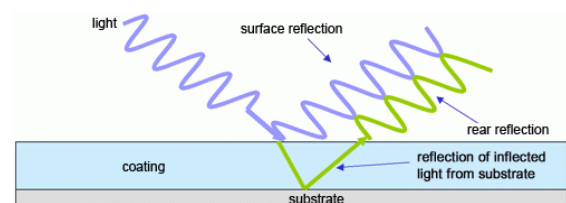
3. ANTI-REFLECTEREND GLAS

Winkels en showrooms, zeker wanneer ze in een winkelstraat of een winkelcentrum gelegen zijn, profiteren van een goede weergave van hun goederen. De visuele connectie tussen 'binnen' en 'buiten' kan cruciaal zijn om mogelijke kopers aan te trekken. Volgens deze logica hebben winkelpuien vaak grote glasoppervlakken.

Helaas heeft conventioneel natronkalkglas in sommige (licht)omstandigheden merkbare reflecties, waardoor voorbijgangers eerder de gespiegelde omgeving zien in plaats van de producten. Dat is jammer, want door deze hinderlijke reflecties schiet het materiaal in dat geval zijn doel voorbij (glas wordt hier specifiek gekozen voor zijn transparantie). De oplossing hiervoor kan glas met een anti-reflecterend coating zijn ('ontspiegelend glas').

Het principe is dat de reflecties op het buitenoppervlak van de (zilver)coating en deze op het binnenoppervlak destructief interfereren. Door de juiste dikte te kiezen, vindt de gewenste verschuiving van de lichtgolven plaats en heffen ze elkaar op (Afb. 3.1). Dat resulteert in een drastische vermindering van de zichtbare reflecties,

tot wel 16 keer minder 'spiegeling' in vergelijking met vlakglas zonder dergelijke coating. Het resulteert ook in minder verblindingsproblemen en bovendien is er weinig tot geen waarneembare kleurverschuiving. Deze 'magnetron-ge-sputterde' coating wordt aangebracht op vlak glas en kan zodoende gebruikt worden in glas-laminaten of in IGU's.



Afb. 3.1: Werking van een anti-reflecterende coating.
(© NIDEK CO., LTD)

Winkels die anti-reflectief glas gebruiken, kunnen hun producten meer waarheidsgetrouw tonen en zijn meer uitnodigend voor voorbijgangers om de winkel binnen te gaan (Afb. 3.2). De impressie wekken dat niets de kijker scheidt van het object naar waar hij kijkt, terwijl het achterliggende object toch beschermd wordt, is ook zeer gewild voor het tentoonstellen van objecten in musea.



Afb. 3.2: Twee voorbeelden van winkelpuien waar zowel ongecoat glas als anti-reflecterend glas gebruikt werd. (links: © Clear-sight, rechts: © Macada Innovision)

Referenties ANTI-REFLECTEREND GLAS

TEKST

- **[1]** Reyniers, M.-F. (2018). *Building Chemistry. Part 3. Inorganic polymeric construction materials*. (Academiejaar 2018–2019). E052730. Universiteit Gent
- **[2]** Gulnick, J. (2019). The Psychology of Perception, Threshold, and Emotion in Interior Glass Design. *GPD Proceedings 2019*. 432–436.

AFBEELDINGEN

- **Afb. 3.1:** © NIDEK CO., LTD. Geraadpleegd van https://www.nidek-intl.com/product/coating_technical/coating_type.html
- **Afb. 3.2 Links:** © AGC Glass Europe. Geraadpleegd van <https://www.agc-glass.eu/nl/news/press-release/clearsight-geoptimaliseerd-antireflecterend-glas>
- **Afb. 3.2 Rechts:** © Macada Innovision BV. Geraadpleegd van <https://www.macada-innovision.nl/nl/spiegels-en-glas/anti-reflectie-glas>

4. ZELFREINIGEND GLAS

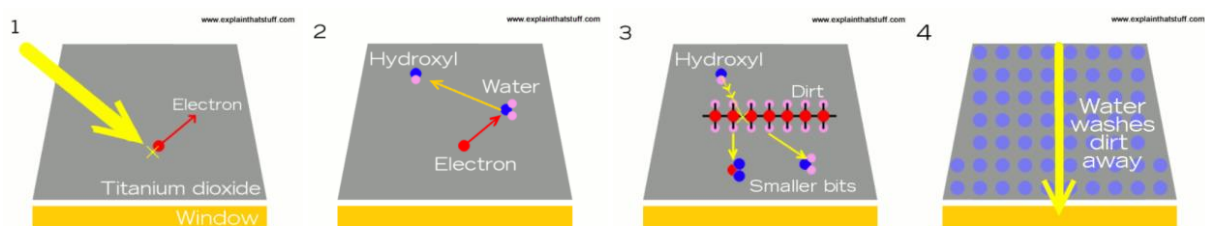
Grote gebouwen met veel beglazing hebben vaak hoge onderhoudskosten. Voor hoge kantoorgebouwen bijvoorbeeld is er op regelmatige basis nood aan gespecialiseerde firma's die de beglazing op grote hoogte kunnen schoonmaken. Afhankelijk van de omgeving en de oriëntatie van een glasgevel, kan er zich meer of minder vuilafzetting in loop der tijd voordoen. Zo krijgen bepaalde gevels van een gebouw soms duidelijk meer slagregen ('wind driven rain') te verduren, naargelang de plaatselijke hoofdwindrichting. Regen brengt vuiligheid met zich mee en bij het opdrogen kunnen er vieze plekken achtergelaten worden. Anderzijds, zal droog organisch vuil zich ophopen bij ramen met weinig contact met regenwater.

Voor dergelijke moeilijk toegankelijke ramen of ramen die vaak vuil zijn, werd er een nieuw glasproduct ontwikkeld: zelfreinigend glas. Dat is glas met een titaniumdioxide-coating die het daglicht en de regen gebruikt om zichzelf te reinigen. Dit kan de schoonmaakkosten drastisch verlagen. Voorbeelden van zelfreinigend glas zijn Pilkington Activ™ en SGG (Saint-Gobain Glass) BIOCLEAN®.

Wanneer UV-straling de titaniumdioxide-coating raakt, komen er elektronen vrij uit de coating. UV-licht is trouwens ook in overvloed aanwezig op bewolkte dagen, dus een directe inval van zonlicht is niet noodzakelijk (Afb. 4.1 stap 1). De losgekomen elektronen reageren met water uit de lucht in de nabijheid van het oppervlak en

breken dat water in hydroxylradicalen (OH) (Afb. 4.1 stap 2). Deze OH-moleculen zijn de belangrijkste stoffen bij het principe van zelfreinigend glas, ze bestrijden namelijk de verschillende soorten koolstofmoleculen waaruit organisch vuil bestaat. De chemische bindingen worden verbroken en veranderend in kleinere, onschadelijke stoffen zoals CO₂ en water (Afb. 4.1 stap 3). Onder andere stuifmeel, hars, vogelpoep of bladresten worden actief afgebroken en blijven derhalve niet langer stevig vastgehecht aan het glasoppervlak.

Daarnaast maken de hydroxylradicalen het glas hydrofiel ('houden van water'). Bij normaal glas bevinden zich bij een regenbui allemaal druppels in bollen en strepen op het glasoppervlak. Bij zelfreinigend glas daarentegen zal er een gelijkmatige film regenwater over het ganse oppervlak gevormd worden. Dankzij deze mooie verdeling van de watermoleculen, wordt het reeds afgebroken vuil op de glasplaat ten volle meegenomen. Het geheel van regen en vuil wordt als het ware als een soort automatische ruitenswisher van de glasplaat weggespoeld (Afb. 4.1 stap 4). Zelfreinigend glas zorgt dus ook voor een betere doorkijk tijdens een regenbui, gezien er weinig druppels op het glasoppervlak blijven. Nadat het geregend heeft, droogt het zelfreinigend glas dan ook sneller op in vergelijking met conventioneel glas, en bovendien zonder vlekken of strepen achter te laten (Afb. 4.2).



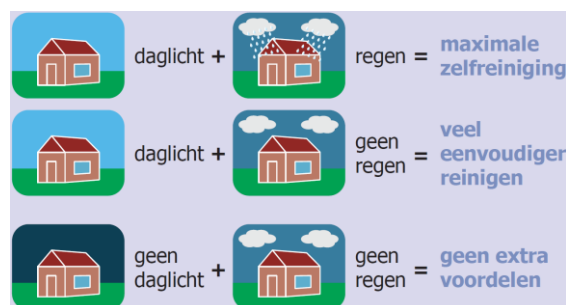
Afb. 4.1: De werking van de titaniumdioxide-coating. (© Chris Woodford, explainthatstuff.com)



Afb. 4.2: Het verschil in transparantie na een regenbui tussen conventioneel glas en zelfreinigend glas. (© Uit [1])

De besproken werking van de coating wordt vaak in twee grote delen opgesplitst, namelijk enerzijds de afbraak van het organisch vuil met behulp van licht, vocht en zuurstof (het 'fotokatalytisch' proces) en anderzijds het wegspoelen van dat organisch vuil tijdens elke regenbui. De fabrikanten benoemen hun producten dan ook als 'zelfreinigend glas met een dubbele werking'. Nochtans zijn de twee processen aan elkaar gelinkt, aangezien de hydroxyl-moleculen zowel voor de afbraak van het vuil als voor het hydrofiele karakter van het glas zorgen.

Bij mooi weer (daglicht en geen regen), wordt het vuil enkel in kleinere deeltjes omgezet. Bij slecht weer (daglicht en regen), worden de ramen effectief gekuist (Afb. 4.3). Als het 's nachts regent, zal de zelfreinigende coating ook werken, maar het reinigende vermogen is echter enkel optimaal overdag, omdat dan de coating effectief geactiveerd wordt. Als men de werking autonoom wil laten gebeuren, moet regenwater het glas dus kunnen bereiken. Daarom is zelfreinigend glas in principe niet bedoeld voor beglazing die zich onder luifels bevindt of die door andere gebouwdelen afgeschermd wordt. Bij dakbeglazing met een helling van minder dan 20 graden zal de coating wel zijn werk doen, maar zal het regenwater minder goed van het oppervlak kunnen aflopen en zal het uiteindelijke effect minder goed zijn.



Afb. 4.3: De reinigingscapaciteit bij verschillende omstandigheden. (© Uit [2])

Glas met een titaniumdioxide-coating blijft haar neutrale kleur en transparantie behouden. De coating wordt uiteraard op het buitenoppervlak van het glas aangebracht, en moet dus heel duurzaam zijn. De coating wordt daarom via het pyrolytisch proces aangebracht en is bijgevolg een integraal onderdeel van de glasplaat. (Zie *addendum 3* voor info over het aanbrengen van een coating.) Normaal gezien zou de coating een even lange levensduur moeten hebben als het glas zelf.

Dezelfde titaniumdioxide-coating kan overigens ook aangebracht worden op andere oppervlakken dan glas. Zo zijn er bijvoorbeeld 'zelfreinigende tegels'. Een extra motivatie om de coating toe te passen, is dat het de omgeving gezonder maakt. Enerzijds worden organisch verontreinigende stoffen zoals VOC's, bacteriën en ziektekiemen, die aan het oppervlak geadsorbeerd zijn, afgebroken tot CO₂ en water. Anderzijds worden tijdens het fotokatalytisch proces ook SO₂ en andere emissies uit de nabije lucht 'opgebruikt' en afgebroken.

Bij lange droge periodes zullen de ramen toch vuil worden. Dan is een reiniging met de hand aanbevolen. Hierbij volstaat het in principe om eens met de tuinslang te sproeien op het glas. De coating wordt niet aangetast door het gebruik van vloeibare schoonmaakmiddelen, dus ook dat is mogelijk. Er moet enkel opgelet worden met metalen (scherpe) objecten. Hoe dan ook is het glas vlotter schoon te maken dan dat bij conventioneel glas het geval is. Na een manuele reiniging duurt het wel een week voordat de autonome reinigende werking terug volledig geactiveerd is, net zoals na de installatie overigens.

Een aandachtspunt bij de montage van zelfreinigend glas is dat de coating niet compatibel is met siliconen. Daar dient rekening mee gehouden te worden bij bijvoorbeeld de keuze van de beglazingsrubbers of de elastische kit.

Referenties ZELFREINIGEND GLAS

TEKST

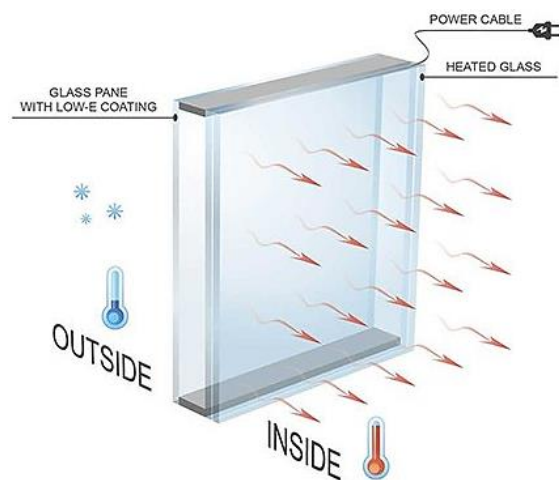
- **[1]** Reyniers, M.-F. (2018). *Building Chemistry. Part 3. Inorganic polymeric construction materials*. (Academiejahr 2018–2019). E052730. Universiteit Gent
- **[2]** NSG GROUP. (2017). *Pilkington Nederland B.V. Pilkington Activ™ Zelfreinigend glas. Eenvoudig schoon!*
- **[3]** NSG GROUP. (2017). *Pilkington Nederland B.V. Pilkington Activ™ Zelfreinigend glas*.

