

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen:
bouwkunde

Masterthesis

Optimalisatie van de relatieve vochtigheid in een museale vitrine voor de bewaring van kunstschatten

**Benjamin Hendrikx
Danton Maes**

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

PROMOTOR :

Prof. dr. ing. Bram VANDOREN

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Evy VEREECKEN

COPROMOTOR :

Prof. dr. ir. arch. Gustaaf ROELS

Gezamenlijke opleiding UHasselt en KU Leuven



Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen | Agoralaan Gebouw H - Gebouw B | BE 3590 Diepenbeek

Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Agoralaan Gebouw D | BE 3590 Diepenbeek
Universiteit Hasselt | Campus Hasselt | Martelarenlaan 42 | BE 3500 Hasselt



2022
2023

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen:
bouwkunde

Masterthesis

Optimalisatie van de relatieve vochtigheid in een museale vitrine voor de bewaring van kunstschaten

Benjamin Hendrikx

Danton Maes

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

PROMOTOR :

Prof. dr. ing. Bram VANDOREN

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Evy VEREECKEN

COPROMOTOR :

Prof. dr. ir. arch. Gustaaf ROELS



KU LEUVEN

Woord vooraf

Ten eerste willen wij de volgende personen bedanken voor de begeleiding tijdens onze masterproef. In de eerste plaats onze externe promotor Prof. dr. ir. Evy Vereecken. Zij heeft ons gedurende het hele proces van de thesis goed begeleid en geholpen. Zowel tijdens het uitwerken van het onderzoek, als het schrijven van de thesis konden wij altijd rekenen op de nodige feedback. Alsook willen wij Prof. dr. ing. Bram Vandoren bedanken voor zijn ondersteuning en feedback als interne promotor vanuit de UHasselt. Daarnaast willen wij ook graag onze externe copromotor Prof. dr. ir. arch. Staf Roels bedanken voor zijn toewijding en steun. Wanneer nodig konden wij altijd bij hem terecht voor vragen en toelichtingen.

Vervolgens willen wij Patricia Elsen bedanken voor de praktische hulp gedurende onze thesis. Dankzij haar konden wij onze metingen vanop afstand laten uitlezen. Tevens willen wij Jimmy Van Crieelingen bedanken voor de hulp en bijstand in het laboratorium Bouwfysica en Duurzaam Bouwen in Heverlee.

Bovendien bedanken wij het Gallo-Romeins Museum te Tongeren voor de terbeschikkingstelling van een professionele vitrine. Deze vitrine was een grote bijdrage voor het onderzoek. Eveneens bedanken wij CHARP Art Care voor het gebruik van de sensoren voor de uitvoering van de metingen. Ook willen wij de KU Leuven bedanken voor het gebruik van het laboratorium Bouwfysica en Duurzaam Bouwen in Heverlee. Dit heeft mogelijk gemaakt om alle experimenten correct uit te voeren. Als laatste willen wij ook de UHasselt prijzen voor deze samenwerking mogelijk te maken.

Over het algemeen is de communicatie tussen alle betrokken personen altijd vlot en professioneel verlopen, zo ook de samenwerking tussen ons beiden. Doordat wij elkaar al verschillende jaren kennen, konden wij elkaar aanvullen en bijsturen waar nodig.

Tot slot wensen wij u veel leesplezier,

Benjamin en Danton.

Inhoudsopgave

Woord vooraf	1
Lijst van tabellen	7
Lijst van figuren	9
Verklarende woordenlijst	11
Abstract	13
Abstract in English	15
1 Inleiding	17
1.1 Situering.....	17
1.2 Probleemstelling.....	17
1.3 Doelstellingen.....	18
1.4 Opbouw van de thesis.....	18
2 Literatuurstudie	19
2.1 Inleiding.....	19
2.2 Schadefenomenen.....	19
2.2.1 Chemische degradatie.....	19
2.2.2 Mechanische degradatie.....	20
2.2.3 Biologische degradatie.....	20
2.3 RV-beheersing voor kunstschaten.....	21
2.3.1 Boundary control.....	21
2.3.2 Passive control.....	22
2.3.3 Active control.....	22
2.4 Bewaring van kunstschaten.....	22
2.5 Ontwerp van een vitrine.....	23
2.5.1 Luchtdichtheid.....	23
2.5.2 Tracer verval test.....	24
2.5.3 Richtlijnen voor het ontwerp van een vitrine.....	26
2.6 Vitrines gebruikt in het Gallo-Romeins Museum te Tongeren.....	27
2.6.1 Kunstschaten tentoongesteld gedurende tijdelijke tentoonstelling.....	27
2.6.2 Vitrines gebruikt tijdens tentoonstellingen.....	27
2.7 Vochtbufferende materialen.....	27
2.7.1 Werking vochtbufferend materiaal.....	27
2.7.2 Vochtbufferende materialen in museale vitrines.....	29
2.7.3 Gebruik van het vochtbufferend materiaal.....	30
2.8 Moisture Buffer Value.....	31
2.8.1 Testprotocol: Nordtest.....	31
2.8.2 Dynamische MBV.....	34

2.8.3	Classificatie	35
2.9	Dampbalans	35
2.9.1	EMPD-model.....	36
2.9.2	EC-model.....	36
2.9.3	Vergelijking EC-model met EMPD-model.....	37
3	Experimenteel onderzoek met vitrines	39
3.1	Gebruikte materialen	39
3.1.1	Vitrines	39
3.1.2	Vochtbufferend materiaal	41
3.1.3	Sensoren	43
3.1.4	Ventilator.....	45
3.2	Gebruikte methode	46
3.2.1	Overzicht randvoorwaarden per experiment	47
3.2.2	Testopstelling lege abstracte vitrine	47
3.2.3	Testopstelling lege professionele vitrine van Tongeren	48
3.2.4	Testopstelling abstracte vitrine met calciumsilicaat	48
3.2.5	Testopstellingen professionele vitrine met calciumsilicaat	49
3.2.6	Testopstelling tracer verval test.....	50
3.3	Resultaten	52
3.3.1	Experimenten 1 en 2: referentietoestanden lege vitrines.....	52
3.3.2	Experimenten 3 en 4: vitrines met calciumsilicaat	56
3.3.3	Experimenten 5 en 6: alternatieve testopstelling t.o.v. experimenten 3 en 4	58
3.3.4	Experiment 7 en 8: invloed van een ventilator	61
3.3.5	Tracer verval test.....	65
4	MBV in functie van RV van calciumsilicaat	67
4.1	Invoerparameters Delphin	67
4.1.1	Geometrie van het sample	67
4.1.2	Materiaaleigenschappen calciumsilicaat	68
4.1.3	Opgelegde condities	71
4.2	Uitvoerparameters Delphin	73
4.3	Resultaten simulaties.....	74
5	RV-voorspellingen voor museale vitrines.....	77
5.1	Dampbalans in Microsoft Excel.....	77
5.1.1	Gekende variabelen	77
5.1.2	Onbekende variabelen	78
5.2	Lege vitrines.....	78
5.2.1	Simulatie lege abstracte vitrine	79

5.2.2	Simulatie lege professionele vitrine	80
5.3	Vitrines met calciumsilicaat	82
5.3.1	Simulatie abstracte vitrine met calciumsilicaat	82
5.3.2	Simulatie professionele vitrine van Tongeren met calciumsilicaat	85
5.4	Simulatie professionele vitrine van Tongeren met zelfgekozen randvoorwaarden	86
5.4.1	Voorbeeld RV-voorspelling	87
6	Besluit	91
6.1	Terugblik	91
6.2	Beperkingen van het onderzoek	92
6.3	Toekomstig onderzoek	93
	Referentielijst.....	95
	Bijlagen.....	99
	Bijlage A: Delphin	99
	Output PostProc 2.3.0 simulatie 75-33% RV MBV _{8u}	99
	Output PostProc 2.3.0 simulatie 75-33% RV MBV _{1u}	99

Lijst van tabellen

Tabel 1: Materialen met hun optimale RV-bereik volgens Museums Galleries Scotland	22
Tabel 2: Materialen met hun optimale RV-bereik volgens Gallo-Romeins Museum te Tongeren.....	22
Tabel 3: Vochtbufferende materialen met hun optimaal RV-bereik en verschillende verpakkingsmogelijkheden.....	29
Tabel 4: Geometrische eigenschappen gebruikte CaSi-samples in het experimenteel onderzoek.....	41
Tabel 5: Overzicht van de gebruikte CaSi-samples in het experimenteel onderzoek	42
Tabel 6: Preconditionering CaSi-samples	43
Tabel 7: Overzicht randvoorwaarden experimenten	47
Tabel 8: Resultaten tracer verval test professionele vitrine.....	65
Tabel 9: Resultaten tracer verval test abstracte vitrine.....	66
Tabel 10: Gebruikte materiaaleigenschappen calciumsilicaat in Delphin.....	68
Tabel 11: Resultaten MBV_{8u} simulatie Delphin.....	74
Tabel 12: Resultaten MBV_{1u} simulatie Delphin.....	75
Tabel 13: Invoerparameters dampbalans lege abstracte vitrine.....	79
Tabel 14: Invoerparameters dampbalans lege professionele vitrine	80
Tabel 15: Invoerparameters dampbalans abstracte vitrine met calciumsilicaat	82
Tabel 16: Invoerparameters dampbalans professionele vitrine met calciumsilicaat	85
Tabel 17: Randvoorwaarden vitrine simulatie RV-verloop	87
Tabel 18: Invoerparameters voorbeeld met CaSi	88
Tabel 19: Invoerparameters voorbeeld met Art Sorb	88

Lijst van figuren

Figuur 1: Vitrine Gallo-Romeins Museum Tongeren	21
Figuur 2: Effect van boundary control op het RV-verloop in een vitrine	21
Figuur 3: Resultaat van een tracer verval test in een plasticen container	24
Figuur 4: Resultaten van de RV in de zomer van de oude vitrine, case 1	25
Figuur 5: Resultaten van de RV in de winter van de oude vitrine, case	25
Figuur 6: Resultaten van de tracer verval test op de nieuwe vitrines, case 2	26
Figuur 7: Hygroscopische curve van een poreus materiaal	28
Figuur 8: Vochtopname in de hygroscopische zone: moleculaire absorptie en capillaire condensatie	28
Figuur 9: Hysteresis bij hygroscopische materialen	29
Figuur 10: Verschillende verpakkingsmogelijkheden a) cassette (Pro Sorb) b) zakje (Pro Sorb) c) losse korrels (Pro Sorb) d) sheet (Art Sorb)	29
Figuur 11: Hygroscopische curven Silica gel E, Pro Sorb en Art Sorb	30
Figuur 12: Plaatsing hygroscopisch materiaal vitrine a) vitrine met verhoogde vitrinebodem b) vitrine met spleten in de bodem	30
Figuur 13: Bepaling van de MBV1u/8u voor 1 cm en 10 cm gipspleister (Nordtest)	32
Figuur 14: Vergelijking verandering in vochtinhoud Pro Sorb, Art Sorb en vloepapier	33
Figuur 15: MBV na 1 uur blootstelling aan hoge RV voor de verschillende materialen	33
Figuur 16: MBV na 8 uur blootstelling aan hoge RV voor de verschillende materialen	34
Figuur 17: MBV1u en MBV8u voor calciumsilicaat in functie van RV	34
Figuur 18: Categorische classificatie MBV	35
Figuur 19: Vergelijking tussen de verschillende modellen	37
Figuur 20: Professionele vitrine Gallo-Romeins Museum Tongeren a) gesloten vitrine b) geopende vitrine	39
Figuur 21: Abstracte vitrine	40
Figuur 22: CaSi-sample 2 gebruikt in experiment 3	41
Figuur 23: Dampdiffusiekamer laboratorium Bouwfysica en Duurzaam Bouwen in Heverlee	42
Figuur 24: Locatie van de CHARP Art Care-sensoren in a) abstracte vitrine b) professionele vitrine	44
Figuur 25: Plaatsing Squirrel-sensoren in abstracte vitrine a) praktisch b) schematisch	44
Figuur 26: Locatie HOBOSensoren in de professionele vitrine a) praktisch b) schematisch	45
Figuur 27: Ventilator EBM-papst type 414 F	45
Figuur 28: Algemene testopstelling vitrines afdeling Bouwfysica te Heverlee	46
Figuur 29: Testopstelling experiment 1 lege abstracte vitrine	47
Figuur 30: Testopstelling experiment 2 lege professionele vitrine	48
Figuur 31: Testopstelling experimenten 3 en 5 abstracte vitrine met calciumsilicaat	48
Figuur 32: Testopstelling experiment 4 met CaSi in professionele vitrine	49
Figuur 33: Testopstelling experiment 6 met CaSi in professionele vitrine	49
Figuur 34: Testopstelling experiment 7 met ventilator in professionele vitrine a) praktisch b) schematisch	50
Figuur 35: Schematische weergave protocol tracer verval test	50
Figuur 36: a) CO ₂ -injector b) CO ₂ -patroon	51
Figuur 37: CO ₂ -sensoren a) binnenmodules en weerstation Netatmo b) locatie sensoren professionele vitrine (schematisch)	51
Figuur 38: RV [%] - en temperatuurverloop [°C] experimenten 1 en 2 op de lege vitrines 21/12/2022 – 10/01/2023	52
Figuur 39: Dampdruk [Pa] - en temperatuurverloop [°C] experimenten 1 en 2 op de lege vitrines 21/12/2022 – 10/01/2023	52
Figuur 40: RV [%] - en temperatuurverloop [°C] experimenten 1 en 2 op de lege vitrines 10/01/2023 - 27/02/2023	54
Figuur 41: Dampdruk [Pa] - en temperatuurverloop [°C] experimenten 1 en 2 op de lege vitrines 10/01/2023 - 27/02/2023	54

Figuur 42: RV [%] - en temperatuurverloop [°C] experimenten 3 en 4 met calciumsilicaat 07/03/2023 - 21/03/2023	56
Figuur 43: Dampdruk [Pa] - en temperatuurverloop [°C] experimenten 3 en 4 met calciumsilicaat 07/03/2023 - 21/03/2023	56
Figuur 44: Gewicht calciumsilicaat sample 2 experiment 3 abstracte vitrine 07/03/2023 – 21/03/2023	57
Figuur 45: RV [%] - en temperatuurverloop [°C] experiment 5 met calciumsilicaat 02/05/2023 - 16/05/2023.....	58
Figuur 46: Dampdruk [Pa] - en temperatuurverloop [°C] experiment 5 met calciumsilicaat 02/05/2023 - 16/05/2023	59
Figuur 47: Gewicht calciumsilicaat sample 4 experiment 5 abstracte vitrine 02/05/2023 – 16/05/2023	60
Figuur 48: RV [%] - en temperatuurverloop [°C] experiment 6 met calciumsilicaat 02/05/2023 - 09/05/2023.....	60
Figuur 49: Dampdruk [Pa] - en temperatuurverloop [°C] experiment 6 met calciumsilicaat 02/05/2023 - 09/05/2023	61
Figuur 50: RV [%] - en temperatuurverloop [°C] experiment 7 met calciumsilicaat en ventilator 18/04/2023 - 02/05/2023	62
Figuur 51: Dampdruk [Pa] - en temperatuurverloop [°C] experiment 7 met calciumsilicaat en ventilator 18/04/2023 - 02/05/2023	62
Figuur 52: Bakje water gebruikt in experiment 8.....	63
Figuur 53: RV [%] - en temperatuurverloop [°C] experiment 8 met water en ventilator 09/05/2023 - 16/05/2023.....	63
Figuur 54: Dampdruk [Pa] - en temperatuurverloop [°C] experiment 8 met water en ventilator 09/05/2023 - 16/05/2023	64
Figuur 55: Resultaten tracer verval test professionele vitrine	65
Figuur 56: Resultaten tracer verval test abstracte vitrine	66
Figuur 57: Geometrie van het sample in Delphin (20 cm x 5 cm)	68
Figuur 58: Implementatie materiaaleigenschappen calciumsilicaat in Delphin	68
Figuur 59: Hygroscopische curve calciumsilicaat (adsorptie)	69
Figuur 60: Implementatie hygroscopische curve calciumsilicaat in Delphin.....	69
Figuur 61: Dampdiffusieweerstand calciumsilicaat in functie van de RV	70
Figuur 62: Implementatie dampdiffusieweerstand in functie van de RV in Delphin.....	71
Figuur 63: Opgelegd RV-verloop in Delphin (75-33%)	71
Figuur 64: Opgelegd temperatuurverloop Delphin (23°C)	72
Figuur 65: Boundary conditions: RH	73
Figuur 66: Boundary conditions: Temperatuur	73
Figuur 67: MBV in functie van RV calciumsilicaat: simulatie Delphin	75
Figuur 68: Simulatie RVi-verloop lege abstracte vitrine	79
Figuur 69: Simulatie Pvi-verloop lege abstracte vitrine.....	80
Figuur 70: Simulatie RVi-verloop lege professionele vitrine	81
Figuur 71: Simulatie Pvi-verloop lege professionele vitrine.....	81
Figuur 72: Simulatie RVi-verloop abstracte vitrine met calciumsilicaat	83
Figuur 73: Simulatie RVi-verloop abstracte vitrine met calciumsilicaat (aanpassing n)	84
Figuur 74: Simulatie RVi-verloop abstracte vitrine met calciumsilicaat (aanpassing HIR)	84
Figuur 75: Simulatie RVi-verloop professionele vitrine met calciumsilicaat (methode 1).....	85
Figuur 76: Simulatie RVi-verloop professionele vitrine met calciumsilicaat (methode 2).....	86
Figuur 77: Voorbeeld RVi -voorspelling lege professionele vitrine	87
Figuur 78: RVi -voorspelling met CaSi als vochtbufferend materiaal	88
Figuur 79: RVi -voorspelling met Art Sorb als vochtbufferend materiaal	89
Figuur 80: RVi -voorspelling met Art Sorb als vochtbufferend materiaal (oppervlakte 0,1 m ²)	89

Verklarende woordenlijst

Term	Betekenis	Eenheid
A	Blootgesteld oppervlak van het sample	m^2
C	Concentratie van een gas	ppm
CaSi	Calciumsilicaat	/
CO ₂	Koolstofdioxide	/
C_p	Soortelijke warmtecapaciteit	J/(kgK)
G_{buf}	Vochtuitwisseling	kg/s
G_{vP}	Vochtproductie	kg/s
HVAC	Heating Ventilation and Airconditioning	/
HIR	Hygric Inertia of Room	kg/(m ³ %RV)
MBV	Moisture Buffer Value	kg/(m ² %RV)
MDF	Medium Density Fibreboard	/
m_{max}	Maximale massa van het sample	kg
m_{min}	Minimale massa van het sample	kg
n	Ventilatievoud	d ⁻¹ /h ⁻¹
P_v	Dampdruk	Pa
Q	Luchtstroom	m ³ /s
RV/ ϕ	Relatieve vochtigheid	%
R_v	Gasconstante	J/(Kmol)
T	Temperatuur	°C
V	Volume	m ³
δ_p	Waterdampgeleidingscoëfficiënt van het vochtbufferend materiaal	s
δ_a	Waterdampgeleidingscoëfficiënt van lucht	s
ρ_{dry}	Dichtheid van het droog materiaal	kg/m ³
θ_{por}	Poreusheid	m ³ /m ³
λ_{dry}	Thermische geleidbaarheid van het droge materiaal	W/(mK)
w	Vochtgehalte	kg/m ³
μ	Dampdiffusieweerstand	/

Abstract

Bij de bewaring van kunstschaten is een stabiele relatieve vochtigheid (RV) van belang om de degradatie van deze kunstschaten te voorkomen. Musea zijn door de hoge energieprijzen op zoek naar innovatieve oplossingen voor de beheersing van het binnenklimaat.

Binnen deze masterproef wordt a.d.h.v. experimenteel en theoretisch onderzoek getracht de invloed van de kwaliteit van een vitrine en een vochtbufferend materiaal op het RV-verloop in de vitrine te achterhalen. Het experimenteel onderzoek bestaat uit verschillende experimenten, die zijn uitgevoerd op twee vitrines: een professionele museale vitrine en een vitrine, specifiek ontwikkeld voor onderzoek. Binnen dit onderzoek wordt calciumsilicaat (CaSi) gebruikt als vochtbufferend materiaal. Het eerste theoretisch onderdeel onderzoekt het vochtbufferend vermogen van CaSi in functie van de RV m.b.v. het hygrothermisch simulatieprogramma Delphin. In het tweede onderdeel wordt er een numeriek model opgesteld op basis van een dampbalans waarmee het RV-verloop in een vitrine met zelfgekozen randvoorwaarden voorspeld wordt.

Het experimenteel onderzoek toont aan dat de professionele vitrine (vervaardigd uit hout) zelf al een vochtbufferend vermogen bezit. Daarnaast speelt de luchtdichtheid van een museale vitrine een belangrijke rol om een stabiel RV-verloop in de vitrine te handhaven. De simulaties in Delphin tonen aan dat het vochtbufferend vermogen van CaSi het grootst is vanaf 60% RV. Ten slotte laat het numeriek model toe om het RV-verloop te voorspellen in een vitrine.

Abstract in English

When preserving art treasures, a stable relative humidity (RH) is crucial to prevent the degradation of these art treasures. Due to high energy prices, museums are looking for innovative solutions for indoor climate control.

Within this master's thesis, by means of experimental and theoretical research, an attempt is being made to determine the influence of the quality of a display case and a moisture-buffering material on the RH fluctuations within the display case. The experimental research involves various experiments on two display cases: a professional museum display case and a display case, developed specifically for research purposes. Calcium silicate (CaSi) is used as a moisture-buffering material in this research. The first theoretical part investigates the moisture-buffering capacity of CaSi in relation to RH using the Delphin hygrothermal simulation program. The second part sets up a numerical model based on a moisture balance to predict the RH fluctuations in a display case under self-specified boundary conditions.

The experimental research shows that the professional display case (made of wood) itself already possesses a moisture-buffering capacity. Additionally, the airtightness of a museum display case plays an important role in maintaining a stable RH level within the display case. The simulations in Delphin show that the moisture buffering capacity of CaSi is the most significant from 60% RH. Finally, the numerical model allows to predict the RH fluctuations in a display case.

1 Inleiding

1.1 Situering

Dit onderzoek wordt uitgevoerd binnen de onderzoeksinstelling Bouwfysica en Duurzaam Bouwen van het Departement Burgerlijke Bouwkunde aan de KU Leuven. Daarnaast wordt het onderzoek mede mogelijk gemaakt door het Gallo-Romeins Museum te Tongeren, dat een professionele museale vitrine ter beschikking stelt voor dit onderzoek. Het meten van de alle nodige parameters voor dit onderzoek gebeurt d.m.v. sensoren die ter beschikking worden gesteld door CHARP Art Care [1].

De energie die hedendaags verbruikt wordt met het aansturen van HVAC-installaties (*Heating Ventilation and Airconditioning*) voor de beheersing van het binnenklimaat leidt tot hoge energiekosten voor musea [2]. Met de huidige energieprijzen zijn musea dan ook op zoek naar innovatieve oplossingen om de fluctuaties van de relatieve vochtigheid (RV) in vitrines te beperken en de kosten te reduceren. Naast de beheersing van de fluctuaties is een stabiel RV-niveau ook van belang. In eerste instantie kan er geopteerd worden om de vitrine zelf zo optimaal mogelijk te ontwerpen. Op deze manier vangt de vitrine zelf een deel van deze fluctuaties op. Dit wordt de *boundary control* genoemd. Daarnaast kan er ook gekozen worden voor een extra maatregel. Dit wordt gedaan a.d.h.v. een passieve strategie zoals het gebruik van vochtbufferende materialen die worden weggewerkt in de vitrine.

De vitrine zorgt ervoor dat er een microklimaat wordt gecreëerd. Door het gebruik van hygroscopische materialen kan de relatieve vochtigheid in dit microklimaat beheerst worden. Dit is nodig omdat de condities van het klimaat in een museumruimte niet constant zijn. Hier ontstaan er veel schommelingen door de aanwezigheid van personen in de ruimte, weersomstandigheden, storingen van het HVAC-systeem of andere externe factoren [3]. Het is belangrijk om de relatieve vochtigheid binnen de vitrine te beheersen zodat de kunstschaten onder optimale omstandigheden bewaard worden, om zo de degradatie van deze objecten te voorkomen.

Elk vochtbufferend materiaal heeft zijn eigen vochtbufferend vermogen. Dit vermogen wordt uitgedrukt in een *Moisture Buffer Value (MBV)*. Het principe van een vochtbufferend materiaal steunt op het feit dat deze materialen bij een hoge relatieve vochtigheid waterdampdeeltjes opnemen en bij een lage relatieve vochtigheid deze waterdampdeeltjes terug afgeven. Op deze manier heeft het vochtbufferend materiaal als doel het RV-verloop stabiel te houden in de vitrine en indien nodig te doen dalen of stijgen als dit vereist is voor het bewaren van de kunstschat.

1.2 Probleemstelling

Binnen het kader van deze masterproef wordt er gefocust op de relatieve vochtigheid binnen museale vitrines. Veel kunstschaten hebben een specifieke *range* waarbinnen de relatieve vochtigheid moet gelegen zijn om geen schade te ondervinden. Zo moeten bijvoorbeeld organische materialen en fresco's bewaard worden tussen 50-55% RV [4]. Om aan dit RV-bereik te voldoen, is het van belang kennis te hebben van de verschillende soorten vochtbufferende materialen die kunnen worden toegepast in de passieve strategie. Als kunstschaten niet bewaard worden naargelang de behoeften van het object, kan er chemische, fysische en/of biologische schade optreden [5].

Naast het gebruik van vochtbufferende materialen, onderzoekt deze masterproef ook de invloed van de kwaliteit van een vitrine op het RV-verloop in de vitrine. Daarom worden er binnen dit onderzoek verschillende invloedsfactoren op het RV-verloop in de vitrine zoals de luchtdichtheid van de vitrine en de luchtcirculatie in de vitrine onderzocht. Daarnaast wordt er nagegaan of de vitrine op zichzelf al een vochtbufferend vermogen bezit en hoe groot de invloed hiervan is op het RV-verloop in de vitrine.

Naast de invloed van de kwaliteit van de vitrine zelf op het RV-verloop in de vitrine, wordt ook de invloed van de toevoeging van een vochtbufferend materiaal onderzocht. Deze passieve strategie houdt de relatieve vochtigheid constant. Vochtbufferende materialen worden doorgaans in afzonderlijke

sokkels onderaan de vitrine geplaatst. Belangrijk hierbij is dat de lucht vrij kan circuleren tussen het vochtbufferend materiaal en de vitrine zelf. Dit wordt gerealiseerd door uitsparingen te voorzien in de bodem van de vitrine oftewel door verschillende niveaus te voorzien in de bodemplaat van de vitrine [6]. Door de vrije circulatie van de lucht tussen de vitrine-omgeving en het vochtbufferend materiaal, gaan deze materialen een impact hebben op de eigenschappen van de lucht binnen de vitrine. Er is onderzoek nodig naar de invloed van een vochtbufferend materiaal op het RV-verloop binnen dit microklimaat.

Het vochtbufferend vermogen van dergelijke materialen wordt voorgesteld aan de hand van de MBV. Deze waarde wordt bepaald met een experimenteel testprotocol, de Nordtest [7]. Het is echter van belang om rekening te houden met de randvoorwaarden waarmee de MBV bepaald wordt. Het RV-bereik, gebruikt in de Nordtest, wijkt af van de eerder gelijkmatige randvoorwaarden die in de praktijk terug te vinden zijn. Verder onderzoek is nodig naar de noodzaak voor het bepalen van een MBV die in functie staat van de RV.

Ten slotte wordt er binnen dit onderzoek ook getracht een model op te stellen om een RV-voorspelling te doen op basis van opgelegde randvoorwaarden. Deze randvoorwaarden stellen een realistische situatie voor die optreedt binnen een museale ruimte. Op deze manier kan het RV-verloop binnenin een vitrine voorspeld worden. Dit laat musea toe om op voorhand te beslissen of de toevoeging van een vochtbufferend materiaal nodig is naast de boundary control van de vitrine zelf.

1.3 Doelstellingen

Volgende doelstellingen zijn bepaald om het onderzoek voldoende af te bakenen:

1. Wat is de invloed van verschillende parameters op het RV-verloop in een museale vitrine?
 - a. Wat is de invloed van de luchtdichtheid van een vitrine?
 - b. Wat is de invloed van het toevoegen van calciumsilicaat als vochtbufferend materiaal?
 - i. Speelt de locatie van het vochtbufferend materiaal een rol?
 - ii. Kan de luchtcirculatie verbeterd worden met behulp van een ventilator en wat is de invloed hiervan?
 - c. Wat is de invloed het vochtbufferend vermogen van een vitrine zelf?
2. Kan het vochtbufferend vermogen van calciumsilicaat in functie van de RV gesimuleerd worden met behulp van het hygrothermisch simulatieprogramma Delphin?
 - a. Is het nodig om een dynamische MBV te gebruiken die in functie staat van de RV? Of is een eenduidige MBV representatief in alle situaties?
3. Is het mogelijk om het RV-verloop in een vitrine te voorspellen aan de hand van opgelegde randvoorwaarden?

1.4 Opbouw van de thesis

In het eerste deel van deze thesis wordt er een literatuurstudie uitgevoerd a.d.h.v. relevante informatie die gebruikt wordt in dit onderzoek. Vervolgens wordt het experimenteel onderzoek behandeld onder hoofdstuk 3. In dit hoofdstuk worden eerst de gebruikte methodes en materialen toegelicht. Hierna worden de resultaten van de experimenten op de vitrines in detail besproken. Hoofdstukken 4 en 5 bevatten het theoretisch onderzoek. In hoofdstuk 4 wordt het vochtbufferend vermogen van calciumsilicaat in functie van de RV onderzocht. Daarnaast wordt in hoofdstuk 5 een model opgesteld om RV-voorspellingen te maken in een museale vitrine. Tot slot wordt er een besluit getrokken onder hoofdstuk 6. Dit slaat neer op dit onderzoek zelf, de beperkingen van het onderzoek en aanbevelingen voor toekomstig onderzoek.

2 Literatuurstudie

2.1 Inleiding

Door onderzoek te doen naar eerder uitgevoerde studies wordt een duidelijker beeld verkregen van het onderwerp binnen deze thesis. De literatuurstudie is in de eerste plaats opgebouwd uit de oorzaken voor dit onderzoek. Dit bevat de schadefenomenen die kunnen optreden bij het fout bewaren van kunstschat, de beheersing van de relatieve vochtigheid die momenteel wordt toegepast en de omgevingscondities waarin de kunstschat dienen bewaard te worden. Het tweede deel van deze literatuurstudie gaat dieper in op de materialen die gebruikt worden binnen dit onderzoek. Het derde en laatste deel bevat de theoretische beschrijving van enkele eigenschappen van vochtbufferende materialen.

2.2 Schadefenomenen

Kunstschat die bewaard wordt in musea kunnen door externe factoren drie soorten degradatie ondergaan, namelijk chemische, mechanische en biologische. De externe factoren zorgen meestal voor een RV-fluctuatie of een temperatuurverandering. Fluctuaties in RV-waarden worden gezien als de grootste oorzaak voor degradaties aan kunstschat [8].

2.2.1 Chemische degradatie

Er wordt gesproken van chemische degradatie wanneer de degradatie van de kunstschat wordt veroorzaakt door één of meerdere chemische reacties [8]. Een RV-fluctuatie zorgt er in dit geval voor dat twee fenomenen optreden als het gaat over organische verbindingen: hydrolyse en oxidatie [9].

Hydrolyse beschrijft het fenomeen waar een watermolecule wordt toegevoegd aan een bestaande verbinding waaruit één of twee nieuwe verbindingen ontstaan. Dit zorgt ervoor dat moleculaire ketens worden afgebroken. Vooral bij materialen die zijn opgebouwd uit polymere ketens, zoals leer en papier, zorgt hydrolyse in combinatie met zuren of alkaliën uit de atmosfeer ervoor dat de sterkte, buigzaamheid, kleur en vorm van de materialen verloren gaat [9].

Oxidatie is het fenomeen waarbij een atoom een elektron verliest aan een oxiderende stof. Dit proces zorgt ervoor dat het effect van hydrolyse bevordert wordt. Eén van de schadegevallen die optreedt, gebeurt wanneer organische kleurstoffen onderhevig zijn aan een hoge relatieve vochtigheid. De kleurstoffen gaan dan verbleken [9].

Ook de temperatuur speelt een belangrijke rol in het optreden van chemische degradatie. De snelheid waarmee een chemische reactie optreedt, wordt namelijk in eerste instantie bepaald door de temperatuur. Hogere temperaturen zorgen ervoor dat chemische reacties vaak sneller verlopen. Dit in tegenstelling tot lage temperaturen waardoor de chemische reacties trager verlopen [8]. De chemische stabiliteit van materialen bepaalt hoe snel de degradatie van het materiaal optreedt. Zo ondervinden chemisch instabiele materialen eerder de effecten van degradatie dan chemisch stabiele materialen.

Materialen met lage uitzettingscoëfficiënten worden doorgaans bewaard op lage temperaturen. Materialen die bij lage temperaturen bewaard worden, kunnen bros worden. Dit doet zich vooral voor bij materialen die opgebouwd zijn uit polymere ketens [8].

2.2.2 Mechanische degradatie

De expansie van materialen waaruit kunstschaten zijn opgebouwd, wordt omschreven als mechanische degradatie. Dit fenomeen doet zich voor wanneer er fluctuaties van de RV of de temperatuur aanwezig zijn [8].

Veel organische materialen zijn hygroscopische materialen die steeds een hoeveelheid vocht bevatten. Hygroscopische materialen passen hun vochtgehalte aan naargelang de omgeving waarin ze zich bevinden [9]. Dit verschijnsel gebeurt in twee richtingen. Zo kan water afgegeven worden aan de omgeving, dit wordt desorptie genoemd. Daarentegen kan er ook water uit de omgeving opgenomen worden door deze materialen, wat men absorptie noemt. Het feit dat er zowel de- als absorptie optreedt, betekent dat het volume van deze materialen ook verandert. De volumeverandering zorgt ervoor dat er mechanische schade optreedt aan deze materialen. Absorptie zorgt ervoor dat het materiaal gaat opzwellen, wat op zijn beurt gaat zorgen voor andere schadefenomenen zoals spleten, kromtrekken, etc. Desorptie daarentegen zorgt ervoor dat het materiaal gaat krimpen, wat op haar beurt resulteert in andere schadefenomenen zoals spleten, barsten, etc.

Organische materialen proberen dus altijd een evenwichtsvochtgehalte te bereiken met de omgeving. Natuurlijk zijn niet alle organische materialen hetzelfde en vertonen ze dus andere hygroscopische eigenschappen. Kunstschaten kunnen ook bestaan uit verschillende materialen. Dit betekent dat deze afzonderlijke materialen diverse schade kunnen oplopen.

Wanneer de temperatuur in de ruimte waarin de kunstschat bewaard wordt grote schommelingen ondergaat, treedt er mechanische degradatie op aan de kunstschat. Dit wordt veroorzaakt door het thermisch uitzetten of krimpen van de materialen waaruit de kunstschat is gemaakt. Temperatuurverschillen ontstaan op verschillende manieren. Ze worden veroorzaakt door zowel menselijke als natuurlijke invloeden. Zo zorgt blootstelling aan zonlicht ervoor dat de temperatuur van de kunstschat verhoogt. Daarnaast zorgt de aansturing van elektrische verwarming of andere verwarmingselementen ook voor temperatuurveranderingen [8].

Het optreden van mechanische degradatie doet zich vooral voor bij materialen die een grote uitzettingscoëfficiënt hebben. Materialen zoals hout en papier worden dus minder aangetast door mechanische degradatie dat voortkomt uit temperatuurverschillen. Daarentegen zijn metalen, die eerder hogere uitzettingscoëfficiënten hebben, wel vatbaarder voor mechanische degradatie. Er dient hierbij wel opgemerkt te worden dat bijvoorbeeld het materiaal hout wel een mechanische degradatie kan ondergaan door het opnemen van vocht. Hierdoor gaat het hout uitzetten. Mechanische degradatie komt meestal voor bij twee materialen die een verschillende uitzettingscoëfficiënt hebben. Deze materialen gedragen zich dus verschillend van elkaar wanneer er een temperatuurverandering optreedt [8].

Een andere factor die ervoor zorgt dat de temperatuur verandert in een ruimte is de aanwezigheid van mensen in de ruimte. Als er een temperatuurverschil is tussen de ruimte en de mens, zal de mens warmte afstaan aan of opnemen van de omgeving. Mensen produceren immers altijd warmte, hierdoor ontstaat een temperatuurverschil [8].

2.2.3 Biologische degradatie

Wanneer er schade veroorzaakt wordt door schimmeligroei op de kunstschaten, wordt er gesproken van biologische degradatie. De schimmel kan ontstaan als de ondergrond voldoende voedingsstoffen bevat. Organische materialen zijn daarom een geschikte ondergrond voor de groei van schimmels. Maar ook anorganische materialen vormen de basis voor schimmeligroei. Zo ontstaat er schimmeligroei op deze materialen wanneer ze voldoende vuil of vetten bevatten, die dienen als voedingsbodem [8].

Opdat schimmels ontstaan, is er een hoeveelheid vocht nodig aan het oppervlak van de materialen [8]. Dit ontstaan wordt dus bepaald door de relatieve vochtigheid en de temperatuur van het oppervlak. Een te hoge relatieve vochtigheid zorgt ervoor dat schimmels na een bepaalde tijd beginnen te groeien. Het is dus belangrijk om ervoor te zorgen dat er geen te hoge relatieve vochtigheid wordt aangehouden

gedurende een langere periode. Hierbij is het wel van belang om een onderscheid te maken tussen de verschillende materialen. Niet alle materialen zijn even vatbaar voor het ontstaan van schimmels op hun oppervlak.

Een 70% RV in de ruimte waarin de kunstschat bewaard wordt, zorgt in de meeste gevallen voor het ontstaan van schimmels [9]. Maar de groei van schimmels hangt in eerste instantie af van de RV van het materiaal zelf, daarna van de RV van de omgeving waarin het materiaal zich bevindt.

2.3 RV-beheersing voor kunstschatten

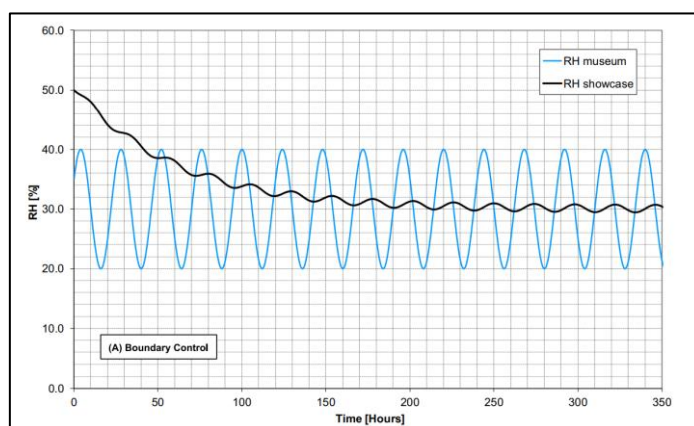
2.3.1 Boundary control

Boundary control wordt bereikt door het gebruik van een vitrine of *display case* waarin de kunstschat wordt bewaard. Het dient als een eerste bescherming tegen schade afkomstig uit de omgeving, die veroorzaakt wordt door het klimaat en de bezoekers in de omgeving [10]. Door gebruik te maken van een vitrine wordt er een afgesloten binnenklimaat gecreëerd voor de kunstschat die bewaard dient te worden. Op deze manier wordt de kunstschat afgeschermd van de grotere ruimte waarin het zich bevindt. Een voorbeeld van een vitrine, die instaat voor de boundary control, is getoond in Figuur 1.



Figuur 1: Vitrine Gallo-Romeins Museum Tongeren

Deze vitrine heeft als buitenste laag in eerste instantie een dubbele functie en vervult met het gebruik van hygroscopische materialen ook een derde functie. De dubbele functie omvat het thermisch en hygiënisch beschermen van de kunstschat tegen de ruimte waarin de vitrine staat. Wanneer de vitrine is opgebouwd uit hygroscopische materialen vervult deze ook een derde functie. De vitrine draagt dan zelf al een groot deel bij aan het creëren van een gunstig binnenklimaat voor de bewaring van de kunstschat. Zo draagt bijvoorbeeld het gebruik van een houten vitrine bij aan het afvlakken van RV-fluctuaties binnen de vitrine wanneer er zich RV-fluctuaties voordoen in de ruimte [11]. Deze afvlakking is zichtbaar in Figuur 2.



Figuur 2: Effect van boundary control op het RV-verloop in een vitrine [11, p. 280]

Boundary control kan in bepaalde gevallen voldoende bescherming bieden om kunstschaten te bewaren. Maar wanneer er aanzienlijke verschillen zijn tussen de RV-condities in de ruimte en de RV-condities in de vitrine moet er overgeschakeld worden naar extra maatregelen. Deze extra maatregelen betekenen de toepassing van *passive of active control*.

2.3.2 Passive control

Passive control maakt gebruik van vochtbufferende materialen die in de vitrine geplaatst worden [11]. Deze vochtbufferende materialen zijn in dit geval vooral hygroscopische materialen die de RV in het binnenklimaat beheersen. De hygroscopische materialen zorgen ervoor dat de RV-fluctuaties van buitenaf afgevlakt worden. Op deze manier wordt de RV binnen de vitrine constant gehouden tussen een bepaald RV-domein. De werking van deze materialen wordt verder uitgelegd in paragraaf 2.7.1.

2.3.3 Active control

Wanneer het gebruik van boundary control in samenwerking met passive control niet voldoende is om het gewenste RV-bereik te bereiken en handhaven, is het mogelijk om nog een extra maatregel te nemen. Er wordt dan gesproken over het toepassen van active control. Active control bestaat uit het plaatsen van een *airconditioning unit* in de vitrine zodat het binnenklimaat geregeld wordt van buitenaf. Maar het gebruik van een dergelijke unit zorgt ervoor dat de onderhoudskosten en de initiële kosten voor musea hoog oplopen. Daarnaast zou het defect raken van de unit ervoor zorgen dat er plotseling zeer grote verschillen in omgevingscondities ontstaan. Zo wordt de temperatuur en relatieve vochtigheid niet meer gecontroleerd. Dit heeft een negatieve invloed op de kunstschaten die bewaard worden in de vitrine. Vandaar dat deze oplossing doorgaans niet wordt toegepast in de praktijk [11].

2.4 Bewaring van kunstschaten

Niet elke kunstschat dient bewaard te worden in hetzelfde RV-bereik. Elk materiaal heeft zijn eigen voorwaarden voor een optimale bewaring. Het ontwikkelingsorgaan voor de Schotse museumsector, *Museums Galleries Scotland*, maakt een onderscheid tussen verschillende materialen en hun RV-bereik [12]. Tabel 1 toont de meest voorkomende materialen met hun optimale RV-bereik.

Tabel 1: Materialen met hun optimale RV-bereik volgens Museums Galleries Scotland [12]

Materiaal	RV-bereik [%]
Hout, leer en vezelcomponenten	40-60
Steen, keramiek en inerte materialen	20-30
Ijzer	< 15
Glas	40-60
Textiel	30-50
Ivoor en been	50-60
Schilderijen op canvas	40-60
Perkament	55-60

Belangrijk hierbij is dat niet elk museum dezelfde eisen stelt voor de bewaring van kunstschaten. Zo heeft bijvoorbeeld het Gallo-Romeins Museum te Tongeren hiervoor andere RV-bereiken vooropgesteld, zoals getoond in Tabel 2.

