

Transparant restaureren

Met het begrip transparant restaureren vat ik alle mogelijke aanpassingen aan een historisch gebouw op, die tot doel hebben om de levensduur van het gebouw te vergroten door glazen elementen te gebruiken als vervanging van missende oorspronkelijke gebouw delen/componenten. Deze aanpassingen kunnen soms slecht decoratieve elementen betreffen maar ook ingrijpende oplossingen waarbij deel van de hoofdconstructie wordt vervangen. Het doel van dit onderzoek is de mogelijkheden te verkennen van de toepassing van constructief glas binnen de praktijk van restauratie als een innovatief nieuwe technologie dat ons architectonisch erfgoed borgt voor de toekomst; via een kenmerkende maar subtiele benadering tot restauratie. Om de innovatieve transparant restaureren benadering klaar te maken voor reële toepassingen is er een veelzijdige methodologie ontwikkeld die de diverse aspecten van restauratie theorie, esthetiek, productie en constructie technieken, milieutechnisch ontwerpen meeneemt. Dit door toetsing van het systeem door het bouwen van prototypes en het beproeven van constructies.

Probleem definitie

Het belang van het behouden van ons architectonisch erfgoed voor toekomstige generaties staat tegenwoordig niet meer ter discussie. Het architectonisch erfgoed wordt universeel gezien als een integraal deel van onze nationale identiteit. De hedendaagse benadering tot restauratie is gebaseerd op Williams Morris' "Manifesto of the society for the protection of ancient buildings" geschreven in 1877. Dit stelt dat iedere aanpassing van een historisch gebouw minimaal moet zijn en duidelijk te onderscheiden moet zijn van het oorspronkelijke gebouw/materiaal. Dit zodat duidelijk is welke deel uit welke tijd stamt en om te voorkomen dat er misinterpretaties optreden betreffende de aard en constructie van het oorspronkelijke gebouw. Oude gebouwen hebben een unieke culturele, historische en esthetische waarde; als deel van hun authenticiteit moeten deze aspecten erkend en gerespecteerd worden. Aan de andere kant, veroudering van de historische materialen vereist werkbare oplossingen om een monument constructief aan de eisen te laten voldoen zodat de toekomst van het gebouw geborgd is. Tegenwoordig is er vaak een conflict tussen aan de ene kant het handhaven van het gebouw en aan de andere kant het handhaven van de oorspronkelijke en vaak door de tand des tijds aangetaste constructie. De balans tussen deze twee is deel van het debat tussen restauratie en conservering. Conserveringsbehandelingen van oude materialen lopen het risico dat oud en nieuw niet meer goed te onderscheiden zijn. Dit terwijl de noodzaak om de constructieve veiligheid te waarborgen vaak resulteert in visueel zeer zichtbare en niet reversibele oplossingen die het authentiek beeld van het monument aantasten. Hoewel de theorie en methodologie van restauratie ver ontwikkeld zijn, is de kritische vraag nog steeds niet beantwoord: Hoe kunnen we aanpassingen plegen in een historisch gebouw zonder het historisch beeld aan te tasten?¹

¹ Stanley-Price, N. (2009). The Reconstruction of Ruins: Principles and Practice. In A. R. a. A. Bracker (Ed.), Conservation: Principles, Dilemmas and Uncomfortable Truths: Elsevier

Waarom glas?

Het onderscheid tussen historisch en nieuw toegevoegd materiaal kan versterkt en verduidelijkt worden door transparante materialen naar de voorgrond te brengen. Glas is een materiaal dat intrinsiek transparant is en dat ook voldoet aan de richtlijnen voor restauratie zoals vastgelegd in het "Venice Charter"²; Het draagt een duidelijk eigentijds karakter en daardoor is het te onderscheiden van bestaande historische bouwmaterialen. Door het neutrale uiterlijk van glas is het onderscheidend omdat het niets toevoegt aan het uiterlijk. Dit resulteert in een minimalistische verandering van de beeldvorming. De hedendaagse ontwikkelingen op het gebied van constructief glas geven de ontwerper nieuwe mogelijkheden waarbij constructieve elementen visueel geminimaliseerd worden terwijl de constructie een transparante beschermende barrière vormt die de historische constructie beschermt.

