

# Haalbaarheidsstudie voor de restauratie van de glasoverkapte exportuimen van het Paleis voor Schone Kunsten, Brussel



dr. ir.-arch. Filip Descamps

<http://www.daidalos.be>

## ABSTRACT

Musea zijn plekken waar omwille van de preventieve conservering van de kunstwerken strenge en soms variabele eisen aan het binnenklimaat gesteld worden. In de lezing wordt het traject geschetst dat gevolgd werd bij de haalbaarheidsstudie voor de restauratie van de glasoverkapte exportuimen van het Paleis voor Schone Kunsten van Victor Horta. Metingen en simulaties van de hygrothermische klimaatparameters en van de beschikbaarheid van daglicht worden geconfronteerd met de eisen voor de preventieve conservering van kunstwerken, de verwachtingen van architectuurhistorici, en de verzuchtingen van de tentoonstellingsverantwoordelijken.

- I Inleiding**
- II Situering en vastleggen van de prestatie-eisen**
- III Analyse van de bestaande toestand via metingen**
- IV Besluit: bouwfysische krijtlijnen voor de uitwerking van de oplossing**

# I Inleiding

We simuleren (1) om de bouwfysische prestaties van een ontwerp te controleren (2) en om bouwfysisch te ontwerpen.

Het simuleren om de prestaties van een ontwerp te *controleren*, is zinvol en noodzakelijk. Dit is belangrijk om in uitvoeringsfase tot een éénduidige en onbetwistbare beoordeling van gebouw- of componentprestaties te komen, maar het biedt slechts beperkte mogelijkheden om ontwerpmaatregelen te beoordelen. Het kan gebeuren met relatief gesloten simulatietools die, bij correcte invoer, ook een correcte evaluatie van de prestatie opleveren. De know-how van het simuleren beperkt zich in dit geval tot het beoordelen of een bepaald 'black box'-model wel geschikt is om de prestatie te modelleren. Een groot aantal van dit type simulatiepakketten is gebaseerd op genormeerde rekenmethodes.

Simuleren om te *ontwerpen* is een creatiever proces. Het doel bestaat erin ontwerpmaatregelen voor te stellen of te evalueren in die gevallen waar de complexiteit zo groot is dat basiskennis of ervaring niet volstaat om correcte ontwerpmaatregelen te formuleren. Deze complexiteit kan ontstaan uit ongebruikelijke randvoorwaarden of uit innovatieve gebouw- of componentconcepten.

Simulatie tijdens de ontwerpfase dient (1) om de verschillende invloedsfactoren in te schatten (2) om het probleem te reduceren tot ontwerpgerichte kengetallen die communicatie met de ontwerper mogelijk moeten maken en (3) om onszelf te overtuigen van de correctheid van de voorgestelde ontwerpbeslissingen.

De methodologie voor het oplossen van een nieuw bouwfysisch ontwerpprobleem bestaat uit vijf stappen:

- (1) het vastleggen van de bouwfysische prestatie-eisen ;
- (2) indien haalbaar: het uitvoeren van metingen in de bestaande toestand ;
- (3) het uitwerken van varianten van een type-oplossing via enkele iteratieve cycli. Met ontwerprichtlijnen worden de krijtlijnen geschetst waarbinnen de ontwerpmatige oplossing moet uitgewerkt worden. Binnen het ontwerpteam wordt dan een oplossing ontwikkeld die ook aan de niet-bouwfysische prestatie-eisen voldoet. Tijdens elke cyclus worden de krijtlijnen waarbinnen ontworpen wordt, strakker ;
- (4) het vertalen van het ontwerp in plannen, details en in bestekteksten ;
- (5) indien haalbaar: het uitvoeren van controlemetingen op een proefmodel.

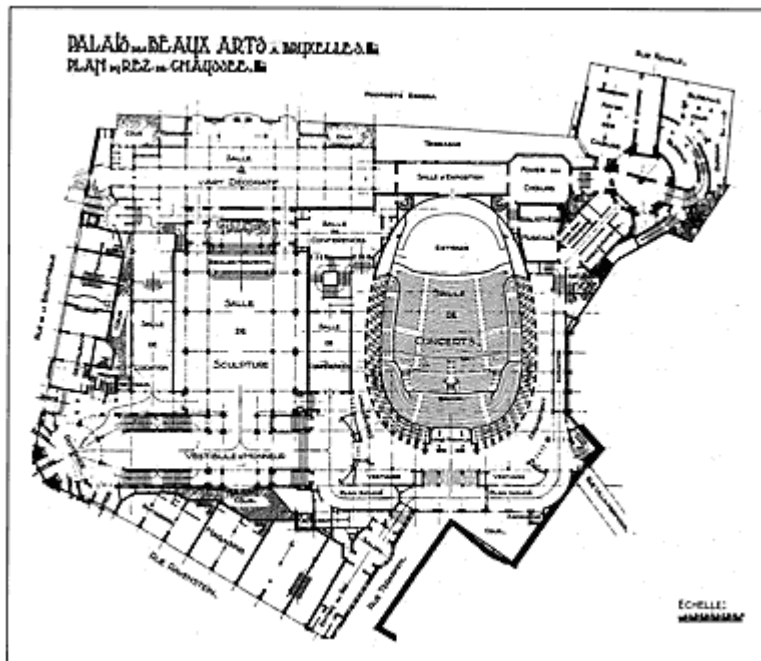
Voor elk ontwerpprobleem wordt een uniek geheel samengesteld van modellering, simulatie en meting, aangepast aan de specificiteit van het probleem. Veel problemen laten zich niet vooraf in een strak simulatiekeurslijf duwen en vergen van de gebruiker een probleemspecifieke know-how: (1) het doorgronden van het probleem, (2) het verwerven van inzicht in de ontwerpmatige mogelijkheden om het probleem op te lossen en (3) het beschikken over inzicht in de beschikbaarheid van grove en verfijnde simulatietechnieken.

