# Binnenisolatie aan raamaansluitingen: risico-analyse aan de hand van hygrothermische simulaties

Stephanie Heyrman Studentennummer: 01815602

Promotor: prof. dr. ir.-arch. Nathan Van Den Bossche Begeleider: Isabeau Vandemeulebroucke

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

Academiejaar 2022-2023



### Voorwoord

Met oprechte dankbaarheid wil ik iedereen bedanken die heeft bijgedragen aan mijn academische reis en de totstandkoming van mijn thesis.

Allereerst wil ik mijn promotor, Professor dr. ir. arch. Nathan Van Den Bossche, van harte bedanken voor het aanreiken van dit onderwerp, de interessante begeleidingen, het aansturen waar nodig en vooral het vertrouwen in het onderzoek van deze thesis.

Uiteraard wil ik mijn begeleider, ir. arch. Bruno Vanderschelden, bedanken voor de onschatbare begeleiding, feedback en onmisbare hulp bij de problemen die zich onderweg voordeden.

Verder wil ik ir. arch. Joost Declercq en arch. Yannick Veny van Archipelago bedanken voor het toevertrouwen van de gegevens van de Vlaamse Hoeve en hun begeleiding bij het plaatsbezoek. Ook ir. arch. Gretel De Smet, ir. arch Robbe Verelst en ing. Martijn Vyncke van Bureau Bouwtechniek wil ik bedanken voor het toevertrouwen van de gegevens van de Paardenmarkt en het beantwoorden van al mijn vragen.

Tot slot wil ik mijn familie en vrienden bedanken voor alle steun en liefde. In het bijzonder, mijn ouders, Lennert en Glenn, bedankt voor jullie inspiratie, motivatie en het luisteren naar mijn eindeloze bedenkingen.

Zonder de kennis en het enthousiasme van alle bovengenoemde mensen, zou deze thesis niet mogelijk zijn geweest.

### Toelating tot bruikleen

De auteur geeft de toelating deze masterproef voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de masterproef te kopiëren voor persoonlijk gebruik.

Elk ander gebruik valt onder de beperking van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze masterproef.

Gent, 8 juni 2023

Stephanie Heyrman

"Deze masterproef vormt een onderdeel van een examen. Eventuele opmerkingen die door de beoordelingscommissie tijdens de mondelinge uiteenzetting van de masterproef werden geformuleerd, werden niet verwerkt in deze tekst."

#### Binnenisolatie aan raamaansluitingen: Risico-analyse aan de hand van hygrothermische simulaties

Auteur: Stephanie HEYRMAN Promotor: Prof. dr. ir. arch. N. VAN DEN BOSSCHE Begeleider: ir. arch. B. VANDERSCHELDEN

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

Faculteit ingenieurswetenschappen en Architectuur

Vakgroepvoorzitter: prof. dr. ir. arch. Johan Lagae

Academiejaar: 2022-2023

#### Abstract

Het verminderen van het energieverbruik is momenteel belangrijker dan ooit vanwege de stijgende energieprijzen en de negatieve effecten van het hoog energieverbruik op het klimaat, milieu en CO<sub>2</sub>uitstoot. Aangezien een kwart van de gebouwen in België nauwelijks isolatie bevat, is er een groot potentieel om het energieverbruik te verminderen door de thermische prestaties van gebouwen te verhogen. Indien buitenisolatie geen optie is, om erfgoed te behouden of binnen de strikte bouwlijn te blijven in stedelijke context, wordt er binnenisolatie toegepast. Binnenisolatie kan risicovol zijn vanwege veranderingen in de temperatuurgradiënt en vochtbalans van de bestaande muurstructuur. Dit kan leiden tot vochtgerelateerde schade, zoals schimmelgroei, vorstschade en houtrot. Hoewel er al veel studies zijn uitgevoerd over binnenisolatie bij metselwerkstructuur, ontbreekt er onderzoek naar binnenisolatie bij bouwknopen. Een kritieke bouwknoop waarbij vaak schadeproblemen optreden na plaatsing van binnenisolatie zijn raamaansluitingen, deze zullen worden onderzocht in deze masterproef.

Om raamaansluitingen bij volsteens metselwerk te kunnen onderzoeken zijn er twee cases gebruikt als basis voor de verzameling van gegevens, de Vlaamse Hoeve in Meise en de Paardenmarkt in Antwerpen. Het onderzoek omvat een stappenplan startend van 1D-analyse van het volsteens metselwerk opbouwend tot 2D-analyse van de raamaansluitingen. Hierbij wordt in elke stap de bestaande toestand met de nieuwe toestand met binnenisolatie vergeleken. Het reactiegedrag wordt geëvalueerd via berekeningen die het optreden van schadefenomenen voorspellen, waarna deze resultaten per stap worden voorgesteld en vergeleken via samenvattende grafieken. Het onderzoek toont het belang van verschillende keuzes: randvoorwaarden en materiaaleigenschappen, het verschil in schade na toepassen van binnenisolatie en het verschil tussen 1D en 2D-simulaties, waarbij elke stap meer detail vereist en zo een verschil in resultaten geeft.

**Kernwoorden:** Numerieke HAM-simulatie, Risico-analyse, Binnenisolatie, Historisch metselwerk, Schadefenomenen, Raamaansluitingen

# Interior insulation of window-wall interfaces: risk analysis based on hygrothermal simulations.

Stephanie HEYRMAN Ghent University stephanie.heyrman@ugent.be

Promotor: Prof. dr. ir. arch. N. VAN DEN BOSSCHE Supervisor: ir. arch. B. VANDERSCHELDEN

Abstract This research aims to investigate the risks and benefits of interior insulation in building nodes, specifically focusing on window-wall interfaces in solid brickwork. Although previous studies have examined interior insulation in masonry structures, research on interior insulation in building nodes is lacking. To address this gap, this study proposes a step-by-step plan starting from a 1D analysis of the solid masonry to a 2D analysis of the window-wall interface. The Vlaamse Hoeve in Meise and the Paardenmarkt in Antwerp are used as case studies for data collection. The existing state before retrofitting is compared to a new state after retrofitting at each step, and the reaction behaviour is evaluated using calculations that predict the occurrence of damage phenomena. The results show the importance of geometry, material selection, moisture exposure and moisture control.

*Keywords* Numerical HAM simulation, Sensitivity analysis, Interior insulation, Historical masonry, Degradation, Window-wall interface.

#### I. INTRODUCTION

Reducing energy consumption is now more important than ever due to rising energy prices and the negative effects on the climate, environment, and CO<sub>2</sub>-emissions [1]. Since a quarter of buildings in Belgium contain hardly any insulation, there is great potential to reduce energy consumption by increasing the thermal performance of buildings [2]. If outdoor insulation is not an option, for example, to preserve heritage or to stay within the strict building line in an urban context, interior insulation is applied. Interior insulation can be risky due to changes in the temperature gradient and moisture balance of the existing wall structure. This can lead to moisture-related damage, such as mould growth, frost damage, and wood rot [2], [3].

During renovation, interior insulation is often applied without considering the thermal bridges that may occur at construction nodes, especially in complex geometries such as the window-wall interface. These geometries, being the weak spot of the building, require further research to avoid future damage [4].

#### **II. METHODS**

This study utilizes case studies to gather data that closely approximates realistic conditions. Two cases with varying parameters, conditions, and materials are selected for evaluation using simulation software Delphin 6.1. The goal is to construct each case as accurately as possible, with all the different configurations.

#### A. Wall assembly

Two different types of wall assemblies were evaluated in this study: a solid masonry wall assembly and a retrofitted solid masonry assembly. The Vlaamse Hoeve (VH) in Meise, designed by Archipelago, features a 410mm-thick masonry structure with an upright masonry bond, a 200mm-thick mineral wool insulation layer, and an airtight fibreboard, (see figure 1a). During the interior insulation of the window connections, new windows were installed and placed on the thermal cut of the mineral wool.

The wall construction of the Campus Paardenmarkt (PM) in Antwerp, designed by Bureau Bouwtechniek, comprises a 280mm-thick masonry structure and 100mm-thick capillaryactive insulation material, multipor. This facade is finished with an exterior plaster, (see figure 1b). During the interior insulation of the window connections, new windows were also installed and placed on the thermal cut of the multipor, with additional PIR insulation at the top.



Figure 1 Wall construction after retrofitting with monitoring points for the damage mechanisms: a) Vlaamse Hoeve b) Paardenmarkt

#### **B.** Assumptions

Heat and moisture transport depends on the material properties and boundary conditions applied to the inner and outer surfaces of the configuration. These boundary conditions model the real-life conditions to which the configuration will be exposed.

This research uses a "moisture reference year" (MRY) for the outside and inside climate, which contains data from the most critical year and worst moisture conditions that a structure is exposed throughout ten years. Vandemeulebroucke et al. recently determined a MRY of Brussels, which includes data on outdoor temperature, relative humidity, radiation, wind and rain [5].

The wall configurations are aligned to the most critical orientation, which is the western side in both cases. The rain exposure coefficient is adjusted to account for potential leaks or poor detailing, with values 0.5, 0.7 and 1.5.

Hygrothermal modelling of historical masonry constructions poses a challenge due to the uncertain material properties of the used bricks. To overcome this issue, this research selected three types of bricks, brick ZC, ZG, and ZK, from the Delphin Material Database, 'Old Building Bricks - Dresden', based on the study by Vanderschelden et al. [6]. These bricks are chosen from different clusters, which are determined based on the similarity of their physical properties.

#### C. Damage criterion

Three different damage mechanisms are evaluated in this study. The frost-thaw damage (FTC) is calculated using the ice mass volume method. This method considers the thermodynamic equilibrium between water content in ice and liquid phases, utilizing a threshold of 25% of the pore volume density based on the study of Mensinga et al. [7].

Mould degradation (M) is determined using the mould index (MI) based on the updated VTT model by Hukka and Viitanen [8]. This model calculates the severity of mould growth based on the temperature, relative humidity, presence of nutrients, growth rate, and growth reduction during drier periods.

Wood decay (WD) is assessed based on experimental evaluations conducted by Brischke and Rapp on coarse pine wood [9]. The decay estimation is calculated at a distance of 100 mm from the interior surface of the masonry. The progression of wood decay can be predicted using the moisture content and temperature observed in the surrounding masonry [9], [10]. (See figure 1 for the damage monitoring points on the wall constructions of the evaluated case studies.)

#### **III. RESULTS AND DISCUSSION**

#### A. Step 1: 1D-study

In this step, the Vlaamse Hoeve (VH) and the Paardenmarkt (PM) are examined in 1D-environment, before and after retrofitting. From the study of the existing state, it can be established that damage can already occur before the installation of interior insulation. However, this damage must be accompanied by high wind driven rain, water leakage, local damage, or a critical brick type. It is crucial to conduct a visual inspection of the current state in order to better understand the real behaviour of the construction and effectively compare it to the model's outcomes.

After evaluating the three moisture-related damage phenomena, it can be concluded that the risk of damage increases after retrofitting. The installation of a vapor-tight interior insulation system restricts the drying process on the interior side of the construction, resulting in an extended duration of moisture exposure for the masonry. Therefore, controlling internal moisture transport is crucial, see figures 2 and 3 for a comparison between capillary and vapor transport throughout the construction before and after retrofitting.

In constructions with critical indoor and outdoor climates, like the critical MRY that is used in this study, it is demonstrated that both capillary and vapor transport need to be restricted through the use of vapor-tight and waterproof membranes on both the interior and exterior side. As a result, it is clear that the selection of appropriate materials and membranes plays a decisive role in minimizing moisture-related issues in constructions.