Hoewel glas tot nu toe niet in het algemeen beschouwd wordt als een materiaal voor restauraties, heeft de Italiaanse architect Franco Minissi [1919-1996] diverse methodieken ontwikkeld voor het gebruik van glas in transparante restauraties. In zijn werk heeft hij het belang van een verbinding tussen een historisch gebouw en zijn directe omgeving ontwikkeld door gebruik te maken van perspex om het oorspronkelijke beeld van het historisch gebouw te herstellen. Zijn meest waardevolle bijdrage is dat gebruik van transparante materialen de lagen in de constructie zichtbaar maakt waardoor zowel de oorspronkelijke als de huidige toestand van de constructie zichtbaar worden. Hierdoor zijn zowel het verleden als het heden gelijktijdig in beeld. Minissi's transparante restauraties zijn een poging om de architectonische geschiedenis en haar verhaal in het heden zichtbaar te maken. In een dergelijke context kan glas evolueren tot een voorkeursmateriaal voor restauratie toepassingen.

Casestudie

De casestudie van een oude, gedeeltelijk ingestorte, toren in zuidwest Griekenland is gebruikt om de mogelijkheden van het gebruik van glas in restauratie te verkennen. De toren was gebouwd in de 13^e eeuw en is deel van een groot kasteel, dat op dit moment archeologisch onderzocht wordt. De constructie is eenvoudig, in doorsnede een rechthoekige vorm [13.2 x 9.1 m], ongeveer 8 m boven zeeniveau. Eén kant van de toren is deel van de kasteel muur. De analyse van de huidige staat van het gebouw is een essentieel deel van de onderzoeksmethodologie omdat het monument daardoor beter begrepen kan worden en de noodzakelijke ingrepen voor restauratie vastgesteld kunnen worden. De pathologie van schade geeft duidelijk aan dat de nabijheid tot de zee de hoofdreden voor verval is. Zee zout dringt door in het poreuze metselwerk en kristalliseert daar. De continue vochtigheid en lage temperaturen in de winter bevorderen dit proces. De kristallisatie veroorzaakt door de volumevergroting lokale spanningen die scheurvorming in het metselwerk veroorzaken. De scheurvorming verzwakt zowel de stenen als de voegen van het metselwerk. Afbrokkeling van materiaal is een gevolg waardoor vooral de onderkant van de muur, nabij de zee, aanzienlijke variatie in dikte vertoont. Op basis wordt voorgesteld om de lege ruimte op te vullen. Hierbij wordt in eerste instantie gekeken naar de zuidoost muur, die de grootste schade heeft. Door de openingen in de muur op te vullen wordt het gebouw bestendiger tegen aardbevingen. Het gebruik van glas verzegeld de kwetsbare laaggelegen

² Internationaal handvest voor behoud en restauratie van monumenten en stads- en dorpsgezichten, Venetië, 1964

delen van de muur, waardoor het historisch metselwerk beschermd tegen de invloeden van de naastgelegen zee.

Ontwerp benaderingen

Het architectonische en constructieve ontwerp van een glazen constructie voor een te restaureren monument is gebaseerd op de richtlijnen voor restauraties in combinatie met de eigenschappen van het glas. Hierbij moeten alle aspecten zoals esthetiek, vorm, constructief ontwerp en productiebeperkingen worden meegenomen

De verschillende mogelijke vormen van het glas, zoals vlak glas, gegoten glas en samengesteld glas worden onderzocht en gewogen op de comptabiliteit met de bestaande constructie. Een constructie van gegoten glazen steen in een stapel constructie is ontwikkeld om de missende muurdelen te vervangen en de constructie als geheel te stabiliseren. Een dergelijke stapelconstructie sluit aan bij de technische en esthetische grondslagen van de historische constructie. Betreffende het gebruik van glas moet worden opgemerkt dat het een beduidend stijver materiaal is vergeleken met de kalksteen in de historische constructie³. Hierdoor is er minder volume aan materiaal nodig. Historische constructies verkrijgen hun stabiliteit door het gebruik van massieve stijve vormen waarbij bulk van materiaal de slechte eigenschappen van in dit geval de kalksteen compenseert. Moderne materialen zoals glas zijn veel stijver en sterker waardoor ze andere verbindingen nodig hebben⁴. Een voordeel is dat gebruik van glas in een historisch monument tot gewichtsbesparing kan leiden. Een glazen constructie heeft maar een kwart van de massa nodig van een kalksteen constructie voor dezelfde constructieve eigenschappen. Om een goede en gelijkmatige geleiding van de krachten van de oude naar de nieuwe constructie delen te waarborgen, wordt een variabele metselwerk dikte gebruikt. Waar de glazen muur de historische muur nadert, is de glazen muur dikker. Dit geeft een geleidelijk overgang van krachten in het materiaal en voorkomt spanningsconcentraties in de historische constructie. Deze piramidale doorsnede verhoogt ook de weerstand tegen knik. Constructieve berekeningen geven aan dat de glazen minimaal 125 mm dik moet zijn in het midden en 625 mm aan de randen waar de verbinding met het historisch metselwerk is [zowel horizontaal als verticaal].