AFBEELDINGEN

- **Afb. 4.1:** © Chris Woodford. Geraadpleegd van <https://www.explainthatstuff.com/how-self-cleaning-windows-work.html>
- **Afb. 4.2:** Uit [1]
- **Afb. 4.3:** Uit [2]

5. VERWARMD GLAS

Verwarmd glas is een product dat ontwikkeld werd met de bedoeling om te dienen als een warmteafgifte-element. Ter vervanging of ter ondersteuning van traditionele radiatoren of convectoren, kunnen ramen met verwarmd glas ingezet worden om ruimtes op te warmen. Voorbeelden zijn Saint-Gobain EGLAS, IQ-Glas®, HeatVision® en Thermo Heat Glas van New Glass Technology. Het betreft telkens een glasplaat die voorzien is van een transparante tin-oxide-coating die elektriciteit omzet in infraroodwarmte. Het raam dient enkel via een klassieke stekker op het elektriciteitsnetwerk van het gebouw aangesloten te worden (Afb. 5.1).



Afb. 5.1: Isolatieglas voorzien van een verwarmd glaspaneel langs de binnenzijde. (© heatvision.info)

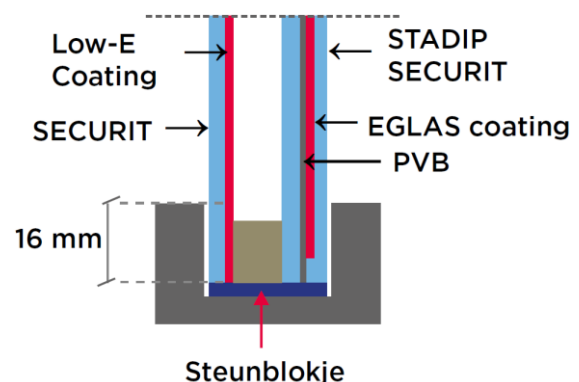
Hoewel het principe van verwarmd glas al tientallen jaren bestaat, is er nu een opmars bezig van dit product. Het past binnen de huidige energietransitie. De fabrikanten promoten hun product graag als duurzaam, omdat het op elektriciteit werkt en het om een relatief efficiënte energieafgifte gaat (de plaats waar warmte wordt opgewekt is de plaats waar de warmte wordt afgegeven). Toch is elektrisch verwarmen maar zo duurzaam als de manier waarop de elektriciteit wordt opgewerkt. Verwarmd glas dient op groene stroom te werken,

bijvoorbeeld afkomstig van de eigen zonnepanelen op het dak van het gebouw, om als een duurzaam alternatief te mogen worden beschouwd.

De meest gebruikte variant van verwarmd glas is de toepassing in IGU's (dubbel of drievoudig). In een IGU bevindt de verwarmde glasplaat zich meestal aan de interieurzijde. De tin-oxide-coating is wel altijd naar de spouw gericht. Op de coating zijn elektrodes aangebracht, in de vorm van zilver- en koperstrips. Daardoor warmt de coating op wanneer het raam van stroom wordt voorzien. De coating fungeert in principe als een elektrische weerstand.

Op de andere glasplaat wordt een low-e coating aangebracht, eveneens langs de spouwzijde (Afb. 5.2). Deze dient de opgewerkte infraroodwarmte te reflecteren en er zo voor te zorgen dat de warmte naar de gewenste kant wordt afgegeven. De low-e coating houdt in de zomer uiteraard ook de zonnewarmte buiten. (Zie addendum 3 over low-e coatings.)

Ook als het verwarmd glas 'uit' staat, moet het isolatieglas voldoen aan de normen van een voldoende lage U-waarde. Als het glas 'aan' staat, isoleert het uiteraard des te beter en is de U-waarde nog lager (tot $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$).



Afb 5.2: De low-e coating reflecteert de warmte naar de gewenste zijde. (© Saint-Gobain EGLAS)

De binnentemperatuur wordt zoals bij andere systemen met een thermostaat en sensoren geregeld. Als de thermostaat 'aanslaat', zal de glasplaat opgewarmd worden om de gewenste kamertemperatuur te bereiken. Daarbij wordt de glasplaat wel warmer dan de ingestelde kamertemperatuur, tot maximaal ongeveer 40°C, afhankelijk van de fabrikant. Het verwarmd glas heeft een opwarmingstijd van een kwartier tot twintig minuten.

Stralingswarmte wordt ervaren als de meest comfortabele vorm van warmte. Door de grote oppervlaktes van verwarmde beglazing, kan er een gelijkmatige warmteafgifte met lage intensiteit plaatsvinden. Zo wordt convector groten-deels vermeden.

De coating met elektriciteitsaansluiting wordt niet enkel voor enkele glasplaten toegepast. Het wordt ook gebruikt in gelaagd veiligheids-glas, hetgeen als enkelvoudig paneel ingezet kan worden, of kan dienen als een paneel in een IGU. Afhankelijk van de samenstelling in de IGU, of van het gebruik van enkelvoudig glas, kan het verwarmd glas ook ingezet worden om de warmte naar buiten toe te richten. Dat principe wordt in Scandinavië soms gebruikt om sneeuw op beglazing te doen smelten (Afb. 5.3).

Bij elke glassamenstelling van verwarmde glas-producten wordt er gebruik gemaakt van gehard glas voor alle lagen. Dit type glas kan namelijk het beste tegen de thermische schokken die kunnen plaatsvinden tijdens het gebruik.



Afb. 5.3: Het opgewarmd glas helpt om de sneeuw te laten smelten. (© New Glass Tech. Thermo Heat Glas)

IQ-glas biedt verwarmd isolatieglas aan met afmetingen tot 2,4m op 4,2m. Bij Saint-Gobain EGLAS is er verwarmd gelaagd veiligheidsglas verkrijgbaar in panelen van 2,1m op 3,8m. Thermo Heat Glass biedt bovendien allerlei verschillende vormen aan. De diktes van enkel, dubbel of drievoudig verwarmd glas zijn telkens te vergelijken met deze van de conventionele tegenhangers. Het product vereist daarom geen aangepast raamkozijn en kan in principe gemonteerd worden volgens de gangbare methodes. Voor de doorgang van het snoer moet wel een gat geboord worden in het schrijnwerk. Middels een sticker wordt soms aangegeven welke de verwarmende zijde van de IGU is, zodat het glaspaneel zeker correct wordt geïnstalleerd.

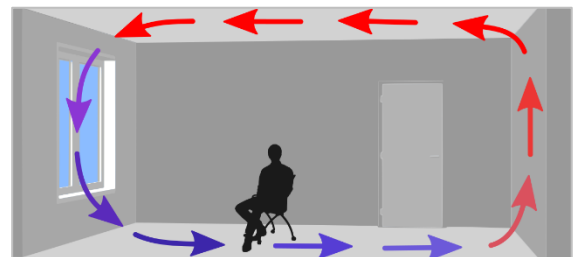
Verwarmd glas biedt enkele voordelen. Ten eerste heeft men met verwarmd glas 'transparante radiatoren' in huis die geen extra plaats innemen. Als het verwarmd glas gedimensioneerd werd als hoofdverwarming, zijn er namelijk geen radiatoren, convectors of andere elementen meer nodig (Afb. 5.4).



Afb. 5.4: Dankzij het gebruik van verwarmd glas moeten er geen hinderlijke verwarmingselementen voor het glas geplaatst worden. (© New Glass Tech. Thermo Heat Glas)

Ten tweede is lokaal verwarmen gemakkelijk te regelen met verwarmd glas. De ramen kunnen onafhankelijk van elkaar werken en de temperatuur kan per raam geregeld worden. Enkel de ramen in de ruimte waarin men aanwezig is, worden dan aangezet. Als dat slim aangepakt wordt, bijvoorbeeld door middel van domotica-systemen, kan hierbij energie bespaard worden.

Ten derde wordt met verwarmd glas het probleem van koudeval vermeden. Koudeval doet zich voor wanneer warme lucht ter hoogte van een (groot) koud oppervlak komt en daar door relatief snel afkoelt. De afgekoelde lucht daalt langs het raam naar beneden en wordt terug de ruimte in gestuurd (Afb. 5.5). Zo ontstaat er een onaangename convectiestroom die vermeden kan worden met tocht, maar dus niet afkomstig is van spleten of kieren in de gebouwschil. Vooral wanneer het buiten koud is of wanneer er veel wind op het glas komt, kan een minder performante IGU een dergelijk oppervlak vormen dat de warme binnenlucht lokaal afkoelt. Met verwarmd glas daarentegen komt een koude glaswand niet meer voor wanneer het raam 'aan' staat, en zal er geen risico op koudeval zijn.



Afb. 5.5: Het principe van koudeval. (© OSeveno)

Ten slotte kan verwarmd glas handig zijn om te gebruiken in ruimtes met een hoge relatieve vochtigheidsgraad (bijvoorbeeld zwembaden). Hoe kouder buiten (en hoe slechter geïsoleerd), hoe groter de kans op condensatie op de binnenzijde van glazen gevels in vochtige ruimtes. Het grootste nadeel van condensatie op glas, vanuit een architecturaal standpunt, is dat het zicht beperkt wordt. Verwarmd glas kan dit probleem het hoofd bieden. Het warme oppervlak van verwarmd glas zal het raam namelijk condensvrij houden, zelfs bij hoge relatieve vochtigheidsgraden en buitentemperaturen beneden het vriespunt.

Op basis van de functie (als hoofdverwarming, als bijverwarming, enkel om condens te vermijden of om sneeuw te laten smelten) worden de afmetingen en het vermogen (W/m^2) van het verwarmd glas bepaald. Elektrisch verwarmd glas is duurder dan normaal isolerend glas. Dankzij de energie-efficiëntie van het systeem, en bij slim gebruik, kan de investering echter zichzelf terugverdienen.

Om af te sluiten kan vermeld worden dat hetzelfde principe ook wordt toegepast bij glazen plaatradiatoren. Firma's zoals New Glass Technology maken esthetische radiatoren uit geëlaagd gehard glas die opgewarmd worden door elektriciteit (Afb. 5.6).



Afb. 5.6: Impressie van een transparante elektrische radiator. (© New Glass Tech. Thermo Heat Glas radiator)

Referenties VERWARMD GLAS

TEKST

- **[1]** Saint-Gobain. *EGLAS: Het glas dat verwarmt*. Geraadpleegd van <https://nl.saint-gobain-building-glass.com/nl/eglas>
- **[2]** Installatieprofs. (2017, 27 februari). *E-Glas: steeds vaker toegepast*. Geraadpleegd van <https://www.installatieprofs.nl/nieuws/verwarming/overige-verwarming/e-glas-steeds-vaker-toegepast>
- **[3]** IQ-Glas®. *De ruit als radiator! + IQ-Glas®. De belangrijkste redenen om te kiezen voor verwarmend IQ GLAS® + IQ-Glas®. Bestekomschrijving. VERWARMEND IQ-GLAS® + IQ-Glas®. Hoe eenvoudig is het monteren en aansluiten van verwarmend IQ-GLAS®? + IQ-Glas®. IQ-Glas®, zwembad en comfort*. Geraadpleegd van <http://www.iq-glas.nl/index.php?page=downloads>.
- **[4]** New Glass Tech. *Thermo Heat Glas*. Geraadpleegd van <http://www.newglasstech.com/?page=product&cat=Specialities&product=thermo-heat-glas&lang=nl>
- **[5]** New Glass Tech. *Thermo Heat Glas radiator*. Geraadpleegd van <http://www.newglasstech.com/?page=product&cat=Specialities&product=thermo-heat-glas-radiator&lang=nl>

AFBEELDINGEN

- **Afb. 5.1:** © HeatVision®. Geraadpleegd van https://heatvision.info/wp-content/uploads/2018/11/glass_2_small.jpg
- **Afb. 5.2:** © Saint-Gobain EGLAS. Uit [1]
- **Afb. 5.3, 5.4:** © New Glass Tech. Uit [4]
- **Afb. 5.5:** © OSeveno. Gebruik gemaakt van bestand: Silhouette of man on chair.svg, CC BY-SA 4.0.
- **Afb. 5.6:** © New Glass Tech. Uit [5]

6. CAPILLAIR GLAS

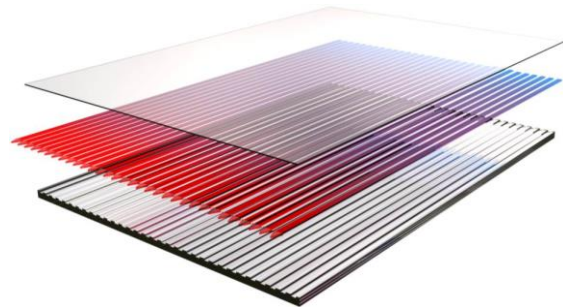
Capillair glas is een nieuwe en unieke oplossing voor het efficiënt opslaan van zonne-energie en warmte-uitwisseling via een actieve gebouwschil. Het betreft een speciaal soort gelaagd glas waar een vloeistof (bijvoorbeeld monopropyleenglycol) doorheen stroomt met de bedoeling om warmte te absorberen of af te geven aan een ruimte. Een voorbeeld van dit concept werd gerealiseerd door LaWin, een project ontstaan aan de Friedrich-Schiller Universiteit in Jena (Duitsland) (Afb. 6.1). Dergelijk gelamineerd paneel bestaat uit een dunne glasplaat en een glasplaat met een normale dikte die geprofileerd werd met rechthoekige inkepingen door een specifiek walsproces tijdens het float proces. Zo ontstaan er lineaire holtes waar een vloeistof doorheen kan stromen ('capillairen') (Afb. 6.2 en 6.4). De vloeistof is transparant en is gekozen op zijn kwaliteiten inzake warmteopslagcapaciteit.