In deze lezing geven we een voorbeeld van een ontwerptraject waarin simulatie en meting gecombineerd worden om tijdens een haalbaarheidsstudie een aantal ontwerprichtlijnen te formuleren.

## II Situering en vastleggen van de prestatie-eisen

### II.1 Het gebouw

De Belgische architect Victor Horta (1861-1947) ontwierp het Paleis voor Schone Kunsten (PSK). Het gebouw opende in 1928 zijn deuren. Horta ruilde in zijn ontwerp de kronkelende lijnen van de art nouveau in voor de geometrische vormtaal van de art deco. Maar de lichtinval in de tentoonstellingszalen en de ingenieuze schikking van de verschillende ruimtes verraden de hand van de meester. In zijn memoires noemt Horta het Paleis voor Schone Kunsten een hoogtepunt in zijn carrière.



Figuur 1. Grondplan van de gelijkvloerse verdieping

In het Paleis voor Schone Kunsten komen alle kunsten samen. Horta puzzelde de drie concertzalen, de tentoonstellingszalen en de conferentieruimten in elkaar tot een harmonisch geheel. Een staalskelet voor de dakspanten en het gebruik van gewapend beton maakten het open plan mogelijk.



Foto's 1-2. Tentoonstellingszalen.

De tentoonstellingszalen functioneren als een kunsthall: het PSK beschikt niet over een eigen collectie, maar mikt met grote en prestigieuze tijdelijke tentoonstellingen op een grote publiekstoeloop.

## II.2 De glasoverkapte tentoonstellingszalen

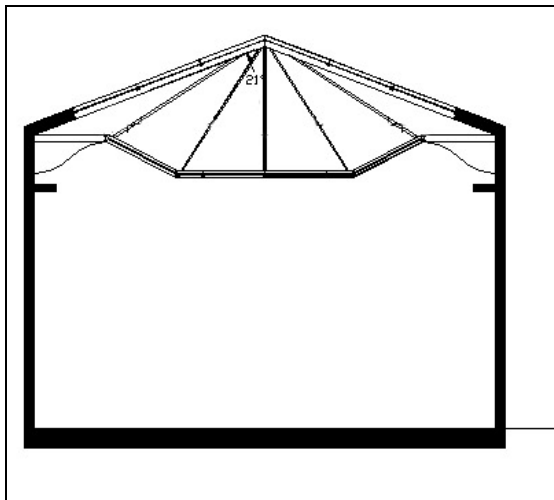
De tentoonstellingszalen waren oorspronkelijk grotendeels glasoverkapt. De buitenkap bestond oorspronkelijk uit enkele heldere beglazing die werd vervangen door een melkwhite kunststof golfplaat. De binnenbeglazing bestond oorspronkelijk uit gestructureerde enkele beglazing, maar werd uit veiligheids- en brandtechnische overwegingen door een vlakke licht gestructureerde kunststofplaat vervangen. De oorspronkelijke binnenbekleding van de zalen bestond uit een textielbespanning op strekmetaal. De huidige bekleding is een (vele keren) geverfde houten beplating. De vloer bestaat uit parket. De zijwanden van de zalen zijn grotendeels binnenwanden. Sommige zalen kunnen van andere zalen afgescheiden worden via in de wand verdwijnende schuifdeuren.



Foto's 3-6. Gedeeltelijk overzicht van de daken van de tentoonstellingszalen, zolderstructuur van de daken en binnenzichten.



Foto's 7-8. Zicht op de dakstructuur en oorspronkelijke binnenbekleding van de wanden



Figuur 2. Typische dwarsdoorsnede van een karakteristieke zaal (zaalbreedte 9.5 m).