Tabel 2: Materialen met hun optimale RV-bereik volgens Gallo-Romeins Museum te Tongeren [4]

Materiaal	RV-bereik [%]
Ijzer en brons	< 30
Been, hout en leer	50-55
Aardewerk, steen en glas	50

Door de eisen van beide musea te vergelijken, valt op dat er geen algemene regels zijn die voor alle musea gelden. Elk museum staat namelijk in voor zijn eigen beleid. Er wordt wel vastgesteld dat bepaalde materialen zeker rond een bepaald RV-bereik bewaard moeten worden. Zo wordt hout, een veelgebruikt materiaal in kunstschaten, best bewaard rond een RV van 50%.

2.5 Ontwerp van een vitrine

2.5.1 Luchtdichtheid

Museale vitrines vormen een besloten ruimte die leidt tot een microklimaat in tentoonstellingsruimtes. Het macroklimaat in de museumruimte, dat vaak wordt gekenmerkt door een minder veeleisend milieubeheer, is meestal gescheiden van het buitenklimaat door de gebouwschil [13]. Met deze veronderstelling wordt een eerste globale klimaatbeheersing uitgevoerd. Dit met het gebruik van een algemeen HVAC-systeem omdat in het macroklimaat geen bijzonder strenge klimaatvereisten gegarandeerd dienen te worden. In het microklimaat, gecreëerd door de vitrine, is een nauwkeurigere beheersing van het klimaat vereist. Dit wordt alleen gerealiseerd als de vitrine voldoende luchtdicht is ten opzichte van de museumruimte [11].

Het luchtdebiet Q in een vitrine wordt gegenereerd door natuurlijke ventilatie en vindt plaats via kleine spleetjes, onvolkomen afdichtingen en openingen voor bedrading. Omdat het luchtdebiet afhankelijk is van de grootte van de geventileerde ruimte, leidt dit tot een complexe berekening. Daarom wordt doorgaans de term ventilatievoud (n), ook wel luchtverversingssnelheid genoemd, gebruikt voor het uitdrukken van de luchtdichtheid. De term is afkomstig uit de bouwsector en heeft als voordeel dat het algemeen bruikbaar is voor het uitdrukken van de luchtdichtheid van een volume. Algemeen wordt deze term uitgedrukt in het aantal luchtverversingen per uur (h^{-1}). Omdat museale vitrines een hoge graad van luchtdichtheid behalen, is het interessanter het ventilatievoud uit te drukken in dagen (d^{-1}). Formule (1) toont de formule voor het ventilatievoud [11].

$$n = \frac{Q}{V} \tag{1}$$

Met: Q = de luchtstroom [m^3/s]

V = het volume van de ruimte [m^3]

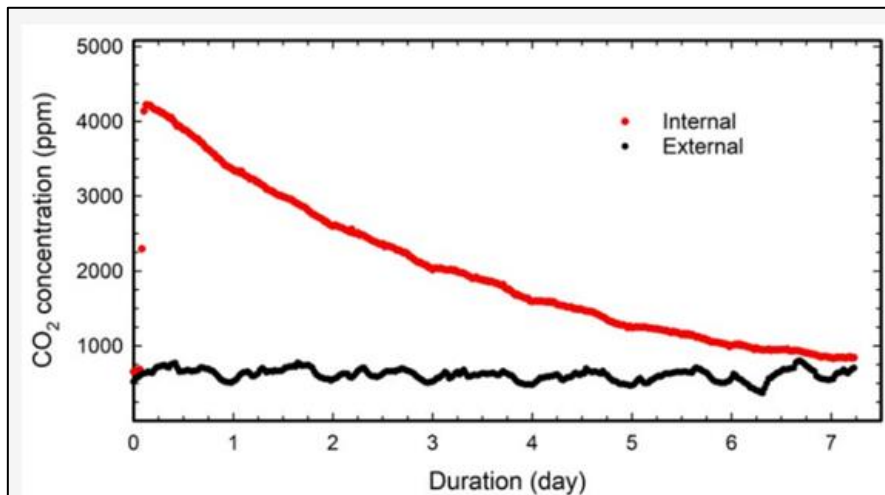
Om de relatieve vochtigheid te bepalen in een vitrine zijn drie parameters van groot belang: het ventilatievoud n , de dampdiffusieweerstand van de museale vitrine R_{eq} en de oppervlakte/volume-factor van de vitrine $\frac{A}{V}$. Deze laatste parameter is in functie van de grootte en de vorm van de vitrine. Dit is een waarde die wordt vastgelegd bij het ontwerpen van de vitrine, afhankelijk van de behoeften van de museumopstelling. De andere twee parameters n en R_{eq} , vertegenwoordigen daarentegen de sleutelfactoren voor een zo goed mogelijke beheersing van de relatieve vochtigheid [11].

Gebouwen hebben doorgaans een gemiddeld ventilatievoud van $0,3 - 0,7 \text{ h}^{-1}$, dit is gelijk aan $7,2 - 16,9 \text{ d}^{-1}$. In museale vitrines is deze waarde veel kleiner, hier varieert deze waarde tussen $0,1 - 0,5 \text{ d}^{-1}$ [11]. Bovendien is de $\frac{A}{V}$ - verhouding in een vitrine veel groter dan in een gebouw. In vitrines zijn zowel diffusief als convectief damptransport van belang. Dit maakt duidelijk dat de luchtdichtheid van de vitrine (n) en zowel de gasdiffusieweerstand van het vitrinemateriaal (R_{eq}) zeer belangrijk zijn voor de beheersing van het microklimaat.

Museale vitrines worden ingedeeld op basis van hun ventilatievoud. Een laag ventilatievoud leidt tot een betere stabiliteit van de relatieve vochtigheid bij gegeven temperatuurschommelingen. Als het macroklimaat in de museumruimte stabiel is, zonder grote RV-fluctuaties, dienen er minder vochtbufferende materialen gebruikt te worden. Minder materiaal leidt dan weer tot een economisch voordeel voor musea [14] - [15].

2.5.2 Tracer verval test

Een belangrijk aspect voor de kwantificering van de luchtdichtheid is de methode om het ventilatievoud te meten. Voor deze meting is een standaardmethode ontwikkeld, waarbij een tracergas gebruikt wordt. Een veelgebruikt tracergas voor deze test is koolstofdioxide (CO₂). Dit gas heeft de eigenschappen dat de oplosbaarheid en het verspreidingsgedrag gelijkaardig zijn aan die van lucht. De tracer verval test is een meting van korte duur, die afhankelijk van het optredende ventilatievoud, enkele uren tot dagen duurt. Het is belangrijk dat het gas zich goed vermengt met de lucht in de vitrine [16]. Figuur 3 toont het resultaat van een tracer verval test. Hierbij is de CO₂-concentratie uitgezet in functie van de tijd over de volledige testduur.



Figuur 3: Resultaat van een tracer verval test in een plastic container [11, p. 35]

Door in Formule (2) de afname van de tracergasconcentratie in functie van de tijd in te vullen, wordt het ventilatievoud als volgt bepaald [17]:

$$n_{eq} = \frac{\ln C_{in1} - C_{ex} - \ln C_{in2} - C_{ex}}{\Delta t} \quad (2)$$

Met: n_{eq} = ventilatievoud [d⁻¹]

C_{in1} = interne concentratie van tracergas bij aanvang van de test [ppm]

C_{in2} = interne concentratie van tracergas aan het testuiteinde [ppm]

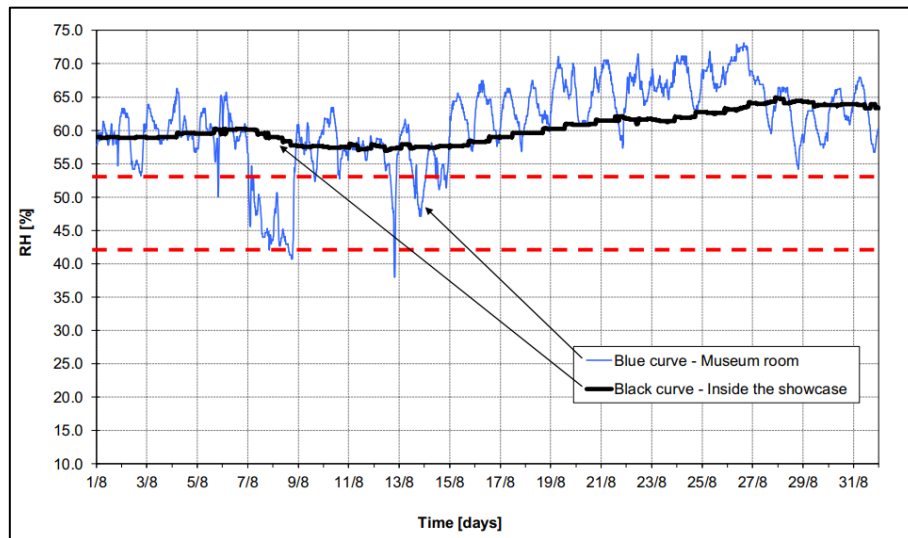
C_{ex} = externe (kamer)concentratie van tracergas [ppm]

Δt = duur van de meting [d]

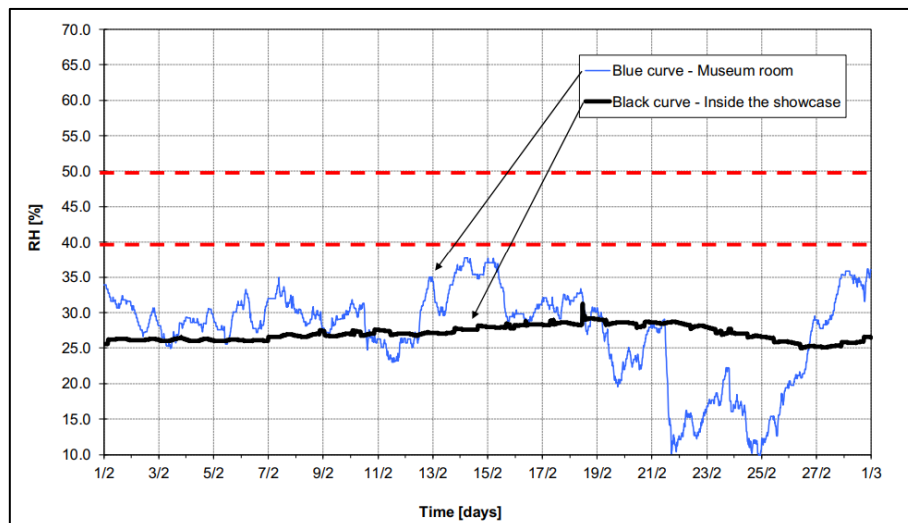
Deze testmethode wordt gebruikt voor het bepalen van de luchtdichtheid van de vitrine. Uit [11] blijkt dat de waarde van n_{eq} zeer effectief is voor het karakteriseren van het RV-gedrag in de vitrine.

De concentratie van het gas vormt de basis voor de tracer verval test. Er zijn drie manieren om de test uit te voeren, waarbij het gas telkens op een andere manier geïnjecteerd wordt. Toediening van het gas voor de meting, tijdens de meting met een constant debiet of tijdens de meting met een variabel debiet. De eerste manier wordt gebruikt voor de analysering van de afname van de gasconcentratie in de besloten ruimte. Bij de tweede manier, de constante injectiemethode, wordt de luchtstroom bepaald uit een stijging van de concentratie gas. Tot slot is er de derde manier waarbij de concentratie van het gas constant wordt gehouden door een variabel injectiedebiet [18].

In [11] zijn er twee cases uitgewerkt op professionele museale vitrines. Een eerste experiment is uitgevoerd op een relatief kleine vitrine, gemaakt uit *Medium Density Fibreboard (MDF)* en plexiglas. Onder in de vitrine is 400 g *Art Sorb* geplaatst als vochtbufferend materiaal. Dit materiaal bevat kleine deeltjes silica, die vocht absorberen of afgeven bij de gewenste RV. De verbindingen tussen de wanden zijn vervaardigd uit polymeerpakkingen. Uit de studie blijkt dat deze vitrine geen goede RV-condities kon garanderen. In de zomer zijn er RV-schommelingen van lange duur en in de winter is de RV zeer laag, dit is af te leiden uit Figuur 4 en Figuur 5. Uiteindelijk blijkt na uitvoering van de luchtdruktest en de tracer verval test dat de vitrine niet voldoende luchtdicht is en de dampdiffusieweerstand te laag is. De reden hiervoor is dat de MDF-wanden niet goed behandeld zijn geweest.



Figuur 4: Resultaten van de RV in de zomer van de oude vitrine, case 1 [11, p. 8]



Figuur 5: Resultaten van de RV in de winter van de oude vitrine, case 1 [11, p. 8]

Uiteindelijk is er een nieuwe vitrine ontwikkeld, gemaakt uit de volgende materialen: plexiglas, staal, aluminium en luchtdichte rubberen verbindingen. Uit de resultaten van de tracer verval test blijkt dat de nieuwe vitrine luchtdichter is dan de oude vitrine. De oude vitrine heeft een waarde van $n_{eq} = 9,31 d^{-1}$ en de nieuwe vitrine heeft een waarde van $n_{eq} = 0,02 d^{-1}$. Hierdoor blijft de werking van de aanwezige hoeveelheid *Art Sorb* in de nieuwe vitrine gedurende het hele jaar intact, terwijl dit bij de oude vitrine helemaal niet het geval is [11]. Dit is te verklaren doordat het binnenklimaat in luchtdichte vitrines minder beïnvloed wordt door het buitenklimaat van de ruimte waarin de vitrine wordt opgesteld.

Een tweede case wordt uitgevoerd op een vitrine die bovenaan voorzien is van een geperforeerde metalen folie. Opnieuw zijn gedurende de wintermaanden de RV-waarden veel lager dan de onderste toegelaten limietwaarde. Ook in de zomermaanden schommelen deze waarden boven de maximaal toegelaten RV. Binnen deze case worden er drie nieuwe vitrines ontwikkeld met als doel een $n_{eq} < 0,3 d^{-1}$ te behalen [11]. Op de drie vitrines is een tracer verval test uitgevoerd. De resultaten worden getoond in Figuur 6.

Showcase →	#9	#5	#18
n_{eq} [1/day]	0.18	0.18	0.29
R^2	0.999	0.995	0.996

Figuur 6: Resultaten van de tracer verval test op de nieuwe vitrines, case 2 [11, p. 10]

Uit de resultaten blijkt dat alle waarden van n_{eq} lager zijn dan $0,3 d^{-1}$. De nieuwe vitrines zijn gebaseerd op een combinatie van boundary en passive control, met integratie van 2 kg Art Sorb, gepreconditioneerd op 50% RV. Uiteindelijk blijkt uit de resultaten dat de vochtbufferende hoeveelheid Art Sorb niet nodig is om de RV binnen het vereiste bereik te houden. Dit valt te verklaren door de hoge luchtdichtheid van de nieuwe vitrine [11].

Uit [11] wordt geconcludeerd dat er veel aandacht besteed moet worden aan het ontwerp van een museale vitrine. Als deze vitrines ontworpen worden, wordt er naar een evenwicht gezocht om enerzijds de economische energiekosten te reduceren en anderzijds een goede bewaring van de kunstschat te garanderen. De eerste fundamentele stap in het ontwerp is om ervoor te zorgen dat de vitrine voldoet aan de vooropgestelde luchtdichtheidseisen zoals eerder beschreven. Als de omstandigheden, nodig voor het bewaren van de kunstschat, het toelaten, is de toepassing van boundary control voldoende om de RV binnen het gewenste bereik te houden.

2.5.3 Richtlijnen voor het ontwerp van een vitrine

In [19] werd vastgesteld dat de luchtverontreinigingsniveaus in moderne vitrines veel hoger liggen dan deze bij traditionele vitrines. Moderne vitrines zijn meestal vervaardigd uit glazen kubussen met glazen afdekplaten en bodemplaten uit gelakte vezelplaat. Oude traditionele vitrines bestaan doorgaans uit gelakte houten materialen als bodem-, afdek – en rugplaten. Doordat moderne vitrines zeer luchtdicht zijn stapelen organische vluchtige stoffen zich op in de vitrine. Deze nieuwe vitrines hebben doorgaans een ventilatievoud rond de $0,25 d^{-1}$.

Vitrines van hoge kwaliteit worden ingedeeld op basis van hun ventilatievoud. Lage waarden zorgen voor een hoge relatieve vochtigheid bij redelijke temperatuurschommelingen [20]. Als het ventilatievoud van een museumvitrine $0,1 d^{-1}$ of minder bedraagt, dan is de vitrine zeer luchtdicht. Als de vitrine te luchtdicht wordt ontworpen, kan het zijn dat gassen en verontreinigingen een probleem vormen wanneer de concentratie ervan te sterk oploopt. Als de kunstschat in de vitrine minder strenge eisen hebben volstaat een ventilatievoud tussen $0,25-1 d^{-1}$ [20].

Wereldwijd worden vitrines tegenwoordig opgebouwd uit chemisch stabiele materialen, wat eerder betekent dat het gebruik van hout of houtcomposieten vermeden wordt [12]. De structuur is voornamelijk opgebouwd uit glazen panelen en metalen platen, maar ook worden organische materialen gebruikt zoals verf, lijm, pakkingen of isolatoren. Deze laatste zorgen bovendien ook voor nieuwe vormen van aantasting of storende effecten op de kunstschaten [20].

2.6 Vitрины gebruikt in het Gallo-Romeins Museum te Tongeren

De professionele vitrine die gebruikt wordt in dit onderzoek is afkomstig van het Gallo-Romeins Museum te Tongeren. De vitrine werd gebruikt in de tijdelijke tentoonstelling ‘Oog in oog met de Romeinen’, die tentoongesteld werd voor een periode tussen 2020 en 2021. In deze tentoonstelling werden verscheidene vitrines van dit type gebruikt om kunstschat tentoon te stellen.

2.6.1 Kunstschat tentoongesteld gedurende tijdelijke tentoonstelling

Binnen de tentoonstelling werden kunstschat uit verschillende materialen tentoongesteld zoals aardewerk, brons, ijzer, edelmetaal, steen, pleisterwerk en hout. Zoals besproken in paragraaf 2.4 hebben elk van deze materialen een optimaal RV-bereik waarin ze bewaard dienen te worden. Metalen zoals brons en ijzer worden best bewaard rond een RV-niveau onder 30%, zonder al te hoge RV-fluctuaties. Andere materialen zoals aardewerk daarentegen worden voor optimale bewaring best bewaard rond een RV van 50%.

De vitrines dienen dus rond het RV-bereik van de kunstschat gepreconditioneerd te worden. Het conditioneren van de vitrines gebeurde, tijdens de tijdelijke tentoonstelling, door gebruik te maken van Pro Sorb cassettes als vochtbufferend materiaal. De optimale werking van dit vochtbufferend materiaal wordt verder besproken in paragraaf 2.7.2.

2.6.2 Vitрины gebruikt tijdens tentoonstellingen

Naast het gebruik van de professionele vitrine voor dit onderzoek werden er nog andere vitrines gebruikt in de tijdelijke tentoonstelling. Deze vitrines verschillen vooral in afmetingen en kleur. Uit verkregen informatie van het Gallo-Romeins Museum te Tongeren is duidelijk dat het merendeel van de vitrines, gebruikt tijdens verschillende tentoonstellingen, is opgebouwd uit MDF [21]. Ook de vitrine die gebruikt wordt binnen dit onderzoek is vervaardigd uit MDF als omkasting van de vitrine.

2.7 Vochtbufferende materialen

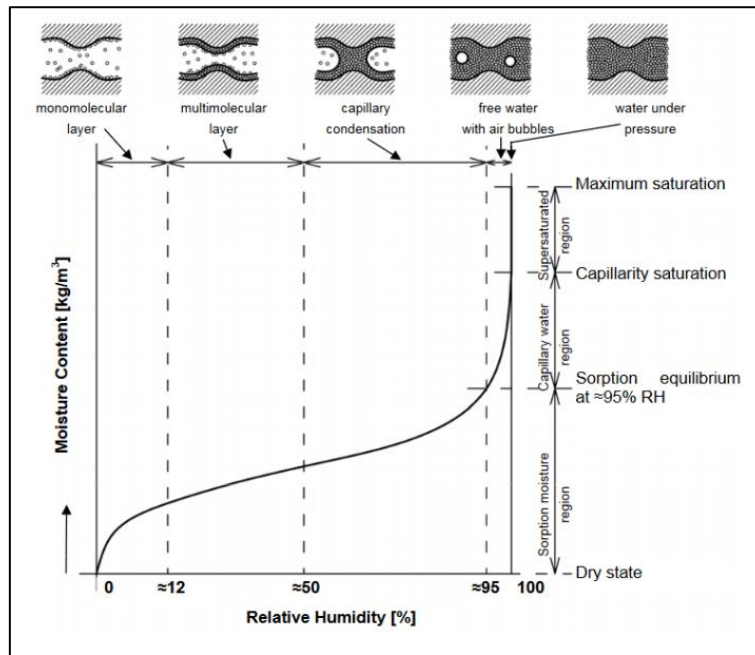
Vochtbufferende materialen worden gebruikt voor de controle van het binnenklimaat binnen de passieve strategie [2]. Het vochtbufferend effect van deze materialen controleert de RV-fluctuaties en reduceert voornamelijk de piekwaardes van de RV. Ieder soort hygroscopisch materiaal heeft een specifiek RV-bereik waarbinnen hun vochtbufferend vermogen optimaal is. Als de RV verandert, zal het hygroscopisch materiaal vocht absorberen of desorberen aan de lucht in de vitrine [16].

2.7.1 Werking vochtbufferend materiaal

2.7.1.1 Vochtabsorptie en hygroscopisch vochtgehalte

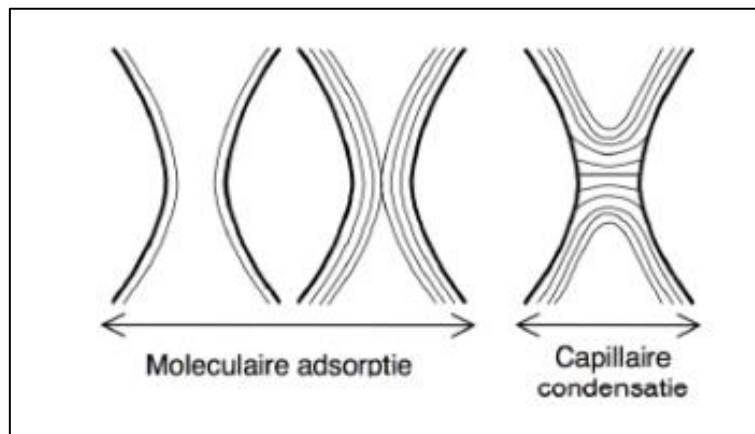
Doorgaans hebben materialen een structuur die bestaat uit een netwerk van kleine poriën of capillairen. De meeste poreuze materialen bevatten een kleine hoeveelheid vocht, namelijk de hygroscopische hoeveelheid vocht. De hoeveelheid hiervan is afhankelijk van de RV waarin het materiaal zich bevindt. De hoeveelheid vocht die bij een bepaalde RV in het materiaal wordt opgeslagen, wordt het evenwichtsvochtgehalte genoemd [22] - [23].

Met de hygroscopische curve, ook wel sorptie-isotherm genoemd, wordt de relatie tussen de RV en het vochtgehalte voorgesteld. Deze curve is getoond in Figuur 7 en valt op te delen in drie zones: de hygroscopische zone, de capillaire zone en de over-capillaire zone [24].



Figuur 7: Hygroscopische curve van een poreus materiaal [23, p. 19]

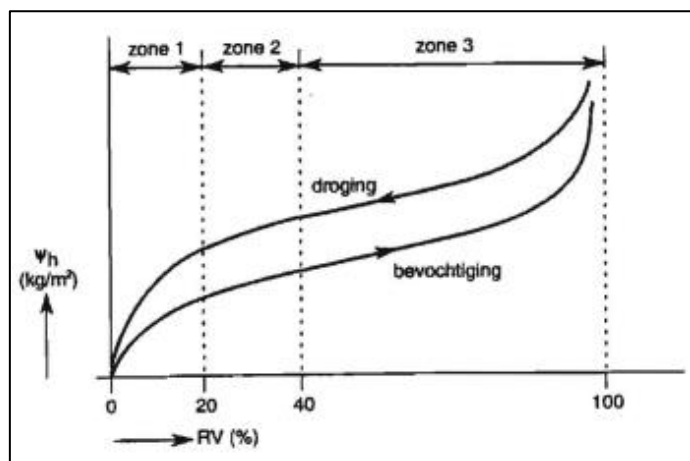
In de hygroscopische curve wordt duidelijk dat het poreus materiaal bij lage RV vocht begint op te nemen tot een evenwichtsvochtgehalte bij 95% RV. Vochtopname gebeurt door moleculaire absorptie en capillaire condensatie, dit vormt ook de hygroscopiciteit van een poreus materiaal. Moleculaire absorptie komt voor wanneer de lucht met waterdamp in contact komt met de poriënwallen van het materiaal. Dit treedt eerder op bij lage waarden van RV tussen 0-40%. Capillaire condensatie treedt op wanneer vochtige lucht condenseert boven een hol wateroppervlak bij hoge waarden van RV tussen 40-100% [23]. Deze hygroscopische verschijnselen zijn getoond in Figuur 8.



Figuur 8: Vochtupname in de hygroscopische zone: moleculaire absorptie en capillaire condensatie [23, p. 36]

2.7.1.2 Hysteresis

Hygroscopische materialen worden vaak gekenmerkt door het hysteresis-effect. Hierbij wordt er rekening gehouden met twee curves: bevochtiging en droging. Hysteresis is het fenomeen waarbij het vochtgehalte bij een bepaalde RV verschilt, afhankelijk of de omstandigheden eerst droger waren (adsorptie) of eerst vochtiger waren (desorptie). Deze ad- en desorptiecurves, getoond in Figuur 9, worden bepaald door een volledig droog materiaal te laten verzadigen en een volledig nat materiaal te laten drogen. Het fenomeen hysteresis duidt erop dat niet alleen de waarden van belang zijn, maar dat ook de richting van het proces bepalend is [22].



Figuur 9: Hysteresis bij hygroscopische materialen [22, p. 23]

2.7.2 Vochtbufferende materialen in museale vitrines

Uit [4], [25] blijkt dat Art Sorb, Pro Sorb en Silica gel E doorgaans gebruikt worden in museale vitrines voor de bewaring van kunstschatten. In Tabel 3 worden deze materialen getoond met hun desbetreffende optimale RV-bereik en de verschillende verpakkingsmogelijkheden.

Tabel 3: Vochtbufferende materialen met hun optimaal RV-bereik en verschillende verpakkingsmogelijkheden

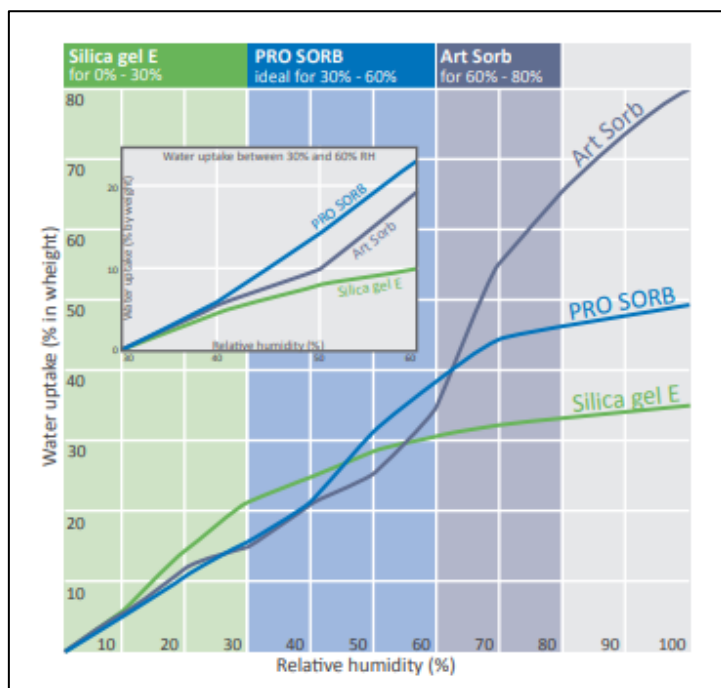
Hygroscopisch buffermateriaal	RV-bereik [%]	Verpakkingsmogelijkheden
Pro Sorb	30-60	Cassettes, losse korrels, zakjes
Art Sorb	60-80	Cassettes, losse korrels, zakjes, sheets
Silica gel E	0-30	Cassettes, losse korrels, zakjes

De verschillende verpakkingsmogelijkheden worden getoond in Figuur 10.



Figuur 10: Verschillende verpakkingsmogelijkheden a) cassette (Pro Sorb) b) zakje (Pro Sorb) c) losse korrels (Pro Sorb) d) sheet (Art Sorb) [6]

Het optimale RV-bereik van deze materialen wordt bevestigd door Figuur 11. Als naar de helling van de hygroscopische curves wordt gekeken, wordt er afgeleid binnen welk RV-bereik elk materiaal optimaal werkt. Waar de helling van de curve het steilst is, ondervindt het materiaal zijn optimale werking [25].



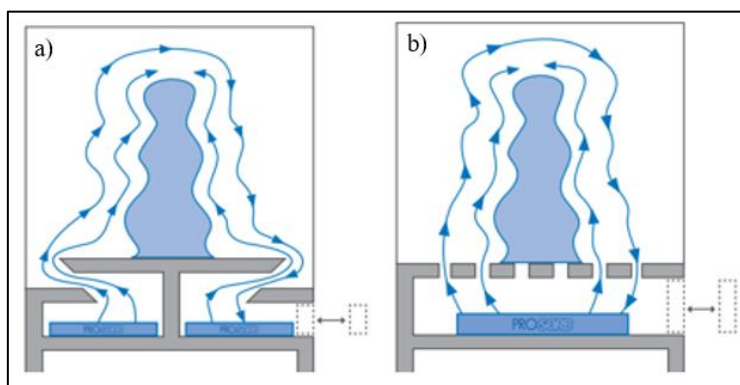
Figuur 11: Hygroscopische curven Silica gel E, Pro Sorb en Art Sorb [25, p. 1]

Vochtbufferende materialen gemaakt op basis van silicagel worden het meest gebruikt binnen museale vitrines. Silicagel bestaat uit vaste, vochtabsorberende kristallen van een silicaat, gemaakt uit natriumsilicaat. Het materiaal bindt water op een chemische manier aan zich vast. Dit proces kan blijven doorgaan tot het materiaal verzadigd raakt. Als verzadiging optreedt, kan dit materiaal geregenereerd worden door het te drogen bij 150 °C. Hierna is het weer in staat om vocht op te nemen. De levensduur van de vochtbufferende materialen ligt tussen de 10 en 20 jaar [16], [26].

De vochtbufferende materialen zijn beschikbaar in verschillende vormen. In museale vitrines wordt doorgaans gekozen voor het gebruik van cassettes en zakjes. Cassettes hebben geen last van stof en zijn eenvoudig te hanteren. Zakjes hebben dan weer als voordeel dat ze flexibel zijn en op maat gemaakt kunnen worden voor de vitrine [25].

2.7.3 Gebruik van het vochtbufferend materiaal

Naast het gebruikte materiaal is ook de plaatsing van de hygroscopische materialen van belang. Planken of lades in de vitrine die van buitenaf toegankelijk zijn, maken het mogelijk het materiaal in de vitrine te plaatsen zonder de vitrine zelf te moeten openen. Als er met panelen wordt gewerkt, worden deze materialen ook aan de achterwand van de vitrine bevestigd. Het materiaal kan ook geplaatst worden in een afzonderlijke sokkel onder in de vitrine zoals in Figuur 12 is getoond [25].



Figuur 12: Plaatsing hygroscopisch materiaal vitrine a) vitrine met verhoogde vitrinebodem b) vitrine met spleten in de bodem [25]

Figuur 12 toont eveneens aan dat de luchtcirculatie in een vitrine van groot belang is om de werking van de vochtbufferende materialen te garanderen. Dit kan gerealiseerd worden door een verhoogde vitrinebodem, getoond in Figuur 12 a). De tweede manier is het voorzien van spleten in de vitrinebodem, getoond in Figuur 12 b). Eventueel wordt er nog een kleine ventilator geïntegreerd in de vitrine voor deze luchtcirculatie te bevorderen [25].

De te gebruiken hoeveelheid vochtbufferend materiaal is afhankelijk van enkele factoren. Voornamelijk spelen hierin de kwaliteit van de vitrine en het omgevingsklimaat een grote rol. De algemene regel luidt: hoe meer materiaal, hoe lager de fluctuaties en hoe minder onderhoud de vitrine nodig heeft. Volgens [25] is het gangbaar om te beginnen met 2-4 kg vochtbufferend materiaal per m³ vitrinevolume.

2.8 Moisture Buffer Value

De noodzaak om een gestandaardiseerde grootheid te definiëren voor het bepalen van het vochtbufferend vermogen van een materiaal heeft geleid tot de Moisture Buffer Value (MBV) [27]-[28].

2.8.1 Testprotocol: Nordtest

Het Nordtest-protocol is ontwikkeld voor de experimentele bepaling van het vochtbufferend vermogen van een hygroscopisch materiaal. Hierbij wordt het *sample* onderworpen aan omgevingsveranderingen die als een blok golf in dagcycli verlopen. Deze dagcycli zijn gebaseerd op 8 uur hoge relatieve vochtigheid (75%), gevolgd door 16 uur lage relatieve vochtigheid (33%). Deze vochtigheidsniveaus zijn bepaald omdat ze worden gehandhaafd door zoutoplossingen. Tijdens de testprocedure is het belangrijk dat de opgelegde RV-condities snel kunnen veranderen, daarom wordt de test doorgaans uitgevoerd in een klimaatkast. Als referentietemperatuur wordt 23 °C aangenomen [7], [27]- [28].

De samples worden meestal op één of twee oppervlakken na afgedekt. Het is van belang dat de minimale blootgestelde oppervlakte 0,01 m² bedraagt. De dikte van het sample moet minstens gelijk zijn aan de penetratiediepte voor dagelijkse vochtigheidsvariaties of 10 mm als deze waarde groter is. Algemeen geldt dat er minstens drie samples getest moeten worden. Met een nauwkeurige weegschaal dienen de samples voortdurend gewogen te worden met voldoende tussenpauzes. Zo wordt de vochtmassa van het sample doorlopend bepaald gedurende het experiment. De Nordtest bestaat uit minimaal drie cycli, waarbij de gewichtsamplitude niet meer dan 5% mag variëren van dag tot dag [7].

Binnen de Nordtest moeten de minimale en de maximale waarde van zowel de vochtmassa en de relatieve vochtigheid gekend zijn om de MBV te bepalen. Het Nordtest-protocol definieert de MBV als een normalisatie van de vochtigheid massa-amplitude per m² open oppervlak en de procentuele RV-verandering [29]:

$$MBV_{8u} = \frac{m_{max} - m_{min}}{A * (\varphi_{high} - \varphi_{low})} \quad (3)$$

Met: $m_{max/min}$ = de maximale of minimale massa van het sample [g]
 A = het blootgestelde oppervlak van het sample [m²]
 $\varphi_{high/low}$ = de hoge/lage RV toegepast in de test [%]

Formule (3) geldt voor het bepalen van de MBV als het sample gedurende 8 uur blootgesteld wordt aan een hoge RV van 75%. Er is een zeer grote variatie in vochtproductie door de verschillende ruimtes, zo is er bijvoorbeeld in een badkamer een constante vochtproductie in vergelijking met een kantoorruimte. Hierdoor is het interessant om ook de MBV te bepalen na 1 uur blootstelling aan hoge RV, deze bijkomende MBV is eerder ontstaan uit het standpunt van gebouwen. De bepaling van deze MBV is gebaseerd op hetzelfde principe als de MBV na 8 uur blootstelling aan hoge RV [29]:

$$MBV_{1u} = \frac{m_{m1} - m_{min}}{A \cdot (\varphi_{high} - \varphi_{low})} \quad (4)$$

Met: $m_{m1/min}$ = de massa na 1 uur blootstelling aan hoge RV of minimale massa van het sample [g]
 A = het blootgestelde oppervlak van het sample [m²]
 $\varphi_{high/low}$ = de hoge/lage RV toegepast in de test [%]

Formule (3) en (4) worden gecombineerd tot volgende uitdrukking:

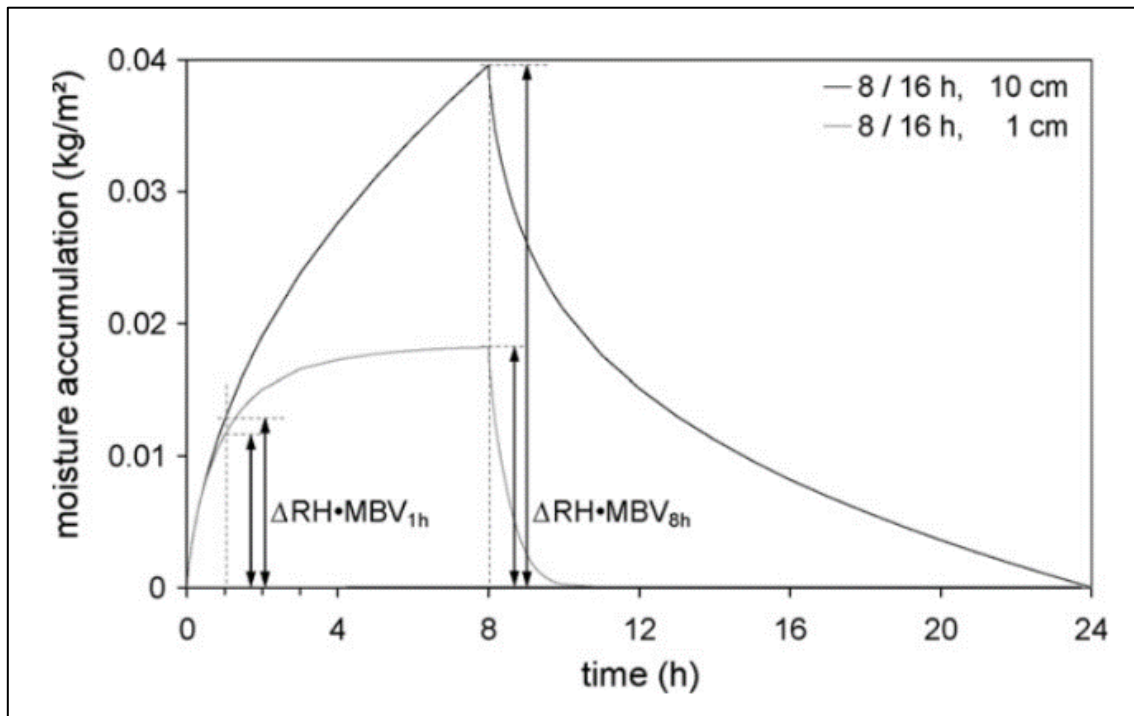
$$MBV^* = \alpha \cdot MBV_{8u} + (1 - \alpha) \cdot MBV_{1u} \quad (5)$$

Met: MBV^* = de aan het vochtproductie-interval aangepaste MBV
 $MBV_{8u/1u}$ = de gemeten MBV-waarden
 α = de wegingsfactor

De wegingsfactor α is afhankelijk van het tijdsinterval, in [30] zijn de volgende waarden vooropgesteld voor de bepaling van α :

- $0 \text{ h} < \text{vochtproductie} - \text{interval} \leq 2 \text{ h}: \alpha = 0,0$
- $2 \text{ h} < \text{vochtproductie} - \text{interval} \leq 6 \text{ h}: \alpha = 0,5$
- $6 \text{ h} < \text{vochtproductie} - \text{interval} \leq 8 \text{ h}: \alpha = 1,0$

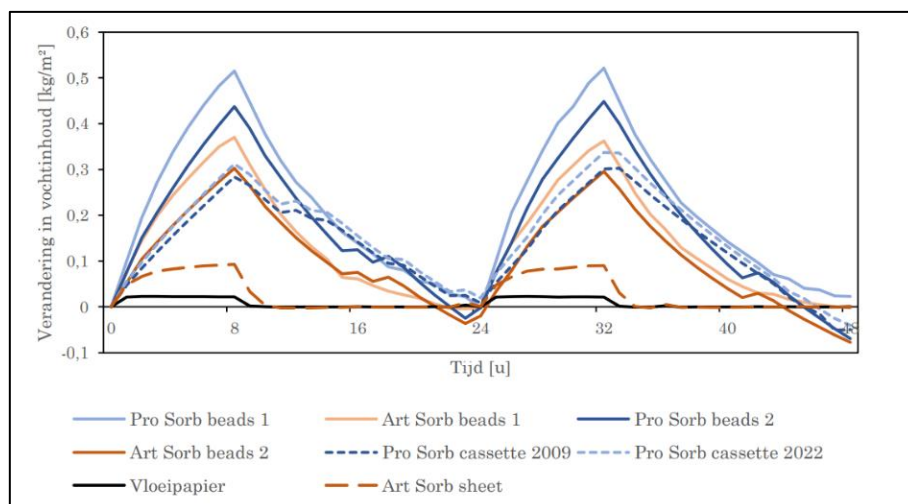
In [30] zijn de vochtbufferprestaties van verschillende materialen, zoals gipspleister, onderzocht met behulp van de Nordtest. Voor elk tijdstip wordt de gewichtsverandering van het sample bijgehouden. Uit deze gewichtsverandering wordt bepaald hoeveel vocht het sample heeft geabsorbeerd. Uiteindelijk wordt de MBV berekend uit de opgenomen vochthoeveelheid door het sample en de minimale en maximale RV. Dit principe is geïllustreerd in Figuur 13.



Figuur 13: Bepaling van de $MBV_{1u/8u}$ voor 1 cm en 10 cm gipspleister (Nordtest) [30, p. 387]

In [4] is dit Nordtest-protocol uitgevoerd op enkele veelgebruikte hygroscopische materialen in museale vitrines, namelijk Pro Sorb, Art Sorb, vloeipapier en *Clay Pack*.