Gegoten glas is een relatief nieuw materiaal in de bouw. Het is gebruikt in een beperkt aantal projecten in de vorm van glazen stapelconstructies. Bijvoorbeeld het Atocha Memorial [Madrid, 2007], het Optical House [Hiroshima, 2013] en het Crystal Houses [Amsterdam, 2016]. Studie van deze drie voorbeelden geeft aan dat dit soort constructies niet eenvoudig is en dat er aantal kritische zaken die mee moeten worden genomen in het ontwerp, gerelateerd aan de eigenschappen en productie van gegoten glas. Een van de meest kritische beperkingen is gerelateerd aan de productie van gegoten glazen elementen. Glas moet na het gieten langzaam en gelijkmatig afgekoeld worden om te voorkomen dat residuele spanningen ontstaan in het glas⁵. Dit is een tijdrovende, en dus dure, zaak. De groter de steen, de moeilijker het is om deze gelijkmatig af te koelen. Daarom worden bij voorkeur

³ De elasticiteits modulus van Natron Kalk glass is 68-72 GPa, die van kalksteen 35-55 GPa

⁴ Feilden, B. M. (1982). Conservation of historic buildings. London; Butterworth Scientific

⁵ Het spanningsvrij gloeien van glas is dat onderdeel van het productie proces waar het glas langzaam en gecontroleerd afkoelt om de opbouw van residuele spanningen te voorkomen.

borosilicaat stenen met een massa van minder dan 10 kg gegoten. De lage thermische expansie coëfficiënt van borosilicaat glas [$33 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$; ongeveer 1/3 van het gebruikelijke natron kalk glas] maakt snellere en productie mogelijk en minimaliseert de latere kans op breuk door ongelijke temperaturen in de glazen gevel⁶. Ook niet onbelangrijk is het gebruik van een zelfdragende glazen stapelconstructie in deze benadering tot restauratie. Dit bepaald niet alleen de mate van transparantie [gebruik van additionele hulpconstructies is nadelig voor de transparantie], maar ook de mate van reversibiliteit van de restauratie. Dit is essentieel in de moderne benadering tot restauratie. Het voorgestelde ontwerp is een zuivere glazen stapelconstructie die de hoge druksterkte van het gegoten glas [minimaal 200 MPa]⁷ optimaal gebruikt. Omdat de verbinding tussen de glazen constructie en de historische constructie zonder mortel of lijm is, is er geen permanente verbinding aan het historisch materiaal waardoor de restauratieve ingreep volledig reversibel is. Omdat de glazen stenen door hun vorm samenhang hebben, is beweging tussen de glazen stenen beperkt en de stabiliteit van de volledige constructie gewaarborgd.