## II.3 Criteria binnenklimaat

[Thomson 1986], [Haiad 1990] en [Camuffo 2001] geven een goed overzicht van eisen aan het binnenklimaat in musea. We vulden deze eisen aan met gegevens die bij de binnenklimaatssimulaties eenduidig moeten vastgelegd worden. We maken hierbij een onderscheid tussen zaalonafhankelijke binnenklimaatseisen (temperatuur en binnenluchtkwaliteit), en zaalafhankelijke binnenklimaatseisen (relatieve vochtigheid en verlichtingssterkte). Alle eisen gelden de klok rond: er wordt geconditioneerd voor de kunstwerken, en slechts in tweede instantie voor de gebouwgebruikers. De eisen gelden voor alle punten waar kunstwerken kunnen geplaatst worden: vloeren, en wanden tot een hoogte onder de lijst.

### II.3.1 Binnentemperatuur

Beheersing van de binnentemperatuur is belangrijk om de relatieve vochtigheid te beheersen. Het niveau van de binnentemperatuur wordt bepaald door het comfort van de bezoeker.

Er wordt categorie A volgens CR 1752 opgelegd, rekening houdend met een buitenklimaatafhankelijke kledingweerstand (0.7 in juni, 1.0 in december, variërend tussenin) en lage activiteit (1.7 met). Deze eisen worden aangevuld met de gebruikelijke eisen voor lokaal (dis)comfort.

Parameters	Recommended Limits (CEN CR 1752)		
	Category	Summer	Winter
PMV	A	-0.2 < PMV < 0.2	
	B	-0.5 < PMV < 0.5	
	C	-0.7 < PMV < 0.7	
PPD, [%]	A	< 6	
	B	< 10	
	C	< 15	

Tabel 1.

### II.3.2 Binnenluchtkwaliteit

De eisen aan binnenluchtkwaliteit worden gespecificeerd om de reinigingsfrequentie (en dus de beschadiging) van de kunstwerken te kunnen beperken. In [Haiad 1990] wordt een overzichtstabel gegeven voor grenzen aan gasvormige verontreinigingen en verontreiniging door deeltjes:

**TABLE 5**  
**Comparative Air Quality Specifications**

Environmental Variable	Control Levels		
	The Museum Environment (Thomson 1978)	The Museum Environment (Thomson 1986)	Preservation of Historic Records (NRC 1986)
SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , HNO <sub>3</sub>	10 μgm <sup>-3</sup> 10 μgm <sup>-3</sup>	<10 μgm <sup>-3</sup> <10 μgm <sup>-3</sup>	1 μgm <sup>-3</sup> Best available technology
O <sub>3</sub> , Particulates	0-2 μgm <sup>-3</sup> 60-80% MBT	<2 μgm <sup>-3</sup> 80% efficiency*	2 μgm <sup>-3</sup> See Table 6

Notes: \* On Eurovent 4/5 standard.  
MBT = methylene blue test.

Tabel 2.

Voor het comfort van de bezoekers wordt binnenluchtkwaliteit IDA 2 (pr EN 13779) opgelegd.

### II.3.3 Relatieve vochtigheid

De relatieve vochtigheid is functie van het materiaal van de kunstwerken. Het gros van de materialen mag bewaard worden in een omgeving met een relatieve vochtigheid 50 ± 5 %.

We vullen deze eisen met drie aspecten aan:

- de eisen moeten voldaan worden gedurende 98 % van de tijd ;
- de maximale tijdsgradiënt bedraagt 2% per uur ;
- de relatieve vochtigheid is altijd tussen 40 en 60%.

Materialen die een andere relatieve vochtigheid vergen, worden tentoongesteld in geconditioneerde kasten (metaal, fotografisch papier en sommige andere papiersoorten, film).

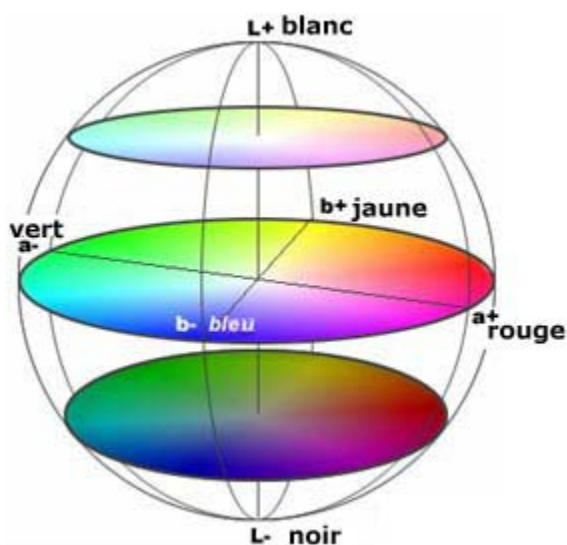
### II.3.4 Verlichtingssterkte

Er wordt ontworpen voor 'medium responsivity' materialen volgens CIE Technical Report 157:2004. De maximale verlichtingssterkte bedraagt dan 200 lux, met een maximale blootstelling van 600000 lux.uur/jaar. Deze eis geldt zowel voor de vloer, als voor de wanden, en is gebaseerd op de som van daglicht- en kunstlichtverlichting. Gevoeliger materialen kennen strengere criteria die het gebruik van daglicht praktisch uitsluiten.

