EINDRAPPORT PROJECT JEAN-JACQUES COMHAIRE Koning Bouwdewijn Stichting

[Archeometrische studie van 7 Besloten Hofjes in functie van de preventieve conservering]

WILLEMIEN ANAF

Mei 2015-Juli 2017

Inhoudsopgave

1. Inleiding	4
2. Overzicht van de Mechelse Besloten Hofjes	4
2.1 Besloten Hofje met Calvarie, jacht op de Eenhoorn en Onbevlekte Ontvangenis (BH1)	4
2.2 Besloten hofje met de heiligen Elisabeth, Ursula en Catharina (BH2)	5
2.3 Besloten Hofje met Calvarie, de Heilige Maagd en Johannes de Evangelist (BH3)	6
2.4 Besloten hofje met Daniël in de leeuwenkuil (BH4)	6
2.5 Besloten hofje met Calvarie (BH5)	7
2.6 Besloten hofje van Sint-Anna-ten-drieën, Augustinus en Elisabeth (BH6)	7
2.7 Besloten hofje met Onze-Lieve-Vrouw (BH7)	8
3. Materiaal-technisch onderzoek	9
3.1 Vezelanalyse	9
3.2 Kleurstofanalyse	. 10
3.3 XRF-analyse metaaldraad, lovertjes en metalen paillet	. 10
3.4 Analyse darmdraad	. 10
4. Hof van Busleyden	. 12
5. Risicoanalyse	. 13
5.1 Materiaalfractie	. 14
5.2 Waardefractie	. 16
5.3 Waardeverlies	. 18
5.4 Rankschikking van de impact per materiaal en schadefactor	. 19
6. Ondersteundend archeometrisch onderzoek	. 20
6.1 Klimaat	. 20
6.1.1 Relatieve vochtigheid (RH)	. 20
6.1.2 Temperatuur	. 24
6.2 Licht	. 26
6.3 Trillingen	. 30
6.3.1 Massaverdeling en bevestigingsmethodes, BH1	. 31
6.3.2 Vervaardigen van dummiebloemen en -druiventrosjes	. 33
6.3.3 Vervaardigen van dummiekast	. 35
6.3.4 Transport dummiekast naar de firma Sebert, Nederland	. 40
6.3.5 Trillingsexperimenten op trillingstafel, firma Sebert, Nederland	. 43
6.3.6 'Op zoek naar Utopia', case studie transport originele Besloten Hofjes	. 44

	6.3.7 Trillingstesten in het Hof van Busleyden	. 47
	6.4 Pollutie	. 51
	6.5 Ongedierte	. 62
	6.6 Display	. 64
	6.6.1 Air Exchange Rate	. 65
	6.6.2 Bufferende werking vitrine: verschillende scenario's	. 66
	6.6.3 Invloed interne belichting op hygrothermische eigenschappen	. 79
	6.6.4 (Fijn) stof, pollutie en licht	. 79
7.	Vergelijking van verschillende tentoonstellingsscenario's	. 84
8.	Aanbevelingen	. 88
	8.1 Klimaat	. 88
	8.2 Licht	. 89
	8.3 Trillingen en transport	. 90
	8.4 Technische aanbevelingen vitrine	. 90
Re	eferenties	. 92

1. Inleiding

De zeven Besloten Hofjes van de Mechelse Gasthuiszusters zijn 16^{de}-eeuwse historische ensembles uit diverse materialen, geplaatst in een houten kist. Ze zijn uiterst zeldzaam in het Belgische en zelfs werelderfgoed. Het is uitzonderlijk dat een collectie van zeven Besloten Hofjes tot op heden bewaard gebleven is. Veel Hofjes zijn immers door religieuze en politieke conflicten vernietigd vanaf de 16^{de} tot de laat 18^{de} eeuw. De Mechelse Hofjes zijn tot in de late 20^{ste} eeuw in de woonruimte van de Gasthuiszusters bewaard. De Hofjes zijn steeds mee verhuisd met de Gasthuiszusters (Baert et al., 2015). Initieel bevonden ze zich in het Onze-Lieve-Vrouwegasthuis aan de Dijle. In 1857 verhuisden ze naar de Keizerstraat, en in 1956 werden ze overgebracht naar een complex bij de Augustijnenstraat en de Bleekstraat. Later werden de Besloten Hofjes tentoongesteld in het Schepenhuis te Mechelen. Hun laatste halte voor hun verhuis naar het restauratieatelier in het Hof van Busleyden, was in het Mechelse gildehuis 'In de Grooten Zalm' op de Zoutwerf (de Nijn, 1998).

De conditie van de Mechelse Besloten Hofjes is bijzonder fragiel. Een team van restaurateurs heeft in september 2016 de conservatie-restauratie van drie Besloten Hofjes afgewerkt. In januari 2017 zijn ze gestart met de restauratie van de overige vier Hofjes. Vanaf maart 2018 worden de Hofjes permanent tentoongesteld in het gerenoveerde Hof van Busleyden. Hoewel de Hofjes dan volledig gerestaureerd zijn, blijft het van cruciaal belang om ze in optimale omstandigheden tentoon te stellen en te bewaren. Zo wordt verdere degradatie tegengegaan, en wordt de toegankelijkheid van deze topstukken in de toekomst verzekerd.

Dit Comhaire-project is opgestart om via onderzoek en proefopstellingen (simulaties) de meest optimale situatie te evalueren voor de lange termijn bewaring van de Besloten Hofjes in het Hof van Busleyden te Mechelen. Het complexiteit van dit traject zit onder meer in de verscheidenheid aan materialen die in deze historische 'mixed-media' objecten is gebruikt. Elk materiaal heeft immers zijn eigen 'ideale condities' waardoor een compromis gezocht moet worden.

2. Overzicht van de Mechelse Besloten Hofjes

Hieronder worden de zeven Mechelse Besloten Hofjes beknopt besproken, gebaseerd op (Iterbeke). In dit rapport zal verder gebruikt gemaakt worden van de afkortingen van de Hofjes (BH1-7).

2.1 Besloten Hofje met Calvarie, jacht op de Eenhoorn en Onbevlekte Ontvangenis (BH1)

In dit Besloten Hofjes staat centraal een altaarstuk met Christus aan het kruis. Links van het altaar zien we Johannes de evangelist. Een engel houdt de leiband van een horde honden vast. In de linkerhoek staat de krijgsheer Gédéon die voor de poort van Ezechiël luistert naar de priester Aaron. Aan de rechterzijde van het altaar zien we Maria Magdalena, een Maagd en de eenhoorn. Uiterst rechts wordt de scène van Mozes en de brandende braamstruik verbeeld.



Fig. 2.1: Besloten Hofje met Calvarie, jacht op de Eenhoorn en Onbevlekte Ontvangenis (na restauratie)

Dit Hofje wordt gedateerd rond 1510-1530. De kast is 124 cm hoog, 158.5 cm breed en 33 cm diep. De massa van dit Hofje is vastgelegd op 42.7 kg.

2.2 Besloten hofje met de heiligen Elisabeth, Ursula en Catharina (BH2)

In dit Besloten Hofje staan drie heiligen, van links naar rechts: de Heilige Elisabeth van Hongarije, de Heilige Ursula van Keulen en de Heilige Catharina van Alexandrië. Deze heiligen vertegenwoordigen de deugdzaamheid. Tussen de heiligen bevinden zich nog 2 kleinere beeldjes. De figuur in de rode mantel is een representatie van Christus. Het andere kleine beeldje is Maria Magdalena die Christus aanbidt. Op de wassen zegel centraal in het Hofje wordt de wederopstanding van Christus uit het graf afgebeeld. Op het linker luik is Sint Jacob de Meerdere geschilderd met een man die knielend bid. Op het rechterluik zien we de Heilige Margaretha met voor haar twee biddende zusters.



Fig. 2.2: Besloten Hofje met H. Elisabeth, Ursula en Catharina (na restauratie)

Dit Hofje wordt gedateerd rond 1520-1530. Het wassen zegel is gedateerd op 1513. De kast is 134 cm hoog, 97.5 cm breed (gesloten toestand) en 22.2 cm diep. De massa van dit Hofje is vastgelegd op 46.3 kg.

2.3 Besloten Hofje met Calvarie, de Heilige Maagd en Johannes de Evangelist (BH3) In dit Hofje zien we opnieuw Christus aan het kruis, met aan de linkerkant de Maagd Maria en aan de

rechterkant Johannes de evangelist.

Op de luikjes van dit Besloten Hofje zijn langs beide zijden figuratieve voorstellingen te zien. Langs de binnenzijde is rechts een knielende priester te zien vergezeld door Sint-Pieter. Links zit een biddende zuster vergezeld van Sint Cornelius. Langs de buitenzijde wordt rechts ook een biddende zuster afgebeeld, hier met de Heilige Josse. Links zit opnieuw een priester vergezeld door zijn patroonheilige.



Fig. 2.3: Besloten Hofje met Calvarie, Heilige Maagd en Johannes de Doper

Dit Besloten Hofje wordt gedateerd rond 1525. De kast is 109 cm hoog, 89.7 cm breed (gesloten toestand) en 28.2 cm diep. De massa van dit Hofje is vastgelegd op 26.4 kg.

2.4 Besloten hofje met Daniël in de leeuwenkuil (BH4)

Dit Besloten Hofje beeldt het verhaal van Daniël in de leeuwenkuil uit. Centraal zien we Daniël met vier leeuwen. Linksboven wordt de Profeet Habakuk afgebeeld, vergezeld door een engel die een mandje met voedsel draagt. Rechts van de leeuwenkuil zien we Hiëronymus, aan de linkerzijde zien we Sint-Anna-ten-Drieën. Op de geschilderde luiken zien we links Sint-Pieter en rechts Sint-Jan de Evangelist.



Fig. 2.4: Besloten Hofje met Daniël in de leeuwenkuil.

Dit Besloten Hofje wordt gedateerd rond 1401-1450. De kast is 83.5 cm hoog, 71 cm breed (gesloten toestand) en 22 cm diep. De massa van dit Hofje is vastgelegd op 19.9 kg.

2.5 Besloten hofje met Calvarie (BH5)

Dit is het op één na kleinste Besloten Hofje in de collectie. Centraal zien we een kruis met Christus. Op de luikjes zijn links de Maagd Maria met kindje Jezus en rechts Sint Antonius geschilderd.



Fig. 2.5: Besloten Hofje met Calvarie.

Dit Besloten Hofje wordt gedateerd rond 1500-1530. De kast is 56 cm hoog, 46 cm breed (gesloten toestand) en 25 cm diep. De massa van dit Hofje is vastgelegd op 4.7 kg.

2.6 Besloten hofje van Sint-Anna-ten-drieën, Augustinus en Elisabeth (BH6)

In dit Besloten Hofje zien we drie figuren: links staat de Heilige Augustinus, centraal zien we Anna met op haar armen Maria en Jezus (Sint-Anna-ten-drieën) en rechts staat de Heilige Elisabeth van Hongarije. Het beeldje centraal bovenaan in het Hofje verbeeldt de Lucerna Clarissima: een gekroonde Maria met Jezus, bekleed met de zon en de maan onder haar voeten. Op de grote medaillon onder deze Lucerna Clarissima zien we het tafereel van de jacht op de eenhoorn. Op de beschilderde luiken zien we links de Heilige Hiëronymus vergezeld van een leeuw. Rechts staat de Heilige Catharina met voor haar twee vrouwelijke biddende religieuzen.



Fig. 2.6: Besloten Hofje met H. Augustinus, Anna ten Drieën, Maria en Kind.

Dit Besloten Hofje wordt gedateerd rond 1520-1550. De kast is 150 cm hoog, 120 cm breed (gesloten toestand) en 38 cm diep. De massa van dit Hofje is vastgelegd op 62.9 kg.

2.7 Besloten hofje met Onze-Lieve-Vrouw (BH7)

Dit Besloten Hofje is het kleinste kastje uit de collectie. Het lijkt eerder op een reliekschrijn. Het is vermoedelijk minder oud dan de andere Besloten Hofjes in de collectie. In de centrale zwarte nis staat een Madonna: de maagd Maria met het Christuskind. Rondom deze nis zijn verschillende relieken verwerkt, waarvan de meeste van vrouwelijke heiligen. Op de luikjes zien we links een piëta. Het rechterluikje beeldt een portret af van de schenker van het Hofje.



Fig. 2.7: Besloten Hofje met Onze-Lieve-Vrouw.

Dit Besloten Hofje wordt gedateerd in 1539. De kast is 50.5 cm hoog, 40.5 cm breed (gesloten toestand) en 11 cm diep. De massa van dit Hofje is vastgelegd op 4.6 kg.

3. Materiaal-technisch onderzoek

In het kader van dit project is beperkt materiaal-technisch onderzoek uitgevoerd op enkele fragmenten van BH1. Dit Hofje is tijdens de restauratie volledig ontmanteld, waardoor de verschillende objecten beter toegankelijk waren. Vijf fragmenten (tabel 3.1) werden overgebracht naar het KIK, waar ze in detail werden bekeken met optische microscopie. Daarnaast werden enkele XRF-analyses, vezelanalyses en kleurstofanalyses uitgevoerd. Dit onderzoek vormt een meerwaarde voor het traject 'preventieve conservering', omdat het informatie geeft over de materialen die zich in het Besloten Hofje bevinden.

Naam fragment	Beschrijving	Foto
V-046-BL	Sterk gedegradeerd wijnblad met bessen	
V-039-ML-OL	Bloemenrank met lovertjes	C. C. C.
V-036-ML-OL	Bloem met zilverdraad (darmdraad) en pareltjes	No.
A-001-OM	Los fragment met lovertje, parel en metalen paillet	
B-085-M	Druiventros met blauwe en twee groene druiven	

Tabel 3.1: Overzicht van de vijf fragmenten die in detail zijn geanalyseerd.

3.1 Vezelanalyse

De vezelanalyse werd uitgevoerd met een optische microscoop (Stemi, Zeiss, Germany). Zoals verwacht, zijn de meeste bloemen en vegetatieve elementen opgebouwd uit ontgomde gecultiveerde zijde (Bombyx mori L.). De druiventrosjes bestaan uit een bastvezel. De volledige resultaten van dit onderzoek kunnen worden geconsulteerd in het rapport van Vanden Berghe en Vandorpe (2015) (appendix ...).

3.2 Kleurstofanalyse

Kleurstofanalyse werd uitgevoerd met een hoge prestatie vloeistofchromatograaf, uitgerust met een fotodiode-array detector (HPLC-PDA). Volgende kleurstoffen werden gedetecteerd:

- Groen/geel: wouw en indigo of wede
- Geel: wouw
- Rood: roodhout, looistof en indigo of wede
- Beige: roodhout en spoor van meekrap

De volledige resultaten kunnen geconsulteerd worden in Vanden Berghe en Vandorpe (2015) (Bijlage 5).

3.3 XRF-analyse metaaldraad, lovertjes en metalen paillet

De metaaldraad die gebruikt is als basis voor de fragmenten V-046-BL, V-039-ML-OL, A-001-OM en B-085-M, bestaat uit een koper-zink (Cu-Zn) legering (messing) met een Cu/Zn ratio van 3.5 ± 1.1 (16 metingen). Lood, ijzer en nikkel zijn de belangrijkste sporenelementen. Bij fragment V-039-ML-OL zijn ook sporen van zilver en mangaan teruggevonden. Fragment V-039-ML-OL valt op door het gebruik van vergulde (darm)draad (zie 3.4 Analyse darmdraad). Enkel aan het uiteinde, waar de bloem aan de binnenkast wordt bevestigd, is messingdraad aanwezig die qua samenstelling sterk overeenkomt met de andere geanalyseerde metaaldraad (Cu/Zn ratio van 3.9 en sporen van lood, ijzer en nikkel).

In totaal zijn 4 lovertjes van 2 fragmenten (A-001-OM en V-039-ML-OL) geanalyseerd. Deze hebben een zeer gelijkaardige samenstelling en bestaan voornamelijk uit messing. De Cu/Zn ratio is 3.8 ± 0.2 (8 metingen). Nikkel, ijzer en lood komen telkens voor als de belangrijkste sporenelementen.

De ringetjes waarmee deze lovertjes aan de objecten zijn bevestigd, zijn eveneens uit messing vervaardigd. De ringetje van fragment A-001-OM (3 metingen) heeft een Cu/Zn ratio van 8.5 ± 0.5 , met ijzer en lood als belangrijkste sporenelementen. De drie geanalyseerde ringetjes van fragment V-039-ML-OL hebben een Cu/Zn ratio van 13 ± 1 . Naast nikkel, ijzer en lood is hier ook arseen aanwezig als sporenelement. Het ringetje dat bij fragment V-036-ML-OL gebruikt is om de vierkante parel te bevestigen, heeft een lage Cu/Zn ratio van 2.2. Sporen van ijzer, lood en zilver zijn aanwezig.

3.4 Analyse darmdraad

De geanalyseerde darmdraad heeft een kern van in S-torsie gesponnen gele draad (met wouw gekleurde bastvezel) waarrond zich een in S-torsie gewonden metaaldraad bevindt (Fig. 3.1). Deze metaaldraad bestaat uit verguld zilverdarmvlies. Voor een dergelijke membraandraad worden doorgaans zeer dunne metaalbladen op een membraan (bv. dierlijke darm) geslagen. Vervolgens wordt het geheel in strips gesneden en ten slotte rond een kerndraad gewonden (Karatzani, 2014).



Fig. 3.1: Optische microscopiebeelden van de darmdraad. Het zilver is zwart uitgeslagen. Op enkele plaatsen zijn nog visuele sporen van de vergulding te zien.





Fig. 3.2: a-b-d: Secundaire elektronenbeelden van een klein fragment van de darmdraad; c: X-stralen fluorescentiespectrum van locatie 1 (fig. 3.2 d); e: detail X-stralen fluorescentiespectra van de drie locaties aangeduid op fig. 3.2 d.

De XRF-analyses tonen de aanwezigheid van kwik in de metaaldraad. Deze is vermoedelijk afkomstig van het gebruik van een amalgaam bij het vervaardigen van de vergulding. Een klein monster van deze darmdraad is diepgaander onderzocht met ESEM¹ onder laag vacuüm condities. Op Fig. 3.2 a) is de S-torsie van de metaaldraad duidelijk te zien. De textiel kern is niet meer aanwezig in dit monster. Fig. 3.2 b) illustreert de conditie waarin de metaaldraad zich bevindt: de metaallaag is gebarsten en is niet meer volledig intact. Uit de EDX-spectra komen zilver en goud naar voren als belangrijkste elementen. Daarnaast is ook zwavel aanwezig, vermoedelijk gelinkt aan de vorming van zwart zilversulfide (cf. visuele zwarte verkleuring van de darmdraad). Kleine hoeveelheden van koper, chloor, aluminium en calcium werden waargenomen (Fig. 3.2 c). Uit Fig. 3.2 d-e blijkt dat kwik niet homogeen voorkomt: locaties 1 en 2 vertonen geen duidelijke aanwezigheid van kwik, terwijl in locatie 3 wel duidelijk kwik aanwezig is.

4. Hof van Busleyden

De Besloten Hofjes zijn vanaf 23 maart 2018 permanent tentoongesteld op de zolderverdieping van het gerenoveerde Hof van Busleyden.

Het Hof van Busleyden werd in het begin van de 16^{de} eeuw opgetrokken door de humanist Hiëronymus van Busleyden, lid van de Grote Raad en vriend van Erasmus. Hij liet zijn paleis ontwerpen door architect Keldermans in nieuwe renaissancestijl. Tijdens Wereldoorlog I werd het gebouw zwaar geteisterd: enkel de muren stonden nog recht. Tijdens de jaren '30 van de 20^{ste} eeuw werd er een grondige renovatie uitgevoerd en krijgt het gebouw de functie van stadsmuseum (1938).

Het Hof van Busleyden is intussen omgebouwd tot een hedendaags stadsmuseum. Fase 1, de ondergrondse ruimtes onder de binnenkoer, werd in 2012 opgeleverd (Fig. 4.1 - 4.2). Fase 2 (Fig. 4.1), de renovatie van het 16^{de} -eeuwse gebouw, werd opgestart in 2015 en is begin 2018 gefinaliseerd. Tijdens de werken vonden er enkel tijdelijke tentoonstellingen plaats (Muse.Mechelen). In het voorjaar van 2018 is het hele renovatieproject afgesloten en opent het museum in zijn nieuwe vorm, waarbij de Besloten Hofjes een vaste en prominente plaats krijgen in de opstelling.



Fig. 4.1: Fase 1 (roze): nieuwe ondergrondse tentoonstellingsruimte. Fase 2 (groen): uitbreiding en renovatie van het historische 16^{de}-eeuwse monument (Muse.Mechelen).

¹ Environmental Scanning Electron Microscopy, QUANTA 250 FEG (FEI, Hillsboro, Oregon, USA)



Fig. 4.2: Fase 1: Ondergrondse ruimte en circulatiezone die het nieuwe gebouw verbindt met het oude. In dit nieuwe ondergrondse deel is het huidige restauratieatelier gehuisvest (Muse.Mechelen).

In het gerenoveerde Hof van Busleyden is een klimaatinstallatie aanwezig die zowel kan verwarmen, koelen, bevochtigen en ontvochtigen. De setpoints zijn ingesteld op 18°C en 50% RH. Ondanks de renovatie blijft het gebouw echter lek (o.a. 20^{ste}-eeuws glas-in-lood). De zolderverdieping waar de Besloten Hofjes tentoongesteld worden, heeft echter een beperkte raamoppervlakte en ook het dak wordt volledig geïsoleerd volgens de huidige normen. (De lagere verdiepingen bestaan uit niet geïsoleerde bakstenen muren, en hebben daardoor vermoedelijk meer invloed van het buitenklimaat.) De prestatie van het klimaatsysteem op de zolder kan echter pas geëvalueerd worden na een langere periode van temperatuur en vochtigheidsmetingen, liefst gedurende 1 jaar zodat de seizoensveranderingen in kaart gebracht kunnen worden. De ramen van de zolderverdieping zijn volledig afgesloten om daglicht buiten te houden. Hierdoor wordt een donkere ruimte gecreëerd met beperkte verlichting in de nok. Het publiek komt binnen via een glazen passerelle die 50% van het daglicht tegenhoudt. Vervolgens komen ze via een open doorgang (historische deur die open blijft staan) in een lichtsas terecht, alvorens de tentoonstellingsruimte te betreden. Hierdoor wordt direct en gereflecteerd daglicht volledig buitengesloten. Alle multimedia wordt in de ruimte na de Besloten Hofjes geplaatst, waardoor ook deze lichtbron geëlimineerd wordt.

5. Risicoanalyse

Binnen het traject preventieve conservering staat een risicoanalyse centraal. Deze risicoanalyse heeft als doel om de meest schadelijke risicofactoren te bepalen voor de Besloten Hofjes in hun geheel. Het resultaat van een dergelijke analyse ondersteunt de besluitvorming. In deze studie werd een eigen aanpak van een risicoanalyse uitgewerkt, gebaseerd op bestaande methodes (Waller, 2003, Brokerhof et al., 2013, Brokerhof and Bülow, 2016, Michalski, 2010, Pedersoli Jr. et al., 2016, Michalski and Pedersoli Jr., 2016).

Risico wordt gedefinieerd als de impact vermenigvuldigd met de waarschijnlijkheid (Fig. 5.1). Beide factoren werden opgesplitst in twee subfactoren. De impact van een bepaald risico is afhankelijk van de materiaalfractie en de waarde hiervan. De waarschijnlijkheid dat een risico zal plaatsvinden, is afhankelijk van de materiaalgevoeligheid en van de omgeving. Deze vier subfactoren worden gekwantificeerd met een nummer van 0 tot 1.

De subparameters materiaalfractie, waarde en waardeverlies zijn gerelateerd aan het object zelf. Daarom hebben we hier zelf weinig impact op. De factor waar we wel impact op hebben, is de omgeving. Deze omvat alle externe parameters die een invloed hebben op de waarschijnlijkheid dat er effectief een dreiging plaatsvindt.



Fig. 5.1: Conceptueel kader voor de risico gebaseerde aanpak.

Doordat de finale omgevingscondities van de Besloten Hofjes in hun permanente tentoonstelling in het Hof van Busleyden nog open staan, zijn eerst de parameters gekwantificeerd die gerelateerd zijn aan de Besloten Hofjes zelf ('impact'). Aan de hand van de gekwantificeerde 'impact' kunnen we objectief kijken met welke materiaaltypes we het meeste rekening moeten houden om advies te geven naar bewaaromstandigheden. In *7. Vergelijking van verschillende tentoonstellingsscenario's* bekijken we verschillende omgevingsomstandigheden, gebaseerd op de tien schadefactoren (Michalski, 1990, Waller, 1994). Op deze manier kunnen we verschillende situaties objectief vergelijken. De omgeving met het laagste risico krijgt daarbij de voorkeur.

Hieronder wordt dieper ingegaan op de kwantificatie van de factoren materiaalfractie, waarde en waardeverlies. De kwantificatie is uitgevoerd op het Besloten Hofje met Calvarie, jacht op de Eenhoorn en Onbevlekte Ontvangenis (BH1). Dit Hofje kan beschouwd worden als het meest fragiele. Door de sterke gelijkenis van de verschillende Besloten Hofjes, kunnen de verkregen resultaten doorgetrokken worden naar de andere Besloten Hofjes van de collectie.

5.1 Materiaalfractie

In de erfgoedsector wordt risicoanalyse doorgaans uitgevoerd op volledige collecties. Daarbij wordt de materiaalfractie gebaseerd op het aantal objecten van een bepaald (materiaal)type of deelcollectie. Als we dit doortrekken voor de Besloten Hofjes, geeft dit een onrealistisch beeld van de materiaalfracties (Fig. 5.2). Er zijn talrijke kleine objecten aanwezig in glas en metaal, maar van de grote houten kast -de basis van het Hofje- is er maar één aanwezig. Om deze discrepantie te vermijden, werd een alternatieve methode uitgewerkt om de materiaalfractie te bepalen, gebaseerd op volumefractie.