In elkaar grijpende glazen stapelconstructie

Het gebruik van in elkaar grijpende stenen gaat terug tot de Inca's. Gebruik van in elkaar grijpende stenen maakte stabiele en zelf richtende constructies mogelijk. Het gebruik van lijm- of specie-loze verbindingen betekent dat de constructieve veiligheid van dergelijke systemen gebaseerd is op de geometrie van de individuele stenen die door gebruik van in elkaar grijpende holtes en uitsteeksels niet verticale krachten overdragen⁷. Vergeleken met monolithische constructies kunnen in elkaar grijpende stapel constructies mechanische energy, van bijvoorbeeld aardbevingen, goed absorberen door lokale verplaatsingen binnen de stapelconstructie. Deze is door de aard van de constructie zelf richtend en keert dus weer terug in een stabiele vorm. Voegen en andere verbindingen geven spanningsconcentraties waardoor de veiligheid in het geding kan komen. De flexibiliteit van de voorgestelde glazen constructie voorkomt spanningsconcentraties en dus schade⁸. Ook in klassieke materialen, zoals baksteen en beton, wordt onderzoek gedaan naar vergelijkbare specie loze verbindingen. De voordelen van snelle bouw, minder arbeid en dus lagere kosten zijn belangrijk in de moderne bouwpraktijk. Een dergelijk systeem in glas is volledig innovatief en heel geschikt voor restauratieve toepassingen omdat de ingreep aangebracht en indien nodig volledig verwijderd kan worden zonder de originele constructie te schaden.

De grootte en richting van de belastingen bepalen hoe de constructie opgelegd/vastgezet moet zijn. De gevel die in dit onderzoek bekeken is, is een vrijstaande gevel en moet dus de windkracht en andere krachten loodrecht op de gevel en de verticale krachten van de constructie kunnen weerstaan en doorgeven. Dit impliceert dat het mechanisme van in elkaar grijpende blokken in de gevel in de horizontale richting krachten moet overdragen terwijl het zelfgewicht de constructie in de verticale

⁶ Door het temperatuurverschil dat kan ontstaan door opwarming door de zon en afkoeling door zeewater kan mogelijk thermische breuk ontstaan.

⁷ Dikonomopoulou F., F. V., R. Nijse, K. Baardolf (2014). "A completely transparent, adhesively bonded soda-lime glass block masonry system." *Journal of Facade Design and Engineering* 2

⁸ Pave Rogério, H. U. (2010). *Structural Behaviour of Dry Stack Masonry Construction*. Portugal SB10: Sustainable Building Affordable to All, Vilamoura, Portugal

richting moet borgen. Verschillende manieren van in elkaar grijpen zijn onderzocht zodat verschillende ontwerpen van glazen blok vergeleken kunnen worden op transparantie, vrijheidsgraden qua beweging, maakbaarheid en monteerbaarheid. Het gebruik van computermodellen gekoppeld aan 3D print en laser snij technieken om modellen te maken op verschillende schaal niveaus was kritisch in de ontwikkeling van het uiteindelijk ontwerp. Via dit iteratief proces is een innovatieve glazen steen ontwikkeld, die qua principe vergelijkbaar is met de LEGO® steen en die aan de bovenstaande eisen voldoet. Het symmetrisch ontwerp van uitstulpingen boven en holtes onder geeft een simpel en elegant ontwerp dat zelf richtend is en eenvoudig en snel geplaatst kan worden. De homogene dikte geeft een homogene koeling gedurende productie. Het vermijden van dunnere secties voorkomt zwakke plekken en lokale residuele spanningen. Variaties op het basis ontwerp zijn ook ontwikkeld [halve steen, dubbele breedte, hoek model] om de specifieke problemen op te lossen die ontstaan bij het bouwen van een ondersteunende muur met variabele dikte. Een familie van acht specifieke geometrieën is ontwikkeld. Samen maken deze de snelle constructie van dragende muren in verschillende vormen mogelijk.

De stenen kunnen niet direct op elkaar gelegd worden. Door het brosse karakter van glas is het makkelijk voor scheuren om te vormen bij spanningsconcentraties die ontstaan door lokaal contact. Dit betekent dat een transparant kunststof intermediair nodig is tussen de stenen. Dit heeft als bijkomend voordeel dat de doorzichtigheid maximaal is en de constructie makkelijk gedemonteerd kan worden. Het intermediair stabiliseert de constructie en vereffent onregelmatigheden in de stenen. Het geeft ook druk en schuifspanningen homogeen en uniform door. Kunststoffen zoals PET, PA, PETG, PMMA en PVC zijn geschikt als intermediair, waarbij wel goed aan de UV-weerstand gedacht moet worden.