### II.3.5 Kleur van het binnenkomende daglicht

We vinden in de literatuur geen eisen aan de verkleuring van het binnenkomende daglicht. Omwille van het belang dat conservatoren aan dit criterium hechten, formuleren we zelf een criterium.

Als het invallende licht een daglichtspectrum heeft (illuminant D65, waarnemer 2°), dan moeten de a en b-waarde van het doorvallende licht op basis van de kleurenschaal CIE Lab beperkt blijven tot de waarden in onderstaande tabel.



Figuur 3. CIE Lab kleurmodel.

L varieert tussen 0 (zwart) en 100 (wit). a en b variëren tussen -120 en + 120:

- a = 120 : rood;
- a = -120 : groen;
- b = 120 : geel;
- b = - 120 : blauw.

Grootheid	Eenheid	Eis	Eis
a	(-)	$\geq -4$	$\leq +4$
b	(-)	$\geq -4$	$\leq +4$

Tabel 3. geldig voor halfgesloten positie van eventuele mobiele zonneweringselementen

## II.4 Afspraken rond het gebruikersgedrag en buitenklimaat

Deze afspraken zijn belangrijk om de eisen aan het binnenklimaat op een éénduidige manier te kunnen toetsen in de controleberekeningen.

### II.4.1 Gebruikersgedrag

Er wordt een onderscheid gemaakt tussen normale bezetting en piekbezetting:

- normale bezetting: 1 persoon per 12.5 m<sup>2</sup> netto vloeroppervlakte ;
- piekbezetting: 1 persoon per 2.5 m<sup>2</sup> netto vloeroppervlakte.

Tijdens de dag wordt de bezetting vanaf nul tot de karakteristieke waarde opgebouwd tussen 10 en 11 uur 's morgens. De bezetting blijft dan constant tot 17 uur, en wordt opnieuw lineair afgebouwd tot 18 uur. Buiten deze periodes is er geen bezetting.

Tijdens het jaar wordt elke periode van vijf dagen met normale bezetting, afgewisseld met twee dagen met piekbezetting.

### II.4.2 Buitenklimaat

Er wordt gerekend met een gemiddeld buitenklimaat.

## II.5 Niet-bouwfysische prestatie-eisen

De dakstructuur is beschermd als monument. De bestaande dakstructuur is relatief licht en kan slechts beperkte extra belasting aan. De eisen aan brandveiligheid zijn streng.

## III Analyse van de bestaande toestand via metingen en simulatie

### III.1 Meetopstelling

Gedurende een tiendaagse warme zonnige periode werden volgende binnenklimaatparameters gemeten in een niet gebruikte én niet geconditioneerde tentoonstellingszaal:

- binnentemperatuur als functie van de hoogte in de tentoonstellingszaal, zoldertemperatuur op de zolder;
- relatieve vochtigheid in de tentoonstellingszaal ;
- horizontale en verticale verlichtingssterkte op vloer en wand ;
- warmtestroom naar een binnenwand van de tentoonstellingszaal.

Tijdens dezelfde periode werden volgende buitenklimaatparameters in-situ gemeten:

- temperatuur en relatieve vochtigheid ;
- totale bezonning op het horizontaal vlak ;
- verlichtingssterkte op het horizontaal vlak.