Fig. 5.2: Schijfdiagram van de materiaalfractie gebaseerd op het aantal objecten per type materiaal.

Om een inschatting te maken van de volumefractie per materiaal, werd een 2D-projectie per materiaal uitgewerkt, gebaseerd op een foto van BH1 (Fig. 5.3). Volgende materiaaltypes werden beschouwd: hout, gepolychromeerd hout, textiel, plantaardig materiaal, was, glas, metaal, perkament en papier. Vanuit de 2D-projectie werd het dekkingsgebied bepaald op basis van het aantal pixels. Vervolgens werd op basis van volumeformules een 3D-factor bepaald (zie bijlage 1). De dekkingsgraad werd vervolgens vermenigvuldigd met deze 3D-factor om tot de finale materiaalfractie te komen (Fig. 5.4). Belangrijk hierbij is om te vermelden dat het hier gaat om een ruwe inschatting. In de andere Besloten Hofjes komen gelijkaardige materialen terug. In sommige Hofjes komen nog enkele andere materialen voor, zoals albast en botmateriaal (relieken). Bovendien zijn er bij de andere Hofjes beschilderde panelen aanwezig. Hoewel er voor deze Hofjes geen risicoanalyse is uitgevoerd, geldt gelijkaardig advies.



Fig. 5.3: 2D-projecties van de verschillende materialen die in rekening zijn gebracht.



Fig. 5.4: Schijfdiagrammen van de materiaalfractie gebaseerd op 2D-projectie (links) en op volumefractie (rechts).

Om deze materiaalfractie te gebruiken in de kwantificatie van de risico's, werden de waarden genormaliseerd waarbij de som van de materiaalfracties gelijk is aan 1. Tabel 5.1 geeft de kwantificatie weer.

Materiaal	Materiaalfractie
Hout	0.507
Textiel	0.185
Plantaardige materialen	0.084
Was	0.000
Glas	0.001
Metaal	0.005
Polychromie	0.140
Perkament	0.007
Papier	0.069

5.2 Waardefractie

De waarde van objecten is voor iedereen zeer verschillend. Het is dan ook moeilijk om een volledig objectieve (gekwantificeerde) waardebepaling uit te voeren voor erfgoedobjecten. Waardebepaling is bovendien niet statisch: wat nu een lage waarde toebedeeld krijg, kan over enkele jaren bijvoorbeeld veel hoger gewaardeerd worden (Versloot, 2013).

Voor de risicoanalyse van BH1 is een waardebepaling binnen één Hofje uitgevoerd. Dit maakt de waardebepaling nog complexer. De relatieve waarde voor elk materiaal is gekwantificeerd door verschillende personen waarbij eenzelfde set van criteria is gebruikt. De waardebepaling is gebaseerd op de methodiek beschreven in 'Op de museale weegschaal. Collectiewaardering in zes stappen'

(Versloot, 2013). Volgende primaire criteria zijn toegepast: (1) historische waarde, (2) artistieke of esthetische waarde, (3) wetenschappelijke waarde of onderzoekspotentieel, en (4) sociale of spirituele waarde. Ook de volgende vergelijkingscriteria zijn in acht genomen: (1) de herkomst, (2) de zeldzaamheid of representativiteit, (3) de conditie of volledigheid, en (4) de interpretatiecapaciteit (Russell and Winkworth, 2009). Volgende objecttypes zijn in rekening gebracht: plantaardig materiaal – druiven, turf; was - medaillons; glas – parels, medaillons; metaal – metaaldraad, crucifix; polychromie – Poupée de Malines; perkament – bloemblaadjes; papier – bekleding binnenkast, bekleding bodem; hout – kast; textiel – altaar met kaarsen, bloemen, vegetatie, bodem, paperollen. Het aantal geraadpleegde personen voor deze waardebepaling is beperkt gehouden omwille van de specifieke toepassing van deze waardering. Het materiaal met de laagste waarde heeft een waardescore van 1 gekregen. Vervolgens is een verhoudingsschaal gebruikt om de relatieve waarde van de andere materialen te bepalen. Als een materiaal bijvoorbeeld 10 keer waardevoller is, krijgt dit materiaal een waardescore van 10. De waardescores per materiaal en objecttype zijn telkens onderbouwd met argumenten (bijlage 1).

De waardefractie per materiaaltype (Fig. 5.5) is ten slotte gekwantificeerd door de waardes per objecttype te vermenigvuldigen met hun volumefractie en vervolgens per materiaaltype op te tellen. De som van deze resultaten zijn genormaliseerd naar 1. Tabel 5.2 geeft een overzicht van de waardefracties per materiaal.



*Fig. 5.5: Schijfdiagram van de waardefractie per materiaal (materiaalfractie * waarde).*

Materiaal	Waarde
Hout	0.421
Textiel	0.214
Plantaardige materialen	0.099
Was	0.001
Glas	0.001
Metaal	0.008
Polychromie	0.233
Perkament	0.011
Papier	0.013

Tabel 5.2: Gekwantificeerde waarde per materiaaltype.

5.3 Waardeverlies

Het waardeverlies werd ingeschat voor elk materiaal ten gevolge van een toekomstige blootstelling aan de 10 schadefactoren. De verwachte mate van schade en waardeverlies kan afgeleid worden uit literatuur, bestaande documentatie en observaties van het object zelf, of gelijkaardige objecten die in het verleden (onder gekende condities) aan bepaalde schadefactoren blootgesteld zijn. Het overeenkomstige waardeverlies van een materiaal moet rekening houden met de functie en huidige conditie van het materiaal zoals aanwezig in het Besloten Hofje. Voor de kwantificatie is gekozen voor een discrete schaal met 5 opties: 0.05, 0.25, 0.5, 0.75 en 1, gaande van verwaarloosbaar waardeverlies (0.05) tot extreme of totaal waardeverlies (1). De kwantificatie moet gebeuren met een vaste tijdshorizon in gedachten, of met een maximum waardeverlies door blootstelling aan een schadefactor. Tabel 5.3 geeft een overzicht van de effecten die beschouwd zijn per schadefactor. Voor cumulatieve processen zoals lichtschade is rekening gehouden met een maximaal waardeverlies ('worst case scenario'). Tabel 5.4 geeft een overzicht van het ingeschatte waardeverlies per materiaal en per schadefactor.

waardeverlies. De laatste kolom toont of een schadefactor al dan niet als een cumulatief proces is								
beschouwd.								
Schadefactor Beschouwde effecten						Cumulatief		
Vuur	'Doct flachovor'	tadium	(vollodia	ontwikkold	VIIIIr			

Tabel 5.3: Overzicht van de beschouwde effecten per schadefactor bij de kwantificatie van het

Schadefactor	Beschouwde effecten	Cumulatief
Vuur	'Post-flashover' stadium (volledig ontwikkeld vuur	
	waarbij de objecten en het gebouw aangetast zijn) met	
	een (bijna) volledige verbranding (van brandbare	
	materialen); hitte deformatie, instorting, roetafzetting	
	(bij niet brandbare materialen)	
Water	Schade door lekken: deformatie, verkleuringen,	
	oplossing/migratie van wateroplosbare materialen,	
	schimmelgroei (op organische materialen wanneer ze te	
	lang nat blijven),	
Dieven en vandalen	Diefstal van objectonderdelen	
Dissociatie	Verlies van kleine onderdelen	
Onjuiste RH	Mechanische schade door fluctuaties (bv. Deformatie,	•
	barsten,), schimmel en corrosie door verhoogde	
	relatieve vochtigheid, broosheid door te droge condities	
Onjuiste T	Fragiel en broos worden van materialen door een	•
	versnelde chemische veroudering door	
	hydrolyse/oxidatie (verhoogde temperatuur)	
Licht, UV en IR	Kleurverandering en verlies in sterkte door	•
	fotochemische degradatieprocessen	
Polluenten	Accumulatie van stof, versnelde chemische veroudering	•
	door schadelijke gassen	
Fysieke krachten	Mechanische schade door trillingen, luchtverplaatsing	•
	(loskomen of bewegen van kleine items, materiaalverlies	
	door breuk etc.)	
Ongedierte	Insecten (perforatie, verzwakking, verlies etc.)	

Materiaal	Fysische krachten	Brand	Water	Ongedierte en schimmel	Verontreinigingen	Licht en straling	Verkeerde T	Verkeerde RH	Informatieverlies	Dieven en vandalen
Hout	0,25	1	0,5	0,5	0,25	0,25	0	0,5	0,25	0,25
Textiel	1	1	0,75	0,75	0,75	1	0,75	0,75	0,25	0,75
Plantaardige mat.	0,25	1	0,5	0,5	0	0,25	0,25	0,25	0,25	0,5
Was	0,5	1	0,5	0	0,25	0,5	1	0,5	0,25	0,75
Glas	0,25	1	0,5	0	0,25	0	0	1	0,25	1
Metaal	0,25	1	0,5	0	0,25	0	0	0,75	0,25	0,75
Polychromie	0,5	1	0,5	0,25	0,25	0,25	0	0,75	0,25	0,25
Perkament	0,5	1	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,25	0,25
Papier	0,25	1	0,75	0,75	0,75	1	0,75	0,75	0,25	0,75

5.4 Rankschikking van de impact per materiaal en schadefactor

We hebben nu verschillende parameters gekwantificeerd: de materiaalfractie, de materiaalwaarde en het waardeverlies per materiaal. Door deze parameters te vermenigvuldigen, kunnen we de impact berekenen. Vermits elke term een waarde heeft tussen 0 en 1 is de maximale impact gelijk aan 1. Vervolgens kunnen we per materiaaltype en schadefactor de impact op het Besloten Hofje rangschikken. Hieruit komt naar voor dat de grootste risico's zich situeren bij de materialen textiel, polychromie en hout. Een opvallende uitschieter is het risico bij brand voor hout. Hoewel brand voor alle materialen een gevoeligheid van 1 heeft gekregen, geeft hier de grote materiaalfractie van hout de doorslag. Fig. 5.6 toont het risico per materiaaltype. Hiervoor zijn per materiaal de risico's voor de verschillende schadefactoren met elkaar opgeteld. Ook hier komen textiel, polychromie en hout naar voor als de materialen met het hoogste totale risico. In sectie 6 (*Ondersteunend archeometrisch onderzoek*) wordt het risico per materiaal besproken voor de relevante schadefactoren.



Fig. 5.6: Overzicht van de impact op het Besloten Hofje. (a) Driedimensionale visualisatie per materiaal bij blootstelling aan elke schadefactor ('worst case'-scenario voor cumulatieve processen). (b) Totale impact per schadefactor. (c) Totale impact per materiaal.

6. Ondersteundend archeometrisch onderzoek

Om de kwantificatie van de omgevingsfactor te onderbouwen, zijn literatuurstudie, onderzoeken en simulaties uitgevoerd. Deze worden hieronder besproken per schadefactor waaraan ze gelinkt zijn.

6.1 Klimaat

6.1.1 Relatieve vochtigheid (RH)

Voor relatieve vochtigheid kan een onderscheid gemaakt worden tussen richtwaarden en fluctuaties. Erhardt en Mecklenburg (2011) geven een overzicht van RH-stabiliteitszones voor verschillende materialen en types degradatie waarbinnen een richtwaarde gekozen kan worden (Fig. 6.1). Deze RHrichtwaarde is de vochtigheid die je probeert aan te houden. In sommige gevallen mag deze richtwaarde doorheen de seizoenen (beperkt) variëren. De witte gebieden geven optimale RH-zones. De oranje gebieden tonen RH-zones die niet optimaal zijn, maar nog aanvaardbaar. De rode zones zijn RH-waarden die vermeden moeten worden. Uit dit overzicht wordt duidelijk dat extreme RH-waarden vaak problematisch zijn, en dus vermeden moeten worden. Hieronder worden de RH-richtwaarden voor de belangrijkste materialen in de Besloten Hofjes besproken.



Fig. 6.1: Stabiliteitszones voor relatieve vochtigheid. Gebaseerd op Erhardt en Mecklenburg (2011).

In het algemeen kan gesteld worden dat zijde, en meer algemeen textiel, doorgaans sneller veroudert bij hoge RH dan bij lage RH (Pavlogeorgatos, 2003). Verschillende onderzoeken bevestigen inderdaad dat waterdamp (en zuurstof) de meest diepgaande impact hebben op zijdedegradatie (Pawcenus et al., 2016, Koperska et al., 2014). Een vochtigheid boven 70% moet ten allen tijde vermeden worden (CCI, 2013). Howell (1996) vermeldt dat er weinig meetbare schade is aan zijde bij RH-condities tussen 30-60%, zelfs bij extreme fluctuaties. Hansen en Sobel (1992) raden aan om zijde onder de 50% RH te bewaren. Een te lage RH kan zijde echter uitdrogen waardoor het heel bros wordt (Boersma et al., 2000, CCI, 2013). Hout heeft algemeen een groot RH-bereik waarin de richtwaarde vastgelegd kan worden. Hout wordt stijf en bros bij een RH kleiner dan 10%, en verliest sterkte en wordt flexibel bij zeer hoge RH (Mecklenburg, 2007). Een RH boven 75% moet sowieso vermeden worden om schimmelgroei te voorkomen (ASHRAE, 2011). Voor paneelschilderingen en gepolychromeerd hout worden RH-waarden van 50 ± 15% veilig geacht (Bratasz, 2013, Mecklenburg et al., 1998). Voor papier is een lage vochtigheid beter voor de lange-termijn bewaring, maar dit zal het materiaal bros maken. Hierdoor ontstaat een groot risico op schade bij manipulatie. Afhankelijk van de bron worden RHrichtwaarden tussen 35 en 60% aangeraden (McIntyre et al., 2000, UNESCO, 2016, Henderson, 2013). Ook hier zal een te hoge RH schimmelgroei bevorderen. Perkament is zeer RH-gevoelig. Een bepaalde hoeveelheid water is nodig om de stabiliteit op moleculair niveau te garanderen. Hiervoor moet de RH boven 25% zijn. Tussen 25 en 60% RH wordt omgevingsvocht opgenomen in hydrofiele sites van de proteïnes waaruit het perkament is opgebouwd. Boven 60% ontstaan er vrije watermoleculen. Vanaf 40% RH stijgt het aantal breuken in waterstofverbindingen, wordt het gelatinisatieproces versterkt en vergroot ook de kans op biologische schade (Hansen and Lee, 1991). De toestand waarin het collageen zich bevindt, speelt ook een cruciale rol in de stabiliteit van het perkament (Badea et al., 2012). De adviezen voor perkamentbewaring die in de literatuur worden gevonden, verschillen opmerkelijk. Hansen en Lee (1991) geven 30% RH aan als optimaal. Vosteen (1994) vermeldt een RH van 50%, met een seizoensfluctuatie naar 45% in de winter en 55% in de zomer, terwijl UNESCO een richtwaarde van 50-60% voorschrijft (UNESCO, 2016). Voor botmateriaal wordt een richtwaarde tussen 45-55% RH aangeraden (Stone, 2010). Om metaalcorrosie tegen te gaan, moet hoge vochtigheid vermeden worden (ASHRAE, 2011). Voor glas speelt de vochtigheid in principe een minder cruciale rol, tenzij het glas reeds gecorrodeerd is. In dat geval, en zeker in de extreme situatie van crizzling, moet ook glas aan zo laag mogelijke vochtigheidsgehaltes blootgesteld worden, omdat de deliquentie relatieve vochtigheid van natrium- en kaliumhydroxide respectievelijk 6 en 5% is (Erhardt and Mecklenburg, 2011). Er is echter nog te weinig gekend over de optimale bewaaromstandigheden van gecrizzled glas. Hogg et al. (1998) vermelden dat vooral cycli van hydratatie en dehydratatie door fluctuerende RH voor de vorming van oppervlaktebarstjes zorgt. 'Weeping', een fenomeen waarbij druppeltjes op het glas gevormd worden, wordt doorgaans opgemerkt vanaf RH-waarden van rond de 45-50% (Hogg et al., 1998, Erhardt and Mecklenburg, 2011). Daarom wordt soms ook een RH aangeraden van 40-45% (Koob, 2010). <u>Was</u> is in principe niet-hygroscopisch en waterafstotend. Daarom wordt weinig effect verwacht van een te hoge of te lage vochtigheid. Water kan echter wel hydrolyse van esterverbindingen in de hand werken, en bij hoge pH ook verzeping bevorderen. Bovendien kan blootstelling aan hoge RH-waarden biologische schade veroorzaken (Ortiz and Boró, 2012).

Fluctuaties zijn vooral belangrijk voor hygroscopische materialen. Deze materialen zullen vocht opnemen of afgeven aan de omgeving tot ze een evenwichtssituatie bereiken. Dit gedrag wordt samengevat in evenwichtsvochtgehalte ('equilibrium moisture content', EMC) curves. Deze curves tonen de gewichtstoename van een materiaal bij verschillende relatieve vochtigheden. De Besloten Hofjes zijn hoofdzakelijk opgebouwd uit hygroscopische materialen, zoals hout, perkament, textiel en papier (Fig. 6.2-6.3). Fig. 6.4 toont de EMC-curves voor de belangrijkste hygroscopische materialen van de Hofjes. Voor RH-fluctuaties geldt algemeen hoe kleiner, hoe minder risico op schade. Sommige materialen kunnen echter wel wat fluctuaties verdragen. Vanuit de EMC-curves blijkt dat de grootste wateropname en -afgifte plaats vindt in de extreme RH-gebieden. In het centrale gebied tussen 40-60% RH is de vochtopname bij deze materialen beperkt. Doordat vochtopname gelinkt is aan uitzetting van het materiaal, zijn de toegelaten RH-fluctuaties in dit RH-gebied groter dan in de extreme RHgebieden (zeer lage of zeer hoge RH) (Erhardt et al., 1995). Daarnaast kunnen materialen die vrij kunnen bewegen, doorgaans grotere fluctuaties verdragen. Materialen die geremd zijn in hun uitzetting of krimp zijn gevoeliger. Hier zullen fluctuaties meer spanningen veroorzaken. Naast een grenswaarde voor directe schade door fluctuaties, moet ook rekening gehouden worden met een vermoeidheidsgrens. Veel kleine(re) fluctuaties kunnen op lange termijn mogelijk ook schadelijk zijn. Hierover is echter nog te weinig onderzoek gebeurd. Dit is sterk afhankelijk van het feit of een materiaal vrij kan bewegen, of geremd is in zijn uitzetting en krimping. In dat laatste geval kunnen fluctuaties spanningen in het materiaal veroorzaken. Daarnaast heeft elk materiaal een specifieke uitzettingscoëfficiënt. In objecten waarin verschillende materialen gecombineerd zijn, zoals in de Besloten Hofjes, zal dit bijkomende spanningen creëren. Ook in bijvoorbeeld gewoven stoffen zoals het zijde op de turfbodem kunnen mechanische schade ondervinden door het schuren van de vezels onder constant fluctuerende RH (Boersma et al., 2007). Constant fluctuerende RH kan ook mechanische schade veroorzaken in samengestelde objecten. Een voorbeeld hiervan is het schuren van vezels bij de gewoven zijde op de turfbodem. In literatuur zijn de aanbevolen richtlijnen voor fluctuaties sterk variërend, en de meeste musea gebruiken de (vermoedelijk te) strikte grenswaarden om het risico op schade minimaal te houden.



Fig. 6.2: Schijfdiagram van de volumefractie hygroscopische en niet-hygroscopische materialen in BH1.



Fig. 6.3: Schematische voorstelling van de hygroscopische materialen (links) en niet-hygroscopische materialen (rechts) in BH1.



Fig. 6.4: 'Equilibrium moisture content'-curves voor de belangrijkste hygroscopische materialen aanwezig in de Hofjes (perkament, zijde, hout en cellulose (papier)) (TIS, 2012-2017, Padfield, s.d.-a, Popescu et al., 2015, Padfield, s.d.-b).

Fig. 6.5 toont een bloemblaadje met een kern van perkament waarrond zijde is gewikkeld. Er is sterke zijdedegradatie te zien daar waar de zijde rond het perkament 'gevouwen' is. Deze opvallende

degradatie kan onder andere gelinkt worden aan een verlies aan sterkte op de vouw, maar heeft mogelijk ook te maken met het grote verschil in uitzetting tussen zijde en perkament bij hogere vochtigheid.



Fig. 6.5: Microscopisch beeld van fragment V-039-ML-OL. Sterke degradatie van de zijde die rond het perkament gewikkeld is.

Vanuit de risicoanalyse (5. *Risicoanalyse*) zien we dat vooral hout, het gepolychromeeerd hout en het textiel in de Besloten Hofjes een hoog risico hebben op onjuiste relatieve vochtigheid (Fig. 6.6). Daarom is vooral op deze materialen gefocust bij de beslissing van de richtwaarde en toegestane fluctuaties voor relatieve vochtigheid (zie *8. Aanbevelingen*).



Fig. 6.6: Risico ten opzichte van onjuiste relatieve vochtigheid per materiaaltype, zonder rekening te houden met de omgevingsfactor.

6.1.2 Temperatuur

Voor metaal en glas is de temperatuur van beperkt belang. Er moet vooral opgelet worden voor lokale extreme opwarming door bijvoorbeeld belichting. Voor alle andere materialen in de Besloten Hofjes is vooral een te hoge temperatuur risicovol. Voor de wassen medaillons is dit cruciaal, omdat de smelttemperatuur van was relatief laag ligt. Bovendien wordt was al plakkering onder zijn smelttemperatuur, en zorgt dit voor een verhoogde stofdepositie. Voor alle organische materialen

(textiel, papier, perkament, plantmateriaal, en (gepolychromeerd) hout) versnelt een verhoogde temperatuur het chemische degradatieproces.

Vanuit de risicoanalyse blijkt dat het textiel (voornamelijk zijde) veruit de grootste impact ondervindt voor een onjuiste temperatuur (Fig. 6.7). Daarom wordt in het vervolg van deze sectie op dit materiaal gefocust.



Fig. 6.7: Risico ten opzichte van onjuiste temperatuur per materiaaltype, zonder rekening te houden met de omgevingsfactor.

De reactiesnelheid van chemische reacties wordt beschreven door de Arrhenius vergelijking (vgl. 6.1), waarbij k de reactiesnelheidsconstante is, A de pre-exponentiële factor, E_a de activatie-energie, R de molaire gasconstante en T de temperatuur in Kelvin.

$$k = Ae^{-Ea/RT}$$
 (vgl. 6.1)

Gebaseerd op deze vergelijking, en de activatie-energieën bepaald door Luxford et al. (2009), is een simulatie gemaakt van het verlies aan treksterkte van zijde bij een relatieve vochtigheid van 30, 50 en 75%, voor temperaturen tussen 16 en 30°C. De ratio k/A is significant lager bij 50% RH in vergelijking met relatieve vochtigheden van 30 of 75%, waarvoor de k/A respectievelijk een factor 10^7 of 10^8 hoger ligt (Fig. ...). Ook voor de maximale belasting zien we een gelijkaardig effect, met eveneens de hoogste activatie energy bij een RH van 50% (k/A met een factor 10^5 en 10^4 hoger voor een RH van 30 en 75%, respectievelijk). Op basis van de parameters treksterkte en maximale belasting kan daarom geadviseerd worden om zijde te bewaren bij een intermediaire relatieve vochtigheid (zie ook *8. Aanbevelingen*). Temperatuur speelt echter ook een rol. Fig. 6.8 illustreert hoeveel sneller de degradatie zal plaatsvinden. In deze grafiek is de reactiesnelheid bij 16° C als nulpunt genomen. Bij 20° C en 50% RH zal de treksterkte van zijde 1.6 ± 0.1 keer sneller afnemen dan bij 16° C, terwijl dit bij 25° C al 2.8 ± 0.4 keer sneller is. Merk op dat, hoewel de treksterkte veel minder sterk afneemt bij een RH van 50% in vergelijking met 30 of 75%, de temperatuur hier een groter effect heeft.

Een meer algemene vuistregel die in musea wordt gebruikt, is dat elke daling van 5°C de chemische levensduur van onstabiele materialen verdubbelt (bv. papier en fotografisch materiaal) (Michalski, 2002). Deze materialen hebben een activatie-energie E_a van ongeveer 100 kJ mol⁻¹. Bij kleinere E_a verandert deze vuistregel. Zo geldt bijvoorbeeld voor een E_a van 60-80 kJ mol⁻¹ een verdubbeling van de degradatiesnelheid per 7°C (Michalski, 2002). Voor zijde worden in de literatuur E_a -waarden tussen 10 en 150 kJ mol⁻¹ vermeld (Luxford and Thickett, 2011).



Fig. 6.8: Simulatie van de reactiesnelheid bij een RH van 30, 50 en 75% bij een variabele temperatuur.
(a) Vergelijking van de ratio k/A bij een vochtigheid van 30, 50 en 75%; (b) relatieve degradatiesnelheid ten opzichte van 16°C bij een RH van 30, 50 en 75%.

6.2 Licht

Buiten het aanwezige glas, metaal en was, zijn alle materialen van de Besloten Hofjes in meer of mindere mate lichtgevoelig. Echter, gebaseerd op de risicoanalyse, komt ook hier textiel naar voren als het materiaal met de grootste impact (Fig. 6.9). Daarom is hierop gefocust.



Fig. 6.9: Risico ten opzichte van licht per materiaaltype, zonder rekening te houden met de omgevingsfactor.