Figure 3 Wall construction after retrofitting VH: Moisture content [kg/m<sup>3</sup>], Relative humidity [%], Temperature [°C]

After the installation of a vapor-permeable, capillary-active interior insulation system, the construction is still able to dry on both sides, although the results show a slight decrease in drying capacity. A critical indoor climate can still lead to a higher risk of damage due to condensation on colder surfaces behind the interior insulation. However, it is observed that this condensation can still dry out because the interior insulation system is not vapor-tight.

In conclusion, these findings emphasize the importance of selecting suitable materials and membranes, considering material properties such as absorption coefficient, pore distribution, and vapor resistance. Understanding the interaction between material properties and the indoor and outdoor climate is crucial in assessing the hygrothermal behaviour of a structure.

#### B. Step 2: 1D-2D transition study

In the second phase of the research, a transitional study from 1D to 2D is conducted as a preparatory step for the 2D investigation of the window-wall interface. In this transitional study, the configurations from the 1D analysis are modified to a complete masonry structure. This 1D-2D analysis allows for more detailed understanding of the causes and links concerning the hygrothermal behaviour of a structure.

The addition of a horizontal lime mortar layer to the configurations in de 1D-2D study leads to different results and variations in the hygrothermal behaviour from the 1D study. Before retrofitting, the risk of the three damage phenomena significantly increases when the monitoring points are positioned in the lime mortar. However, after an insulation system is added, the increased risk in the lime mortar regarding mould growth disappears, (see figure 4). This indicates a change in the hygrothermal behaviour after renovation, where the relative humidity of the indoor environment plays a more significant part. The risk of frost-thaw damage and wood decay continues to differ between the lime mortar and the brick, demonstrating that these damage phenomena, both before and after retrofitting, remain dependent on the impact of driving rain from the outdoor climate and the amount of liquid moisture within the construction.



Figure 4 Comparison results FTC, M and WD measured in the brick versus in the lime mortar, after retrofitting, configurations 5 and 6, PM



Figure 5 Monitoring points FTC, M and WD measured in the alternating masonry bond and in the lime mortar, after retrofitting, configurations 5, PM

Additionally, the alternating masonry bond is being evaluated, showing that more detailed 2D constructions exhibit smaller differences in the results, between the variating masonry assembly monitoring points, (see figure 5), compared to the 1D constructions. This suggests that in reality, there is no significant distinction between the masonry assembly since the entire construction and masonry bond is connected.

In practice, there also exists an interface resistance (IR) between material layers. In this study, the lime mortar is assumed to be wet cured, which corresponds to a value of IR = 2.5e10 m/s based on a study of Derluyn et al. [11]. This value represents the resistance between material layers in terms of moisture conductivity, resulting in a decrease in moisture transport capacity at the interface between two materials. This means that previous simulations assumed perfect hydraulic contact between all material layers.



Figure 6 Comparison between perfect hydraunc contact and interface resistance, VH

After evaluating the interface resistance in the 1D-study and the 1D-2D-study, it is found that this resistance forms a barrier to liquid moisture transport, (see figure 6). Furthermore, there is a higher moisture absorption observed at the front of the brick. This is due to the interface resistance which hinders capillary moisture flow. Consequently, the moisture is restricted from spreading and tends to collect at the front. This means that for the damage phenomena, the risk of frost-thaw damage will increase, the risk of wood decay will decrease. The risk of mould degradation remains unchanged, as the relative humidity of the indoor environment again, plays a more significant part after the retrofitting.

By comparing the 1D study with the 1D-2D study, it can be concluded that the values in 1D appear to be more critical than those in 1D-2D, (see figure 7).



Figure 7 Comparisons step 1 (1D) and step 2 (1D-2D), (ZC, RF1.5): Ice mass volume at 5mm exterior masonry, relative humidity between cementation and glass wool, moisture storage 100mm from interior masonry, VH

The values for frost-thaw damage and wood decay decrease from the 1D analysis to the 1D-2D analysis, but in measurements within the mortar layer, the values increase compared to the 1D analysis. This indicates that the 1D-2D transition actually lies between the two extreme values of the homogeneous 1D analysis. For the risk of mould growth there is almost no difference between the 1D and 1D-2D-study

#### C. Step 3: 2D-study

In this section, the window-wall interface of the Vlaamse Hoeve and Paardenmarkt after retrofitting, have been examined and analysed in a 2D environment. The same moisture-related occurrences, as observed in the 1D and 1D-2D steps, are present. The difference between the window-wall interface and the 1D-2D step is that both the exterior and interior climate can now act on the building node in both the horizontal and vertical dimensions, rather than solely vertically. As a result, while the moisture-related phenomena remain the same, the moisture distribution pattern within the construction has changed.

In general, it can be determined that the additional horizontal dimension can have both positive and negative effects on the evaluated window connection. On one hand, this dimension may be exposed to additional driving rain and water vapor from the exterior climate, resulting in an additional wetting side for the construction. This wetting surface has a negative impact as it allows an increased amount of moisture to infiltrate in the construction. On the other hand, this additional dimension can also facilitate drying of the construction, allowing the infiltrated moisture to evaporate more rapidly, thereby providing a positive effect on the construction.

Specifically, it is determined that the window-wall interface at the top is less critical due to the enhanced drying potential at the bottom of the node, protected from wind driven rain, (see figure 8).



Figure 8 Window-wall interface top, ZG, RF0.7, Moisture content, 15-03, VH

Figure 9 Window-wall interface bottom, ZC, RF0.7, Moisture content, 15-03, PM

However, the window-wall interface at the bottom is more critical due to the added moisture exposure, (see figure 9). Though, it should be noted that these phenomena can be mitigated by construction-specific elements.

The differences in geometry and the selection of different materials with different thicknesses in the window connections, emphasize the uniqueness of the hygrothermal behaviour for each type of building node. This makes uniform research challenging.

Further investigation into the interface resistance confirms the findings of the 1D and 1D-2D analyses. Once again, it is established that adding interface resistance in the mortar layer and cementation, hinders capillary transport within the construction. It also leads to increased moisture content at the start of the construction, (see figure 9). However, these effects appear less prominent and have no influence on the risk of damage in the 2D study compared to 1D or 1D-2D transition.



Figure 10 Window-wall interface bottom, ZG, RF0.7, Moisture content, 15-03, PM

When the masonry of the window-wall interface is homogenized into a complete brick structure without mortar layers, the results evaluating the risk of damage are found to be lower compared to a detailed masonry structure. Additionally, both vapor and capillary transport are reduced, (see figure 10). This indicates that the interrupting mortar layers, which transport moisture into the inner construction, play a significant role. However, this raises questions, as the opposite was observed in the 1D and 1D-2D studies. It appears that the additional horizontal wetting surface in de 2D-study has a considerable influence, since the vertical mortar layers can now be more directly moistened. Through this more direct moistening of both the horizontal and vertical mortar layers, the mortar layers can exert a greater influence on the moisture behaviour of the construction. In conclusion, these findings emphasize the importance of the number of additional wetting or drying surfaces.

#### IV. CONCLUSION AND DISCUSSION

This study explored the effects of interior insulation on the hygrothermal behaviour of masonry constructions, specifically focusing on the window-wall interface. The findings revealed that the presence of interior insulation increases the risk of moisture-related damage, such as mould growth, frost-thaw damage, and wood rot. Controlling the internal moisture transport was identified as crucial in mitigating these risks. The choice of suitable materials and barriers, considering properties like absorption coefficient, pore distribution, and vapor resistance, played a vital role in minimizing moisture-related issues.

The transition from 1D to 2D analysis provided valuable insights into the behaviour of the masonry structure and the influence of horizontal mortar layers and interface resistance. The results indicated significant changes in hygrothermal behaviour after the addition of interior insulation, with the relative humidity of the indoor environment playing a more prominent role in mould growth. However, differences in frostthaw damage and wood rot were observed between monitoring in mortar or brick, emphasizing the impact of rain exposure and liquid moisture within the construction.

The findings in the 2D-study highlight that the additional horizontal dimension at the window-wall interface can have both positive and negative impacts. While it increases moisture exposure from rain and external vapor, it also enables faster drying. The lower window connection is more vulnerable to moisture, while the upper window connection benefits from better drying potential. The study also emphasizes the significance of mortar layers in the hygrothermal behaviour of construction nodes.

Overall, this study demonstrated that a detailed 2D analysis of construction nodes is valuable for a comprehensive understanding of hygrothermal behaviour in construction. It emphasizes the importance of geometry, material selection, moisture exposure and moisture control to prevent damage and ensure durable and moisture-resistant designs.

However, it is important to note that this study has limitations regarding its generalizability and material assumptions. Future research should include a larger number of cases and consider different materials to enhance validity. Next, the use of a moisture reference year may affect the results of the damage phenomena. The influence of interface resistance and the evaluation of the entire structure is another interesting research direction. Finally, more research is needed in the area of 2D simulations, including specific construction nodes like window connections.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

The author would like to thank Professor dr. ir. arch. Nathan Van Den Bossche and ir. arch. Bruno Vanderschelden for their guidance in this study.

#### REFERENCES

- J. Straube en C. Schumacher, 'Interior Insulation Retrofits of Load-Bearing Masonry Walls in Cold Climates', Journal of Green Building, vol. 2, nr. 2, pp. 42–50, mei 2007, doi: 10.3992/jgb.2.2.42.
- [2] E. Vereecken en S. Roels, 'A comparison of the hygric performance of interior insulation systems: A hot box-cold box experiment', Energy Build, vol. 80, pp. 37–44, 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.04.033.
- [3] M. Harrestrup en S. Svendsen, 'Internal insulation applied in heritage multi-storey buildings with wooden beams embedded in solid masonry brick façades', Build Environ, vol. 99, pp. 59–72, apr. 2016, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.01.019.
- [4] N. Van Den Bossche, A. Janssens, en J. Moens, 'Design principles for pressure moderated window frames', in Canadian Conference on Building Science and Technology, 12th, Derome D, Red., Montreal, Canada: National Building Envelope Council, 2009, pp. 545–556.
- [5] I. Vandemeulebroucke, S. Caluwaerts, en N. Van Den Bossche, 'Decision framework to select moisture reference years for hygrothermal simulations', Build Environ, vol. 218, jun. 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109080.
- [6] B. Vanderschelden, K. Calle, en N. Van Den Bossche, 'On the potential of clustering approaches for hygrothermal material properties based on three degradation risks in solid masonry constructions', J Build Phys, vol. 46, nr. 1, pp. 882–922, jul. 2022, doi: 10.1177/17442591221085734.
- [7] J. Straube, C. Schumacher, en P. Mensinga, 'Assessing the Freeze-Thaw Resistance of Clay Brick for Interior Insulation Retrofit Projects', in Proceedings of Buildings XI, ASHRAE/DOE Conference, Clearwater Beach, Florida, 2010.
- [8] A. Hukka en H. A. Viitanen, 'A mathematical model of mould growth on wooden material', Springer-Verlag, 1999.
- [9] C. Brischke en A. O. Rapp, 'Dose-response relationships between wood moisture content, wood temperature and fungal decay determined for 23 European field test sites', Wood Sci Technol, vol. 42, nr. 6, pp. 507–518, aug. 2008, doi: 10.1007/s00226-008-0191-8.
- [10] E. Vereecken en S. Roels, 'Wooden beam ends in combination with interior insulation: An experimental study on the impact of convective moisture transport', Build Environ, vol. 148, pp. 524–534, jan. 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.10.060.
- [11] H. Derluyn, H. Janssen, en J. Carmeliet, 'Influence of the nature of interfaces on the capillary transport in layered materials', Constr Build Mater, vol. 25, nr. 9, pp. 3685– 3693, sep. 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.03.063.