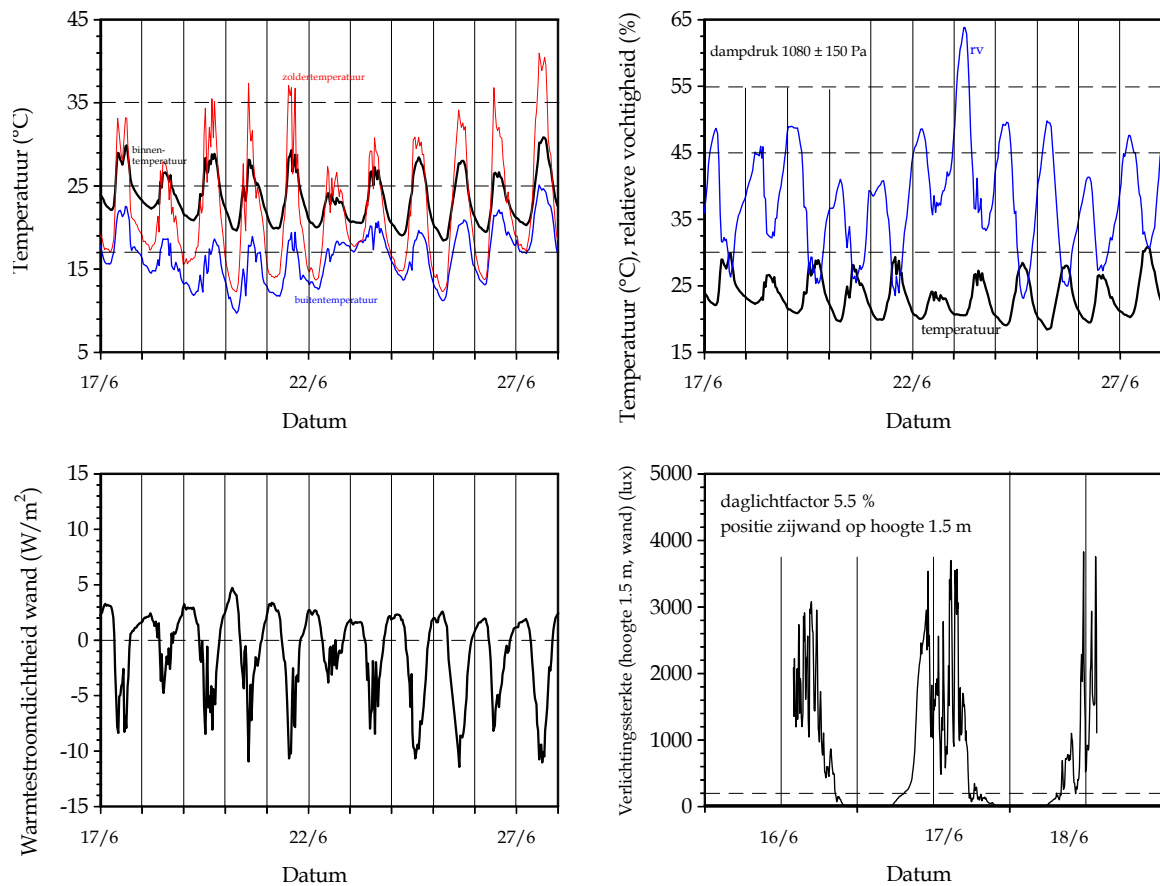
Foto 9. Opstelling sensoren in de tentoonstellingszaal.

Alle kleureigenschappen voor de lichtsimulatie werden in-situ spectraal bepaald. Ook de lichtdoorlatendheid van de doorzichtige elementen werd in-situ gemeten.

### III.2 Meetresultaten

De meetresultaten geven aan:

- dat de bezonning en het oplopen van de zoldertemperatuur een belangrijke thermische belasting vormen voor de tentoonstellingsruimte ;
- dat de relatieve vochtigheid bij ongeveer constante dampdruk zeer snel en sterk varieert, en zeer lage waarden kan bereiken ;
- de energiewisseling tussen de lichte wandbekleding en de tentoonstellingsruimte beperkt is ;
- de daglichtfactor op de wand 5.5 % bedraagt, wat de zaal tot een echte daglichtruimte maakt.



Figuren 4-7. Overzicht van de meetresultaten.

### III.3 Numerieke simulatie

De numerieke simulaties focussen op daglichttoetreding en de regeling ervan, en op het beperken van de zonneprestaties doorheen de beglazen overkapping. Uiteraard zijn dit gekoppelde problemen: het daglichtspectrum is een deel van het zonnenspectrum. Daglichttoetreding is daarbij net iets eenvoudiger te modelleren dan zonnetoetreding: bij zonnetoetreding is er, zoals bij daglichttoetreding, de directe component. Een tweede belangrijke component bij zonnetoetreding is echter de indirecte component: door de temperatuurstijging in de zolderruimte ontstaat een bijkomende warmtestroom naar de tentoonstellingsruimte.

We starten met de modelleren van de daglichttoetreding (en dus ook van de directe component van de zonnetoetreding).