Door de volledige ontmanteling van BH1, was het mogelijk om de kleine textielfragmenten zowel langs de voor- als achterzijde te onderzoeken. De voorzijde, die honderden jaren blootgesteld geweest is aan licht, vertoont een sterke verkleuring. De achterzijde vertoont daarentegen veel fellere kleuren die dichter aanleunen bij het origineel (Fig. 6.10).



Fig. 6.10: Optische microscopiebeelden van de voor- (links) en achterzijde (rechts) van een druiventrosje.

Om de kleurverandering onder lichtinvloed in kaart te brengen, werden kleurmetingen uitgevoerd aan zowel de voor- als de achterzijde van enkele (minder fragiele) fragmenten. De metingen werden uitgevoerd met een BYK Gardner Color-Guide 45/0 (6807) Portable Colorimeter. Deze heeft een apertuur van 4 mm en heeft een spectraal bereik van 400-700 nm (20 nm resolutie). Als lichtbron werd D65 geselecteerd. Dit is een gestandaardiseerde lichtbron die natuurlijk zonlicht simuleert dat overeenkomt met daglicht zoals voorkomt in Noord- en West-Europa. De 10° standard observer modus werd geselecteerd. Kleurwaarden werden geregistreerd als L^* -, a^* - en b^* -waarden (CIELAB-systeem), vanwaaruit vervolgens de kleurverandering ΔE_{76}^* berekend wordt als:

$$\Delta E_{76}^* = \sqrt{(\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})}$$
(vgl. 6.2)

Kleurverandering vanaf $\Delta E^* > 1.5$ zijn visueel waarneembaar, waarbij een ΔE^* -waarde van 1.5 is vastgelegd als 'juist waarneembare verandering' (ICN, 2005). Bij het meten van kleur op textiel, zijn telkens 2 verschillende oriëntaties gebruikt: parallel met de vezelrichting, en loodrecht op de vezelrichting. Hierdoor wordt rekening gehouden met een mogelijk verschil in glans, afhankelijk van de vezelrichting.

Hoewel de ΔE^* -waarde een goede indicatie geeft van de (kleurstof)degradatie, moeten volgende factoren in acht genomen worden. (1) De verkleuring van kleurstoffen is afhankelijk van verschillende factoren. Naast de intensiteit en het spectrum van de belichting, is de verkleuring ook afhankelijk van de concentratie kleurstof, bijtsen, etc. (2) De geanalyseerde fragmenten zijn gemeten na mechanische (droge) reiniging. Desondanks kan ook vervuiling van de textielvezels invloed hebben op het resultaat. (3) De textielvezels zelf kunnen ook verkleurd zijn door veroudering.

De resultaten van de kleurmetingen staan in bijlage 2. De gemiddelde ΔE^* -waarde voor de blauwe druiventrosjes is 15.0 ± 4.0 (Fig. 6.11). Kleurstofanalyse heeft aangetoond dat de blauwe kleurstof vermoedelijk indigo is (zie 3.2 Kleustofanalyse). Deze kleurstof komt overeen met gevoeligheidsklasse 5 van de ISO blauwe wol standaarden indien geverfd op zijde (CCI, 2016). De gemiddelde ΔE^* -waarde voor de groene kleur van de wijnbladen is 13.7 ± 2.5. Vermits deze groene kleur een combinatie is van vermoedelijk indigo en wouw, is ook hier de ISO gevoeligheidsklasse 5 genomen.



Fig. 6.11: Verkleuring van blauwe wol standaarden ten opzichte van het aantal mega lux-uren blootstelling. De horizontale lijn geeft het gemiddelde weer van de verkleuring van de blauwe indigo kleurstoffen op de druiventrosjes (links) en de verkleuring van de groene kleurstof (indigo en wouw) op de wijnbladen (rechts) (stippellijnen = standaarddeviatie).

Op basis van de ISO blauwe wol standaarden, kan een inschatting gemaakt worden van het toekomstige kleurverlies onder verschillende omstandigheden (Michalski, 2014). Hierbij wordt het aantal lux-uren waaraan de Hofjes in het verleden zijn blootgesteld, in rekening gebracht. De historische lichtdosis is ingeschat op basis van de kleurmetingen. Vanuit Fig. 6.11 werd een gemiddelde historische lichtdosis van 76 of 83 mega lux-uren (Mlxh) vastgelegd voor respectievelijk de groene en blauwe kleur. Hierbij werd de aanwezigheid van UV verondersteld.

Voor zes situaties is het toekomstig kleurverschil bepaald (Michalski, 2014). De situaties verschillen in verlichtingssterkte, het aantal uren belichting per dag, het aantal dagen per week, en het al dan niet nemen van foto's met flits (Tabel 6.1). Voor alle situaties is een bewaarhorizon van 100 jaar in acht genomen. Er werd een simulatie gemaakt voor zowel met als zonder UV-straling. Doordat lichtdosis bepaald wordt door de verlichtingssterkte te vermenigvuldigen met de blootstelling, is de dosis voor situatie 1 en 3 hetzelfde. Er wordt enkel een simulatie voor een historische blootstelling aan 76 Mlxh getoond. De simulatie bij een historische blootstelling van 83 Mlxh geeft een gelijkaardig resultaat, met een iets beperkter toekomstig kleurverlies. Voor de berekening van het toekomstig kleurverschil is de veronderstelling gemaakt dat alle ISO gevoeligheidsklassen in gelijke mate aanwezig zijn in de Besloten Hofjes.

	Situatie 1	Situatie 2	Situatie 3	Situatie 4	Situatie 5	Situatie 6
Verlichtingssterkte (lux)	50	50	100	50	100	200
Belichting per dag (uren)	4	8	4	8	8	8
Aantal dagen per week	6	6	6	6	6	6
Bewaarhorizon (jaar)	100	100	100	100	100	100
Aantal flitsen per dag*	0	0	0	10	0	0
Toekomstige lichtdosis (Mluxh)	6.26	12.52	12.52	12.61	25.04	50.08

Tabel 6.1: Overzicht van de vijf situaties waarvoor het toekomstig kleurverlies is berekend.

* Elektronische flits van amateurfototoestel, maximum output, close-up.

Fig. 6.12 toont zowel het toekomstig kleurverlies als percentage van de originele kleur, en als percentage van de overgebleven kleur voor de 6 situaties uit tabel 6.1. Hierbij wordt zowel een toekomstige belichting met en zonder UV in rekening gebracht. Door de hogere energie van UVstraling, zorgt dit voor een snellere verkleuring van kleurstoffen. Ook een hogere lichtdosis zal het percentage aan kleurverlies verhogen. Dit is vooral goed zichtbaar in het kleurverlies ten opzichte van de originele kleur. Omdat aan de hand van het percentage kleurverlies niet nagegaan kan worden of het toekomstig kleurverlies effectief een zichtbare kleurverandering zal veroorzaken, wordt in Fig. 6.13 de verandering in ΔE^* weergegeven voor elke ISO gevoeligheidsklasse, en voor 3 verschillende situaties: na blootstelling aan 6.26, 12.52 en 50.08 Mlxh. Ook hier wordt een onderscheid gemaakt tussen belichting met en zonder UV. Kleurstoffen binnen de ISO klassen 1 en 2 zijn door de historische belichting reeds zo goed als volledig verkleurd. Daardoor is het toekomstig kleurverlies verwaarloosbaar. Kleurstoffen binnen ISO klasse 3, 4 en 5 zullen de sterkste kleurverandering ondergaan. Echter, zonder UV-straling blijft deze kleurverandering onder de 'juist waarneembare verandering' (ΔE^* = 1.5) bij een lichtdosis van 6.26 en 12.52 Mlxh. Bij een hogere dosis van 50.08 Mlxh wordt deze grens wel overschreden voor de ISO klassen 3, 4 en 5. In aanwezigheid van UV-licht, wordt een ΔE^* -waarde van 1.5 reeds overschreden voor ISO-klasse 4 bij een beperkte lichtdosis van 6.26 Mlxh. Echter, deze 'juist waarneembare verandering' wordt enkel door geoefende kijkers waargenomen. Bovendien gaat het hier om een kleurverandering over 100 jaar, waarbij het verkleurde materiaal niet naast een materiaal met de initiële kleur wordt geplaatst. Daarom is deze 'juist waarneembare verandering' zeer strikt. Een hogere ΔE^* -waarde van 4 kan daarom eerder beschouwd worden als een significante kleurverandering². Deze wordt enkel overschreden voor ISO-klassen 3, 4 en 5 bij een lichtdosis van 50.08 Mlxh. Als conclusie kan gesteld worden dat het toekomstig kleurverlies beperkt blijft indien verlichting met lage intensiteit wordt gebruikt, en UV-straling wordt vermeden.



Fig. 6.12: Toekomstig kleurverlies als percentage van de originele kleur (links) en als percentage van de overgebleven kleur (rechts) voor de 6 situaties uit Tabel ... , rekening houdende met de al dan niet aanwezigheid van UV-straling.

² https://www.researchgate.net/post/Human_eye_color_change_sensibility_in_CIELAB_unit



Fig. 6.13: Verandering in ΔE^* na blootstelling aan 6.26 Mlxh (links), 12.52 Mlxh (midden) en 50.08 Mlxh (rechts).

Bovenstaande simulatie houdt enkel rekening met kleurverandering door het degraderen van kleurstoffen. Straling kan echter ook de degradatie van het textiel waarop de kleurstof is aangebracht, in de hand werken. Van alle natuurlijke vezels is zijde het meest lichtgevoelig, zeker voor UV-straling. Dit is gerelateerd aan de aanwezigheid van de aminozuren tryptofaan, tyrosine en phenylalanine, die UV-straling absorberen (220-370 nm) en vervolgens oxideren. Hierbij vormen ze chromofore groepen die de zijde een geelachtige kleur geven. Daarnaast zorgt fotodegradatie ook voor een lagere polymerisatiegraad en een daling van de cross-linking. Dit maakt de zijde bros en zwak (Boersma et al., 2007, Shao et al., 2005, Vilaplana et al., 2015).

6.3 Trillingen

Eén van de grote bekommernissen van de restauratoren, was het gedrag van de Besloten Hofjes op trillingen, vooral naar transport toe. Enerzijds zijn er zeer veel kleine fragmentjes die afzonderlijk in de Hofjes zijn bevestigd. Anderzijds is er de sterk gedegradeerde zijde. Bij de verhuis van de Besloten Hofjes van het gildehuis 'In den Grooten Zalm' naar het pop-up restauratieatelier in het Hof van Busleyden werd opgemerkt dat bepaalde fragmenten zeer sterk bewogen, en mogelijk niet stevig vastzaten. Uit voorzorg werden enkele fragmenten uit de Hofjes verwijderd voor het korte transport.

Ook vanuit de risicoanalyse blijkt dat het textiel, de polychrome 'Poupées de Malines' en de houten kist zelf de belangrijkste materialen zijn om op te volgen bij deze schadefactor (Fig. 6.14). Om een beter inzicht te krijgen, werd een dummiekast vervaardigd waarop verschillende trillingstesten zijn uitgevoerd. De informatie die hieruit gekomen is, is zowel gebruikt voor advies naar restauratiebehandeling, tentoonstelling en transport. Daarnaast is het transport van drie Besloten Hofjes naar de tijdelijke tentoonstelling 'Op zoek naar Utopia' in Museum M te Leuven gebruikt als case studie om het effect van een kort transport per vrachtwagen te bestuderen.



Fig. 6.14: Risico ten opzichte van fysieke krachten (focus op trillingen) per materiaaltype, zonder rekening te houden met de omgevingsfactor.

6.3.1 Massaverdeling en bevestigingsmethodes, BH1

Door de volledige ontmanteling van BH1 was het mogelijk de massa te bepalen van de verschillende fragmentjes. De massa's van de fragmenten is zeer verschillend, en ligt binnen een gebied van minder dan een gram (afzonderlijke bloemblaadjes), tot 733 gram (polychroom beeldje van Johannes de Evangelist). Door deze massa's te linken aan hun plaats in het Besloten Hofje, krijgen we een inzicht waar zich het zwaartepunt van het Hofje bevindt. Fig. 6.15 toont de massa's van alle gemeten fragmentjes op hun positie in de kast. Gaande van de kleinste massa's naar de grootste massa's, zijn de fragmenten ingekleurd in schakeringen gaande van groen over geel tot rood. Zoals verwacht, bevindt de grootste massa zich op de turfbasis.



Fig. 6.15: Overzicht van de massa van de losse fragmentjes. Het zwaartepunt ligt onderaan in de kast.

Naast de massa van de verschillende fragmenten, is het vooral ook belangrijk om te weten hoe deze in het Besloten Hofje bevestigd zijn. Bij de ontmanteling van het Hofje is door de restauratoren nauwgezet gedocumenteerd hoe elk fragment bevestigd was. Fig. 6.16 geeft een overzicht van de belangrijkste methodes en hun aantal toepassingen, gebaseerd op de data van de restauratoren. Het meest voorkomende bevestigingstype is met garen. Vervolgens komen bevestigingen door een gaatje in de binnenkast, met een nietje, of geklemd tussen andere objecten. Fig. 6.17 linkt de massainformatie met het type bevestiging. De zware objecten, voornamelijk de gepolychromeerde houten beeldjes, zijn bevestigd met houten deuvels en/of lijm. Het bevestigen via een gat, of geklemd, is –op twee uitzonderingen na- beperkt tot fragmenten met een massa kleiner dan 20 gram. Garen en nietjes worden ook voor fragmenten met een iets grotere massa gebruikt, tot 125 gram. Voor garen is er zelfs één object van 488 gram. Het gaat hier om de Toren van David, die los op de turfbasis staat, maar die via de aanwezige ketting met garen aan de binnenkast van het Hofje is bevestigd.



Fig. 6.16: Types bevestigingen met hun aantal toepassingen voor BH1.



Fig. 6.17: Massa van de fragmentjes gecombineerd met het type bevestiging.

6.3.2 Vervaardigen van dummiebloemen en -druiventrosjes

Op basis van de afmetingen van originele fragmenten uit BH1, bepaald op basis van microscopische beelden (zie bijlage 6), werden dummiebloemen en –druiventrosjes vervaardigd door een team textielexperten (Fig. 6.18). Voor de wijnbladen werd messingdraad omwikkeld met witte zijde. Vervolgens werden hiermee spiraaltjes gevormd. Daarna werd het blad 'opgevuld' door rond de spiraalvorm witte zijdedraad te wikkelen. In de bloemblaadjes werden kleine stukjes perkament gebruikt waarrond opnieuw zijdedraad werd gewikkeld. Voor de druiventrosjes werd linnen gebruikt, waarin kersenpitjes werden verwerkt. Foto's van de dummies naast originele fragmenten kunnen geconsulteerd worden in bijlage 3.



Fig. 6.18: Textielexperten vervaardigen dummiebloemen- en druiventrosjes.

Om voor de trillingsexperimenten de fragiliteit van de originele zijde bloemen te benaderen, werden de dummiebloemen voor 9 weken (63 dagen) verouderd bij 140 °C (Fig. 6.19). Deze procedure is gebaseerd op Vilaplana et al. (2015), waarin verschillende verouderingsmethodes met elkaar worden vergeleken. Uit dit onderzoek werd geconcludeerd dat thermo-oxidatie bij verhoogde temperatuur (125 °C) het beste de veroudering van historische (17^{de}-eeuwse) zijde nabootst. De mate van degradatie kan gecontroleerd worden door de blootstellingsduur aan te passen. Door de beperkte verouderingstijd, en het doel om de zijde zeer fragiel te maken (cf. Middeleeuwse zijde), werd geopteerd voor een iets hogere temperatuur van 140 °C. Deze ligt nog steeds onder de glastransitietemperatuur van zijde ($T_{g \ zijde} = 160 \ -175 \ ^{\circ}$ C). Boven dit punt veranderen de polymeereigenschappen, en voor de meeste polymeren verandert ook hun reactiviteit (Luxford and Thickett, 2011, Koperska et al., 2014). Gebonden water heeft vermoedelijk ook invloed op de reactiviteit. Voor zijde zou dehydratatie al plaatsvinden bij temperaturen van 100 °C (Luxford and Thickett, 2011). Deze temperatuur ligt echter onder de 125 °C die door Vilaplana et al. (2015) wordt

toegepast. Koperska et al. (2014) vermelden dat bij een temperatuur van 150 °C zowel het geadsobeerde als gebonden water in de fibroinestructuur verwijderd wordt. Doordat voor dit experiment het belangrijkste doel was om in beperkte tijd zeer fragiele zijde te verkrijgen, is geen rekening gehouden met de dehydratatietemperatuur. Al na enkele dagen veroudering waren de dummiebloemen sterk vergeeld. Deze vergeling bleef stabiel gedurende de rest van de veroudering. De vergeling wordt toegewezen aan de vorming van chromofoorgroepen (bv. oxidatieve groepen) tijdens de degradatie (Vilaplana et al., 2015, Boersma et al., 2007).



Fig. 6.19: Thermische veroudering van de dummiebloemen en –druiventrosjes. Links: voor veroudering; rechts: na veroudering. (Verouderingsperiode: 21 januari, 16u tot 31 maart, 16u)

Hoewel voor dit onderzoek geen testen uitgevoerd zijn naar de chemische en fysische veranderingen van het zijde en het linnen, was een duidelijke verzwakking merkbaar na veroudering. Bij manipulatie en transport van de verouderde dummiebloemen, was vezelverlies op te merken. Na het verouderen van de bloemen, werden aan verschillende wijnbladen lovertjes bevestigd, zoals ook bij verschillende originelen het geval is. Deze manipulatie zorgde ervoor dat de zijde die rond de messingdraad gewikkeld werd, plaatselijk bijna volledig verdween. Dit is duidelijk zichtbaar op de microscopiebeelden in Fig. 6.20.





Fig. 6.20: Hirox microscopiebeelden van de verouderde dummiebloemen, met duidelijke schade aan de fragiele zijdedraad.

6.3.3 Vervaardigen van dummiekast

Om voor de trillingsexperimenten een goede simulatie te maken van het gedrag van verschillende types objecten in de Besloten Hofjes, is een dummiekast nagemaakt. Deze bestaat uit een 'binnenkast' en een buitenkast, vervaardigd uit multiplex platen. Voor de buitenkast werd een dikte van 18 mm gebruikt, voor de binnenkast een dikte van 4 mm. De afmetingen van de buitenkast zijn 125 x 90 x 25 cm (hoogte x breedte x diepte). De verschillende zijdes werden aan elkaar gezet met houtlijm en schroeven. Daarnaast werden op enkele plaatsen stoelhoeken bevestigd voor extra stevigheid. Deze zijn niet aanwezig in de originele Hofjes. Voor de trillingsmetingen is de kast zelf echter van ondergeschikt belang, omdat vooral het gedrag van de objecten in de kast bestudeerd zal worden. Daarom is de kast uit voorzorg extra stevig gemaakt zodat deze niet de zwakke schakel is tijdens de trillingstesten. Voor de binnenkast werden, naar analogie met de binnenkast van BH1, verschillende panelen naast elkaar gezet, en met horizontale latjes aan elkaar bevestigd (Fig. 6.21). Deze latjes zijn ongeveer 2 cm breed. Onder- en bovenaan werd een dikte van 1 cm gebruikt, de middelste latjes zijn 0.5 cm dik. Het plafond van de dummiekast werd vervaardigd uit een multiplexplaat van 4 mm en werd aan de binnenkast bevestigd door messingdraad ($\emptyset = 1 \text{ mm}$) door geboorde gaatjes te rijgen. Op de binnenkast werden enkele stroken papier gelijmd met stijfsellijm, naar analogie met de originele Besloten Hofjes.



Fig. 6.21: Links: achterzijde van de originele binnenkast met plafond van BH1; rechts: achterzijde van de binnenkast van het dummie Besloten Hofje.

In overleg met de restauratoren zijn de textielobjecten op verschillende manieren bevestigd aan de binnenkast. Hierdoor kan meer informatie ingewonnen worden over de stabiliteit van bepaalde nieuwe en historische hechtingsmethodes. Een eerste onderscheid is het gebruik van één of twee gaatjes. Dit onderscheid is relevant indien er slechts één historisch gat aanwezig is. Als er een goede manier gevonden wordt om de objecten via dit gat te bevestigen, is geen extra boring nodig. Er werd voorgesteld om een klein stokje te gebruiken waarrond geknoopt wordt (Fig. 6.22, links). In de dummiekast werden hiervoor stukjes tandenstoker gebruikt. Indien twee gaatjes aanwezig zijn, wordt voor een tweede optie gekozen. Hierbij wordt de draad doorheen de gaatjes geknoopt (Fig. 6.22, rechts).

Er werden verschillende types draad gebruikt: messing ($\emptyset = 0.4 \text{ mm}$), linnen, polyester, en verouderd linnen (verouderingsprocedure cf. bloemen en druiventrosjes). Eén wijnblad werd los door een gat gestoken. Deze bevestigingsmethode komt voor bij Hofje 1, maar zal bij de hermontage niet opnieuw toegepast worden. Voor de druiventrosjes zijn twee hechtingen nodig: er werd een lus gemaakt langs de achterzijde van de druiventros (Fig. 6.23). Via deze lus werd de druiventros aan de binnenkast bevestigd. Tabel 6.2 geeft een overzicht van de gebruikte bevestigingsmethode voor elk fragment in de dummiekast. Fig. 6.24 toont een detail van de achterzijde van de binnenkast na de bevestiging van alle objecten. Er dient hier reeds opgemerkt te worden dat de verouderde linnendraad zeer gemakkelijk doorbrak bij het knopen.


Fig. 6.22: Schematische voorstelling van de bevestigingsmethode door één gat, gebruik makend van een stokje (links), en door twee gaten (rechts).



Fig. 6.23: Druiventrosje met langs de achterzijde een lus in messingdraad.



Fig. 6.24: Detail van de achterzijde van de binnenkast, na bevestiging van de verschillende objecten.

Tabel 6.2: Overzicht van de bevestigingsmethodes van de objecten aan de binnenkast (o = één gat, gebruik makend van stokje; oo = 2 gaten).

00	00	00	00	00	00	00	00
Messing*	Messing*	Messing*	Messing*	Linnen*	Linnen*	Verouderd linnen*	Verouderd linnen*
Messing**	Linnen**	Verouderd linnen**	Polyester**	Linnen**	Polyester**	Verouderd linnen**	Polyester**
			Wijnk	oladen			
00	0	0	0	00	0	00	0
Messing	Messing	Gat	Linnen	Polyester	Polyester	Verouderd linnen	Verouderd linnen
			Bloe	emen			
00	0	00	0	00	0	00	0
Messing	Messing	Polyester	Polyester	Linnen	Linnen	Verouderd linnen	Verouderd linnen

Druiventrosjes

Houtblokken ('Poupées de Malines')

Origineel	Huidig	Restauratie
(deuvel in klein gat)	(deuvel in groot gat)	(aangepaste deuvel in groot gat)

* Bevestigingsmethode voor de lus rond het druiventrosje. ** Bevestigingsmethode van het druiventrosje aan de binnenkast (plafond).

De 'Poupées de Malines' zitten in de Besloten Hofjes doorgaans in een turfbasis met een houten deuvel. De gaten in de turf zijn echter doorheen de jaren vergroot, waardoor de stabiliteit van de 'Poupées de Malines' sterk verminderd is. Daarom worden ook dummies van de 'Poupées de Malines' meegenomen in het trillingsonderzoek. Hiervoor zijn balkvormige stukken hout gebruikt met in de onderkant een deuvel. Voor de turfbasis werden turfblokken aangekocht in een Nederlands tuincentrum. Deze blokken werden in plakken van ongeveer 4 cm gesneden en aan de lucht gedroogd. Tenslotte werd een warmtebehandeling uitgevoerd waarbij de turfblokken gedurende 2,5 uur aan 55°C werden blootgesteld. Dit zorgt ervoor dat alle micro-organismen gedood worden. Nadien werden de turfblokken naast elkaar geplaatst en ingepakt in een linnen doek die grof werd dichtgenaaid (Fig. 6.25). Voor de bevestiging van de dummies van de 'Poupées de Malines' werden drie gaten gemaakt

in de turf: één nauw aansluitend gat dat vermoedelijk de oorspronkelijke situatie simuleert, en twee te grote gaten die de huidige situatie simuleren (Fig. 6.26). Eén van de dummie 'Poupées de Malines' werd door de houtrestaurator voorzien van een aangepaste deuvel waarrond bamboe werd bevestigd om deze aansluitend te maken in het te grote gat.



Fig. 6.25: Turfbasis voor de dummiekast, ingepakt in linnen en grof dichtgenaaid.



Fig. 6.26: Turfblok met aansluitend gat (links) en te groot gat (rechts).

Ten slotte werd het volledige dummie Besloten Hofje gemonteerd. De binnenkast werd in de buitenkast geplaatst en met nagels vastgeklemd. De turfbasis werd onderaan geplaatst. Deze wordt langs de voorzijde met drie nagels op zijn plaats gehouden. Fig. 6.27 toont het finale resultaat.



Fig. 6.27: Dummiekast.

6.3.4 Transport dummiekast naar de firma Sebert, Nederland

De trillingsexperimenten op de dummiekast werden uitgevoerd door de firma Sebert Trillingstechniek B.V. te Bergschenhoek (Rotterdam, Nederland). Het transport van de dummiekast van Mechelen, waar de dummiekast vervaardigd werd, naar Rotterdam werd reeds als een experiment opgevat om een transport te bestuderen. De dummiekast werd vervoerd in een bestelwagen van het KIK. De kast werd met de rijrichting mee in de koffer bevestigd met spanriemen (Fig. 6.28). Dit kan dus beschouwd worden als een zeer extreme situatie, waarbij geen gebruik gemaakt wordt van een speciale transportkist en trillingsdempers zoals mousse of aangepaste vering van het voertuig. Ook voor de route werd geen rekening gehouden met 'kunsttransport'. Resultaten leveren daardoor een duidelijke bovengrens. Het transport is geëvalueerd op basis van: (1) visuele veranderingen, (2) trillingsmetingen, en (3) monitoring van verlies aan zijdevezels.