# Inhoudstabel

Voorwoord	i
Toelating tot bruikleen	ii
Abstract	iv
Extended abstract	V
Lijst met figuren	xiii
Lijst met tabellen	xxviii
Nomenclatuur	xxix
Benamingen	xxxi
1 Inleiding	1
2 Literatuurstudie	3
2.1 Toepassen van binnenisolatie	3
2.1.1 Soorten isolatiesystemen	4
2.1.2 Schadegevallen	6
2.1.3 Relevante parameters	7
2.1.4 Binnenisolatie in de praktijk	10
2.2 Binnenisolatie bij raamaansluitingen	11
2.2.1 De waterdichtheid van ramen	
2.2.3 Gegeven typeoplossingen raamaansluitingsdetails	11
2.3 HAM-Simulaties	13
2.3.1 1D simulaties	13
2.3.2 2D simulaties	14
2.4 Besluit	14
3 Methodologie	15
3.1 Nodige documentatie	15
3.1.1 De Vlaamse Hoeve Meise	15
3.1.2 Paardenmarkt Antwerpen	16
3.2 Plan van aanpak	16
3.3 HAM-simulaties	
3.3.1 Simulatieprogramma	
3.3.2 Aannames	17

	3.3.3 Postprocessing	. 21
	3.3.4 Beperkingen	. 25
4	1D-Simulaties	. 27
	4.1 Vertaling naar 1D simulaties	. 27
	4.2 Vlaamse Hoeve Meise	. 27
	4.2.1 Bestaande toestand	. 27
	4.2.2 Nieuwe Toestand	. 35
	4.2.3 Vergelijking bestaande en nieuwe toestand	. 44
	4.2.4 Besluit Vlaamse Hoeve 1D	. 45
	4.3 Paardenmarkt Antwerpen	. 46
	4.3.1 Bestaande toestand	. 47
	4.3.2 Nieuwe Toestand	. 52
	4.3.3 Vergelijking bestaande en nieuwe toestand	. 59
	4.3.4 Besluit Paardenmarkt 1D	. 60
5	Overgang 1D-2D	. 61
	5.1 Vertaling naar 1D-2D simulaties	. 61
	5.2 Vlaamse Hoeve Meise	. 61
	5.2.1 Bestaande toestand	. 61
	5.2.2 Nieuwe Toestand	. 67
	5.2.3 Vergelijking bestaande en nieuwe toestand	. 72
	5.3.4 Vergelijking 1D en overgang 1D-2D	. 73
	5.2.5 Besluit Vlaamse Hoeve 1D-2D	. 75
	5.3 Paardenmarkt Antwerpen	. 76
	5.3.1 Bestaande toestand	. 76
	5.3.2 Nieuwe Toestand	. 80
	5.3.3 Vergelijking bestaande en nieuwe toestand	. 85
	5.3.4 Vergelijking 1D en overgang 1D-2D	. 86
	5.3.5 Besluit Paardenmarkt 1D-2D	. 87
6	2D-Simulaties	. 89
	6.1 Vertaling naar 2D simulaties	. 89
	6.2 Vlaamse Hoeve Meise	. 89
	6.2.1 Raamaansluiting verticale snede onderaan	. 90
	6.2.2 Raamaansluiting verticale snede bovenaan	. 95
	6.2.3 Raamaansluitingen overzicht	. 96

	6.2.4 Besluit Vlaamse Hoeve 2D	96
	6.3 Paardenmarkt Antwerpen	97
	6.3.1 Raamaansluiting verticale snede onderaan	98
	6.3.2 Raamaansluiting verticale snede bovenaan	. 101
	6.3.3 Raamaansluitingen overzicht	. 103
	6.3.4 Besluit Paardenmarkt 2D	. 104
7	Discussie	. 105
8	Conclusie	. 106
Bi	bliografie	. 109
BI	JLAGEA	. 114
BI	JLAGEB	. 142

### Lijst met figuren

Figure 1. Deleventic endemode of energia varias (b) technological time anisolatic of recomponed vitig addetail	2
Figure 1: Relevance onderzoek: a) energievernes, b) toepassing binnenisolatie, c) raamaansuutingsoetan	Z
Figuur 2: Isolatiesystemen: a) buitenisolatie, b) dampopen isolatie met dampscherm, c) dampdichte isolatie, d) capillair actieve isolatie	4
Figuur 3: Schadegevallen: a) vorst-dooischade, b) schimmelgroei, c) houtrot	6
Figuur 4: Slagregen en verminderde droging bij binnenisolatie	8
Figuur 5: Materiaalparameters	9
Figuur 6: Praktijkoplossingen binnenisolatie bij raamaansluitingen [20]	. 12
Figuur 7: Opbouwen HAM-simulaties: a) 1D b) van 1D naar 2D c) 2D	. 13
Figuur 8: De Vlaamse Hoeve	. 15
Figuur 9: Campus Paardenmarkt	. 16
Figuur 10: Opbouwen HAM-simulaties: a) Stap 1: 1D, b) Stap 2: van 1D naar 2D, c) Stap 3: 2D	. 17
Figuur 11: MRY buitenklimaat grafieken parameters	. 18
Figuur 12: Algemene beslissingsboom voor clustering met het vastgestelde clusterschema voor 15 stenen, volgens onderzoek	
Vanderschelden et al. [45]	. 19
Figuur 13: Clusterschema van degradatieprofielen: schimmel bovenaan, houtrot in het midden en vorstschade onderaan, volgens onderzo	vek
Vanderschelden et al. [45]	. 19
Figuur 14: Algemene infofiche Vlaamse Hoeve	. 28
Figure 15: Materiaaleigenschannen hestaande toestand. Vlaamse Hoeve, Stan 1	29
Figure 16: Configuration hostiando toostand Vlaamse Hoeve Stan 1	29
Figure 17: Berultater verstander obertande herzande toestand Vlaamse Hoeve Stan 1	31
Figure 19: Resultation orbitational destanda to estand. Vialance Hoeve, Stan 1	21
Figure 10. Resultaten schimmergioer bestaande toestand, vraanse hoeve, stap 1	. JI 22
Figure 19. Resultater Hourtot, Volgens aantai uosissen, bestaande toestand, Viaanse Hoeve, stap 1	. 32
Figure 20: Resultaten noutrot, Volgens vervalscore, bestaande toestaande toestaande hoeve, stap 1	. 32
Figuur 21: Vergelijking voortgehalte en relatieve voortigneid van C1 en C2 (2C, RF1.5, PhttD)	.33
Figuur 22: Vergelijkingen deel 1 (C1) en deel 2 (C3 en C4) Bestaande Toestand, (2C, RF1.5, PintO): a) IJsmassavolume op 5mm van	
buitenmetselwerk, b) relatieve vochtigheid op binnenoppervlak	. 34
Figuur 23: Vergelijking C1, C3 en C3 met interface weerstand (ZC, RF1.5, PintO) tussen de materiaallagen	. 35
Figuur 24: Materiaaleigenschappen nieuwe toestand, Vlaamse Hoeve, Stap 1	. 36
Figuur 25: Configuraties nieuwe toestand, Vlaamse Hoeve, Stap 1	. 37
Figuur 26: Resultaten vorst-dooischade nieuwe toestand met binnenisolatie, Vlaamse Hoeve, Stap 1	. 38
Figuur 27: Resultaten schimmelgroei, gemeten op cementering, nieuwe toestand met binnenisolatie, Vlaamse Hoeve, Stap 1	. 39
Figuur 28: Resultaten schimmelgroei, gemeten tussen glaswol en rotswol, nieuwe toestand met binnenisolatie, Vlaamse Hoeve, Stap 1	
Figuur 29: Resultaten houtrot, aantal doses, nieuwe toestand met binnenisolatie, Vlaamse Hoeve, Stap 1	
Figuur 30: Resultaten houtrot, vervalscore, nieuwe toestand met binnenisolatie, Vlaamse Hoeve, Stap 1	. 39
Figuur 31: Nieuwe toestand, vergelijking vochtopslag (C1, ZC, RF0.5): a) Werkelijkheid met MRY, b) folie tussen rotswol en luchtdichte	
houtvezelplaat (sd=1500m), c) folie tussen metselwerk en cementering (sd=1500m), d) folie tussen rotswol en luchtdichte houtvezelplaat	en
folie tussen metselwerk en cementering (sd=1500m)	. 40
Figuur 32: Relatieve vochtigheid gemeten tussen de cementering en de glaswol	.41
Figuur 33: Vergelijking vochtgehalte en relatieve vochtigheid van C1 en C2 (ZC, RF0.7)	. 42
Figuur 34: Vergelijkingen deel 1 (C1) en deel 2 (C3 en C4) nieuwe toestand, (ZC, RF1.5): a) IJsmassavolume op 5mm buiten-metselwerk, b)	
relatieve vochtigheid tussen cementering en binnenisolatie. c) Vochtgehalte op 100mm van binnenmetselwerk	. 42
Figuur 35: Vergelijking C1, C3 en C3 met interface weerstand (ZC, RF0.7, PInto) tussen de materiaallagen	. 43
Figure 36: Bestaande toestand (7C, RF0.7, PIntO): a) Vochtopslag [kg/m³], b) Relatieve vochtigheid [%], c) Temperatuur [°C]	. 44
Figure 37: Nieuwe toestand (7C, RE0,7); a) Vochtonslag, b) Relative vochtiaheid, c) Temperatuur	44
Figure 38: Algemene infoliche Paardenmarkt	46
Figure 30: Materiaaleigenschannen hestande toestand. Paardenmarkt. Stan 1	. 10
Figure 30: Monthantigeneonappet doctamente doctamente doctamente a la companya de la companya de la companya de	. 47
Figure 40. Computaties bestander toestand, Faardenmarkt, Stap 1	.40
Figure 41. Resultaten voist-dooischade bestaalde toestallit, Paaldeminakt, Stap 1.	.49
Figure 42: Resultaten schimmegroei bestaanoe toestano, Paaroenmarkt, stap 1	. 50
riguur 45. Nesultaten houtrot, voigens aantal oosissen, bestaande toestand, Paardenmarkt, Stap 1	. 50
Figuur 44: Resultaten noutrot, voigens vervaiscore, bestaande toestand, Paardenmarkt, Stap 1	.51
Figuur 45: vergelijking vochtopslag en relatieve vochtigheid van C1 en C2 (ZC, RFO. /, PIntO)	.51
Figuur 46: vergelijking relatieve vochtigheid binnenoppervlak, deel 1 (C1) en deel 2 (C3 en C4) B1, (ZC, RF1.5, PExtO, PintO)	.51
Figuur 47: Vergelijking C1, C3 en C3 met interface weerstand (ZC, RF1.5, PExtO, PIntO) tussen de materiaallagen	. 52
Figuur 48: Materiaaleigenschappen nieuwe toestand, Paardenmarkt, Stap 1	. 53
Figuur 49: Configuraties nieuwe toestand, Paardenmarkt, Stap 1	. 54
Figuur 50: Resultaten vorstdooi-schade nieuwe toestand met binnenisolatie, Paardenmarkt, Stap 1	. 55