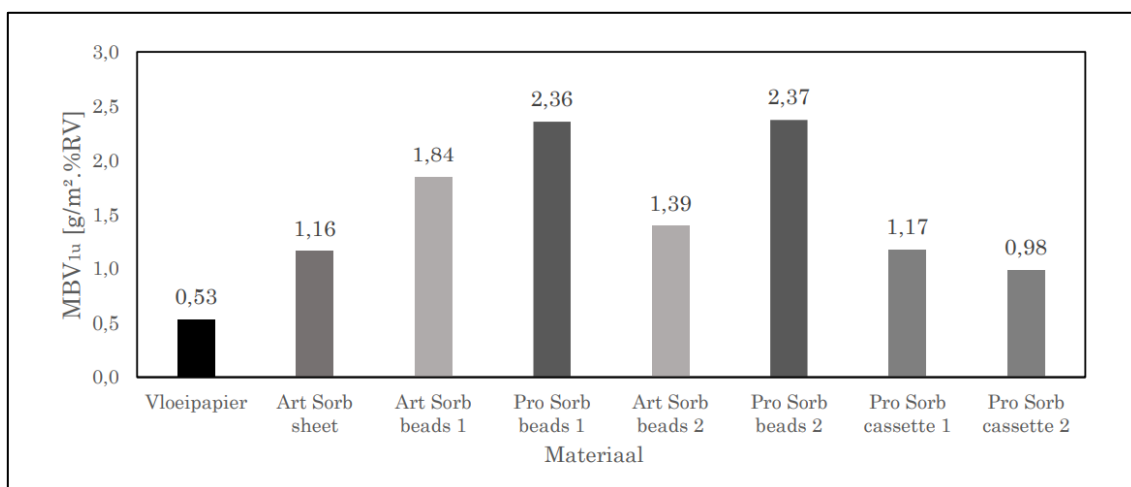
De resultaten van al deze materialen worden vergeleken in Figuur 14. Hieruit valt af te leiden dat de Art Sorb *sheet* en het vloeipapier zeer weinig vocht kunnen opnemen en snel hun maximale capaciteit bereiken. De andere materialen tonen een redelijk gelijkaardig patroon in verandering in vochtinhoud. Hier is het grote verschil in de hoeveelheid vocht die wordt opgenomen of afgegeven. Als er naar de helling wordt gekeken van Pro Sorb *beads* in vergelijking met Art Sorb, wordt er vastgesteld dat Pro Sorb meer vocht opneemt of afgeeft dan Art Sorb onder de condities van de Nordtest (75-33%) [4].



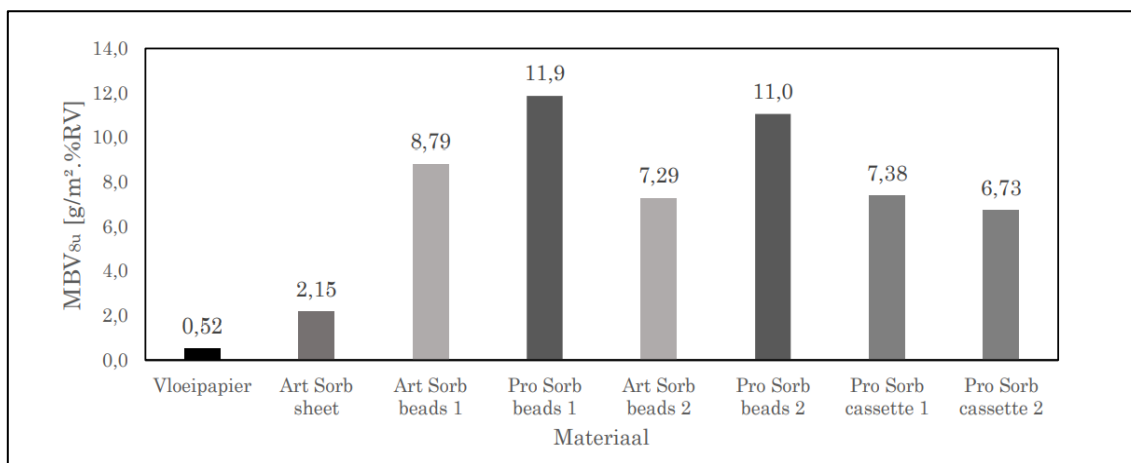
Figuur 14: Vergelijking verandering in vochtinhoud Pro Sorb, Art Sorb en vloeipapier [4, p. 65]

Wat ook interessant blijkt uit Figuur 14 is dat de ouderdom van het materiaal ook een rol speelt. Zo valt af te leiden dat de Pro Sorb cassette van 2022 meer vocht opneemt dan de cassette uit 2009. Een aandachtspunt hierbij is dat de meetnauwkeurigheid eveneens van belang is. Als de laagdikte vergeleken wordt tussen Pro Sorb beads 1 en Pro Sorb beads 2, respectievelijk 4 mm en 15 mm, is duidelijk dat deze dikte ook invloed heeft op de verandering in vochtinhoud.

Wanneer deze procedure is uitgevoerd, wordt de MBV berekend voor 1 uur en 8 uur blootstelling aan hoge RV. Deze resultaten worden weergegeven in Figuur 15 en Figuur 16, hieruit wordt een goede vergelijking gemaakt tussen de verschillende vochtbufferende materialen.



Figuur 15: MBV na 1 uur blootstelling aan hoge RV voor de verschillende materialen [4, p. 66]

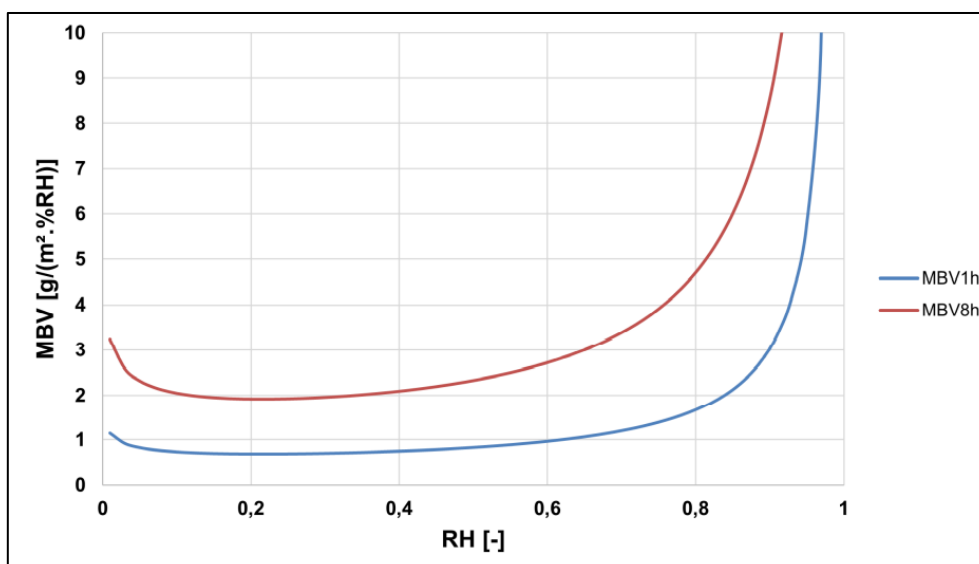


Figuur 16: MBV na 8 uur blootstelling aan hoge RV voor de verschillende materialen [4, p. 66]

Uit [4] blijkt dat vloepapier een slecht vochtbufferend vermogen heeft. Daarnaast wordt ook afgeleid dat beads over het algemeen beter vocht bufferen dan sheets. Dit valt te verklaren door het feit dat sheets slechts een beperkte dikte hebben van 1,8 mm en bij beads zelf de dikte bepaald wordt. Zowel voor Pro Sorb en Art Sorb geldt dat deze materialen uitstekend vocht kunnen bufferen, ook presteert Pro Sorb over het algemeen beter dan Art Sorb bij de condities van de Nordtest. Dit is ook te verklaren omdat het optimale RV-bereik van Pro Sorb volledig binnen het bereik van de Nordtest valt. Beads staan in tegenstelling tot cassettes rechtstreeks in contact met de omgeving, hierdoor is de MBV van beads hoger dan deze voor cassettes. Echter wordt er toch aangeraden door Waller [25] om zakjes of cassettes te gebruiken bij vitrines, vanwege de hanteerbaarheid en het gemak om te reconditioneren.

2.8.2 Dynamische MBV

In de realiteit is de MBV afhankelijk van de RV. Door een MBV in functie van de RV te gebruiken wordt er steeds met een representatieve waarde van de MBV van een materiaal gewerkt. Zo is in eerder uitgevoerd onderzoek [31] door Trimpeneers het vochtbufferend vermogen in functie van de RV van het materiaal calciumsilicaat experimenteel onderzocht. Het resultaat hiervan is getoond in Figuur 17.



Figuur 17: MBV_{1u} en MBV_{8u} voor calciumsilicaat in functie van RV [31, p. 177]

Hieruit blijkt dat het vochtbufferend vermogen van calciumsilicaat in functie staat van de RV. Namelijk bij een hogere RV heeft calciumsilicaat een groter vochtbufferend vermogen dan bij lagere RV. Het optimale RV-bereik van calciumsilicaat ligt in dezelfde range als dit van Art Sorb (60-80%). Dit wordt ook bevestigd door de hogere MBV vanaf 60% RV.

2.8.3 Classificatie

Volgens [32] - [33] wordt de praktische MBV, bepaald met de Nordtest, ingedeeld in vijf categorieën. Figuur 18 toont de grenzen van de MBV voor de verschillende categorieën. Echter slaat deze classificatie terug op slechts beperkt onderzoek van bouwmaterialen en wordt er niet dieper ingegaan op vochtbufferende materialen gebruikt bij museale vitrines. Vochtbufferende materialen zijn specifiek ontwikkeld om optimaal vocht te bufferen tussen een bepaald RV-bereik, waarin hun MBV-waarde het hoogst is. Hierdoor zullen de MBV-waarden veel hoger liggen voor de materialen gebruikt binnen deze thesis, zoals eerder aangetoond in Figuur 16.

MBV _{practical} class	Minimum MBV level	Maximum MBV level
	[g/(m ² % RH) @ 8/16h]	
Negligible	0	0.2
Limited	0.2	0.5
Moderate	0.5	1.0
Good	1.0	2.0
Excellent	2.0	...

Figuur 18: Categorieën classificatie MBV [32, p. 13]

2.9 Dampbalans

In een vitrine zijn er verschillende vochtstromen mogelijk. De grootste vochtstromen worden omschreven als infiltratie, exfiltratie, productie, condensatie en buffering. Vochtinfiltratie is de hoeveelheid vocht die van buiten naar binnen de vitrine infiltreert. Terwijl vochtexfiltratie de hoeveelheid vocht weergeeft die van binnen de vitrine naar buiten exfiltreert. De vochtproductie geeft weer hoeveel vocht er door de vitrine of andere materialen in de vitrine zelf geproduceerd wordt. Dit komt in de meeste gevallen voor wanneer er zich een vochthoudend voorwerp in de vitrine bevindt dat vocht afgeeft aan de omgeving. De oppervlaktecondensatie is de hoeveelheid vocht die condenseert of verdampt in de vitrine. Omdat dit bijna nooit het geval is, wordt deze term als nul verondersteld. Tot slot is er nog de vochtbuffering door de hygroscopische materialen in de vitrine, hierbij gebeurt er een vochtuitwisseling tussen de vitrine en het buffermateriaal [4], [26].

Volgens [30] is een kwantitatieve beoordeling van de vochtbuffering vereist. Echter is een dergelijke simulatie zeer ingewikkeld en blijkt een volledige simulatie van de opslag en transport van vocht onrealistisch. Dit omdat gedetailleerde kennis van de materiaaleigenschappen, die vaak niet beschikbaar is, hiervoor nodig is. Bovendien zou dit een zeer arbeidsintensief proces zijn. Doordat de som van alle luchtstromen gelijk moet zijn aan nul, is het mogelijk om een vergelijking op te stellen met de dampdruk binnen de vitrine als onbekende. Het opstellen van de dampbalans is gebaseerd op de wet van behoud van massa.

In de meeste gevallen wordt de voorkeur gegeven aan vereenvoudigde berekeningen. Zo worden doorgaans het *Effective Capacitance (EC)* model en het *Effective Moisture Penetration Depth (EMPD)* model gebruikt.

Net zoals ruimtes binnenshuis is bij een vitrine ook een beoordeling nodig van de luchtvochtigheid. Deze vochtigheid wordt bepaald door: vochtbronnen in de ruimte, vochttransport door ventilatielucht en vochtuitwisseling met de ruimte. Uitgaande van een ideale convectieve vermenging van de lucht, geen oppervlaktecondensatie en het verwaarlozen van de temperatuurafhankelijkheid van de luchtdichtheid wordt de vochtbalans voor de ruimtelucht uitgeschreven met Formule (6) [30]:

$$\frac{V}{R_v * T_i} * \frac{dp_{vi}}{dt} = (p_{ve} - p_{vi}) * \frac{n * V}{3600 * R_v * T_i} + G_{vP} - G_{buf} \quad (6)$$

Met: V = volume van de ruimte [m³]
 R_v = de gasconstante [J/(kg.K)]
 T_i = de temperatuur [K]
 P_{vi} = de dampdruk binnen [Pa]
 P_{ve} = de dampdruk buiten [Pa]
 n = het ventilatievoud [s⁻¹]
 G_{vp} = de waterdamp geproduceerd of weggenomen in de kamer [kg/s]
 G_{buf} = de vochtuitwisseling tussen de ruimtelucht en buffermaterialen [kg/s]

En:

$$G_{buf} = \sum \beta_k * A_k * (p_{vi} - p_{vs,k}) \quad (7)$$

Met: β_k = de convectieve oppervlaktefilmcoëfficiënt voor damptransport [s/m]
 A_k = de oppervlakte [m²]
 $p_{vs,k}$ = de oppervlaktedampdruk voor binnenelement k [Pa]

2.9.1 EMPD-model

Bij het eerste vereenvoudigde model, het EMPD-model, wordt aangenomen dat slechts een dunne oppervlaktelaag van het buffermateriaal bijdraagt aan de vochtbuffering. Vochttopslag en transport in deze dunne bufferlaag wordt beschreven in een enkele controlevolumevergelijking:

$$G_{buf} = A * \frac{p_{vi} - p_{vb}}{\frac{1}{\beta} + \frac{d_b}{2 * \delta}} \quad (8)$$

Met: A = het beschikbaar uitwisselingsoppervlak [m²]
 p_{vi}/p_{vb} = de dampdruk van het vochtbufferend materiaal en de lucht in de ruimte [Pa]
 β = de waterdampovergangscoefficiënt [s/m]
 d_b = de dikte van de bufferlaag [m]
 δ = de waterdampdoorlaatbaarheid van het vochtbufferend materiaal [s]

Een nadeel van dit EMPD-model is de afhankelijkheid van de vochtindringingsdiepte van het buffermateriaal. Deze wordt alleen berekend uit de vochtcapaciteit en de dampdoorlaatbaarheid. Dit soort berekeningen zijn echter zeer tijd- en arbeidsintensief. Ook is de vochtindringingsdiepte niet goed gedefinieerd voor binnenafwerkingen met meerdere dunne lagen [30].

2.9.2 EC-model

Bij de tweede methode, het EC-model, wordt aangenomen dat de vochtigheid in het actieve deel van de ruimte altijd in evenwicht is met de luchtvochtigheid in de ruimte zelf. Formule (6) wordt dan gereduceerd tot:

$$M * \frac{V}{R_v * T_i} * \frac{dp_{vi}}{dt} = (p_{ve} - p_{vi}) * \frac{n * V}{3600 * R_v * T_i} + G_{vp} \quad (9)$$

Met: M = de vermenigvuldigingsfactor voor vochtcapaciteit van de zonelucht

Dit zorgt ervoor dat het EC-model een zeer eenvoudige methode is, waarbij geen extra vergelijkingen moeten worden opgelost. Eenvoudig genomen, bij een grotere waarde van M is het vochtbufferend potentieel groter. Echter moet er wel rekening gehouden worden met de waarde van M die doorgaans nog vaag gedefinieerd is [30].

Bij het EC-model wordt G_{buf} bepaald met behulp van de *Hygric Inertia of Room (HIR)*. Deze term wordt voorgesteld als een superpositie van de MBV van de objecten in de vitrine. Terwijl de MBV slechts duidt op het vochtbufferend vermogen van één materiaal, duidt de HIR op het vochtbufferend vermogen van de gehele ruimte. De HIR is uitgedrukt in functie van de experimenteel bepaalde MBV-waarden en wordt uitgedrukt als:

$$HIR_{8h/1h} = \frac{\sum A_k * MBV_{eq,8h/1h}}{V} \quad (10)$$

Met: $MBV_{eq,8h/1h}$ = de equivalente MBV na 8u/1u [kg/(m²%RV)]
 $\sum A_k$ = de som van alle uitwisselingsoppervlakken [m²]
 V = het volume van de ruimte [m³]

Door de integratie van de HIR-waarde is er rekening gehouden met de vochtbufferende materialen. Uiteindelijk wordt dan de volgende uitdrukking bekomen voor de waterdampuitwisseling:

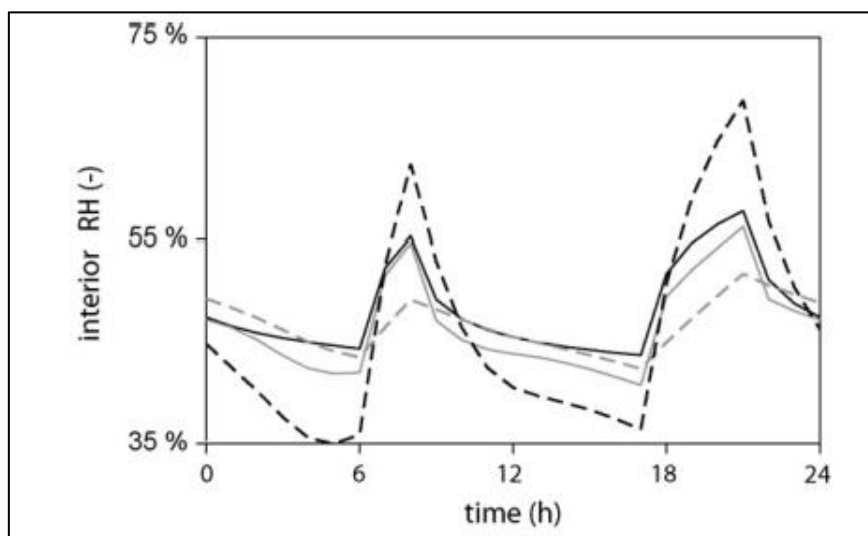
$$G_{buf} = \frac{100 * HIR * V}{p_{v,sat}(T_i)} * \frac{dp_{vi}}{dt} \quad (11)$$

Deze waarde wordt ingevuld in Formule (6) van de dampbalans:

$$\left(\frac{V}{R_v * T_i} + \frac{100 * HIR * V}{p_{v,sat}(T_i)} \right) * \frac{dp_{vi}}{dt} = (p_{ve} - p_{vi}) * \frac{n * V}{3600 * R_v * T_i} + G_{vp} \quad (12)$$

2.9.3 Vergelijking EC-model met EMPD-model

In eerder uitgevoerd onderzoek in [30] is een vergelijking gemaakt tussen de verschillende modellen. Hierbij is een vergelijking gemaakt tussen een volledig numerieke RV-voorspelling (volle zwarte lijn), het EMPD-model (volle grijze lijn), het EC-model (grijze streeplijn) en het RV-verloop zonder vochtbuffering (zwarte streeplijn). De resultaten zijn getoond in Figuur 19.



Figuur 19: Vergelijking tussen de verschillende modellen [30, p. 9]

Uit Figuur 19 blijkt dat er een goede overeenstemming is tussen het volledige numerieke model en het EMPD-model. Bij het EC-model worden daarentegen goede voorspellingen gevonden voor de minima en maxima van de RV, maar dit model is niet in staat om het werkelijk verloop van de variaties in RV in de ruimte te voorspellen.

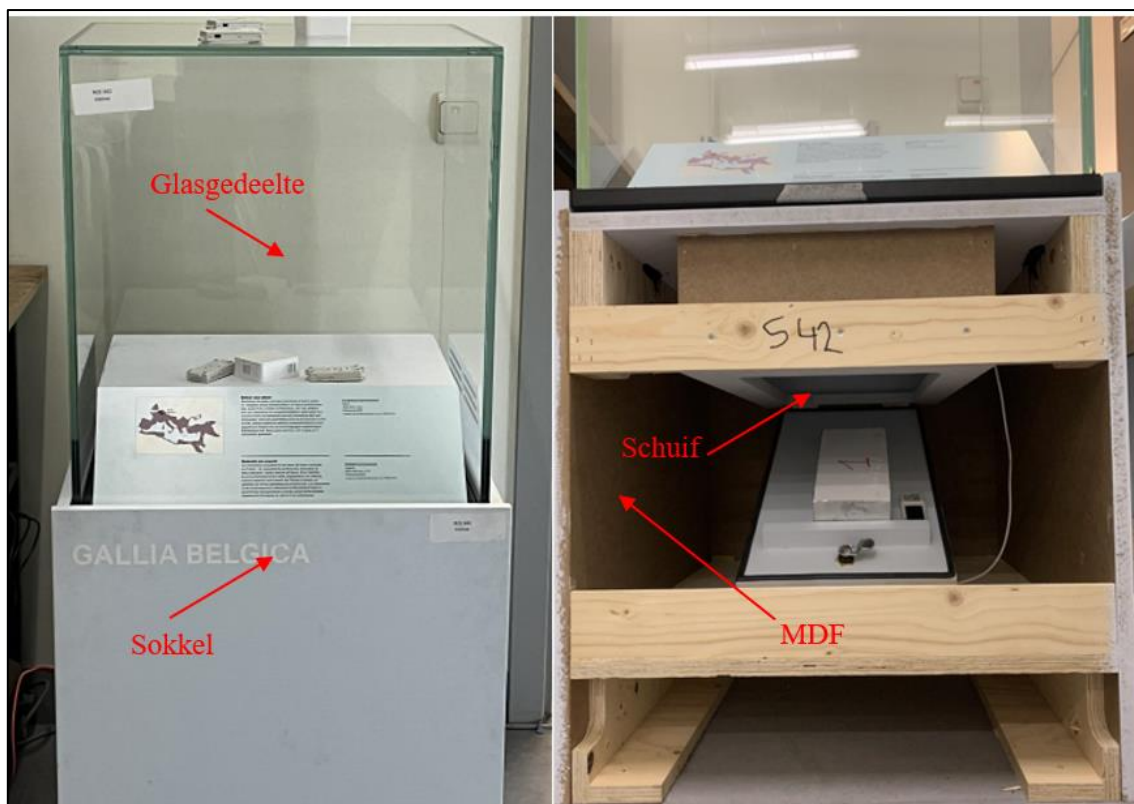
3 Experimenteel onderzoek met vitrines

3.1 Gebruikte materialen

3.1.1 Vitrines

3.1.1.1 Professionele vitrine

Voor het uitvoeren van de experimenten wordt er gebruikgemaakt van twee vitrines. De eerste vitrine is een professionele vitrine die gebruikt werd voor tentoonstellingen. Ze werd voor dit onderzoek ter beschikking gesteld door het Gallo-Romeins Museum te Tongeren. Deze vitrine wordt getoond in Figuur 20. De vitrine is opgebouwd uit verschillende onderdelen. Het glasgedeelte heeft volgende binnenafmetingen: 52,8 cm x 52,8 cm x 61,1 cm. Dit glasgedeelte is rechtstreeks verbonden met een schuif waarin vochtbufferende materialen geplaatst kunnen worden. Deze twee ruimtes vormen samen een volume van 0,195 m³. Onder het glasgedeelte bevindt zich een houten sokkel. De houten sokkel is vervaardigd uit MDF. De voorkant van deze houten sokkel kan geopend worden d.m.v. een sleutel, dit zodat bezoekers in een museum de vitrine niet zomaar kunnen openen. Binnenin de sokkel is er nog een aparte schuif. Deze schuif dient voor het plaatsen van een vochtbufferend materiaal, zodat dit niet zichtbaar is van buitenaf voor bezoekers van het museum. Met behulp van openingen aan de bovenkant van deze schuif staat deze ruimte in verbinding met het volume onder het glazen omhulsel. De aansluiting van het glazen omhulsel en de houten sokkel is gemaakt met behulp van een rubberen afsluiting.

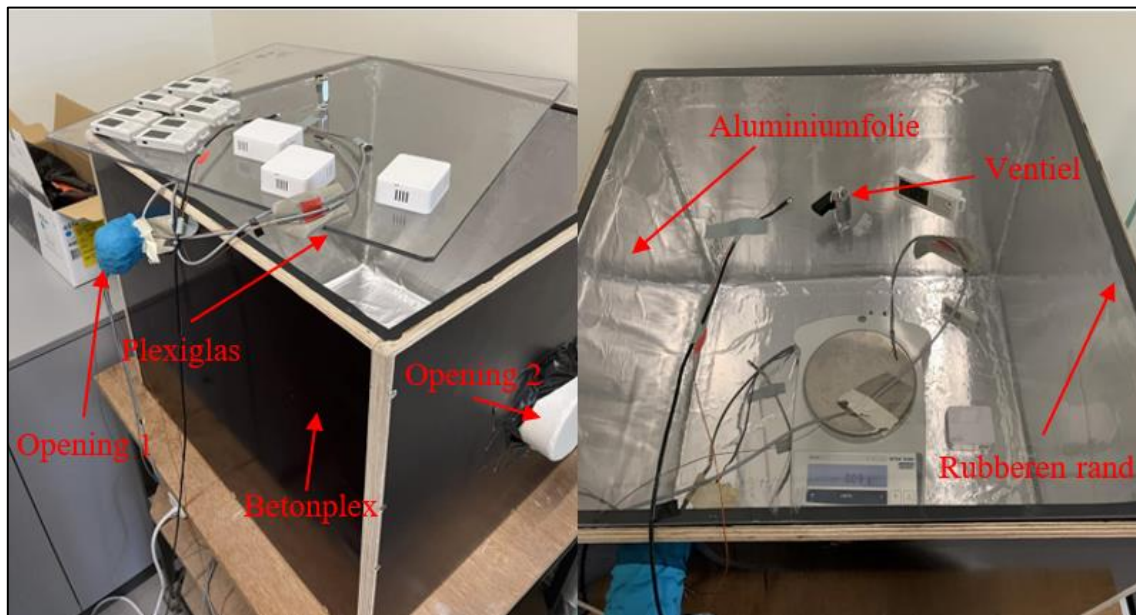


Figuur 20: Professionele vitrine Gallo-Romeins Museum Tongeren a) gesloten vitrine b) geopende vitrine

De luchtcirculatie tussen de sokkel en de vitrine zelf is van belang om de werking van het vochtbufferend materiaal te garanderen. De plaatsing van deze materialen werd eerder besproken in paragraaf 2.7.3 van de literatuurstudie. Aangezien het materiaal hout een hygroscopisch materiaal is, kan dit een invloed hebben op de experimenten met de hygroscopische materialen die in de vitrine geplaatst worden. Dit betekent dat de vitrine op zichzelf al een vochtbufferend vermogen kan bezitten. Deze invloed zal verder behandeld worden onder hoofdstuk 5.

3.1.1.2 Abstracte vitrine

De tweede vitrine, getoond in Figuur 21, die gebruikt wordt voor het uitvoeren van de experimenten, is een vitrine die specifiek is ontwikkeld voor onderzoek. De wanden van deze vitrine zijn gemaakt uit betonplex, dit is houten plaatmateriaal, behandeld met epoxy. Verder zijn de voegen van de wanden langs de binnenzijde van de vitrine afgedekt met Tescon Vana tape [34]. Deze tape zorgt ervoor dat de aansluitingen tussen de wanden van de vitrine luchtdicht zijn. Aangezien deze tape mogelijk vochtbufferend kan werken, is deze tape nog eens bedekt met een dampdichte aluminiumfolie. Om de vitrine toch nog zichtbaar te maken van buitenaf, is de afdekplaat gemaakt uit plexiglas. Tussen de aansluiting van de afdekplaat en de wanden van de vitrine is een rubberen rand voorzien. De abstracte vitrine heeft volgende binnenafmetingen: 47,5 cm x 56 cm x 56 cm. Dit resulteert in een vitrinevolume van 0,149 m³.



Figuur 21: Abstracte vitrine

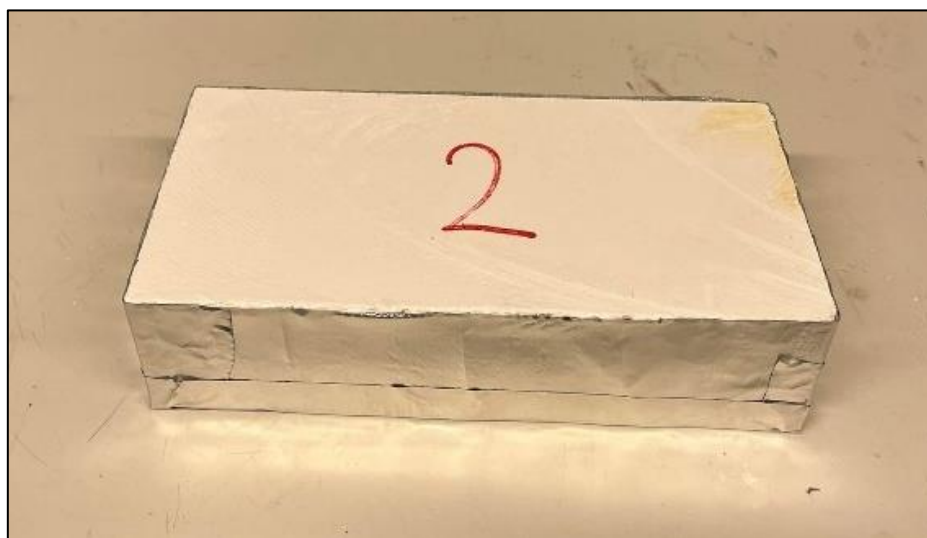
In het midden van de plexiglazen afdekplaat is een ventiel voorzien om de luchtdichtheid van de vitrine te regelen. De invloed van dit ventiel zal verder besproken worden in de resultaten van de experimenten 3 en 5. In de wanden van de vitrine zijn twee openingen voorzien. De eerste opening dient om kabels en draden van meetapparatuur binnen te brengen. Om ervoor te zorgen dat deze opening geen invloed heeft op het binnenklimaat, wordt deze langs de buitenkant afgedekt met plasticine na het inbrengen van alle kabels en draden. Plasticine is een synthetische kneedmassa die altijd zacht blijft en zorgt voor een luchtdichte afsluiting [35].

De tweede opening is voorzien in de vitrine om een luchtdichtheidsmeting uit te voeren. Bij deze meting wordt een buis gebruikt voor het aanbrengen van een drukverschil in de vitrine om luchtverliezen in de vitrine te meten. Binnen dit onderzoek wordt er geen gebruikgemaakt van deze luchtdichtheidsmeting. Echter is er een afdekhuls voorzien voor het afsluiten van deze opening wanneer de meting niet wordt uitgevoerd. Deze afdekhuls zorgt ervoor dat de vitrine ook via deze opening luchtdicht is.

3.1.2 Vochtbufferend materiaal

3.1.2.1 Calciumsilicaat

Het vochtbufferend materiaal dat gebruikt is tijdens de experimenten is calciumsilicaat (CaSi). De keuze voor dit materiaal is gebaseerd op eerder uitgevoerd onderzoek waarin reeds de materiaaleigenschappen van CaSi zijn bepaald [31]. Aangezien dit materiaal op maat gezaagd kan worden, is dit eenvoudig voor het maken van samples. Doordat de eigenschappen en de afmetingen van dit materiaal gekend zijn, is dit materiaal eenvoudig te implementeren in numerieke simulaties. Bij het uitvoeren van de experimenten worden alle zijden, met uitzondering van de bovenzijde, afgedekt met een dampdichte aluminiumtape. Dit zorgt ervoor dat het vochttransport tussen het sample en de vitrine-omgeving enkel plaatsvindt via de bovenzijde van het sample. Figuur 22 geeft sample 2 weer, gebruikt in experiment 3 in de abstracte vitrine.



Figuur 22: CaSi-sample 2 gebruikt in experiment 3

3.1.2.2 Overzicht van de gebruikte samples

Tabel 4 toont een overzicht van de geometrische eigenschappen van de gebruikte samples in het experimenteel onderzoek. In totaliteit zijn er vijf samples gebruikt voor het uitvoeren van verschillende reeksen van experimenten.

Tabel 4: Geometrische eigenschappen gebruikte CaSi-samples in het experimenteel onderzoek

Sample	Lengte [cm]	Breedte [cm]	Hoogte [cm]	Volume [m ³]
1	20,0	10,0	5,0	0,00100
2	20,0	10,0	5,0	0,00100
3	19,9	10,0	3,6	0,000720
4	20,0	10,0	4,5	0,000900
5	20,0	10,0	3,9	0,000780

3.1.2.3 Preconditionering

Voor aanvang van de experimenten is het van belang om de samples te preconditioneren op het gewenste RV-niveau. Calciumsilicaat werkt optimaal in hetzelfde RV-bereik als dit van Art Sorb. Zoals eerder beschreven in paragraaf 2.7.2 in de literatuurstudie, is dit een RV-bereik van 60-80%. Het laboratorium Bouwfysica en Duurzaam Bouwen in Heverlee beschikt over een diffusiekamer waarin de samples gepreconditioneerd kunnen worden. In de diffusiekamer is de RV 84,7%. De beschrijving van de diffusiekamer van het laboratorium in Heverlee wordt getoond in Figuur 23.



Figuur 23: Dampdiffusiekamer laboratorium Bouwfysica en Duurzaam Bouwen in Heverlee

De preconditionering van de samples is een belangrijke stap voor het uitvoeren van de experimenten. Om dit proces duidelijk te maken wordt onderstaand voorbeeld gebruikt [25].

Het gewenste RV-bereik in de museumvitriene is 45-55% en de huidige RV van in de vitrine bedraagt 60%. Indien Pro Sorb gebruikt wordt als hygroscopisch materiaal, dient deze gepreconditioneerd te worden op 45% RV. Dit is de ondergrens van het gewenste RV-bereik. Op deze manier absorbeert Pro Sorb vocht van de omgeving, zodat de RV in de vitrine daalt naar het gewenste RV-bereik.

De optimale preconditionering hangt af van de eisen van de kunstschat die bewaard dient te worden. Vochtbufferende materialen zorgen voor het bereiken van een bepaald RV-bereik en niet voor een specifieke RV-waarde. Als het gewenste RV-bereik vochtiger is dan het huidige RV-bereik, moet het materiaal gepreconditioneerd worden op de bovengrens van het werkingsgebied van het materiaal. Op deze manier geeft het materiaal vocht af aan de omgeving. Echter wanneer het gewenste RV-bereik lager ligt dan het huidige RV-bereik, moet het materiaal op de ondergrens van het werkingsgebied gepreconditioneerd worden om vocht op te nemen uit de omgeving [25].

Om ervoor te zorgen dat de CaSi-samples vocht afgeven bij de plaatsing in de vitrine, is er geopteerd om de samples te preconditioneren op 84,7% RV. Deze keuze is gemaakt omdat uit de resultaten van de experimenten op de lege vitrines blijkt dat het RV-verloop schommelt tussen 35-40%. Het doel van het toevoegen van calciumsilicaat, gepreconditioneerd op 84,7% RV, is om het RV-niveau te laten toenemen in de vitrines. Tabel 5 geeft een overzicht weer van de samples en hun preconditionering zoals toegepast in de experimenten.

Tabel 5: Overzicht van de gebruikte CaSi-samples in het experimenteel onderzoek

Experiment	Gebruikt sample	Verwacht RV sample voor aanvang experiment [%]
1	/	/
2	/	/
3	2	84,7
4	1	84,7
5	4	84,7
6	5	84,7
7	3	84,7

3.1.2.4 Controle preconditionering

Een extra controle wordt uitgevoerd op de samples om na te gaan of de preconditionering al dan niet gelukt is. Deze controle bestaat erin om het vochtgehalte in de samples te bepalen voordat ze in de vitrines worden geplaatst. Het vochtgehalte wordt bepaald door het gewicht van ieder sample bij het begin van een experiment te meten en dit te verminderen met het drooggewicht. Het drooggewicht van een sample wordt bekomen door het sample enkele dagen te drogen in een droogoven op 50 °C. De bepaling van het drooggewicht gebeurt a.d.h.v. Formule (13).

$$\omega = \frac{m_{\text{VoorMeting}}(g) - m_{\text{drooggewicht}}(g)}{V(m^3)} * 10^{-3} \quad (13)$$

Het vochtgehalte van ieder sample wordt nu in combinatie met de hygroscopische curve van calciumsilicaat gebruikt om het RV-niveau van het sample te bepalen. De bepaling van de hygroscopische curve van calciumsilicaat staat verder beschreven in paragraaf 4.1.2 onder hoofdstuk 4.

In Tabel 6 worden de gebruikte samples in de experimenten met hun overeenkomstige RV-niveau op basis van het gemeten vochtgehalte en de hygroscopische curve getoond.

Tabel 6: Preconditionering CaSi-samples

Experiment	Gebruikt sample	Volume [m ³]	Massa voor experiment [g]	Drooggewicht [g]	Vochtgehalte [kg/m ³]	RV sample voor aanvang experiment [%]
1	/	/	/	/	/	/
2	/	/	/	/	/	/
3	2	0,00100	276,140	271,260	4,880	79
4	1	0,00100	280,636	275,505	5,131	81
5	4	0,00090	236,276	231,309	4,967	80
6	5	0,00078	215,484	211,814	4,705	78
7	3	0,00072	196,758	191,678	5,080	81

Uit de bepaling van de exacte RV-waarden van de samples bij aanvang van ieder experiment blijkt dat geen enkel sample het vooropgestelde conditioneringsniveau van 84,7% RV behaalt. Echter is de preconditionering van de samples over het algemeen goed gelukt. Alle samples behalen een RV-niveau van minimaal 78%.

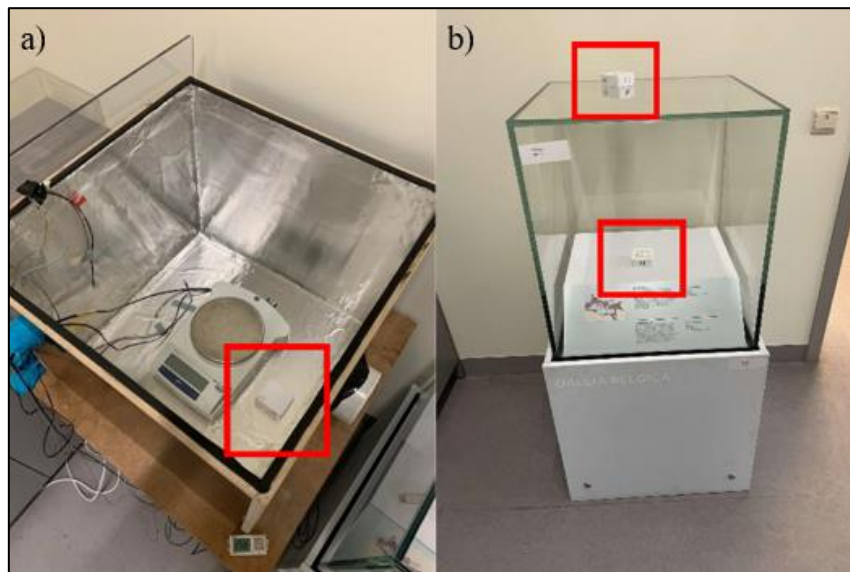
3.1.3 Sensoren

Binnen dit onderzoek worden de relatieve vochtigheid en de temperatuur doorlopend gemeten met behulp van sensoren. Deze twee parameters worden zowel binnen als buiten de vitrines gemeten. Deze meting vindt plaats om de tien minuten. In het experimenteel onderzoek wordt gebruikgemaakt van drie verschillende soorten sensoren: sensoren van CHARP Art Care [1], Squirrel-sensoren en HOBOSensoren [36]. Doordat er drie verschillende typen sensoren worden gebruikt, is er kans op een foutenmarge tussen de verschillende sensoren. Echter wordt er binnen deze thesis verder gewerkt met de sensoren van CHARP Art Care. De andere sensoren worden gebruikt in specifieke gevallen om bepaalde veronderstellingen te valideren.

3.1.3.1 CHARP Art Care-sensoren

CHARP Art Care heeft voor dit onderzoek drie sensoren ter beschikking gesteld. Deze sensoren meten zowel de RV als de temperatuur. Het uitlezen van deze gegevens gebeurt via een online platform van CHARP Art Care. Dit maakt het mogelijk om de gegevens draadloos uit te lezen vanop afstand. De sensoren zijn zo ingesteld dat het meetinterval tussen twee opeenvolgende metingen tien minuten bedraagt. Op deze manier worden er constant metingen uitgevoerd gedurende de volledige periode van de experimenten.

In beide vitrines is een sensor van CHARP Art Care geplaatst. De locatie van de sensor in de abstracte vitrine is getoond op Figuur 24 a). In de professionele vitrine is de sensor geplaatst in de vitrine zoals getoond op Figuur 24 b). De derde sensor is boven op de professionele vitrine geplaatst en meet de condities buiten de twee vitrines, dit is het klimaat op de afdeling Bouwfysica (vierde verdieping) van het Departement Burgerlijke Bouwkunde in Heverlee, waar de vitrines zijn geplaatst.

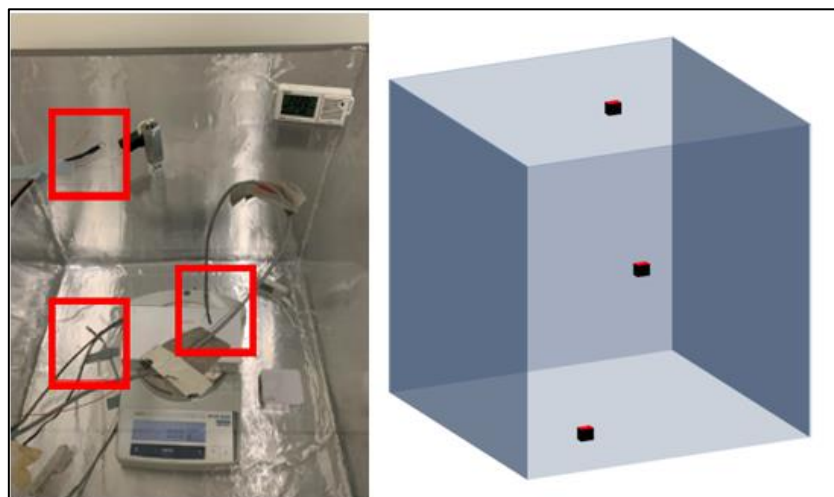


Figuur 24: Locatie van de CHARP Art Care-sensoren in a) abstracte vitrine b) professionele vitrine

3.1.3.2 Squirrel-sensoren

Tijdens het experimenteel onderzoek zijn er ook drie Squirrel-sensoren gebruikt. Net zoals bij de sensoren van CHARP Art Care is het meetinterval tussen twee opeenvolgende metingen ingesteld op tien minuten. Voor het uitlezen van deze sensoren is het nodig om de sensoren te verbinden met een computer d.m.v. een kabelverbinding.

De sensoren zijn enkel gebruikt in de abstracte vitrine wegens praktische redenen. Het gebruik van kabels is immers moeilijk bij de professionele vitrine. Deze moeilijkheid zit vooral in de luchtdichtheid die niet gegarandeerd wordt door het aanbrengen van kabels van buiten naar binnen de vitrine. Figuur 25 toont de locatie van de Squirrel-sensoren in de abstracte vitrine. Twee van deze sensoren zijn in de vitrine geplaatst en meten de binnencondities. De eerste sensor is op de bodem van de vitrine geplaatst, de tweede sensor hangt in het midden van de vitrine. De derde sensor is boven op de vitrine geplaatst en meet op zijn beurt de buitencondities op de afdeling waarop de vitrines zijn geplaatst.