Fig. 6.28: Vervoer van de dummiekast van Mechelen naar Rotterdam. Bevestiging van de kast in de bestelwagen met behulp van spanriemen. Uiterst rechts is de sterke beweging te zien van een druiventrosje tijdens transport.

Visuele inspectie toont een sterke beweging van voornamelijk de druiventrosjes en de lovertjes (Fig. 6.28). Tijdens het transport Mechelen-Rotterdam is één druiventrosje losgekomen dat via een lus van verouderde linnendraad met polysterdraad aan de binnenkast was bevestigd. De verouderde linnendraad is doorgebroken. De polysterdraad die het trosje aan de kast verbindt, is intact. Daarnaast is ook de middelste "Poupées de Malines" omgevallen. Dit is degene die zonder restauratieingreep in een te groot gat in de turf bevestigd is. Op de terugweg van Rotterdam naar Brussel (KIK) is nog een druiventrosje gevallen. Ook deze keer is het een druiventrosje met verouderd linnen (messing lus en bevestiging met verouderd linnen). De middelste "Poupées de Malines" viel ook tijdens de terugweg uit zijn turfbasis.

De trillingen tijdens transport zijn in drie richtingen opgevolgd met een VB300 3-axis g-force datalogger (Extech, FLIR, Nashua, USA). Tabel 6.3 geeft een overzicht van de specificaties van dit meettoestel. Fig. 6.29 geeft een schematische voorstelling van de drie assen die door de datalogger gemeten worden, ten opzichte van het voertuig.

uber 0.5. Specificaties van de Extech	vb300 3-uxis y-joice uululogye
Frequentiedomein	0-60 Hz
Versnellingsresolutie	0.00625 g
Versnellingsnauwkeurigheid	± 0.5 g
Versnellingsbereik	± 18 g
Bemonsteringssnelheid (software)	500 ms – 24 hours

Tabal 6.2: Spacification yan da Extach VR200.2 avis a farca datalaan	
	1 O F
1 UDEI 0.5. SDECITICULIES VUIT UE EXLECTI V DSOU S-UXIS U-TOTCE UULUIOUU	ier.



Fig. 6.29: Schematische weergaven van de drie assen die de trillingslogger monitort, ten opzichte van het voertuig. X-as: horizontale beweging, loodrecht op rijrichting. Y-as: verticale beweging, op en neer gaan auto. Z-as: horizontale beweging, gelijk met rijrichting.

Fig. 6.30 toont de resultaten van de trillingsmetingen tijdens transport. Van 10u30 tot ongeveer 11u17 zien we de achtergrondwaarden toen het voertuig stilstond. Vanaf 11u17 begint het voertuig te rijden en zien we veel hogere amplitudes in versnelling (g). Door de beperkte geheugencapaciteit heeft de logger geen data meer opgenomen van het laatste stuk traject. Tabel 6.4 geeft een overzicht van de belangrijkste waarden per as, met een onderscheid tussen de achtergrond en het transport. De grootste amplitudes werden waargenomen op de X-as. De verklaring hiervoor is dat de logger aan de bovenzijde van de dummiekast werd bevestigd, en dat de kast enkel met spanriemen werd vastgemaakt in de auto.



Fig. 6.30: Versnelling (g) voor het transport van Mechelen naar Rotterdam, gelogd met de Extech VB300. De grijze invulling geeft de grens van 95% van de achtergrondwaarden (10u30-11u10). De rode lijn geeft 95% van de versnellingswaarden tijdens transport (11u17-12u28).

Tabel 6.4: Versnelling (g) gemeten op de dummiekast tijdens het transport Mechelen-Rotterdam voor
de verschillende richtingen, met indicatie van het 95 ^{ste} percentiel, gemiddeldes, maxima en minima

(amplitude).										
	Transport Mechelen-Rotterdam									
	X-a	is	Y-a	is	Z-as					
	Achtergrond	Transport	Achtergrond Transport		Achtergrond	Transport				
95%	0.02	0.40	0.01	0.25	0.04	0.20				
Gemiddelde	e 0.01 0.16		0.00 0.09		0.03	0.07				
Maximum	0.38	2.11	0.44	1.55	0.97	0.80				
Minimum	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				

Om een idee te krijgen van het verlies aan zijdevezels, zijn onder de wijnbladen en de bloementakjes microscoopglaasje gemonteerd in een mousse. Door de glans van deze microscoopglaasjes te meten voor en na het transport, wordt een indicatie gegeven van de stofdepositie die tijdens het transport heeft plaatsgevonden. Verwacht wordt dat deze stofdepositie hoofdzakelijk bestaat uit zijdevezels die losgekomen zijn. Fig. 6.31 geeft het verschil in glans weer als percentage. De posities verwijzen naar de locatie van het microscoopglaasje in de dummiekast. Posities 1 t.e.m. 8 zijn microscoopglaasjes die onder de wijnbladen werden bevestigd (bovenste rij). Posities 9 t.e.m. 16 zijn de microscoopglaasjes onder de bloemenranken (onderste rij). De resultaten tonen een beperkte glansverandering voor de wijnbladen, en een opvallend grotere verandering voor de bloemenranken. De resultaten tonen aan dat er verlies aan zijde is opgetreden. Door de grotere hoeveelheid zijde in de bloemenranken in vergelijking met de wijnbladen, kan geen uitspraak gedaan worden of de positie in de kast het verlies in zijde beïnvloedt.



Fig. 6.31: Glansverlies van microscoopglaasjes geplaatst onder de wijnbladen (positie 1 t.e.m. 8) en bloemenranken (positie 9 t.e.m. 16) na transport van de dummiekast, ter indicatie van het verlies aan zijdevezels.

6.3.5 Trillingsexperimenten op trillingstafel, firma Sebert, Nederland

De hoogste kwetsbaarheid van de Besloten Hofjes voor trillingen wordt verwacht als de trillingsbron dezelfde frequentie heeft als de resonantiefrequentie van de verschillende kleine objecten in de kast. Resonantie levert doorgaans een versterking van de trilling tot 20 keer. Dit betekent bijvoorbeeld dat wanneer een object wordt blootgesteld aan een trillingsbron van 1 g op de resonantiefrequentie, het object dit voelt als 20 g (Marcon and Michalski, 2002). Om de resonantiefrequentie van de verschillende objecten in de Besloten Hofjes te bepalen, werd de dummiekast op een trillingstafel geplaatst bij de firma Sebert trillingstechniek B.V. (Bergschenhoek, Nederland). Daarnaast werd een simulatie van een transport uitgevoerd.

Voor het bepalen van de resonantiefrequenties werd de dummiekast blootgesteld aan continue dalende vibraties van 100 naar 3 Hz, voor zowel horizontale als verticale vibraties. Video opnames zijn gebruikt om de resonantie visueel te evalueren, omdat sensoren niet kunnen bevestigd worden op objecten met beperkte massa. De resonantie is uitgezet op een grafiek met een relatieve schaal van 0 (geen resonantie) tot 100 (hoge resonantie).

Twee verschillende situaties zijn gesimuleerd: transport en tentoonstelling. Tijdens transport wordt de beweging van het Besloten Hofjes belemmerd door de transportkist, die in het voertuig is vastgemaakt. Om een transport te simuleren is de dummiekast daarom stevig vastgemaakt aan de vibratietafel. In een tentoonstelling zijn objecten doorgaans niet gefixeerd, of zeer beperkt om te voorkomen dat een object gaat 'wandelen'. Om een tentoonstelling te simuleren, is de dummiekast daarom niet vastgezet op de vibratietafel. Fig. 6.32 toont de resultaten van de visuele evaluatie van de resonantie. Voor beide situaties veroorzaken de horizontale vibraties de grootste resonantie, voornamelijk bij frequenties onder 20 Hz. Daarom wordt geadviseerd om de vibraties in het lager frequentiedomein te beperken of te dempen, en bij voorkeur alle frequenties onder 100 Hz. Gelijkaardige resonantiefrequenties zijn waargenomen voor andere kunstwerken, zoals schilderijen (1 Hz voor grote, los opgespannen schilderijen tot 50 Hz voor kleine, strak opgespannen schilderijen) (Marcon and Michalski, 2002), en een modern kunstwerk (verschillende resonanties onder de 50 Hz) (Wei et al., 2011).

Een gelijkaardig experiment is uitgevoerd op een klein (29 x 24 x 4 cm), vroeg 20^{ste}-eeuws Hofjes van de Béthune voor horizontale trillingen. De resonantie van de verschillende bloemen bevindt zich ook hier in het lagere frequentiebereik, hoewel sommige bloemen in het geteste frequentiebereik geen visuele beweging vertoonden. Net zoals bij de dummiekast, is er sterkere resonantie wanneer het object op de trillingstafel vastgezet werd. De resultaten van de trillingsmetingen op dit object kunnen geconsulteerd worden in bijlage 4.



Fig. 6.32: Resonantiefrequenties op basis van videobeelden voor de lovertjes, druiventrosjes, wijnbladjes, en drie houtblokken ('Poupées de Malines') voor horizontale en verticale trillingen, met de dummietafel los en vast op de trillingstafel.

6.3.6 'Op zoek naar Utopia', case studie transport originele Besloten Hofjes

Een uitstekende case studie om de schadelijke effecten van trillingen en schokken op de Besloten Hofjes in te schatten, was het transport van drie originele Hofjes naar Museum M te Leuven voor de tijdelijke tentoonstelling 'Op zoek naar Utopia' (20.10.2016 – 17.01.2017). De conservatoren voorzagen een bescherming van de kast zelf, dat als dempend materiaal voor de paneelschilderijen diende, en de meest fragiele objecten in de kast ondersteunde (Fig. 6.33). De Hofjes werden vervolgens

in een transportkist geplaatst. Er werden transportkisten gerecupereerd van vroegere transporten van de Besloten Hofjes. Deze kisten zijn ongeveer 20 jaar oud. Ze bestaan uit hout en zijn langs de binnenzijde met een (polyurethaan)mousse bekleed. Voor het transport naar Leuven voorzag de *art handler* (Mobull) een vrachtwagen met drie luchtgeveerde assen. Bovendien werden bijkomende trillingsdempers geplaatst onder de transportkisten. Om het transport te monitoren, werd de Extech VB300 3-axis g-force datalogger (Tabel 6.3) met behulp van een magneet op een scharnier van BH6 geplaatst (onder links). De transportroute is verlopen langs de autostrade, en duurde ongeveer 45 minuten.



Fig. 6.33: De conservatoren voorzagen een ondersteuning voor de binnenkast tijdens transport.

Fig. 6.34 en 6.35 visualiseren de trillingsdatasets van de transporten van en naar Leuven. Tabel 6.5 toont de gemiddelden, het 95^{ste} percentiel, het maximum en minimum voor elke dataset. Er wordt telkens een onderscheid gemaakt tussen het transport, en de achtergrond wanneer de Besloten Hofjes in hun transportkist stilstonden. Tijdens transport ondervinden de Besloten Hofjes de hoogste acceleratie-waardes in de y-as (verticale beweging van de vrachtwagen) (tot 1.6 g), en de laagste in de z-as (horizontale beweging parallel met rijrichting) (tot 0.6 g). In het algemeen zijn de acceleraties van het terugtransport Leuven-Mechelen iets lager in vergelijking met het heentransport.



Fig. 6.34: Versnelling (g) voor het transport van Mechelen naar Leuven, gelogd met de Extech VB300. De grijze invulling geeft de grens van 95% van de achtergrondwaarden (kist in rust) (10u05-10u50). De rode lijn geeft 95% van de versnellingswaarden tijdens transport (11u00-12u00).



Fig. 6.35: Versnelling (g) voor het transport van Leuven naar Mechelen, gelogd met de Extech VB300. De grijze invulling geeft de grens van 95% van de achtergrondwaarden (kist in rust) (14u12-14u20 en 15u24-15u36)). De rode lijn geeft 95% van de versnellingswaarden tijdens transport (14u23-15u13).

Tabel 6.5: Versnelling (g) gemeten op BH6 tijdens het transport Mechelen-Leuven en Leuven-Mechelen voor de verschillende richtingen, met indicatie van het 95^{ste} percentiel, gemiddeldes, maxima en minima (piekwaarden).

		Trans	sport Mec	helen-Le	euven	Transport Leuven-Mechelen							
	X-a	as	Y-as		Z-as		X-as		Y-as		Z-as		
	Achtergrond	Transport	Achtergrond	Transport	Achtergrond	Transport	Achtergrond	Transport	Achtergrond	Transport	Achtergrond	Transport	
95%	0.01	0.14	0.01	0.22	0.02	0.13	0.02	0.11	0.02	0.18	0.04	0.13	
Gemiddelde	0.00	0.06	0.01	0.07	0.01	0.05	0.01	0.04	0.01	0.06	0.02	0.05	
Maximum	0.30	0.72	0.19	1.59	0.44	0.63	0.32	0.70	0.19	1.06	0.42	0.44	
Minimum	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

Door het gebrek aan gepubliceerde niveaus van trillingsschade (Thickett, 1999, Thickett, 2002) en de complexiteit van trillingsmetingen, kunnen deze acceleratiewaarden op zich geen eenduidige evaluatie geven over de mogelijk schadelijke effecten van het transport. Ze moeten gecombineerd worden met gedetailleerde conditierapportering. Daarom zijn macroscopische beelden van verschillende fragmenten opgenomen door een fotograaf van het KIK-IRPA, vlak vóór en na het transport. De focus lag hierbij op de zijdevezels. De beelden werden in detail bestudeerd op verschillen. Voor verschillende fragmenten werd geen visuele verandering opgemerkt. Echter, andere fragmenten toonden bewogen of verdwenen zijdevezels. Op de bodem van BH1 werden losgekomen zijdevezels opgemerkt (Fig. 6.36). Alle macrobeelden vóór en na transport kunnen geconsulteerd worden in bijlage 7, met indicatie van de locaties waar veranderingen hebben plaatsgevonden. Bij deze resultaten moet de kanttekening gemaakt worden dat de Besloten Hofjes vlak voor dit transport gerestaureerd zijn. Tijdens de reiniging van de Hofjes zijn vermoedelijk al zeer veel losse zijdevezels verwijderd.

De schadelijke effecten van het transport werden hiermee aangetoond: irreversibel materiaalverlies heeft plaatsgevonden. Het belang van deze schade, en het daaraan gekoppelde waardeverlies moet geëvalueerd worden door de verantwoordelijke entiteit. Deze onderzoeksresultaten kunnen gebruikt worden in de besluitvorming en argumentatie naar toekomstige bruikleenaanvragen toe.



Fig. 6.36: Macroscopisch beeld van BH1 vóór (links) en na (rechts) transport. Indicatie van losgekomen zijdevezels na transport.

Tijdens het transport van de Besloten Hofjes is het ook belangrijk om ervoor te zorgen dat de objecten geen klimaatschokken krijgen. Daarom werden op het terugtransport van Leuven naar Mechelen twee loggers voor temperatuur en relatieve vochtigheid meegestuurd met de vrachtwagen. Eén werd in de transportkist geplaatst, de andere werd langs de buitenzijde op de kist bevestigd. Fig. 6.37 toont de resultaten. In de temperatuurdata van de logger op de kist is duidelijk te zien wanneer de transportkist zich in de buitenlucht bevindt (2 temperatuursdalingen van ongeveer 4°C). De logger in de transportkist voelt deze dalingen niet. Dit is een positief resultaat voor de getransporteerde Hofjes. De relatieve vochtigheid daalt met ongeveer 15% wanneer de transportkist Museum M verlaat. Deze schok wordt echter eveneens niet gevoeld in de bufferende transportkist.



transport van de Besloten Hofjes van Leuven naar Mechelen.

6.3.7 Trillingstesten in het Hof van Busleyden

Verwacht wordt dat het trillingsniveau waaraan de Besloten Hofjes blootgesteld zullen worden in het Hof van Busleyden lager is in vergelijking met transport. Er moet echter in rekening gebracht worden dat trillingen een vorm van cyclische belasting zijn, en dat er een cumulatief effect is. Blootstelling aan één minimale trilling zal vermoedelijk geen schade veroorzaken, maar na miljoenen cycli kan er door materiaalmoeheid toch schade ontstaan (Wei, 2006). Doordat de permanente tentoonstelling over verschillende jaren loopt, is het belangrijk het trillingsniveau zo laag mogelijk te houden.

De Besloten Hofjes worden tentoongesteld op de zolderverdieping van het gerenoveerde Hof van Busleyden. De zoldervloer bestaat uit een 'zwevende' betonplaat van ongeveer 6 centimeter dik. Deze ligt op lewisplaten die op de historische houten draagconstructie rusten. Als je op de vloer stapt, voel je deze duidelijk meetrillen. Om na te gaan wat het trillingsniveau is ten opzichte van het transport, is een experiment uitgevoerd waarbij de dummiekast rechtstreeks op de vloer geplaatst is. De Extech VB300 trillingslogger is bevestigd aan de zijkant van de dummiekast. Vervolgens zijn periodes van 'geen menselijke activiteit' afgewisseld met periodes van 'menselijke activiteit'. Als menselijke activiteit hebben 1 tot 8 personen rond de dummiekast gestapt en/of gesprongen (Fig. 6.38). Daarnaast is de trillingslogger ook op de betonnen vloer vastgeplakt met aluminiumtape om de trillingen van de vloer zelf te meten. Bij het uitvoeren van de metingen stond er bouwmateriaal gestockeerd op de betonvloer (zuidelijke deel: gipsplaten, technische onderdelen; noordelijke deel: tegels). Deze belasting zorgt voor een demping van de trillingen. In de finale opstelling zullen voornamelijk de zeven vitrines met de Besloten Hofjes de belasting vormen.



Fig. 6.38: Foto's tijdens de experimenten op de zolderverdieping van het Hof van Busleyden.

Fig. 6.39 geeft een voorbeeld van de grootte van de acceleratie per seconde (situatie 1, tabel 6.6). In de eerste tijdsperiode (voor de stippellijn) was er geen menselijke activiteit. In de tweede tijdsperiode (na de grijze stippellijn) bestond de menselijke activiteit uit 2 personen die rondstapten of sprongen. Dit komt in de resultaten naar voren als een verhoging van het aantal datapunten > 0 g. Deze komen gegroepeerd voor, vermoedelijk vooral gelinkt aan het springen op de vloer. In deze dataset zijn drie events zichtbaar, die vooral tot uiting komen in de x- en z-as.

Tabel 6.6 geeft de resultaten van verschillende korte experimenten. Doordat de periodes met en zonder menselijke activiteit moeilijk van elkaar te onderscheiden zijn, zijn de statistische gegevens bepaald op basis van de volledige datasets (max. 5 minuten). De gegevens bevinden zich voornamelijk in de achtergrond range (zie ook tabel 6.4 en 6.5). Dit kan verschillende oorzaken hebben. De logger meet enkel in het frequentiedomein 0-60 Hz. De trillingen die de bezoeker ervaart, liggen mogelijk in een hoger frequentiedomein. De logger is vermoedelijk ook niet gevoelig genoeg om relatief zwakke gebouwtrillingen te meten, omdat deze ontwikkeld is voor het loggen van trillingen en schokken tijdens transport.

Een onderzoek van Thickett (2002) toont aan dat de trillingsniveaus in museumzalen door dagdagelijkse activiteiten zoals bezoekerscirculatie, gemiddelde acceleraties hebben tussen 0.006 en 0.15 g. Hierbij wordt het plaatselijke karakter van bepaalde vibraties benadrukt. De gemiddelde waarden hier opgemeten in het museum, vallen binnen deze range.



Fig. 6.39: Acceleratie over de 3 assen voor situatie 1 (Tabel 6.6). In de eerste tijdsperiode (vóór de verticale stippellijn) was er geen menselijke activiteit. In de tweede tijdsperiode (na de stippellijn) hebben 2 mensen rondgelopen en gesprongen.

Situatie			X-a	ixis		Y-axis			Z-axis				
		95%	Gem.	Max.	Min.	95%	Gem.	Max.	Min.	95%	Gem.	Max.	Min.
1.	Locatie 1, boven, rust- springen (2)	0.04	0.01	0.23	0.00	0.01	0.00	0.26	0.00	0.03	0.01	0.31	0.00
2.	Locatie 1, boven, stappen-rust-stappen- springen (1)	0.03	0.01	0.23	0.00	0.01	0.00	0.17	0.00	0.02	0.01	0.39	0.00
3.	Locatie 1, onder, stappen- springen (6)	0.01	0.01	0.32	0.00	0.00	0.00	0.45	0.00	0.00	0.01	0.40	0.00
4.	Locatie 2, boven, rust- stappen-8man (3)	0.03	0.02	0.27	0.00	0.01	0.00	0.17	0.00	0.02	0.01	0.37	0.00
5.	Locatie 2, onder, wandelen-springen (4)	0.02	0.01	0.22	0.00	0.01	0.00	0.19	0.00	0.02	0.01	0.44	0.00
6.	Locatie 2, logger op vloer geplakt (7)	0.06	0.01	0.40	0.00	0.05	0.01	0.50	0.00	0.04	0.01	0.31	0.00

Tabel 6.6: Acceleratie over periodes van 1 seconde voor verschillende testsituaties.

Voor trillingsgevoelige objecten wordt aangeraden om ze in muurvitrines te plaatsen zodat de invloed van vibraties van de vloer tot een minimum beperkt kan worden (Thickett, 2002). In de opstelling in het Hof van Busleyden is dit echter geen optie.

Sinds 23 maart 2018 is het gerenoveerde stadsmuseum Hof van Busleyden opnieuw geopend, met als blikvanger de gerestaureerde Besloten Hofjes op de zolderverdieping. De Hofjes staan tentoongesteld in individuele vitrines waarin trillingsdempers zijn voorzien. Deze dempers bestaan uit een synthetische visco-elastische urethaanpolymeer, gekozen door de vitrinebouwer (stud mount 0510450-70-10 with durometer 70, Sorbothane, Inc., Kent, Ohio). Dit materiaal kan werken als trillingsdemper in een frequentiebereik boven 10 Hz.

Al snel werd echter duidelijk dat de Besloten Hofjes in hun permanente opstelling aan bepaalde trillingen werden blootgesteld. Bij bezoekerspassage begonnen de lovertjes en andere kleine fragmentjes bijvoorbeeld zichtbaar te bewegen. Om de efficiëntie van de trillingsdempers in de vitrine te evalueren, werd daarom geopteerd om een uitgebreide trillingsanalyse te laten uitvoeren door Tractebel. Er werden op 3 locaties in de permanente tentoonstelling trillingssensoren geplaatst, zogenaamde accelerometers (PCB Piezotronics model 393A03, Depew, NY, USA). Eén sensor werd op de vloer geplaatst in het midden van de ruimte, tussen twee steunbalken. De twee andere sensoren werden in de vitrine geplaatst: één op de vitrinekader in de technische ruimte van de vitrine, onder de trillingsdempers; en één vlak naast het Besloten Hofje BH2, boven de trillingsdempers (Fig. 6.40). Op donderdag 26 juli 2018 werd er gedurende 24 uur gemonitord, van middernacht tot middernacht. Op deze meetdag was het museum open van 10u00 tot 22u00. De trillingen werden continue gemonitord met een snelheid van 1024 Hz. Om een *data overload* te vermijden, werd enkel het maximale trillingsniveau per 30 seconden tijdsinterval opgeslagen. Frequentieanalyse werd uitgevoerd door Tractebel met eigen ontwikkelde software.



Fig. 6.40: Links: positie van de loggers (sensor 1: vloer, sensor 2: technische ruimte vitrine, sensor 3: naast Besloten Hofje). Rechts: detail van de sensor (accelerometer) naast het Besloten Hofje.

Fig. 6.41 toont het trillingsniveau voor de drie meetlocaties. Vanaf middernacht tot ongeveer 5u30 zijn de trillingsniveaus zeer laag. Vanaf 5u30 stijgt de activiteit en blijft deze vrij constant doorheen de dag, tot het museum sluit om 22u00. Tijdens de meetdag ging het museum om 10u00 open, maar het museumpersoneel was al vroeger aanwezig. Omdat de trillingsniveaus tussen 6u30 en 9u00 echter ruwweg hetzelfde zijn als de rest van de dag, kunnen we stellen dat menselijke activiteit niet de enige trillingsbron is. Gebaseerd op de spectrale analyse en de frequentieanalyse kunnen we besluiten dat zwaar verkeer (bussen en vrachtwagens) in de Frederik de Merodestraat ook een belangrijke trillingsbron zijn. Dit zwaar verkeer veroorzaakt trillingen in het frequentiedomein van 8 tot 20 Hz. De Frederik de Merodestraat bevindt zich op ongeveer 35 meter van de tentoonstellingszaal.

In Fig. 6.41 zien we dat de maximale trillingsniveaus per 30 seconden op de vloer iets hoger zijn dan in de technische ruimte van de vitrine. De meeste waarden blijven echter onder de 0.4-0.5 mm s⁻¹. Opmerkelijk is echter dat het gemiddelde trillingsniveau naast het Besloten Hofje opmerkelijk hoger is. Hier komen we ruwweg uit op waarden onder de 0.7 mm s⁻¹, met hier en daar uitschieters tot 1.5 mm s⁻¹ en zelfs twee pieken boven 2 mm s⁻¹. Dit betekent dat het dempingssysteem toegepast in deze vitrine de inkomende trillingen van de vloer niet dempt maar versterkt. Het volledige rapport van Tractebel is terug te vinden in bijlage 8.