Figuur 51: Resultaten schimmelgroei nieuwe toestand met binnenisolatie, Paardenmarkt, Stap 1	
Figuur 52: Resultaten houtrot, volgens het aantal dosissen, nieuwe toestand met binnenisolatie, Paardenmarkt, Stap 1	. 56
Figuur 53: Resultaten houtrot, volgens vervalscore, nieuwe toestand met binnenisolatie, Paardenmarkt, Stap 1	. 57
Figuur 54: Vergelijking vochtopslag en relatieve vochtigheid van C1 en C2 (ZC, RF0.7)	. 57
Figuur 55: Vergelijking deel 1 (C1) en deel 2 (C3 en C4) Nieuwe Toestand, (ZC, RF1.5, PExtO, PIntO): a) relatieve vochtigheid tussen de	
lijmmortel en multipor, b) IJsmassavolume 5mm in het buitenmetselwerk	. 58
Figuur 56: Vergelijking C1, C3 en C3 met interface weerstand (ZC, RF1.5, PExtO, PIntO) tussen de materiaallagen	. 58
Figuur 57: Vergelijking van het risico op schimmelgroei, tussen de lijmmortel en multipor, C3 en C3 IR, Nieuwe Toestand, (ZC, RF1.5, PExtC	),
Pinto)	. 58
Figuur 58: Bestaande toestand: a) Vochtopslag, b) Relatieve vochtigheid, c) Temperatuur (ZC, RF0.7, PExtD, PIntO)	. 59
Figuur 59: Nieuwe toestand: a) Vochtopslag, b) Relatieve vochtigheid, c) Temperatuur (ZC, RF1.5, PExtD, PIntO)	. 59
Figuur 60: Configuraties bestaande toestand, Vlaamse Hoeve, Stap 2	.61
Figur 61: Resultaten vorstdooi-schade bestaande toestand, Vlaamse Hoeve, Stap 2	. 62
Figure 62: Resultaten schimmelgroei bestaande toestand. Vlaamse Hoeve, Stan 2	. 62
Figure 63: Resultaten houtrot, volgens het aantal dosissen, bestaande toestand. Vlaamse Hoeve, Stap 2	. 63
Figure 64: Resultaten houtrot, volgens de vervalscore bestaande toestaand Vlaamse Hoeve Stan 2	63
Figure 65: Vergeliking resultaten vorst-dooischabel schimmelgroei en houtrot gemeten in de baksteen versus in de kalkmontel	64
Figure 6. Configurate Smatter and uiding meatures in material work housing smatter in backwork order and	64
Figure 67. Configurate 5 International meta-departer in meta-departe borenaan, norder en meta-deverk onder aan	. 04
rigual of configurate 5 (2), kr.1.5, Fin(c), a) issues avoiding of shift variable teners, b) kelateve volnigher binnenoppelviak rand 15 maart b) (valtaselag 100m via binnamatabuork	C A
Total 15 maan, c) vooritopsiag toomin van binnermetsewerk	. 04
Figure 60. Vergelijking volitopslag en relatieve volitignieu van 65 en 64 /26. Pri 16.	. 05
Figure 59: Vergelijking configuraties deel 1 (C1) en deel 2 (C5 en C4), (CC, KF1.5, PintO) Bestaande toestand: a) relatieve vochtigneid	65
Dinnenoppervlak, b) vocnigenalte Luumm van net binnenmetselwerk	. 65
Figuur /0: Vergelijking Moisture content van C1, C2 en C5 (ZC, RHO.7, PintO, kritische dag 15 maart)	. 66
Figuur 71: Vergelijking C1, C5 en C5 met interface weerstand (ZC, RF1.5, PintO, kritische dag 15 maart) tussen de materiaallagen	. 66
Figuur 72: Configuraties nieuwe toestand met binnenisolatie, Vlaamse Hoeve, Stap 2	. 67
Figuur 73: Resultaten vorst-dooischade nieuwe toestand met binnenisolatie, Vlaamse Hoeve, Stap 2	. 68
Figuur 74: Resultaten schimmelgroei nieuwe toestand met binnenisolatie, Vlaamse Hoeve, Stap 2	. 68
Figuur 75: Resultaten schimmelgroei gemeten tussen de glaswol en rotswol nieuwe toestand, Vlaamse Hoeve, Stap 2	. 69
Figuur 76: Resultaten houtrot, volgens het aantal dosissen, nieuwe toestand met binnenisolatie, Vlaamse Hoeve, Stap 2	. 69
Figuur 77: Resultaten houtrot, volgens de vervalscore, nieuwe toestand met binnenisolatie, Vlaamse Hoeve, Stap 2	. 69
Figuur 78: Vergelijking resultaten vorst-dooischade, schimmelgroei en houtrot gemeten in de baksteen versus in de kalkmortel	. 70
Figuur 79: Configuratie 5 met aanduiding meetpunten in metselwerk bovenaan, mortel en metselwerk onderaan	. 70
Figuur 80: Configuratie 5 Nieuwe toestand (ZC, RF0.7): a) IJsmassavolume op 5mm van buitenmetselwerk, b) Relatieve vochtigheid tussen	
cementering en glaswol, c) Vochtopslag 100mm van binnenmetselwerk	. 70
Figuur 81: Vergelijking constructies NT, vochtopslag en relatieve vochtigheid van C5 en C6 (ZC, RF0.7, Kritische dag 15 maart)	.71
Figuur 82: Vergelijkingen deel 1 (C1) en deel 2 (C3 en C4) Nieuwe Toestand, (ZC, RF0.7: a) relatieve vochtigheid tussen multipor en	
lijmmortel, b) Vochtopslag 100mm van binnenmetselwerk	. 71
Figuur 83: Vergelijking Moisture content van C1, C2 en C5 (ZC, RF0.7, kritische dag 15 maart)	. 72
Figuur 84: Vergelijking C1, C5 en C5 met interface weerstand (ZC, RF0.7, kritische dag 15 maart) tussen de materiaallagen	. 72
Figuur 85: Bestaande toestand: a) Vochtopslag, b) Relatieve vochtigheid, c) Temperatuur (ZC, RF0.7, PIntO, 15maart)	. 73
Figuur 86: Nieuwe toestand: a) Vochtopslag, b) Relatieve vochtigheid, c) Temperatuur (ZC, RF0.7, 15maart)	.73
Figuur 87: Bestaande toestand, vergelijking vochtopslag 1D en 1D-2D (ZC, RF1.5, PIntO, 31 december): a) 1D C1 BT, b) 1D C3 BT, c) 1D-2D	C1
BT, d) 1D-2D C5 BT	. 73
Figure 88: Nieuwe toestand, vergelijking vochtopslag 1D en 1D-2D (ZC, RF0.7, PIntO, 31 december): a) 1D C1 NT, b) 1D C3 NT, c) 1D-2D C1	
NT. d) 1D-2D C5 NT	.74
r, y	
huitenmetselwerk h) relatieve vochtieheid hinnennelster () Vochtonslag 100mm van hinnenmetselwerk	75
Figure 90: Nieuwe toestand vergelijkingen stan (1(D) en stan 2((D-2D) (7C RE1 5): a) Usmassavolume on 5mm huitenmetselwerk h)	
right of the server to each the server is a server of the server of the server is the	75
Figure 1: Configuration bettering on grawdo, c) vocincipal Johnni van binnermetselwerk	.75
Figure 91. Computaties Destander Costand, Faardenmarkt Stap 2	.70
Figure 92. Resultatell voiserdoolsenade bestaalde toestaald, Faaldeminarkt, Stap 2	
Figure 95: Resultaten schimmegroei bestaande toestand, Paardenmarkt, stap 2	. / /
riguur 94. Nesultaten houtrot volgens net aantal oosissen, bestaande toestand, Paardenmarkt, Stap 2	. 78
Figuur 95: Kesuitaten noutrot volgens de vervaindex, bestaande toestand, Paardenmarkt, Stap 2	. 78
Figuur 96: vergelijking resultaten vorst-doolschade, schimmelgroei en houtrot gemeten in de baksteen versus in de kalkmortel	. 79
Figuur 97: vergelijking vochtopslag en relatieve vochtigheid van C5 en C6 (ZC, RFU.7, PExtD, PIntO   PExtZ, PIntO, Kritische dag 15 maart)	. 79
Figuur 98: Vergelijking relatieve vochtigheid binnenoppervlak, deel 1 (C1, C2) en deel 2 (C5) BT, (ZC, RF1.5, PExtO, PIntO)	. 80
Figuur 99: Configuraties nieuwe toestand, Paardenmarkt Stap 2	. 80
Figuur 100: Resultaten vorst-dooischade nieuwe toestand met binnenisolatie, Paardenmarkt, Stap 2	
Figuur 101: Resultaten schimmelgroei nieuwe toestand met binnenisolatie, Paardenmarkt, Stap 2	.81
Figuur 102: Resultaten houtrot volgens het aantal dosissen, nieuwe toestand met binnenisolatie, Paardenmarkt, Stap 2	. 82

Figuur 103: Resultaten houtrot volgens de vervalindex, nieuwe toestand met binnenisolatie, Paardenmarkt, Stap 2	83
Figuur 104: Vergelijking resultaten vorst-dooischade, schimmelgroei en houtrot gemeten in de baksteen versus in de kalkmortel	83
Figuur 105: Configuratie 5 en 6 (ZC, RF1.5, PExtD, PIntO, Kritische dag 15 maart): vochtopslag en RH	84
Figuur 106: Vergelijkingen deel 1 (C1, C2) en deel 2 (C5) Nieuwe Toestand, (ZC, RF1.5, PExtO, PIntO): a) IJsmassavolume op 5mm	
buitenmetselwerk, b) relatieve vochtigheid tussen multipor en lijmmortel, c) Vochtopslag 100mm van binnenmetselwerk	84
Figuur 107: Bestaande toestand: a) Vochtopslag, b) Relatieve vochtigheid, c) Temperatuur (ZC, RF0.7, PExtD, PIntO, 15maart)	85
Figuur 108: Nieuwe toestand: a) Vochtopslag, b) Relatieve vochtigheid, c) Temperatuur (ZC, RF0.7, PExtD, PIntO, 15maart)	85
Figuur 109: Bestaande toestand, vergelijking vochtopslag 1D en 1D-2D (ZC, RF1.5, PExtO, PIntO, 31 december): a) 1D C1 BT, b) 1D C3 BT,	, c)
1D-2D C1 BT, d) 1D-2D C5 BT	86
Figuur 110: Nieuwe toestand, vergelijking vochtopslag 1D en 1D-2D (ZC, RF1.5, PExtO, PIntO, 31 december): a) 1D C1 NT, b) 1D C3 NT, c)	1D-
2D C1 NT, d) 1D-2D C5 NT	86
Figuur 111: Bestaande toestand vergelijkingen stap 1 (1D) en stap 2 (1D-2D), (ZC, RF1.5, PExtO, PIntO): a) IJsmassavolume op 5mm	
buitenmetselwerk, b) relatieve vochtigheid binnenpleister, c) Vochtopslag 100mm van binnenmetselwerk	87
Figuur 112: Nieuwe toestand vergelijkingen stap 1 (1D) en stap 2 (1D-2D), (ZC, RF1.5, PExtO, PIntO): a) IJsmassavolume op 5mm	
buitenmetselwerk, b) relatieve vochtigheid binnenpleister, c) Vochtopslag 100mm van binnenmetselwerk	87
Figuur 113: Materiaaleigenschappen nieuwe toestand, Vlaamse Hoeve, Stap 3	90
Figuur 114: Raamaansluiting verticale snede onderaan met aangegeven meetpunten, Vlaamse Hoeve, Stap 3	91
Figuur 115: Resultaten schadefenomenen verticale snede onderaan, Vlaamse Hoeve, Stap 3	91
Figuur 116: Resultaten schadefenomenen 1D-2D, C5, ZG, RF0.7, Vlaamse Hoeve, Stap 2	91
Figuur 117: Moisture content fieldplot (ZG, RF0.7, 15-03): a) Stap 3, Raamaansluiting verticale snede onderaan, b) Stap 2, constructie bla	auwe
hardsteen en volsteens metselwerk, c) Stap 2, constructie volsteens metselwerk	92
Figuur 118: Relatieve vochtigheid fieldplot (ZG, RF0.7, 11-08): a) Stap 3, Raamaansluiting verticale snede onderaan, b) Stap 2, constructie	9
blauwe hardsteen en volsteens metselwerk, c) Stap 2, constructie volsteens metselwerk	93
Figuur 119: Temperatuur fieldplot (ZG, RF0.7, 09-12): a) Stap 3, Raamaansluiting verticale snede onderaan, b) Stap 2, constructie blauwe	2
hardsteen en volsteens metselwerk, c) Stap 2, constructie volsteens metselwerk	93
Figuur 120: Vergelijking Raamaansluiting verticale snede onderaan met interface weerstand (ZG, RF0.7, 15-03)	94
Figuur 121: Vergelijking homogenisatie Raamaansluiting verticale snede onderaan (ZG, RF0.7, 15-03)	94
Figuur 122: Raamaansluiting verticale snede bovenaan, Vlaamse Hoeve, Stap 3	95
Figuur 123: Raamaansluiting verticale snede bovenaan, Vlaamse Hoeve, Stap 3	95
Figuur 124: Raamaansluiting verticale snede bovenaan (ZG, RF0.7): a) Moisture content 15-03, b) Relatieve vochtigheid, 11-08	95
Figuur 125: Materiaaleigenschappen nieuwe toestand, Paardenmarkt, Stap 3	98
Figuur 126: Raamaansluiting verticale snede onderaan, Paardenmarkt, Stap 3	99
Figuur 127: Raamaansluiting verticale snede onderaan, Paardenmarkt, Stap 3	99
Figuur 128: Resultaten schadefenomenen 1D-2D, C5, ZG, RF0.7, Paardenmarkt, Stap 2	99
Figuur 129: Moisture content fieldplot (ZC, RF0.7): a) Stap 3, Raamaansluiting verticale snede onderaan, b) Stap 2, constructie volsteens	
metselwerk en lager absorberende buitenpleister	100
Figuur 130: Relatieve vochtigheid fieldplot (ZC, RF0.7): a) Stap 3, Raamaansluiting verticale snede onderaan, b) Stap 2, constructie volstee	ens
metselwerk en lager absorberende buitenpleister	100
Figuur 131: Temperatuur fieldplot (ZC, RF0.7): a) Stap 3, Raamaansluiting verticale snede onderaan b) Stap 2, constructie volsteens	
metselwerk en lager absorberende buitenpleister	101
Figuur 132: Raamaansluiting verticale snede onderaan, Paardenmarkt, Stap 3	101
Figuur 133: Resultaten schadefenomenen verticale snede bovenaan, Paardenmarkt, Stap 3	102
Figuur 134: Raamaansluiting verticale snede bovenaan (ZC, RF0.7): a) Moisture content 15-03, b) Relatieve vochtigheid, 11-08	102
Figuur 135: gegeven detailtekeningen raamaansluiting verticale snede bovenaan: a) waterkering aan de buitenzijde zoals in de simulatie,	, b)
stalen profiel aan de buitenzijde als verlenging van het raamprofiel	103
Figuur 136: Overzicht schimmelgroei gemeten tussen de lijmmortel en de multipor, raamaansluitingen Paardenmarkt Boven- en	
Onderaansluting	103
Figuur 137: Overzicht schimmelgroei gemeten boven multipor, aan het raamkader, raamaansluitingen Paardenmarkt Boven- en	
Onderaansluting	104
Figuur 138: Aanduiding meetpunt risico op schimmelgroei gemeten boven multipor, aan het raamkader	104