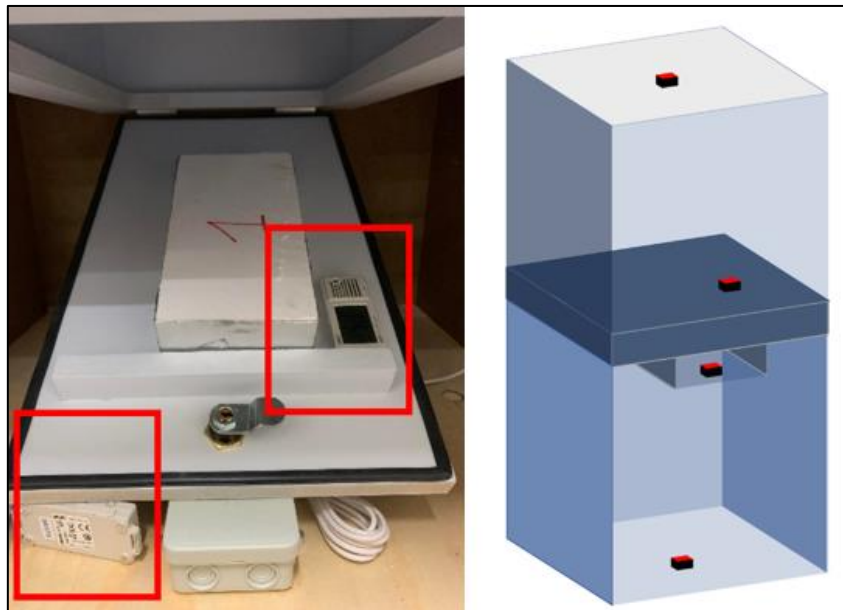


Figuur 25: Plaatsing Squirrel-sensoren in abstracte vitrine a) praktisch b) schematisch

3.1.3.3 HOBO-sensoren

Het derde type sensoren dat gebruikt wordt tijdens het experimenteel onderzoek zijn sensoren van het merk HOBO [36]. Van dit type worden acht sensoren gebruikt. Deze sensoren worden uitgelezen door middel van een kabelverbinding. Daarentegen dienen deze sensoren niet constant verbonden te zijn met de kabel en zijn ze dus eenvoudig plaatsbaar op verschillende locaties binnen en buiten de vitrines.

De verschillende HOBO-sensoren zijn verdeeld over de twee vitrines. Doordat er van dit type acht verschillende sensoren ter beschikking waren, zijn enkele van deze sensoren ook op locaties geplaatst waar de andere type sensoren niet geplaatst kunnen worden. Zo is in de professionele vitrine ook een sensor geplaatst in de schuif waar het vochtbufferend materiaal dient te liggen, zoals getoond in Figuur 26. Een andere sensor is geplaatst in de sokkel van de professionele vitrine, zoals ook getoond in Figuur 26.



Figuur 26: Locatie HOBO-sensoren in de professionele vitrine a) praktisch b) schematisch

3.1.4 Ventilator

Tijdens het experimenteel onderzoek wordt er ook gebruikgemaakt van een ventilator in experimenten 7 en 8. Deze ventilator is van het merk EBM-papst, type 414 F [37]. De ventilator is gebruikt in de professionele vitrine om de invloed van de luchtcirculatie te achterhalen op het RV-verloop in de vitrine en is getoond in Figuur 27. Voor het in- en uitschakelen van de ventilator is er een kabel bevestigd aan de ventilator. Dit zorgt ervoor dat de ventilator van buiten de vitrine bediend kan worden.

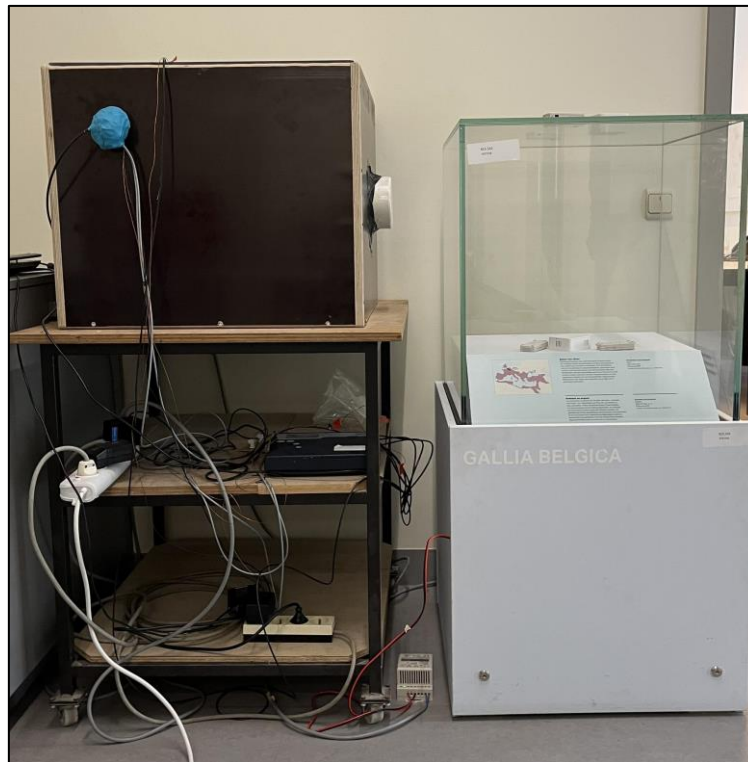


Figuur 27: Ventilator EBM-papst type 414 F

3.2 Gebruikte methode

Tijdens de experimenten worden eerst de referentietoestanden van de vitrines bepaald. Dit houdt in dat er geen extra vochtbufferend materiaal geplaatst wordt in de vitrines. Op deze referentietoestanden wordt later het effect van verschillende parameters achterhaald. Deze parameters zijn het toevoegen van calciumsilicaat als vochtbufferend materiaal, de luchtdichtheid van een vitrine en het toevoegen van een ventilator in de professionele vitrine om de luchtcirculatie tussen het vochtbufferend materiaal en de vitrine-omgeving te verbeteren.

Voor het uitvoeren van de experimenten op de vitrines zijn er verschillende testopstellingen gebruikt. De twee vitrines zijn naast elkaar opgesteld op de vierde verdieping van het Departement Burgerlijke Bouwkunde in Heverlee. Op deze manier zijn beide vitrines onderhevig aan dezelfde omgevingscondities. Dit zorgt ervoor dat de vergelijking tussen beide vitrines optimaal gebeurt. De algemene testopstelling wordt getoond in Figuur 28.



Figuur 28: Algemene testopstelling vitrines afdeling Bouwfysica te Heverlee

Tijdens de experimenten zijn aan elk van deze testopstellingen minieme aanpassingen gedaan om de invloeden van verschillende parameters op het RV-verloop in de vitrines in kaart te brengen. Dit is gedaan voor zowel de abstracte als de professionele vitrine. Deze aanpassingen worden per testopstelling verder toegelicht.

3.2.1 Overzicht randvoorwaarden per experiment

Om een duidelijk overzicht te geven van de verschillende experimenten wordt in Tabel 7 een overzicht getoond van de experimenten met hun randvoorwaarden en doelen.

Tabel 7: Overzicht randvoorwaarden experimenten

Experiment	Periode	Vitrine	Vochtbufferend materiaal	Randvoorwaarden	Doel experiment
1	21/12/22 – 27/02/23	Abstracte	/	Ventiel gesloten	Referentietoestand
2	21/12/22 – 27/02/23	Professionele	/	/	Referentietoestand
3	07/03/23 – 21/03/23	Abstracte	CaSi (80% RV)	Ventiel open	Invloed CaSi
4	07/03/23 – 21/03/23	Professionele	CaSi (81% RV)	Sample in schuif	Invloed CaSi
5	02/05/23 – 16/05/23	Abstracte	CaSi (80% RV)	Ventiel gesloten	Luchtdichtheid
6	02/05/23 – 09/05/23	Professionele	CaSi (80% RV)	Sample boven	Locatie sample
7	18/04/23 – 02/05/23	Professionele	CaSi (81% RV)	Sample schuif + ventilator	Luchtcirculatie
8	09/05/23 – 16/05/23	Professionele	/	Bakje water schuif + ventilator	Luchtcirculatie
Tracer verval test	11/04/23 – 18/04/23	Abstracte	/	Ventiel gesloten	Ventilatievoud
		Professionele	/	Schuif gesloten	Ventilatievoud

3.2.2 Testopstelling lege abstracte vitrine

De testopstelling die gebruikt is voor experiment 1 op de lege abstracte vitrine wordt getoond in Figuur 29.



Figuur 29: Testopstelling experiment 1 lege abstracte vitrine

3.2.3 Testopstelling lege professionele vitrine van Tongeren

De testopstelling die gebruikt is voor experiment 2 op de lege professionele vitrine wordt getoond in Figuur 30.



Figuur 30: Testopstelling experiment 2 lege professionele vitrine

3.2.4 Testopstelling abstracte vitrine met calciumsilicaat

Op de abstracte vitrine zijn twee verschillende experimenten uitgevoerd met de toevoeging van een vochtbufferend materiaal. Deze experimenten zijn uitgevoerd met de toevoeging van een CaSi-sample op een balans. Gedurende experiment 3 is het ventiel volledig opgedraaid. Experiment 5 gebruikt dezelfde initiële opstelling, maar hier wordt het ventiel volledig dichtgedraaid. De testopstelling voor deze experimenten is getoond in Figuur 31.

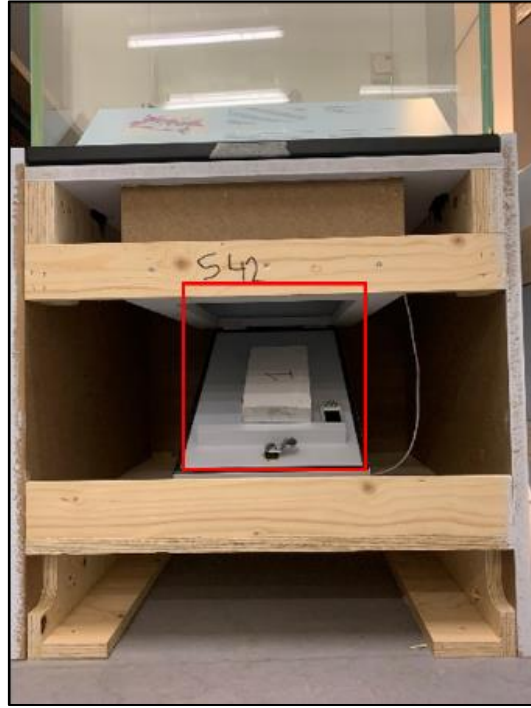
De balans is waterpas geplaatst in de vitrine zodat de metingen op een correcte manier gebeuren. De meetgegevens van de balans worden uitgelezen via een kabelverbinding. Hier is ook geopteerd om het meetinterval tussen twee opeenvolgende metingen van de balans op tien minuten in te stellen. Door hetzelfde meetinterval van de sensoren en de balans is de verwerking van de gegevens achteraf eenvoudiger.



Figuur 31: Testopstelling experimenten 3 en 5 abstracte vitrine met calciumsilicaat

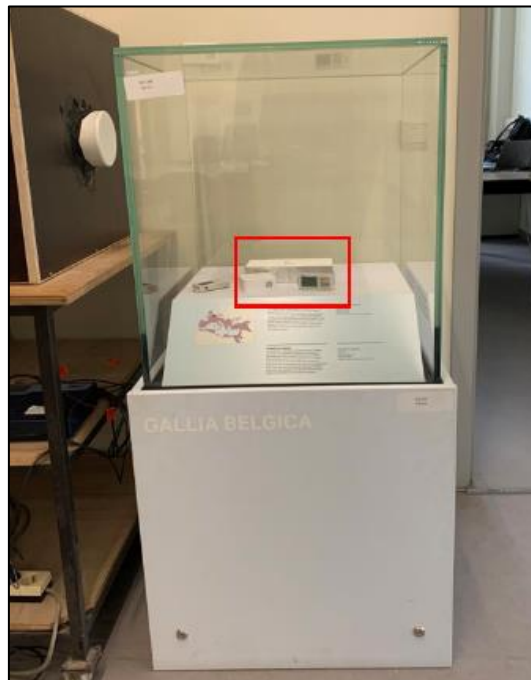
3.2.5 Testopstellingen professionele vitrine met calciumsilicaat

Experiment 4 is uitgevoerd op de professionele vitrine met de toevoeging van een CaSi-sample als vochtbufferend materiaal. Het CaSi-sample wordt tijdens experiment 4 in de sokkel van de vitrine geplaatst in de voorziene schuif voor de plaatsing van een vochtbufferend materiaal, dit is getoond in Figuur 32. Deze ruimte staat in verbinding met de vitrine-omgeving d.m.v. openingen tussen deze twee ruimtes.



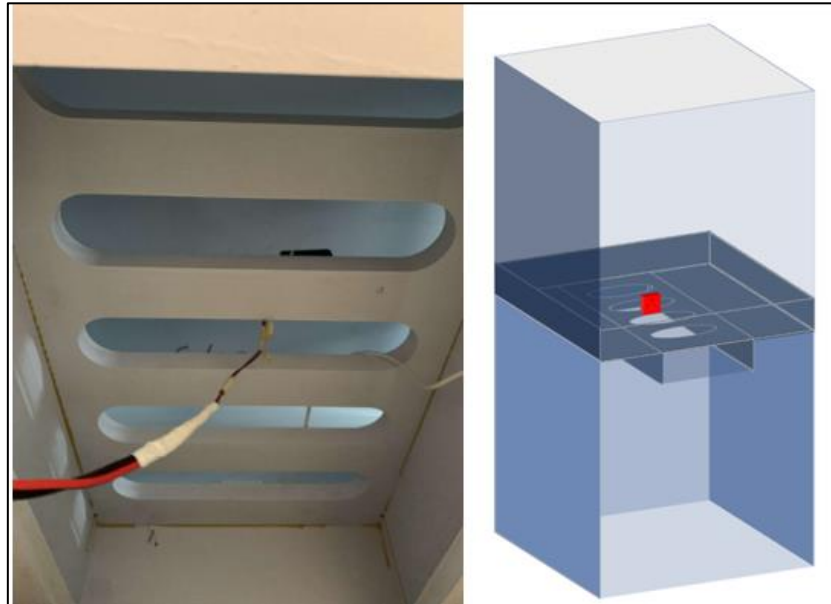
Figuur 32: Testopstelling experiment 4 met CaSi in professionele vitrine

Tijdens experiment 6 op de professionele vitrine wordt het CaSi-sample in de vitrine zelf geplaatst i.p.v. in de voorziene schuif, dit is getoond in Figuur 33. Op deze manier wordt de invloed van de locatie van het sample op het RV-verloop in de vitrine in kaart gebracht.



Figuur 33: Testopstelling experiment 6 met CaSi in professionele vitrine

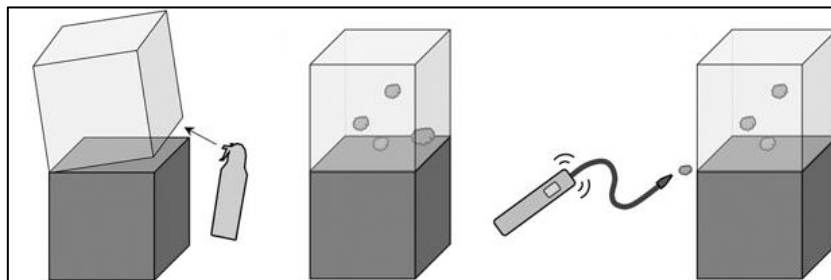
In experiment 7 is bij de professionele vitrine een ventilator toegevoegd in de sokkel van de vitrine. Deze ventilator is eerder besproken in paragraaf 3.1.4. De locatie van de ventilator is getoond in Figuur 34. Hierbij wordt de ventilator geplaatst boven de openingen van de schuif waarin het CaSi-sample is geplaatst, zoals bij experiment 4. Door de toevoeging van een ventilator wordt de invloed van de luchtcirculatie tussen het vochtbufferend materiaal en de vitrine-omgeving op het RV-verloop in de vitrine achterhaald.



Figuur 34: Testopstelling experiment 7 met ventilator in professionele vitrine a) praktisch b) schematisch

3.2.6 Testopstelling tracer verval test

De tracer verval test wordt uitgevoerd aan de hand van het protocol beschreven in paragraaf 2.5.2 [11]. Dit protocol wordt schematisch getoond in Figuur 35.

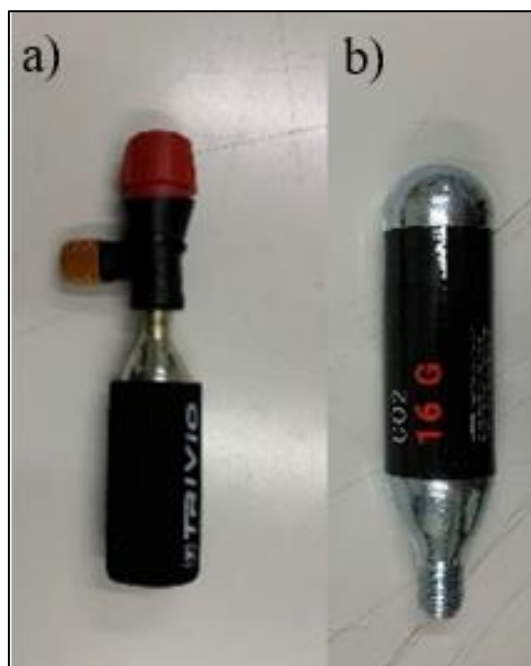


Figuur 35: Schematische weergave protocol tracer verval test [17]

Het uitvoeren van de tracer verval test voor de bepaling van de luchtdichtheid van de vitrines gebeurt op zowel de abstracte vitrine als de professionele vitrine. Voor experiment 9 wordt gebruikgemaakt van de testopstellingen van experimenten 1 en 2 op de lege vitrines, zoals eerder beschreven in paragrafen 3.2.2 en 3.2.3. Als tracergas wordt koolstofdioxide (CO₂) gebruikt. Volgende componenten zijn gebruikt bij dit experiment:

- CO₂-injector,
- CO₂-patronen,
- CO₂-sensoren.

Voor het injecteren van de CO₂ wordt gebruikgemaakt van een CO₂-injector, zoals getoond in Figuur 36 a). Deze injector is van het merk Trivio [38] en wordt normaal gezien gebruikt om fietsbanden op te pompen. Daarnaast wordt ook gebruikgemaakt van een CO₂-patroon van 16 g, dit patroon is getoond in Figuur 36 b).



Figuur 36: a) CO₂-injector b) CO₂-patroon

Om de CO₂-concentratie in de vitrines te meten wordt er gebruikgemaakt van een weerstation dat ter beschikking gesteld wordt door Buildwise [39]. Dit weerstation van fabrikant Netatmo [40] is in staat om naast de temperatuur en de relatieve vochtigheid ook de CO₂-concentratie in een ruimte te meten. Het meetinterval van deze sensoren bedraagt vijf minuten. Het uitlezen van deze gegevens gebeurt via een app op een smartphone of via de webapp van Netatmo [40]. Voor de uitvoering van dit experiment wordt enkel de CO₂-concentratie uitgelezen en wordt er een abstractie gemaakt van de andere parameters.

Om de afzonderlijke CO₂-concentraties in de twee vitrines en buiten de vitrines te meten, is tijdens dit experiment gebruikgemaakt van drie binnenmodules en één centraal weerstation. Deze meetapparatuur worden getoond in Figuur 37. De modules hebben een meetbereik van 0 – 5000 ppm. Eén module wordt in de abstracte vitrine geplaatst en de twee andere modules worden in de professionele vitrine geplaatst. In de professionele vitrine is één module in de vitrine zelf geplaatst en de andere module in de sokkel van de vitrine.

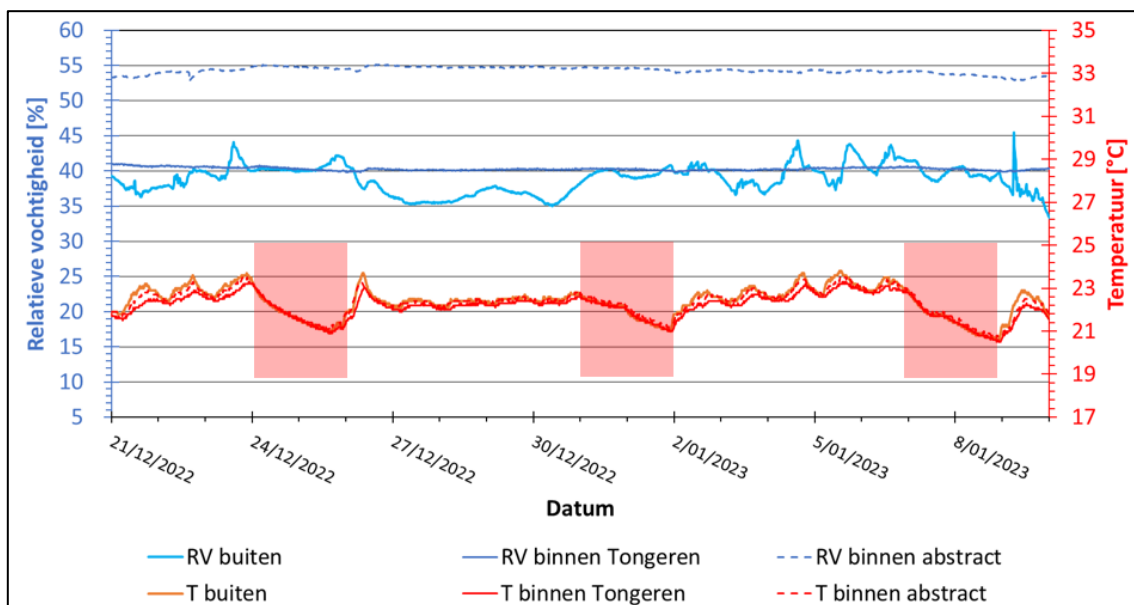


Figuur 37: CO₂-sensoren a) binnenmodules en weerstation Netatmo b) locatie sensoren professionele vitrine (schematisch)

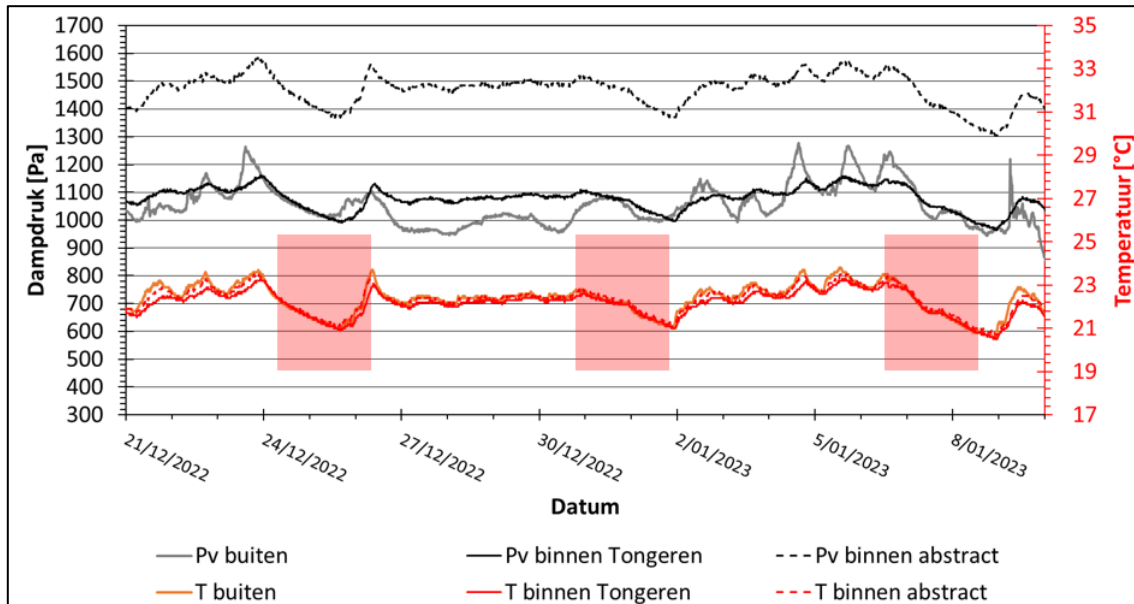
3.3 Resultaten

3.3.1 Experimenten 1 en 2: referentietoestanden lege vitrines

De resultaten van de eerste metingen op de lege vitrines worden, voor de periode van 21 december 2022 tot en met 10 januari 2023, getoond in Figuur 38 en Figuur 39. Hierin wordt het RV-, dampdruk- en temperatuurverloop, gemeten met de sensoren van CHARP Art Care, voor beide vitrines getoond.



Figuur 38: RV [%] - en temperatuurverloop [°C] experimenten 1 en 2 op de lege vitrines 21/12/2022 – 10/01/2023



Figuur 39: Dampdruk [Pa] - en temperatuurverloop [°C] experimenten 1 en 2 op de lege vitrines 21/12/2022 – 10/01/2023

3.3.1.1 Temperatuurverloop

Uit Figuur 38 en Figuur 39 blijkt dat het temperatuurverloop in beide vitrines hetzelfde verloopt als het temperatuurverloop op de afdeling waar de vitrines zijn geplaatst. Echter is de invloed van het weekend (aangeduid met de rode rechthoeken in Figuur 38 en Figuur 39), waar de temperatuur gereduceerd wordt, wel zichtbaar.

3.3.1.2 RV-verloop

Het RV-verloop buiten de vitrines op de afdeling vertoont geen constant verloop. Dit RV-verloop is onder invloed van verschillende externe factoren. Zo heeft het openzetten van een raam of de passage van personen een invloed op dit RV-verloop. Buiten de vitrines schommelt het RV-verloop tussen 35-45%. Het RV-verloop binnen de vitrines vertoont een verloop zonder grote fluctuaties. In de professionele vitrine schommelt de RV rond 40%, daar waar in de abstracte vitrine het RV-verloop schommelt rond 54%.

Het relatief constante RV-verloop in de professionele vitrine toont aan dat de vitrine zelf al een vochtbufferend vermogen bezit. Aangezien de vitrine opgebouwd is uit hout, een vochtbufferend materiaal, heeft dit ook een invloed op het RV-verloop binnen de vitrine. In dit geval is de boundary control, zoals besproken in paragraaf 2.3.1 van de literatuurstudie, duidelijk aanwezig. Het vochtbufferend vermogen van de vitrine wordt verder behandeld in het numeriek onderzoek op basis van de dampbalans onder hoofdstuk 5.

Opmerkelijk uit Figuur 38 is wel dat het RV-verloop in de abstracte vitrine hoger ligt dan in de professionele vitrine ondanks dat het temperatuurverloop hetzelfde is. De abstracte vitrine stond voor aanvang van de metingen op de afdeling altijd in het laboratorium Bouwfysica en Duurzaam Bouwen in Heverlee. Dit wil zeggen dat de vitrine gepreconditioneerd is op de condities van het laboratorium. Dit terwijl de professionele vitrine al een langere periode op de afdeling stond waar de metingen uitgevoerd worden. Een andere mogelijke verklaring voor dit hogere RV-verloop is het vochtbufferend vermogen van de betonplex waaruit de abstracte vitrine is opgebouwd.

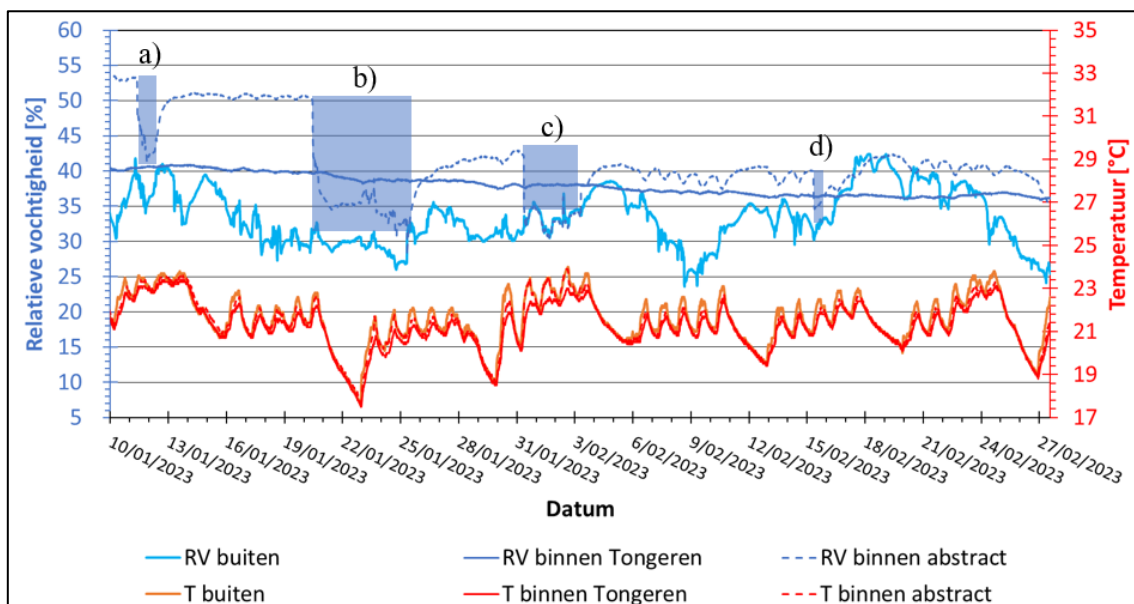
3.3.1.3 Dampdrukverloop

Uit Figuur 39 valt af te leiden dat de fluctuaties in het dampdrukverloop enkel afhankelijk zijn van de temperatuur. Dit omdat het volume van de vitrines constant is en door het feit dat er geen dampproductie aanwezig is. Een stijging in temperatuur veroorzaakt een stijging van de dampdruk. Dit wil zeggen dat een temperatuurstijging resulteert in een verhoging van de saturatiedampdruk. Hierdoor daalt de RV bij een temperatuurverhoging en stijgt deze terug bij een temperatuurverlaging. Door de luchtdichtheid van de vitrines is dit effect niet zichtbaar op het RV-verloop binnen de vitrines.

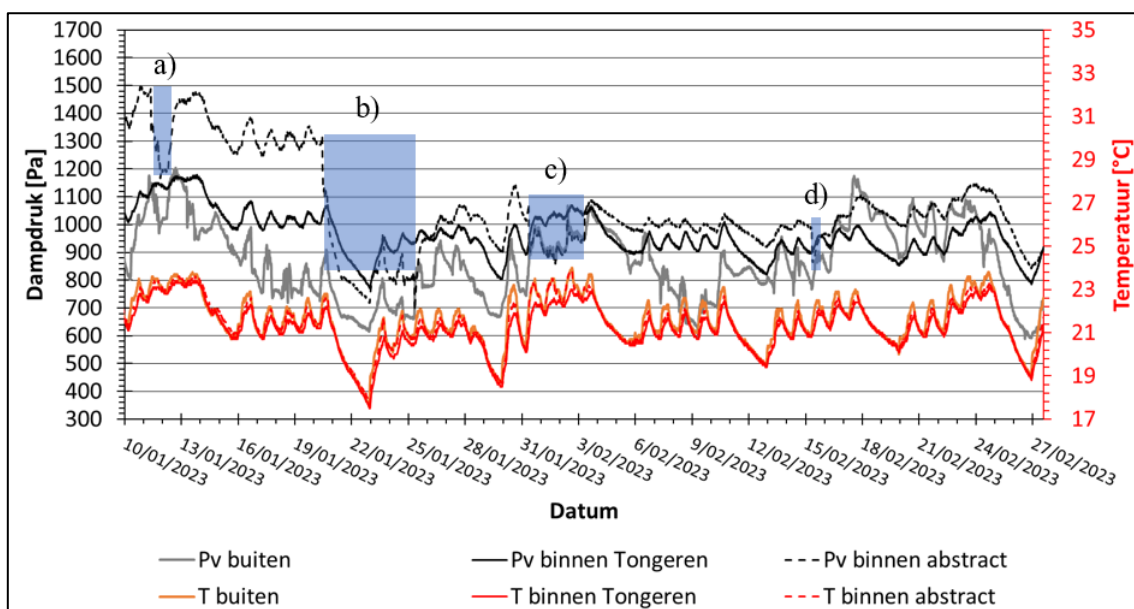
3.3.1.4 Optimalisatie van de referentietoestand

Buiten de vitrines zijn er, zoals eerder vermeld, externe factoren die een invloed hebben op het RV-verloop. Zo fungeren personen op de afdeling bijvoorbeeld als vochtbron. Het algemene dampdrukverloop buiten de vitrine is gelijkaardig aan het algemene RV-verloop buiten de vitrine. Het RV-verloop is naast de temperatuur, ook afhankelijk van andere externe factoren zoals bijvoorbeeld externe vochtproductie, vochtbuffering en ventilatie. Externe vochtproductie zorgt voor een stijging van de dampdruk en de RV. Doordat de afdeling waarop de vitrines geplaatst zijn helemaal niet luchtdicht is, is hier de invloed van de temperatuur op de RV wel zichtbaar.

Om uiteindelijk te starten met realistische referentietoestanden is het van belang dat de vitrines zich eerst aanpassen aan de omgeving waarin de experimenten worden uitgevoerd. Om deze reden is er besloten om de experimenten op de lege vitrines langer te laten doorlopen. De resultaten van de verdere metingen op de lege vitrines worden, voor de periode van 10 januari 2023 tot en met 27 februari 2023, getoond in Figuur 40 en Figuur 41.



Figuur 40: RV [%] - en temperatuurverloop [°C] experimenten 1 en 2 op de lege vitrines 10/01/2023 - 27/02/2023



Figuur 41: Dampdruk [Pa] - en temperatuurverloop [°C] experimenten 1 en 2 op de lege vitrines 10/01/2023 - 27/02/2023

3.3.1.5 Aanpassingen abstracte vitrine

Allereerst is er besloten om op 11 januari 2023 de abstracte vitrine open te zetten (rechthoek a in Figuur 40 en Figuur 41). Dit om de vitrine te laten aanpassen aan de condities op de afdeling. De vitrine is terug gesloten op 12 januari 2023. Na het sluiten van de vitrine, steeg de RV binnen de abstracte vitrine meteen opnieuw aanzienlijk tot ongeveer 50%.

Aangezien in het begin van de metingen op de lege abstracte vitrine het ventiel voor het regelen van de luchtdichtheid helemaal dicht stond, is dit ook een mogelijke verklaring voor de snelle toename in RV. Hierdoor is er besloten om op 18 januari 2023 het ventiel volledig open te draaien. Echter blijkt de invloed van het openen van dit ventiel niet merkbaar te zijn in het RV-verloop in de vitrine.

Op 20 januari 2023 is de vitrine voor de tweede keer geopend (rechthoek b in Figuur 40 en Figuur 41). Tijdens het uitvoeren van deze experimenten bleek dat er een verschil zat in de verschillende sensoren van CHARP Art Care. De drie sensoren van CHARP Art Care zijn in het begin van de metingen verdeeld

over drie locaties. Zo is er een sensor geplaatst in beide vitrines en een sensor buiten de vitrines op de afdeling, zoals eerder uitgelegd in paragraaf 3.1.3. Echter zijn er tijdens deze metingen ook drie HOBOSensoren geplaatst op dezelfde locaties als de CHARP Art Care-sensoren. Dit om ervoor te zorgen dat er met betrouwbare metingen gewerkt wordt. Hieruit blijkt dat de CHARP- en HOBOSensor die buiten de vitrines zijn geplaatst hetzelfde RV- en temperatuurverloop meten. Echter bij de vergelijking van het RV- en temperatuurverloop binnen de abstracte vitrine blijkt dat de RV 5% hoger ligt bij de CHARP-sensor in vergelijking met de HOBOSensor. De gemeten temperatuur van beide sensoren is wel gelijk. Door dit feit is er besloten om de CHARP Art Care-sensor van buiten de vitrine op 25 januari 2023 om te wisselen met de CHARP Art Care-sensor van binnen de vitrine (rechthoek b in Figuur 40 en Figuur 41).

Daarnaast zijn alle voegen van de vitrine afgeplakt met een dampdichte aluminiumtape om ervoor te zorgen dat er via deze voegen geen luchtuitwisseling ontstaat tussen de vitrine en de ruimte waarin deze geplaatst is. Hierna is de vitrine terug gesloten.

Na de wisseling van sensoren blijkt dat de RV in de abstracte vitrine terug snel toeneemt. Dit valt mogelijks te verklaren door het feit dat er in de abstracte vitrine toch een element aanwezig is dat vocht opgenomen heeft en daarna terug afgeeft. Bij het sluiten van de vitrine wordt er dadelijk vocht afgegeven in de vitrine. Dit resulteert in een snelle toename van de RV. Doordat er een gat voorzien is in de vitrine, om kabels en draden binnen te brengen, is dit gat langs de buitenkant afgedekt met plasticine. Deze plasticine is mogelijks ook een oorzaak voor de RV-toename in de abstracte vitrine.

Om zeker te zijn dat er geen vochtbufferend materiaal of vochtbron blootgesteld wordt aan de binnenomgeving van de abstracte vitrine is op 31 januari 2023 de vitrine langs de binnenzijde volledig afgeplakt met een dampdichte aluminiumfolie (rechthoek c in Figuur 40 en Figuur 41). Hierdoor heeft de vitrine geen invloed op het klimaat in de vitrine. Enkel het ventiel in de afdekplaat wordt nog als invloedsfactor beschouwd. Na het afplakken van de vitrine met aluminiumfolie is de vitrine terug gesloten. Echter is op dat moment de CHARP Art Care-sensor niet terug in de vitrine geplaatst. Deze sensor is op 3 februari 2023 terug in de vitrine gelegd om de metingen te hervatten.

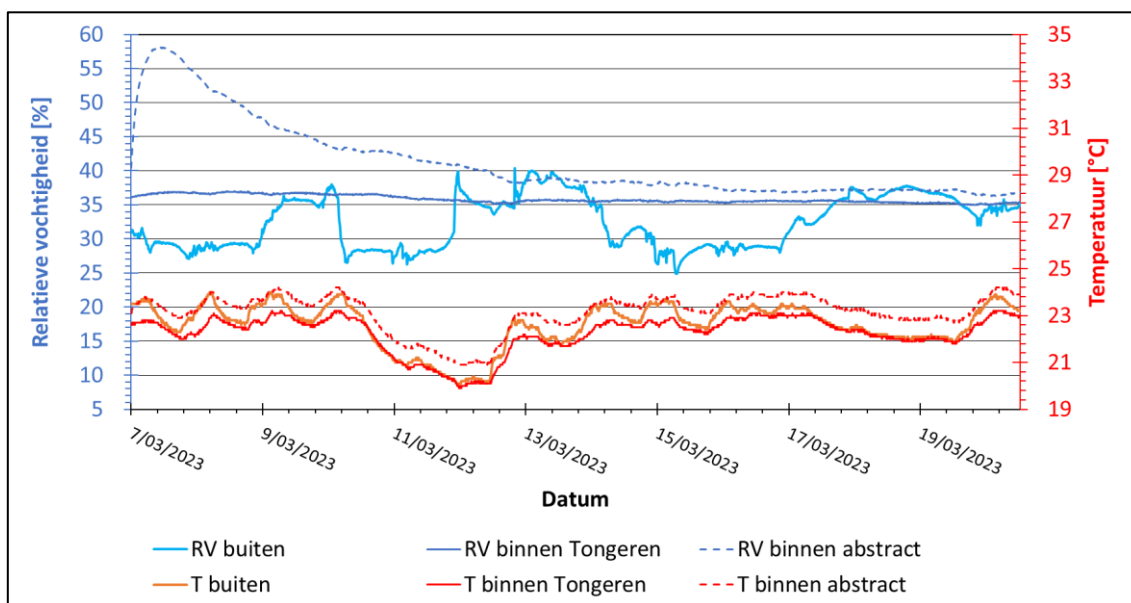
Na het afplakken van de vitrine blijkt dat de RV-toename in de abstracte vitrine verminderd is. De invloed van het weekend, waar de temperatuur daalt door het lager instellen van de thermostaat, is op Figuur 40 wel zichtbaar. Zoals eerder vermeld resulteert een daling van de temperatuur in een stijging van de RV. Op 15 februari 2023 is de abstracte vitrine nogmaals geopend om te controleren of het RV-verloop terugkeert naar het RV-verloop bekomen tussen 3 februari 2023 en 13 februari 2023 (aangeduid met rechthoek d in Figuur 40 en Figuur 41). Hieruit blijkt dat het RV-verloop 2% is gestegen ten opzichte van de periode ervoor.

3.3.1.6 Bekomen referentietoestanden

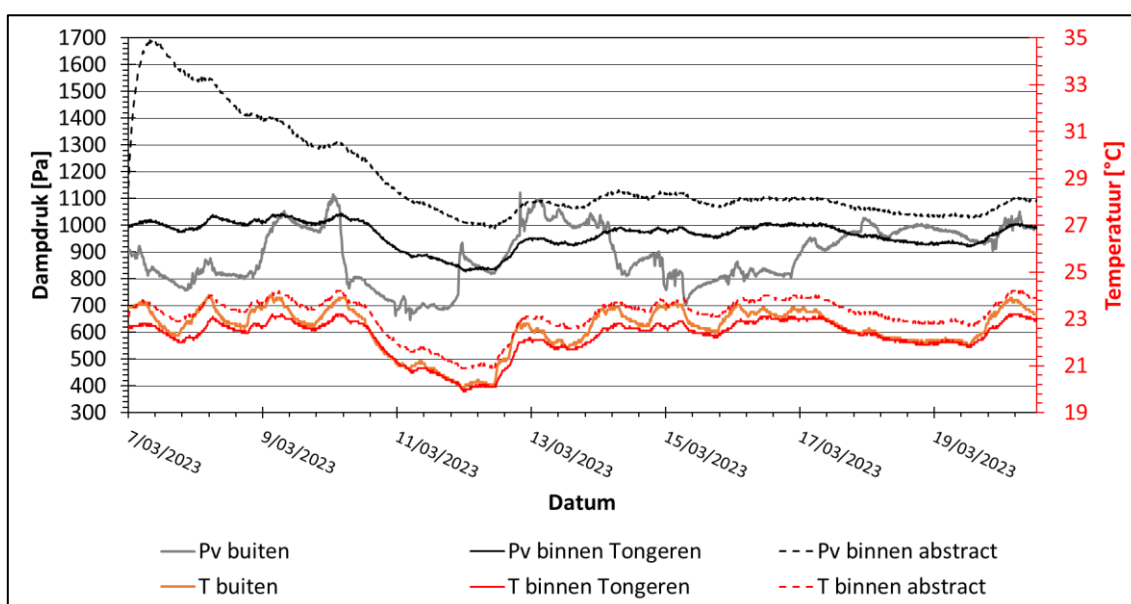
De bepaling van de referentietoestanden heeft een periode van ongeveer twee maanden in beslag genomen. Het RV-verloop in de professionele vitrine schommelt tussen 36-41% gedurende deze periode. Voor de abstracte vitrine was de bepaling van de referentietoestand moeilijker door de eerder vermelde invloedsfactoren. Na het afplakken van de vitrine met een dampdichte aluminiumfolie op 31 februari 2023 is de referentietoestand uiteindelijk bekomen. Het RV-verloop in de abstracte vitrine schommelt tussen de 37-42%. Dit terwijl de RV buiten de vitrines schommelt tussen 23-42%. Hieruit volgt dat de betonplex, waaruit de abstracte vitrine is opgebouwd, mogelijks ook een vochtbufferend vermogen bezit. Uit Figuur 40 valt op te merken dat de RV-fluctuaties in de professionele vitrine opmerkelijk kleiner zijn dan de RV-fluctuaties in de abstracte vitrine. Dit verschil in RV-fluctuaties is mogelijks te wijten aan het vochtbufferend vermogen van de professionele vitrine. Het temperatuurverloop vertoont een gelijkaardig verloop over de gehele periode. Hierbij daalt de temperatuur in het weekend tot een minimum van 17 °C. Door de week daalt de temperatuur gedurende de nacht met ongeveer 2 °C ten opzichte van de dag.