Fig. 6.41: Maximum trillingsniveaus per 30 seconden, gemeten gedurende 24 uur. De resultaten voor de drie meetlocaties worden weergegeven: de vloer, de technische ruimte van de vitrine, en de locatie naast het Besloten Hofje.

Het Hof van Busleyden onderzoekt nu in samenwerking met de vitrinebouwer en de trillingsexperten van Tractebel hoe de situatie voor de Besloten Hofjes geoptimaliseerd kan worden. Via nieuwe proefopstellingen wordt gekeken welke oplossing haalbaar en effectief is. De vitrines zullen vervolgens aangepast worden met meer geschikte dempers om ervoor te zorgen dat de blootstelling van de Besloten Hofjes aan trillingen beperkt blijft. In de aangepaste vitrines zal ook rekening gehouden worden met de verschillende massa's van de Besloten Hofjes.

6.4 Pollutie

Vanuit de risicoanalyse komt naar voor dat voor de Besloten Hofjes vooral voor de materialen textiel, hout en polychromie aandacht moet besteed worden aan polluenten (Fig. 6.42). Pollutie omvat zowel gasvormige polluenten alsook (fijn) stof. In het algemeen geldt voor alle materialen: hoe lager het pollutieniveau, hoe beter.



Fig. 6.42: Risico ten opzichte van pollutie per materiaaltype, zonder rekening te houden met de omgevingsfactor.

Wat meteen opvalt aan de Besloten Hofjes voor hun restauratie, is de grote hoeveelheid stofdepositie in de kast (Fig. 6.43). Dit stof heeft een storend esthetisch effect. Dit is vermoedelijk één van de meest duidelijke schadefenomenen veroorzaakt door stof, en is sterk gerelateerd aan menselijke waarneming. Het zijn vooral de grotere stofpartikels die visueel het meest bijdragen aan de vervuiling (Yoon and Brimblecombe, 2001). Stof kan echter ook andere types schade veroorzaken. Mechanische schade is gelinkt aan de aanwezigheid van stofdeeltjes met hoge hardheid, zoals bijvoorbeeld silicaten. Dergelijke stofdeeltjes kunnen microkrassen veroorzaken, onder andere tijdens de reiniging van het object (Ioanid et al., 2005, Wei et al., 2007). Reinigen op zichzelf brengt ook een risico met zich mee voor mechanische schade. Een verhoogde stofdepositie zorgt ervoor dat er regelmatiger moet gereinigd worden. Bovendien kunnen stofdeeltjes zich na verloop van tijd steviger aan het oppervlak hechten, waardoor agressievere reinigingsmethodes nodig zijn (Spafford-Ricci and Graham, 2000, Brimblecombe et al., 2009). Het verwijderen van stof op verouderde zijde vormt in het bijzonder een zeer grote uitdaging, omdat praktisch elke reiniging voor materiaalverlies zorgt (MEMORI, 2013). Een derde vorm van schade is biologische veroudering. Enerzijds kunnen stofdeeltjes een biologische oorsprong hebben, zoals bacteriën, sporen, pollen enz. Eens deze op een oppervlak neergekomen zijn, kunnen ze onder gunstige omstandigheden biodegradatie veroorzaken (Prajapati, 2003, Ioanid et al., 2005). Anderzijds kan een stoflaag op een object een voedingsbodem vormen voor fungi, en zo hun levensvatbaarheid vergroten. Een laatste belangrijke vorm van schade die door stof veroorzaakt kan worden, is chemische aantasting. Stofdepositie kan de degradatie van verschillende materiaal versnellen, enerzijds door de chemische samenstelling van het stof, anderzijds door de hygroscopische eigenschappen van het stof (Anaf, 2014).



Fig. 6.43: Stofdepositie op kleine fragmenten in de BH1. Foto's voor restauratie.

Voor de restauratie werd geaccumuleerd stof verzameld op verschillende locaties in de Besloten Hofjes. Hiervoor werd dubbelzijdige koolstoftape voorzichtig op verschillende stofrijke oppervlakken geduwd en opnieuw verwijderd. In totaal werden 7 locaties bemonsterd. In BH1 werden stalen genomen ter hoogte van het plafond, de zijwand, de turfbasis, het altaar en op het hoofd van de dame van de eenhoorn. In BH2 en BH6 werden stofstalen genomen op de (turf)basis. De koolstoftape werd vervolgens geanalyseerd met een elektronenmicroscoop in combinatie met een X-stralen detector (ESEM-EDX, QUANTA 250 FEG, FEI, Hillsboro, Oregon, USA). De morfologie van het stof werd bestudeerd op basis van secundaire en terugverstrooide elektronenbeelden (Fig. 6.44).

Opmerkelijk is dat op elke horizontale locatie textielvezels werden teruggevonden, zelfs als de ondergrond waarop bemonsterd was, niet uit textiel bestond. Door de fragiele staat van de Besloten Hofjes vermoeden we dat deze losse vezels voornamelijk afkomstig zijn van de zijden bloemen in de Besloten Hofjes zelf. Onder invloed van de zwaartekracht zullen deze (zijde)vezels zich voornamelijk afzetten op horizontale oppervlakken.



Fig. 6.44: Terugverstrooid elektronenbeeld van een stofstaal, bemonsterd op koolstoftape (bemonsteringslocatie: BH1 – turfbasis, bovenop groen papier).

Naast een morfologische analyse werd ook de elementaire samenstelling van 157 individuele stofdeeltjes bepaald. Op basis van de atoompercentages werd een clusteranalyse uitgevoerd (k-means clustering). Koolstof en zuurstof werden hiervoor niet meegenomen omdat hun hoeveelheid niet exact kan worden bepaald door de invloed van het koolstofsubstraat. Alle andere elementen werden genormaliseerd zodat de som van de atoompercentages voor elk stofdeeltje gelijk is aan 1. De 157 geanalyseerde stofdeeltjes zijn geklasseerd in 6 clusters. Elke cluster komt overeen met een specifiek type stof (Fig. 6.45). Drie clusters bevatten minerale deeltjes: calciumrijke deeltjes, silicarijke deeltjes en deeltjes met een mix aan mineraal gerelateerde elementen. Deze drie clusters omvatten 75% van alle geanalyseerde deeltjes. Twee andere clusters bevatten enerzijds ijzerrijke deeltjes en anderzijds koperrijke deeltjes. In een laatste cluster zitten deeltjes die gekenmerkt worden door een hoog stikstofgehalte.



Cluster analysis (single particle analysis)

Ca-rich Si-rich Cu-rich N-rich Fe-rich mixed minerals

Fig. 6.45: Het taartdiagram van de 6 verschillende clusters geeft een indicatie van de hoeveelheid stofdeeltjes per cluster. Elke cluster omvat stofdeeltjes met een karakteristieke samenstelling.

Het risico op mechanische schade veroorzaakt door stof op de Besloten Hofjes, wordt verhoogd door de aanwezigheid van minerale stofdeeltjes. Silicarijke deeltjes in het bijzonder, hebben een hoge hardheid. Dit bevordert abrasieve processen. Bij hoge vochtigheid kunnen minerale deeltjes, in het bijzonder calciumrijke deeltjes, microkristallijne calcietcement vormen (Brimblecombe et al., 2009). Dit cementatieproces zorgt voor een sterkere verbinding tussen de stofdeeltjes en het substraat, waardoor het verwijderen van het stof moeilijker wordt. De samenstelling van de minerale deeltjes die gevonden zijn in de Besloten Hofjes, wordt weergegeven in Fig. 6.46. De ternaire grafieken in Fig. 6.46 a) en b) tonen dat de siliciumrijke stofdeeltjes een lage hoeveelheid calcium en zwavel bevatten. Hun aluminiumgehalte is eveneens relatief laag. In de gemengde minerale deeltjes zien we een verdeling tussen siliciumrijke en calciumrijke deeltjes. Deze gemengde mineralen hebben een hoog zwavelgehalte en een gemiddeld silicium en calcium gehalte. De calciumrijke deeltjes, ten slotte, hebben een laag silicium- en aluminiumgehalte. De meest voorkomende calciumrijke deeltjes zijn carbonaten, sulfaten en nitraten. Stikstof werd echter niet gedetecteerd in de calciumrijke deeltjes, waardoor de bijdrage van nitraatrijke calciumdeeltjes als beperkt wordt ingeschat. Het koolstofgehalte van de stofdeeltjes kan niet eenduidig geïnterpreteerd worden door de invloed van het koolstofsubstraat. De calcium-tot-zwavel atoomverhouding is echter hoger dan 1.5 voor 25 van de 30 calcium-rijke deeltjes (Fig. 6.46 c)). Daardoor vermoeden we een belangrijke bijdrage van carbonaten.



Fig. 6.46: a-b) Ternaire grafieken die de drie clusters van mineraalrijke stofdeeltjes visualiseren; c) Spreidingsdiagram van zwavel en calcium voor de calciumrijke stofdeeltjes.

De gemengde minerale stofdeeltjes en de calciumrijke stofdeeltjes werden teruggevonden op alle bemonsteringslocaties in de drie bemonsterde Besloten Hofjes. De siliciumrijke deeltjes werden teruggevonden in alle stalen genomen in BH1, maar niet in de stalen genomen in BH2 en BH6. Hiervoor kunnen verschillende hypotheses gemaakt worden. Alle drie de Besloten Hofjes waren afgesloten met glas. Bij de start van het restauratieproject werden deze beschermglazen verwijderd. In BH2 en BH6 zat het glas bevestigd in een metalen frame. De verbinding tussen kast en glasframe was uitgevoerd in mastiek. Hierdoor werd een meer gesloten omgeving gecreëerd in deze Hofjes. Dit type bevestiging zorgde echter ook voor een moeilijkere verwijdering van het glas. Voor BH1 stond een glasplaat in een houten frame dat gemakkelijk kon verwijderd worden door twee deuvels weg te nemen. Dit houten frame zorgde voor een minder afgesloten geheel, met smalle openingen tussen het glasframe en de houten kast. Zijn de Besloten Hofjes ooit blootgesteld aan een omgeving met een hoge concentratie aan siliciumrijke deeltjes? Is BH1 meer geopend dan de andere twee Hofjes? Dit zijn vragen voor verder onderzoek. We verwachten niet dat de siliciumrijke stofdeeltjes afkomstig zijn van gedegradeerde glasfragmenten in de Hofjes zelf, zoals de glasparels. Als de stofdeeltjes van deze fragmenten afkomstig zouden zijn, zouden we ze voornamelijk op horizontale oppervlakken terugvinden. Hier werden de siliciumrijke deeltjes op oppervlakken in verschillende oriëntaties teruggevonden. Bovendien vertonen de glasfragmenten in BH2 en BH6 een sterkere degradatie dan de fragmenten in BH1.

IJzerrijke deeltjes staan erom bekend om de reactie van SO₂ naar H₂SO₄ te katalyseren (Camuffo et al., 1999). Bovendien toonde Grau-Bové et al. (2016) aan dat de aanwezigheid van transitiemetalen zoals koper en ijzer de degradatie van cellulosevezels aantast, en dus het risico op chemische schade verhoogt. Negen van de elf koperrijke deeltjes werden gedetecteerd op de basis van BH2. Deze basis is geschilderd in groen, waardoor het zeer waarschijnlijk is dat deze geanalyseerde deeltjes bestaan uit kleine afgeschilferde verffragmenten. In totaal werden maar 5 ijzerrijke deeltjes geanalyseerd, waardoor het moeilijk is hun bron te achterhalen.

De stikstofrijke deeltjes bestaan voornamelijk uit koolstof, zuurstof en stikstof met sporen van zwavel, natrium en calcium. Deze deeltjes hebben vermoedelijk een organische oorsprong. Het kunnen bijvoorbeeld kleine fragmenten van zijdevezels zijn, of huidschilfers. Biologische deeltjes zoals sporen hebben een gelijkaardige chemische samenstelling, maar deze deeltjes hebben vaak een karakteristieke morfologie. Stofdeeltjes met dergelijke morfologie zijn niet waargenomen. Bovendien werden er geen sporen van (historische) schimmelgroei op de Besloten Hofjes gedetecteerd. Zoals vermeld, is chemische degradatie vooral gelinkt aan de chemische samenstelling van de stofpartikels, maar ook hun hygroscopische eigenschappen. Eens een stofdeeltje zich op een erfgoedmateriaal heeft afgezet, zal het schadelijke effect van het stofdeeltje grotendeels afhangen van zijn hygroscopische eigenschappen. Water speelt een cruciale rol in degradatieprocessen in het algemeen, en bevordert vermoedelijk ook de chemische reacties tussen de stofdeeltjes en hun substraat. Ook het cementatieproces wordt bevorderd in aanwezigheid van hygroscopisch stof. Alle stofdeeltjes, zelfs de inerte, gedragen zich als condensatiekernen. Ze adsorberen vocht uit de omgeving waardoor het watergehalte aan het oppervlak verhoogt (Brimblecombe et al., 2009). Voor onoplosbare deeltjes zoals silicium, is de wateropname echter alleen significant in de extreme condities van oververzadigde damp. Wateroplosbare stofdeeltjes hebben daarentegen een vochtabsorptiecapaciteit en kunnen al een aanzienlijke wateropname hebben onder gematigde omstandigheden (Hinds, 1982). Deze oplosbare stofdeeltjes hebben een sterke affiniteit met water en hebben de mogelijkheid om water uit de omgeving op te nemen en vast te houden. Wanneer deze hygroscopische stofdeeltjes zich op een oppervlak hebben afgezet, zullen ze water aan het oppervlak aantrekken waardoor degradatieprocessen die bevorderd worden onder vochtige omstandigheden, worden versneld. Voorbeelden zijn oxidatieve degradatie van papier en textiel, corrosie van metaal, verkleuring van pigmenten enz. (Feller, 1994, Havlínová et al., 2009, Saunders and Kirby, 2004). De waterfilm die de hygroscopische stofdeeltjes aan het oppervlak creëren, zal bovendien makkelijker andere stofdeeltjes aantrekken en zo stofdepositie verhogen (Camuffo, 1998).

Om een inzicht te krijgen in de hygroscopische eigenschappen van het historische stof, zijn beperkte analyses uitgevoerd op twee stofstalen die tijdens de reinigingsbehandeling verwijderd zijn met een restauratiestofzuiger (555-MU-E HEPA) door de textielrestaurator Joke Vandermeersch (Fig. 6.47). De twee stofstalen van respectievelijk 0.03600 en 0.01789 gram zijn elk vermengd met 7 mL milli-Q water. De mengsels zijn krachtig geschud om de wateroplosbare fractie van het stof in oplossing te brengen. De onoplosbare fractie is vervolgens verwijderd door de stalen te filteren (poriediameter van 0.2 μ m). Vervolgens is de ionenoplossing geanalyseerd met een Ionenchromatograaf 833 Basic Plus (Metrohm, Antwerp, Belgium) voor zowel anionen als kationen. De ionenconcentraties zijn bepaald op basis van kalibratiecurves met standaardoplossingen in het bereik van 1 tot 20 ppm.



Fig. 6.47: Stofstalen die verwijderd zijn met een restauratiestofzuiger tijdens de reinigingsbehandeling.

Fig. 6.48 toont aan dat beide stofstalen ongeveer 7-8 gew.% wateroplosbare stofdeeltjes bevatten. Fig. 6.49 (links) geeft de gemeten ionenconcentraties in µgram per gram. Deze werden herberekend naar µequivalenten per gram (Fig. 6.49, rechts). Deze laatste eenheid geeft een beter inzicht in de chemische betekenis van de ionenconcentraties: één equivalent van een anion kan reageren met één equivalent van een kation. De resultaten van de analyse zouden een gelijke anionen en kationen concentratie moeten opleveren. Er is echter een duidelijk anionentekort. Dit wordt wel vaker geobserveerd, zeker in de fractie met grotere stofdeeltjes. Dit komt omdat carbonaten (CO_3^{2-}) niet worden gemeten, maar wel worden verwacht, zeker in de minerale stofdeeltjes. Dit bevestigt de resultaten van de individuele deeltjesanalyse waaruit bleek dat de calciumrijke stofdeeltjes vermoedelijk rijk zijn aan carbonaten. De ionenconcentraties zijn heel gelijkaardig in beide stofstalen, behalve voor ammonium, dat heel sterk aanwezig is in stofstaal 2. Sulfaten en nitraten zijn de meest voorkomende anionen. Voor de kationen zien we een hoge aanwezigheid van natrium, ammonium, kalium en calcium. De hygroscopische eigenschappen van het stof hangen af van het type zout dat in het stof aanwezig is. Hoewel de exacte zoutsamenstelling niet kan afgeleid worden uit de huidige analyses, geven we hier een aantal vochtigheidsgrensen die nodig zijn om een bepaald zout om te vormen tot een druppeltje. Dit is hun deliquentie relatieve vochtigheid (DRH). Calcium carbonaat (CaCO₃) heeft een DRH van 97% en is daarom weinig risicovol met betrekking tot zijn hygroscopische eigenschappen. Natrium chloride (NaCl) vormt druppeltjes bij een relatieve vochtigheid van ongeveer 75-78%, (NH₄)₂SO₄ bij 80-81% en NH₄NO₃ bij 61-62%. Sommige zouten hebben hele lage DRH's, zoals MgCl₂ (33%) (Anaf, 2014).



Fig. 6.48: Taartdiagrammen van de twee geanalyseerde stofstalen. Onderscheid in hun water onoplosbare en wateroplosbare fractie.



Fig. 6.49: Concentraties van de wateroplosbare ionen in de twee geanalyseerde stofstalen. Links: concentraties in µgram per gram. Rechts: concentraties in µequivalent per gram.

Om na te gaan in hoeverre de zichtbare stofdepositie kan gereinigd worden door de textielrestaurator, werd een origineel wijnblad voor de helft zorgvuldig gereinigd door Joke Vandermeersch (Fig. 6.50). Vervolgens werd dit wijnblad bestudeerd met de elektronenmicroscoop bij laag vacuum condities (ESEM, QUANTA 250 FEG, FEI, Hillsboro, Oregon, USA). Fig. 6.51 en 6.52 geven impressies van de zijdevezels zonder en met reiniging, respectievelijk. Het is duidelijk dat de reiniging een zeer groot deel van de stofpartikels heeft verwijderd. Toch blijven er nog heel wat kleine stofdeeltjes aanwezig op de zijdevezels (< 5 μ m). Het gemak waarmee stofdeeltjes kunnen verwijderd worden, is afhankelijk van hun grootte. Kleine stofdeeltjes (< 2 µm) zitten in de grootteorde van de oppervlakteruwheid van materialen. Daarom hebben deze deeltjes in verhouding een groot contactoppervlak. Dit vertaalt zich in hogere adhesiekrachten. Daardoor worden van der Waals krachten veel belangrijker in vergelijking tot externe krachten zoals luchtverplaatsing. Bovendien worden de kleine stofdeeltjes ook 'beschermd' door de oppervlakteruwheid. Hierdoor zijn kleine stofdeeltjes veel moeilijker te verwijderen tijdens een reinigingsbehandeling in vergelijking met grote stofdeeltjes (Hinds, 1982, Kildeso et al., 1999, Kontozova-Deutsch, 2007). Op de secundaire elektronenbeelden is ook te zien dat dieper gelegen zijdevezels moeilijker te reinigen zijn. Op basis van visuele observatie zien we dat het stoffige/vuile uitzicht sterk gereduceerd wordt na reiniging. Er is echter nog steeds stof zichtbaar. Dieper gelegen delen zijn moeilijker te reinigen, waardoor ook grotere stofdeeltjes achterblijven.



Fig. 6.50: Origineel wijnblad, waarvan de onderste helft werd gereinigd door de bevoegde textielrestaurator.



Fig. 6.51: Secundaire elektronenbeelden (laag vacuum) van de ongereinigde helft van het originele wijnblad.



Fig. 6.52: Secundaire elektronenbeelden van het originele wijnblad na reiniging.

Hoewel de droge reiniging relatief effectief blijkt, mag het schadelijke effect van deze reinigingsmethode niet onderschat worden. Een belangrijke fractie van verwijderd stof werd geïdentificeerd als losgekomen (zijde)vezels (Fig. 6.53). Dit bevestigd opnieuw de zeer fragiele toestand van het zijde. Deze zijdevezels kunnen al afgebroken zijn in het verleden, maar kunnen ook gebroken zijn tijdens de reinigingsbehandeling. Het is namelijk bijna onmogelijk om sterk gedegradeerd zijde te reinigen zonder bijkomend materiaalverlies (MEMORI, 2013).



Fig. 6.53: Secundaire elektronenbeelden van het stof verwijderd met de restauratiestofzuiger. Merk de grote hoeveelheid aan (zijde)vezels op.

De Besloten Hofjes zijn tijdens hun restauratiebehandeling helemaal gereinigd. Hoe kunnen we ze nu beschermen van toekomstige stofdepositie tijdens hun permanente tentoonstelling? Een veel gebruikte oplossing zou zijn om ze tentoon te stellen in luchtdichte tentoonstellingskasten. Door de luchtdichtheid worden verschillende externe invloeden zoals een incorrecte of fluctuerende relatieve vochtigheid, externe polluenten en stof afgeblokt (Thickett et al., 2005). Polluenten die in de tentoonstellingskast worden gegenereerd, kunnen echter niet ontsnappen en kunnen zorgen voor zeer hoge pollutieconcentraties in de tentoonstellingskast. Bronnen van interne polluenten kunnen de materialen zijn die gebruikt zijn voor de tentoonstellingskast. Door echter geschikte materialen te gebruiken, kan deze bron vermeden worden. Een andere mogelijke bron zijn de Besloten Hofjes zelf. Eikenhout, gebruikt voor de kasten, is bijvoorbeeld een bekende bron voor azijn- en mierenzuur (Gibson and Watt, 2010). Deze polluenten kunnen de degradatie van andere materialen van de Besloten Hofjes beïnvloeden en versterken. Het is geweten dat off-gassing van materialen vermindert doorheen de tijd, maar er is een gebrek aan gepubliceerde data rond de emissiesnelheid van eik op lange termijn. Daarom is een experiment uitgewerkt om proefondervindelijk na te gaan of er nog substantiële off-gassing is van de materialen in de Besloten Hofjes zelf.

Voor dit experiment werd BH3 in een luchtdichte doos geplaatst (Fig. 6.54). De doos werd vervaardigd uit lexaanplaat (polycarbonaat), een materiaal met verwaarloosbare gasemissie. De verschillende zijden werden vastgezet met kleine winkelhaakjes. Om de box zo luchtdicht mogelijk te maken, werd aluminium tape gebruikt. Hiervoor werd 'self-adhesive frame sealing tape' gebruikt (Lineco, archive quality). Voor de stabiliteit van de box werd over deze tape nog een extra aluminium tape aangebracht die niet zuurvrij is (Brico). De luchtdichtheid van de box werd op voorhand getest. Een AER van 0.02 luchtverversingen per dag werd gemeten. De box werd op maat gemaakt van BH3, zodanig dat het lege volume van de box beperkt is. Het luchtvolume was ongeveer 150% het volume van het Besloten Hofje. Het experiment werd uitgevoerd in het restauratieatelier in het Hof van Busleyden, Mechelen. Op aanraden van de conservator, werd mousse tegen het Hofje geplaatst, zodat het niet kon bewegen of omvallen. Deze mousse was aanwezig in het restauratieatelier.

Zowel in de doos als buiten de doos werden telkens drie Radiello diffusiebuisjes geplaatst voor NO₂ en SO₂ (Fondazione Salvatore Maugeri, Padova, Italy). Met deze diffusiebuisjes is het ook mogelijk om mieren- en azijnzuur te meten (Kontozova-Deutsch et al., 2008). Er werd gedurende 2 weken bemonsterd. Het experiment werd nadien herhaald met dezelfde doos, maar zonder Besloten Hofje. De mousse gebruikt om het Hofje te ondersteunen, werd wel in de doos gelaten. Het experiment met BH3 werd uitgevoerd in de periode 20/12/2016 tot en met 03/01/2017. Het blanco experiment (lege doos met mousse) werd uitgevoerd in de periode 03/01/2017 tot en met 17/01/2017. Na bemonstering werden de diffusiebuisjes geanalyseerd met ionenchromatografie (833 Basic Plus, Metrohm, Antwerpen, België). Formaat en acetaat werden geanalyseerd volgens de methode van Kontozova-Deutsch et al. (2008) en Stranger et al. (2009).



Fig. 6.54: Experimentele setup van de luchtdichte doos met BH3. Drie diffusiebuisjes werden in en op de doos geplaatst om de hoeveelheid off-gassing van dit Hofje te bepalen.



Fig. 6.55: Concentraties mierenzuur en azijnzuur in de afgesloten box en het restauratieatelier. Links wordt de vergelijking gemaakt tussen de box met Hofje en het restauratieatelier (zelfde meetperiode). Rechts wordt de vergelijking gemaakt tussen de lege box met mousse en het restauratieatelier (zelfde meetperiode).

Fig. 6.55 toont de gemeten concentraties voor mieren- en azijnzuur in de verschillende testopstellingen. Merk op dat de mousse, die ook in de lege box lag, beide gassen emitteert. Door echter een vergelijking te maken tussen de concentraties in de box met het Besloten Hofje, de lege box (met mousse) en de achtergrondconcentraties in het restauratieatelier, kunnen we besluiten dat de emissies van mieren- en azijnzuur, afgegeven door het Besloten Hofje, zeer beperkt zijn. Dit resultaat wordt bovendien bevestigd door een lange termijn 'test' die onbewust is uitgevoerd bij BH3. De beschermende beglazing die bij dit Hofje was gebruikt, was gemaakt van glas-in-lood raampjes. Lood is gekend omwille van zijn hoge reactiviteit voor vluchtige organische componenten zoals azijn-en mierenzuur. Deze gassen leiden tot een verhoogde loodcorrosie, waarbij het proces wordt versneld bij hoge relatieve vochtigheid (Tétreault et al., 1998). Het lood vertoont echter geen gevorderde staat van corrosie, zelfs niet aan de binnenzijde die blootgesteld stond aan de kast.