Verbindingen en detaillering

Eén van de meest kritische aspecten van het ontwerp is de verbinding tussen de glazen muur en de historische constructie. Geprefabriceerde componenten van gestapelde vlak glas panelen worden gebruikt om de ruimte tussen de gegoten glazen stenen en het ruwe oneffen oppervlak van de historische constructie op te vullen. Door gebruik van 3D scan technieken kan een nauwkeurig digitaal model van het monument gemaakt worden. Dit geeft een exact beeld van de te vullen ruimte. Met waterstraal snijden kan een pakket van vlak glas gesneden worden, dat door correct snijden en stapelen van verschillende diktes de ruimte exact vult.

Deze pakketten worden mechanisch verbonden aan elkaar met een minimum aan verbindingen aan de historische constructie door gebruik te maken van roestvast stalen staven. Aan de kant van de glazen stenen ruimtes zijn ontworpen in het glazen pakket die in de gegoten glazen stenen grijpen. De verbinding aan de historische constructie is bewust ontworpen als het zwakste punt. Lokaal bezwijken van dit zwakste punt is dus een waarschuwing voor overbelasting. Een neopreen tussenlaag wordt gebruikt tussen de historische constructie en het vlak glas pakket om een droge en flexibele verbinding te maken die ook de verschillen in thermische uitzetting kan opnemen. Berekeningen geven aan dat een dikte van minimaal 4 mm noodzakelijk is om de benodigde vervormingsverschillen op te nemen. Een te dunne laag geeft een te rigide verbinding die tot scheurvorming kan leiden.

Horizontale verbindingen zijn ook onderzocht als deel van het totaal onderzoek naar de preservering van het monument. De onderkant van de glazen constructie is verbonden aan de oude fundering op een manier dat horizontale verplaatsingen door aardbevingen opgenomen kunnen worden. Verankerde roestvast stalen veren borgen genoeg flexibiliteit dat de glazen stapel constructie aardbevingsbestendig is. Het dak is ontworpen als een monolithische glazen plaat die de vorm volgt van het gewelf van het monument en dat de glazen stapel constructie horizontaal aan het monument verbindt. In de glazen stenen gegoten uitsparingen verbinden het gebogen glazen dak met de gegoten glazen stenen. Het voordeel hiervan is dat voldoende toleranties biedt gedurende de bouw omdat de uitsparingen meerdere opties bieden qua verankering.

In het ontwerp is een betonnen fundering voor de glazen muur opgenomen die de krachten kan opnemen en verdelen en die tevens voldoende stabiel is om de glazen muur op te kunnen plaatsen.

Prototype en Beproeving

Om het concept te valideren is een schaal 1:2 prototype gemaakt en beproefd. Dit binnen de *Glass & Transparency research Group* van de TU Delft. Doel was inzichten ontwikkelen hoe het systeem in werkelijkheid zal werken. Een serie van vijf in elkaar grijpende glazen blokken is getest op afschuiving. Het experiment gaf aan dat de "LEGO" achtige stenen een goede weerstand bieden tegen krachten loodrecht op de gevel, zoals windkrachten. In dit experiment werd een maximale kracht van 17.3 kN bereikt. Omdat de in het laboratorium gegoten stenen meer fouten en defecten bevatten dan industrieel geproduceerde stenen, is de gevonden sterkte dus een conservatieve waarde. Meer proeven met bij voorkeur industrieel vervaardigde stenen zijn wenselijk zodat een statistisch verantwoorde sterkte kan worden bepaald.

Om het prototype te maken, wordt eerst een 3D model van de mal uit MDF gefreesd. Van dit model wordt een wassen positief gemaakt. Met dit wassen positief wordt een gietmal (dus weer een negatief) gemaakt van een gips dat bestendig is tegen temperaturen tot 950°C. Deze gietmal wordt in de oven geplaatst onder een keramische bloempot vol met glazen fragmenten. Na aanzetten van de oven wordt langzaam de gewenste temperatuur bereikt en het glas loopt uit het gat onder in de bloempot in de gietmal. Deze methode wordt "kiln-casting" genoemd. De oven koelt dan langzaam af om te voorkomen dat er restspanningen in het glas ontstaan. De volledige cyclus duurt ongeveer 7 dagen. Na afkoeling wordt de gipsen gietmal opgelost in water om de glazen steen vrij te maken.