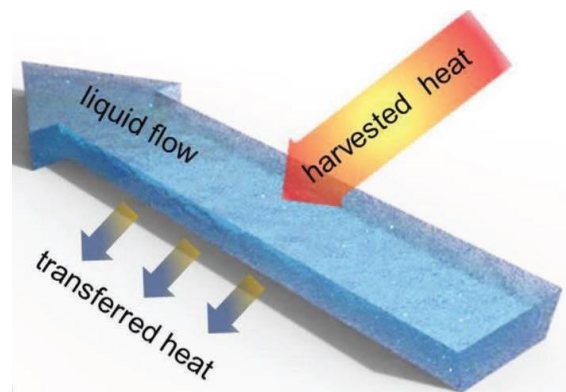
Afb. 6.1: Capillair glas, ontwikkeld door LaWin. (© [4])

Het capillair glas van LaWin haalt afmetingen tot 2m op 1,5m. De panelen kunnen worden geïntegreerd in vliesgevelsystemen of in een IGU. Afhankelijk van het beoogde doel kan het capillaire glas op verschillende plaatsen in de IGU worden geplaatst. Het kan langs de interieurzijde gericht zijn en dienen als een verwarmings- of koelelement, dat respectievelijk warmte afgeeft of absorbeert. Het kan ook als buitenste paneel in een IGU gesitueerd zijn om

zonnewarmte te 'oogsten' en als warmtecollector fungeren (Afb. 6.3). Een combinatie kan natuurlijk ook.



Afb. 6.2: De opbouw van een capillair glaspaneel. (© [4])



Afb. 6.3: De vloeistof is in staat om warmte op te nemen en af te geven. (© [2])

De LaWin-panelen zijn doelbewust verkrijgbaar in diktes die gebruikelijk worden toegepast in dubbele (of drievoudige) beglazing, variërend van 4 tot 6mm. Zo is een gemakkelijke integratie met standaard raamprofielen gegarandeerd en hopen de ontwikkelaars op een snelle marktacceptatie.

Meerdere panelen kunnen in serie (of in parallel) over een volledige gevel of gebouwhuid met elkaar worden verbonden, waardoor de plek waar de vloeistof doorstroomt gekozen kan worden naargelang de zonnestand om de meest efficiënte werking te verkrijgen. Daarnaast kan de vloeistof dan ook specifiek circuleren naar de ruimtes waar er op dat moment vraag is naar verwarming/koeling.



Afb. 6.4: Links: Productie van de glasplaat met normale dikte. Midden: Het laminaat. Rechts: Montage van LaWin-panelen in raamkaders. (© [4])

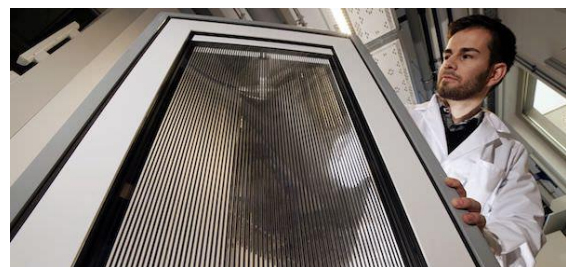
Het team van LaWin gaat ervan uit dat hun product het meest gebruikt zal worden in de 'zon-negordel van onze planeet' vanwege de aanwezigheid van veel zonnestraling. Tegelijk moeten deze regio's gelinkt worden aan omstandigheden zoals hoge temperaturen, grote verschillen in dag-nacht temperaturen, een hoge UV-straling en mogelijks grote wind- en zandbelastingen. Uit hun resultaten vloeit de conclusie voort dat een EVA-tussenlaag de beste prestaties levert om aan deze vereisten te voldoen. EVA of ethyleenvinylacetaat is gekend voor de uitstekende duurzaamheid op vlak van warmte, vochtigheid en ultraviolette stralen.

De panelen van LaWin staan nog niet helemaal op punt qua transparantie en het probleem ligt dan nog eerder in de modus waar geen vloeistof door het paneel loopt dan in de modus wanneer dat wel gebeurt (Afb. 6.5). Maar ook bij de vloeistof ontstaan nog gemakkelijk luchtbellens wat nefast is voor de transparantie van het paneel.



Afb. 6.5: Links: paneel zonder vloeistof (lege kanaaltjes). Rechts: paneel volledig gevuld met een vloeistof die een brekingsindex heeft die overeenkomt met die van het capillaire glas. (© [2])

Er bestaan nog gelijkaardige varianten van capillair glas. Zo is er het project van doctoraatstudent Benjamin Heiz (onder leiding van Wondraczek) waar er eveneens onderzoek gedaan wordt naar ramen waar vloeistof doorheen circuleert (Afb. 6.6). Naast gelijkaardige motieven zoals het absorberen, afgeven en transporteren van warmte, zijn er in dit project ook ijzerdeeltjes gesuspendeerd in de vloeistof om de hoeveelheid licht doorheen het raam te kunnen regelen. Vanwege deze extra functie promoten de onderzoekers het als 'slim glas'. Het verschil (en voordeel) met andere 'slimme' vensters is dat er geen extra elektriciteit nodig is om de technologie te gebruiken. Het scheiden van de ijzerdeeltjes van de vloeistof kan met behulp van een magneet; met één druk op de knop kan de gebruiker de magneet instellen om de deeltjes aan te trekken en zo de hoeveelheid licht en warmte te regelen. Net als bij het LaWin-project, is het belangrijkste doel ook het ontwikkelen van kosteneffectieve grote modules die geïntegreerd kunnen worden in bestaande raamkaders.



Afb. 6.6: Een prototype van het innovatieve capillaire raam. (© [6])

Referenties CAPILLAIR GLAS

TEKST

- **[1]** Bornemann, S. *Recent Developments of Laminating Films as Contribution for Energy Efficient Buildings and Façades*. Folienwerk Wolfen GmbH
- **[2]** Heiz, B. P. V., Pan, Z., Lautenschläger, G., Sirtl, C., Kraus, M., & Wondraczek, L. (2016). Ultrathin Fluidic Laminates for Large-Area Façade Integration and Smart Windows. *Advanced Science*, 4(3), 1600362. <https://doi.org/10.1002/advs.201600362>
- **[3]** Heiz, B. P. V., Pan, Z., Su, L., Le, S. T., & Wondraczek, L. (2017). A Large-Area Smart Window with Tunable Shading and Solar-Thermal Harvesting Ability Based on Remote Switching of a Magneto-Active Liquid. *Advanced Sustainable Systems*, 2(1), 1700140. <https://doi.org/10.1002/adsu.201700140>
- **[4]** LaWin. *Wrap your building into a liquid layer*. Geraadpleegd van <http://www.lawin.uni-jena.de/en/startpage/>
- **[5]** EU Horizon 2020. *Large area fluidic windows*. Geraadpleegd van <https://cordis.europa.eu/project/id/637108>
- **[6]** Oney, F. (2018, 2 februari). *Smart window technology uses magnetic nanoparticles suspended in fluid to control light, heat*. Geraadpleegd van <https://ceramics.org/ceramic-tech-today/smart-window-technology-uses-magnetic-nanoparticles-suspended-in-fluid-to-generate-light-heat>
- **[7]** Belis, J. (2018). *Glass Structures*. (Academiejaar 2018–2019). E044630. Universiteit Gent

AFBEELDINGEN

- **Afb. 6.1, 6.2, 6.4:** Uit [4]
- **Afb. 6.3, 6.5:** Uit [2]
- **Afb. 6.6:** Uit [6]

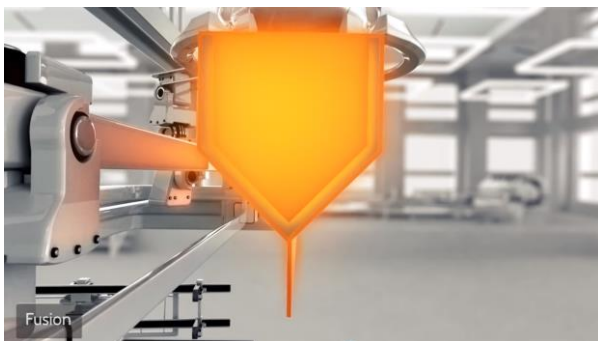
7. DUN GLAS



Afb. 7.1: Gestapeld dun glas. (© AGC Glass Europe)

Met dun glas bedoelen we glas met een dikte van een tiende van een millimeter tot maximaal twee millimeter (boven 2mm wordt beschouwd als een 'normale' dikte) (Afb. 7.1). Er bestaat ook ultradun glas met diktes die dunner zijn dan een menselijk haar, maar deze zijn in architectuur minder relevant. Dun glas is naast de dikte, ook op andere manieren verschillend van conventionele beglazing. Ten eerste gaat het om een ander soort glas, namelijk aluminiumsilicaatglas in plaats van natronkalksilicaatglas. Daarnaast is het ook een ander 'type' glas, wat slaat op het gekozen hardingsproces, dun glas wordt chemisch gehard in plaats van thermisch. Ook wordt dun glas meestal op een andere wijze geproduceerd; aan de hand van het 'overflow fusion'-proces (een verticale methode) in plaats van het klassieke 'float' procedé (een horizontale methode).

Bij 'overflow fusion' wordt een specifieke glas-samenstelling gesmolten en gegoten in een langwerpige trogvormige mal. Deze wordt gevuld zodat het glas gelijkmatig over beide kanten overstroomt ('overflow'). Onderaan komt het glas dan weer samen ('fusion') waar het een heel dunne vlakke glasplaat vormt (Afb. 7.2). Omdat de glasplaat in de lucht wordt gevormd, worden de oppervlakken ervan niet aangetast. Bij de klassieke float productie daarentegen is er wel mechanisch contact met het glas (de rollen), wat resulteert in vele minuscule krasjes ('flaws') op de glasoppervlakken die een verzwakking van het glaspaneel betekenen. Bij 'overflow fusion' is er bij het vormen van het glas geen enkel mechanisch contact en zodoende heeft het glas een beduidend hogere (buig)sterkte. Bovendien zijn de oppervlakken onberispelijk glad zodat ze geen polijstwerk meer vereisen achteraf.



Afb. 7.2: Links: Het gesmolten glas loopt over aan beide kanten en komt terug samen onderaan. Rechts: Het dunne glaspaneel koelt af in de lucht en wordt meteen in het gewenste formaat gesneden door een robot (die je ziet staat achter het glaspaneel). (© Corning)

Dun glas wordt chemisch gehard. (Zie addendum 1 voor meer info over het chemisch harden van glas.) Het sterke basismateriaal samen met het chemisch hardingsproces resulteert in een zeer sterk eindproduct. Dun glas heeft een karakteristieke sterkte van meer dan 600 N/mm². Ter vergelijking: klassiek uitgegloeid (float) glas heeft een karakteristieke sterkte van 45 N/mm².

Tegenwoordig wordt dun glas veel gebruikt als displays voor smartphones en tablets (een bekend merk is Corning Gorilla Glass®), maar het is ook interessant om het potentieel van dit materiaal voor toepassingen in architectuur te bekijken. Marco Zaccaria van AGC Glass Europe beweert dat dun glas voorlopig nog niet is doorgebroken in de architectuurwereld omdat aluminiumsilicaatglas te duur is (en daardoor meteen ook het gehele productieproces), gezien de grondstoffen veel hogere smelttemperaturen vereisen dan natronkalksilicaatglas. AGC Glass Europe wou dit kostprijsprobleem aanpakken door een dun glas te maken dat goedkoper is dan het normaal gebruikte aluminiumsilicaatglas, maar dat toch in staat was om een vergelijkbare residuele spanning op te bouwen na het chemisch harden.