6.5 Ongedierte

Vanuit de risicoanalyse weten we dat de schadefactor 'ongedierte' vooral een impact zal hebben op de materialen hout en textiel (Fig. 6.56).



Fig. 6.56: Risico ten opzichte van ongedierte per materiaaltype, zonder rekening te houden met de omgevingsfactor.

Tijdens de restauratiebehandeling zijn verschillende sporen van oude aantasting van ongedierte opgemerkt (Fig. 6.57). In het hout zitten oude aantastingen van houtboorders. In het textiel zijn verschillende vervellingen of insectenlijkjes teruggevonden, o.a. van het wolbeertje.



Fig. 6.57: Sporen van ongedierte die tijdens de restauratiebehandeling naar boven zijn gekomen.

Er werd geen actief ongedierte aangetroffen in de Besloten Hofjes. Indien de Hofjes onder goede condities bewaard worden, kunnen nieuwe aantastingen vermeden worden. Hiervoor kan een de IPM-methodologie ('Integrated Pest Management') gevolgd worden (Fig. 6.58). Een dergelijke geïntegreerde bestrijding moet vanuit de volledige museumcollectie bekeken worden, en is daarom in het kader van dit onderzoek niet uitgewerkt. Voor meer informatie over deze strategie verwijzen we door naar Brokerhof et al. (2003).

Doordat de Besloten Hofjes in luchtdichte vitrines zullen tentoongesteld worden, onder gecontroleerde klimatologische omstandigheden, wordt de kans op aantasting sowieso gereduceerd.



Fig. 6.58: Schematische weergave van een 'Integrated Pest Management' (IPM).

6.6 Display

Binnen het kader van dit Comhaire project heeft de firma Meyvaert een vitrine ter beschikking gesteld om een aantal experimenten in uit te voeren. Deze vitrine bestaat uit een technische ruimte met daarboven een glazen klok (Fig. 6.59). Er zijn twee LED-lampen aanwezig waarvan de bron zich in de technische ruimte bevindt. De volgende binnenmaten van de vitrine zijn gebruikt in simulaties en berekeningen: 58 x 32 x 32 cm (hoogte x breedte x diepte), met een bijhorend volume van 0.06 m³. Deze vitrine wordt verder in dit verslag benoemd als 'testvitrine'.



Fig. 6.59: Fragment uit de technische tekening van de testvitrine (©Meyvaert).

6.6.1 Air Exchange Rate

De 'air exchange rate' (AER) van een vitrine is een maat die het aantal luchtverversingen per tijdseenheid binnen de vitrine weergeeft. Deze parameter beïnvloedt de goede werking van een vitrine op verschillende vlakken. Zo zal de effectiviteit van de vitrine om de relatieve vochtigheid te bufferen, veel groter zijn bij een lage AER dan bij een hoge AER. Daarnaast vormt een vitrine met lage AER ook een betere barrière tegen externe polluenten (NBN, 2014, Thickett et al., 2005, Thickett et al., 2007). Toch is een lage AER niet altijd gewenst, bijvoorbeeld bij de aanwezigheid van een interne pollutiebron. Dit kan het materiaal zijn waarmee de vitrine is opgebouwd, maar evengoed het tentoon te stellen object zelf. In een vitrine met een lage AER zal in deze gevallen een opstapeling van schadelijke gassen ontstaan (Schieweck, 2009, Thickett et al., 2005, Gibson and Watt, 2010).

De AER van de testvitrine is bepaald door een hoeveelheid CO_2 in de vitrine te injecteren, en vervolgens de afname in CO_2 -concentratie (C_{int}) te meten in functie van de tijd (Calver et al., 2005, Raphael, 2005, Padfield, 2014). Omdat CO_2 ook aanwezig is in de atmosfeer, is vlak voor het uitvoeren van de AER-test de CO_2 -concentratie buiten de vitrine (C_{ext}) opgemeten gedurende minimum 15 minuten.

De CO₂ concentratie is gemonitored met een OPUS 20 TCO CO₂ datalogger (Lufft, Fellbach, Duitsland) met een meetinterval van 1 minuut. De CO₂ injectie is gebeurd met een Airchamp CO₂-pomp (SKS, Sundern, Duitsland). Het experiment is driemaal herhaald om statistische verwerking mogelijk te maken. Bovendien kunnen externe omstandigheden de AER-meting beïnvloeden, waardoor het aangewezen is om verschillende malen (en indien mogelijk) langere periodes (> 24 uur) te meten (Calver et al., 2005, Thickett et al., 2005). Voor de AER-bepaling van deze testvitrine is steeds meer dan 2,5 dagen gemeten per test.

Onderstaande vergelijking (6.3) geeft de berekening weer van de AER, met *N* het aantal luchtverversingen per dag, C_{int}^{t0} de CO₂ concentratie in de vitrine bij aanvang van de test (ppm), C_{ext} de CO₂ concentratie in de ruimte rondom de vitrine (ppm), C_{int}^{t1} de CO₂ concentratie in de vitrine aan het einde van de test (ppm), t^0 de starttijd (dagen), t^1 de eindtijd (dagen), en *In* het natuurlijk logaritme (Calver et al., 2005).

$$N = \frac{\ln(C_{int}^{t_0} - C_{ext}) - \ln(C_{int}^{t_1} - C_{ext})}{(t^1 - t^0)}$$
(vgl. 6.3)

Fig. 6.60 toont de verwerking van de data visueel. Links is de afname van de CO_2 -concentratie te zien. De groene curve toont het verval zoals opgemeten, terwijl bij de zwarte curve de CO_2 -concentratie van buiten de vitrine is afgetrokken. Rechts worden het natuurlijk logaritme van de CO_2 -concentratie getoond voor de 3 AER-testen. De richtingscoëfficiënt van de trendlijn geeft de AER weer. De AER van deze vitrine werd bepaald op 0.55 ± 0.07 luchtverversingen per dag.



Fig. 6.60: AER-metingen in de vitrine. Links: afname van de CO₂ concentratie. Rechts: natuurlijk logaritme van de CO₂ concentratie met lineaire trendlijn. De richtingscoëfficiënt van deze trendlijn geeft de AER weer.

6.6.2 Bufferende werking vitrine: verschillende scenario's

De bufferende werking van een vitrine is een belangrijk aspect. Vitrines met een lage AER kunnen ervoor zorgen dat een kunstobject beschermd is van sterk fluctuerende omgevingsfactoren. Doordat veel kunstobjecten hygroscopisch zijn, is vooral de vochtigheid hierin een cruciale parameter. Deze dient zo constant mogelijk gehouden te worden rond een specifiek setpoint om het risico op mechanische schade minimaal te houden. Voor veel materialen ligt dit setpoint tussen 40-60% (Serota, 2014, ASHRAE, 2011).

De term 'buffer' wordt gebruikt voor elk materiaal dat veranderingen in RH (deels) kan opvangen (Thomson, 1986). Hygroscopische materialen zoals hout, papier, textiel enz. zullen vocht opnemen of afgeven aan de omgeving tot ze een evenwichtssituatie bereiken. Dit gedrag wordt samengevat in evenwichtsvochtgehalte (equilibrium moisture content, EMC) curves. Deze curves tonen de gewichtstoename van een materiaal bij verschillende relatieve vochtigheden (Fig. 6.61a). Dit gedrag zorgt ervoor dat deze hygroscopische materialen fungeren als buffers. De buffercapaciteit van een bepaald materiaal kan uit de EMC-curves afgeleid worden door de 1^{ste} afgeleide te bepalen. Fig. 6.61b toont de buffercapaciteit voor hout, cellulose, zijde, perkament, en ArtSorb. Dit laatste materiaal is een soort silicagel dat specifiek ontwikkeld is om het vochtgehalte in vitrines te regelen. Zoals blijkt uit Fig. 6.61b is de buffercapaciteit afhankelijk van het relatieve vochtigheidsgebied. Zo zal ArtSorb optimaal werken rond 60-75% RH. De andere materialen hebben vooral een goede buffercapaciteit in het hogere RH-bereik.



Fig. 6.61: a) EMC-curves en b) buffercapaciteit van ArtSorb, hout, zijde, cellulose en perkament. Gebaseerd op EMC-curves uit de literatuur (TIS, 2012-2017, Padfield, s.d.-a, Popescu et al., 2015, Padfield, s.d.-b, Weintraub, 2002)

De nodige hoeveelheid bufferend materiaal kan berekend worden met volgende vergelijking 6.4 (Weintraub, 2002, Thickett et al., 2013):

$$m = \frac{C_{eq} V n D t}{B_H F} \tag{vgl. 6.4}$$

waarbij:

m = nodige buffermassa [kg]

 C_{eq} = concentratie waterdamp bij 100% RH luchtvochtigheid en vitrinetemperatuur [g m⁻³]

V = volume van de vitrine [m³]

n = AER van de vitrine [luchtverversingen per dag]

D = decimale verschil in RH tussen de vitrine en de ruimte rondom (bv. als de gemiddelde RH_{ruimte} = 60% en de gemiddelde RH_{vitrine} = 41%, dan is D = 0.19) [geen eenheden]

 B_H = specifieke buffercapaciteit [g kg⁻¹ %RH⁻¹] (zie Fig. 6.61b)

F = gewenste bereik van RH fluctuaties (bv. als ± 5% fluctuaties toegestaan zijn, is F = 10) [geen eenheden]

t = maximum aantal dagen dat de vitrine binnen de vooropgestelde RH range moet blijven [dagen]

In de vitrine zijn verschillende situaties gesimuleerd waarbij de temperatuur (T) en de relatieve vochtigheid (RH) zijn gelogd met een meetinterval van 30 minuten. Hiervoor zijn Hanwell ML4000RHT loggers (IMC group, Letchworth, Hertfordshire, UK) gebruikt. De T-sensor heeft een bereik van -20 tot 60°C met een accuraatheid van ± 0.3°C. De RH-sensor heeft een bereik van 10 tot 90% met een accuraatheid van ± 3%. Er werd telkens een logger in en buiten de vitrine geplaatst. Voor de validatie van de resultaten zijn beide loggers naast elkaar geplaatst en aan dezelfde condities blootgesteld. De twee loggers geven vergelijkbaar resultaat (T-T en RH-RH scatterplots met richtingscoëfficiënt 0.98) (Fig. 6.62). Logger 1 is steeds in de vitrine geplaats, terwijl logger 2 de ruimte rondom de vitrine gemonitord heeft. Deze ruimte wordt verder aangeduid als 'bureau' of 'ruimte rondom de vitrine'.



Fig. 6.62: Vergelijking van de twee Hanwell T en RH dataloggers die in deze studie zijn gebruikt.

6.6.2.1 Intrinsieke buffering

In eerste instantie werd gedurende twee maanden een lege vitrine gemonitord om na te gaan of de vitrine op zich al een bufferende werking heeft door de lage AER (0.55 ± 0.07 luchtverversingen per dag). Fig. 6.63 toont de temperatuur en de relatieve vochtigheid over tijd.



Fig. 6.63: T en RH in en uit lege vitrine.

De temperatuur in de vitrine is zeer gelijkaardig aan de temperatuur buiten de vitrine. De shift op de data is te wijten aan de plaatsing van de logger buiten de vitrine (enkele meters van de vitrine vandaan) (T-T scatter plot met rico 1.04). De sterke RH-fluctuaties buiten de vitrine worden deels gebufferd in de vitrine. In de vitrine zien we RH-fluctuaties die negatief gecorreleerd zijn aan de temperatuur.

Voor zowel de temperatuur als de relatieve vochtigheid, zijn de dagelijkste fluctuaties berekend met volgende vergelijking 6.5 (Martens, 2012):

$$\Delta X_{dag,i} = \max(X_{i-n}, X_{i-n+1}, \dots, X_i) - \min(X_{i-n}, X_{i-n+1}, \dots, X_i)$$
(vgl. 6.5)

waarbij:

 $\Delta X_{dag,i}$ = de verandering in T [°C] of RH [%] over 24 uur X = T [°C] of RH [%] n = het aantal datapunten in één dag i = het datapunt in het databereik

In de ruimte rondom de vitrine zijn gemiddelde dagelijkse T-fluctuaties van 1.7 ± 0.8 °C. In de vitrine zelf komen gelijkaardige fluctuaties voor: 1.9 ± 0.8 °C. De dagelijkse RH-fluctuaties in de ruimte zijn gemiddeld 5.6 ± 2.9 %. In de vitrine zijn deze beperkt tot gemiddeld 4.8 ± 2.1 % met maxima van 4.9%.

Met de *CCI-relative humidity calculator* is een simulatie gemaakt voor deze vitrine (Fig. 6.64-6.65). Tabel 6.7 geeft een overzicht van de invoergegevens. Uit de simulaties blijkt dat een vitrine met een AER van 0.55 luchtverversingen per dag zonder bufferend materiaal de RH-curve van buiten de vitrine sterk volgt (Fig. 6.64). Enkel uitschieters (zeer snelle RH-fluctuaties) worden deels gebufferd. Om een gelijkaardig resultaat te verkrijgen zoals de RH-data die gemonitord werd in de testvitrine (Fig. 6.63), moet een bufferend materiaal in rekening gebracht worden (Fig. 6.65). In de simulator werd een hoeveelheid buffermateriaal van 2.5 kg hout ingegeven. Dit blijkt een goede overeenkomst te geven met het dagelijks voortschrijdend gemiddelde van de meting in de vitrine (Fig. 6.63). De simulator houdt echter geen rekening met temperatuurfluctuaties, waardoor het bijkomende dag-nachtpatroon in de gemonitorde data niet gereproduceerd kan worden.

Parameter	Simulatie zonder buffermateriaal (Fig. 6.64)	Simulatie met buffermateriaal (Fig. 6.65)					
AER	- 2 luchtverversingen per dag (blauwe curve)						
	 - 0.55 luchtverversingen per dag (groene curve) = AER van de geteste vitrine 						
RH buiten vitrine	RH data gelogd buiten de vitrine gedurende 2 maanden (cf. Fig. 6.63)						
RH in vitrine bij start	47.2 %						
Vochtbuffer: oppervlak	Geen	Geen					
Vochtbuffer: bulk	Geen*	Hout met een massa van 2.5 kg. Dit					
		materiaal is –naast ArtSorb- voorlopig de					
		enige optie die kan geselecteerd worden.					
		De massa is geschat op basis van het					
		resultaat van de simulatie, opdat deze zo					
		goed mogelijk overeenkomt met Fig. 6.63.					

Tabel 6.7: Invoergegevens voor de CCI RH-simulatie zonder en met buffermateriaal.

*Door een bug in deze calculator was het niet mogelijk om 'no bulk buffer material' te selecteren. Daarom is hier Silica gel geselecteerd met een verwaarloosbare 'fraction of volume with bulk buffer' van 0.01%.



Fig. 6.64: CCI RH-simulatie zonder buffermateriaal*.



Fig. 6.65: CCI RH-simulatie met buffermateriaal.



Fig. 6.66: RH in en uit lege vitrine (idem als Fig. 6.63, maar met zelfde schaal op de y-as als Fig. 6.65).

Veronderstel dat een RH tussen 45 en 55% gewenst is in de vitrine. Vanuit de T en RH gegevens kunnen we nu nagaan of er moet bevochtigd of ontvochtigd worden en hoeveel water hiervoor nodig is. Fig. 6.67 plot de absolute vochtigheid (AH) in de tijd gedurende de meetperiode. De grijze invulling toont het gebied met de gewenste vitrinecondities: 45-55% RH. Fig. 6.68 toont wanneer en hoeveel water nodig is om in dit bereik te blijven. Onder de geteste condities, is er weinig bevochtiging nodig, met een maximum van 0.05 gram water per 30 minuten.



Fig. 6.67: Absolute vochtigheid in vitrine (groene curve). De grijze invulling geeft de range weer tussen 45-55%, gebaseerd op temperatuur in de vitrine.



Fig. 6.68: Hoeveelheid waterdamp nodig om in de vitrine binnen het bereik van 45-55% te blijven (volume vitrine = 0.06 m^3).

6.6.2.2 Papier als bufferend materiaal

Vanuit de gemonitorde data in de lege vitrine, is berekend hoeveel papier (cellulose) nodig is om de vitrine te bufferen. Hiervoor is volgende input gebruikt:

 $C_{eq} = 18.23 \text{ g m}^{-3}$ $V = 0.06 \text{ m}^{3}$ n = 0.55 luchtverversingen per dag D = 0.09 $B_{H} = 1.3 \text{ g kg}^{-1} \% \text{RH}^{-1}$ (50% RH) F = 10t = 40 dagen

Hieruit volgt dat ongeveer 166 gram cellulose nodig is voor een goede bufferende werking. In totaal werden 5 vellen tekenpapier met een totale massa van 165 gram in de vitrine geplaatst (Fig. 6.69). Het experiment werd tweemaal herhaald: één keer in de winterperiode waarbij de verwarming in de ruimte rondom de vitrine de overhand heeft (Fig. 6.70), en één keer in de zomerperiode waarbij de buitentemperatuur de temperatuur in de omgevende ruimte controleert (Fig. 6.71). In de winterperiode werd het papier eenmalig bevochtigd door er enkele druppels water op aan te brengen. De gemiddelde RH in de vitrine werd hierdoor bijgesteld, maar neemt geleidelijk aan weer af.

De beperkte fluctuaties in de RH worden vermoedelijk veroorzaakt door T-fluctuaties in de vitrine. In de winterperiode is de gemiddelde dagelijkste T-fluctuatie in de vitrine 1.9 ± 0.9 °C, wat leidt tot een gemiddelde dagelijkste RH-fluctuatie van 0.7 ± 0.3 % met maxima van 1.5%. In de zomerperiode is er een gelijkaardige T-fluctuatie van 1.9 ± 0.5 °C, die gepaard gaat met iets grotere dagelijkse RH-fluctuaties van 1.2 ± 0.3 % met maxima van 2.1%.


Fig. 6.69: Plaatsing van 165 gram tekenpapier in de vitrine.



Fig. 6.70: T en RH in en uit de vitrine, gevuld met 165 gram papier (winterperiode). (Logger 'bureau' enkele meters van vitrine.)



Fig. 6.71: T en RH in en uit de vitrine, gevuld met 165 gram papier (zomerperiode). (Logger 'bureau' op vitrine.)

6.6.2.3 Hout als bufferend materiaal

In deze test werd een rechthoekige houtblok met een massa van 482 gram in de vitrine geplaatst. Volgens de berekening voor bufferende massa (formule 3.1), is dit bijna 4 keer meer dan nodig. (Er werd dezelfde input gekozen als voor papier, met een aanpassing van $B_H = 1.7$). Het experiment werd in de winterperiode uitgevoerd. Dit uit zich duidelijk in de temperatuurgrafiek (Fig. 6.72) met dagelijkse opwarming, die beperkt is in de weekends en tijdens de kerstperiode. In de vitrine wordt een gemiddelde RH van 45% bereikt. De grote RH-fluctuaties van de ruimte worden goed gedempt. De RH-fluctuaties in de vitrine worden veroorzaakt door de T-fluctuaties. Dit is duidelijk te zien bij een vergelijking van de periode oktober-november en de kerstperiode (24/12/2016 t.e.m. 02/01/2017).

De gemiddelde T-fluctuatie in de vitrine is 2.1 ± 1.1 °C, met een gemiddelde RH-fluctuatie van $2.6 \pm 1.2\%$ met maxima van 7.1%.



Fig. 6.72: T en RH in vitrine, gevuld met houtblok

6.6.2.4 ArtSorb als bufferend materiaal

ArtSorb is een type silicagel dat geschikt is voor vochtigheidscontrole in vitrines. Doordat er in de vitrine geen apart compartiment voorzien is voor silicagel, is een grote ArtSorb cassette (1050 gram bij 50%) in de vitrine zelf geplaatst. De cassette was geconditioneerd bij 50% RH (ingepakt aangeleverd door de firma Meyvaert). De hoeveelheid ArtSorb is volgens de berekeningen 15 keer meer dan nodig (input idem als bij papier, behalve $B_H = 6.6$ en D = 0.19). Theoretisch zou deze hoeveelheid silicagel de vitrine kunnen conditioneren gedurende 600 dagen.

In de resultaten (Fig. 6.73) zien we hetzelfde patroon terugkeren: de temperatuur in de vitrine komt sterk overeen met deze buiten de vitrine. De RH fluctuaties van de ruimte worden goed gedempt. Daarnaast zorgt de ArtSorb voor een hoger gemiddelde RH in de vitrine (56%, hoger dan de aangegeven waarde van conditionering) dan buiten de vitrine (37%). Doordat de gemiddelde RH in de vitrine in evenwicht zal komen met deze van buiten de vitrine, daalt de gemiddelde RH in de vitrine na verloop van tijd. Na 64 dagen is het dagelijks voortschrijdend gemiddelde in de vitrine licht gezakt van 57.1% naar 54.5%.

Opnieuw zijn in de RH-curve fluctuaties aanwezig die gelinkt zijn aan de T-fluctuaties. Tijdens de weekends is de opwarming in de omgeving beperkt, waardoor ook de opwarming in de vitrine gelimiteerd is. Tijdens deze korte periodes zijn ook de RH-fluctuaties beperkt. De gemiddelde dagelijkse T-fluctuaties in de vitrine zijn 2.4 ± 0.9 °C. De gemiddelde RH-fluctuaties zijn $4.4 \pm 1.5\%$, met maximale fluctuaties van 7.4%.



Fig. 6.73: T en RH in en uit vitrine, gevuld met grote cassette Artsorb (50%)

Voor sommige erfgoedobjecten wordt een hoge RH-setpoint in de vitrine gevraagd (bv. 70-75%). Dit is bijvoorbeeld nodig wanneer een kunstwerk uit een kerk naar een museale omgeving wordt overgeplaatst voor een tijdelijke tentoonstelling. Omdat het object aangepast is aan zijn historisch klimaat, dat in kerken over het algemeen vochtig is, zou het kunstwerk een RH-shock krijgen wanneer het zonder voorzorgsmaatregelen in een museum met RH van 50% wordt geplaatst.

Om na te gaan hoe lang ArtSorb op hoge RH condities blijft, zijn 2 kleine ArtSorbcassettes geconditioneerd op 75%. Eén kleine ArtSorb cassette heeft een massa van 570 gram bij 50% RH, dus in totaal is er een massa van 1140 gram ArtSorb aanwezig. Na 75 dagen is de gemiddelde dagelijkse RH gezakt van 73.0% naar 66.3% (Fig. 6.74).

De gemiddelde dagelijkste T-fluctuaties in de vitrine zijn 2.0 ± 0.5 °C. De gemiddelde RH-fluctuaties zijn $3.5 \pm 0.8\%$, met maximale fluctuaties van 5.2%.



Fig. 6.74: T en RH in en uit vitrine, gevuld met twee kleine cassettes Artsorb (geconditioneerd op

6.6.2.5 Zoutoplossing

Alle vorige geteste buffermaterialen zijn vaste stoffen. Verzadigde zoutoplossingen kunnen echter ook gebruikt worden om in een afgesloten ruimte de vochtigheid te controleren (O'Brien and M.A., 1948). Daarom is een open bokaal (diameter = 7.5 cm) met een verzadigde NaCl-zoutoplossing in de vitrine geplaatst. Voor zuiver NaCl ligt het RH-setpoint op 76-77%. In dit experiment is keukenzout gebruikt, met een iets lager RH-setpoint. De gemiddelde T-fluctuaties in de vitrine is 2.4 \pm 0.8°C, met een gemiddelde RH-fluctuatie van 7.1 \pm 2.2% (maxima van 10.7%) (Fig. 6.75). De grote RH-fluctuaties in de vitrine zijn vermoedelijk te wijten aan het beperkte contactoppervlak tussen de zoutoplossing en de lucht in de vitrine. (De toepassing van zoutoplossingen in erfgoedcontext is niet aangewezen, omdat kleine zoutpartikels op de objecten terecht kunnen komen en daar schade kunnen veroorzaken.)



Fig. 6.75: T en RH in en uit vitrine, met een open bokaal met een verzadigde NaCl-oplossing.

6.6.2.6 Thermische massa

In gebouwdesign wordt gebruik gemaakt van 'thermische massa'. Dit is materiaal dat warmte kan opslaan om zo temperatuurfluctuaties te bufferen. Wanneer de omgevingstemperatuur hoger is dan de temperatuur van de thermische massa, zal deze warmte absorberen. Als de omgevingstemperatuur daalt, zal de thermische massa geleidelijk aan weer warmte afgeven. Geschikte materialen voor thermische massa hebben een hoge specifieke warmtecapaciteit en een hoge densiteit.

In dit experiment zijn vier bakstenen in de vitrine geplaatst (Fig. 6.76). Bakstenen hebben een iets lagere specifieke warmtecapaciteit dan beton. De gebruikte bakstenen zijn echter heel poreus, waardoor hun densiteit niet optimaal is. Exacte waarden voor de specifieke warmtecapaciteit en densiteit van deze bakstenen zijn niet gekend.

De gemiddelde T-fluctuaties in de ruimte rondom te vitrine is 2.7 ± 0.9 °C, terwijl de gemiddelde T-fluctuaties in de vitrine 2.4 ± 0.7 °C zijn. Dit verschil ligt binnen de meetfout van de loggers. De RH in de vitrine wordt wel (beperkt) gebufferd, met een gemiddelde RH-fluctuatie van $5.0 \pm 1.3\%$ (maxima van 7.7%) (Fig. 6.77).