### Lijst met tabellen

Tabel 1: Classificatie van schimmelindexen volgens Viitanen et al. [34]	23
Tabel 2: Schimmelgevoeligheidsklassen volgens Ojanen et al. [63],[64]	23
Tabel 3: Parameters voor verschillende schimmelgevoeligheidsklassen volgens Ojanen et al. [63],[64]	23
Tabel 4: Verval score volgens NBN-EN 252 "Field test method for determining the relative protective effectiveness of a v	vood
preservative in ground contact" uit CEN 2014	25
Tabel 5: Beperkingen van de simulatiestappen	26
Tabel 6: Parameters Vlaamse Hoeve	30
Tabel 7: Classificatie van initiële opzuiging (IW) volgens NBN-EN 771-1 "Specification for masonry units" uit CEN 2015	37
Tabel 8: Classificatie van waterabsorptie (W) volgens NBN-EN 998-1 "Specification for mortar for masonry" uit CEN 2016	537
Tabel 9: Classificatie van waterabsorptie (WS) volgens DIN-18947 "German classification of moisture adsorption capacity	/ of
earth plasters"	37
Tabel 10: Classificatie van dampdichtheid volgens DIN 4108-3 "Protection against moisture subject to climate conditions	40
Tabel 11: Parameters Paardenmarkt	48

### Nomenclatuur

Aw	Absorptiecoëfficiënt	kg/(m² s <sup>0.5</sup> )
С	Soortelijke warmtecapaciteit	J/(kg K)
d	dikte	m
D	Dagelijkse dosis	-
DR	Vervalscore	-
m	massa	kg
Μ	schimmelindex	-
MC	vochtgehalte	% of kg/m³
n	Dagen blootstelling	d
R	warmteweerstand	m²K/W
Sd-waarde	Diffusieweerstand	m
t	tijd	S
Т	temperatuur	°C
U	Warmtedoorgangscoëfficiënt	W/(m² K)
V	windsnelheid	m/s

#### Griekse symbolen

α	Warmteovergangscoëfficiënt	W/(m²K)
δ	Permeabiliteit	kg/(Pa m s)
θ	Porositeit	m³/m³
λ	Warmtegeleidingscoëfficiënt	W/(m K)
μ	Diffusieweerstandsgetal	-
ρ	Densiteit	kg/m³
$\phi$	Relatieve vochtigheid	%

#### Afkortingen

VIP	Vacuümisolatiepanelen	
FTC	Vorst-dooicycli	(Frost Thaw Cycles)
Μ	Schimmel	(Mold)
WD	Houtrot	(Wood decay)
WDR	Slagregen	(Wind driven rain)
IHU	Hitte-eilandeffect	(Urban heat islandeffect)
IR	Interfaceweerstand	(interfaceweerstand)
MC	vochtgehalte	(moisture content)
HAM	Warmte, lucht, vocht	(Heat, Air, Moisture)
TRY	Testreferentiejaar	(year)
MRY	vochtreferentiejaar	(moisture reference year)
DR	Vervalscore	(decay rating)
Mlvtt	Schimmelcriteria	
RH	Relatieve vochtigheid	(Relative humidity)

RF	Regenbelasting	(rainfactor)
IBK	Institut BauKlimatic, Technical University	
	of Dresden	
SQ	Kwaliteit van het oppervlak	(Surface quality)
W	Soort hout	(Wood type)
WD	Houtrot	(wood decay)
VH	Vlaamse Hoeve	
PM	Paardenmarkt	
BT	Bestaande Toestand	
NT	Nieuwe Toestand	
PExtO	Buitenpleister dampopen	
PExtD	Buitenpleister dampdicht	
PIntO	Binnenpleister dampopen	
PIntD	Binnenpleister dampdicht	
C1	Configuratie 1	
C2	Configuratie 2	
C3	Configuratie 3	
C4	Configuratie 4	
C5	Configuratie 5	
C6	Configuratie 6	

### Benamingen



## Inleiding

Momenteel is het verminderen van het energieverbruik in België belangrijker dan ooit. Naast de stijgende energieprijzen, als gevolg van de energiecrisis, gaat een hoog energieverbruik ook gepaard met klimaat- en milieuveranderingen, en een hogere CO<sub>2</sub>-uitstoot [1]. Om deze negatieve effecten tegen te gaan, worden verschillende initiatieven genomen, waaronder de Green Deals en klimaatconferenties. Aangezien een kwart van de gebouwen in België nauwelijks isolatie bevat, is er een groot potentieel om het energieverbruik te verminderen door de thermische prestaties van gebouwen te verhogen [2]. Dit kan worden bereikt door buitenisolatie, spouwisolatie of binnenisolatie toe te passen.

Het plaatsen van binnenisolatie kan risicovol zijn, omdat het de temperatuurgradiënt en vochtbalans van de bestaande muurstructuur verandert. De buitenmuur wordt kouder omdat de binnenisolatie verhindert dat de warmtestroom naar buiten ontsnapt. Bovendien zorgt de verhoogde diffusieweerstand van de isolatie ervoor dat de inwaartse vochtdiffusie vermindert, die bijdraagt aan het drogen van het metselwerk [3]. Hierdoor kan er een overmatige vochtigheid in het metselwerk ontstaan die kan leiden tot schade en degradatie van het materiaal, wat op zijn beurt kan leiden tot structurele problemen, zoals scheuren. Daarnaast kan het vocht de thermische prestaties van de wand beïnvloeden, waardoor de isolatiewaarde van de muur afneemt [4]. Aangezien binnenisolatie de droging in het metselwerk verhindert, verhoogt het risico op vochtgerelateerde schade zoals schimmelgroei, vorstschade en houtrot [5]. Ondanks deze nadelen is binnenisolatie soms de enige optie om erfgoed te behouden en binnen de strikte bouwlijn te blijven in stedelijke context [2].

Indien buitenisolatie geen optie is, kan binnenisolatie worden geplaatst om het energieverbruik en de bijhorende kosten te minimaliseren (Figuur 1a, 1b). Zo een renovatie wordt vaak uitgevoerd door particulieren, die echter niet altijd rekening houden met de koudebruggen die ontstaan bij bouwknopen na het aanbrengen van binnenisolatie. Dit komt vooral voor op plaatsen met een complexere geometrie, zoals raamaansluitingen, waarbij er onvoldoende ruimte is om een dikke isolatielaag aan te brengen (Figuur 1c).



Figuur 1: Relevantie onderzoek: a) energieverlies, b) toepassing binnenisolatie, c) raamaansluitingsdetail

Bovendien zal regenwater ook vooral doordringen, en zo mogelijks schade veroorzaken, bij (raam)aansluitingen of scheuren [6]. Raamaansluitingen zijn de overgang van het bouwdeel naar het glasraam, waarbij alle verschillende materialen en functies door elkaar worden geforceerd. In dat opzicht zijn raamaansluitingen meestal de zwakke plek van het gebouw [7]. Om schadeproblemen in de toekomst te vermijden is er onderzoek nodig naar de impact van binnenisolatie bij raamaansluitingen. Het doel van deze thesis is dan ook om een beoordeling en analyse uit te voeren over het hygrothermisch gedrag van binnenisolatie, specifiek bij raamaansluitingen.

Het volgende en tweede hoofdstuk van deze thesis behandelt de literatuurstudie en creëert een context voor het onderzoek. Dit literatuuronderzoek bestaat uit drie delen. Het eerste deel gaat dieper in op de mogelijke risico's bij het toepassen van binnenisolatie bij metselwerk, waarbij relevante parameters en schadegevallen worden besproken. In het tweede deel wordt de focus gelegd op reeds bestaande theorie- en praktijkoplossingen van raamaansluitingen waarbij binnenisolatie is toegepast. Het laatste deel gaat in op HAM-simulaties, waarbij het verschil tussen 1D- en 2D-simulaties besproken wordt.

In het derde hoofdstuk, methodologie, wordt de nodige documentatie voor de start van het onderzoek besproken en het plan van aanpak uiteengezet. Dit hoofdstuk behandelt ook de nodige aannames die worden gemaakt, waaronder de toegepaste randvoorwaarden en de toelichting bij de geselecteerde materialen en overeenkomstige eigenschappen. Daarnaast wordt de uitgekozen methode van postprocessing voor de drie schadefenomenen: vorst-dooischade, schimmelgroei en houtrot, uiteengezet, samen met enkele beperkingen die het gehele onderzoek met zich meebrengt.

In het vierde hoofdstuk gaat het onderzoek van start door 1D simulaties op de gekozen cases toe te passen, waarbij de resultaten uitvoerig worden geanalyseerd, op vlak van het veranderende hygrothermisch gedrag van de constructie bij de nieuwe toestand, ten opzichte van de bestaande toestand, zonder binnenisolatie.

Het vijfde hoofdstuk vormt de overstap tussen 1D naar 2D simulaties. Aangezien deze simulaties de wandopbouw en dus nog geen complexe bouwknoop, op 2D niveau analyseren, worden deze 1D-2D simulaties genoemd in plaats van de volledige 2D simulaties. Deze 1D-2D simulaties worden geanalyseerd, beoordeeld en met de resultaten en conclusies van de 1D simulaties vergeleken.