AGC Glass Europe ontwikkelde een nieuw type aluminiumsilicaat-glassamenstelling (met de commerciële naam Falcon® glas) dat kan worden geproduceerd op een standaard float lijn. AGC beweert dat chemisch temperen zeer effectief is op Falcon® glas. Na het chemisch hardingsproces waren er echter opmerkelijke verschillen tussen de 'tin'- en 'lucht'zijde door het verschil in de snelheid van ionenuitwisseling. Er is een extra behandeling nodig om de reacties in evenwicht te brengen en zo ook de vlakheid van de panelen te waarborgen.

Er worden door AGC diktes aangeboden van 0,5mm tot 2,1mm. Om een idee te geven, bijvoorbeeld de 2,1mm-versie van Falcon® glas heeft oppervlakten beschikbaar tot 1,60m op 3,21m. Dat biedt mogelijkheden voor architecturale toepassingen.

Dun glas is een lichtgewicht materiaal (wat gunstig is voor transport en installatie) dat zeer sterk en flexibel is (het kan opgerold worden). Door de geringe dikte kunnen kaders voor dun glas bijgevolg ook zeer slank en elegant worden uitgevoerd. Of dun glas kan bijvoorbeeld worden gebruikt als middelste paneel van drievoudige isolerende beglazing, wat resulteert in een reductie van het gewicht (en dikte) (Afb. 7.3).



Afb. 7.3: Dun glas zorgt voor een aanzienlijke gewichtsvermindering bij meervoudige isolerende beglazing.
(© LiSEC Austria GmbH)

Nadelen van dun glas voor architecturale toepassingen kunnen echter de stijfheid zijn bij blootstelling aan verschillende soorten belastingen (bijvoorbeeld windbelasting) en ook de verdere productiemogelijkheden. Theoretisch gezien heeft lamineren en coaten op dun glas geen beperking, maar de industriële apparatuur die wordt gebruikt bij standaard vlakglas is mogelijk niet in staat om ook dun glas te hanteren. Het Oostenrijkse bedrijf LiSEC presenteerde echter op Glasstec 2018 in Düsseldorf hun nieuwe machines voor de behandeling van dun glas. Bovendien is het mogelijk om dun glas met de hand te snijden, maar de voorkeur gaat toch naar technieken zoals lasersnijden zodat er geen verdere verwerking meer nodig is om een goede randafwerking te verkrijgen.

Al in 2013 bespraken Lambert en O'Callaghan het potentieel van dun glas voor de bouwsector en classificeerden ze verschillende mogelijke architecturale toepassingen, zoals gelaagd glas met één of meerdere sterke dunne glaslagen (bijvoorbeeld voor anti-explosie), membraanstructuren uit dun glas en koud gebogen dun glas. Vooral dat laatste kan nieuwe wegen openen bij het ontwerpen van een glasgevel. De flexibiliteit van het materiaal (vanwege zijn slankheid en sterkte) leidde onderzoekers ertoe

om de mogelijkheden van koud gebogen dun glas (of gebogen gelaagd dun veiligheidsglas) te exploreren. Concepten zoals beweegbare elementen voor glazen luifels of adaptieve panelen in gevels, zijn een aantal opmerkelijke ideeën die bruikbaar zijn in architectuur.

De geometrieën waarin de dunne glaspanelen kunnen vervormen, zijn gebaseerd op de theorie van ontwikkelbare oppervlakken voor het beheersen van een laag spanningsniveau tijdens de beweging. De beweegbare componenten kunnen elektronisch worden bediend of kunnen autonoom bewegen. Op basis van de twee basistypen van beweging, translatie en rotatie (en hun combinatie), komen dunne glasstructuren tot leven. Zo kunnen de kromming en positie van dunne glaspanelen in een gevel zich bijvoorbeeld automatisch aanpassen aan de stand van de zon, met als doel het zonlicht de hele dag door zo optimaal mogelijk naar binnen te begeleiden. Dat kan de verlichtingskosten verlagen. Een voorbeeld van dit concept is het idee 'Infinity Lights', ontwikkeld in het kader van een masterproef (Afb. 7.4). Bij 'Infinity Lights' kan de openingshoek van de modules uit dun glas variëren om op die manier telkens het zonlicht zo diep mogelijk de binnenruimte in te leiden.



Afb. 7.4: Diverse zonnestanden en bijbehorende openingshoeken van het dun glas. (© JRC)

Het vervormingsvermogen van dun glas kan ook nuttig zijn wanneer de glaspanelen voorzien zijn van (geïntegreerde) fotonvoltaïsche cellen. Net als een zonnebloem zouden de panelen de hele dag door rechtstreeks naar de zon kunnen gericht worden, wat resulteert in een betere efficiëntie.

Dit concept werd gebruikt in het Soft House in Hamburg, ontworpen door Sheila Kennedy van Kennedy & Violic Architecture (Afb. 7.6). In dit gebouw werden de beweegbare panelen ingezet voor de productie van energie en het verschaffen van schaduw overeenkomstig met de zonpositie. De panelen waren aanvankelijk bedoeld om te worden gerealiseerd uit dun glas met 'vapor-deposited' fotonvoltaïsche technologie, maar uiteindelijk werd het anders uitgevoerd. De ontwerpers hebben ervoor gekozen om flexibele zonnepaneeltjes te gebruiken die zijn bevestigd aan een textiel dat kan draaien. Deze 'twisters' zijn bevestigd aan flexibele vezelcomposietplaten op het dak, die ook het hele jaar door kunnen meebewegen. Op deze manier biedt het systeem zowel dagelijkse als seizoensgebonden vormaanpassing.

Het oorspronkelijke idee (dunne glaspanelen met geïntegreerde fotonvoltaïsche cellen) loont de moeite om verder te bekijken. Dit concept wordt het best gebruikt als de 'standaardpositie' van de glaspanelen op het zuiden is gericht, waarna de panelen 's ochtends naar het oosten en 's avonds naar het westen kunnen draaien (Afb. 7.5). De dunne glaspanelen zijn gevormd als cilindersegmenten en hebben draaipunten in het midden van de bevestigingsrails boven- en onderaan elk element. Met kleine verticale rotaties van de rails kan de kromming van het oppervlak snel worden veranderd. Dit concept is een mooie illustratie van hoe de materiaaleigenschappen van dun glas kunnen worden benut om bij te dragen aan duurzaam ontwerpen, in dit geval door op een efficiëntere manier milieuvriendelijke energie te produceren.



Afb. 7.5: Openingsprocedure voor de energieopwekking van PV-elementen aangebracht op dun glas. Links: Ochtend. Midden: Middag. Rechts: Avond. (© JRC)



Afb. 7.6: De voorgevel van Soft House in Hamburg. (© Kennedy & Violic Architecture)

Met glas dunner dan 2mm worden opwindende nieuwe principes denkbaar in vergelijking met normale glasdiktes. In plaats van een raam klassiek te openen door het beweegbaar kader te laten scharnieren tegenover het vaste kader, zou bijvoorbeeld het glaspaneel van een raam kunnen worden 'opgekruld' tot de gewenste opening. Of dankzij de hoge vervormbaarheid van het materiaal kan er bijvoorbeeld een systeem van zelfregulerende luchtventilatie worden bedacht. Dat via een dubbelwandige gevel waarbij de buitenste laag bestaat uit autonoom beweegbare dunne glazen gevelelementen. Bij dit idee worden dunne glaspanelen langs de verticale randen bevestigd. Een kleine opwaartse beweging van de onderste eindpunten van deze randen zorgt voor een grotere kromming van het glas waardoor er een grotere (ventilatie)opening ontstaat (Afb. 7.7). De autonome beweging kan gebeuren aan de hand van draden uit een legering met 'vormgeheugen' of bimetalen linten die discreet in de randen van het frame zijn geïntegreerd. De draden of linten worden 'geactiveerd' door veranderingen in de omgevingscondities (temperatuurverschillen) en vervormen dienovereenkomstig.



Afb. 7.7: Openingsprocedure voor luchtventilatie via panelen uit dun glas. Links: Gesloten. Midden: Glas wordt geopend. Rechts: Maximale opening. (© JRC)

Nog een andere toepassing voor dun glas dankzij de grote buigzaamheid zou kunnen bestaan uit een transparante scharnierende verbinding tussen twee gelaagde glasplaten. Door het dun glas doorlopend (in het midden) mee te lamineren, kunnen glaspanelen worden verbonden (Afb. 7.8).



Afb. 7.8: Dun glas zou ook kunnen dienen als scharnierende verbinding in een glazen constructie. (© T. Peters)

Een publicatie van Louter onderzoekt het potentieel van dun glas voor architecturale toepassingen. Het eerste onderwerp gaat ook over flexibele dunne glaspanelen die van vorm veranderen als gevolg van externe invloeden. Het algemene idee van adaptieve glazen gevels is dat ze herhaaldelijk van vorm kunnen veranderen als reactie op externe parameters. Enkele voorbeelden van de adaptieve gevelconcepten worden getoond op de volgende bladzijde (Afb. 7.9 en. 7.10).

Overigens is het gewicht een enorm voordeel en een reden om te kiezen voor dun glas in bouwschillen. Het lage gewicht maakt een eenvoudigere installatie mogelijk en vermindert de transportenergie, het benodigde framemateriaal en het totale gewicht van het gebouw. Maar omdat dun glas erg slank is, heeft het niet de stijfheid die men verwacht bij het ontwerpen van (verticale) vlakke gevelelementen. Daarom gaat het tweede onderwerp van de publicatie van Louter over composietpanelen bestaande uit twee lagen dun glas samengehouden door een 3D-geprinte kern (Afb. 7.11). Deze plastieken kern zorgt ervoor dat er een stijver paneel wordt verkregen. Hoewel er ook gebogen versies werden onderzocht, lijkt de geprinte kern de mogelijkheid te bieden om vlakke gevelpanelen te maken uit dun glas. Zaken zoals de duurzaamheid van de kern, de lichttransmissie, de warmteweerstand en de esthetiek van dergelijke composietpanelen moeten echter nog verder worden onderzocht.



Afb. 7.9: Ontwerp van een adaptieve glasgevel met dun glas, ontwikkeld door Rafael Ribeiro Silveira. (© Rafael Ribeiro Silveira)



Afb. 7.10: Links: Ontwerp van een adaptieve glasgevel met dun glas, ontwikkeld door Özhan Topcu. (© Özhan Topcu). Rechts: proefopstelling van een adaptief dun glazen gevelelement dat gebruik maakt van een 'shape memory' legering om de beweging te activeren, ontwikkeld door Bahareh Miri. (© Bahareh Miri)



Afb. 7.11: Dungleascomposietpanelen met 3D-geprinte kern. Prototype en ontwerpvoorstel, ontwikkeld door Tim Neeskens. (© Tim Neeskens)

Referenties DUN GLAS

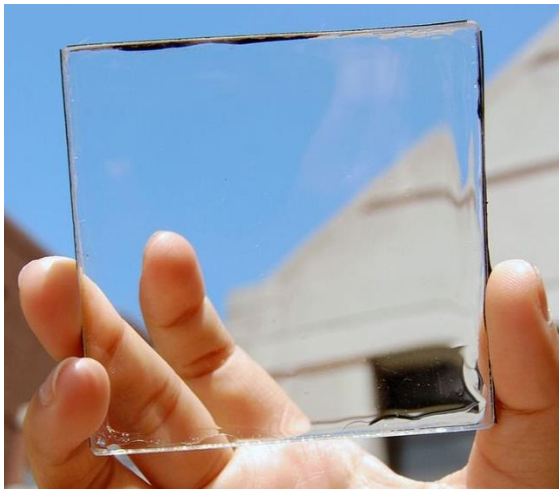
TEKST

- [1] Bartholomew, R. F., & Garfinkel, H. M. (1980). Chemical Strengthening of Glass. *Glass Science and Technology*, 217–270. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-706705-6.50011-4>
- [2] Zaccaria, M., & Gillon, X. (2019). Scaling Thin Glass Use to the Architectural World. *GPD Conference Proceedings 2019*. 320-323.
- [3] Lambert, H., & O'Callaghan, J. (2013). Ultra-thin High Strength Glass Research and Potential Applications. *Glass Performance Days 2013*. 95-99.
- [4] Silveira, R. R., Louter, C., & Klein, T. (2018). Flexible transparency - A study on Adaptive Thin Glass Facade Panels. *Challenging Glass Conference*, vol. 6. 135-148.
- [5] Neugebauer, J. (2019). Adaptive Façades Systems made from Thin Glass. *GPD Proceedings*. 310-314.
- [6] Louter, C. (2019). Thin Glass Concepts for Architectural Applications. *GPD Proceedings 2019*. 324-325.
- [7] AGC Glass Europe. (2019). *FALCON GLASS for thin and lightweight applications. Factsheet*
- [8] AGC Glass Europe. (2019). *Thin and ultra-thin glass for an extended range of applications. Factsheet*
- [9] Corning. *How It's Made. Glass Composition. Corning Gorilla Glass*. Geraadpleegd van <https://www.corning.com/gorillaglass/in/en/technology/how-it-s-made.html>
- [10] Siegele, C. (2018, 23 januari). *Glass off the roll - Thin glass is revolutionising the performance spectrum of glass and glass panes*. Geraadpleegd van <https://www.glassonweb.com/article/glass-roll-thin-glass-revolutionising-performance-spectrum-glass-and-glass-panes>