De gebruikte bakstenen hebben dus geen significant bufferend effect voor de T-fluctuaties rondom de vitrine. Bijkomende experimenten moeten uitgevoerd worden om na te gaan of bijvoorbeeld vitrines die voor een groot oppervlaktepercentage uit beton bestaan, wel een bufferende werking hebben.



Fig. 6.76: experiment met thermische massa in de vitrine (4 bakstenen).



Fig. 6.77: T en RH in en uit vitrine, met thermische massa in de vitrine (4 bakstenen).

6.6.2.7 Boxplots verschillende scenario's

Fig. 6.78 en 6.79 geven een vergelijkend overzicht van de verschillende scenario's aan de hand van boxplots van de temperatuur en relatieve vochtigheid. Zoals reeds is gebleken uit voorgaande secties, neemt de lucht in de vitrine zeer snel de temperatuur over van deze in de ruimte rondom de vitrine. Er is geen bufferende werking te zien. Voor de relatieve vochtigheid is er wel een duidelijke bufferende werking: fluctuaties worden in min of meerdere mate beperkt in de vitrine. Daarnaast kan ook de gemiddelde RH in de vitrine relatief gemakkelijk aangepast worden.

Vermoedelijk gedraagt papier zich hier als de beste buffer door het grote contactoppervlak en de beperkte dikte van het materiaal. Hierdoor zal het volledige materiaal zich relatief snel aanpassen aan de fluctuerende temperatuur. Het vochtgehalte van bijvoorbeeld een dikke houtblok zal zich veel trager aanpassen en zal vermoedelijk geen evenwicht vinden bij de dagelijkse fluctuaties (Thomson, 1986). Het kleinste contactoppervlak is vermoedelijk dat bij de verzadigde NaCl-oplossing. Deze komt dan ook naar voor als de minst effectieve buffer.



Fig. 6.78: Boxplots van de temperatuur voor de verschillende situaties.



Fig. 6.79: Boxplots van de relatieve vochtigheid voor de verschillende situaties.

6.6.3 Invloed interne belichting op hygrothermische eigenschappen

De vitrine heeft LED-verlichting, waarvan de bron zich in de technische ruimte onderin de vitrine bevindt. Om na te gaan of het aanzetten van de belichting een invloed heeft op de hygrothermische eigenschappen in de vitrine, is de T en RH gedurende 14 dagen gelogd, waarbij de LED-lampen continue hebben gebrand. Zelfs na deze periode van continue inschakeling van de lampen, is geen significante temperatuursstijging waar te nemen in de vitrine (Fig. 6.80).



Fig. 6.80: T in en uit vitrine, met continue LED-verlichting.

6.6.4 (Fijn) stof, pollutie en licht

Om de effectiviteit van de vitrine te testen in het afblokken van stofdepositie, is een eenvoudig experiment uitgevoerd. Tien microscoopglaasjes zijn nauwgezet gereinigd met een microvezeldoek. Vervolgens zijn glansmetingen uitgevoerd onder een hoek van 85° met een micro-TRI-gloss (BYK Gardner, Geretsried, Duitsland). Nadien zijn vijf glaasjes in de vitrine en vijf glaasjes op de vitrine geplaatst. De test werd tweemaal herhaald: in de periode 07/07/2016 tot en met 21/09/2016 (test 1) en in de periode 21/09/2016 tot en met 09/01/2017 (test 2). Na blootstelling werd de glans van de microscoopglaasjes opnieuw gemeten. Eén procent glansreductie wordt vertaald naar één 'soiling unit' (su). De resultaten worden weergegeven als *soiling units* per week (su wk⁻¹) (Brooks and Schwar, 1987, Adams, 1997, Adams and Ford, 2001). Uit de resultaten blijkt dat de vitrine een effectieve buffer is voor stofdepositie (Fig. 6.81). Voor test 1 is de ratio in/uit vitrine 0.08. Voor test 2 is deze ratio 0.12.



Fig. 6.81: Stofdepositie in en uit de vitrine, gedurende twee testperiodes.

Door de AER van 0.55 luchtverversingen per dag, wordt verwacht dat externe polluenten zoals NO₂ maar in beperkte mate in de vitrine zullen dringen. Anderzijds kan een luchtdichte vitrine die gemaakt is uit ongeschikte materialen, zorgen voor een opstapeling van intern gegenereerde polluenten. Met behulp van diffusiebuisjes kan de concentratie van verschillende polluenten bepaald worden. Voor deze vitrine is gebruik gemaakt van Radiello diffusiebuisjes voor NO₂ en SO₂ (cartridge code 166, Fondazione Salvatore Maugeri, Padova, Italië) (Fig. 6.82). Bovendien is uit eerdere studies gebleken dat deze diffusiebuisjes ook geschikt zijn om de concentraties van mieren- en azijnzuur te bepalen (Kontozova-Deutsch et al., 2008, Krupinska et al., 2013). Deze organische gassen worden vaak gelinkt aan interne pollutie. Met één type diffusiebuisjes kan dus zowel een inschatting gemaakt worden van de bufferende werking van de vitrine voor externe gassen, als de emissie van schadelijke gassen in de vitrine.



Fig. 6.82: Radiello diffusiebuisje.

Zowel in als op de vitrine werden telkens drie diffusiebuisjes geplaatst gedurende een periode van 2 weken (09/01/2017 tot 23/01/2017). Na de bemonstering zijn de diffusiebuisjes zo snel mogelijk geanalyseerd in de Universiteit Antwerpen, departement Chemie, onderzoeksgroep AXES (24/01/2017). De periode tussen de bemonstering en de analyses werden de diffusiebuisjes in de koelkast bewaard. Analyse is gebeurd met ionen chromatografie (Metrohm, Antwerpen) volgens de methodes beschreven door Radiello (www.radiello.com) en Kontozova-Deutsch et al. (2008).

Fig. 6.83 geeft de concentraties van de verschillende gassen in de vitrine en de ruimte rondom. Zoals verwacht is de concentratie van NO₂ veel lager in de vitrine dan erbuiten, met een indoor/outdoor ratio van 0.06. SO₂ is nauwelijks meetbaar, zelfs niet na de lange bemonsteringstijd van 2 weken. Deze lage concentraties zijn te danken aan de strenge Europese politiek rond SO₂-emissie in de laatste decennia (Tidblad, 2013). Voor de organische gassen mieren- en azijnzuur zijn de concentraties in de vitrine significant hoger dan in de omgeving. Dit wijst op een interne bron. Het gaat hier vermoedelijk om het gebruikte MDF dat niet overal gecoat is.



Fig. 6.83: Concentraties van NO₂, SO₂ en mieren- en azijnzuur, gemeten met Radiello diffusiebuisjes.

Tot slot zijn met een uitgebreide setup fijn stof, licht (verlichtingssterkte en UV), en gassen gemeten (Fig. 6.84). Tabel 6.8 geeft de gebruikte meettoestellen weer.

Parameter	Toestel	Specificaties
Fijn stof	Lighthouse 3016-IAQ	Deeltjesteller, simultane meting van
	(Universiteit Antwerpen)	6 fracties, groottebereik: 0.3-10 μm.
Gassen	SainSmart MQ138 formaldehyde aldehyde	Deze gassensor meet (niet specifiek)
	gas detectie sensor module, aangesloten op	volgende gassen:
	een Arduino (Airchecq-project)	- Formaldehyde (1-10 ppm)
		- Aceton (10-300 ppm)
		- Alcohol (30-300 ppm)
		- Methanol (5-100 ppm)
		- Tolueen (10-100 ppm)
Licht	Hanwell ML4000UV/LUX (IMC group,	- 10 tot 5000 lux in het
	Letchworth, Hertfordshire, UK)	golflengtebereik van 400-700 nm
		- 20 tot 2000 mW/m ² in het
		golflengtebereik van 215-365 nm

Tabel 6.8: Meettoestellen	gebruikt in eer	n uitgebreide	meetsetup in de	vitrine
---------------------------	-----------------	---------------	-----------------	---------



Fig. 6.84: Setup van de uitgebreide meetsetup om fijn stof, gassen en licht te meten.

Fig. 6.85 geeft een overzicht van de resultaten van dit experiment, uitgevoerd op 12/07/2017. Rond 8u55 werden alle toestellen op de vitrine geïnstalleerd. Rond 10u12 werd alles in de vitrine geplaatst, waarna de meettoestellen om 15u40 weer op de vitrine werden gezet om nog 40 minuten verder te meten. Voor alle parameters is een duidelijke schok te zien op het moment dat de setup in, en vervolgens weer uit de vitrine werd geplaatst. De vitrine, opgebouwd uit anti-reflectief glas met 2 lagen polyvinylbutaryl (PVB), beperkt de verlichtingssterkte (lux) met ongeveer 24%. Dit is echter maar een richtpercentage omdat er niet simultaan in en buiten de vitrine is gemeten. Het is echter vooral de UV-fractie van het licht die zo goed als volledig wordt afgeblokt, voor ongeveer 93%, berekend op de absolute UV-waarden (mW Im⁻¹).

Voor fijn stof heeft de vitrine, na het openen om de meettoestellen erin te plaatsen, een beperkte periode nodig om in een stabiele toestand te komen. Om een indicatie te krijgen van het percentage fijn stof dat per fractie wordt tegengehouden, zijn de berekeningen daarom uitgevoerd met de data van de eerste periode buiten de vitrine (75 minuten), en data van de laatste 75 minuten in de vitrine. Hieruit volgt dat de vitrine 100% van de deeltjes groter dan 2.5 µm tegenhoudt. De PM_{1-2.5} fractie wordt voor 99.97% tegengehouden, en de fijnste fractie PM₁ voor 99.81%.

De gassensor, tenslotte, geeft een significante stijging in signaal. Deze bevestigt de metingen met de diffusiebuisjes dat er effectief een interne bron van organische gassen aanwezig is. Deze vitrine is daarom niet geschikt om kunstvoorwerpen in tentoon te stellen die gevoelig zijn voor organische gassen.



Fig. 6.85: Metingen in en uit de testvitrine van de verlichtingssterkte, UV-gehalte, fijn stof en gassen.

7. Vergelijking van verschillende tentoonstellingsscenario's

In *5. Risicoanalyse* hebben we een ranking gemaakt van de impact per materiaal en per schadefactor, gebaseerd op het hoogst mogelijke waardeverlies. Wanneer we nu verschillende scenario's in acht nemen, zal het waardeverlies afhangen van het scenario. In deze studie vergelijken we 4 verschillende scenario's die verband houden met de presentatie van de Besloten Hofjes in hun permanente opstelling. De scenario's hebben een toenemende graad van bescherming: een open display, een voorzetglas voor het Hofje, een vitrine met passieve klimatisatie en een vitrine met actieve klimatisatie (Fig. 7.1).



Fig. 7.1: Verschillende scenario's voor de permanente tentoonstelling van de Besloten Hofjes: (a) open display; (b) voorzetglas; (c) vitrine met passieve of actieve klimatisatie.

Het gebruik van scenario's vereist een gedetailleerde beschrijving van elk scenario. Verschillende algemene condities worden voor de vier scenario's beschouwd:

- De Besloten Hofjes zullen tentoongesteld worden op de zolder van het gerenoveerde Hof van Busleyden.
- Een actief klimatisatiesysteem zal de tentoonstellingsruimte klimatiseren, waarbij een ASHRAE-klasse B of beter bereikt zal worden. Dit betekent dat de temperatuur tussen de 15 en 25°C zal liggen, met korte fluctuaties van ±5°C en een seizoensaanpassing van ±10°C. Hierbij moet de temperatuur onder de 30°C blijven. De relatieve vochtigheid wordt tussen de 40 en 60% gehouden, met korte fluctuaties van ±10% en seizoensaanpassingen van ±10% (ASHRAE, 2011).
- Er zal een up-to-date branddetectiesysteem geïnstalleerd worden.
- Er lopen geen waterleidingen in de nabije omgeving van de Besloten Hofjes.
- Alle directe zonnestraling wordt afgeblokt.
- Tijdens de openingsuren worden de Besloten Hofjes belicht bij 50 lux, zonder UV-straling. Er wordt extra belichting voorzien om de bezoekers te begeleiden. Deze belichting is ook bij lage lux-niveaus.

Per scenario worden ook specifieke randvoorwaarden vastgelegd. Voor de open display en het voorzetglas wordt een afstandshouder voorzien om ervoor te zorgen dat bezoekers de Besloten Hofjes niet kunnen aanraken. Voor het voorzetglas wordt uitgegaan van een luchtdichtheid van 1.5 luchtverversingen per dag. Voor de vitrines wordt een luchtdichtheid van 0.4 luchtverversingen per dag in acht genomen. Eén vitrine wordt passief geconditioneerd met silicagel, de andere vitrine heeft

een actief klimatisatiesysteem voor vochtigheid. Beide vitrines zijn zodanig ontworpen dat de sokkel losstaat van de buitenvitrine om schokken van direct contact van bezoekers te vermijden. Onder de sokkels zijn passieve schokdempers geplaatst om trillingen onder 100 Hz te dempen. De vitrines zijn gebouwd uit materiaal met lage emissie.

In de volgende paragraaf wordt het beschermingsniveau per schadefactor voor elk scenario besproken. Het beschermingsniveau heeft invloed op de kans dat schade zal optreden en op het waardeverlies per scenario.

- **Onjuiste temperatuur**: de temperatuur waaraan de Hofjes zullen blootgesteld worden, zal dezelfde zijn als deze van de geklimatiseerde ruimte. Een voorzetglas of vitrine hebben nauwelijks invloed op de temperatuur, en kunnen ook temperatuursfluctuaties niet bufferen.
- Onjuiste relatieve vochtigheid: de relatieve vochtigheid van de ruimte zal gecontroleerd worden met een HVAC-systeem. Een dergelijk systeem is het grootste deel van de tijd betrouwbaar, maar technische problemen kunnen plotse veranderingen in relatieve vochtigheid veroorzaken. In een open display zullen de Besloten Hofjes direct blootgesteld worden aan deze -vaak drastische- vochtigheidsfluctuaties door een slecht functionerend systeem. Een voorzetglas zal deze vochtigheidsfluctuaties gedeeltelijk bufferen. Verwacht wordt dat beide vitrines de vochtigheidsfluctuaties zullen bufferen door hun hoge luchtdichtheid, in combinatie met hun passieve of actieve vochtigheidscontrole. Door deze vochtigheidscontrole zal bovendien ook een bepaald vochtigheidniveau kunnen behouden worden. De passief-gecontroleerde vitrine zal voordeel halen uit een constante temperatuur in de ruimte. Actieve klimatisatie in de vitrine vertrouwt ook op technologie, die bijgevolg ook kan falen. Een dergelijk falen kan tot een groter waardeverlies leiden.
- **Straling**: lichtstraling zal in alle scenario's gelimiteerd worden op 50 lux. Daarom is de kans op lichtschade en het waardeverlies gelijk in alle scenario's.
- Pollutie: de accumulatie van stof wordt als één van de belangrijke problemen gezien voor de Besloten Hofjes. Een open display zal geen bescherming bieden voor stofophoping, noch voor andere polluenten. Een voorzetglas zal de Hofjes gedeeltelijk beschermen omdat het grote stofdeeltjes en ook gasvormige polluenten (deels) tegenhoudt. Door de hoge luchtdichtheid van de vitrines zullen deze externe polluenten, zowel stof als gassen, efficiënt tegenhouden (Thickett et al., 2005). Doordat de intern gegenereerde polluenten in de vitrine verwaarloosbaar zijn, is het waardeverlies door pollutie veel kleiner in vergelijking met de eerste twee scenario's.
- Fysieke krachten: wanneer de Besloten Hofjes permanent zullen tentoongesteld worden, zijn het vooral trillingen en schokken, o.a. veroorzaakt door bezoekers, die fysische schade zullen veroorzaken. Verhoogde luchtcirculatie kan ook fysische schade veroorzaken door de beweging van de kleine fragmentjes in de Besloten Hofjes. De open display is het meest gevoelig aan dergelijke fysische krachten. De vitrines met hun trillingsdempers zouden de blootstelling aan trillingen moeten beperken. De losgekoppelde sokkels moeten ervoor zorgen dat schokken, veroorzaakt door bezoekers die tegen de vitrine lopen of tikken, niet worden doorgegeven aan de Besloten Hofjes.
- Vuur: in het geval van vuur zal het heel moeilijk zijn om de Besloten Hofjes te evacueren, gezien hun locatie in het gebouw (de zolder). Er zijn echter speciale brandcompartimenten voorzien in het gebouw. Een open display maakt het makkelijker om de objecten te evacueren, maar

een vitrine zal de objecten beter beschermen voor secundaire schade zoals roet accumulatie, waterschade enzovoort.

- Dieven en vandalen: een open display is het meest aantrekkelijk om kleine, waardevolle objecten uit de Besloten Hofjes te nemen. Een voorzetglas en een vitrine beschermen de Hofjes voor deze schadefactor. Echter, eens dieven toegang hebben tot de Besloten Hofjes, moet een totaal waardeverlies in acht genomen worden voor de gestolen fragmenten. De kans op een gebeurtenis rond dieven of vandalen verschilt dus in de verschillende scenario's, maar het waardeverlies is gelijk.
- Water: waterschade kan optreden door lekken in het dak. De dakstructuur is tijdens de werken nagekeken. De open display en het voorzetglas beschermen de Besloten Hofjes niet van waterschade. De vitrines doen dit wel. Daarom is de kans op schade sterk gereduceerd voor de vitrines.
- Ongedierte: insecten, schimmelsporen enzovoort komen het museum binnen via kleine openingen of via bezoekers. In open display heeft ongedierte vrije toegang tot het object. Daarom is hier de hoogste kans op schade. Het voorzetglas reduceert de kans op ongedierte, maar kleine insecten en schimmelsporen vinden nog steeds toegang tot de houten kasten via de kleine openingen tussen het glas en de houten kasten. Bovendien zijn de houten kasten zelf niet beschermd langs de buitenzijde, en hout is een aantrekkelijk materiaal voor insecten en schimmel. Beide vitrines zullen de kans op ongedierte sterk verminderen. Echter, eens het ongedierte toegang heeft tot de Hofjes, zullen ze een gelijkaardig waardeverlies veroorzaken in de verschillende scenario's.
- **Dissociatie**: er is een hogere kans op schade toegekend aan de open display, omdat de kans hier groter is dat kleine fragmenten van de Besloten Hofjes verloren gaan.

Voor elk scenario en elke schadefactor is nu de kans op schade gedefinieerd. De kansen zijn gekwantificeerd met een getal tussen 0 en 1, gaande van een verwaarloosbare tot een significante kans op schade. Er is een tijdshorizon van 100 jaar beschouwd. De kwantificatie wordt weergegeven in Tabel 7.1. Verschillende schadefactoren veroorzaken schade aan erfgoedmaterialen door cumulatieve processen. Dit zijn: incorrecte temperatuur, incorrecte relatieve vochtigheid, straling, pollutie en fysische krachten (trillingen). Deze schadefactoren hebben een kans van 1 gekregen in alle scenario's. Dit betekent dat er in bepaalde mate schade zal accumuleren op de Besloten Hofjes over een periode van 100 jaar. Deze schade kan heel beperkt zijn, maar dit komt terug in de kwantificatie van het waardeverlies. De kans op schade door de andere 'snelle' schadefactoren is bepaald met het Poisson proces (Waller, 2003). Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de kans op schade gelijk is aan de kans dat een gebeurtenis plaatsvindt. De frequenties van gebeurtenissen zijn omgezet naar kansen via de formule $P(t)_{(event)} = 1 - e^{\lambda t}$, waarbij $P(t)_{(event)}$ de kans is dat een gebeurtenis plaatsvindt binnen tijdsspanne t, λ de frequentie en t de tijdsspanne. Als voorbeeld: er wordt verwacht dat een brand de Besloten Hofjes zal treffen één keer elke 500 jaar. Dit is gebaseerd op het aantal woningbranden in België (www.statbel.be; www.belgium.be). Dit komt neer op een kans van 0.18 (of 18%) voor een periode van 100 jaar. Doordat de graad van bescherming voor brand in de vier scenario's geen tot weinig invloed heeft op het uitbreken van een brand, heeft deze schadefactor dezelfde kans in elk scenario. Voor de andere snelle schadefactoren, variëren de kansen over de verschillende scenario's.

Tabel 7.1: Kwantificatie van de kans op materiaalschade of -verlies voor de verschillende scenario's in functie van de tien schadefactoren. O betekent een verwaarloosbare kans, terwijl 1 een hoge kans betekent. D.w.z., schade is te verwachten binnen een tijdshorizon van 100 jaar.

Scenario	Incorrecte T	Incorrecte RH	Straling	Pollutie	Fysische krachten	Brand	Dieven en vandalen	Water	Ongedierte	Dissociatie
Open display	1	1	1	1	1	0.18	0.63	0.63	0.86	0.63
Voorzetglas	1	1	1	1	1	0.18	0.18	0.63	0.63	0.18
Vitrine (passief)	1	1	1	1	1	0.18	0.18	0.18	0.39	0.18
Vitrine (actief)	1	1	1	1	1	0.18	0.18	0.18	0.39	0.18

Vervolgens is het waardeverlies per schadefactor en per materiaal bepaald. Hiervoor werd een discrete schaal met 5 opties gebruikt. Om ten slotte de scenario's kwantitatief te evalueren, is de kans op schade vermenigvuldigd met de deelwaarden en het waardeverlies. Om de totale omvang van het risico te bepalen, zijn alle waarden uit de verkregen matrix opgeteld en gedeeld door een factor 9 (= het aantal materiaaltypes dat in rekening werd gebracht). Zo werden waarden tussen 0 en 1 verkregen. De resultaten voor de vier scenario's worden getoond in Fig. 7.2 . Zoals intuïtief verwacht, zorgt de open display voor het grootste risico, terwijl de passieve vitrine het laagste risico heeft. Deze vitrine vermindert het risico met 39%. Een actief geklimatiseerde vitrine vermindert het risico met 37%, en een voorzetglas geeft een risicovermindering van 19%. Gebaseerd op deze resultaten heeft het Hof van Busleyden besloten om de Besloten Hofjes permanent tentoon te stellen in passief geklimatiseerde vitrines.



Fig. 7.2: Totale omvang van het risico voor de vier scenario's, met indicatie van het percentage risicovermindering in vergelijking met het scenario met het hoogste risico (= open display).

8. Aanbevelingen

Hieronder wordt per thema een advies voorgesteld voor een optimaal behoud van de Besloten Hofjes in hun permanente tentoonstelling in het Hof van Busleyden. Daarnaast wordt ook een advies voor toekomstige bruiklenen (transport) gegeven. Er wordt algemeen aangeraden om op regelmatige basis een conditierapportering uit te voeren van elk Besloten Hofje om op die manier hun toestand en bewaarcondities op lange termijn te evalueren.

8.1 Klimaat

Er wordt voorkeur gegeven aan passieve klimaatcontrole, vermits de ruimte reeds actief zal worden geklimatiseerd. Tussen de technische ruimte van de vitrine en de vitrine zelf moeten openingen voorzien worden van minstens 8 mm diameter, met een bedekkingsgraad van 25%, of moeten er sleuven voorzien worden aan de zijkanten van minstens 17 mm. Dit om voldoende ventilatie te creëren tussen de technische ruimte en de vitrine. De technische ruimte moet voldoende groot zijn om de nodige hoeveelheid bufferend materiaal te plaatsen.

Relatieve vochtigheid

Richtwaarde: Zo constant mogelijk, met als richtwaarde 45% met dagelijkse fluctuaties van \pm 2.5% en seizoenfluctuaties van \pm 5%.

Argumentatie: Vanuit de risicoanalyse is vooral gekeken naar ideale omstandigheden voor de zijde, polychromie en hout. Hierbij heeft de zeer fragiele zijde de meest kritieke aanbevelingen. Een lagere RH vertraagt de zijdedegradatie, maar verhoogt de brosheid van de zijde. Doordat de zijde al in zeer slechte staat is, en trillingen een risico vormen, wordt een gemiddelde relatieve vochtigheid voorgesteld. De aanbevolen relatieve vochtigheid van 45% is aangewezen voor de meeste materialen in de Besloten Hofjes.

<u>Temperatuur</u>

Richtwaarde: Zo constant en zo laag mogelijk, met een maximum van 20°C. (Trage) temperatuurfluctuaties zijn minder kritiek tenzij ze directe invloed hebben op de relatieve vochtigheid. Extreme fluctuaties moeten echter vermeden worden.

Argumentatie: Hogere temperaturen versnellen chemische degradatiereacties. Voor zijde is het effect van een verhoogde temperatuur klein t.o.v. een te hoge of te lage relatieve vochtigheid. Echter, bij een relatieve vochtigheid van 50% is bij een temperatuur van 20°C de degradatiesnelheid anderhalve keer groter dan bij 16°C (Luxford et al., 2009).

Algemene aandachtspunten

Er moet aandacht besteed worden aan de mogelijke vorming van microklimaat in de vitrine, bijvoorbeeld indien deze dicht bij een HVAC-outlet staat. Dit kan leiden tot een plaatselijke opwarming of afkoeling die ten sterkste vermeden moet worden. Voor dergelijke locaties kan bijvoorbeeld isolatie aan de achterzijde van de vitrine voorzien worden. Ook andere voorstellen zijn welkom.

8.2 Licht

De belichting van de Besloten Hofjes is een belangrijk aandachtspunt. Het belichtingsniveau moet zo laag mogelijk gehouden worden, en ook zo beperkt mogelijk in de tijd. In onderstaand schema wordt er per type materiaal een richtlijn weergegeven. Er moet echter uitgegaan worden van de meest lichtgevoelige materialen. Het maximale belichtingsniveau is daarom 50 lux. UV-straling moet volledig vermeden worden, met een maximale blootstelling van 10 μ W/Im.