3.3.2 Experimenten 3 en 4: vitrines met calciumsilicaat

De eerste experimenten met het vochtbufferend materiaal calciumsilicaat zijn uitgevoerd in de periode van 7 maart 2023 tot en met 21 maart 2023. De resultaten van deze experimenten zijn getoond in Figuur 42 en Figuur 43. Hierbij is het ventiel van de abstracte vitrine gesloten en is er geen ventilator aanwezig in de professionele vitrine. De CaSi-samples zijn op 7 maart 2023 in de vitrines geplaatst.



Figuur 42: RV [%] - en temperatuurverloop [°C] experimenten 3 en 4 met calciumsilicaat 07/03/2023 - 21/03/2023



Figuur 43: Dampdruk [Pa] - en temperatuurverloop [°C] experimenten 3 en 4 met calciumsilicaat 07/03/2023 - 21/03/2023

3.3.2.1 Professionele vitrine van Tongeren

Uit Figuur 42 valt af te leiden dat de toevoeging van calciumsilicaat als vochtbron in de schuif van de professionele vitrine weinig invloed heeft op het RV-verloop in de vitrine. Zoals eerder vermeld lag het RV-verloop van de lege professionele vitrine tussen 36-41%. Na de toevoeging van calciumsilicaat ligt het RV-verloop tussen 35-37%. Dit wil zeggen dat het RV-verloop in de professionele vitrine weinig is veranderd na het toevoegen van calciumsilicaat. Het vocht dat het sample afgeeft aan de ruimte waarin het geplaatst is, geraakt niet tot in de vitrine-omgeving. Ter verificatie van deze veronderstelling zijn de

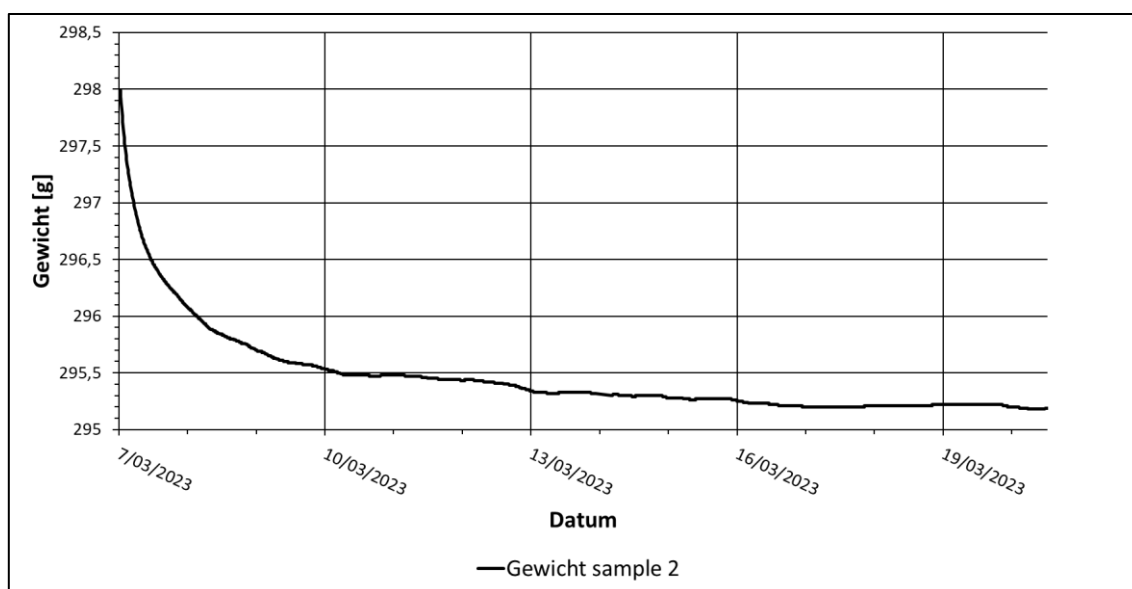
metingen van de HOBO-sensor in de schuif gebruikt. Hieruit bleek dat het sample wel degelijk vocht afgaf, omdat de RV in de schuif wel een stijgend verloop vertoonde. Het stabiel RV-verloop in de vitrine-omgeving valt mogelijks te verklaren doordat er een gebrek aan luchtcirculatie is tussen de schuif waarin het sample is geplaatst en de vitrine-omgeving. Deze invloed wordt daarom verder onderzocht in experiment 7. Het zou hiernaast ook kunnen liggen aan het materiaal hout waaruit de professionele vitrine is opgebouwd. Hout is namelijk een hygroscopisch materiaal. Dit betekent dat het afgegeven vocht van het sample wordt opgenomen door het hout waaruit de vitrine is opgebouwd. Als dit laatste het geval is, betekent dit dat het vocht gebufferd wordt door de vitrine zelf en niet wordt afgegeven aan de vitrine-omgeving. Uit Figuur 43 blijkt dat het dampdrukverloop schommelt tussen 830-1035 Pa.

3.3.2.2 Abstracte vitrine

In tegenstelling tot de professionele vitrine is de invloed van de toevoeging van calciumsilicaat in de abstracte vitrine wel zichtbaar in de RV-toename op Figuur 42. Dit is mogelijks te verklaren door het feit dat het sample rechtstreeks in contact staat met de vitrine-omgeving. Daarnaast wordt er veronderstelt dat de abstracte vitrine zelf minder vocht buffert dan de professionele vitrine. Bij het plaatsen van het sample in de abstracte vitrine geeft dit sample vocht af aan de vitrine-omgeving. Hierdoor stijgt de RV tot een maximum van 58%. Na het bereiken van dit maximum zakt het RV-verloop tot een evenwicht van 37% op 16 maart 2023. Hier valt het op dat de initieel hoge RV, door het afgegeven vocht van het sample, niet behouden blijft in de vitrine. Het RV-verloop in de abstracte vitrine ligt in de laatste week van het experiment kort bij het RV-verloop van de professionele vitrine. Dit wil zeggen dat de toevoeging van calciumsilicaat niet leidt tot een hoger gewenst RV-niveau op langere duur.

Aangezien het ventiel in de afdekplaat van de vitrine in dit experiment helemaal geopend stond, kan dit een mogelijke verklaring zijn voor het feit dat het afgegeven vocht van het sample uit de vitrine gaat via dit geopend ventiel. De invloed van het ventiel wordt verder onderzocht in experiment 5. Echter worden de RV-fluctuaties in de abstracte vitrine nu wel gebufferd door de toevoeging van calciumsilicaat in vergelijking met het RV-verloop van de lege vitrine, zoals getoond in Figuur 40. Het dampdrukverloop wordt niet langer enkel beïnvloed door de temperatuur, maar ook door de vochtproductie van het hygroscopisch materiaal.

Zoals eerder vermeld in 3.2.4 is het sample in de abstracte vitrine op een balans geplaatst om het gewicht van het sample gedurende het experiment te meten. De resultaten van de balans zijn getoond in Figuur 44 voor experiment 3.



Figuur 44: Gewicht calciumsilicaat sample 2 experiment 3 abstracte vitrine 07/03/2023 – 21/03/2023

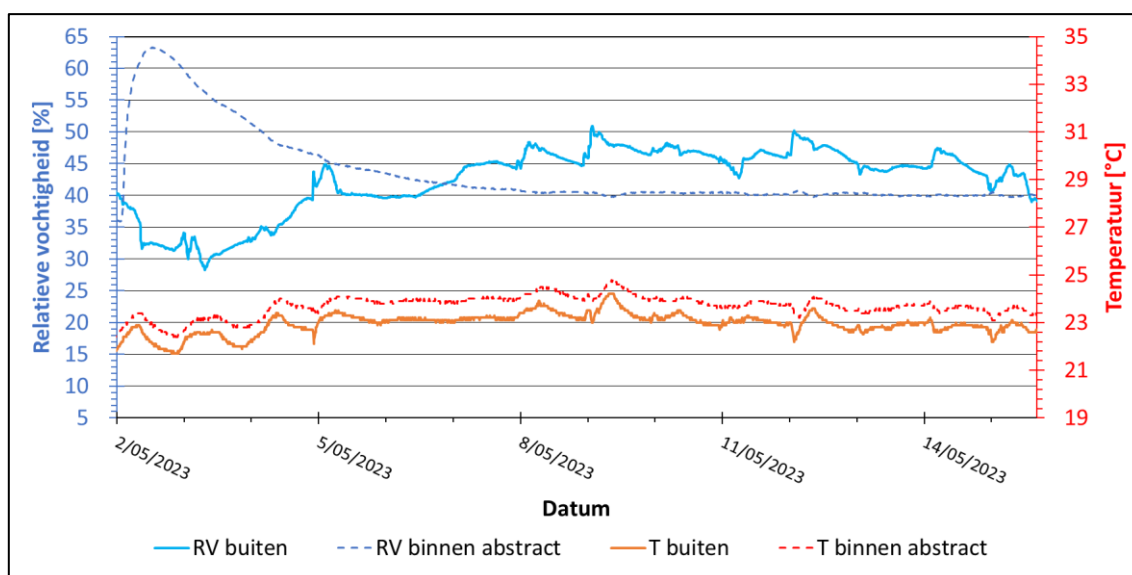
Uit Figuur 44 valt af te leiden dat het sample bij het plaatsen in de abstracte vitrine vocht afgeeft aan de vitrine-omgeving, zoals ook zichtbaar is in het RV-verloop van de abstracte vitrine in Figuur 42. Bij aanvang van het experiment heeft het sample een gewicht van 298,2 g, terwijl op het einde van het experiment dit gewicht nog slechts 295,2 g bedraagt. Dit wil zeggen dat het sample gedurende de twee weken van het experiment 3 g vocht heeft afgegeven aan de vitrine-omgeving. Deze resultaten worden verder gebruikt in hoofdstuk 5.

3.3.3 Experimenten 5 en 6: alternatieve testopstelling t.o.v. experimenten 3 en 4

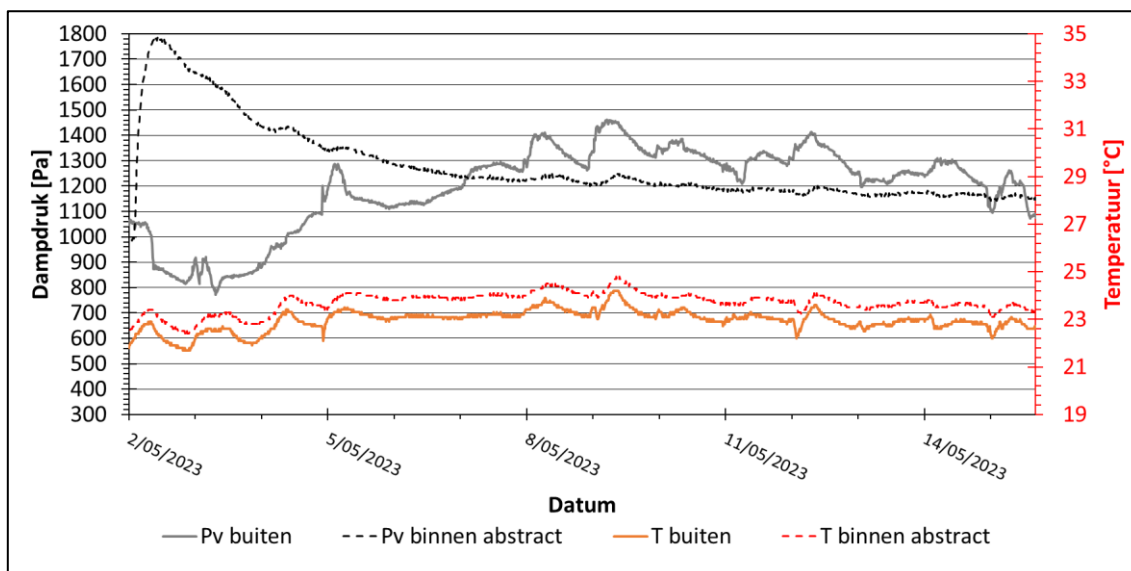
In de volgende reeks experimenten worden er twee parameters onderzocht in afzonderlijke experimenten op de vitrines. Enerzijds wordt de invloed van het ventiel (luchtdichtheid) in de abstracte vitrine op het RV-verloop in de vitrine achterhaald. Anderzijds wordt de invloed van de locatie van het vochtbufferend materiaal op het RV-verloop in de professionele vitrine achterhaald.

3.3.3.1 Experiment 5: abstracte vitrine met ventiel dicht

Het experiment waarbij de invloed van het ventiel in de abstracte vitrine wordt onderzocht heeft plaatsgevonden van 2 mei 2023 tot en met 16 mei 2023. De resultaten van dit experiment worden getoond in Figuur 45 en Figuur 46. CaSi-sample 4 is op 2 mei 2023 in de abstracte vitrine geplaatst.



Figuur 45: RV [%] - en temperatuurverloop [°C] experiment 5 met calciumsilicaat 02/05/2023 - 16/05/2023



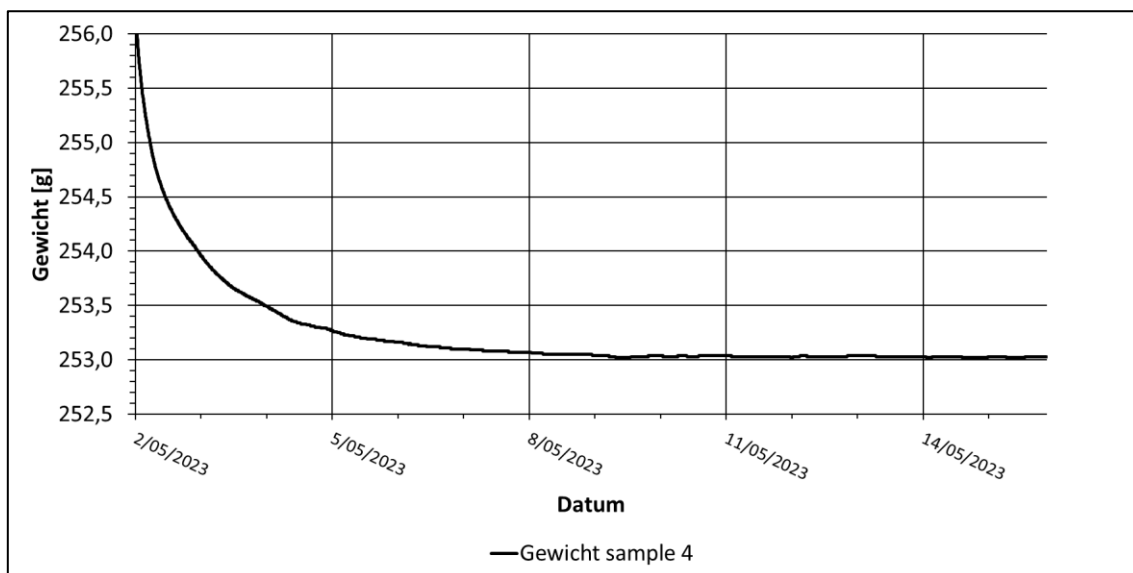
Figuur 46: Dampdruk [Pa] - en temperatuurverloop [°C] experiment 5 met calciumsilicaat 02/05/2023 - 16/05/2023

Zoals bij experiment 3 is de toevoeging van het CaSi-sample in de abstracte vitrine zichtbaar in het RV-verloop in de vitrine, zoals blijkt uit Figuur 45. Het CaSi-sample geeft vocht af aan de vitrine-omgeving, hierbij stijgt de RV in de abstracte vitrine tot een maximum van 63%. In vergelijking met experiment 3, waarbij de RV tot een maximum van 58% steeg, ligt deze maximale RV bij experiment 5 dus 5% hoger. Dit is een eerste indicatie dat de sluiting van het ventiel een impact heeft op het RV-verloop in de abstracte vitrine. Door het ventiel helemaal dicht te draaien stijgt de luchtdichtheid van de vitrine. Hierdoor blijft het afgegeven vocht van het CaSi-sample langer in de vitrine zelf.

Na het bereiken van dit maximum zakt het RV-verloop tot een evenwicht van 40% op 9 mei 2023. Hier valt het op dat de initieel hoge RV door een afgifte van vocht door het sample niet behouden blijft in de vitrine. Dit was ook het geval bij experiment 3, waarbij het ventiel van de abstracte vitrine volledig open stond. Echter ligt het RV-verloop op het einde van het experiment 3% hoger dan bij experiment 3, hier bedroeg de stabiele RV 37%. Uit Figuur 46 valt ook af te leiden dat het dampdrukverloop stijgt tot een maximum van 1800 Pa. Dit maximum ligt ook 100 Pa hoger in vergelijking met het dampdrukverloop van experiment 3 in Figuur 43.

Algemeen wordt er vastgesteld dat de invloed van het ventiel in de abstracte vitrine zichtbaar is in het RV-verloop van experimenten 3 en 5. Zo zorgt de sluiting van het ventiel voor een hogere luchtdichtheid van de vitrine. Deze hogere luchtdichtheid leidt tot een toename van 3% in het RV-verloop van de abstracte vitrine op langere duur.

Ook bij dit experiment is het sample in de abstracte vitrine op een balans geplaatst om het gewicht van het sample gedurende het experiment te meten. De resultaten van de balans zijn getoond in Figuur 47 voor experiment 5.

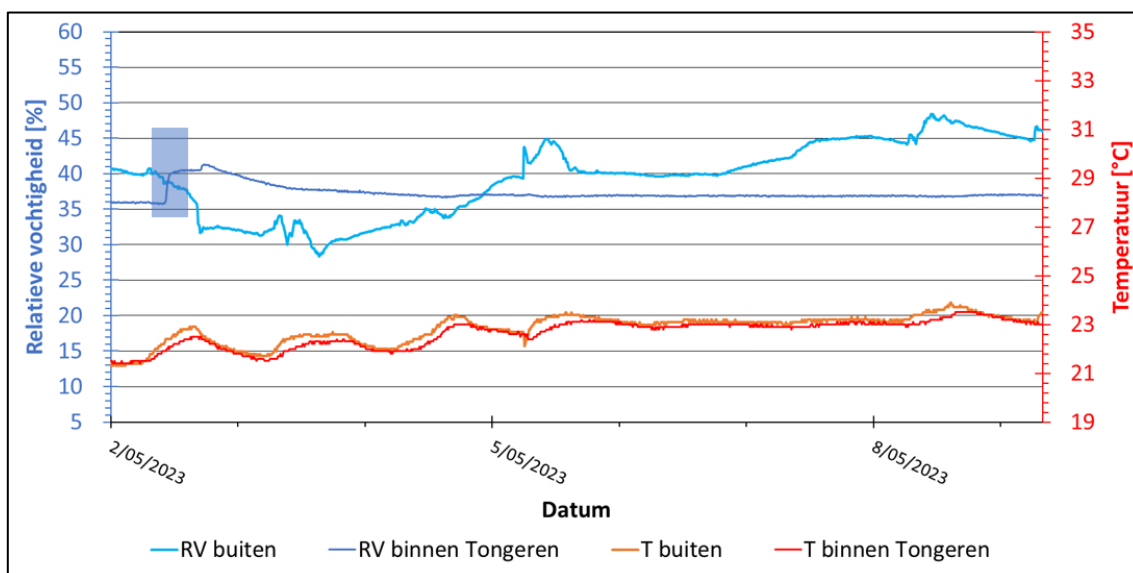


Figuur 47: Gewicht calciumsilycaat sample 4 experiment 5 abstracte vitrine 02/05/2023 – 16/05/2023

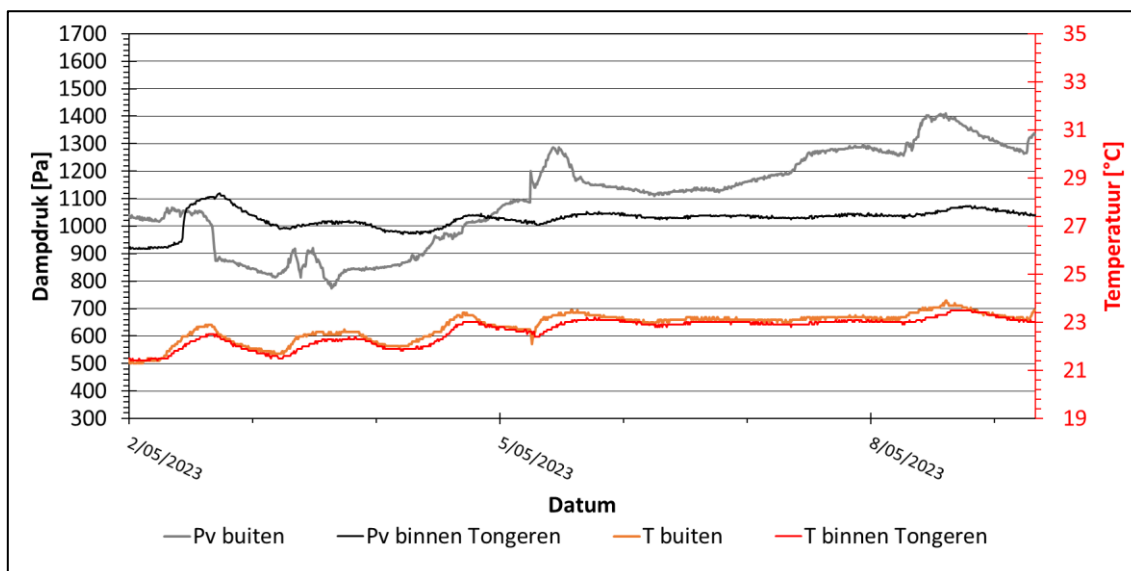
Uit Figuur 47 valt af te leiden dat het sample bij het plaatsen in de abstracte vitrine vocht afgeeft aan de vitrine-omgeving, zoals ook zichtbaar is in het RV-verloop van de abstracte vitrine in Figuur 45. Bij aanvang van het experiment heeft het sample een gewicht van 256,5 g, terwijl op het einde van het experiment dit gewicht nog slechts 253 g bedraagt. Dit wil zeggen dat het sample gedurende de twee weken van het experiment 3,5 g vocht heeft afgegeven aan de vitrine-omgeving. Deze resultaten worden verder gebruikt in hoofdstuk 5.

3.3.3.2 Experiment 6: CaSi-sample boven in professionele vitrine

Het experiment waarbij het CaSi-sample boven in de professionele vitrine geplaatst wordt, is uitgevoerd van 2 mei 2023 tot en met 9 mei 2023. De testopstelling van dit experiment is eerder getoond in Figuur 33. De resultaten van de metingen zijn getoond in Figuur 48 en Figuur 49. Het CaSi-sample is op 2 mei 2023 in de professionele vitrine geplaatst.



Figuur 48: RV [%] - en temperatuurverloop [°C] experiment 6 met calciumsilycaat 02/05/2023 - 09/05/2023



Figuur 49: Dampdruk [Pa] - en temperatuurverloop [°C] experiment 6 met calciumsilicaat 02/05/2023 - 09/05/2023

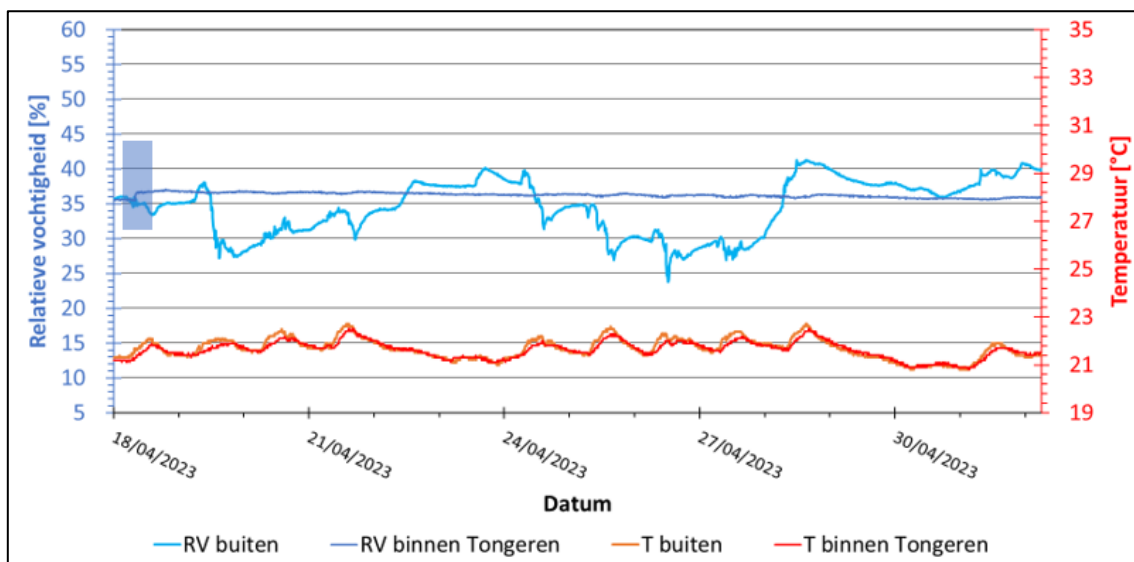
Uit Figuur 48 valt af te leiden dat de locatie van het CaSi-sample een invloed heeft op het RV-verloop in de professionele vitrine. In experiment 4 lag het CaSi-sample in de voorziene schuif van de professionele vitrine. Hierbij was de invloed van het CaSi-sample niet zichtbaar op het RV-verloop in de professionele vitrine, zoals getoond in Figuur 42. De verklaring hiervoor was dat het afgegeven vocht van het sample niet tot in de vitrine-omgeving geraakt is door een gebrek aan luchtcirculatie en het vochtbufferend vermogen van de vitrine zelf. Bij experiment 6 is ervoor gekozen om het sample rechtstreeks bloot te stellen aan de vitrine-omgeving. Bij het plaatsen van het sample boven in de professionele vitrine (aangeduid met de blauwe rechthoek in Figuur 48) is er een RV-toename van 5%. Hierbij stijgt de RV van 36% tot 41%.

Nadat de RV stijgt tot 41% daalt deze tot een constant verloop van 37% RV. Bij experiment 4, waarbij het CaSi-sample in de schuif van de professionele vitrine is geplaatst, lag de RV eerder rond de 35%. Dit wil zeggen dat er een kleine RV-toename is van 2% in de professionele vitrine door het sample boven in de vitrine te plaatsen. Deze RV-toename is echter klein en valt te verklaren door het vochtbufferend vermogen van de professionele vitrine. Hierbij wordt het afgegeven vocht door het sample gebufferd door de MDF-platen van de professionele vitrine. Daarentegen verloopt het RV-verloop na langere duur zeer stabiel. Dit kan een mogelijk gevolg zijn van het CaSi-sample dat rechtstreeks wordt blootgesteld aan de vitrine-omgeving.

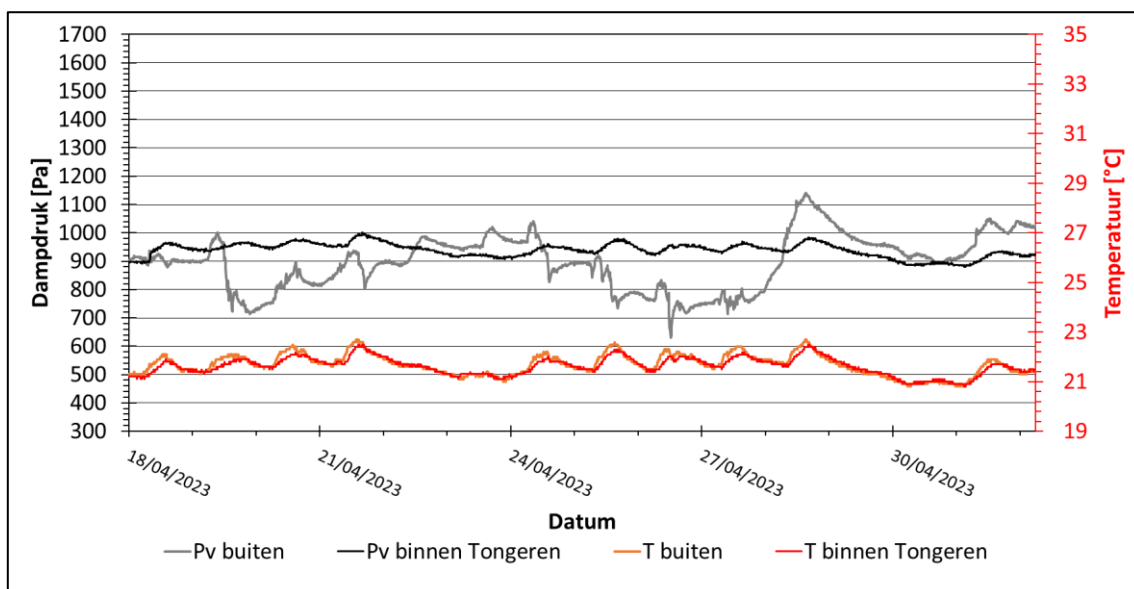
3.3.4 Experiment 7 en 8: invloed van een ventilator

3.3.4.1 Experiment 7: met calciumsilicaat-sample

Het experiment met de toevoeging van een ventilator in de professionele vitrine is uitgevoerd van 18 april 2023 tot en met 2 mei 2023. Hierbij is de ventilator in de professionele vitrine geplaatst zoals eerder vermeld in 3.2.5. De resultaten van dit experiment worden getoond in Figuur 50 en Figuur 51. Het CaSi-sample is in dit experiment, net zoals in experiment 4 in de schuif van de professionele vitrine geplaatst. Op 18 april 2023 is het sample in de vitrine geplaatst.



Figuur 50: RV [%] - en temperatuurverloop [°C] experiment 7 met calciumsilicaat en ventilator 18/04/2023 - 02/05/2023



Figuur 51: Dampdruk [Pa] - en temperatuurverloop [°C] experiment 7 met calciumsilicaat en ventilator 18/04/2023 - 02/05/2023

Uit Figuur 50 blijkt dat de toevoeging van een ventilator (aangeduid met de blauwe rechthoek in Figuur 50) in de professionele vitrine weinig impact heeft op het RV-verloop in de vitrine. Tijdens experiment 4 werd het CaSi-sample in de schuif van de professionele vitrine geplaatst zonder ventilator. Hierbij lag het RV-verloop in de vitrine tussen 35-37%. Na de toevoeging van een ventilator in de vitrine is het RV-verloop constant rond 36%. Echter wordt er wel opgemerkt dat de RV-fluctuaties kleiner zijn na het toevoegen van de ventilator in vergelijking met het RV-verloop in Figuur 42. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de vochtuitwisseling tussen de vitrine en het CaSi-sample bevordert wordt door de ventilator. Hierdoor is de vochtbufferende werking van het CaSi-sample beter. Het dampdrukverloop vertoont hetzelfde verloop als het temperatuurverloop, zoals getoond in Figuur 51. Hierbij schommelt de dampdruk tussen 880-1000 Pa.

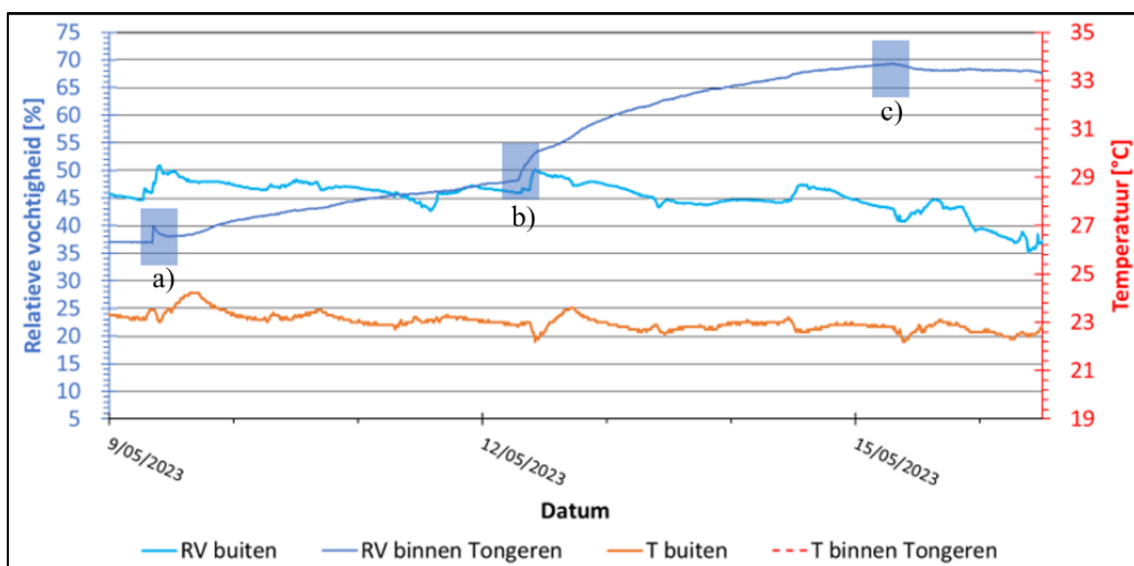
3.3.4.2 Experiment 8: bakje water i.p.v. CaSi

Om de invloed van de luchtcirculatie tussen het vochtbufferend materiaal en de vitrine-omgeving in de professionele vitrine verder te achterhalen wordt er een bijkomend experiment uitgevoerd. Hierbij wordt dezelfde testopstelling gebruikt als in experiment 7. Echter is er gekozen om het CaSi-sample te vervangen door een bakje water, getoond in Figuur 52. Het doel hiervan is om meer vocht te produceren in de professionele vitrine.

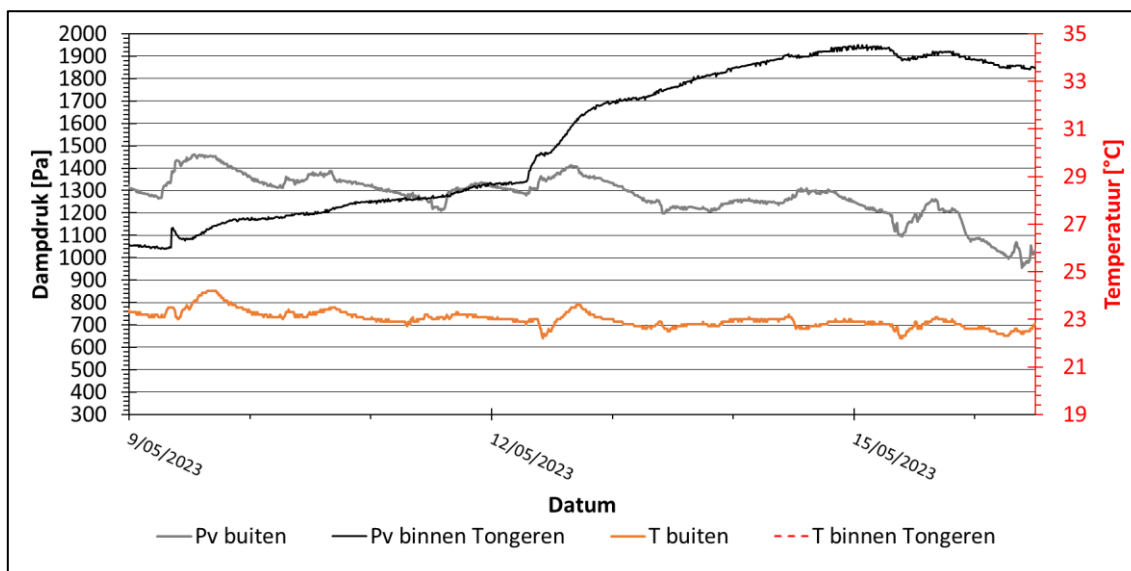


Figuur 52: Bakje water gebruikt in experiment 8

Het experiment met de toevoeging van een bakje water in de professionele vitrine is uitgevoerd van 9 mei 2023 tot en met 16 mei 2023. De resultaten van dit experiment worden getoond in Figuur 53 en Figuur 54.



Figuur 53: RV [%] - en temperatuurverloop [°C] experiment 8 met water en ventilator 09/05/2023 - 16/05/2023



Figuur 54: Dampdruk [Pa] - en temperatuurverloop [°C] experiment 8 met water en ventilator 09/05/2023 - 16/05/2023

In dit experiment is het bakje water op 9 mei 2023 in de professionele vitrine geplaatst (aangeduid met rechthoek a in Figuur 53). Hierbij is het bakje water, net zoals het CaSi-sample in experiment 7, in de schuif van de professionele vitrine geplaatst. Om de invloed van de ventilator in kaart te brengen is ervoor gekozen om de eerste drie dagen van het experiment de ventilator niet aan te zetten. Op 12 mei 2023 is de ventilator aangezet (aangeduid met rechthoek b in Figuur 53). De ventilator is geplaatst op dezelfde locatie als in experiment 7. Dit wil zeggen dat de ventilator boven de schuif in de professionele vitrine geplaatst is, zoals getoond in Figuur 34. Om te controleren of de ventilator op een gunstige locatie geplaatst is, wordt de ventilator op 15 mei 2023 bij het bakje water in de schuif geplaatst (aangeduid met rechthoek c in Figuur 53).

Uit Figuur 53 en Figuur 54 worden een aantal vaststellingen gedaan. Ten eerste zorgt de plaatsing van het bakje water in de professionele vitrine voor een sterke toename van de RV. Dit valt te verklaren doordat er veel vocht geproduceerd wordt in de professionele vitrine. In vergelijking met de plaatsing van een CaSi-sample in de vitrine is de vochtproductie in dit geval veel groter. Door deze grote vochtproductie stijgt de RV in de vitrine omdat de vitrine zelf, opgebouwd uit MDF, niet meer in staat is om al het vocht te bufferen. Een mogelijke verklaring hiervoor kan zijn dat de MDF-platen verzadigd raken na een bepaalde duur.

Ten tweede wordt er geconcludeerd dat de ventilator daadwerkelijk een invloed heeft op het RV-verloop in de vitrine. De stijging van de RV in de vitrine op 12 mei 2023 valt te verklaren doordat de luchtcirculatie tussen het bakje water (in de schuif) en de vitrine-omgeving bevorderd wordt door de ventilator aan te zetten.

De laatste vaststelling houdt in dat de verplaatsing van de ventilator naar de schuif van de professionele vitrine niet leidt tot een betere luchtcirculatie in de vitrine. Dit bevestigt dat de locatie van de ventilator in experiment 7 gunstig is voor de verbetering van de luchtcirculatie. Hierbij moet wel rekening gehouden worden dat bij de verplaatsing van de ventilator de RV in de professionele vitrine al redelijk hoog is. Om een duidelijke vergelijking tussen beide locaties van de ventilator te maken, moet het experiment nog eens uitgevoerd worden. Ditmaal met de ventilator in de schuif, startend met een lagere RV in de vitrine. Echter is dit experiment niet uitgevoerd in dit onderzoek.

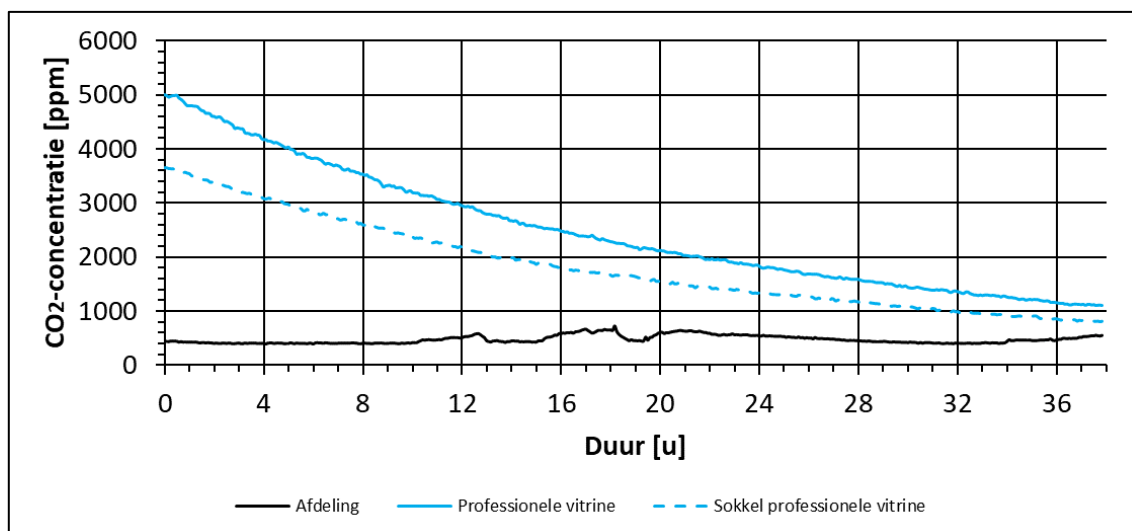
3.3.5 Tracer verval test

Om de hoeveelheid CO₂ te bepalen die nodig is om het gewenste startniveau te bereiken, wordt gebruikgemaakt van een vuistregel. Deze vuistregel beschrijft dat voor het bereiken van een CO₂-concentratie van 1000 ppm in een volume van 1 m³ ongeveer 2 g CO₂ nodig is. Aan de hand van deze vuistregel en de gekende volumes van de vitrines die gebruikt worden binnen dit onderzoek is de hoeveelheid CO₂ bepaald die nodig is voor het uitvoeren van deze experimenten.

Vooraleer van start te gaan met het injecteren van extra CO₂ wordt eerst het referentieniveau bepaald in beide vitrines. Op deze manier wordt het einde van de experimenten bepaald. Namelijk wanneer de CO₂-concentratie in de vitrine terug gelijk is aan het referentieniveau. Pas dan is de bijgevoegde CO₂ volledig verdwenen uit de vitrine.

3.3.5.1 Professionele vitrine

De resultaten van de tracer verval test op de professionele vitrine zijn getoond in Figuur 55. Hierbij is de CO₂-concentratie op de afdeling, in de professionele vitrine en in de sokkel van de professionele vitrine in functie van de tijd getoond. De CO₂ is bij dit experiment geïnjecteerd onder het glazen omhulsel van de professionele vitrine.



Figuur 55: Resultaten tracer verval test professionele vitrine

Het startpunt van de meting is het moment waarbij de CO₂-concentratie lager wordt dan het maximale meetbereik van de sensoren (5000 ppm). Na ongeveer 38 uur was de CO₂-concentratie in de professionele vitrine en in de sokkel van de professionele vitrine voldoende gedaald om het experiment tot een einde te brengen. Uit Figuur 55 blijkt dat ook een deel van de geïnjecteerde CO₂ overgaat van de bovenruimte van de vitrine naar de sokkel van de vitrine. Dit is te verklaren doordat in de sokkel van de vitrine ook een hoge CO₂-concentratie wordt waargenomen. Hieruit blijkt dat de schuif voor het plaatsen van vochtbufferende materialen niet volledig luchtdicht is ten opzichte van de sokkel van de vitrine.

Het ventilatievoud van de professionele vitrine en van de sokkel van de professionele vitrine is berekend met Formule (2), de resultaten zijn getoond in Tabel 8.