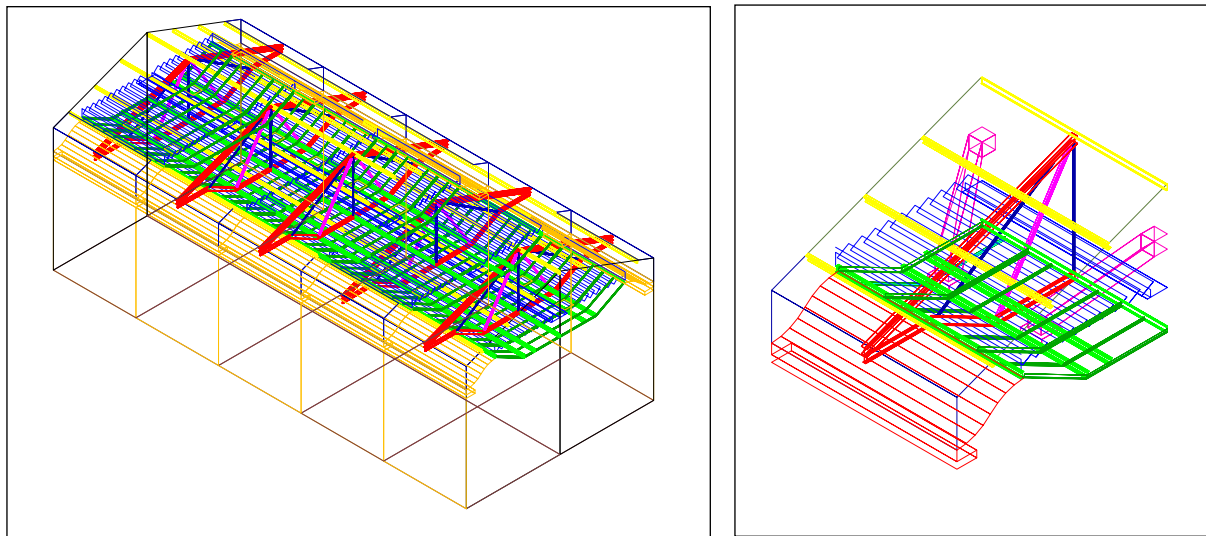
#### III.3.1 Daglichtsimulatie

De daglichtsimulaties moeten een antwoord bieden op de vraag wat de invloed is van de verschillende componenten (buitenbeglazing, binnenbeglazing, spantstructuur, eventuele zonneweringen, hvac-componenten) op de daglichttoetreding in een tentoonstellingszaal.

We schrijven de daglichtfactor van de ruimte daarom als:

$$E_{pos} = E_{hor,e} \cdot f_{pos,geometrie} \cdot f_{staal} \cdot f_{hvac} \cdot f_{glas,e} \cdot f_{vervuiling,glas,e} \cdot f_{glas,i} \cdot f_{vervuiling,glas,i} \cdot f_{brug,lamel} \quad [1]$$

De verschillende  $f$ -invloedsfactoren worden bepaald via ray-tracing op variaties van het geometrisch model van de zaal. Om deze aanpak voldoende nauwkeurig te maken, wordt de dakstructuur geometrisch zeer gedetailleerd uitgewerkt, worden de kleureigenschappen nauwkeurig nagemeten, en gebeurt een vergelijking met meetwaarden voor bepaalde deelfactoren. De benadering verwaarloost de interactie tussen de verschillende componenten, maar levert zoveel ontwerpinzicht op dat dit (beperkte) nadeel op de koop toe genomen wordt. Bij de controleberekening is het echter eenvoudig dit nadeel op te heffen omdat de splitsing in componenten daar niet relevant is.



Figuren 8-9. Geometrisch model voor de bepaling van de invloedsfactoren.

$$\frac{E_{pos}}{E_{hor,e}} = 0.055 = f_{pos,geometrie} \cdot f_{staal} \cdot f_{hvac} \cdot f_{glas,e} \cdot f_{vervuiling,glas,e} \cdot f_{glas,i} \cdot f_{vervuiling,glas,i} \quad [2]$$

Voor de meetpositie op de wand bedraagt  $f_{pos,geometrie}$  0.44. De stalen spanten en de profielen in de beglaasde delen geven een factor  $f_{staal}$  gelijk aan 0.75. De bestaande hvac-installatie heeft een factor  $f_{hvac} = 0.87$ . De doorlaat van de buitenste beglazing (gereinigd) werd in-situ bepaald en bedroeg 0.45. Dezelfde grootte voor de binnenbeglazing bedroeg 0.66. De doorlaat van de vervuilde buitenbeglazing werd kortstondig gemeten op een positie in het dak. De meetwaarde, met hetzelfde geometrisch model gecorrigeerd voor beschaduwing door de profielen in de buitenste glasstructuur, bedroeg 0.38. Dit levert voor de vervuiling van de buitenbeglazing een factor 0.85 op. Deze relatief hoge waarde wordt verklaard door de goede reiniging door regenval van de gehelde kunststofplaten. Eenzelfde meting kon niet uitgevoerd worden voor de binnenbeglazing (ontoegankelijk voor onderhoud, en dus ook voor metingen). Door de horizontale positie van de binnenbeglazing en door de ontoegankelijkheid voor periodieke reiniging schatten we deze waarde op 0.75. De waarde is realistisch tegenover de waarde van de vervuiling van de buitenbeglazing, en bovendien wordt zo de gemeten daglichtfactor van 5.5% bevestigd.