Zeer lichtgevoelig	Lichtgevoelig	Niet lichtgevoelig			
Textiel	Polychromie	Metaal			
Perkament	Hout	Glas			
Papier	Olieschilderijen	Was			
Max. 50 lux	Max. 150 lux	Opletten voor warmte			
< 10 μW lm ⁻¹	< 75 µW lm⁻¹				
50 000 lux-uren jaar ⁻¹	480 000 lux-uren jaar⁻¹				

Om de bezoekerservaring bij een dergelijk laag belichtingsniveau optimaal te krijgen, wordt aangeraden om de ruimtes rondom de Besloten Hofjes donker te maken voor gewenning. Er kan geopteerd worden voor verschillende belichtingsplannen waarbij verschillende objecten gedurende een beperktere tijd worden belicht. Hierbij moet er wel op gelet worden dat de lichtschade gelijkmatig verloopt.

Om de belichtingsduur te beperkten, kan er een optie voorzien worden om de belichting enkel aan te laten gaan als er bezoekers zijn. Dit heeft echter ook nadelen. Het brengt een hogere kost met zich mee, het is moeilijker technisch te verwezelijken, er is een snellere slijtage van de lampen etc. Daarnaast moet er ook nagegaan worden hoe lang de belichting moet aanblijven. Hoe lang mogen de bezoekers bijvoorbeeld 'stil' blijven zitten?).

Er wordt geadviseerd om te belichten met LED-lampen of optische vezels, met de lichtbron buiten de vitrine om opwarming te vermijden.

8.3 Trillingen en transport

Door de hoge fragiliteit van de Besloten Hofjes, in het bijzonder de sterk gedegradeerde zijde en de vele beweegbare objecten en ornamenten, moeten trillingen maximaal gedempt worden. Op basis van Wei et al. (2014) wordt een trillingsniveau onder 2 mm.s⁻¹ aangeraden. Uit onderzoek is gebleken dat vooral de fequenties onder 30 Hz moeten gedempt worden. Toch wordt geadviseerd om zoveel mogelijk frequenties onder 100 Hz te dempen.

Verdere bruiklenen van de Besloten Hofjes worden ter sterkste afgeraden. Onderzoeksresultaten hebben aangetoond dat (beperkte) schade ontstaat tijdens het transport van de Hofjes, ondanks de genomen voorzorgsmaatregelen om de Hofjes optimaal te beschermen.

8.4 Technische aanbevelingen vitrine

Air exchange rate (AER)

Doordat passieve klimatisatie geadviseerd wordt, wordt een AER van kleiner dan 0.4 luchtuitwisselingen per dag geadviseerd. Hoe lager de AER, hoe meer stof en schadelijke gassen uit de omgeving worden tegengehouden. Kieren kleiner dan 0.2 mm houden bovendien insecten uit de vitrine.

De AER wordt best ter plaatse gemeten in de finale omgevingsomstandigheden, omdat de AER sterk afhankelijk is van bijvoorbeeld temperatuursverschillen enz. Er moet minstens gedurende een dagnachtcyclus gemeten worden.

<u>Materialen</u>

Alle gebruikte materialen van de vitrine moeten inert zijn. Hiervoor kan gebaseerd worden op volgende documenten:

- *NMAI conservation approved exhibit materials,* Smithsonian, National Museum of the American Indian (2007)
- *Display materials and exhibition guidelines,* PA Historical and Museum Commission, Pennsylvania, PA (2009)
- Les matériaux utilisés en conservation préventive, KIK-IRPA

Ook de Oddy-test materialendatabase op de AIC-wiki kan geconsulteerd worden (http://www.conservation-wiki.com/wiki/Oddy_Tests:_Materials_Databases#Results_Tables). Indien andere materialen gebruikt worden, moet een technische fiche toegevoegd worden en moet gegarandeerd worden dat deze materialen geen schadelijke gassen uitstoten. Droogtijden van materialen moeten gerespecteerd worden.

Het glas moet gelaagd veiligheidsglas zijn met eventueel anti-UV eigenschappen (cf. belichting en UVgehalte van de ruimte). Om reflecties te vermijden, kan geopteerd worden voor anti-reflecterend glas (bijvoorbeeld ArtGlass van GroGlass), zeker voor de voorzijde van de vitrine.

Bevestiging Besloten Hofjes

De Besloten Hofjes moeten vastgemaakt kunnen worden in de achterwand van de vitrine. Ook de zijpaneeltjes moeten vastgezet worden, liefst aan de achterwand van de vitrine, opdat ze onder dezelfde hoek open blijven staan. De restauratoren moeten evalueren of de scharnieren van de luikjes voldoende stevig zijn om de luikjes permanent open te zetten, of dat deze moeten verstevigd worden of dat de paneeltjes ondersteund moeten worden.

Onderhoud en monitoring

De vitrine moet zonder zuignappen geopend kunnen worden met 2 personen, waarbij de Besloten Hofjes eenvoudig in en uit de vitrine gehaald kunnen worden. Dit moet langs de voorzijde kunnen gebeuren. De voorzijde van de vitrine moet dus de toegang zijn. Deze handeling moet intern uitgevoerd kunnen worden. Let bij het ontwerp op de beperkte plaats in de zolderverdieping (hellend dak, kepers, ...).

Het museumpersoneel moet de mogelijkheid hebben om de vitrines langs binnenzijde te onderhouden.

Voorzie een mogelijkheid om een (radiogestuurde) datalogger voor temperatuur en relatieve vochtigheid op een discrete wijze in de vitrine te kunnen plaatsen, waarbij de dipslay van buiten de vitrine afgelezen kan worden.

Referenties

- ADAMS, S. J. 1997. Dust Deposition and Measurement: A Modified Approach. *Environmental Technology*, **18**, 345-350.
- ADAMS, S. J. & FORD, D. 2001. Monitoring of Deposited Particles in Cultural Properties: the Influence of Visitors. *Atmospheric Environment*, 35, 4073-4080.
- ANAF, W. 2014. The influence of particulate matter on cultural heritage. Chemical characterisation of the interaction between the atmospheric environment and pigments. PhD, University of Antwerp.
- ASHRAE 2011. Museums, Galleries, Archives, and Libraries. ASHRAE Handbook Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Applications (I-P Edition). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- BADEA, E., CARSOTE, C., VETTER, W., PETROVICIU, I., MIU, L., SCHREINER, M. & DELLA GATTA, G. How parchment responds to temperature and relative humidity: a combined micro DSC, MHT, SEM and FTIR study. ICAMS, 4th International Conference on Advanced Materials and Systems, 27-29 September 2012 2012 Bucharest, Romania. 487-492.
- BAERT, B., ITERBEKE, H. & WATTEEUW, L. Late medieval Enclosed Gardens of the Low Countries. Mixed media, remnant art, récyclage and gender in the Low Countries (16th c. onwards). Agency of Things. New perspectives on European art of the 14th-16th centuries, 10-12 June 2015 2015 Warsaw, Poland.
- BOERSMA, F., BROKERHOF, A., VAN DEN BERG, S. & TEGELAERS, J. 2007. Unravelling textiles. A handbook for the preservation of textile collections, London, Archetype Publications Ltd.
- BOERSMA, F., VAN DEN BERG, S., BROKERHOF, A. & TEGELAERS, J. 2000. *Op de keper beschouwd. Handboek voor het behoud van textielcollecties,* Delft, Stichting Textielcommissie Nederland.
- BRATASZ, L. 2013. Allowable microclimatic variations for painted wood. *Studies in Conservation*, 58, 65-79.
- BRIMBLECOMBE, P., THICKETT, D. & YOON, Y. H. 2009. The Cementation of Coarse Dust to Indoor Surfaces. *Journal of Cultural Heritage* 10, 410-414.
- BROKERHOF, A., ANKERSMIT, B. & LIGTERINK, F. 2013. Digitaal Handboek Risicomanagement. Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed.
- BROKERHOF, A. W. & BÜLOW, A. E. 2016. The QuiskScan a quick risk scan to identify value and hazards in a collection. *Journal of the Institute of Conservation*, 39, 18-28.
- BROKERHOF, A. W., VAN ZANEN, B., VAN DE WATERING, K. & PORCK, H. 2003. Het loopt in de papieren. Geïntegreerde bestrijding van insecten in collecties. Amsterdam: Instituut Collectie Nederland.
- BROOKS, K. & SCHWAR, M. J. R. 1987. Dust Deposition and the Soiling of Glossy Surfaces. *Environmental Pollution*, 43, 129-141.
- CALVER, A., ANDY, H., THICKETT, D. & WEINTRAUB, S. Simple methods to measure air exchange rates and detect leaks in display and storage enclosures. ICOM Committee for Conservation, 14th triennial meeting, 2005 The Hague, The Netherlands. 597-609.
- CAMUFFO, D. 1998. *Microclimate for Cultural Heritage,* Amsterdam, Elsevier.
- CAMUFFO, D., BRIMBLECOMBE, P., VAN GRIEKEN, R., BUSSE, H.-J., STURARO, G., VALENTINO, A., BERNARDI, A., BLADES, N., SHOOTER, D., DE BOCK, L., GYSELS, K., WIESER, M. & KIM, O. 1999. Indoor air quality at the Correr Museum, Venice, Italy. *The Science of the Total Environment*, 236, 135-152.
- CCI. 2013. *Textiles and the environment (Canadian Conservation Institute Notes 13/1)* [Online]. Canadian Conservation Institute. Available: <u>http://canada.pch.gc.ca/eng/1439925170741</u> [Accessed 23 August 2017].
- CCI. 2016. *Light damage calculator* [Online]. Available: <u>http://canada.pch.gc.ca/eng/1450464034106</u> [Accessed 2 March 2017].

DE NIJN, H. 1998. 800 jaar Onze-Lieve-Vrouwegasthuis: uit het erfgoed van de Mechelse gasthuiszusters en het OCMW, Mechelen, Stad Mechelen.

ERHARDT, D. & MECKLENBURG, M. 2011. Relative Humidity Re-examined. *In:* CAPLE, C. (ed.) *Preventive Conservation in Museums.* London: Routledge, Taylor&Francis Group.

- ERHARDT, D., MECKLENBURG, M. F., TUMOSA, C. S. & MCCORMICK-GOODHART, M. 1995. The determination of allowable RH fluctuations. *WAAC Newsletter*, **17**, **1**9.
- FELLER, R. L. 1994. Accelerated Aging: Photochemical and Thermal Aspects, The J. Paul Getty Trust.
- GIBSON, L. T. & WATT, C. M. 2010. Acetic and formic acids emitted from wood samples and their effect on selected materials in museum environments. *Corrosion Science*, 52, 172-178.
- GRAU-BOVÉ, J., BUDIC, B., KRALJ CIGIC, I., THICKETT, D., SIGNORELLO, S. & STRLIC, M. 2016. The effect of particulate matter on paper degradation. *Heritage Science*, 4.
- HANSEN, E. F. & LEE, S. N. The effects of relative humidity on some physical properties of modern vellum: implications of the optimum relative humidity for the display and storage of parchment. AIC 19th Annual Meeting, June 3-8 1991 Albuquerque, New Mexico.
- HANSEN, E. F. & SOBEL, H. Effect of the environment on the degradation of silk: a review. Textile Specialty Group postprints, Textile Subgroup Session, AIC 20th annual meeting, June 1992 1992 Buffalo, New York. 14-30.
- HAVLÍNOVÁ, B., KATUSCÁK, S., PETROVICOVÁ, M., MAKOVÁ, A. & BREZOVÁ, V. 2009. A Study of Mechanical Properties of Papers Exposed to Various Methods of Accelerated Ageing. Part I. The Effect of Heat and Humidity on Original Wood-Pulp Papers. *Journal of Cultural Heritage* 10, 222-231.
- HENDERSON, J. 2013. Managing the library and archive environment. *Preservation Advisory Centre. Environment.* The British Library.
- HINDS, W. C. 1982. *Aerosol Technology. Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles,* New York, John Wiley & Sons.
- HOGG, S., MCPHAIL, D., OAKLEY, V. & ROGERS, P. 1998. Cracking crizzling: eight years of collaborative research. *Conservation journal*.
- HOWELL, D. Some mechanical effects of inappropriate humidity on textiles. *In:* BRIDGLAND, J., ed. ICOM Committee for Conservation 11th Triennial Meeting, 1-6 September 1996 1996 Edinburgh. James and James, 692-698.
- ICN 2005. *Het beperken van lichtschade aan museale objecten: lichtlijnen,* Amsterdam, Mart.Spruijt bv.
- IOANID, G. E., PARPAUTA, D. & VLAD, A. M. 2005. The Electrostatic Behaviour of Materials Used in Restoration-Conservation Process. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 7, 1643-1649.
- ITERBEKE, H. *De zeven Besloten Hofjes* [Online]. Stad Mechelen. Available: https://beslotenhofjes.com [Accessed 2 October 2018 2018].
- KARATZANI, A. 2014. Metal threads: the historical development. *Traditional textile craft An intangible cultural heritage.* The Jordan Museum, Amman.
- KILDESO, J., VALLARINO, J., SPENGLER, J. D., BRIGHTMAN, H. S. & SCHNEIDER, T. 1999. Dust Build-Up on Surfaces in the Indoor Environment. *Atmospheric environment* 33, 699-707.
- KONTOZOVA-DEUTSCH, V. 2007. Characterization of Indoor Gaseous and Particulate Pollutants for Conservation in Museums and Churches
- KONTOZOVA-DEUTSCH, V., KRATA, A., DEUTSCH, F., BENCS, L. & VAN GRIEKEN, R. 2008. Efficient separation of acetate and formate by ion chromatography: Application to air samples in a cultural heritage environment. *Talanta*, 75, 418-423.
- KOOB, S. P. An experimental treatment for severely crizzled glasses. *In:* ROEMICH, H., ed. Glass and Ceramics Conservation. Interim Meeting of the ICOM-CC Working Group, 3-6 October 2010 Corning, New York, USA. ICOM, 128-132.
- KOPERSKA, M. A., PAWCENIS, D., BAGNIUK, J., ZAITZ, M. M. & MISSORI, M. 2014. Degradation markers of fibroin in silk through infrared spectroscopy. *Polymer Degradation and Stability*, 105, 185-196.

- KRUPINSKA, B., VAN GRIEKEN, R. & DE WAEL, K. 2013. Air quality monitoring in a museum for preventive conservation: results of a three-year study in the Plantin-Moretus Museum in Antwerp, Belgium. *Microchemical Journal*, 110, 350-360.
- LUXFORD, N. & THICKETT, D. 2011. Designing accelerated ageing experiments to study silk deterioration in historic houses. *Journal of the Institute of Conservation*, 34, 115-127.
- LUXFORD, N., THICKETT, D. & WYETH, P. Preserving silk: reassessing deterioration factors for historic silk artefacts. *In:* WILSON, C. A. & LAING, R. M., eds. Natural fibres in Australasia: Proceedings of the combined (NZ and AUS) conference of The Textile Institute, 15-17 April 2009 2009 Dunedin, New Zealand. The Textile Institute (NZ), 151-156.
- MARCON, P. & MICHALSKI, S. 2002. Mechanical risks to large paintings such as Guernica during transit. *El Guernica y los problemas éticos y técnicos de la manipulación de obras de arte.* Fundación Marcelino Botín.
- MARTENS, M. 2012. Climate risk assessment in museums. Degradation risks determined from temperature and relative humidity data. PhD, TU Eindhoven.
- MCINTYRE, J., KIRTLEY, T., BARRETT, A. & JONES, I. 2000. Guidance for exhibiting archive and library materials. *NPO Preservation Guidance. Preservation Management Series.* National Preservation Office.
- MECKLENBURG, M. 2007. Determining the acceptable ranges of relative humidity and temperature in museums and galleries. Part 1, structural response to relative humidity. 57.
- MECKLENBURG, M. F., TUMOSA, C. S. & ERHARDT, D. 1998. Structural response of painted wood surfaces to changes in ambient relative humidity. *Painted wood: history and conservation*. Los Angeles: The Getty Conservation Institute.
- MEMORI. 2013. *The MEMORI technology. Innovation for conservation* [Online]. Available: <u>http://memori.nilu.no/</u> [Accessed 16 April 2018].
- MICHALSKI, S. 1990. An overall framework for preventive conservation and remedial conservation. *Preprints of the International Council of Museums, Committee for Conservation, 9th Triennial Meeting.* Dresden: ICOM Committee for Conservation.
- MICHALSKI, S. 2002. Double the life for each five-degree drop, more than double the life for each halving of relative humidity. *13th triennial meeting*. Rio de Janeiro.
- MICHALSKI, S. Risk Based Decision Making for Collections: the ICCROM-CCI-ICN Course, the Method, and Associated Tools. American Conservation Institute, 38th annual meeting, 2010 Milwaukee.
- MICHALSKI, S. 2014. The power of history in the analysis of collection risks from climate fluctuations and light. *ICOM-CC 17th Triennial Conference*. Melbourne.
- MICHALSKI, S. & PEDERSOLI JR., J. L. 2016. The ABC method: a risk management approach to the preservation of cultural heritage. Ottawa, Canada: Canadian Conservation Institute, ICCROM.
- MUSE.MECHELEN. *Restauratie Hof van Busleyden* [Online]. Available: https://muse.mechelen.be/restauratie-hof-van-busleyden [Accessed 13 July 2017].
- NBN 2014. Conservation of cultural heritage Guidelines for design of showcases for exhibition and preservation of objects Part 1: General requirements.
- O'BRIEN, F. E. M. & M.A. 1948. The control of humidity by saturated salt solutions. *British Electrical* and Allied Industries Research Association, London, 25, 73-76.
- ORTIZ, A. S. & BORÓ, S. M. 2012. Preventive conservation strategies for wax bodies in scientific university collections. *Conservation Science in Cultural Heritage*, 12, 215-245.
- PADFIELD, T. 2014. Air exchange rate. *Conservation Physics*.
- PADFIELD, T. s.d.-a. *The absorption of water by materials* [Online]. Available: <u>http://www.conservationphysics.org/isothrm/isothrm.php</u> [Accessed 13 July 2017].
- PADFIELD, T. s.d.-b. Fundamental microclimate concepts. A glossary of the microclimate variables and units used in conservation physics [Online]. Available:

http://www.conservationphysics.org/intro/fundamentals.php [Accessed 13 July 2017].

PAVLOGEORGATOS, G. 2003. Environmental parameters in museums. *Building and Environment*, 38, 1457-1462.

- PAWCENUS, D., SMOLEN, M., AKSAMIT-KOPERSKA, M. A., LOJEWSKI, T. & LOJEWSKA, J. 2016. Evaluating the impact of different exogenous factors on silk textiles deterioration with use of size exclusion chromatography. *Applied Physics A*, 122.
- PEDERSOLI JR., J. L., ANTOMARCHI, C. & MICHALSKI, S. 2016. A guide to risk management of cultural heritage. ICCROM, Canadian Conservation Institute.
- POPESCU, C.-M., HILL, C. A. S. & KENNEDY, C. 2015. Variation in the sorption properties of historic parchment evaluated by dynamic water vapour sorption. *Journal of Cultural Heritage,* (in press).
- PRAJAPATI, C. L. 2003. Accumulation of Solid Particles on Documents, a Threat for Preservation of Documentary Heritage - The Example of the National Archives of India. *Restaurator-International Journal for the Preservation of Library and Archival Material*, 24, 46-54.
- RAPHAEL, T. J. 2005. Preventive Conservation and the Exhibition Process: Development of Exhibit Guidelines and Standards for Conservation. *Journal of the American Institute for Conservation,* 44, 245-257.
- RUSSELL, R. & WINKWORTH, K. 2009. Significance 2.0: A guide to assessing the significance of collections. *In:* RAINER, V. & BULLOCK, V. (eds.) 2nd edition ed.: Collections Council of Australia Ltd.
- SAUNDERS, D. & KIRBY, J. 2004. The Effect of Relative Humidity on Artists's Pigments. *National Gallery Technical Bulletin*, 25, 62-72.
- SCHIEWECK, A. 2009. *Airborne pollutants in museum showcases: Material emissions, influences, impact on artworks.* PhD, Hochschule für Bildende Künste Dresden.
- SEROTA, N. 2014. Bizot Green Protocol. New York: Bizot Group.
- SHAO, J., LIU, J., ZHENG, J. & CARR, C. M. 2002. X-ray photoelectron spectroscopic study of silk fibroin surface. *Polymer International*, 51, 1479-1483.
- SHAO, J., ZHENG, J., LIU, J. & CARR, C. M. 2005. Fourier transform Raman and fourier transform infrared spectroscopy studies of silk fibroin. *Journal of Applied Polymer Science*, 96, 1999-2004.
- SPAFFORD-RICCI, S. & GRAHAM, F. 2000. The Fire at the Royal Saskatchewan Museum, Part 2: Removal of Soot from Artifacts and Recovery of the Building. *Journal of the American Institute for Conservation*, 39, 37-56.
- STONE, T. 2010. Care of ivory, bone, horn, and antler. CCI Notes.
- STRANGER, M., POTGIETER-VERMAAK, S., SACCO, P., QUAGLIO, F., PAGANI, D., COCHEO, C., GODOI, A. F. L. & VAN GRIEKEN, R. 2009. Analysis of indoor gaseous formic and acetic acid using radial diffusive samplers. *Environmental Monitoring and Assessment*, 149, 411-417.
- TÉTREAULT, J., SIROIS, J. & STAMATOPOULOU, E. 1998. Studies of Lead Corrosion in Acetic Acid Environments. *Studies in Conservation*, 43, 17-32.
- THICKETT, D. 1999. Assessment of vibration damage levels. London: The British Museum.
- THICKETT, D. Vibration damage levels for museum objects. ICOM Committee for Conservation, 13th Triennial Meeting, 2002 Rio de Janeiro. 90-95.
- THICKETT, D., COLSON, I. T. & LEROUX, J. T. 2013. Comment déterminer et vérifier les performances d'une vitrine: importance et mesure de son étanchéité. Institut National du Patrimoine.
- THICKETT, D., DAVID, F. & LUXFORD, N. 2005. Air exchange rate The dominant parameter for preventive conservation? *The Conservator*, 29, 19-34.
- THICKETT, D., FLETCHER, P., CALVER, A. & LAMBARTH, S. 2007. The effect of air tightness on RH buffering and control. *In:* PADFIELD, T. & BORCHERSEN, K. (eds.) *Museum Microclimates.* Denmark: The National Museum of Denmark.
- THOMSON, G. 1986. The Museum Environment, Oxford, Elsevier, Butterworth Heinemann.
- TIDBLAD, J. 2013. Atmospheric corrosion of heritage metallic artefacts: processes and prevention. *In:* DILLMANN, P., WATKINSON, D., ANGELINI, E. & ADRIAENS, A. (eds.) *Corrosion and conservation of cultural heritage metallic artefacts.* Oxford: Woodhead Publishing Limited.

- TIS. 2012-2017. *Silk* [Online]. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. (GDV). Available: <u>http://www.tis-gdv.de/tis_e/ware/fasern/seide/seide.htm#feuchte</u> [Accessed 13 July 2017].
- UNESCO. 2016. Environment and storage [Online]. UNESCO Web Archive. Available: <u>http://webarchive.unesco.org/20160804024437/http://webworld.unesco.org/safeguarding/</u> <u>en/all_envi.htm</u> [Accessed 30 May 2017].
- VANDEN BERGHE, I. & VANDORPE, M. 2015. Analyserapport materiaal-technische studie. Besloten Hofje 1 - Calvarie en jacht op de eenhoorn, Mechelen. Koninklijk Instituut voor het Kunstpatrimonium.
- VERSLOOT, A. 2013. *Op de museale weegschaal. Collectiewaardering in zes stappen*, Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed.
- VILAPLANA, F., NILSSON, J., SOMMER, D. V. P. & KARLSSON, S. 2015. Analytical markers for silk degradation: comparing historic silk and silk artificially aged in different environments. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 407, 1433-1449.
- VOSTEEN, R. 1994. Advisory guide-line air quality archives. *Deltaplan Cultuurbehoud*. The Hague: Rgd.
- WALLER, R. Conservation risk assessment: a strategy for managing resources for preventive conservation. *In:* ROY, A. & SMITH, P., eds. Preventive Conservation: Practice, Theory and Research, 1994 Ottawa. IIC, 12-16.
- WALLER, R. R. 2003. *Cultural Property Risk Analysis Model. Development and Application to Preventive Conservation at the Canadian Museum of Nature,* Ottawa, Canada, Acta Universitatis Gothoburgensis.
- WEI, W. Art in Transit The Need to Reconsider the Problem of Vibrations in the Transport of Cultural Heritage. Impact of Ioan traffic on works of art, 4-5 September 2006 Berlin.
- WEI, W., JOOSTEN, I., KEIM, K., DOUNA, H., MEKKING, W., REUSS, M. & WAGEMAKERS, J. 2007.
 Experience with Dust Measurements in Three Dutch Museums. *Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung*, 21, 261-269
- WEI, W., KRUMPERMAN, N. & DELISSEN, N. Design of a vibration damping system for sculpture pedestals: an integral object-based approach. ICOM Committee for Conservation, 16th Triennial Meeting, 2011 Lisbon.
- WEI, W., SAUVAGE, L. & WÖLK, J. 2014. Baseline limits for allowable vibrations for objects. *ICOM-CC 17th Triennial Conference*. Melbourne.
- WEINTRAUB, S. 2002. Demystifying Silica Gel. Object Speciality Group Postprints, 9.
- YOON, Y. H. & BRIMBLECOMBE, P. 2001. The distribution of soiling by coarse particulate matter in the museum environment. *Indoor Air*, 11, 232-240.