AFBEELDINGEN

- **Afb. 7.1:** © AGC Glass Europe. Uit [9]
- **Afb. 7.2:** © Corning. Geraadpleegd van <https://www.corning.com/in/en/innovation/the-glass-age/science-of-glass/how-it-works-cornings-fusion-process.html>
- **Afb. 7.3:** © LiSEC Austria GmbH. Uit [11]
- **Afb. 7.4, 7.5, 7.7:** © JRC. Uit [6]
- **Afb. 7.6:** © Kennedy & Violich Architecture. Geraadpleegd van <http://www.kvarch.net/projects/87>
- **Afb. 7.8:** © Timon Peters, Technical University of Darmstadt. Uit [11]
- **Afb. 7.9:** © Rafael Ribeiro Silveira. Uit [7]
- **Afb. 7.10 Links:** © Özhan Topcu. Uit [7]
- **Afb. 7.10 Rechts:** © Bahareh Miri. Uit [7]
- **Afb. 7.11:** © Tim Neeskens. Uit [7]

8. TRANSPARANTE ZONNEPANELEN

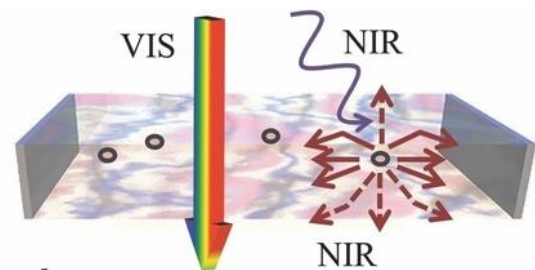


Afb. 8.1: MSU-doctoraatsstudente Yimu Zhao houdt de nieuwe LSC-module omhoog. De transparantie is verbluffend. (© Yimu Zhao)

Onderzoekers van de Michigan State University in de Verenigde Staten hebben, onder leiding van Richard Lunt, een 'onzichtbaar zonnepaneel' ontwikkeld en gepatenteerd. Het gaat om een 'luminescent solar concentrator' (LSC) uit plastic die kan worden aangebracht op heldere oppervlakken zoals glas (Afb. 8.1). Dit product dient gekaderd te worden in het groter geheel van alle recente ontwikkelingen van BIPV-toepassingen ('Building Integrated PhotoVoltaics').

Een 'luminescente zonneconcentrator' is een apparaat waarbij zonnestraling wordt verzameld over een oppervlak en door fluorescentie omgezet wordt in andere straling. Deze straling wordt dan heel gericht geconcentreerd op een relatief klein oppervlak om elektriciteit te produceren. LSC-technologie is op zich niet nieuw, maar het transparante aspect is dat wel. De nieuwe versie focust op golflengten van het zonlicht die niet voorkomen in het zichtbare spectrum van de mens.

De zichtbare frequenties worden niet gebruikt en gaan 'door' het materiaal en zodoende wordt de zonnecollector als transparent ervaren. Een deel van de ultraviolette en infrarode straling van de zon wordt opgevangen aan de hand van kleine organische moleculen die verspreid zijn in de polymere matrix. Daarbij gaan deze moleculen opwarmen ('gloeien') en zelf infrarood uitstralen. Deze IR-straling wordt specifiek gericht op de rand van het plastic paneeltje en wordt daar door dunne stroken fotonvoltaïsche cellen omgezet in elektriciteit (Afb. 8.2).



Afb. 8.2 Het werkingsprincipe. (© Uit [1])

De efficiëntie van dergelijke technologie ligt beduidend lager dan andere niet transparante LSC-technologieën en conventionele fotonvoltaïsche cellen, maar deze uitvinding heeft wel interessante voordelen die gebruikt kunnen worden in architectuur. Vanwege de esthetische kwaliteiten (de geringe dikte en zijn transparantie) kan dergelijk LSC-paneel flexibel worden ingezet in een ontwerp, zonder visueel te hinderen. Zo kan het dus ook op beglazing worden toegepast. Ramen inzetten als energie-opwekkers heeft als extra voordeel dat deze technologie de IR-straling 'gebruikt' en niet doorlaat door het glas, wat kan helpen om de zonnewarmte te beheersen. Richard Lunt vertelt: *"Er bestaan al raamfolietechnologieën zoals low-e die ontwikkeld zijn om infrarood licht af te wijzen. Wij streven naar een vergelijkbare functionaliteit terwijl we ook elektriciteit opwekken."* [2]

Referenties TRANSPARANTE ZONNEPANELEN

TEKST

- **[1]** Zhao, Y., Meek, G. A., Levine, B. G., & Lunt, R. R. (2014). Near-Infrared Harvesting Transparent Luminescent Solar Concentrators. *Advanced Optical Materials*, 2(7), 606–611.
<https://doi.org/10.1002/adom.201400103>
- **[2]** Whelan, J. (2014, 25 augustus). *Invisible Solar Harvesting Technology Becomes Reality*. Geraadpleegd op 22 april 2020, van <https://www.archdaily.com/540760/invisible-solar-harvesting-technology-becomes-reality/>

AFBEELDINGEN

- **Afb. 8.1:** © Yimu Zhao. Uit [2]
- **Afb. 8.2:** © Uit [1]

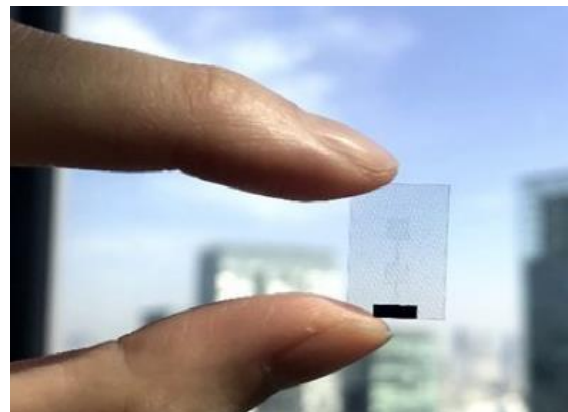
9. TRANSPARANTE ANTENNES

Hedendaagse gebouwen zijn vaak signaalbarrières. Dikkere wandopbouwen (grotere isolatiepakketten) en performantere beglazing zijn bedoeld om de warmtetransmissie door de gebouwschil te verminderen (lagere U-waardes), maar zijn vaak ook gelinkt aan een verminderde doorgang van radiosignalen. De radiofrequentie-eigenschappen van beglazingsconstructies worden doorgaans niet overwogen in de glasin industrie. Met de opkomende vijfde generatie (5G) van radiofrequenties voor mobiele communicatie kan dat een nog groter probleem vormen in de toekomst. De signalen van 5G zijn in sommige frequentiebanden namelijk meer lineair dan de 4G-signalen en zijn daardoor 'niet sterk genoeg' om voldoende door ramen te dringen. Dit penetratieverlies verhindert het optimale gebruik van mobiele apparatuur binnenhuis.

Aan de Aalto University School of Electrical Engineering (Finland) werd onderzoek gedaan naar verlies van 5G-signalen door beglazing. 57 verschillende beglazingsstructuren werden getest op hun doorlaatbaarheid van radiofrequentiesignalen van 0,6 tot 95GHz, het bereik waarin 5G opereert. Alles van enkele beglazing tot drie- of viervoudige beglazing, zowel met of zonder low-e coating(s) werd getest.

Een low-e coating reflecteert deels de warmtestraling en verhindert op die manier het doorlaten of absorberen van warmte door glas. *(Voor meer info hierover, zie addendum 3.)* Uit de studie is helaas gebleken dat metalen low-e coatings ook 5G-signalen weerkaatsen. Dat resulteerde in grote penetratieverliezen, zeker wanneer er meer dan één coating werd toegepast.

Een oplossing zou kunnen zijn om antennes die het signaal versterken te verwerken in beglazing van gebouwen. Deze antenne is dan bij voorkeur wel zo min mogelijk zichtbaar. Een samenwerking tussen NTT DOMOCO, AGC Automotive en Ericsson leidde tot het ontwikkelen van de eerste 'glasantenne' voor 5G-communicatie (Afb. 9.1). De kleine antenne is ingebed in natronkalksilicaglas, en is daarom niet hinderlijk om bevestigd te worden op beglazing. Dankzij de diëlektrische (isolerende) eigenschappen is glas bovendien een uitstekend oppervlak om antennes op te plaatsen. De transparante antenne zou bijvoorbeeld ook geïntegreerd kunnen worden in vensters van wagens en treinen.



Afb. 9.1: 5G-antenne ingebed in glas. (© AGC Automotive)

Bij moderne voertuigen worden er reeds verschillende antennes aan de randen van de ruiten geplaatst. Dat wordt gedaan om de communicatie (verzenden en ontvangen van gegevens) van gsm's en GPS in de wagen te verbeteren. Zo heeft ook Saint-Gobain de TennaFit-antennes ontwikkeld, die dankzij de strategische plaatsing haast onzichtbaar zijn. Het is eventueel ook een mogelijkheid om dit soort (niet-transparante) antennes te integreren in schrijnwerk van beglazing in gebouwen. De antennes worden dan waarschijnlijk beter beschermd tegen bijvoorbeeld trillingen van buitenaf of vandalisme.

Referenties TRANSPARANTE ANTENNES

TEKST

- **[1]** Haneda, K. (2019). Investigation of 5G Radio Frequency Signal Losses of Glazing Structures. *GPD Proceedings 2019*. 243-247.
- **[2]** *DOCOMO, AGC and Ericsson Achieve World's First 5G Communication Using Glass Antenna for 28 GHz.* (2019). Geraadpleegd van <https://www.agc-automotive.com/en/news-and-events/World-First-5G-Communication-Using-Glass-Antenna-for-28GHZ/>
- **[3]** Saint-Gobain. (2013). *Tennafit. Autover*. Geraadpleegd van <https://www.saint-gobain-autover.nl/tennafit>

AFBEELDINGEN

- **Afb. 9.1:** © AGC Automotive. Uit [2]

CONCLUSIE

Na het doornemen van het eerste deel van de masterproef zal het duidelijk zijn dat glas een bouw materiaal is dat op verschillende wijzen ingezet kan worden om de visie van de ontwerper te bereiken. Zo werd er onder meer aangetoond dat het mogelijk is om transparant metselwerk te realiseren, bestaande uit massieve glazen bakstenen die verbonden zijn door transparante 'mortel'. Er werd ook verduidelijkt dat gegolfde glaspanelen een structureel voordeel hebben in vergelijking met vlakglasplaten, waardoor grotere oppervlakken van glas kunnen worden voorzien zonder dat daarbij veel metalen elementen aan te pas hoeven te komen. Spectaculaire dubbel gekromde glazen geveloppervlakken zijn dan weer mogelijk dankzij het 'warm' buigen van glas. Daarnaast werden ook de voordelen van 'koud' buigen besproken. Het is namelijk mogelijk om glaspanelen in vlakke toestand te leveren op de bouwplaats en ze pas in situ te buigen. Verder kwamen ook verschillende technieken om glas van een bedrukking te voorzien aan bod. Bij deze gevalstudies werden de glazen gevels als het ware ingezet als een canvas voor de kunstenaar. Ten slotte werden er transparante draagstructuren toegelicht. Vanwege het fragiele karakter van glas, wordt dit soms als contra-intuïtief ervaren. Door het verstandig kiezen van het type glas en de glasopbouw kunnen er echter robuuste glazen draagstructuren verkregen worden.

Dankzij de antwoorden op de vragenlijst in deel twee van de masterproef kwamen er nog extra projecten aan bod en werd er meer inzicht verkregen in de uitdagingen die gepaard gaan bij het bouwen met glas. Een selectie van prominente personen kreeg via deze masterproef een forum om hun mening te geven. De gelijkenissen en verschillen in de visies tussen de respondenten werden per vraag verenigd in een samenvattende analyse.

In het derde en laatste deel werd onder meer het potentieel van vacuüm glas en slim glas besproken. Dat zijn twee glasproducten waarvan verwacht wordt dat ze meer en meer zullen worden toegepast in gebouwen in de nabije toekomst. Er werd ook besproken hoe de buigbaarheid van dun glas toelaat om te experimenteren met nieuwe wijzen van adaptieve beglazing. Zo zou men dun glas kunnen laten opkrullen om maximaal te profiteren van het zonlicht of om natuurlijke ventilatie te regelen. Ook werden er andere concepten aangehaald die tot de verbeelding kunnen spreken: het raam als radiator, het raam als warmtewisselaar, het raam als zonnepaneel of het raam als antenne.