Na het verzamelen van voorgaande informatie, resultaten en beoordeling, worden in het zesde hoofdstuk uiteindelijk de volledige gegeven bouwknopen van de cases geanalyseerd en geëvalueerd. Hierbij worden de conclusies uit de vorige twee hoofdstukken aangewend om aan een correcte beoordeling te komen van het hygrothermisch gedrag van de raamaansluitingen met binnenisolatie.

In de laatste twee hoofdstukken wordt ten slotte een kritische reflectie gemaakt en globale conclusie getrokken die deze studie samenvat, en tegelijk ook terugkoppelt naar de bredere context van het onderzoek.

# Literatuurstudie

#### 2.1 Toepassen van binnenisolatie

De mogelijkheid om het thermisch rendement van gebouwen te verbeteren, en tegelijkertijd het comfort te verhogen van de gebruikers, zorgt voor een enorme waardestijging van oude gebouwen [8]. Uit een onderzoek van Morelli et al. [9] werd aangetoond dat "...door implementatie van een reeks passieve renovatiemaatregelen, zoals het aanbrengen van binnenisolatie en de installatie van nieuwe ramen, het theoretische energieverbruik met 68% kan worden verminderd in vergelijking met het theoretisch energieverbruik voorafgaand aan de renovatie." Op basis hiervan kan worden afgeleid dat binnenisolatie een belangrijke rol kan spelen bij energiebesparing.

Momenteel wordt bij de keuze van een isolatiemateriaal vooral de focus gelegd op het behalen van een zo laag mogelijke lambda-waarde. Isolatiematerialen met een lage lambda-waarde hebben een lage warmtegeleidingscoëfficiënt, wat betekent dat ze de thermische prestaties van een gebouw verbeteren en zo kunnen leiden tot een vermindering in energiebehoefte. Daarnaast klinkt het vaak "Hoe meer isolatie hoe beter", dikkere isolatiepakketten bereiken een lagere U-waarde, waardoor ook de energiebehoefte daalt. Daarentegen vergeet men wel eens dat warmteoverdracht intrinsiek gekoppeld is aan vochttransport.

Warmteoverdracht vindt plaats via geleiding, convectie of straling, wanneer moleculen van een warmer object in contact komen met moleculen van een kouder object. Vochttransport treedt op door beweging van watermoleculen van een gebied met hoge concentratie naar een gebied met lage concentratie via dampdiffusie, convectie of capillaire werking [10]. De bewegingen van moleculen die warmte overdragen en vocht transporteren kunnen elkaar beïnvloeden doordat het vocht in de lucht warmte kan opnemen en afgeven [10]. Hierdoor kan vochttransport de thermische prestaties van bouwconstructies beïnvloeden en vice versa [11].

In het geval van binnenisolatie is het vochttransport in de constructie van groot belang, omdat er koudere buitengevels ontstaan en het droogpotentieel van de muur wordt verhinderd [5]. Door het verhoogde vochtgehalte van het metselwerk zal het risico op vochtgerelateerde pathologieën toenemen [12]. Daarnaast zorgen binnenisolatiesystemen ervoor dat koudebruggen niet volledig kunnen worden geëlimineerd en dat er een vermindering is van de binnenruimte [13].

#### 2.1.1 Soorten isolatiesystemen

Terwijl buitenisolatiesystemen de buitenmuur beschermen tegen slagregen, ontbreekt dit effect bij binnenisolatie [13]. Naast de afwezigheid van de bescherming van de gevel, zal binnenisolatie het uitdrogende effect van de muur belemmeren. Hierdoor is het belangrijk om een goed evenwicht te vinden tussen het verminderen van het warmteverlies en het vermijden van schade [14].

De plaatsing van binnenisolatie kan verschillen per constructie-element van een gebouw. Zo worden specifieke isolatiesystemen gebruikt voor wanden, en andere bij daken of vloeren. Dit onderdeel wordt beperkt tot deze toepassingsgebieden, voor wanden en detaillering.

#### Isolatiesystemen voor wanden

Momenteel zijn er zoveel verschillende isolatiesystemen, isolatiematerialen en fabrikanten dat men door het uitgebreide aanbod het overzicht dreigt te verliezen [15]. Isolatiesystemen kunnen algemeen worden onderverdeeld in twee groepen: de dampdichte isolatiesystemen en de capillair actieve isolatiesystemen. De dampdichte isolatiesystemen kunnen worden toegepast met dampopen en dampdichte isolatiematerialen. Een dampopen isolatiemateriaal wordt voorzien van een dampscherm tussen het isolatiemateriaal (bv. minerale wol) en de binnenafwerking, om de vochtstroom door de muur van binnenuit te verminderen, zie Figuur 2b [16]. Een dampdicht isolatiemateriaal (bv. XPS, PIR, PUR) heeft een gesloten cellenstructuur, waardoor een hogere diffusieweerstand en hogere dampdichtheid wordt bereikt, zie Figuur 2c. Aangezien binnenisolatie ingaat tegen het algemene principe (Figuur 2a) van isolatie plaatsen aan de koude zijde, en de minst isolerende, meest dampdichte laag plaatsen aan de warme zijde, ontstaat een verhoogd risico op inwendige condensatie tussen het isolatiesysteem en het metselwerk [15]. Dit is weergegeven op Figuur 2b en 2c met een rood bolletje. Het tegengaan van inwendige condensatie via plaatsing van een dampscherm bij dampopen systemen is positief, maar gaat ook rechtstreeks gepaard met het belemmeren van droging van het metselwerk [8]. De droging is weergegeven op Figuur 2 met blauwe pijltjes.



Figuur 2: Isolatiesystemen: a) buitenisolatie, b) dampopen isolatie met dampscherm, c) dampdichte isolatie, d) capillair actieve isolatie

De introductie van binnenisolatiestrategieën heeft de focus verlegd van dampdichte systemen naar dampopen capillaire actieve systemen [3]. In tegenstelling tot dampdichte isolatiesystemen is een capillair actief (vochtbufferend) isolatiesysteem, dampopen en heeft het geen dampscherm nodig, zie Figuur 2d. Wanneer er in een capillair actief systeem inwendige condensatie optreedt, zal deze het vocht bufferen in het isolatiemateriaal of lijmmortel, waarna het wordt herverdeeld in het isolatiemateriaal dankzij de capillair actieve poriën. Via droging wordt het vocht in dampvorm terug afgegeven aan de binnenruimte [15]. Deze systemen bieden het voordeel dat ze de droging van vochtige muren niet verhinderen, waardoor het lijkt dat capillair actieve isolatiesystemen mogelijk een aantal risico's, zoals schimmel, kunnen beperken. Toch zijn er enkele kanttekeningen die gemaakt moeten worden [17]. Het werkingsmechanisme van deze bufferende systemen levert namelijk een hoger vochtgehalte in het isolatiemateriaal op, waardoor de isolerende waarde meestal minder gunstig is dan die van de dampdichte isolatiesystemen [18].

Op dit moment zijn er van dit type systeem verschillende varianten op de markt terug te vinden, met vaak zeer uiteenlopende hygrische eigenschappen, zoals bv. calciumsilicaat, cellenbeton en houtvezelplaten. Sommige van deze systemen hebben een vrij lage capillaire absorptiecoëfficiënt waardoor deze nauwelijks capillaire actieve systemen zijn te noemen [17]. In het onderzoek door Vereecken en Roels [2], werd in een capillair actief systeem een grotere ophoping van vocht waargenomen dan in een dampdicht systeem, vooral geconcentreerd in de lijmmortel, die de neiging vertoonde om vocht op te slaan. Hierdoor wordt geconcludeerd dat vanuit het oogpunt van inwendige condensatie, een dampdicht systeem toch de voorkeur verdiende boven een capillair actief binnenisolatiesysteem.

Als al deze argumenten naast elkaar worden gelegd kan er besloten worden dat de goede werking van een capillair actief systeem enorm zal afhangen van de materiaaleigenschappen van het gebruikte capillair actiefmateriaal, de gekozen lijmmortel en de omgevingsfactoren.

#### Detaillering bij binnenisolatie

De volledige aansluiting van binnenisolatie rond bouwknopen is essentieel om de oppervlaktetemperatuur op de plaats van de aansluiting te verhogen en de warmteverliezen te reduceren [19]. In de praktijk is er echter bij aansluitingsdetails vaak niet genoeg plaats om een dik pakket isolatie te voorzien. Hierdoor moet er soms beroep gedaan worden op nieuwere superisolerende materialen [20]. Een paar van deze materialen, die relevant zijn voor het onderzoek, zullen worden besproken.

Aerogels zijn gedroogde gels met een lage massadichtheid en hoge porositeit, waardoor ze veel lucht bevatten in de kleine openingen tussen de structuur. Hierdoor hebben ze een lagere thermische geleidbaarheid dan lucht (~0,01-0,02 W/m.K). Daarentegen hebben ze wel een lage mechanische sterkte, waardoor ze moeten worden verstevigd met bijvoorbeeld een vezelmatrix. Er bestaan thermisch isolerende pleisters en dekens op basis van aerogel. Thermische isolerende pleisters, zoals kalkpleisters en aerogelpleisters, hebben het voordeel dat oneffenheden, openingen en aansluitingen, makkelijk op te vullen zijn [21]. Zo kan eenvoudiger een thermisch doorlopende isolatielaag gecreëerd worden. Isolatiepleisters kunnen aan de binnen-of buitenzijde, evenals aan beide zijden, worden aangebracht. Bij langdurige blootstelling aan regen zorgt hun beperkte damppermeabiliteit ervoor dat de totale droogcapaciteit vermindert, waardoor het vochtgehalte in de drager toeneemt en het isolatievermogen kan worden aangetast [22]. Hierdoor moet de dikte van de isolatiepleister (minimaal 30mm) goed geëvalueerd worden ten aanzien van waterdampdoorlaatbaarheid, de hoeveelheid vochttransport en de warmteverliezen. Vacuümisolatiepanelen (VIP) bestaan uit een fumed silica kern bij lage luchtdruk (bijna vacuüm), ingekapseld door een beschermende aluminiumhoudende bekleding. VIP's bieden een zeer lage thermische geleidbaarheid (0,003 tot 0,005 W/m.K), maar zijn gevoelig voor punctie, die de interne luchtdruk verhoogt en zo de thermische prestaties doet afnemen [20]. Het grootschalige gebruik van vacuümisolatiepanelen, aerogels en isolerende pleisters blijft echter beperkt, voornamelijk vanwege de hoge kostprijs [23].

#### 2.1.2 Schadegevallen

De voornaamste bezorgdheid bij het toepassen van binnenisolatie bij metselwerkgebouwen, is het verhoogde risico op vorst-dooischade aan de buitenzijde van het metselwerk (Figuur 3a), schimmel op het binnenoppervlak of tussen het metselwerk (Figuur 3b) en de binnenisolatie en het verval van de ingebedde houtstructuur (Figuur 3c) [1].



Figuur 3: Schadegevallen: a) vorst-dooischade, b) schimmelgroei, c) houtrot

#### Vorst-dooischade

Een hoger vochtgehalte gecombineerd met lagere temperatuur in het metselwerk vergroot het risico op vorstschade [24]. Vorst-dooischade wordt veroorzaakt door het herhaaldelijk bevriezen en ontdooien van water in een materiaal. Wanneer water bevriest in de poriestructuur van een materiaal, veroorzaakt dit een volumetoename. Dit zorgt voor druk of spanning op de poriestructuur van het materiaal, waardoor deze kan worden beschadigd. Wanneer het water ontdooit, kunnen de materialen samentrekken, wat ook schade kan veroorzaken [11]. Waar herhaaldelijk vries-dooiwerking optreedt nabij de oppervlaktelaag, zal het buitenoppervlak van het materiaal scheuren en afbrokkelen [25]. Daarom zal de vorming van ijs worden voorspeld op 5 mm van het buitenste wandoppervlak, zie de blauwe lijn in Figuur 3a [26], [27], [28].