Voor de werkelijke constructie zou het nodig zijn om 17500 blokken te maken. Dit vereist productie in een glas gieterij waar herbruikbare, precisie, stalen mallen gebruikt zullen worden onder gecontroleerde condities.

Transparantie in de beeldvorming

In het restaureren van een historisch gebouw is het essentieel dat er harmonie is tussen de esthetica van het oude en het nieuwe deel. Het is daarom nodig goed te kijken naar de beeldvorming en het uiterlijk van de glazen gevel. De voorgestelde rechthoekige glazen stenen volgen de lijnen van de kalksteen muur. Het oppervlak van de glazen stenen is niet vlak maar ruw, vergelijkbaar met de kalksteen. De glazen gevel geeft dus een rustig beeld omdat het licht diffuus zal zijn. Het contrast met

de kalksteen is dus beperkt en het geheel blijft in harmonie. Glas is in deze zin een ideaal materiaal omdat het compleet beeld van het oorspronkelijke gebouw geeft, terwijl de aantasting door de tand des tijds zichtbaar blijft. Er is ook een duidelijke scheidingslijn tussen oud en nieuw. Het historische en het nieuwe zijn zichtbaar. Het oorspronkelijke historische gebouw is herkenbaar maar er is toch een beeld dat het in de moderne tijd plaatst.

Resultaten

Het meest waardevolle resultaat van dit onderzoek is de ontwikkeling van een innovatief constructie systeem dat gebaseerd is op in elkaar grijpende glazen blokken. Dit systeem is uitermate geschikt om historische monumenten die dusdanig vervallen zijn dat ze een constructief risico vormen te herstellen. Het systeem maakt een architectonische beeldtaal mogelijk die de weg opent voor een samenwerking tussen de vakgebieden van restauratie en constructief ontwerpen met glas. Indien het systeem wordt doorontwikkeld kan het een antwoord zijn op vraag naar een reversibel restauratie systeem, zoals genoemd in het Venice Charter. In de toekomst kan indien nieuwe technologieën beschikbaar zijn of andere toepassingen het nodig maken de glazen gevel eenvoudig verwijderd worden zonder het historische materiaal te beschadigen.

Verder vervult het concept van reversibiliteit niet alleen de ontwerp criteria voor deze restauratie, het kan ook de manier hoe we naar glas kijken en over glas denken veranderen. Door het hoge smeltpunt en de energie nodig voor het verwerken van glas, wordt glas vaak gezien als een milieuvriendelijk materiaal. Echter kan de gevel makkelijk uit elkaar gehaald worden en kunnen de stenen ook direct hergebruikt worden in een ander project. Dit leidt tot een milieuvriendelijker en duurzamer gebruik van glas. Als de componenten niet meer nodig of bruikbaar zijn, kunnen deze makkelijk worden omgesmolten. Dit kan omdat door het systeem van in elkaar grijpende blokken het glas niet vervuild is geraakt met lijm of andere chemicaliën.

Het concept van een transparante restauratie methodiek moet ook worden gezien als een integraal deel van de maatschappelijke tendensen van de moderne tijd. In een tijd van snel ontwikkelende technologie en continue innovatie in tal van disciplines, ontwikkelen de disciplines van restauratie en conserveringstechnieken tot een essentieel hulpmiddel om het cultureel erfgoed te behouden en toerisme te bevorderen. Het gebruik van glas in goede restauratie scenario's kan dus een goed ontwerp hulpmiddel zijn maar is ook een voorbeeld van het belang van de technologie in de moderne tijd. Technologie in dienst van het behoud van het culturele erfgoed kan waarde toevoegen aan historische en archeologische locaties en daardoor de gebieden erom heen aantrekkelijker en leefbaarder maken.

Transparantie als een middel om het beeld van monumenten anders weer te geven is niet nieuw. Echter vernieuwing is er niet alleen om nieuwe ideeën te genereren, het schept ook mogelijkheden het oude en bestaande te innoveren en gebruiksklaar te maken voor de moderne tijd. Dat wat Franco Minissi vijftig jaar geleden niet kon bereiken omdat de technologie er niet klaar voor was, kan door de recente ontwikkelingen in 3D ontwerp en glas productietechnologie nu gerealiseerd worden. Restauratie met glas is nu een reële mogelijkheid waardoor Minissi's visie kan worden gerealiseerd.