### III.3.2 Energiebalanssimulatie

We blijven dezelfde aanpak hanteren voor de directe zonnetoetreding, zij het dat de positie nu niet langer meespeelt:

$$\frac{\dot{q}_{sun,i,direct}}{\dot{q}_{sun}} = f_{staal} \cdot f_{hoac} \cdot f_{glas,e} \cdot f_{vervuiling,glas,e} \cdot f_{glas,i} \cdot f_{vervuiling,glas,i} \quad [3]$$

Als we voor de zonnetoetreding benaderend dezelfde waarden hanteren als voor de lichttoetreding vinden we een waarde 0.127. Deze waarde werd gecontroleerd op basis van een dynamische energiebalanssimulatie van de tentoonstellingszaal. De gemeten zoldertemperaturen en het gemeten buitenklimaat werden hierbij als randvoorwaarden opgelegd. Optimale fit tussen de gemeten binnentemperaturen en de gesimuleerde binnentemperaturen bestond bij een waarde van  $\frac{\dot{q}_{sun,i,direct}}{\dot{q}_{sun}}$  gelijk aan 0.103, wat voldoende nauwkeurig de waarde 0.127 benadert.

We kunnen dus aangeven dat de directe component van de zonnetoetredingsfactor  $g$  in de bestaande situatie ongeveer 0.12 bedraagt.

De indirecte component ontstaat door de verhoging van de temperatuur in de zolderruimte. Deze temperatuurverhoging levert benaderend volgende indirecte component op in de zonnetoetredingsfactor  $g$ :

$$g_{indirect} = \frac{\Delta\theta_{e-z}}{\dot{q}_{sun}} U_i \quad [4]$$

waarbij  $U_i$  de warmtedoorgangscoefficiënt van de binnenbeglazing is (rekening houdend met het overgangscoefficiënten voor warmtetransport van boven naar onder).  $\Delta\theta_{e-z}$  is de temperatuurverhoging in de zolderruimte tegenover de buitenluchttemperatuur.

$\frac{\Delta\theta_{e-z}}{\dot{q}_{sun}}$  is een lineair verband dat uit de meetresultaten wordt afgeleid en voor de bestaande situatie gelijk is aan  $0.024 \pm 0.001$ . Rekening houdend met een warmtedoorgangscoefficiënt van  $4.5 \text{ W/m}^2\text{K}$  voor de onderste beglazing bedraagt de indirecte component van de zonnetoetredingsfactor  $g$  ongeveer 0.11.

De totale zonnetoetredingsfactor  $g$  bedraagt in de huidige situatie dus ongeveer 0.23, waarvan ongeveer de helft te weten aan indirecte toetreding. We gaven via de invloedsfactoren al aan hoe de *directe* component ontwerpmatig kan beïnvloed worden. De *indirecte* component kan beïnvloed worden door de warmtedoorgangscoefficiënt van de binnenbeglazing, maar ook via de voorlopig alleen gemeten parameter  $\frac{\Delta\theta_{e-z}}{\dot{q}_{sun}}$ .

De parametrisatie van deze factor gebeurt op basis van een vereenvoudigde stationaire energiebalans van de zolderruimte in aanwezigheid van bezonning. Bij de transmissiecomponent wordt voor de eenvoud van de uiteindelijke oplossing de transmissie-term van zolderruimte naar de tentoonstellingszaal verwaarloosd.

In de energiebalans van de zolderruimte stellen we dus de energieverliezen door transmissie door de buitenbeglazing en de energieverliezen door ventilatie gelijk aan de in de zolderruimte geabsorbeerde zone-energie. Deze laatste term wordt op zijn beurt gelijk gesteld aan het verschil tussen de door de buitenbeglazing doorgelaten energie en de door de binnenbeglazing doorgelaten energie:

$$U_{\text{beglazing,buiten}} \cdot A_{\text{beglazing,buiten}} \cdot \Delta\theta_{e-z} + \frac{\rho c n V}{3600} \Delta\theta_{e-z} = (0.35 - 0.12) \cdot \dot{q}_{\text{sun}} \cdot A_{\text{beglazing,buiten}} \quad [5]$$

Bij de warmtedoorgangscoefficiënt van de buitenbeglazing wordt rekening gehouden met warmtetransport van onder naar boven.

$$\frac{\Delta\theta_{e-z}}{\dot{q}_{\text{sun}}} = \frac{(0.35 - 0.12)}{U_{\text{beglazing,buiten}} + \frac{\rho c n V}{3600 A_{\text{beglazing,buiten}}}} \quad [6]$$

De ventilatieterm blijkt een relatief beperkte bijdrage te leveren tot de beperking van de temperatuurverhoging van de zolder. Het is daarom belangrijk de warmtedoorgangscoefficiënt van de buitenbeglazing hoog te houden. Deze oplossing faalt echter als de buitentemperatuur hoog is: transmissie door de buitenbeglazing is dan beperkter, en ventilatie met warmte buitenlucht is niet erg efficiënt. Adiabatische koeling van de lucht in de zolderruimte kan voor deze piekomstandigheden soelaas bieden.