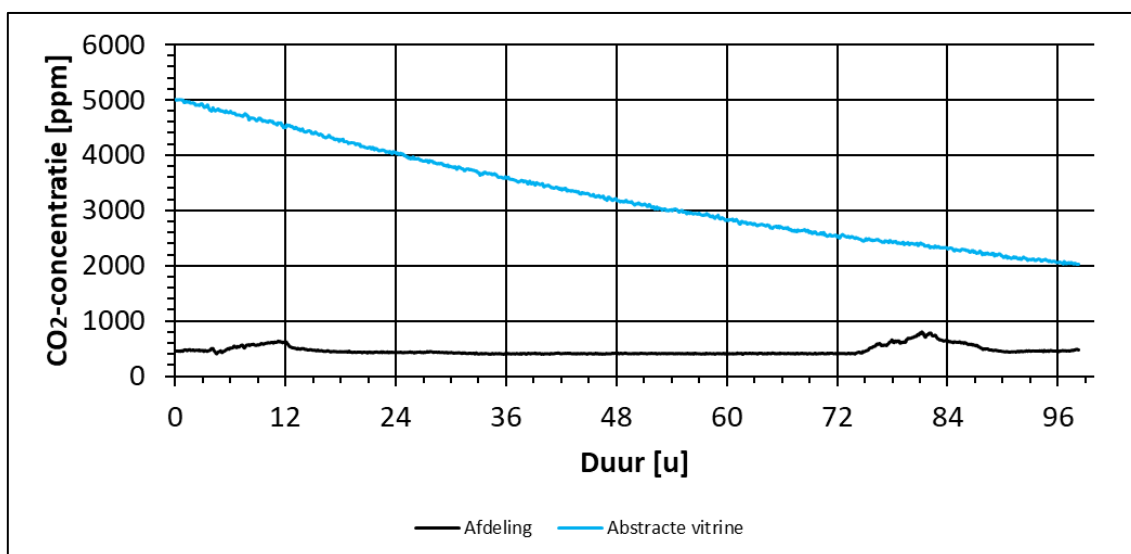
Tabel 8: Resultaten tracer verval test professionele vitrine

	C _{in1} [ppm]	C _{in2} [ppm]	C _{ex} [ppm]	Δt [u]	n [u ⁻¹]	n [d ⁻¹]
Professionele vitrine	4999	1104	476	37,82	0,05	1,25
Sokkel professionele vitrine	3649	817	476	37,82	0,06	1,42

Uit Tabel 8 is af te leiden dat het ventilatievoud van de professionele vitrine gelijk is aan $1,25 \text{ d}^{-1}$ oftewel $0,05 \text{ u}^{-1}$. Voor de sokkel van de professionele vitrine wordt een ventilatievoud van $1,42 \text{ d}^{-1}$ bekomen, dit is gelijk aan $0,06 \text{ u}^{-1}$. Voor de berekening van deze ventilatievouden wordt de gemiddelde CO_2 -concentratie op de afdeling waarop de vitrine geplaatst is over de gehele testduur gebruikt als externe CO_2 -concentratie. Echter dient er wel rekening mee gehouden te worden dat er in de professionele vitrine een schuif zit. Hierdoor gebeurt de CO_2 -uitwisseling niet enkel tussen het volume in het glazen omhulsel en de ruimte waarin de vitrine is geplaatst, maar ook tussen dit volume en het volume in de sokkel van de vitrine.

3.3.5.2 Abstracte vitrine

De tracer verval test is ook uitgevoerd op de abstracte vitrine, tijdens het experiment stond het ventiel helemaal dicht. Dit experiment duurde ongeveer 98 uur, de resultaten zijn getoond in Figuur 56.



Figuur 56: Resultaten tracer verval test abstracte vitrine

Opnieuw is het startpunt van de meting het moment waarbij de CO_2 -concentratie lager wordt dan het maximum meetbereik van de sensoren. Met behulp van Formule (2) is ook het ventilatievoud bepaald voor de abstracte vitrine. Tabel 9 toont de resultaten van de berekening.

Tabel 9: Resultaten tracer verval test abstracte vitrine

	C_{in1} [ppm]	C_{in2} [ppm]	C_{ex} [ppm]	Δt [u]	n [u^{-1}]	n [d^{-1}]
Abstracte vitrine	5000	2025	461	98,29	0,01	0,26

Uit Tabel 9 volgt dat het ventilatievoud in de abstracte vitrine gelijk is aan $0,26 \text{ d}^{-1}$ oftewel $0,01 \text{ u}^{-1}$. Als het ventilatievoud van de abstracte vitrine vergeleken wordt met het ventilatievoud van de professionele vitrine is deze waarde lager. Deze kleinere waarde duidt erop dat de abstracte vitrine luchtdichter is dan de professionele vitrine. Dit wil zeggen dat de lucht in de abstracte vitrine minder snel ververst wordt in vergelijking met de professionele vitrine.

4 MBV in functie van RV van calciumsilicaat

Zoals eerder vermeld in paragraaf 2.8.1 van de literatuurstudie is er een standaard testprotocol ontwikkeld voor de bepaling van de MBV van een vochtbufferend materiaal, de Nordtest. In dit protocol wordt de MBV bepaald aan de hand van slechts één RV-bereik: 8 uur hoge RV van 75% gevolgd door 16 uur lage RV van 33%. Het gemiddelde van dit RV-bereik ligt op 54%. Zo wordt er slechts een MBV bepaald voor een gemiddelde RV van 54%.

Echter, voor vochtbufferende materialen die beter vocht bufferen onder 33% RV of boven 75% RV is de MBV, bepaald met de Nordtest, geen representatieve waarde voor de voorstelling van het vochtbufferend vermogen van het materiaal. Zo wordt bijvoorbeeld voor het materiaal Pro Sorb, dat een optimaal RV-bereik heeft van 30-60%, een betrouwbare MBV gevonden met de Nordtest. Dit omdat dit RV-bereik aansluit bij de condities opgelegd binnen het testprotocol. Echter voor het materiaal Art Sorb, met een optimaal RV-bereik van 60-80%, is de kans reëel dat er een onderschatting gemaakt wordt van de MBV van het materiaal. Dit omdat het RV-bereik van Art Sorb bijna volledig buiten het RV-bereik van de Nordtest valt.

Binnen deze thesis wordt er gebruikgemaakt van calciumsilicaat als vochtbufferend materiaal. Zoals eerder vermeld in paragraaf 2.7.2 van de literatuurstudie ligt het optimale RV-bereik van dit materiaal in dezelfde grootteorde als dat van Art Sorb, namelijk 60-80%.

Het probleem dat de Nordtest slechts een representatieve waarde oplevert voor materialen die goed vocht bufferen binnen de grenzen van de Nordtest, kan opgelost worden door een MBV te simuleren die in functie staat van de RV. In plaats van een eenduidig bepaalde MBV (berekend a.d.h.v. Formule (3)) wordt een dynamische MBV gecreëerd die in functie staat van de RV. Deze dynamische MBV kan in verdere simulaties gebruikt worden en zorgt ervoor dat bij elke RV een representatieve MBV wordt gebruikt.

De MBV in functie van de RV voor het materiaal calciumsilicaat werd eerder experimenteel onderzocht in [31], door Trimpeneers. Het resultaat van deze MBV is getoond in Figuur 17. Binnen dit hoofdstuk is het doel om de MBV van CaSi te simuleren in functie van de RV met behulp van het hygrothermisch simulatieprogramma Delphin. De materiaaleigenschappen zijn eerder bepaald in [31], [41] en [42]. Deze materiaaleigenschappen worden gebruikt binnen de simulaties in Delphin.

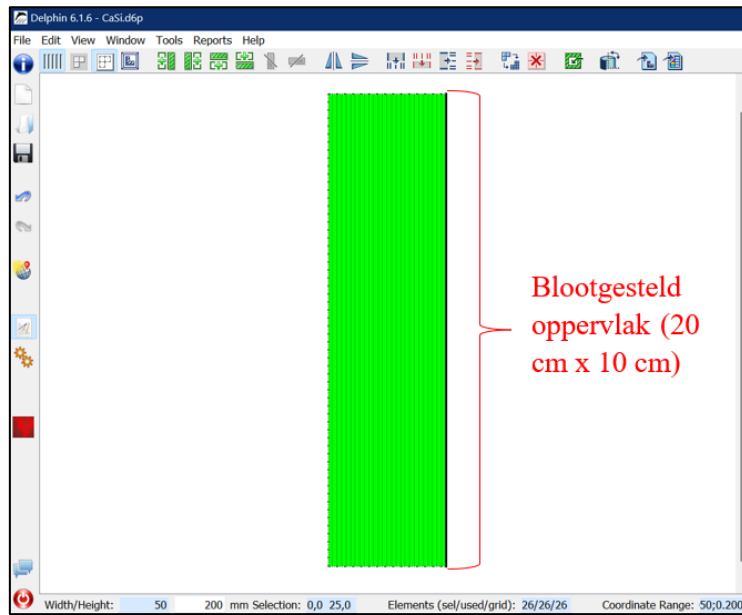
Met behulp van de simulaties in Delphin wordt het vochtbufferend vermogen achterhaald van het calciumsilicaat gebruikt in dit onderzoek. Dit is van belang omdat er ook verschillende soorten calciumsilicaat voorkomen in de praktijk. Hierdoor worden er zo veel mogelijk materiaaleigenschappen gebruikt voor het calciumsilicaat gebruikt in dit onderzoek.

4.1 Invoerparameters Delphin

4.1.1 Geometrie van het sample

Allereerst is het van belang dat de geometrie van het sample correct wordt ingegeven in de software. Er worden simulaties uitgevoerd voor een sample met de volgende afmetingen: 20 cm x 10 cm x 5 cm. In de software is ervoor gekozen om het sample te tekenen met een hoogte van 5 cm en een lengte van 20 cm. Dit wil zeggen dat de breedte van het sample een eenheidslengte van 1 m heeft (deze eenheidslengte staat loodrecht op het tekenvlak). Deze eenheidslengte wordt automatisch bepaald door Delphin wanneer er in 2D wordt getekend.

Voor de bepaling van de MBV is echter enkel het blootgesteld oppervlak voor vochtuitwisseling van belang. Dit is het bovenzvlak van het sample, 20 cm x 10 cm. Deze 10 cm heeft in Delphin de eenheidslengte van 1 m. Bij de berekening van de MBV wordt hiermee rekening gehouden. De geometrie van het sample wordt getoond in Figuur 57.



Figuur 57: Geometrie van het sample in Delphin (20 cm x 5 cm)

4.1.2 Materiaaleigenschappen calciumsilicaat

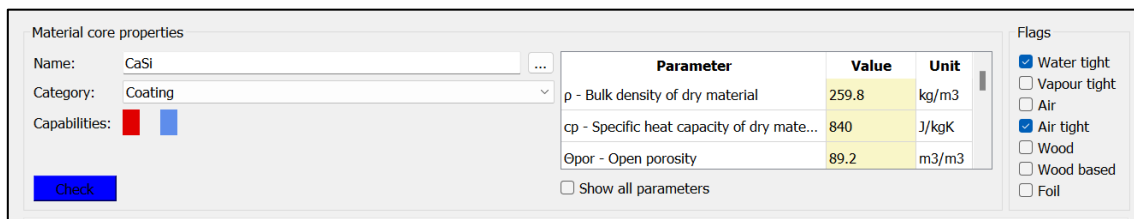
In het programma Delphin is een ingebouwde databank van verschillende materialen aanwezig. Er dient aan de geometrie van het sample een materiaal worden toegekend. Het materiaal calciumsilicaat is een bestaand materiaal in de databank van Delphin. Echter is er zoals eerder vermeld een groot verscheidenheid in het materiaal calciumsilicaat zelf. Hierdoor is er geopteerd om een nieuw materiaalbestand aan te maken in de bestaande databank van Delphin. Dit aangezien er al veel materiaaleigenschappen bekend zijn van het calciumsilicaat gebruikt in dit onderzoek.

Tabel 10 geeft een overzicht weer van de belangrijkste bekende materiaaleigenschappen die gebruikt zijn in de simulaties.

Tabel 10: Gebruikte materiaaleigenschappen calciumsilicaat in Delphin

Eigenschap	Waarde	Eenheid
Dichtheid droog materiaal (ρ_{dry}) [41]	259,8	kg/m ³
Soortelijke warmtecapaciteit (C_p) [43]	840	J/(kgK)
Poreusheid (θ_{por}) [42]	89,2	m ³ /m ³
Thermische geleidbaarheid van het droge materiaal (λ_{dry}) [43]	0,07	W/(mK)

Deze materiaaleigenschappen zijn handmatig ingegeven in het materiaalbestand van calciumsilicaat dat eerder aangemaakt is in de databank van Delphin. Verder is ook het water- en luchttransport uitgeschakeld om de simulaties eenvoudiger te maken. De implementatie van de materiaaleigenschappen wordt getoond in Figuur 58.



Figuur 58: Implementatie materiaaleigenschappen calciumsilicaat in Delphin

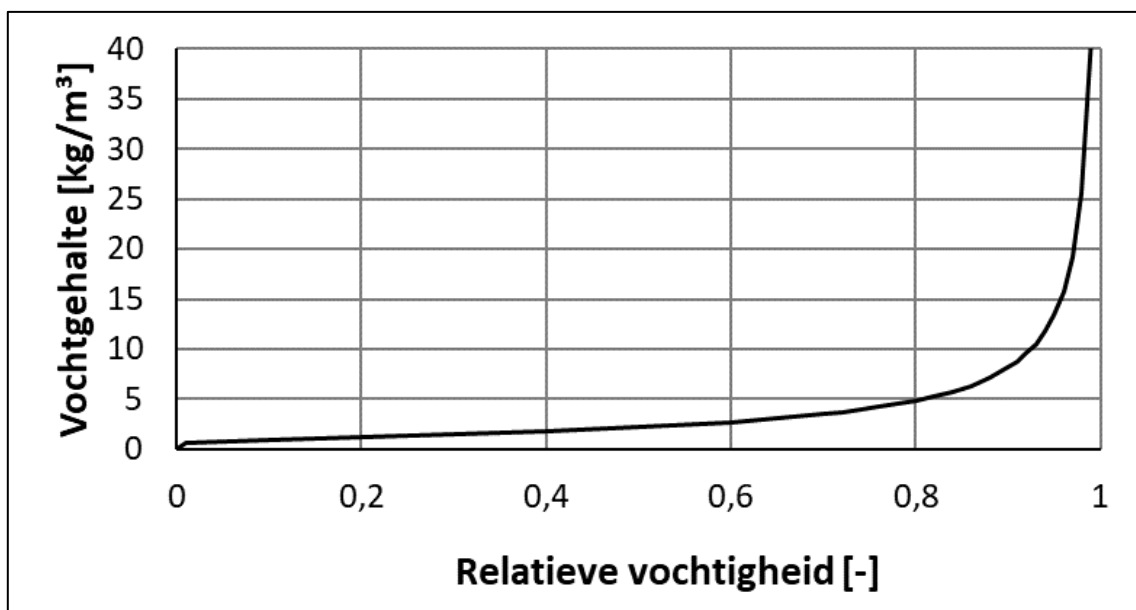
Naast de reeds gekende materiaaleigenschappen wordt ook de hygroscopische curve van calciumsilicaat ingevoerd in Delphin.

De hygroscopische curve van het materiaal is bepaald met Formule (14) [44]:

$$w = w_{sat} * (1 + (m * \ln(\phi))^n)^{\frac{1-n}{n}} \quad (14)$$

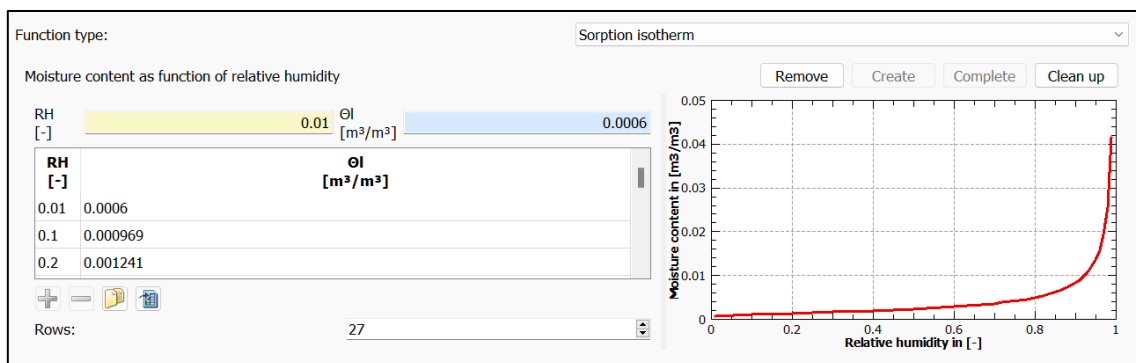
Met: ϕ = de relatieve vochtigheid
 $w_{sat} = 795$ [kg/m³] [44]
 $m = -7184,71$ (adsorptie) [45]
 $n = 1,69$ (adsorptie) [45]

Het resultaat van deze hygroscopische curve wordt getoond in Figuur 59.



Figuur 59: Hygroscopische curve calciumsilicaat (adsorptie)

In Delphin is het mogelijk om deze hygroscopische curve te implementeren. Hierbij moet er enkel rekening gehouden worden met de eenheid van het vochtgehalte. De vochtgehaltes dienen in Delphin ingegeven te worden in m³/m³. De implementatie van deze hygroscopische curve in Delphin voor het materiaal calciumsilicaat is getoond in Figuur 60.



Figuur 60: Implementatie hygroscopische curve calciumsilicaat in Delphin

Een laatste belangrijke eigenschap van het materiaal is de dampdiffusieweerstand μ . Deze waarde geeft aan hoe moeilijk waterdamp doorheen een materiaal gaat. De dampdiffusieweerstand drukt de verhouding uit van de waterdampgeledingscoëfficiënt van een materiaal δ_p ten opzichte van deze van lucht δ_a . De waterdampgeledingscoëfficiënt van lucht is een constante waarde en bedraagt $18,5 \times 10^{-9}$ s. Doorgaans wordt deze parameter bepaald met een experimentele test, de Cup Test [4], [31].

De uitdrukking wordt als volgt geschreven:

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p} \quad (15)$$

Met: δ_a = de waterdampgeledingscoëfficiënt van lucht [kg/s]
 δ_p = de waterdampgeledingscoëfficiënt van het materiaal [kg/s]

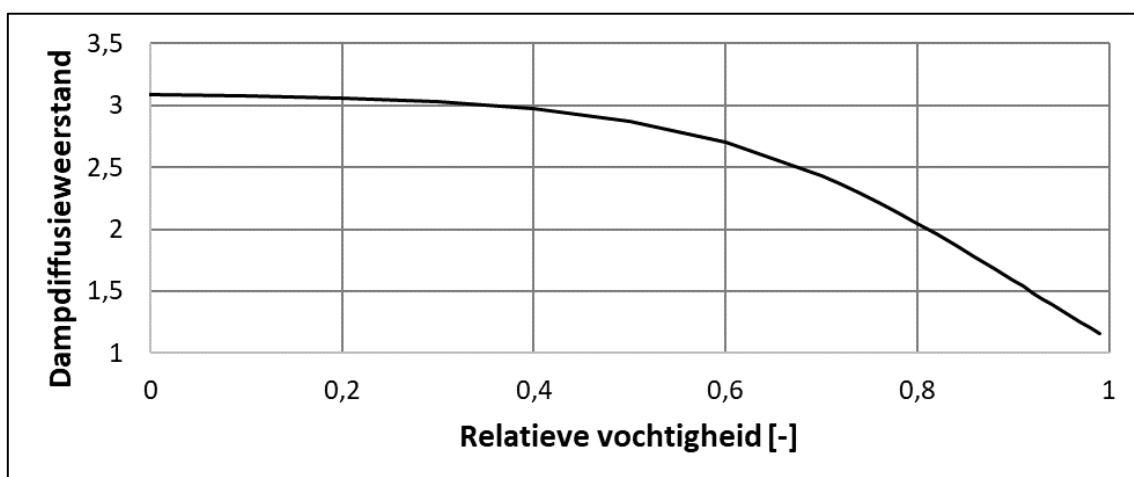
De Cup Test werd niet uitgevoerd in dit onderzoek, hierdoor is het dus niet mogelijk om bovenstaande uitdrukking te gebruiken voor het bepalen van de dampdiffusieweerstand.

In [44] is ook een analytische uitdrukking terug te vinden voor de bepaling van de dampdiffusieweerstand in functie van de RV. Dit is van belang omdat de dampdiffusieweerstand in realiteit niet constant is bij elke RV. Aangezien het doel van de simulaties is om een MBV in functie van de RV te simuleren, is het belangrijk dat de dampdiffusieweerstand ook varieert met de RV. De analytische uitdrukking wordt als volgt geschreven:

$$\mu = \frac{1}{a + b \cdot e^{c \cdot \phi}} \quad (16)$$

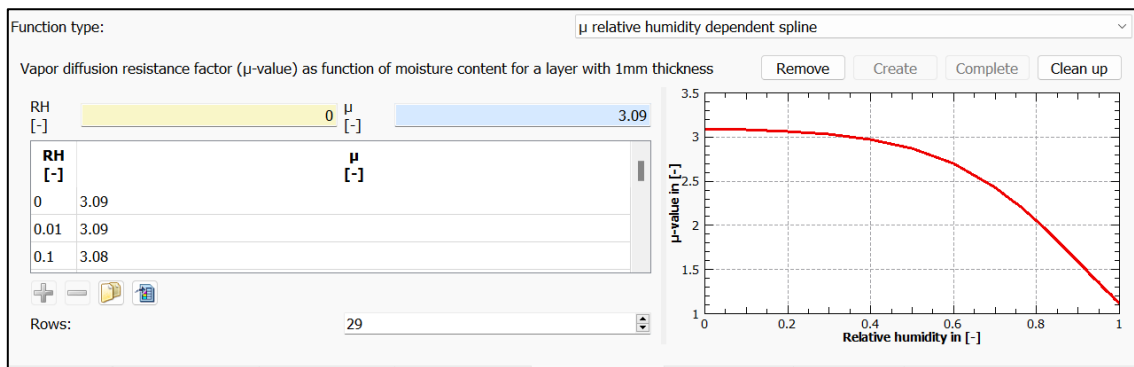
Met: $a = 0,32$ [45]
 $b = 0,0012$ [45]
 $c = 6,20$ [45]
 ϕ = de relatieve vochtigheid

Het resultaat van de dampdiffusieweerstand in functie van de RV is getoond in Figuur 61.



Figuur 61: Dampdiffusieweerstand calciumsilicaat in functie van de RV

Net zoals de hygroscopische curve wordt deze dampdiffusieweerstand in functie van de RV geïmplementeerd in Delphin. Deze implementatie is getoond in Figuur 62.



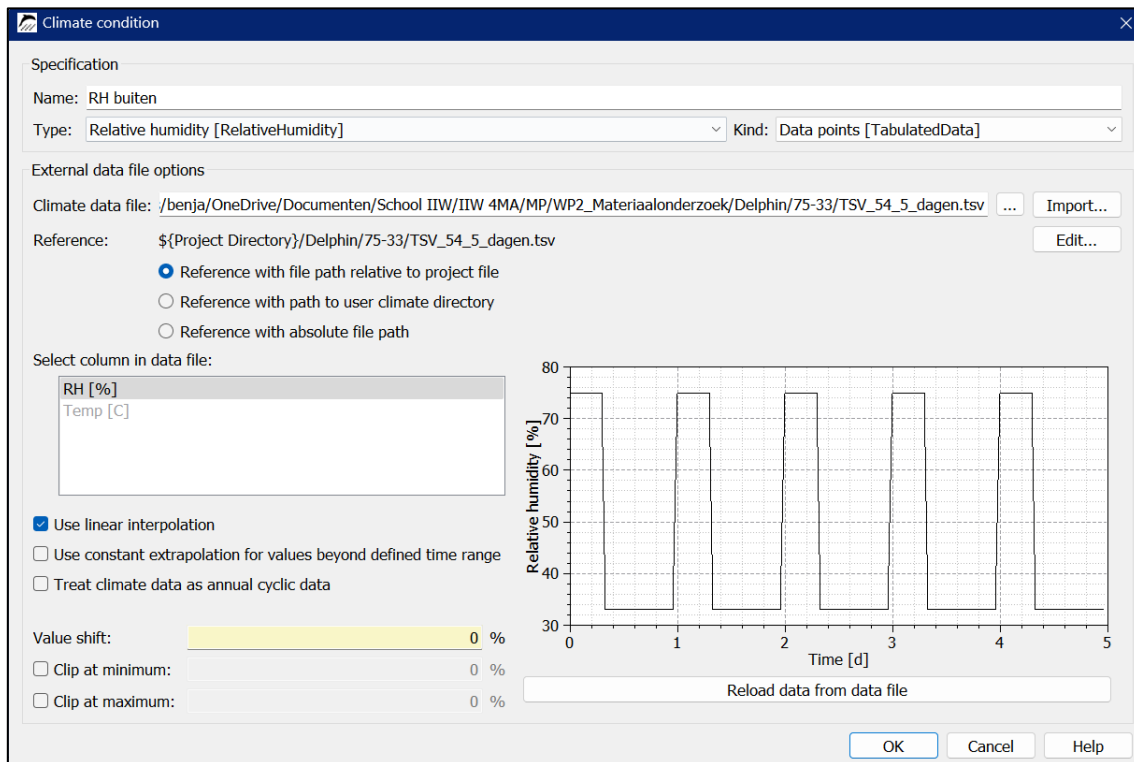
Figuur 62: Implementatie dampdiffusieweerstand in functie van de RV in Delphin

4.1.3 Opgelegde condities

Voor het bepalen van de MBV zijn de opgelegde condities aan het sample van belang. De experimentele bepaling van de MBV, met behulp van de Nordtest, wordt doorgaans uitgevoerd door gebruikt te maken van een klimaatkast. Met behulp van deze klimaatkast wordt het opgelegd RV-bereik en de opgelegde temperatuur waaraan het sample blootgesteld wordt, geregeld. In het experimenteel onderzoek is er gewerkt met rechthoekige CaSi-samples. Hierbij zijn telkens alle zijden, met uitzondering van het bovenvlak, afgeplakt met een dampdichte aluminiumtape, zoals eerder aangehaald in paragraaf 3.1.2.1. Dit zorgt ervoor dat de simulaties in Delphin eenvoudiger te realiseren zijn.

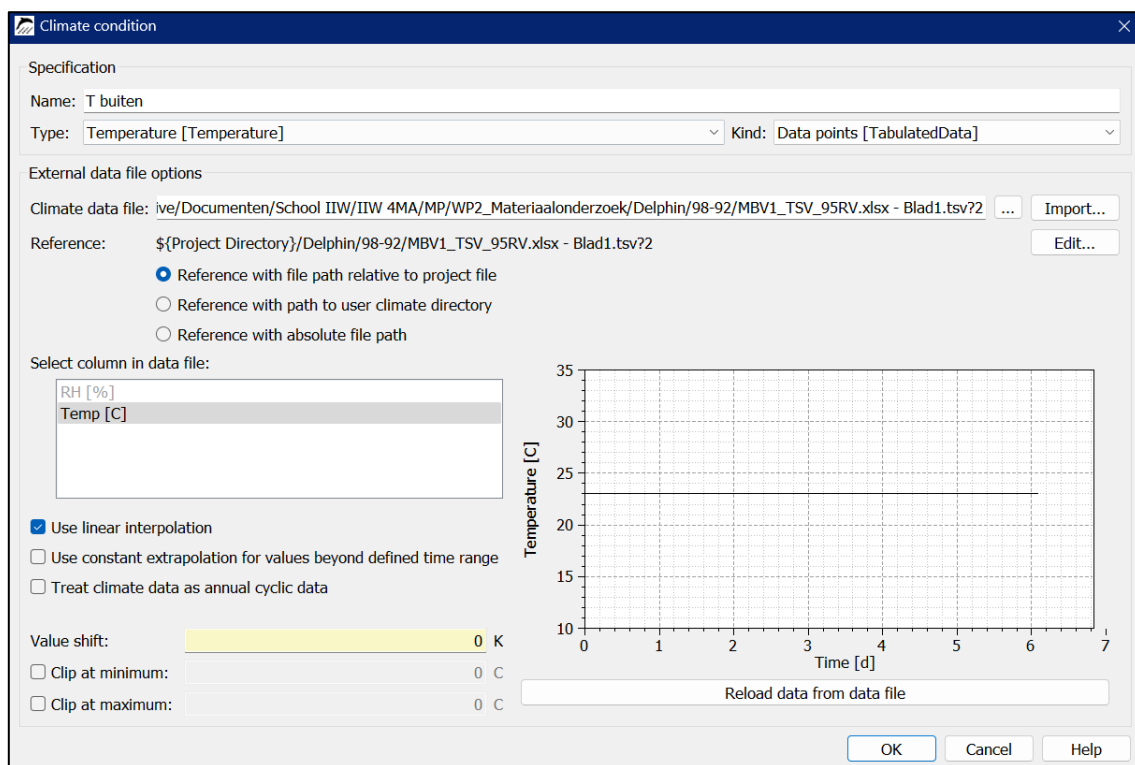
Allereerst dienen de klimaatcondities, het RV- en temperatuurverloop, ingesteld te worden. Deze klimaatcondities worden ingevoerd onder *Climate Conditions* in Delphin als “RH buiten” en “T buiten”.

De klimaatcondities worden enkel toegewezen aan het bovenoppervlak van het sample. Dit is de rechterzijde (zwarte vlak) van het sample in Figuur 57. In de Nordtest wordt het sample 8 uur blootgesteld aan hoge RV van 75% en 16 uur aan lage RV van 33%. Dit RV-interval is uitgeschreven in de vorm van een TSV-bestand, dat op zijn beurt geïmplementeerd wordt in Delphin. Deze implementatie wordt getoond in Figuur 63.



Figuur 63: Opgelegd RV-verloop in Delphin (75-33%)

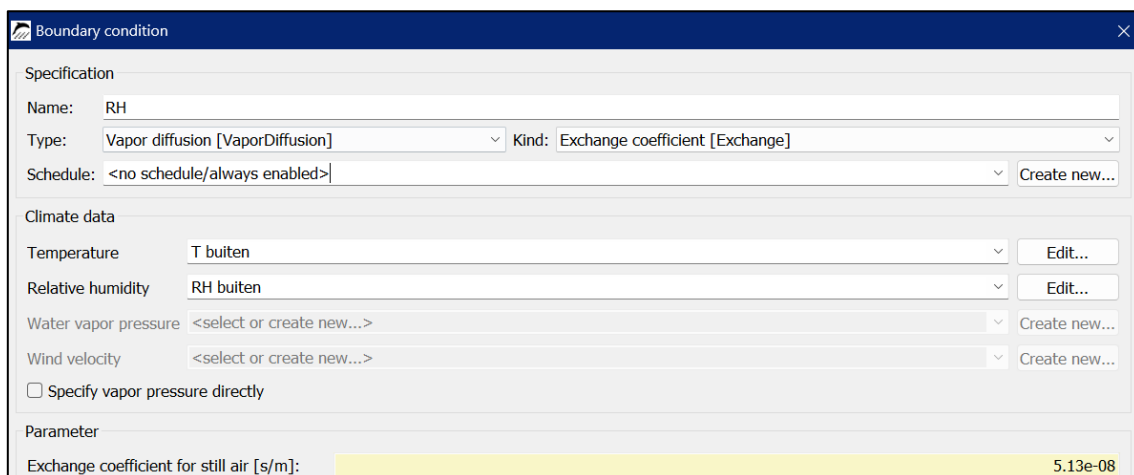
Echter is de gemiddelde RV bij de Nordtest 54%. Het doel van de simulaties is namelijk om een MBV te creëren die in functie staat van de RV. Dit wordt bekomen door TSV-bestanden op te maken voor verschillende RV-intervallen om op deze manier telkens een andere gemiddelde RV te bereiken. Het temperatuurverloop bij de Nordtest ligt op een constante waarde van 23°C. Dit temperatuurverloop is ook uitgeschreven in een TSV-bestand en geïmplementeerd in de software, zoals getoond in Figuur 64.



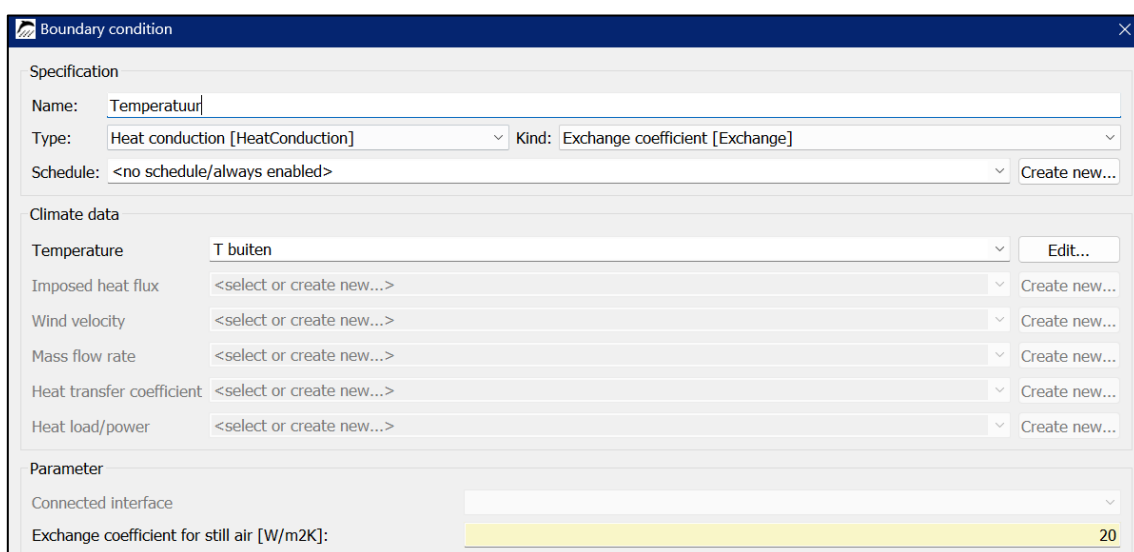
Figuur 64: Opgelegd temperatuurverloop Delphin (23°C)

De volgende stap in de simulatie is het definiëren van de *Boundary Conditions*. In deze stap zijn er twee types van transport mogelijk, namelijk warmte- en vochttransport. De boundary conditions worden gekoppeld aan de eerder bepaalde klimaatcondities, het RV- en temperatuurverloop.

Delphin heeft nog twee parameters nodig om de simulatie uit te voeren. Bij het warmtetransport dient de warmteovergangscoefficiënt ingevuld te worden. Deze waarde bedraagt 20 W/(m²K) [4]. Bij het vochttransport dient de waterdampovergangscoefficiënt ingevuld te worden. Deze parameter is eerder bepaald in [4] via een experimentele test, de capillaire opzuigproef. Hieruit blijkt dat deze waarde gelijk is aan 5,13 x 10⁻⁸ s/m. De boundary conditions “RH” en “Temperatuur” in Delphin worden getoond in Figuur 65 en Figuur 66.



Figuur 65: Boundary conditions: RH



Figuur 66: Boundary conditions: Temperatuur

Deze boundary conditions zijn toegewezen aan het bovenoppervlak van het sample. Dit wil eigenlijk zeggen dat de klimaatcondities gekoppeld worden aan de boundary conditions, die op hun beurt gekoppeld worden aan de boundary zelf. Deze boundary stemt overeen met het bovenoppervlak van het sample zonder aluminiumtape in het experimenteel onderzoek.

Als laatste inputparameter worden de initiële condities van het sample zelf toegewezen. Afhankelijk van het RV-interval dat opgelegd wordt bij de klimaatcondities, varieert deze waarde. Indien bijvoorbeeld een simulatie wordt uitgevoerd die overeenstemt met de Nordtest, met als RV-interval 75-33%, wordt de initiële RV van het sample ingesteld op 54%. De initiële RV wordt ingesteld als het gemiddelde van het opgelegd RV-interval en is ook de RV-waarde waarvoor de MBV gesimuleerd wordt. De initiële temperatuur van het sample bedraagt in alle simulaties 23 °C.

4.2 Uitvoerparameters Delphin

Even belangrijk als de invoerparameters is de gewenste uitvoerparameter van de simulaties. Eenmaal alle klimaatcondities, boundary conditions, initiële condities en de materiaaleigenschappen van het sample bepaald zijn, wordt de output bepaald. Als uitvoerparameter is ervoor gekozen de vochtmassa van het sample te gebruiken, uitgedrukt in gram. Deze waarde, de *Moisture Mass Denisty* in Delphin, wordt integraal genomen over de verschillende discretisatie-elementen van het sample. Dit wil zeggen dat het sample onderverdeeld wordt in afzonderlijke kleine elementen. De uitvoerparameter wordt dus aanzien als de som van de vochtmassa's van al deze elementen.

De simulaties worden uitgevoerd over een zelfgekozen termijn, waarbij om het uur de vochtmassa van het sample wordt uitgedrukt in gram. Zoals eerder vermeld in de literatuurstudie duurt de Nordtest minstens drie dagen en mag de gewichtsamplitude van het sample niet meer dan 5% variëren van dag tot dag. Hiermee dient er dus rekening gehouden te worden om voldoende cycli te voorzien om correcte resultaten te bekomen in de simulaties.

Om de resultaten van de simulaties duidelijk te analyseren wordt er gebruikgemaakt van het programma ProstProc 2.3.0. Dit is een programma van dezelfde ontwikkelaar als Delphin. Het vochtgehalte van het sample wordt in dit programma getoond in zowel tabel- als grafiekvorm. Hiermee wordt er gecontroleerd of de gewichtsamplitude van dag tot dag niet meer dan 5% afwijkt. Deze vochtgehalten worden verder gebruikt voor de berekening van de MBV.

4.3 Resultaten simulaties

Om de MBV in functie van de RV te simuleren in het programma Delphin worden tien verschillende simulaties uitgevoerd. Hierbij wordt voor een gemiddelde RV van 5%, 10%, 20%, 30%, 50%, 54% (Nordtest), 60%, 80%, 90% en 95% een simulatie uitgevoerd. In bijlage A is de output die verkregen wordt in het programma ProstProc 2.3.0 terug te vinden als voorbeeld voor de simulatie bij 54% RV. Hierbij is een opgelegd RV-bereik van 75-33% gebruikt.

Het blootgesteld oppervlak (bovenvlak) van het sample is altijd gelijk aan 0,20 m². Met de opgelegde maximale en minimale RV wordt aan de hand van de simulatie de maximale en minimale massa van het sample bepaald in een cyclus van 8 uur hoge RV en 16 uur lage RV. Met behulp van deze parameters wordt de MBV_{8u} bepaald met Formule (3). De resultaten van de tien simulaties worden getoond in Tabel 11.

Tabel 11: Resultaten MBV_{8u} simulatie Delphin

Opgelegd RV-bereik [%]	Gemiddelde RV [%]	RV _{max} – RV _{min} [%]	m _{max} [g]	m _{min} [g]	A [m ²]	MBV _{8u} [g/(m ² %RV)]
7-3	5	4	8,04	6,92	0,20	1,40
15-5	10	10	10,47	7,88	0,20	1,30
30-10	20	20	14,22	9,83	0,20	1,10
40-20	30	20	17,07	12,58	0,20	1,12
60-40	50	20	24,35	18,87	0,20	1,37
75-33	54	42	29,40	17,03	0,20	1,47
70-50	60	20	29,75	23,34	0,20	1,60
90-70	80	20	51,12	40,08	0,20	2,76
95-85	90	10	82,09	72,53	0,20	4,78
98-92	95	6	133,39	124,51	0,20	7,40

Uit deze resultaten blijkt dat de MBV na 8 uur blootstelling aan een hogere gemiddelde RV afhankelijk is van de RV. Voor een RV tussen 5-60% vertoont de MBV een relatief constante waarde die schommelt tussen 1,40 en 1,60 g/(m²%RV). Zoals eerder vermeld is het optimaal vochtbufferend RV-bereik van calciumsilicaat gelegen tussen 60-80%. Dit optimaal vochtbufferend RV-bereik wordt bevestigd door de resultaten. De MBV van calciumsilicaat stijgt namelijk vanaf een RV van 60%. Hieruit wordt afgeleid dat het vochtbufferend vermogen van calciumsilicaat groter is bij eerder hoge RV dan bij lage RV.

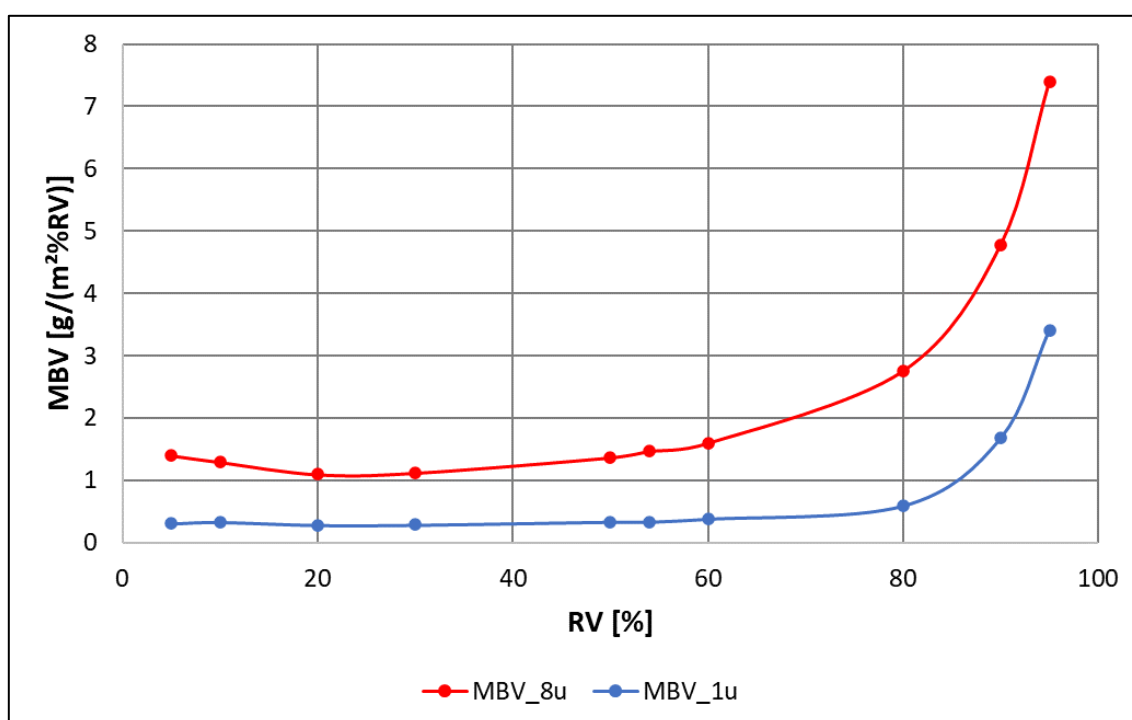
Echter zoals eerder vermeld in paragraaf 2.8.1 van de literatuurstudie wordt de MBV van een materiaal soms ook berekend met 1 uur blootstelling aan hoge RV in plaats van 8 uur. Voor deze simulaties zijn dezelfde RV-intervallen gebruikt als in Tabel 11, maar wordt de hoge RV slechts 1 uur opgelegd aan het sample. Dit is gerealiseerd door de TSV-bestanden van de voorgaande simulaties aan te passen. Hierbij wordt de MBV_{1u} berekend met behulp van Formule (4). De resultaten van deze simulaties zijn getoond in Tabel 12.