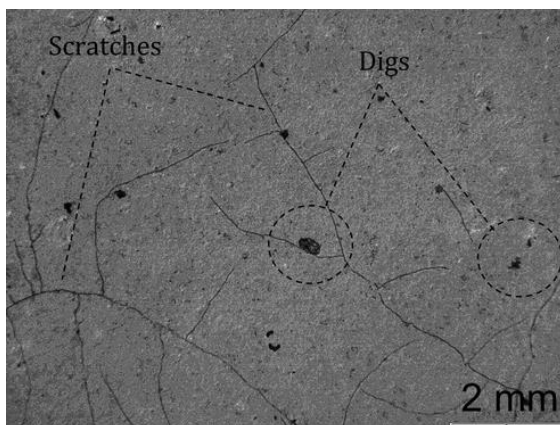
De wetenschappelijke kennis over het materiaal en de daarbij horende nieuwe glastoepassingen blijven in een snel tempo toenemen. De focus van deze masterproef lag hoofdzakelijk bij technieken en toepassingen die ingezet kunnen worden in hedendaagse publieke architectuur. De selectie van de gebouwen en producten in dit eindwerk zijn evenwel slechts een greep uit het geheel van nieuwe ontwikkelingen in de glasindustrie.

ADDENDA

ADDENDUM 1

HARDEN VAN GLAS

De moleculaire treksterkte van glas bedraagt 30.000 N/mm², dat is immens veel. Glas heeft in principe een enorm potentieel. Maar helaas zitten de oppervlakken van een glasplaat vol met krasjes die niet zichtbaar zijn met het blote oog (Afb. 1). Vanwege deze minuscule oppervlaktebeschadigingen, die grotendeels ontstaan zijn tijdens het float proces, behoudt het glas slechts een sterkte van 50 N/mm² over (zeshonderd keer minder).



Afb. 1: Microscopische opname van de verschillende soorten beschadigingen op het oppervlak van een glasplaat. (© Zaccaria & Overend)

De breuk van een glaspaneel dat onderhevig is aan een externe last, start altijd vanaf dergelijke barstjes. De trekspanningen die ontstaan door het buigen van glas onder belasting, zullen er namelijk voor zorgen dat de barstjes verder opengetrokken wordt, wat leidt tot grote zichtbare barsten en uiteindelijk tot het falen van het paneel. Het aantal krasjes, en de dieptes ervan, bepalen de treksterkte van een glaspaneel.

Bij het harden van een glasplaat worden ter hoogte van de oppervlakken doelbewust drukspanningen geïntroduceerd om te anticiperen op de trekspanningen die zullen voorkomen bij het buigen van het glaspaneel tijdens gebruik.

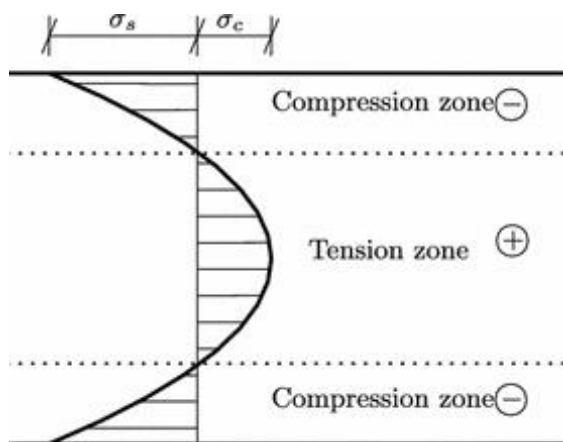
Er kan dus gesproken worden van 'voorgespannen' glas, het betreft namelijk hetzelfde structureel principe zoals bij voorgespannen beton waarbij in het element ook drukspanningen op voorhand worden aangebracht. Bovendien verbetert gehard glas de breukprestaties aangezien het breekt in kleine, stompje stukjes die veiliger zijn dan de grote scherven van standaard uitgegloeid glas.

De meest gebruikte methode om glas te harden (i.e. voor te spannen) is het thermisch harden van glas. Daarbij wordt het glas ruim boven de glastransitietemperatuur (575°C) opgewarmd, waardoor het glas in een zachte, rubberachtige staat verandert en zich niet langer gedraagt als een elastisch materiaal, maar als een visco-elastisch materiaal. Na de opwarming worden de oppervlakken van de glasplaat 'afgeschrikt' met koude lucht: er vindt een snelle afkoeling tot omgevingstemperatuur plaats (Afb. 2). Tijdens het afschrikken beweegt de plaat heen en weer over rollen. Er is ruimte tussen de verschillende rollen vereist om een goede warmteoverdracht mogelijk te maken. Na het proces blijven daardoor soms wel optische vervormingen over, zoals de zogenaamde 'roller waves' of het 'opkrullen' van de randen.



Afb. 2: Machine om vlakglas te harden. Het proces gaat van links naar rechts: de eerste machine is de oven, de tweede grote 'doos' is de ruimte waarin het glas wordt afgeschrikt. Aan deze doos zijn grote luchtkanalen en ventilatoren gekoppeld. (© Glaston)

Wanneer het afschrikken voltooid is, zullen er vanwege het initieel visco-elastisch gedrag spanningen overblijven in het glas. De kern bleef de langste tijd warm tijdens het proces, en wou bij het uiteindelijke afkoelen samentrekken. Dat werd echter verhinderd door de reeds verharde, stijve, oppervlakken van de glasplaat. De verhinderd van krimp bij het afkoelen van de kern, zorgt voor permanente trekspanningen in de kern en permanente drukspanningen aan de oppervlakken van de glasplaat (Afb. 3).



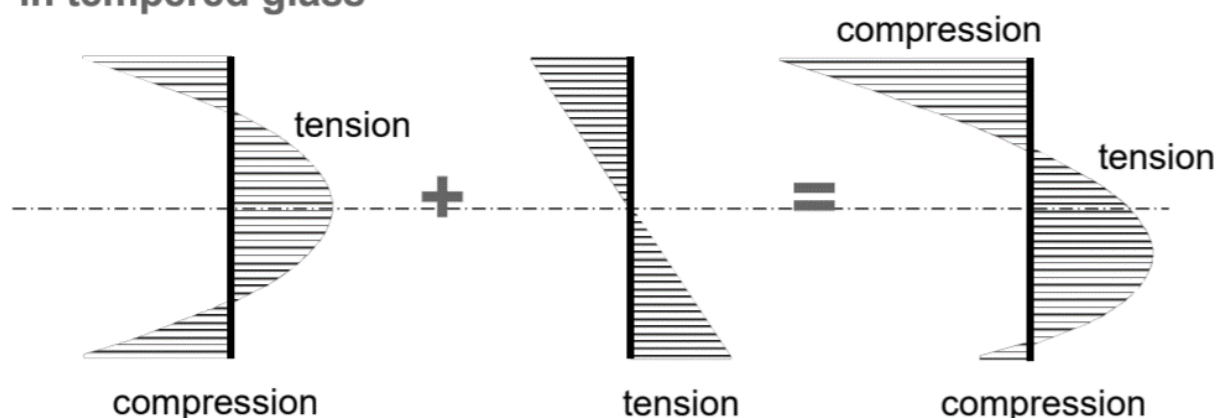
Afb. 3: Principesnede van de spanningsverdeling in gehard glas, op een positie ver van de randen.
(© Nielsen & Bjarrum)

Deze residuele spanningen vertonen een symmetrisch parabolisch verloop in de doorsnede. Hoe groter de amplitude van de parabool, hoe groter de drukspanningen die in het glas werden geïntroduceerd. Bij thermisch harden van glas is de diepte van de compressiezone aan beide zijden ongeveer een vijfde van de volledige glasdikte. Deze mooi symmetrische verdeling van de geïntroduceerde spanningen vindt eerder plaats naar het midden van de glasplaat toe. Bij de randen, de hoeken, en ter hoogte van gaten daarentegen, zullen de compressiezones kleiner zijn. Dit zijn dus iets zwakkere plekken in het paneel en daar is de kans groter dat een punt van een krasje zich in de trekzone bevindt, wat kan leiden tot breuk.

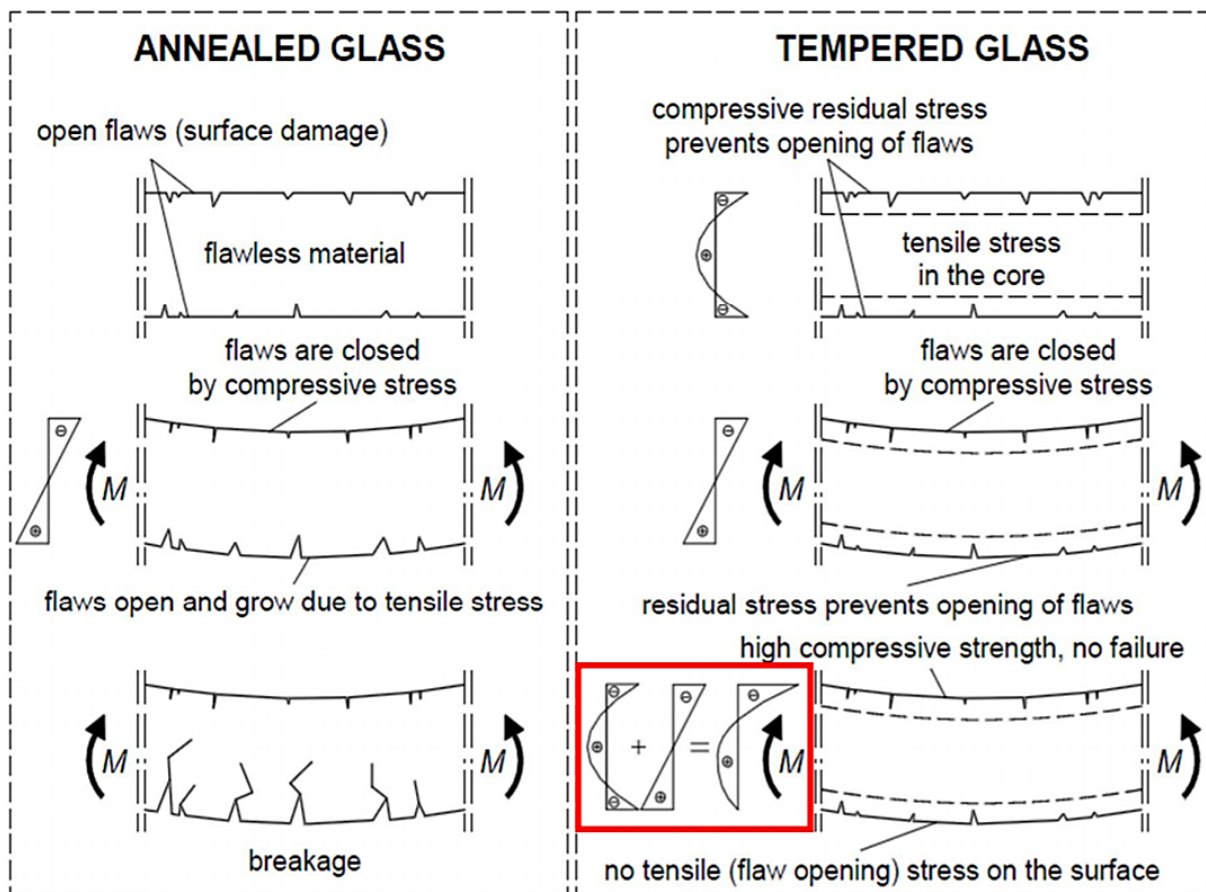
De de superpositie van de residuele spanningen van het voorspannen en de buigspanningen bij externe belasting resulteert tot een spanningsverdeling waarbij er geen of veel lagere trekspanningen zijn aan het glasoppervlak (Afb. 4). De permanente drukspanningen heffen namelijk de trekspanningen op, en duwen de oppervlaktebarstjes dicht. Bij ongehard glas zouden de trekspanningen ervoor zorgen dat de barstjes nog meer opengetrokken worden (scheurgroei), wat uiteindelijk kan leiden tot het falen van het glaselement (Afb. 5).

stress distribution in tempered glass

bending stress



Afb. 4: Superpositie van de residuele spanningen en de buigspanningen. (© Viorel Ungureanu)



Afb. 5: De weerstand bij belasting op buiging van uitgegloeid glas versus thermisch gehard glas. (© Haldimann et al)

Voor er gestart wordt met het thermisch harden van glas, moeten reeds alle bewerkingen op de glasplaat gebeurd zijn. Vanwege de overblijvende residuele spanningen in het glaspaneel is het namelijk niet meer mogelijk om bijvoorbeeld het glas op de juiste maat te snijden, gaten te boren achteraf of de randen te polijsten. Het glas zou daarbij stuk springen.