#### IV Besluit: bouwfysische krijtlijnen voor de uitwerking van de oplossing

We gaan met volgende aanbevelingen naar het ontwerpteam:

- Plaats op 0.9 m boven de onderste rand van de dakstructuur een (lichtdichte) centrale loopgang die onderhoud van de dakstructuur mogelijk maakt ;
- Plaats een dubbele beglazing tussen de hoogste rand van de onderste beglazing en de centrale loopgang en creëer zo twee lange lichtstroken naast de centrale loopgang. De dakstructuur wordt door de dubbele beglazing in twee helften verdeeld: een buitenhelft en een binnenhelft. Deze scheiding laat toe:
  - De dakstructuur luchtdicht te maken ;
  - De warmtetoever vanuit de dakruimte naar de tentoonstellingszaal in belangrijke mate te beperken, en dus ook de koelkosten, het vermogen van de koelinstallatie, en de comfortproblemen die kunnen gebonden zijn aan het toevoeren van grote koelvermogens aan de tentoonstellingsruimte ;
  - De thermische isolatiekwaliteit van de dakstructuur sterk te verhogen, wat de stookkosten en het vermogen van de verwarmingsinstallatie doet dalen ;
  - Bij een regendichte lichtgehelde uitvoering: verneveling van water voor adiabatische koeling van de buitenhelft ;
  - Luchtafvoer uit de tentoonstellingszaal kan eventueel gebeuren via de tussenruimte tussen onderste kunstofbeglazing en de dubbele beglazing ;
- Kies als heldere buitenbeglazing een enkele beglazing met harde selectieve coating (richtmerk Glaverbel Sunergy clear) om zo de zonnetoetreding tot de buitenhelft te beperken. Een enkele beglazing presteert in belangrijke mate beter dan een dubbele beglazing in het beperken van de temperatuurtoename in de buitenhelft van de dakstructuur en heeft dus ook een belangrijke impact op de indirecte component ;
- Plaats boven de lange lichtstroken in dubbele beglazing een lichtregelingsysteem. Dit kan bestaan uit een lichtdicht mobiel doek (0/1 oplossing) of uit regelbare lamellen. De regelbare lamellen hebben als zeer belangrijk voordeel dat bij sterke bezonning de zonnetoetreding kan beperkt worden zonder de zaal te verduisteren.

- Geef de structurelementen en zonnewering in de beglaasde overkapping een blekere kleur. Eventueel corrigeren we met deze kleur heel licht de verkleuring die veroorzaakt wordt door de doorgang door de beglaasde delen ;
- Voorzie opengaande afsluitbare delen in de buitenbeglazing om ventilatie van de buitenhelft met buitenlucht mogelijk te maken.
- Overweeg een bevochtiging via verneveling in de buitenhelft van de dakstructuur. Bij hoge buitentemperaturen schiet de ventilatie en transmissie van de buitenhelft tekort in het beperken van de temperatuurtoename in de buitenhelft. Op die ogenblikken biedt adiabatiese koeling eventueel een uitweg. Volgens sommigen voorzag Horta dit koelsysteem in het ontwerp. Zijn hier schriftelijke bronnen voor?
- Overweeg een herinvoering van de oorspronkelijke wandafwerking, wat ons kan toelaten de hygrische en thermische capaciteit van de wanden beter te benutten. Vooral hygrische capaciteit kan helpen om de pieken in bevochtiging en ontvochtiging op te vangen.

We zijn op basis van het afgelegde simulatietraject nu in staat om het gesprek met de andere partners in het ontwerpteam aan te gaan: er liggen voorstellen op tafel, en, nog belangrijker: we kunnen zeer snel en relatief nauwkeurig antwoorden op de invloed van variaties op bovenstaande aanbevelingen. We hopen met dit traject te hebben aangetoond dat gesofisticeerde modellen kunnen ingezet worden in een zeer preliminaire fase, en leiden tot onderbouwde aanbevelingen.

Het knelpunt in het ontwerp verschuift hierdoor van het oplossen van de restauratie van de beglaasde overkappingen naar het domein van de technische installaties. De focus daar zal onvermijdelijk liggen op (1) de aard van de luchttoevoer- en luchtafvoer, vooral om in de buurt van de kunstwerken stofafzetting te vermijden, en op (2) de plaatsvereisten en tracés voor luchtkanalen.

## Referenties

**Garry Thomson**, *The museum environment*, 1986, Butterworth-Heinemann,

**Dario Camuffo**, *Microclimate for cultural heritage*, 2001, *Developments in Atmospheric Science*, 23, Elsevier

Control of damage to museum objects by optical radiation, CIE Technical report 157:2004

**Haiad, J. C., Druzik, J., Ayres, J. M. et al.**, *Museum Environmental Requirements: A Literature Survey*, ASHRAE Trans. 1990, vol.96, Part 2, paper number 3391, 112-121