Tabel 12: Resultaten MBV_{1u} simulatie Delphin

Opgelegd RV-bereik [%]	Gemiddelde RV [%]	RV _{max} – RV _{min} [%]	m _{max} [g]	m _{min} [g]	A [m ²]	MBV _{1u} [g/ (m ² %RV)]
7-3	5	4	7,08	6,83	0,20	0,31
15-5	10	10	8,33	7,66	0,20	0,34
30-10	20	20	10,85	9,70	0,20	0,29
40-20	30	20	13,58	12,42	0,20	0,29
60-40	50	20	19,71	18,35	0,20	0,34
75-33	54	42	19,00	16,14	0,20	0,34
70-50	60	20	23,84	22,29	0,20	0,39
90-70	80	20	37,97	35,58	0,20	0,60
95-85	90	10	67,85	64,49	0,20	1,68
98-92	95	6	118,78	114,69	0,20	3,41

De MBV-waarden na 1 uur blootstelling aan hoge RV zijn opmerkelijk lager dan de MBV-waarden na 8 uur blootstelling aan hoge RV. Echter vertonen de resultaten wel dezelfde trend als de MBV_{8u}. Hierbij stijgt het vochtbufferend vermogen van calciumsilicaat vanaf 60%.

De resultaten van de simulaties worden in grafiekvorm getoond in Figuur 67.



Figuur 67: MBV in functie van RV calciumsilicaat: simulatie Delphin

De MBV in functie van de RV voor het materiaal calciumsilicaat is in eerder uitgevoerd onderzoek experimenteel bepaald, zoals eerder getoond in Figuur 17 [31]. De resultaten van de simulaties tonen echter aan dat de MBV daadwerkelijk afhankelijk is van de RV. Het is daarom belangrijk om in elke situatie een representatieve waarde van de MBV van een materiaal te gebruiken. Zo is het vochtbufferend vermogen van calciumsilicaat hoger bij eerder hoge RV vanaf 60%. Voor een RV tussen 0-60% is de MBV van calciumsilicaat relatief constant. Dit wil zeggen dat het vochtbufferend vermogen van calciumsilicaat eerder beperkt is bij lage RV. Deze resultaten bevestigen ook dat het optimale RV-bereik van calciumsilicaat aansluit bij dit van Art Sorb.

Uit het experimenteel onderzoek is gebleken dat het RV-verloop in de vitrines schommelt tussen 35-40%. Deze gegevens worden ook gebruikt binnen het model voor de voorspelling van de RV in de vitrines onder hoofdstuk 5. In dit model wordt er ook rekening gehouden met het vochtbufferend vermogen van calciumsilicaat. Om het model zo realistisch mogelijk te maken is het dus nodig dat het vochtbufferend vermogen van calciumsilicaat correct wordt geïmplementeerd. Dit wordt gerealiseerd door de MBV te gebruiken die overeenstemt met het gemiddelde RV-niveau in de vitrines. Bij een RV tussen 35-40% schommelt het vochtbufferend vermogen van calciumsilicaat rond de 1,20 g/(m²%RV).

5 RV-voorspellingen voor museale vitrines

In dit hoofdstuk wordt beoogd om het RV-verloop in een vitrine te voorspellen a.d.h.v. zelfgekozen randvoorwaarden. De randvoorwaarden die nodig zijn om de modellen op te stellen, zijn gebaseerd op de metingen uit het experimenteel onderzoek. Wanneer de eigenschappen van een vitrine en de randvoorwaarden van de ruimte waarin de vitrine staat gekend zijn, kan met behulp van deze modellen een RV-voorspelling gemaakt worden. Op deze manier zijn musea op voorhand in staat om de RV in een vitrine te voorspellen en te beslissen of de toevoeging van vochtbufferend materiaal al dan niet nodig is. Het model wordt opgesteld op basis van een dampbalans. Deze dampbalans wordt opgesteld door gebruik te maken van het EC-model dat eerder beschreven is in paragraaf 2.9.2 van de literatuurstudie. Voor het opstellen van het model wordt gebruikgemaakt van Microsoft Excel. Er wordt getracht het RV-verloop in zowel de professionele vitrine als de abstracte vitrine te voorspellen op basis van de gekende gegevens. Het gesimuleerde RV- en dampdrukverloop worden vervolgens vergeleken met het gemeten RV- en dampdrukverloop verkregen uit de experimenten.

5.1 Dampbalans in Microsoft Excel

Door gebruik te maken van Formule (12), eerder beschreven in paragraaf 2.9.2 van de literatuurstudie, wordt de dampbalans opgesteld. Met deze formule wordt de dampdruk binnen de vitrine berekend. Formule (12) wordt omgevormd naar de dampdruk binnen de vitrine (p_{vi}). Op deze manier wordt Formule (17) bekomen:

$$P_{vi2} = \frac{(n \cdot P_{ve} \cdot P_{vi,sat} \cdot (t_1 - t_2) - 3600 \cdot (100 \cdot HIR \cdot R_v \cdot T_i + P_{vi,sat}) \cdot P_{v1}) \cdot V + 3600 \cdot G_{vp} \cdot P_{vi,sat} \cdot R_v \cdot (t_2 - t_1) \cdot T_i}{(n \cdot P_{vi,sat} \cdot (t_1 - t_2) - 3600 \cdot (100 \cdot HIR \cdot R_v \cdot T_i + P_{vi,sat}) \cdot V)} \quad (17)$$

5.1.1 Gekende variabelen

In Formule (17) zijn enkele variabelen rechtstreeks in te vullen door gebruik te maken van de metingen uit het experimenteel onderzoek of door de vooropgestelde randvoorwaarden van musea. Zo zijn de dampdruk buiten de vitrine (P_{ve}), de temperatuur binnen de vitrine (T_i) en het volume van de gebruikte vitrine (V) reeds bepaald.

De dampdruk buiten de vitrine wordt bepaald door gebruik te maken van de relatieve vochtigheid buiten de vitrine (RV_e) en de saturatiedampdruk buiten de vitrine ($P_{ve,sat}$). Alvorens de dampdruk buiten de vitrine berekend kan worden, dient eerst de saturatiedampdruk ($P_{vsat,i,e}$) bekend te zijn. De saturatiedampdruk wordt berekend aan de hand van Formule (18) [24].

$$P_{vsat,i,e} = 611 * e^{\frac{17,08 \cdot T_{i,e}}{234,18 + T_{i,e}}} \quad (18)$$

Naast de saturatiedampdruk buiten de vitrine kan ook de saturatiedampdruk binnen de vitrine bepaald worden met Formule (18).

Eenmaal de saturatiedampdruk buiten de vitrine bekend is, wordt de dampdruk buiten de vitrine berekend aan de hand van Formule (19) [24].

$$P_{ve} = RV_e * P_{vsat} \quad (19)$$

Een andere variabele die rechtsreeks ingevuld kan worden in Formule (17) is de gasconstante (R_v) van waterdamp. Deze term bedraagt 462 J/(kgK).

Het tijdsinterval dat gekozen wordt tussen twee opeenvolgende berekeningen bedraagt tien minuten. Doordat in Formule (17) de tijdsvariabele in seconden wordt gebruikt, bedraagt het tijdsinterval (t_1-t_2) dus 600 seconden.

Het ventilatievoud (n) van de beide vitrines is eerder bepaald in paragraaf 3.3.5 m.b.v. de tracer verval test en wordt in de modellen overgenomen. Om de invloed van de luchtdichtheid van een vitrine te achterhalen wordt er in enkele modellen geopteerd om het ventilatievoud te alterneren. Deze alternatieve aanpak wordt verder uitgelegd in de bespreking van de modellen zelf.

5.1.2 Onbekende variabelen

In Formule (17) zijn ook een aantal variabelen die nog niet bekend zijn. Deze gegevens zijn de dampdruk in de vitrine (P_{vi}), de *HIR*-waarde van de vitrine en de vochtproductieterm (G_{vp}).

De dampdruk binnen de vitrine is de onbekende die bepaald dient te worden. Aan de hand van deze waarde kan het RV-verloop in de vitrine voorspeld worden.

De *HIR*-waarde, eerder beschreven in paragraaf 2.9.2 van de literatuurstudie, is steeds afhankelijk van de gebruikte vitrine en/of het vochtbufferend materiaal. Door gebruik te maken van een *SOLVER*-functie in Microsoft Excel wordt de *HIR*-waarde van de vitrine *gefit* op basis van de kleinstekwadratenmethode.

De kleinstekwadratenmethode bestaat erin om het verschil tussen de gemeten RV binnen de vitrine ($RV_{i,gemeten}$) en de berekende RV binnen de vitrine (RV_i) te bepalen. Dit wordt gedaan voor elke tijdstap van 600 s. Uiteindelijk wordt de som van de verschillen genomen en gekwadrateerd. Het is op deze som dat de *SOLVER*-functie wordt toegepast. Hierbij wordt dan de *HIR*-waarde van de desbetreffende vitrine gefit opdat de gekwadrateerde som van de verschillen minimaal is.

Ter controle van de *SOLVER*-functie wordt de kleinstekwadratenmethode ook uitgevoerd op de berekende en de gemeten dampdrukken binnen de vitrine. Wanneer de twee verschillende methodes vergeleken worden met elkaar blijkt dat het verschil tussen de twee methodes minimaal is. Dit geeft een bevestiging dat de *SOLVER*-functie correct is toegepast. Er wordt in dit onderzoek dan ook verder gewerkt met het verschil tussen de gemeten en de berekende RV-waarden.

De vierde variabele die overblijft is de vochtproductieterm (G_{vp}). Deze term is afhankelijk per simulatie en wordt verder uitgelegd per experiment dat gesimuleerd wordt met een model.

5.2 Lege vitrines

Ieder model wordt, zoals eerder vermeld, opgesteld per experiment. Zo heeft elk experiment zijn eigen randvoorwaarden. Bij het eerste model van de abstracte vitrine alsook van de professionele vitrine wordt de dampdruk en respectievelijk ook het RV-verloop binnen de vitrines steeds gesimuleerd in lege toestand. Dit wil zeggen dat er geen vochtbufferend materiaal aanwezig is in de vitrines. Daarnaast wordt er verondersteld dat er geen vochtbron aanwezig is. De G_{vp} -waarde wordt in deze simulaties dus gelijk genomen aan nul.

Het doel van de simulaties op de lege vitrines is om de *HIR*-waarde van de vitrines te bepalen. Op basis van de ventilatievouden die bepaald zijn door middel van de tracer verval test in het experimenteel onderzoek onder paragraaf 3.3.5, wordt de *HIR*-waarde van de beide vitrines gefit met behulp van de *SOLVER*-functie in Microsoft Excel.

5.2.1 Simulatie lege abstracte vitrine

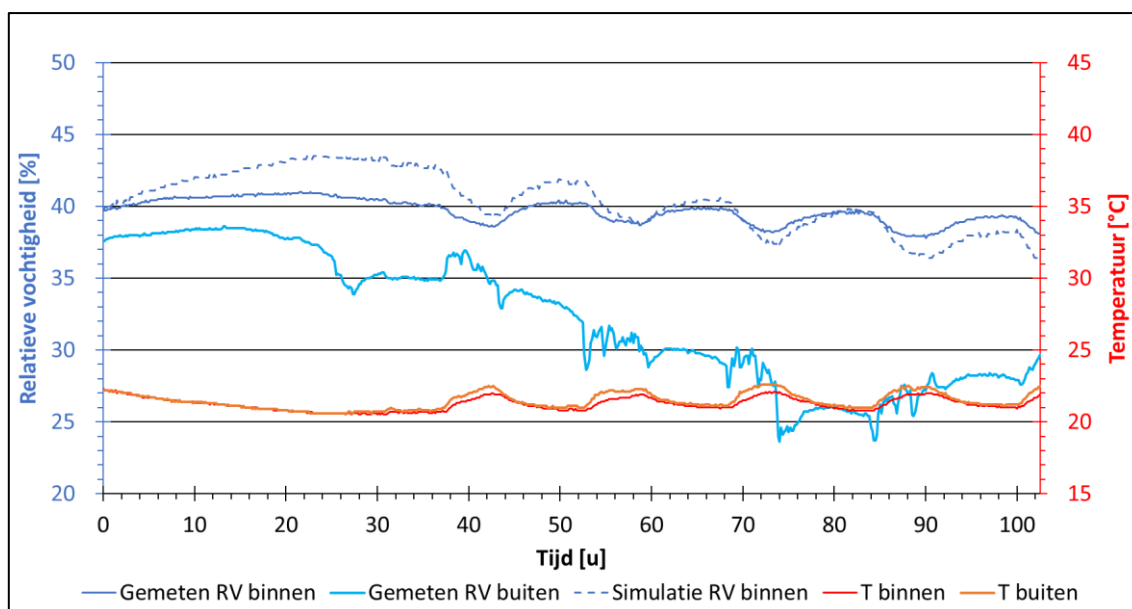
Om het model van de lege abstracte vitrine op te stellen worden alle gekende variabelen in de dampbalans ingevuld zoals getoond in Tabel 13.

Tabel 13: Invoerparameters dampbalans lege abstracte vitrine

G_{vp}	n (h^{-1})	V (m^3)	R_v ($J/(KgK)$)
0	0,01084	0,14896	462

De *HIR*-waarde die met de SOLVER-functie gefit wordt, bedraagt 0,00014021 $kg/(m^3\%RV)$. Dit is een relatief lage waarde. Echter valt deze waarde binnen de verwachtingen doordat de vitrine zo aangepast is om een minimaal vochtbufferend vermogen te bezitten, zoals eerder uitgelegd in paragraaf 3.3.1.5.

Figuur 68 en Figuur 69 tonen respectievelijk de resultaten van de simulatie van het RV- en dampdrukverloop op basis van de gemeten waarden uit experiment 1 (paragraaf 3.3.1) in functie van de tijd. Deze simulaties worden vergeleken met de gemeten waarden uit experiment 1 van het experimenteel onderzoek.

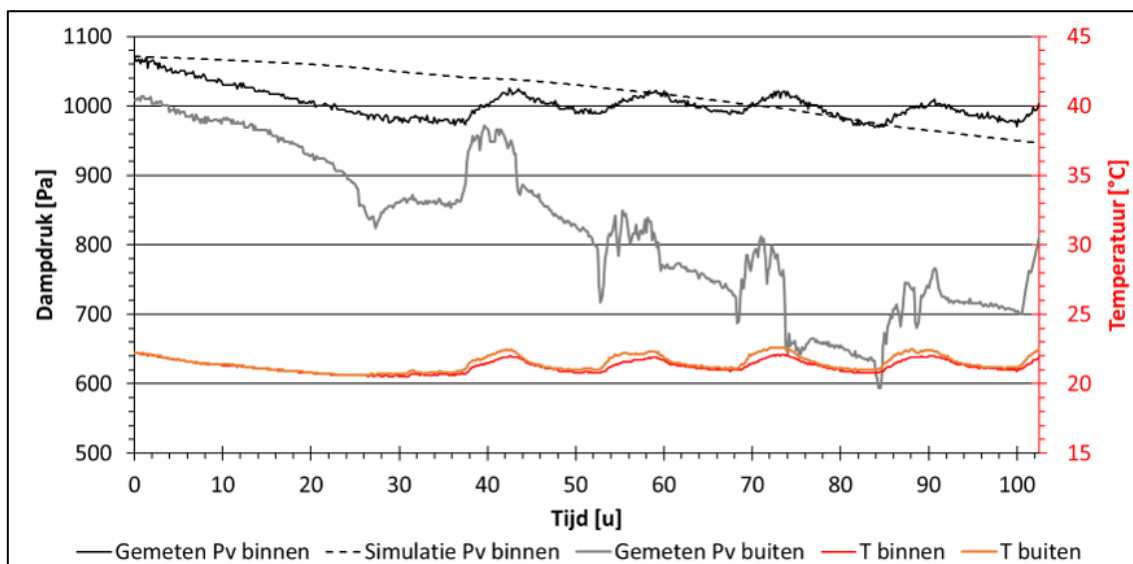


Figuur 68: Simulatie RVi-verloop lege abstracte vitrine

Het gesimuleerde RV-verloop (“Simulatie RV binnen”) binnen de vitrine vertoont in grote mate hetzelfde verloop als het gemeten RV-verloop in de vitrine (“Gemeten RV binnen”). De eerste 40 uren bevindt de gesimuleerde waarde zich op zijn hoogste punt ongeveer 4% boven de gemeten RV-waarde. Naarmate de tijd vordert, conformeren de gesimuleerde waarden beter met de gemeten waarden. Het meest significante verschil dat tussen deze waarden dan nog wordt waargenomen, bedraagt 2%.

Wanneer het RV-verloop bekeken wordt over de volledige tijdspanne valt op dat de simulatie een algemeen dalende trend aanneemt. De dampbalans is opgesteld op basis van de temperatuur in de vitrine en de dampdruk in de ruimte. Vanaf 40 uur is zichtbaar dat het T-verloop binnen en buiten de vitrine een stijgende trend vertoont. Een mogelijke verklaring voor de algemeen dalende trend van de simulatie zou hiermee gerelateerd kunnen zijn.

Figuur 69 toont het gesimuleerde dampdrukverloop binnen de vitrine vergeleken met het gemeten dampdrukverloop binnen de vitrine.



Figuur 69: Simulatie Pvi-verloop lege abstracte vitrine

De gesimuleerde waarden bevinden zich gedurende de periode van 100 uren voornamelijk in de buurt van de gemeten waarden. Ook hier valt op dat in de eerste 40 uren het gesimuleerde verloop hoger ligt dan het effectieve dampdrukverloop in de vitrine. Het maximale verschil bedraagt hier 80 Pa. Vanaf 40 uren stemmen de gemeten en gesimuleerde waarden beter overeen met een maximaal verschil van 40 Pa.

Wanneer het algemene verloop beschouwd wordt, valt op dat het gesimuleerde dampdrukverloop eerder een dalend lineair verloop vertoont. De gemeten waarden daarentegen vertonen hetzelfde verloop als het RV-verloop in Figuur 68. Opnieuw wordt een mogelijke verklaring voor dit verloop in het stijgende temperatuurverloop gevonden.

5.2.2 Simulatie lege professionele vitrine

De tweede simulatie wordt uitgevoerd op de professionele vitrine in lege toestand. Opnieuw wordt dit model opgesteld om de *HIR*-waarde van de vitrine te kwantificeren.

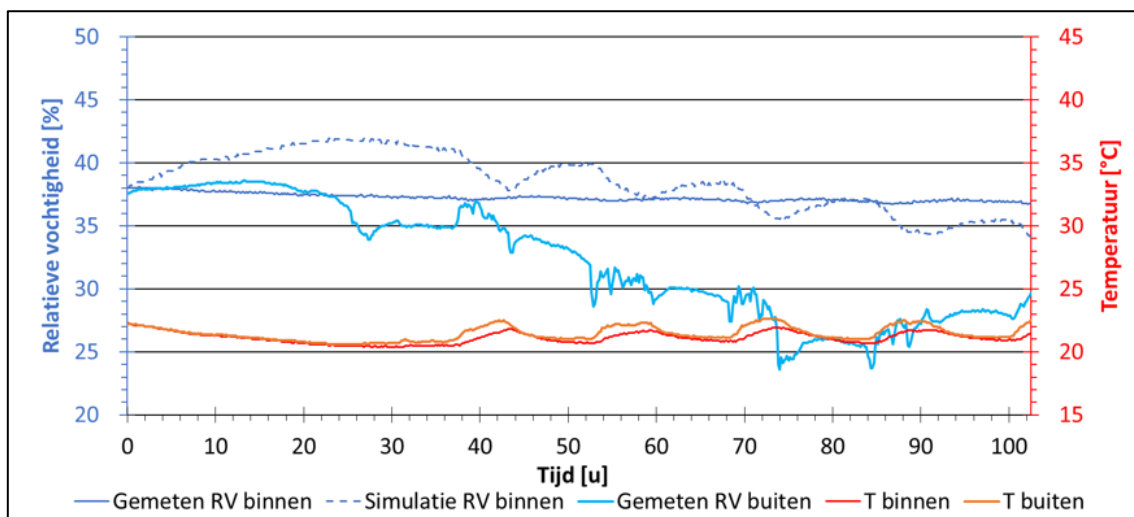
De andere variabele parameters worden in dit model ingevoerd zoals getoond in Tabel 14.

Tabel 14: Invoerparameters dampbalans lege professionele vitrine

G_{vp}	n (h^{-1})	V (m^3)	R_v ($J/(kgK)$)
0	0,0522	0,1951	462

De gefitte *HIR*-waarde van deze simulatie bedraagt $0.000747172 \text{ kg}/(m^3\%RV)$. In vergelijking met *HIR*-waarde van de lege abstracte vitrine valt op dat de *HIR*-waarde van de professionele vitrine ongeveer vijf keer groter is. Deze grotere waarde valt te verklaren doordat de professionele vitrine is opgebouwd uit MDF. Dit materiaal is in staat om vocht op te nemen en kan op deze manier dus als een vochtbufferend materiaal fungeren. De vitrine bezit van zichzelf dus al een vochtbufferend vermogen.

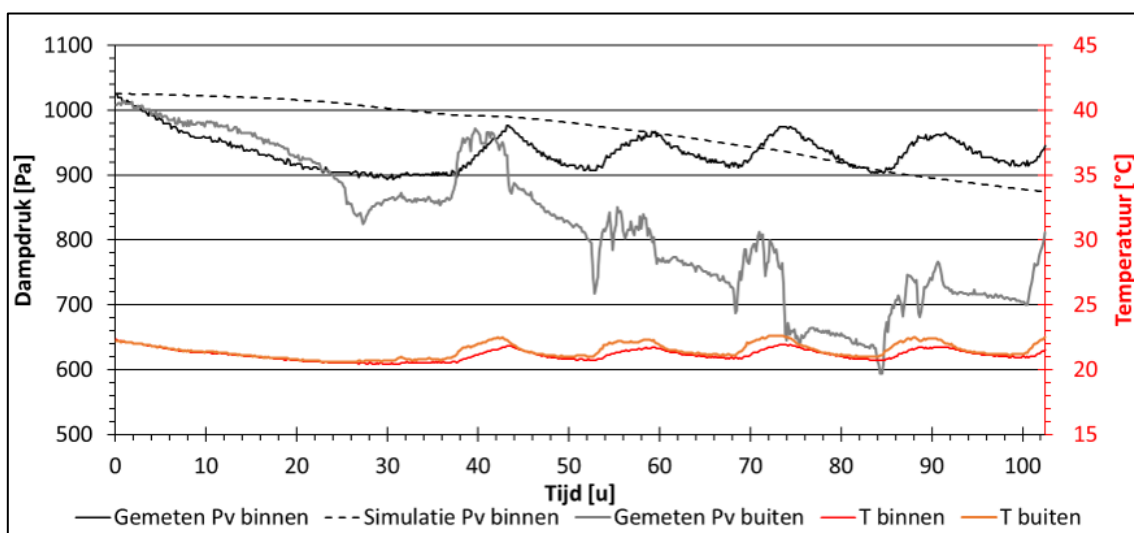
Figuur 70 en Figuur 71 geven respectievelijk de resultaten van de simulaties van het RV- en dampdrukverloop in functie van de tijd weer. Deze simulaties worden vergeleken met de gemeten waarden die eerder bekomen zijn in experiment 2 van het experimenteel onderzoek.



Figuur 70: Simulatie RVi-verloop lege professionele vitrine

Het gesimuleerde RV-verloop binnen de vitrine vertoont een ander verloop dan het gemeten RV-verloop in de vitrine. Het verschil tussen deze twee waarden is maximaal 4,3%. De gesimuleerde RV-waarden vertonen duidelijk een verloop dat mee fluctueert met de gemeten temperatuur. De gemeten waarden daarentegen vertonen een stabiel verloop dat schommelt rond 37% RV. Dit stabiel verloop kan mogelijks verklaard worden door het vochtbufferend vermogen van de professionele vitrine. Daarnaast is een dergelijk stabiel verloop moeilijk te simuleren aangezien de dampbalans opgesteld wordt op basis van de binnentemperatuur en de buitendampdruk. Deze twee waarden ondervinden voortdurend fluctuaties. Het algemene verloop van de gesimuleerde RV-waarden vertoont een dalende trend. Opnieuw wordt hier de verklaring gevonden in de stijgende binnentemperatuur.

Figuur 71 toont het gesimuleerde dampdrukverloop binnen in de professionele vitrine in vergelijking met het gemeten dampdrukverloop binnen de vitrine.



Figuur 71: Simulatie Pvi-verloop lege professionele vitrine

De gesimuleerde waarden bevinden zich gedurende de periode van 100 uur grotendeels in de buurt van de gemeten waarden. Ook hier valt op dat in de eerste 40 uur het gesimuleerde verloop hoger ligt dan het verloop dat gemeten wordt in het experiment. Het maximale verschil bedraagt hier 100 Pa. Na deze 40 uur valt op dat de gemeten en de gesimuleerde waarden beter overeenstemmen.

Wanneer het algemene verloop bekeken wordt, valt opnieuw op te merken dat het gesimuleerde dampdrukverloop eerder een dalend lineair verloop vertoont. De gemeten waarden daarentegen vertonen

hetzelfde verloop als het RV-verloop in Figuur 70. Opnieuw wordt een mogelijke verklaring voor dit verloop in het stijgende temperatuursverloop binnen en buiten gevonden.

5.3 Vitrines met calciumsilicaat

In het vierde en vijfde experiment wordt een CaSi-sample in beide vitrines geplaatst. De plaatsing van een CaSi-sample zorgt voor een vochtproductie in de vitrines. Deze samples zijn namelijk gepreconditioneerd op een RV-waarde van 84,7%, zoals eerder vermeld in paragraaf 3.1.2.3. Hierdoor dient de term G_{vp} ook geïmplementeerd te worden in de dampbalans. De kwantificering van deze term is verschillend voor beide vitrines. Voor de abstracte vitrine wordt de vochtproductie exact bepaald door gebruik te maken van de metingen van de balans. De kwantificering van deze term in de professionele vitrine wordt op een alternatieve methode uitgevoerd.

5.3.1 Simulatie abstracte vitrine met calciumsilicaat

De variabele parameters in dit model worden initieel ingevoerd zoals getoond in Tabel 15.

Tabel 15: Invoerparameters dampbalans abstracte vitrine met calciumsilicaat

G_{vp}	n (h ⁻¹)	V (m ³)	R_v (J/(kgK))
Balans	0,0108	0,1489	462

De vochtproductieterm (G_{vp}) wordt in dit model bepaald aan de hand van de afname in gewicht van het CaSi-sample. In experiment 3 wordt een balans gebruikt die iedere tien minuten het gewicht van het sample meet. Op basis van het gewichtsverlies van het sample gedurende experiment 3 wordt de G_{vp} -waarde per tijdsinterval bepaald. Het verloop van de gewichtsafname is eerder besproken in paragraaf 3.3.2.

Het tijdsinterval in minuten tussen de metingen wordt omgezet naar seconden omdat de G_{vp} -waarde wordt uitgedrukt in kg/s. De berekening van de G_{vp} -waarde per tijdsinterval gebeurt a.d.h.v. Formule (20):

$$G_{vp} = \frac{m_2 - m_1}{600 \text{ s}} \quad (20)$$

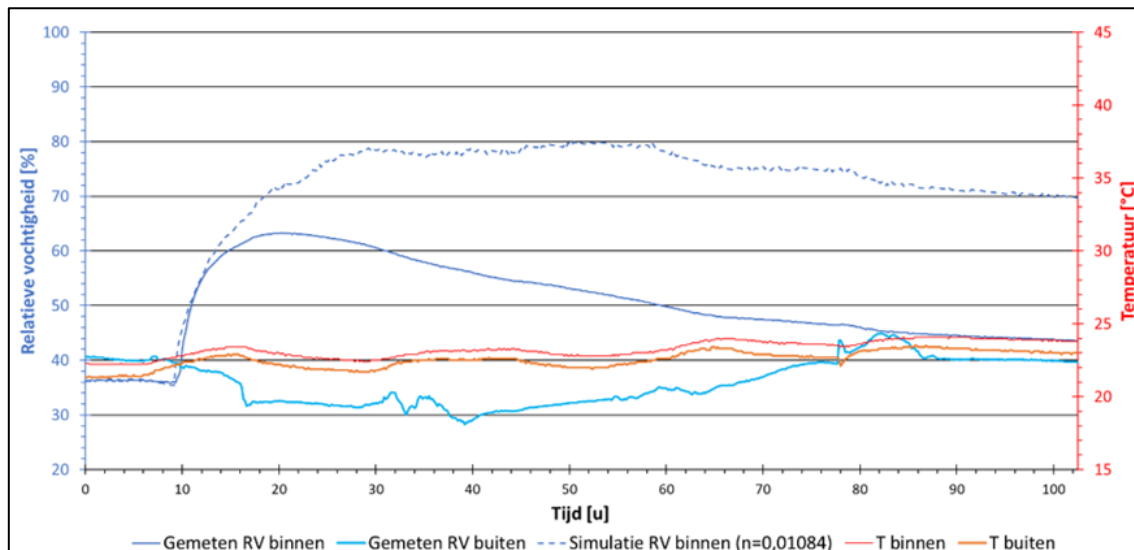
De HIR -waarde van de abstracte vitrine is eerder bepaald in paragraaf 0. Dit is de HIR -waarde van de vitrine zelf. Om een correcter model te verkrijgen dient de MBV van CaSi ook in het model verwerkt te worden. Er wordt binnen dit model geopteerd om te werken met twee verschillende fases. In de eerste fase werkt het CaSi-sample als vochtproducerend element en geeft dus vocht af aan het luchtvolume in de vitrine. De duur van de eerste fase wordt bepaald op basis van de gemeten waarden van de balans. Zolang het CaSi-sample vocht blijft afgeven en dus afneemt in gewicht, werkt het CaSi-sample als vochtproducerend element. In deze fase blijft de HIR -waarde gelijk aan deze van de abstracte vitrine in lege toestand (0,0001403 kg/(m³%RV)).

De tweede fase van dit model beschrijft het RV-verloop wanneer het CaSi-sample geen of zeer weinig extra vocht afgeeft in de abstracte vitrine. Opnieuw wordt dit punt bepaald a.d.h.v. de afname in gewicht van het CaSi-sample. Eens het CaSi-sample geen vocht meer afgeeft en de gewichtsafname stagneert, wordt de G_{vp} -term gelijk genomen aan nul. Op dit punt wordt bij de HIR -waarde van de abstracte vitrine een extra term toegevoegd. Deze term omvat de MBV van CaSi. De HIR -waarde gedurende de tweede fase wordt berekend a.d.h.v. Formule (21):

$$HIR = HIR_{abstracte_vitrine} + \frac{A_{CaSi_sample} * MBV_{8u_CaSi}}{V_{abstracte_vitrine}} \quad (21)$$

De oppervlakte van het gebruikte CaSi-sample bedraagt 0,02 m². De MBV_{8u} is eerder bepaald in paragraaf 4.3 en bedraagt 0,00121 kg/(m²%RV) bij een RV van 37%. De MBV blijft hetzelfde voor de gehele tweede fase en fluctueert niet mee in functie van de RV. Dit wordt gedaan om de berekening niet te complex te maken. De HIR-waarde in de tweede fase bedraagt dan 0,000303 kg/(m³%RV).

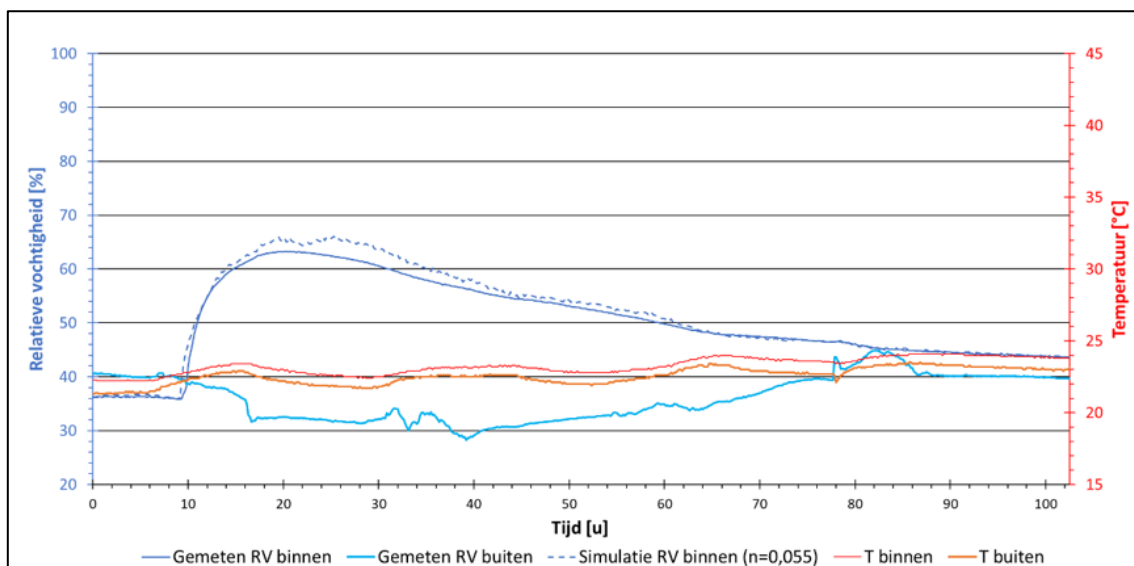
Figuur 72 toont het gesimuleerde RV-verloop binnenin de abstracte vitrine met een CaSi-sample.



Figuur 72: Simulatie RVi-verloop abstracte vitrine met calciumsilicaat

In Figuur 72 valt duidelijk op dat het gesimuleerde RV-verloop en de gemeten waarden in de abstracte vitrine verschillen na 14 uur. De eerste 14 uur loopt het verloop redelijk simultaan en is de vochtproductie van het CaSi-sample duidelijk zichtbaar zoals in het experiment zelf. Echter na deze 14 uur valt op dat het gesimuleerde RV-verloop veel hoger stijgt dan het gemeten verloop. Er wordt hierbij een maximum van 80% RV bekomen, waar op hetzelfde moment de gemeten RV slechts 54% bereikt. Nadat het gesimuleerde RV-verloop ongeveer 77% bereikt heeft, blijft het verloop hierna redelijk stabiel tot het einde van het experiment. Enkel na 60 uur daalt het RV-niveau van 80% naar 72% op het einde van de simulatie.

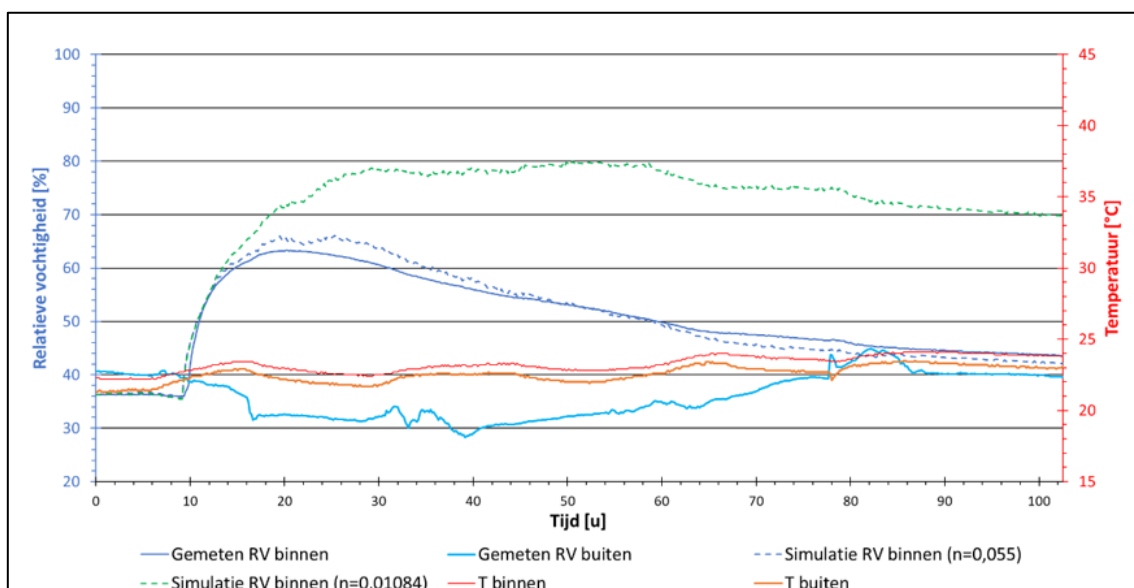
Door het grote verschil tussen de gesimuleerde en gemeten waarden is er gezocht naar een optimalisatie van het model om het gesimuleerde RV-verloop beter te laten overeenkomen met de gemeten waarden. Deze optimalisatie blijkt in het ventilatievoud van de vitrine te zitten. Een wijziging van deze waarde zorgt ervoor dat het RV-verloop aanzienlijk verandert. Zo wordt bij het gebruik van een ventilatievoud van 0,055 h⁻¹ het RV-verloop in Figuur 73 bekomen. Belangrijk om te vermelden is dat alle andere variabelen hetzelfde blijven in het aangepaste model.



Figuur 73: Simulatie RVi-verloop abstracte vitrine met calciumsilicaat (aanpassing n)

De aanpassing van het ventilatievoud (Figuur 73) heeft duidelijk een invloed op het RV-verloop binnen de vitrine. Het gesimuleerde en gemeten RV-verloop komen de volledige periode ongeveer volledig overeen. Enkel tijdens de periode tussen 20 en 40 uur ligt het gesimuleerde RV-verloop gemiddeld 2% hoger dan het gemeten RV-verloop.

Zoals eerder vermeld, wordt in deze modellen steeds gebruikgemaakt van twee verschillende fases om de *HIR*-waarde van de abstracte vitrine weer te geven. Om de invloed van dit effect duidelijker in kaart te brengen wordt in Figuur 74 gedurende de volledige periode enkel gebruikgemaakt van de *HIR*-waarde van de abstracte vitrine zelf. Het model wordt hier zowel bekeken met het ventilatievoud uit de tracer verval test en de aangepaste waarde.



Figuur 74: Simulatie RVi-verloop abstracte vitrine met calciumsilicaat (aanpassing HIR)

Wanneer het RV-verloop vergeleken wordt tussen het gebruik van de *HIR*-waarde in twee fases (Figuur 72 en Figuur 73) en het verloop waarin enkel de *HIR*-waarde van de abstracte vitrine zelf wordt gebruikt over de volledige periode, valt in beide gevallen op dat de aanpassing van de *HIR*-waarde niet zorgt voor een significante invloed op het RV-verloop. Er blijkt enkel een kleine daling van het RV-verloop

op te merken aan het einde van het gesimuleerde RV-verloop. Dit verschil is eerder beperkt en vertaalt zich in een waarde van maximaal 1% RV.

5.3.2 Simulatie professionele vitrine van Tongeren met calciumsilicaat

Analoog zoals de simulatie besproken in paragraaf 5.3.1 wordt een model opgesteld waarbij een CaSi-sample in de professionele vitrine wordt geplaatst. Dit keer worden als invoerparameters voor de vitrine de gegevens van de professionele vitrine gebruikt, zoals getoond in Tabel 16.

Tabel 16: Invoerparameters dampbalans professionele vitrine met calciumsilicaat

G_{vp}	n (h^{-1})	V (m^3)	R_v ($J/(kgK)$)
Balans	0,0522	0,1951	462

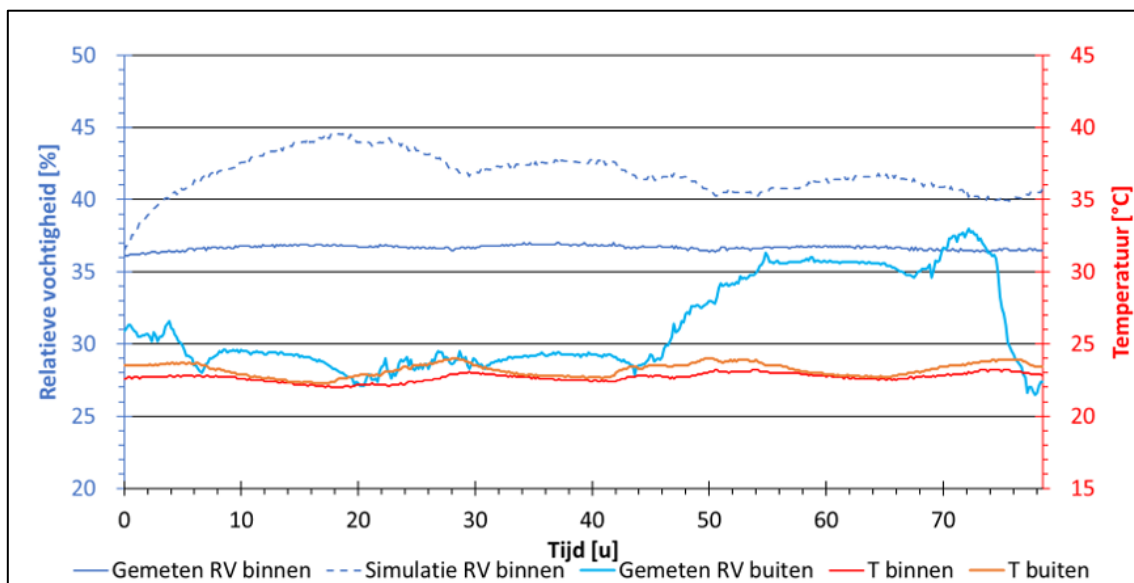
Opnieuw wordt het ventilatievoud, bepaald met de tracer verval test, gebruikt om dit model op te stellen.

Als HIR -waarde wordt er ook in dit model gebruikgemaakt van de eerder bepaalde waarde uit het model op de lege professionele vitrine. Analoog aan het model van de abstracte vitrine met calciumsilicaat wordt hier ook de MBV_{8u} van CaSi in rekening gebracht. Door Formule (21) te gebruiken met de gegevens van de professionele vitrine en het gebruikte sample wordt er in dit geval een HIR -waarde van $0,0008712 \text{ kg}/(m^3\%RV)$ bekomen.

In dit model dient er ook een G_{vp} -waarde ingevoerd te worden doordat er een CaSi-sample gebruikt wordt in het experiment. Omdat het niet mogelijk is om in de professionele vitrine een balans te plaatsen, die het gewicht van het CaSi-sample voortdurend meet, is ervoor gekozen om dit model op te delen op basis van twee verschillende methodes. De eerste methode bestaat uit het ingeven van de G_{vp} -waarde die ook gebruikt wordt in het model voor de abstracte vitrine met CaSi. De G_{vp} -waarde is hier dynamisch per tijdstap. Hierbij wordt dus verondersteld dat het CaSi-sample, gebruikt in de professionele vitrine, evenveel vocht afgeeft aan het luchtvolume als het CaSi-sample gebruikt in de abstracte vitrine. Deze veronderstelling dient kritisch bekeken te worden.

In de tweede methode wordt er gekozen om de G_{vp} -waarde niet in te geven. Dit wordt gedaan omdat uit de resultaten van experiment 4 blijkt dat het RV-verloop in de professionele vitrine weinig tot geen invloed ondervindt wanneer het CaSi-sample in de vitrine wordt geplaatst.