Bepaalde variaties van bakstenen kunnen deze spanningen beter weerstaan dan andere, afhankelijk van hun eigenschappen en ligging in de muur. De belangrijkste factoren voor het evalueren van vriesdooischade zijn het vochtgehalte bij bevriezing, en het aantal vries-dooicycli [11]. Het is dus belangrijk om het vochtgehalte van het metselwerk te beperken. De vriestemperatuur zelf wordt beïnvloed door de poriëngrootteverdeling, het vochtgehalte en de zoutconcentratie van het materiaal. Het aantal kritische vorst-dooicycli (FTC) wordt bepaald door het tellen van het aantal vorst-dooicycli, terwijl de vochtverzadiging boven de kritische verzadigingsgraad ligt. Deze verzadigingsgraad is een materiaalafhankelijke constante die het vochtgehalte specificeert, waarbij vorstschade kan optreden, in verhouding tot het volledig verzadigde vochtgehalte [24]. Om de toename of afname van vorstschade te kwantificeren, zal het criterium voor vries-dooicycli volgens Mensinga et al. worden gehanteerd [26].

#### <u>Schimmel</u>

Een vochtgehalte dat de tolerantie van materialen gedurende een kritieke blootstellingstijd overschrijdt, kan leiden tot de groei van schadelijke organismen [29]. Schimmelgroei ontwikkelt zich op oppervlakken met een relatieve vochtigheid van meer dan 75% bij 20°C [30]. Schimmels kunnen zich enkel ontwikkelen als er voldoende zuurstof, vocht, gunstige temperatuur en een geschikte voedingsbodem aanwezig is in een gebouw. Het is hierbij belangrijk dat de temperatuur weinig schommelt, en voor een

snelle groei tussen 5 en 25°C ligt [31]. De kritische vochtigheidsgraad is afhankelijk van de blootstellingstijd en het soort materiaal. Zo verloopt schimmelgroei op hout gebaseerde materialen met een andere snelheid dan bouwmaterialen met andere eigenschappen [29].

Schimmelsporen in gebouwen moeten vermeden worden, aangezien ze de interieurafwerking verontreinigen, verzwakken en de gezondheid van de bewoner negatief beïnvloeden, door verspreiding van ziekteverwekkers [32]. Het is daarom aangewezen om biologisch materiaal van het binnenoppervlak van het metselwerk te verwijderen en te kiezen voor materialen die wel een hoge relatieve luchtvochtigheid aankunnen, zonder een afname van de prestaties [16]. In de literatuur zijn er verschillende voorspellingsmodellen beschikbaar die schimmelgroei voorspellen. Deze modellen kampen echter met tekortkomingen door vereenvoudigingen en kunnen zeer uiteenlopende resultaten genereren, waardoor we ze niet blind kunnen vertrouwen [33]. In deze thesis zal de vorming van schimmel op het binnenoppervlak of tussen het metselwerk en de binnenisolatie, zie de groene lijn in Figuur 3b, worden voorspeld met het bijgewerkte VTT-model van Hukka en Viitanen [34].

#### <u>Houtrot</u>

Houten balken in vloerconstructies worden vaak ondersteund in het metselwerk, waardoor ze kwetsbaar zijn voor vochtschade en houtrot [28]. Houtrot is de afbraak van hout door aantasting van schimmels. Dit schadefenomeen treedt op wanneer hout gedurende langere tijd wordt blootgesteld aan vloeibaar vocht of damp, waardoor de schimmels kunnen groeien en het hout kan ontbinden [35]. Bij vloeibaar transport dringt water door scheuren of openingen in de buitenste lagen van het hout in het materiaal, waardoor vochtige omstandigheden ontstaan die de groei van schimmels bevorderen en uiteindelijk leiden tot houtrot. Bij damptransport verspreidt het vocht zich door de poriën van het hout, waarbij de luchtvochtigheid rondom het hout vaak hoog blijft, wat kan leiden tot houtrot [5]. Er is enige discussie over het feit dat houtrot kan optreden bij een bepaalde relatieve vochtigheid zonder blootstelling aan vloeibaar vocht. Studies tonen echter aan dat houtrot kan optreden bij een relatieve luchtvochtigheid van meer dan 80% of 95%, afhankelijk van de omgevingsomstandigheden en houtsoort [34].

Een hoge relatieve vochtigheid of transport van vloeibaar vocht kan voorkomen na het plaatsen van binnenisolatie, onder andere door verlaging van de temperatuur aan het uiteinde van de balk, zie de paarse lijn in Figuur 3c [5], [13]. Een slechte luchtdichtheidsafdichting rond de houten balkkoppen verhoogt het risico op houtrot door luchtstroom langs de balkkop van vochtige binnenlucht [36]. Houtrot in houten balkkoppen heeft een negatieve invloed op de structurele eigenschappen en kan leiden tot stabiliteitsproblemen [20]. In deze thesis zal het voorkomen van houtrot worden geëvalueerd met behulp van het predictiemodel van Brischke en Rapp [37].

#### 2.1.3 Relevante parameters

Schade wordt pas veroorzaakt als er verschillende condities tegelijk optreden. Zo moet er een vochtbron aanwezig zijn, zoals slagregen of opstijgend vocht. Daarnaast moet vochtmigratie in de constructie mogelijk zijn, de constructie zelf moet gevoelig zijn voor vochtschade, en vocht- en temperatuuromstandigheden moeten gedurende voldoende tijd "gunstig" zijn om schade te kunnen veroorzaken [1]. Het risico op vochtschade in een constructie is dus nauw verbonden met de eigenschappen van de gebruikte bouwmaterialen en de condities van het buiten- en binnenklimaat [24].

#### <u>Binnenklimaat</u>

Voor de plaatsing van binnenisolatie moet er in het gebouw een gezond binnenklimaat aanwezig zijn, dat niet extreem vochtig is, met voldoende ventilatie en verwarming [20].

#### <u>Buitenklimaat</u>

Eén van de functies van een gebouw is om beschutting te bieden tegen regen en wind. Om te voorkomen dat de buitenmuren vocht absorberen, worden regenwaterpijpen en goten geïnstalleerd om het aflopende water van hogere delen en daken op te vangen en af te voeren. Op deze manier wordt voorkomen dat het water op de muren blijft staan en schade kan veroorzaken [18]. Als de regen verticaal valt, bieden deze systemen een goede bescherming. Regenval wordt echter vaak gestuurd door de windrichting, waardoor de regen schuin valt. Regenval die een horizontale snelheid krijgt, wordt slagregen (WDR) genoemd [11]. Aangezien de zuidwestelijke oriëntatie het meest voorkomt in België, in termen van slagregen, is deze oriëntatie de meest kritische [38]. WDR is een van de grootste vochtbronnen die de hygrothermische prestaties en de duurzaamheid van gevels van gebouwen beïnvloeden [39]. Wanneer er slagregen op de buitengevel valt, dringt het vocht de mortel en de steen binnen en wordt het opgeslagen in de poriënmatrix [40]. Zo kunnen er situaties zijn waarin het vocht, opgeslagen in de muur, niet volledig zal verdampen. Dit leidt tot vochtophoping in de muur die mogelijks de binnenwand kan bereiken. Om dit te voorkomen, moet de wand in de loop van de tijd kunnen drogen door middel van verdamping, dampdiffusie en oppervlaktediffusie. Hierbij is de temperatuur in de muur cruciaal, aangezien het de verdamping van het vocht zal versnellen, waardoor de muur sneller zal drogen. Hierdoor wordt er terug gebotst op de problemen van het plaatsen van binnenisolatie, namelijk het kouder worden van de muur en de verminderde droging, zie Figuur 4[11].



Figuur 4: Slagregen en verminderde droging bij binnenisolatie

Slagregen is moeilijk te voorspellen, vanwege het aantal parameters en hun veranderlijkheid. Blocken en Carmeliet [41] definieerden de fundamentele beïnvloedende parameters: gebouwgeometrie, omgevingstypologie, positie op de gevel van het gebouw, windsnelheid, windrichting, turbulentieintensiteit, neerslagintensiteit, regendruppelgrootteverdeling en duur van regengebeurtenissen. Daarnaast worden er steeds meer innovatieve materialen gebruikt, waarvan de kennis van de hygrothermische prestaties nog niet volledig geweten is, en ontbreken er geschikte kwantitatieve ontwerpgegevens van WDR [41]. Naast oriëntatie en wind speelt de hoogte van het gebouw ook een rol. Hoger aan de gevel zal, door de stroomwijze van de wind, meer slagregen samenkomen. Verder is er ook het "windblokkerend effect" dat ervoor zorgt dat er minder regenval op de gevels komt in een beschut stadslandschap tegenover een open ruraal gebied. Dit komt doordat het windblokkerend effect het windstromingspatroon zal verstoren door de aanwezigheid van gebouwen en daarmee een afname van de stroomopwaartse windsnelheidscomponent in de buurt van de gebouwen veroorzaakt [39]. Klimaatparameters zoals WDR, temperatuur en zonnestraling zijn sterk afhankelijk van de regio [42]. Zelfs in België kan het klimaat in het binnenland sterk verschillen met bijvoorbeeld het klimaat aan de kust, door bijvoorbeeld de sterkere winden. Daarnaast kan het "stedelijk hitte-eilandeffect" (UHI) zorgen voor verhoogde luchttemperaturen in stedelijke omgevingen ten opzichte van rurale gebieden, wat ook de absorptie en droging in de muur kan beïnvloeden [40].

#### Materiaaleigenschappen

Een goede kwaliteit van het bestaand metselwerk is een voorwaarde voor het installeren van binnenisolatie. Zoals eerder gezegd is historisch metselwerk vaak verantwoordelijk voor waterbuffering als waterdichtheidsconcept van de gevel [43]. Het gebruikte materiaal, de typologie (spouwmuur of volsteense muur) en de dikte van de muur, spelen een belangrijke rol in het vochtgehalte van de muur [18]. In deze thesis zal de focus worden gelegd op volsteens historisch metselwerk.

Daarnaast moet er speciale aandacht gaan naar potentiële schade in enerzijds de afwerking, bijvoorbeeld het plaatselijk loslaten van de verf, en anderzijds het metselwerk, bijvoorbeeld scheuren, waardoor regenwater kan binnendringen. Binnenisolatie mag dus in geen geval de schade verbergen [19]. Materiaaleigenschappen zoals de absorptie van het oppervlak, de infiltratiesnelheid in de constructie, het vochtbufferend vermogen en de droogcapaciteit van de constructie hebben een grote invloed op het vochtgehalte van het metselwerk [43]. Vaak terugkerende impactparameters, in perspectief van schade, zijn het effectieve vochtgehalte (door sterke verhouding omvat dit ook de open porositeit, massadichtheid en capillair vochtgehalte), de capillaire absorptiecoëfficiënt en de dampdiffusieweerstand [44], [28]. Om een betrouwbare risicobeoordeling te kunnen doen van een renovatiestudie, is zowel de kennis van de thermische als de hygrische materiaaleigenschappen vereist [45].



Figuur 5: Materiaalparameters

Homogenisatie van een historische metselwerkconstructie tot een 1D massieve baksteenconstructie gebeurt vaak om complexiteit te beperken [46]. Toch is historisch metselwerk wel degelijk een heterogeen materiaal dat bestaat uit bakstenen, stelmortels en voegmortels, met elk hun eigen poriestructuur en hygrothermische eigenschappen, zie Figuur 5. De hygrische eigenschappen per baksteen kunnen sterk variëren door een verschil in grondstoffen, de vorming van de baksteen en bakprocedureprocessen enz. Ook mortels kunnen verschillen, afhankelijk van het type bindmiddel, de zuiverheid van de aggregaten, de mengverhouding en de droogomstandigheden [12]. Zo is te zien dat

na slagregen, een hydraulische kalkmortel een baksteen zijwaarts bevochtigt, en zo het vocht dieper in de structuur doordringt, wat niet het geval is voor een cementmortel [46].