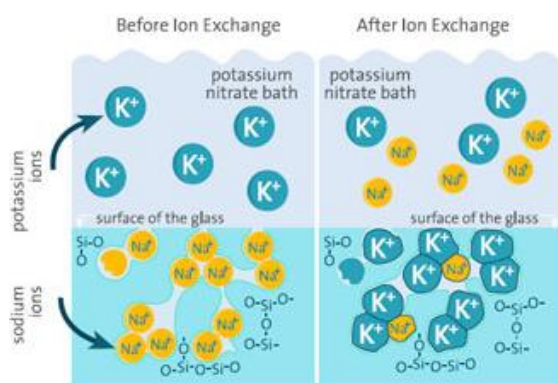
Het productieproces om glasplaten voor te spannen, kan twee verschillende producten opleveren: gehard glas of thermisch versterkt glas. Beide resultaten worden via hetzelfde principe en via dezelfde machines verworven. Het is enkel de snelheid van de afkoeling die verschilt. Bij gehard glas verloopt de koeling sneller, waardoor een hogere oppervlaktecompressie in het glas ontstaat. Om thermisch versterkt glas te produceren, is de koeling langzamer en is de resulterende compressie in het glas lager dan bij gehard glas, maar nog steeds

hoger dan bij ongehard float glas. Normaal uitgegloeid glas heeft een karakteristieke buigsterkte van 45 N/mm^2 , terwijl thermisch versterkt glas met 70 N/mm^2 en gehard glas met 120 N/mm^2 veel sterker zijn. Gehard glas heeft de grootste weerstand tegen externe belasting, maar bijvoorbeeld ook tegen thermische spanningen in het glas door ongelijke uitzetting van het materiaal.

Hoewel thermisch versterkt glas de minder sterke variant is, zijn er toch enkele motieven om in bepaalde gevallen voor dit type glas te kiezen. Thermisch versterkt glas breekt bijvoorbeeld in grote stukken in plaats van in kleine brokjes zoals bij gehard glas. Hoewel de kleine brokjes veiliger zijn, blijven de grote scherven van een thermisch versterkte glasplaat beter in hun kader zitten, wat gewenst is wanneer de glasplaat enkelvoudig gebruikt wordt. Ook het gebruik van thermisch versterkt glas bij gelaagd

glas heeft zijn voordelen. (Meer info hierover vindt u in addendum 2.) Daarnaast is er ook geen risico dat thermisch versterkt glas spontaan zou breken door de uitzetting van een nikkelsulfide-deeltje. Er dient dus geen heat-soak test uitgevoerd te worden bij thermisch versterkt glas, hetgeen kosten bespaart.

Glas kan ook chemisch gehard worden. Daarbij wordt het glas ondergedompeld in een gesmolten KNO_3 -zoutbad. Aan de oppervlakken gebeurt er een uitwisseling van ionen: de kalium-ionen uit het bad vervangen de kleinere natrium-ionen in de moleculaire structuur van het glas. De krimp van de K-ionen om de plaats van de Na-ionen te kunnen innemen genereert een drukkracht in het glas. Deze drukspanning compenseert de trekspanning bij het buigen van het glas (Afb. 6).



Afb. 6: Het principe van chemisch gehard glas.
(© IonGard® Chemically Toughened Glass)

Het voordeel van chemisch harden is de (veel) hogere compressiewaarde die bereikt wordt, namelijk ongeveer 150 N/mm^2 . Deze waarde dient wel met grote voorzichtigheid gebruiken

te worden vanwege de kwetsbaarheid van de compressiezone. Het nadeel van chemisch voorspannen is namelijk dat het slechts een heel dunne drukzone betreft, ongeveer een tiende van een millimeter. Dat houdt een potentieel risico in wanneer er oppervlaktekrasjes zouden zijn die met hun punt dieper zitten dan deze compressiezone. Zonder het op te merken, zal er dan scheurgroei optreden en uiteindelijk kan het glaspaneel spontaan breken, zelfs nog voordat het glaspaneel werd blootgesteld aan externe belastingen. Bovendien is chemisch voorspannen een duurder en langer durend proces dan thermisch voorspannen. Het principe van chemisch gehard glas kan wel goed werken bij dunne glasplaten. Dat wordt besproken in hoofdstuk 7 van DEEL III.

Ten slotte kan het handig zijn om de internationale terminologie rond dit onderwerp eens te bekijken. Als er gehard glas bedoeld wordt, spreken ze in Amerika over 'tempered glass', en in Groot-Brittannië over 'toughened glass'. Deze termen worden dan voorafgegaan door ofwel 'thermally' ofwel 'chemically', naargelang het proces dat werd gebruikt. Soms wordt er ook nog 'fully' bijgeplaatst, om te benadrukken dat het niet gaat om thermisch versterkt glas. Als er wél bedoeld wordt met wat wij in het Nederlands thermisch versterkt glas noemen, heeft men het in beide Engelstalige gebieden over 'heat strengthened glass', zonder een voorafgaande term.

Referenties ADDENDUM 1: HARDEN VAN GLAS

TEKST

- **[1]** Belis, J. (2018). *Glass Structures*. (Academiejaar 2018–2019). E044630. Universiteit Gent
- **[2]** Varshneya, A. K. (2010). Chemical Strengthening of Glass: Lessons Learned and Yet to Be Learned. *International Journal of Applied Glass Science*, 1(2), 131–142. <https://doi.org/10.1111/j.2041-1294.2010.00010.x>
- **[3]** Vitro Architectural Glass. (2004, 27 mei). *Heat Treated Glass for Architectural Glazing. Glass Technical Document TD-138*.

AFBEELDINGEN

- **Afb. 1:** Uit: Zaccaria, M., & Overend, M. (2016). Thermal Healing of Realistic Flaws in Glass. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(2), 04015127. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001421](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001421)
- **Afb. 2:** © Glaston. Geraadpleegd van <https://www.goodnewsfinland.com/glaston-closes-furnace-deal-us/>
- **Afb. 3:** Uit: Nielsen, J.H., Bjarrum, M. (2017). Deformations and strain energy in fragments of tempered glass: experimental and numerical investigation. *Glass Struct Eng* 2. 133–146. <https://doi.org/10.1007/s40940-017-0043-8>
- **Afb. 4:** © Viorel Ungureanu. Uit: COST. (2014). *Advanced Design of Glass Structures. Lecture L2. Glass strengthening methods*.
- **Afb. 5:** Uit: Haldimann, M., Luible, A., Overend, M. (2008). *Structural Use of Glass*. IABSE: International Association for Bridge and Structural Engineering.
- **Afb. 6:** © IonGard® Chemically Toughened Glass. Geraadpleegd van http://www.bceglass.com/en/architectural_glass/arch_iongard.html

ADDENDUM 2

BREUKGEDRAG VAN VEILIGHEIDSGLAS

Veiligheidsglas is een gelaagd glas. Het verschilt van ander gelamineerd glas door het voldoen aan de vereisten van genormaliseerde tests die gespecificeerd zijn in de Europese bouwcode. Het betreft tests waarbij het glas een impact krijgt te verduren. Naar gelang het gekozen glas en tussenlagen verschilt hierbij het (breuk)gedrag. Van gebroken veiligheidsglas wordt verwacht dat het een bepaalde sterkte en stijfheid behoudt, dat de glasscherven worden vastgehouden door de tussenlaag en dat het algemene risico op snijletsels wordt verlaagd.

Er zijn drie types van glas te onderscheiden: klassiek uitgegloeid glas, thermisch versterkt glas en gehard glas, respectievelijk van minder sterk naar sterker. Veiligheidsglas uit platen van gehard glas is de sterkste optie en zal het minst snel barsten vertonen bij impact.

Tussenlagen die vaak gebruikt worden om de glasplaten aan elkaar te hechten zijn PVB (polyvinylbutyral) en SentryGlas® (polyethyleen-co-methacrylzuur, eveneens een vorm van kunststof en dus geen glas). Gebroken glas kan enkel nog druk opnemen. De tussenlaag is cruciaal om de trekspanning op te nemen bij belasting op een gebroken glaslaminaat. De tussenlaag gedraagt zich hierbij ductiel en heeft dus geen bros breukgedrag zoals glas. SentryGlas® is sterker dan PVB. Veiligheidsglas met SentryGlas® als tussenlaag biedt een hogere weerstand en is in principe de beste keuze.

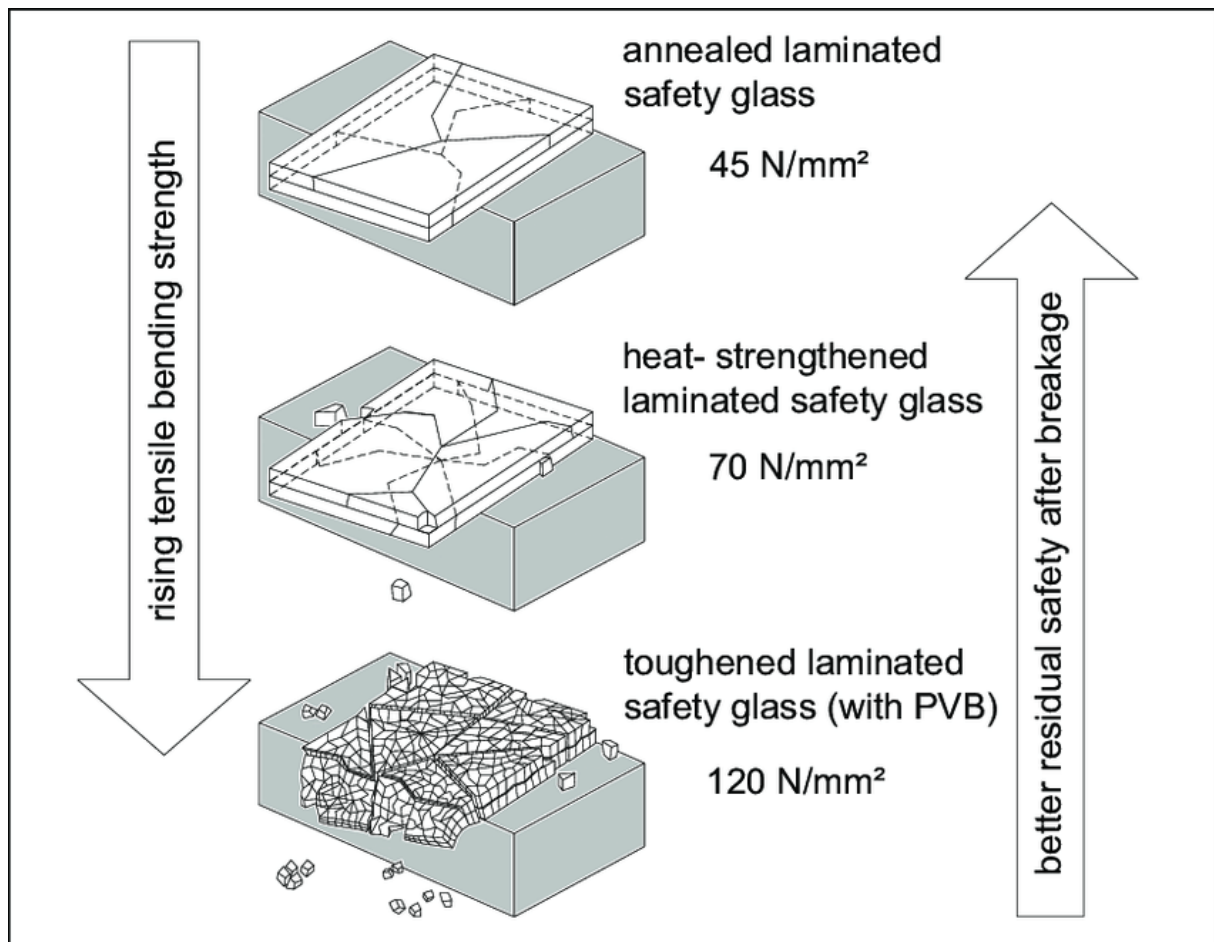
In dezelfde redenering zou men er dan van uitgaan dat een veiligheidsglas bestaande uit gehard glas en gebonden door SentryGlas® de beste optie is om te gebruiken. Maar dat is het niet voor alle toepassingen.

Naast de gewenste residuele sterkte, mag het veiligheidsglas ook niet te veel doorbuigen na breuk. Bijvoorbeeld voor een vrijstaande glazen borstwering mag de opening niet te groot worden. Met 'vrijstaand' wordt bedoeld dat het glas niet in een kader zit, maar slechts door een profiel aan de onderrand of door 'point-fixings' wordt gedragen, een veel gekozen optie in hedendaagse architectuur. Qua stijfheid is SentryGlas® hier opnieuw de beste keuze, maar gehard glas is dat niet per sé, zeker niet als het wordt toegepast voor alle lagen in het laminaat. Dat valt uit te leggen aan de hand van het breukpatroon van de verschillende types beglazing. Terwijl uitgegloeid glas en thermisch versterkt glas in grote scherven breekt, doet gehard glas dat in kleine stompe stukjes (Afb. 1).



Afb. 1: Breukgedrag van glas. Links: uitgegloeid glas. Midden: thermisch versterkt glas. Rechts: gehard glas. (© saflex.com)

In de 'volledig gebroken'-toestand van veiligheidsglas wordt er bij een breuk in grote scherven een betere residuele stijfheid verkregen omdat deze grote stukken elkaar overlappen. Als het laminaat daarentegen uit twee lagen gehard glas bestaat, heeft het door de kleine stukjes minder residuele stijfheid en zal het paneel dus sneller doorbuigen onder eenzelfde last. Afbeelding 2 toont mooi de paradox tussen 'de sterkte tegen de eerste barst' en 'de resterende veiligheid ná breuk'. In dit voorbeeld zijn alle laminaten gebonden door een PVB-tussenlaag.