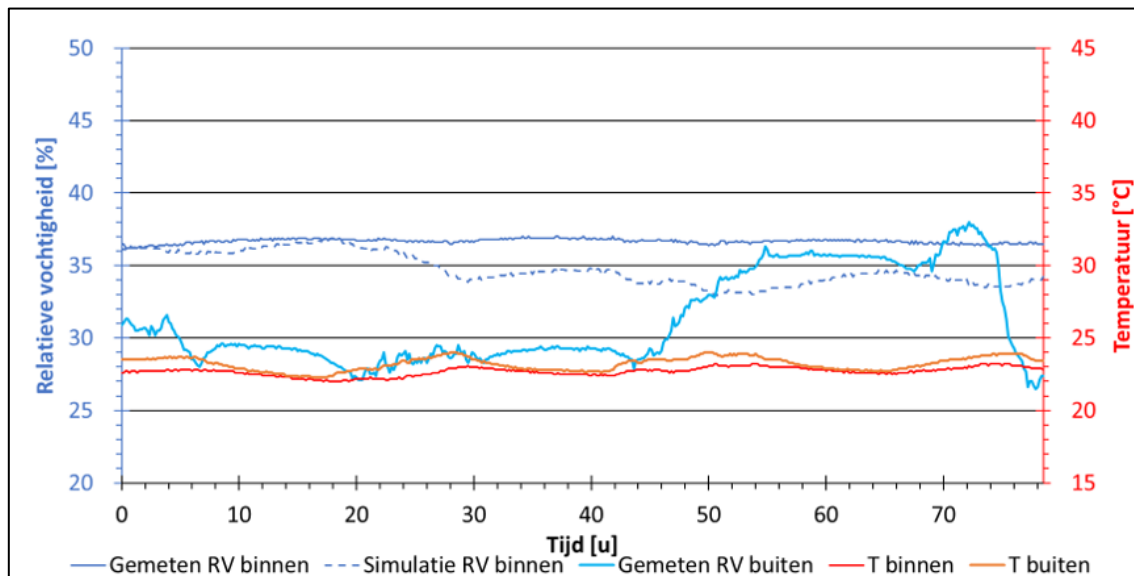
Figuur 75 toont de resultaten van de simulatie in de professionele vitrine waarbij de G_{vp} -term hetzelfde is als in de abstracte vitrine.



Figuur 75: Simulatie RVi-verloop professionele vitrine met calciumsilicaat (methode 1)

Het gesimuleerde RV-verloop ligt aanzienlijk hoger dan het gemeten verloop gedurende de volledige periode. Hieruit blijkt dat de G_{vp} -waarde zorgt voor een initiële stijging van het RV-niveau gedurende de eerste 20 uur. Daarna blijft het gesimuleerde RV-verloop redelijk stabiel rond de 40% schommelen. Over de volledige duur verschilt het gesimuleerde RV-verloop veel in vergelijking met de gemeten waarden, die zoals eerder aangehaald geen/zeer weinig invloed ondervinden van het geplaatste CaSi-sample. Het RV-verloop blijft stabiel rond een RV-niveau van 37%. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de professionele vitrine zelf een heel groot deel van het vrijgekomen vocht uit het CaSi-sample buffert.

Figuur 76 toont de resultaten van de simulatie in de professionele vitrine zonder gebruik te maken van de vochtproductieterm G_{vp} .



Figuur 76: Simulatie RVi-verloop professionele vitrine met calciumsilicaat (methode 2)

Het gesimuleerde RV-verloop stemt in Figuur 76 beter overeen met de gemeten waarden in vergelijking met het gesimuleerde RV-verloop in Figuur 75. Maar ook hier valt op dat het gesimuleerde RV-verloop niet overal overeenstemt met het gemeten RV-verloop. Na 26 uur ligt het gesimuleerde RV-verloop lager dan de gemeten waarden. Het verschil bedraagt dan gemiddeld 3 tot 4% RV. Dit is een redelijk klein verschil dat erop duidt dat de aanname dat het vrijgekomen vocht van het CaSi-sample grotendeels gebufferd wordt door de MDF-platen van de professionele vitrine kan kloppen.

5.4 Simulatie professionele vitrine van Tongeren met zelfgekozen randvoorwaarden

Een vijfde model wordt opgesteld om het RV-verloop in een vitrine te voorspellen op basis van zelfgekozen randvoorwaarden. Deze randvoorwaarden bevatten zowel de eigenschappen van de vitrine maar daarnaast ook de omstandigheden waarin de vitrine zich bevindt. Volgende randvoorwaarden van het klimaat, waarin de vitrine zich bevindt, dienen gekend te zijn om het RV-verloop in de vitrine te voorspellen:

- RV_e (%) of $P_{v,e}$ (Pa),
- T_e (K).

Het model is opgesteld op basis van de gegevens van de professionele vitrine van Tongeren. Dit betekent dat de HIR-waarde, eerder bepaald in paragraaf 5.2.2, hiervoor gebruikt wordt. Wanneer een RV-voorspelling gedaan wordt op een vitrine met andere afmetingen en materialen dient de HIR-waarde van deze vitrine eerst bepaald te worden. Als deze HIR-waarde bepaald en ingegeven is in het model dienen volgende randvoorwaarden van de vitrine zelf nog ingegeven te worden:

- n (h^{-1}),
- V (m^3),
- Soort vochtbufferend materiaal,
- $A_{\text{vochtbufferend materiaal}}$ (m^2).

Als al deze randvoorwaarden ingegeven zijn, voert het model een RV-voorspelling uit.

5.4.1 Voorbeeld RV-voorspelling

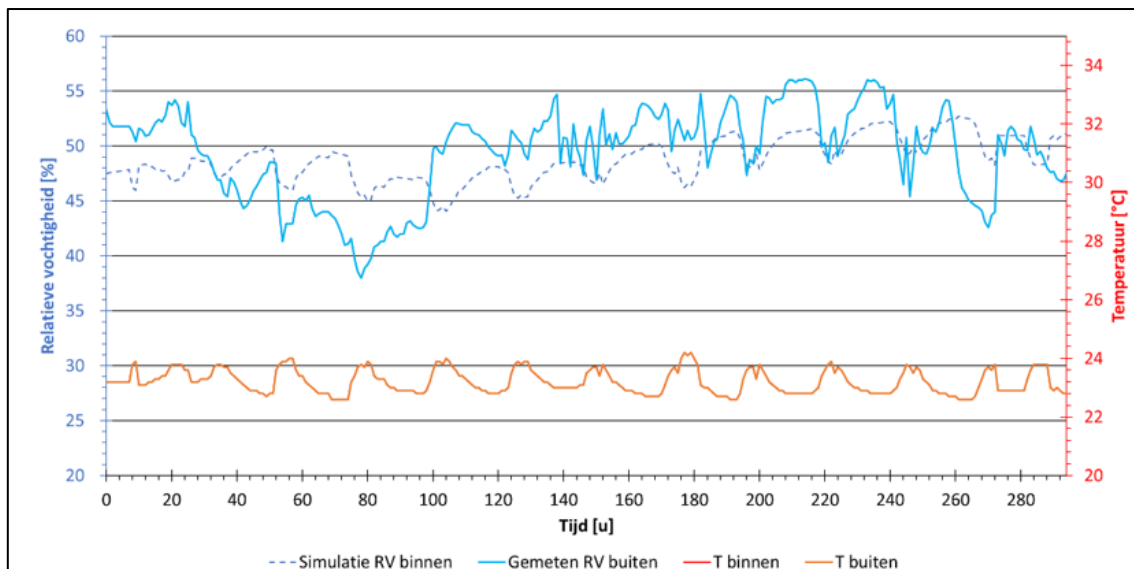
In het voorbeeld wordt een RV-voorspelling uitgevoerd op basis van randvoorwaarden die verkregen worden uit eerdere *monitoring* van een museale ruimte [46]. Daarnaast wordt er voor de gegevens van de vitrine zelf gekozen om te werken met de professionele vitrine. De randvoorwaarden, getoond in Tabel 17, worden hiervoor gebruikt.

Tabel 17: Randvoorwaarden vitrine simulatie RV-verloop

n (h^{-1})	V (m^3)	Vochtbufferend materiaal	$A_{\text{vochtbufferend materiaal}}$ (m^2)
0,0522	0,1951	Geen	0

Om het effect van verschillende vochtbufferende materialen op het RV-verloop in de vitrine te achterhalen, wordt eerst een RV-voorspelling op de lege vitrine gemaakt. Er wordt in dit geval dus geen vochtbufferend materiaal toegevoegd in de vitrine. De vochtbuffering gebeurt in dit geval enkel door de vitrine zelf. De HIR-waarde van de lege professionele vitrine bedraagt $0,000747 \text{ kg}/(m^3\%RV)$.

Figuur 77 toont de RV-voorspelling in de professionele vitrine zonder vochtbufferend materiaal.



Figuur 77: Voorbeeld RVi-voorspelling lege professionele vitrine

Het RV-verloop in de vitrine wordt, zonder vochtbufferend materiaal, al gebufferd door de vitrine zelf. Dit valt op te merken door de afvlakkingen van de maxima en minima van het RV-verloop in de vitrine die wel optreden in het RV-verloop de ruimte zoals af te leiden uit Figuur 77. Wel wordt duidelijk dat het RV-verloop in de vitrine wordt beïnvloed door de temperatuur in de ruimte. Er treden namelijk schommelingen op rond een vast RV-niveau, maar er wordt geen stabiel niveau bereikt.

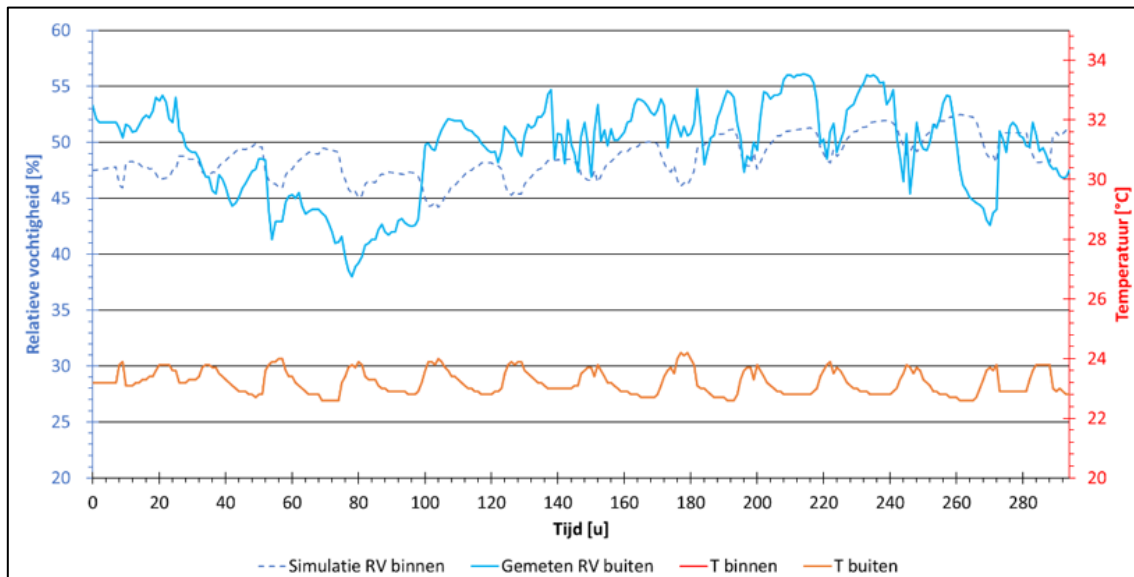
Om nu de invloed van een vochtbufferend materiaal op het RV-verloop te achterhalen worden in het voorbeeld de afmetingen en het soort vochtbufferend materiaal ingegeven die worden gebruikt tijdens de experimenten, beschreven in paragraaf 3.3. Dit omvat de eigenschappen zoals getoond in Tabel 18. Belangrijk om hierbij te vermelden is dat de MBV van het vochtbufferend materiaal steeds gebruikt

wordt bij een RV van 54%. Er wordt dus geen gebruik gemaakt van de dynamische MBV die eerder bepaald werd onder hoofdstuk 4. Dit zou het model te complex maken.

Tabel 18: Invoerparameters voorbeeld met CaSi

n (h ⁻¹)	V (m ³)	Vochtbufferend materiaal	A _{vochtbufferend materiaal} (m ²)
0,0522	0,1951	CaSi	0,02

Figuur 78 toont de RV-voorspelling in de professionele vitrine, met CaSi als vochtbufferend materiaal, op basis van zelfgekozen randvoorwaarden in de ruimte.



Figuur 78: RV_i-voorspelling met CaSi als vochtbufferend materiaal

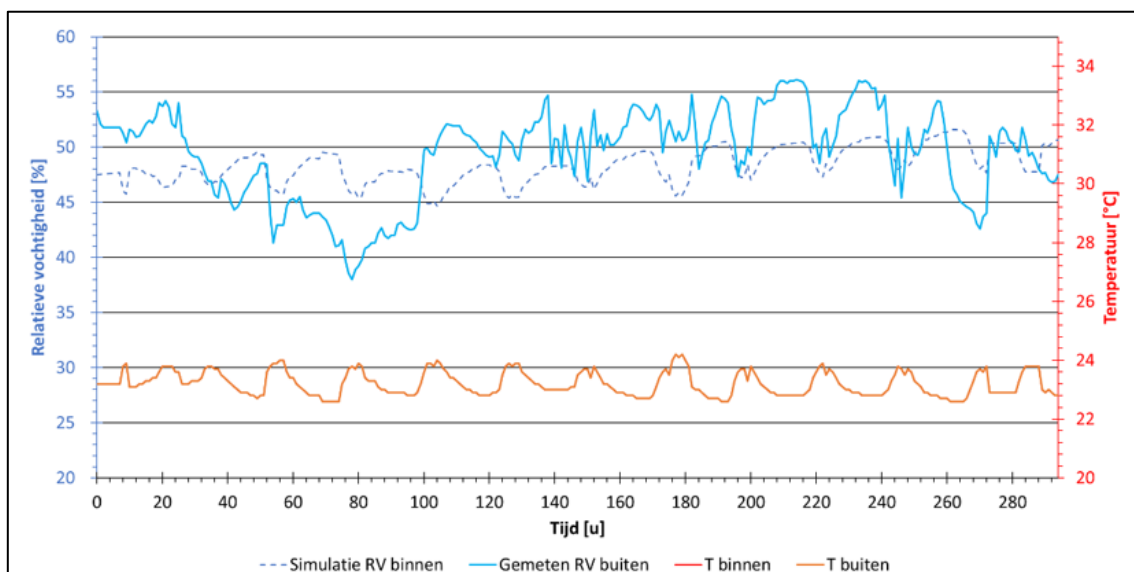
Het gesimuleerde RV_i-verloop, getoond in Figuur 78, schommelt in de eerste 200 uur tussen 45-50% RV. Na deze 200 uur gaat het RV-niveau in de vitrine ongeveer in zijn geheel 5% omhoog, maar blijft wel dezelfde schommeling vertonen als hiervoor.

Het algemene RV_i-verloop vertoont een stabiel evenwicht rond ongeveer 50% RV. Het valt wel op dat het RV-verloop steeds fluctueert. Uit deze fluctuaties valt op dat het RV_i-verloop duidelijk het temperatuurverloop in de ruimte volgt zoals eerder op te merken was in het voorbeeld zonder vochtbufferend materiaal. Na 200 uur stijgt de RV in zijn geheel ongeveer 5%, dit toont aan dat de RV niet enkel beïnvloed wordt door de temperatuur in de ruimte, maar ook wordt beïnvloed door het RV-verloop buiten de vitrine. Het RV-verloop buiten de vitrine ligt namelijk in deze periode ook hoger dan in de eerste 200 uur. Er kan geconcludeerd worden dat calciumsilicaat rond 54% RV niet optimaal werkt als vochtbufferend materiaal.

Wanneer nu hetzelfde voorbeeld opnieuw gebruikt wordt, maar deze keer met Art Sorb als vochtbufferend materiaal wordt het RV-verloop bekomen zoals getoond in Figuur 79. De afmetingen van het gebruikte vochtbufferend materiaal blijven hierbij hetzelfde. Art Sorb heeft een hogere MBV (0,00881 kg/(m²%RV) [4]) dan CaSi (0,00121 kg/(m²%RV)) en buffert het vocht dus beter bij 54% RV. Tabel 19 toont de invoerparameters die gebruikt worden bij dit model.

Tabel 19: Invoerparameters voorbeeld met Art Sorb

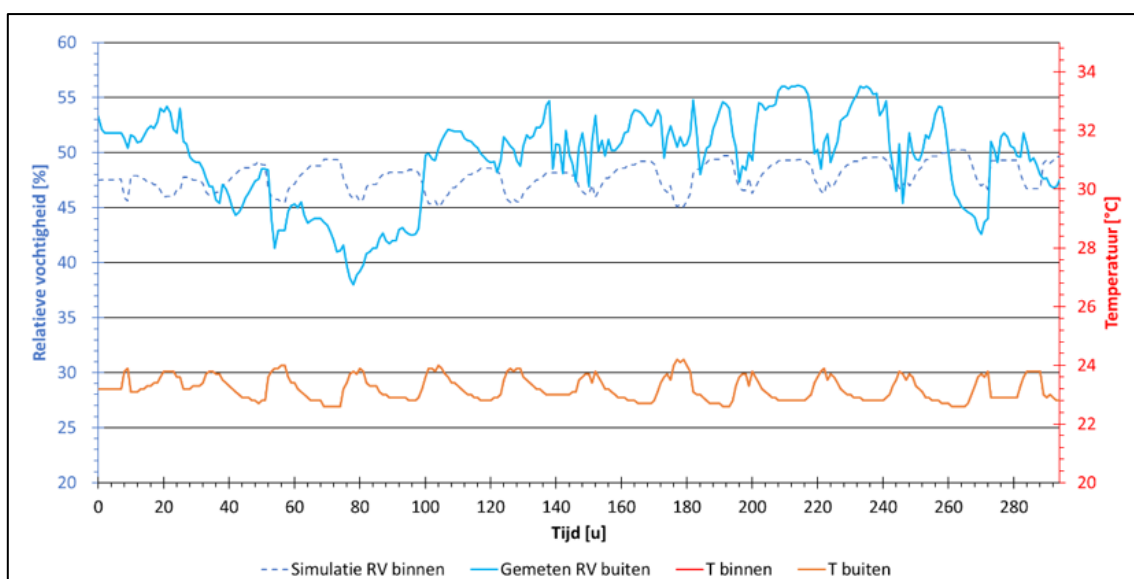
n (h ⁻¹)	V (m ³)	Vochtbufferend materiaal	A _{vochtbufferend materiaal} (m ²)
0,0522	0,1951	Art Sorb	0,02



Figuur 79: RVi -voorspelling met Art Sorb als vochtbufferend materiaal

Wanneer Figuur 79 vergeleken wordt met Figuur 78 valt duidelijk op dat Art Sorb de fluctuaties in het RV-verloop in de ruimte beter buffert dan CaSi. Het RV-verloop blijft bij dit voorbeeld bijna overal tussen 45-50% RV. Enkel tussen 220 en 260 uur ligt het gesimuleerde RV-verloop iets hoger met een maximum van 52% RV.

Naast het type vochtbufferend materiaal kan aan de hand van dit model ook de invloed van de hoeveelheid vochtbufferend materiaal op het RV-verloop in de vitrine achterhaald worden. In plaats van een sample met een oppervlakte van 0,02 m² te gebruiken, wordt in het volgende voorbeeld (Figuur 80) gebruikgemaakt van een sample met een oppervlakte van 0,1 m². Belangrijk hierbij is wel dat de dikte van het vochtbufferend materiaal hetzelfde blijft, enkel de oppervlakte wordt veranderd. Als vochtbufferend materiaal wordt opnieuw gebruikgemaakt van Art Sorb. De andere invoerparameters worden opnieuw gebruikt zoals in Tabel 19.



Figuur 80: RVi -voorspelling met Art Sorb als vochtbufferend materiaal (oppervlakte 0,1 m²)

Wanneer het gesimuleerde RV-verloop met verschillende hoeveelheden vochtbufferend materiaal (Figuur 79 en Figuur 80) vergeleken wordt, valt op dat de oppervlakte van het vochtbufferend materiaal een invloed heeft op het RV-verloop in de vitrine. Waar in Figuur 79 na 220 uur het RV-niveau boven de 50% stijgt, wordt in dit voorbeeld dit RV-niveau gebufferd en stijgt het niet boven de 50%. Een grotere oppervlakte vochtbufferend materiaal zorgt dus voor een stabielere RV-verloop binnen de vitrine.

6 Besluit

6.1 Terugblik

Het experimenteel onderzoek op de abstracte vitrine toont aan dat de luchtdichtheid van een vitrine een significante invloed heeft op het RV-verloop in de vitrine. Dit wordt aangetoond door verschillende standen van het ventiel in de abstracte vitrine te gebruiken. Uit de resultaten van de experimenten met CaSi in de abstracte vitrine blijkt namelijk dat het RV-verloop hoger ligt wanneer het ventiel gesloten is. De maximale RV in de abstracte vitrine ligt 5% hoger bij een gesloten stand van het ventiel. Het algemene RV-verloop van deze toestand ligt gemiddeld 3% hoger dan wanneer het ventiel geopend is. Hieruit blijkt dat een luchtdichtere vitrine het vocht langer vasthoudt in de vitrine. De tracer verval test binnen dit onderzoek toont aan dat zowel de abstracte vitrine als de professionele vitrine uiterst luchtdicht zijn ten opzichte van de omgeving waarin ze zich bevinden. Bovendien is de abstracte vitrine ongeveer vijf keer meer luchtdicht dan de professionele vitrine.

De toevoeging van CaSi in de vitrines heeft een invloed op het RV-verloop in de vitrines. Uit het experimenteel onderzoek blijkt dat CaSi, gepreconditioneerd in een diffusiekamer met een RV van 84,7%, zorgt voor een initiële stijging van het RV-niveau wanneer het sample rechtstreeks in contact staat met de vitrine-omgeving. Deze initiële RV-stijging kan echter niet worden behouden in de vitrines. Dit toont aan dat CaSi bij het plaatsen in de vitrines fungeert als vochtbron. Uit de hygroscopische curve van calciumsilicaat wordt vastgesteld dat het optimale RV-bereik tussen 80-95% ligt om te werken als vochtbufferend materiaal. De experimenten op de lege vitrines tonen aan dat het RV-verloop in de vitrines schommelt tussen 35-40%. Wanneer het CaSi-sample een evenwicht bereikt met de condities binnen de vitrine, is het vochtbufferend vermogen van CaSi niet sterk genoeg om het beoogde hogere RV-niveau te handhaven. Echter is CaSi wel in staat om de RV-fluctuaties in een vitrine te bufferen, wat resulteert in een stabiel RV-verloop gedurende een langere periode.

In de professionele vitrine speelt de locatie van het CaSi-sample een rol op het RV-verloop in de vitrine. De experimenten op de professionele vitrine wijzen uit dat wanneer het sample in direct contact staat met de vitrine-omgeving, er meer vocht in de vitrine-omgeving wordt vrijgegeven. Dit in tegenstelling tot wanneer het sample in de schuif van de professionele vitrine ligt. Hier valt op dat het RV-verloop in de vitrine geen invloed ondergaat van het sample. Dit valt te verklaren door een mogelijks gebrek aan luchtcirculatie tussen het sample en de vitrine-omgeving. Een andere mogelijke verklaring voor dit fenomeen kan zijn dat de professionele vitrine zelf (opgebouwd uit MDF) het afgegeven vocht van het sample buffert.

De toevoeging van een ventilator om de luchtcirculatie tussen de schuif in de professionele vitrine en de vitrine-omgeving te verbeteren heeft een positieve invloed op het RV-verloop in de vitrine. Dit blijkt uit de experimenten met een bakje water dat fungeert als vochtbron. Echter, bij het gebruik van CaSi wordt er te weinig vocht geproduceerd om deze invloed in kaart te brengen. Deze geringe vochtproductie kan mogelijk volledig worden opgenomen door de professionele vitrine zelf.

Over het algemeen wordt geconcludeerd uit het experimenteel onderzoek dat het RV-verloop in een museale vitrine in eerste instantie afhankelijk is van de condities van de museumruimte. Uit alle experimenten op de vitrines blijkt dat het RV-verloop schommelt rond het gemiddelde RV-niveau buiten de vitrines (35-40%). Daarnaast spelen de materialen waaruit een vitrine is opgebouwd een significante rol op het RV-niveau in de vitrine. Deze invloed is duidelijk zichtbaar in de resultaten van het experiment op de lege professionele vitrine. Hierbij werd al een stabiel RV-verloop zonder grote fluctuaties gehandhaafd in de vitrine. Ook na de toevoeging van CaSi, dat is gepreconditioneerd op hoge RV, in de voorziene schuif van de professionele vitrine, blijft het RV-verloop over het algemeen stabiel. Hieruit kan worden geconcludeerd dat het afgegeven vocht van het CaSi-sample wordt gebufferd door de MDF-omkasting voordat het vocht de vitrine-omgeving bereikt.

Uit deze bevindingen wordt geconcludeerd dat wanneer een vitrine voldoende luchtdicht is en opgebouwd is uit MDF, dit voldoende is voor de bewaring van bepaalde kunstschaten. Echter hangt dit samen met de condities van de museumruimte waarin de vitrine is opgesteld.

Aan de hand van het hygrothermisch simulatieprogramma Delphin kan de MBV van CaSi in functie van de RV gesimuleerd worden, mits voldoende bekende materiaaleigenschappen. De simulaties in Delphin tonen aan dat het vochtbufferend vermogen van CaSi daadwerkelijk afhankelijk is van het RV-niveau waarin het materiaal wordt gebruikt. Voor het materiaal CaSi is het vochtbufferend vermogen het grootst vanaf 60% RV. Dit kan worden verklaard door het optimale werkingsgebied van CaSi, dat tussen 80-95% RV ligt, zoals blijkt uit de hygroscopische curve. Het is belangrijk om een representatieve waarde van de MBV te gebruiken om analyses uit te voeren. Voor CaSi geldt dat voor een RV-niveau tussen 0-60% een eenduidige MBV-waarde van 1,29 g/(m²%RV) kan worden gebruikt. Voor RV-niveaus hoger dan 60% wordt aanbevolen om te werken met een MBV-waarde die afhankelijk is van de RV.

Het theoretisch onderzoek op basis van een dampbalans maakt het mogelijk een model op te stellen waarmee het RV-verloop in een vitrine voorspeld kan worden. Uit de modellen van de lege vitrines wordt een HIR-waarde bekomen van de vitrines zelf. De kwantificering van deze waarde gebeurt in de modellen op basis van een SOLVER-functie in Microsoft Excel. De correctheid van deze term dient echter in vraag gesteld te worden. Het model op basis van zelfgekozen randvoorwaarden toont de invloed van het soort vochtbufferend materiaal en de hoeveelheid ervan op het RV-verloop in een vitrine. Hieruit wordt geconcludeerd dat een grotere hoeveelheid vochtbufferend materiaal een positieve invloed heeft op het RV-verloop in de vitrine. Hierdoor blijft het RV-verloop stabiel rond een beoogd RV-niveau. Daarnaast heeft het type vochtbufferend materiaal ook invloed op het RV-verloop in de vitrine. Een materiaal met een hogere MBV zorgt voor een betere vochtbuffering en een stabielere RV-verloop zonder grote fluctuaties in de vitrine.

Het algemeen besluit dat uit deze masterthesis wordt behaald, is dat de optimalisatie van de RV in een museale vitrine voor de bewaring van kunstschaten afhankelijk is van de condities in de museumruimte. Wanneer de condities van de museumruimte zich binnen hetzelfde RV-bereik bevinden als het vereiste RV-bereik van de te bewaren kunstschaten, is de toevoeging van een vochtbufferend materiaal overbodig. Er moet echter worden opgemerkt dat er geen al te grote RV-fluctuaties mogen optreden. Als deze fluctuaties wel optreden, is de toevoeging van een vochtbufferend materiaal nodig om een stabiel RV-niveau in de vitrine te handhaven. Daarentegen is het moeilijk om soortgelijke vitrines zoals de professionele vitrine die in dit onderzoek wordt gebruikt, naar een geschikt RV-niveau te brengen wanneer de condities van de museumruimte slecht zijn. Deze veronderstelling wordt bevestigd door het gebruik van calciumsilicaat als vochtbufferend materiaal in dit onderzoek. Daarentegen wil dit niet zeggen dat deze veronderstelling geldt voor andere vochtbufferende materialen.

Tot slot blijkt uit dit onderzoek dat de toevoeging van vochtbufferende materialen niet in elke situatie noodzakelijk is. Het gebruik van een voldoende luchtdichte vitrine, opgebouwd uit MDF, kan voldoende zijn om een stabiel RV-verloop te bereiken. Hierdoor is het gebruik van de actieve strategie en in bepaalde gevallen de passieve strategie in museale vitrines niet noodzakelijk. Dit zou leiden tot een reductie van de kosten voor musea.

6.2 Beperkingen van het onderzoek

De uitgevoerde experimenten in dit onderzoek vonden plaats op de afdeling Bouwfysica en Duurzaam Bouwen op de vierde verdieping van het Departement Burgerlijke Bouwkunde in Heverlee. Alle experimenten zijn op deze verdieping uitgevoerd, dit wil zeggen dat de vitrines steeds onderhevig waren aan de condities in deze ruimte. Deze condities variëren voortdurend, waardoor de vergelijking tussen de verschillende experimenten niet altijd accuraat kan worden gedaan. Bovendien is er slechts gebruikgemaakt van één professionele vitrine, waardoor de resultaten niet van toepassing zijn voor andere vitrines.

6.3 Toekomstig onderzoek

Het experimenteel onderzoek en het numeriek model op basis van de dampbalans tonen aan dat de professionele vitrine (opgebouwd uit MDF) zelf al een aanzienlijk vochtbufferend vermogen bezit. Dit valt af te leiden uit de resultaten van de experimenten met de professionele vitrine, waarin steeds een stabiel RV-verloop wordt verkregen rond een vast RV-niveau. Zowel met als zonder toevoeging van een vochtbufferend materiaal vertoont deze vitrine een stabiel RV-verloop. Dit onderzoek specificeert echter niet de exacte kwantificatie van dit vochtbufferend vermogen. In het numeriek model wordt de HIR-waarde van deze vitrine bepaald aan de hand van een SOLVER-functie in Microsoft Excel. Verder onderzoek is nodig naar het vochtbufferend vermogen van deze vitrine. Een mogelijkheid bestaat erin om de hygroscopische eigenschappen van een stuk MDF, waaruit de vitrine is opgebouwd, verder te onderzoeken. Hierbij wordt een experiment in een klimaatkast op basis van de Nordtest-methode aanbevolen.

In dit onderzoek is slechts één professionele vitrine gebruikt, afkomstig uit het Gallo-Romeins Museum in Tongeren. Uit persoonlijke ervaring in dit onderzoek blijkt dat er een grote verscheidenheid aan vitrines wordt gebruikt in musea. Zo is er vanzelfsprekend een verschil tussen hedendaagse en oudere vitrines. Toekomstig onderzoek wordt aanbevolen om meer inzicht te krijgen in de verschillen tussen deze vitrines. Dit omvat vooral de kwaliteit van de vitrines, die bepaald wordt door onder andere: de gebruikte materialen, de afmetingen, de luchtdichtheid, etc.

De toevoeging van een ventilator in een vitrine is in dit onderzoek eerder beperkt onderzocht. Het experimenteel onderzoek toont echter wel aan dat de toevoeging van een ventilator in een vitrine een invloed heeft op het RV-verloop in de vitrine. Echter dient de invloed van de ventilator en de locatie ervan verder onderzocht te worden.

In dit onderzoek is calciumsilicaat gebruikt als vochtbufferend materiaal. Echter tonen de resultaten van de hygroscopische eigenschappen van dit materiaal aan dat het optimale werkingsgebied eerder gelegen is bij hoge RV. In musea worden de meeste kunstschaten bewaard bij lagere waarden van de RV. Dit toont aan dat calciumsilicaat niet het meest geschikte vochtbufferend materiaal is voor de bewaring van kunstschaten in een museale vitrine. Naast calciumsilicaat zijn er nog andere mogelijke vochtbufferende materialen voor de bewaring van kunstschaten, zoals Art Sorb en Pro Sorb. Verder onderzoek is nodig naar de werking van deze materialen onder invloed van verschillende omgevingscondities waarin de vitrine zich bevindt.

Ten slotte is in dit onderzoek het EC-model op basis van een dampbalans gebruikt om het RV-verloop in een vitrine te voorspellen. Er zijn echter naast het EC-model ook andere mogelijkheden om het RV-verloop in een vitrine op voorhand te voorspellen. Om de vergelijking te maken tussen bijvoorbeeld het EC-model en een volledig numeriek model, wordt aanbevolen om gebruik te maken van een simulatieprogramma zoals Therakles.

Referentielijst

- [1] CHARP Art Care, „CHARP Art Care Hardware,” [Online]. Available: <https://artcare.be/logger>. [Geopend 25 maart 2023].
- [2] M. Zhang, M. Qin en Z. Chen, „Moisture buffer effect and its impact on indoor environment,” *Procedia Engineering*, vol. 205, pp. 1123-1129, 22 oktober 2017.
- [3] J. Ferdyn-Grygierek, J. Kczmmarczyk, M. Blaszcok, P. Lubina, P. Koper en A. Bulinska, „Hygrothermal risk in museum buildings located in moderate climate,” pp. 1-20, 10 januari 2020.
- [4] J. Claes en V. Leten, Vochtbuffering als passieve strategie voor relatieve vochtigheid beheersing in museale vitrines met kunstschaten [eindwerk], Gezamenlijke opleiding Industriële Ingenieurswetenschappen UHasselt & KU Leuven, 2022.
- [5] K. Ishikawa, C. Iba, D. Ogura, S. Hokoi en M. Yokoyama, „Hygrothermal analysis of a museum storage room for metal cultural artifacts: Quantification of factors influencing high humidity,” pp. 1-19, 4 Juni 2021.
- [6] C. Waller, „Long life for art,” [Online]. Available: <https://llfa.eu/>. [Geopend 21 oktober 2022].
- [7] C. Rode, R. H. Peuhkuri, K. K. Hansen, B. Time, K. Svennberg, J. Arfvidsson en T. Ojanen, „NORDTEST Project on moisture buffer value of materials,” DTU Library, Brussel, 2005.
- [8] B. Ankersmit, *Klimaatwerk*, Amsterdam: Amsterdam University Press, 2009.
- [9] M. Leskard, „Validating the techno-economic viability of hemp lime construction for passive and low energy moisture control in museum storage,” University of Bath, 2021.
- [10] D. Camuffo, G. Sturaro en A. Valentino, „Showcases: a really effective mean for protecting artworks?,” *Thermochimica Acta*, vol. 365, nr. 1-2, pp. 65-77, 2000.
- [11] M. Perino, „Air tightness and RH control in museum showcases: Concepts and testing procedures,” *Journal of cultural heritage*, vol. 34, pp. 277-290, 2018.
- [12] „Museums Galleries Scotland,” 2022. [Online]. Available: <https://www.museumsgalleriesscotland.org.uk/advice/climate-action/climate-action-examples-from-museums/>. [Geopend 30 november 2022].
- [13] J. E. Simmons, „Application of preventive conservation to solve the coming crisis in collections management,” *Collection Forum*, vol. 27, nr. 1, pp. 89-101, 2013.
- [14] M. Adriaens, S. Bioletti en I. Rabin, *Chemical Interactions between Cultural Artefacts and Indoor Environment*, Leuven: Acco, 2018.
- [15] D. Thickett, P. Fletcher, A. Calver en S. Lambarth, „The effect of air tightness on RH buffering and control,” National Museum of Denmark, Copenhagen, 2007.
- [16] E. Neuhaus, *Onderzoek naar methoden voor beperkte RV-beheersing in monumentale gebouwen aan de hand van casussen* [eindwerk], Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2006.

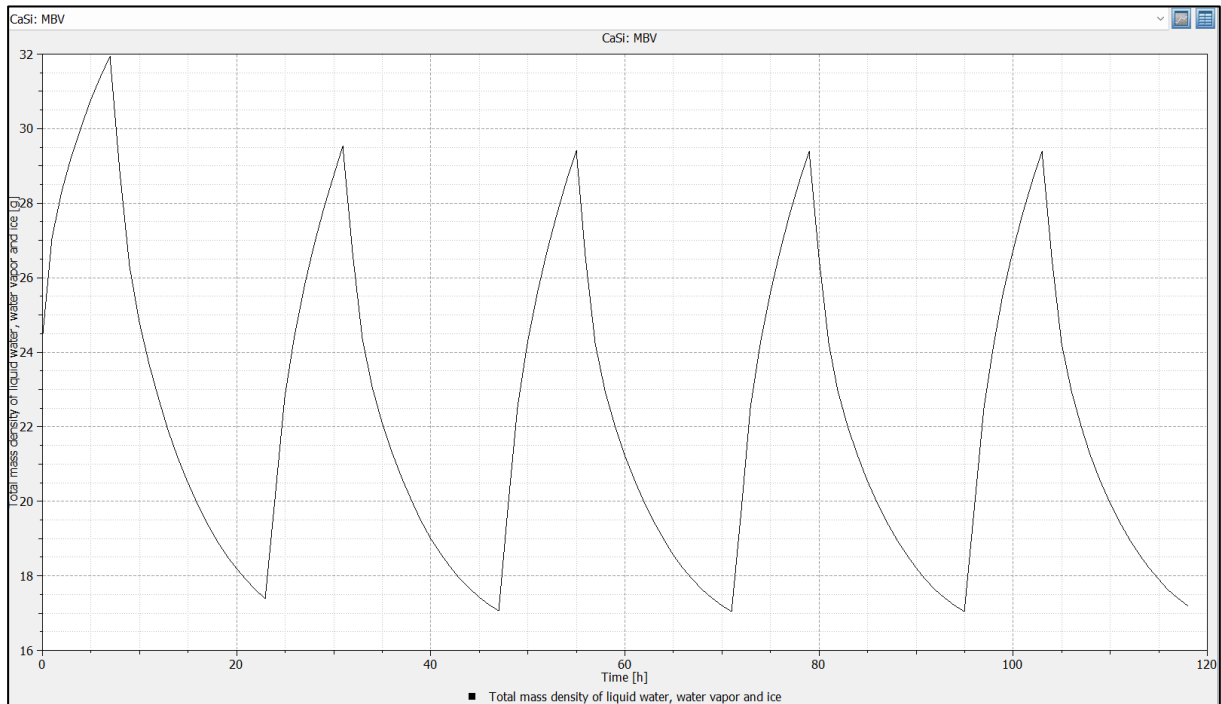
- [17] J. Tétreault en E. Hagan, „Airtightness Measurement of Display Cases and Other Enclosures – Technical Bulletin 38,” 2022. [Online]. Available: <https://www.canada.ca/en.html>. [Geopend 19 april 2023].
- [18] G. Remion, B. Moujalled en M. El Mankibi, „Review of tracer gas-based methods for the characterization of natural ventilation performance: Comparative analysis of their accuracy,” *Building and Environment*, vol. 160, Augustus 2019.
- [19] A. Schieweck en T. Salthammer, „Indoor air quality in passive-type museum showcases,” *Journal of cultural heritage*, vol. 12, pp. 205-213, 2010.
- [20] O. Chiantore en T. Poli, „Indoor air quality in museum display cases: volatile emissions, materials contributions, impact,” *Atmosphere*, vol. 12, p. 364, 2021.
- [21] B. Demarsin, persoonlijke correspondentie, 2023.
- [22] K. Grooten, Hygroscopisch gedrag van papier en boeken [eindwerk], Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2008.
- [23] J. Tyberghien, Onderzoek naar de impact van mortelvoegen op het hygrothermisch gedrag en de waterdichtheid van metselwerk [eindwerk], Gent: Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur Universiteit Gent, 2018.
- [24] E. Vereecken, Bouwfysica: Vochtbeheersing in gebouwen: watertransport [cursus], Diepenbeek: Gezamenlijke opleiding Industriële Ingenieurswetenschappen UHasselt & KU Leuven, 2022.
- [25] C. Waller, „Pro Sorb humidity stabilizer,” 2017. [Online].
- [26] D. Camps, Systeemidentificatie voor de voorspelling van het hygrthermisch gedrag van museumvitruines [eindwerk], Faculteit Ingenieurswetenschappen KU Leuven, 2022.
- [27] I. Gomez-Arriaran, I. Sellens-Fernandez, M. Odriozola-Maritorea en A. Erkoreka-Gonzalez, „A PC-tool to calculate the Moisture Buffer Value,” *Energy Procedia*, vol. 133, pp. 68-75, 2017.
- [28] S. Cerolini, M. D'Orazio, C. Di Perna en A. Stazi, „Moisture buffering capacity of highly absorbing materials,” *Energy and Buildings*, pp. 164-168, 2008.
- [29] E. Vereecken, S. Roels en h. Janssen, „In situ determination of the moisture buffer potential of room enclosures,” *Energy and buildings*, vol. 41, pp. 382-394, 2008.
- [30] H. Janssen en S. Roels, „Qualitative and quantitative assessment of interior moisture buffering by enclosures,” *Energy and buildings*, vol. 41, pp. 382-394, 2009.
- [31] M. Trimpeneers, Exploration of hygrothermal grey-box state-space models [eindwerk], Leuven: Faculteit Ingenieurswetenschappen KU Leuven, 2021.
- [32] C. Rode, R. Peuhkuri, B. Time, K. Svennberg en T. Ojanen, „Moisture buffer value of building materials,” Toronto, 2006.
- [33] E. Latif, M. Lawrence, A. Shea en P. Walker, „Moisture buffer potential of experimental wall assemblies incorporating formulated hemp-lime,” *Building and Environment*, pp. 199-209, 17 Juli 2015.
- [34] „TESCON VANA,” pro clima, Schwetzingen, 2020.

- [35] „Plasticine,” Silicones and more.
- [36] Onset Computer Corporation, „HOBO products,” Onset Computer Corporation, [Online]. Available: <https://www.onsetcomp.com/products?f%5B0%5D=measurement%3A771&f%5B1%5D=measurement%3A811>. [Geopend 05 maart 2023].
- [37] „Plug ‘n’ Play compact axial fans,” ebmpapst, Chelmsford.
- [38] „Trivio - CO2 Adapter + CO2 Patroon 16 gram + Neoprene Huls,” Trivio, 2023. [Online]. Available: https://www.trivio.com/nl_NL/p/trivio---co2-adapter--co2-patroon-16-gram--neoprene-huls/17681/. [Geopend 19 april 2023].
- [39] Buildwise, Buildwise, [Online]. Available: <https://www.buildwise.be/nl/>. [Geopend 12 april 2023].
- [40] Netatmo. [Online]. Available: <https://shop.netatmo.com/nl-nl/weather/smart-weather-station/weatherstation>. [Geopend 12 april 2023].
- [41] C. Feng en H. Janssen, „Hygric properties of porous building materials (II): Analysis of temperature influence,” *Building and environment*, vol. 99, pp. 107-118, 2016.
- [42] E. Vereecken, P. Schutova en S. Roels, „Does kaolin clay really create a perfect hydraulic interface contact between materials?,” *Construction and building materials*, vol. 262, p. 9, 2020.
- [43] O. Tuominen, E. Tuominen, M. Vainio , T. Ruuska en J. Vinha, „Thermal and moisture properties of calcium,” EDP Sciences, Tampere, 2019.
- [44] S. Roels en H. Janssen, „A comparison of the Nordtest and Japanese test methods for the moisture buffering performance of building materials,” *Journal of Building Physics*, nr. 30, pp. 137-161, 2006.
- [45] D. Xinyuan, „Hygroscopic curve and cup test measurements,” niet gepubliceerd., 2013.
- [46] G. Bauwens, persoonlijke correspondentie, 2023.
- [47] B. Ankersmit en M. H. Stappers, *Managing indoor climate risks in museums*, Springer International Publishing, 2017.

Bijlagen

Bijlage A: Delphin

Output PostProc 2.3.0 simulatie 75-33% RV MBV_{8u}



Output PostProc 2.3.0 simulatie 75-33% RV MBV_{1u}