Afb. 2: Verschillende beglazingstypes met hun bijbehorende breukpatronen (gelamineerd met PVB) en hun karakteristieke treksterktewaardes. (© Laufs, W., & Luible, A.)

Als de glasplaten gebonden zouden zijn met SentryGlas® in plaats van PVB, zou het paneel niet zo sterk doorhangen als in afbeelding 2. Maar ook bij de sterkere tussenlaag is het principe van toepassing en scoort gebroken gehard glas slechter dan gebroken ongehard of thermisch versterkt glas. Dit werd aangetoond door testen uitgevoerd door Kuraray (eigenaar van SentryGlas®). De eerste test in 2015 gebeurde

op een gebroken glaslaminaat uit gehard glas gebonden met SentryGlas®. Er werd een belasting van 1,5 kN/m aangebracht en het paneel boog daarbij veel meer door dan de gewenste 15 centimeter (Afb. 3 links). De tweede test in 2016 gebeurde op een gebroken glaslaminaat uit thermisch versterkt glas gebonden met SentryGlas®. Dit paneel was wel in staat om dezelfde belasting veilig te weerstaan (Afb. 3 rechts).



Afb. 3: Links: Test uit 2015 op gebroken thermisch gehard gelaagd glas gebonden met SentryGlas®. Rechts: Test uit 2016 op gebroken thermisch versterkt gelaagd glas gebonden met SentryGlas®. (© Kuraray)

Als men toch gebruik maakt van twee of meerdere geharde glasplaten om veiligheidsglas te maken (wat op zich een logische keuze is; het is het sterkste en breekt in veilige stompe stukjes), kiest men best voor SentryGlas® in plaats van PVB als tussenlaag (SentryGlas is ongeveer honderd keer stijver dan PVB). Bijvoorbeeld een vrijstaande glazen borstwering met PVB kan heel hard doorbuigen na breuk, wat het ‘natte dweil effect’ genoemd wordt. Afbeelding 4 toont aan dat een standaard PVB-tussenlaag geen verstandige keuze is bij een glaslaminaat uit gehard glas, wat we ook zagen in afbeelding 2.

Samenvattend: voor de grootste weerstand tegen de eerste breuk is veiligheidsglas uit gehard glas gebonden door SentryGlas® de beste optie. Maar dat is niet zo voor de weerstand tegen doorbuiging ná breuk; dan is veiligheidsglas bestaande uit uitgegloeid glas of thermisch versterkt glas gebonden door SentryGlas® de beste optie. In plaats van SentryGlas® kan er ook structureel PVB gebruikt worden. Dit stijvere PVB heeft vergelijkbare prestaties, althans bij temperaturen lager dan 30°C. Afhankelijk van het toepassingsgebied, is het dus wel interessant om na te denken over welke samenstelling gewenst is.



Afb. 4: Laminaten uit gehard glas. Links: SentryGlas®. Rechts: PVB. Er blijft geen enkele fysiek barrière over. (© Uit [1])

Referenties ADDENDUM 2: BREUKGEDRAG VAN VEILIGHEIDSGLAS

TEKST

- **[1]** Malvinder Rooprai, S. (2017). Enhanced Structural Integrity of Laminated Glass Balustrades. Kuraray India Pvt. Ltd. *GPD Proceedings 2017*. 397-400.
- **[2]** Malvinder Rooprai, S. (2017). Presentation: Enhanced Structural Integrity of Laminated Glass Balustrades. *GPD Proceedings 2017*. Geraadpleegd van https://www.gpd.fi/GPD2017_proceedings_book/presentations/MRooprai.pdf
- **[3]** Kuraray. (2014). *Post-glass breakage performance of laminated safety glass. Laminated safety glass for architectural applications is the only safety glazing that provides optical quality that remains intact after breakage*.
- **[4]** Belis, J. (2018). *Glass Structures*. (Academiejaar 2018–2019). E044630. Universiteit Gent

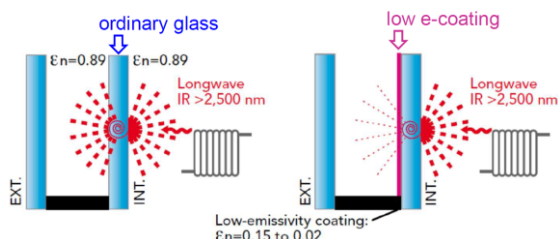
AFBEELDINGEN

- **Afb. 1:** © Saflex. Geraadpleegd van <https://www.saflex.com/saflex-guide>
- **Afb. 2:** Uit: Laufs, W., & Luible, A. (2003). *Introduction on use of glass in modern buildings*. Rapport N° ICOM 462. EPFL - ICOM Lausanne
- **Afb. 3:** © Kuraray. Uit [2]
- **Afb. 4:** Uit [1]

ADDENDUM 3

LOW-E COATINGS

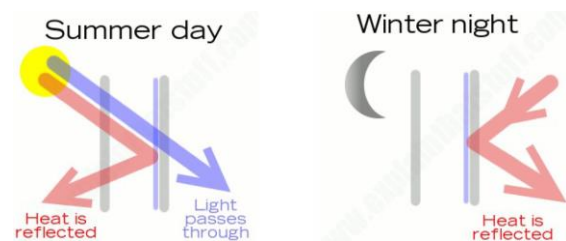
Een externe warmtebron (de zon of vb. een radiator) zal een raam opwarmen. Dat komt omdat het glas de ontvangen warmtestralen voor een groot deel absorbeert, en slechts een klein deel ervan terug reflecteert. Alle opgewarmde materialen, dus ook glas, geven die warmte terug af (via lange golf infraroodstraling). Voor standaard transparant glas wordt meer dan 80% van de warmte geabsorbeerd en later terug uitgestraald. Bij ramen wordt er geprobeerd om deze waarde naar beneden te krijgen. Dat kan aan de hand van low-e coatings. Low-e staat voor 'low emissivity'. Door de emissiviteit (de mate waarin een object warmte uitstraalt) van een raam te verminderen, kan het isolerende vermogen (U-waarde) worden verbeterd (Afb. 1).



Afb. 1: Een low-e coating verlaagt de emissiviteit van het glas: er is minder warmte-uitstraling naar de ongewenste zijde. In dit geval zorgt de coating ervoor dat de warmte binnen blijft. Het raam heeft minder warmteverlies (een betere U-waarde). (© Uit [2])

Low-e coatings op glas zorgen ervoor dat een veel groter deel van warmtestraling van een externe bron meteen wordt terug gereflecteerd, en dus niet geabsorbeerd of doorgelaten wordt. Concreet betekent dat in de zomer de warmtestralen van de zon (korte én lange golf IR) direct weerkaatst worden op het glasoppervlak. Het glas krijgt de kans niet om deze warmtestralen door te laten of te absorberen, om ze later terug uit te stralen. De warmte van de zon blijft dus

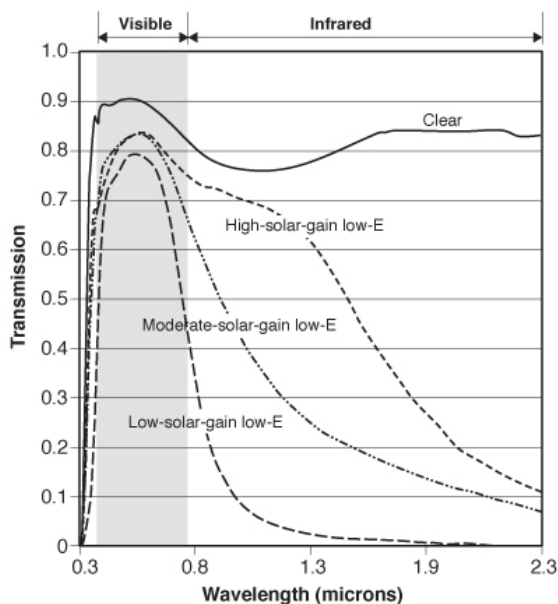
buiten. Dat vermindert de koellasten van een gebouw (Afb. 2 links). Ook in de winter, wanneer de warmtebron binnen zit (vb. radiatoren), is een low-e coating voordelig. De coating zorgt ervoor dat de warmte van de radiator (lange golf IR) terug in de ruimte wordt gereflecteerd en niet door het raam naar buiten verloren gaat. Zo is er een verminderde verwarmingsbehoefte (Afb. 2 rechts). Een low-e coating kan dus het energieverbruik van een gebouw verminderen doorheen het jaar.



Afb. 2: Een low-e coating zorgt in de zomer voor een verlaagde koelbehoefte en in de winter voor een verminderde verwarmingsbehoefte. (© Uit [2])

Uiteraard worden low-e coatings zodanig ontworpen dat het zichtbaar spectrum van het zonlicht wel doorgelaten wordt. Als men spreekt over de selectiviteit van een low-e coating gaat dat over de verhouding tussen het aandeel doorgelaten zichtbare straling van de zon enerzijds en het aandeel tegengehouden warmtestraling van de zon anderzijds. Normaal glas laat 90% van het zichtbaar licht door, maar ook 87% van het totale zonnenspectrum (ook IR en UV), wat resulteert in een selectiviteit van amper 1,03. Glas met een coating haalt dubbel zo hoge selectiviteitswaardes, wat duidt op een heel precieze selectie van het zonnenspectrum dat doorgelaten wordt (zichtbaar licht). De rest van de stralingen geraken er minder door (IR en UV). Deze worden 'low solar gain' low-e coatings genoemd.

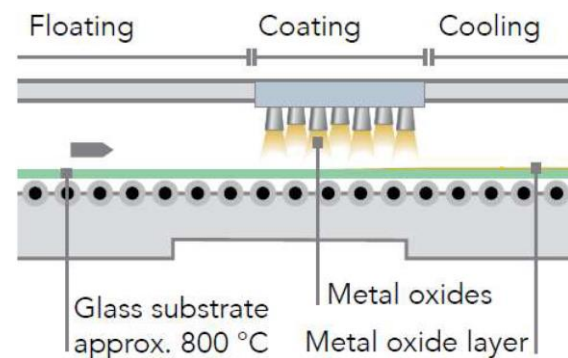
Er worden echter ook ‘high solar gain’ low-e coatings gemaakt waarbij een deel van de zonnewarmte (het aandeel korte golf IR) wél wordt doorgelaten (Afb. 3). Dat lijkt op het eerste zicht tegenstrijdig met het doel van een low-e coating. Deze coatings zijn namelijk ontwikkeld voor koudere klimaten waarbij de zonnewarmte welkom is. De coatings zijn vooral bedoeld om de warmte van verwarmingselementen (lange golf IR) binnen te houden ‘in de winter’ en niet om de zonnewarmte buiten te houden ‘in de zomer’. De selectiviteitswaarde van een coating is dus niet per se hét criterium voor de kwaliteit van de coating.



Afb. 3: De transmissie van verschillende types low-e coatings. (© Uit [2])

Het functionele deel van een low-e coating is een ultradunne laag metaal. Daarop reflecteert de warmtestraling. Het metaal is zo dun dat je erdoor kunt kijken. Low-e coatings kunnen op twee manieren aangebracht worden op een glasoppervlak. Enerzijds is er de ‘sputtered’ techniek waarbij in een vacuümkamer een zilverlaagje op het glasoppervlak wordt ‘geschooten’. Hoewel het zilverlaagje beschermd zit tussen andere laagjes, worden sputtered coatings als zachte coatings benoemd. Ze hebben weinig weerstand tegen chemische of mechanische aantasting. Deze worden dus best gebruikt langs de binnenzijde van de spouw bij een IGU.

Anderszijds bestaat er de ‘pyrolitische’ methode om een coating aan te brengen. Daarbij wordt tinoxide verneveld boven het glasoppervlak. De glasplaat is in nog half gesmolten toestand, zo kan het tinoxidelaagje ingebakken worden in het glas (Afb. 4). Deze harde coatings zijn veel resistenter (vb. tegen schoonmaakmiddelen) en kunnen dus langs de buitenzijde van glaspanelen ingezet worden.



Afb. 4: ‘Pyrolitic coating’-techniek: de metaaloxiden worden in het oppervlak gebakken en vormen zo een harde en resistente coating. (© Uit [2])

Referenties ADDENDUM 3: LOW-E COATINGS

TEKST

- **[1]** Belis, J. (2018). *Glass Structures*. (Academiejaar 2018–2019). E044630. Universiteit Gent
- **[2]** Reyniers, M.-F. (2018). *Building Chemistry. Part 3. Inorganic polymeric construction materials*. (Academiejaar 2018–2019). E052730. Universiteit Gent

AFBEELDINGEN

- **Afb. 1, Afb. 2, Afb. 3, Afb. 4:** Uit [2]

Ontwerpen met glas in hedendaagse architectuur. Capita Selecta

Koen Mersy