Daarnaast kunnen de baksteen en de mortel elkaars vochtgehalte beïnvloeden door de interface tussen hen. Een verstoring van het hygrisch transport, zoals een mismatch tussen de fysisch-chemische eigenschappen, kan leiden tot de zogenaamde "interfaceweerstand" (IR) [46]. Een IR wordt theoretisch gezien als een extra dikte van een materiaal, met een bepaalde permeabiliteit of weerstand, zonder vochtcapaciteit, die is opgenomen tussen de twee materialen [12]. Zo kan het voorkomen dat de combinatie van een bepaald voegmateriaal met een baksteen een te hoge interfaceweerstand heeft, waardoor er kleine openingen en scheurtjes ontstaan tussen de stenen en het voegmiddel. Deze openingen en scheurtjes creëren zones met een hogere weerstand tegen vochttransport, die op hun beurt het risico op vochtophoping en schade aan de bouwconstructie kunnen vergroten [46].

#### 2.1.4 Binnenisolatie in de praktijk

#### Plaatsing van binnenisolatie

Volle dragende metselwerkgebouwen hebben het potentieel voor duurzaamheid op lange termijn wanneer ze onder handen genomen worden voor renovatie [1]. Voorafgaand aan deze renovatie moet er een controle worden gedaan op schade. Vocht in de muur door infiltratie (barsten, beschadigingen van het voegwerk of de stenen, lekkende dakgoot, onvoldoende dichte dorpelaansluitingen...) of capillaire opzuiging (ontbreken van vochtscherm ter plaatse van de muurvoet ...) moeten volledig opgelost worden [20]. Dit kan onder andere via het aanbrengen van een capillaire onderbreking, herstelling van de buitenafwerking, installatie van een draineersysteem enz. Na de uitvoering van deze interventies dient men de muur voldoende lang te laten drogen, soms meerdere maanden, voor het plaatsen van binnenisolatie [47].

Voor het aanbrengen van thermische isolatie moet er een uitgebreide voorstudie uitgevoerd worden. Er moet onderzocht worden of de buitenafwerking van de gevel zo dampopen mogelijk is, de regenbelasting beperkt is, waterleidingen en structuur niet ingewerkt zijn in de gevel, een gezond binnenklimaat (een goed functionerende ventilatie, verwarming en klimaatregeling) aanwezig is. Tijdens het plaatsen van de binnenisolatie moet men waakzaam zijn over de continuïteit van het luchtscherm, of al dan niet een dampscherm moet worden geplaatst en of er tussen de aansluiting van de isolatie en de bestaande gevel geen kieren zitten. Als de gevel vorstschadegevoelig is, en zo waterinfiltratie moet beperkt worden, kan een dampdoorlatend, waterafstotend middel aan de buitenkant van het metselwerk worden geplaatst [48]. Toch is dit niet altijd de voorkeur, want een hydrofobe behandeling kan zorgen voor verkleuring van de gevel, wat niet acceptabel is voor erfgoed [16]. Daarnaast kan een hydrofobe behandeling na verloop van tijd afbreken, waardoor goed onderhoud en regelmatige controle noodzakelijk is [28].

#### Detaillering

Om ervoor te zorgen dat de doelstellingen van comfort, energie-efficiëntie en duurzaamheid worden gehaald, moet een goede detaillering ook worden opgenomen in de renovatiestrategie [1]. De aansluitingsdetails hebben een bijzonder grote impact op de thermische prestaties van de gevel [20]. Bij een correcte detaillering moeten koudebruggen worden gereduceerd, luchtlekken aan de bouwknopen worden vermeden en het binnenklimaat worden beheerst [20], [48]. De zwakste punten bij een binnenisolatieontwerp zijn de aansluitingsdetails: de aansluiting van de raam-muurinterface, de

aansluiting op binnenmuren, vloeren- en balken, en de aansluiting op nieuwe technieken. Om de koudebrugwerking op die plaatsen te beperken, kan er geopteerd worden om de binnenmuur te voorzien van een dunne isolatielaag, tot op een diepte van 60 cm vanaf de buitenmuur [48].

Hierbij is het van essentieel belang om voldoende aandacht te besteden aan de nauwkeurigheid bij het uitvoeren van de detaillering. Dit wordt echter soms niet gedaan, omdat binnenisolatie vaak geplaatst wordt door particulieren, waardoor er soms weinig aandacht aan detaillering wordt besteed. Daarnaast zijn er hierdoor vrij weinig schadegevallen bekend, aangezien dit niet zorgvuldig wordt onderzocht of gecontroleerd [20]. Het gebrek aan aandacht vloeit voort uit de hoeveelheid onbeantwoorde vragen over het ontwerp en de uitvoering van technische detaillering met binnenisolatie, waardoor er vraag is naar verder onderzoek [49].

#### 2.2 Binnenisolatie bij raamaansluitingen

De aansluiting van de binnenisolatie op vensters en deuren is essentieel voor de constructie [48]. Hierbij moet het warmteverlies, luchtlekkage en het binnendringen van water worden beheerst [50]. Aangezien de temperatuur in het metselwerk wordt verlaagd na het plaatsen van binnenisolatie, zullen de lateien en dorpels koudebruggen vormen [48]. Om de oppervlaktetemperatuur te verhogen en warmteverliezen te reduceren, zodat schimmelvorming en oppervlaktecondensatie worden vermeden, moet er een minimale laag binnenisolatie worden geplaatst aan deze aansluitingen [19]. Net zoals de plaatsing van binnenisolatie zorgt voor een verkleining van ruimtes, zorgt het bij ramen voor een diepere raamopening, waardoor er soms minder daglicht kan binnenvallen [9].

#### 2.2.1 De waterdichtheid van ramen

In de praktijk zal regenwater doordringen bij voegen of ramen [6]. Om de oppervlaktewaterstroom bij raamaansluitingen te beheersen worden er vensterbanken en basisdrainage voorzien [1]. Naast de WDR die als primaire factor de infiltratiesnelheid beïnvloedt, zijn er andere krachten, zoals zwaartekracht, oppervlaktespanning en capillariteit, in staat om regenwater dat van de gevel loopt in de aansluiting te leiden door defecten aan de gevel [51]. Zelfs zonder de aanwezigheid van waarneembare defecten, kunnen waterlekkages optreden bij raamaansluitingen. Dit impliceert dat het erg moeilijk is om raammuurinterfaces volledig waterdicht af te dichten, onder meer door hun complexe geometrie (uit het vlak afdichting) en de aanwezigheid van hoeken (vooral degene aan de weerszijden van de dorpel zijn kritische punten) [52], [20]. Hierdoor is er belangrijke aandacht vereist bij plaatsing van binnenisolatie aan raamaansluitingen.

#### 2.2.3 Gegeven typeoplossingen raamaansluitingsdetails

Het plaatsen van binnenisolatie aan de dagkanten van raamdetails kan een uitdaging zijn vanwege de beperkte aanzichtsbreedte van het raamprofiel, wat betekent dat er meestal geen voldoende dikke isolatie geplaatst kan worden [19]. Op de plaats van de latei en aan de zijkanten kan dit zeer moeilijk zijn, omdat er bijna geen materiaal kan worden weggehaald. In vergelijking hiermee is het typisch eenvoudiger om isolatie onderaan het raam te plaatsen, omdat er vaak meer ruimte beschikbaar is voor isolatiematerialen. Het is echter belangrijk om te benadrukken dat er nog andere factoren kunnen spelen, zoals de aanwezigheid van leidingen of van een vensterbank die de ruimte beperkt. Een mogelijke oplossing is om het bestaande pleisterwerk te verwijderen, zodat er enkele millimeters of centimeters kunnen gewonnen worden, er moet hierbij wel worden gelet op de luchtdichtheid van de aansluiting [20]. Een andere optie is het gebruiken van superisolerende isolatiematerialen langs de dagkanten, zoals VIP, isolerende pleister of aerogel [19], [20]. In principe moet de binnenisolatie aan alle zijden van het venster aansluiten op de thermische snede van het raamprofiel, met een minimum isolatiedikte van 2 cm [53]. Desondanks is het niet altijd mogelijk om schimmel of condensatie op de dagkanten volledig te vermijden. Toch wordt er verondersteld in literatuur dat de schade vrij beperkt en beheersbaar blijft, als men voldoende verwarmt en ventileert. Men geeft als oplossing aan om de dagkanten van een makkelijk afwasbare afwerking te voorzien, om zo ongunstige schimmelvorming in te perken [20].

Voor het plaatsen van binnenisolatie aan raamaansluitingen is er dus geen standaardoplossing beschikbaar omdat de specifieke omstandigheden van het raamdetail en de beschikbare ruimte moeten worden overwogen, evenals het type isolatiemateriaal en de installatiemethode die het meest geschikt is voor de specifieke situatie.



Op basis hiervan geeft de renovatiegids van Dobbels volgende mogelijke praktijkoplossingen [20]:

Figuur 6: Praktijkoplossingen binnenisolatie bij raamaansluitingen [20]

Wanneer er voldoende plaats is (2-3 cm) om een standaard isolatiemateriaal te plaatsen zal men kiezen voor Figuur 6a. Als dit niet het geval is kiest men voor een superisolerend materiaal, Figuur 6b, als dit binnen het budget ligt. Wanneer het gebouw erfgoed is en men wil de ramen behouden, zal er worden geopteerd voor Figuur 6c. Bij Figuur 6c en 6d wordt er dan een nieuw raam geplaatst op de thermische snede. Bij Figuur 6e, de meest risicovolle optie, wordt ervoor gezorgd dat de dagkanten van het raam afwasbare oppervlakken zijn, behandeld met een schimmelwerend materiaal.

Wanneer het schrijnwerk schade vertoont of men een totaalrenovatie uitvoert, is het soms aanbevolen om het schrijnwerk volledig te vervangen. Het is immers eenvoudiger om eerst het schrijnwerk te vervangen en vervolgens binnenisolatie aan te brengen, om zo een kwalitatievere aansluiting te kunnen uitvoeren [20]. Na het spreken met enkele architecten en fabrikanten kan besloten worden dat het vervangen van het volledige raam vaak ook kostenefficiënter is dan het raam te behouden, al is dit nog in een vrij goede staat. In het onderzoek van Morrelli et al. [9] werden raamaansluitingen gerenoveerd en binnenisolatie toegepast. Uit het onderzoek bleek dat het prestatieniveau van de gerenoveerde raamaansluitingen gelijkwaardig was aan het plaatsen van nieuwe ramen met binnenisolatie, maar dat de kosten van het achteraf herinbouwen van bestaande vensters een veel duurdere optie was dan de installatie van nieuwe vensters [9]. Daarom zijn er slechts weinig projecten waarbij het raam wordt behouden en alternatieve oplossingen worden gezocht, zoals superisolerende materialen. Dit komt mede doordat deze materialen vrij duur zijn en er nog teveel onwetendheid heerst. Zo zijn er nog geen gedetailleerde bouwfysische studies uitgevoerd op raamaansluitingen, waardoor de opgegeven typeoplossingen voldoende robuust en conservatief moeten zijn om in alle situaties het schaderisico te reduceren [20].

#### 2.3 HAM-Simulaties

In deze thesis zal een gedetailleerde bouwfysische studie uitgevoerd worden op raamaansluitingen. Dit zal gebeuren aan de hand van HAM-simulaties (Heat, air, moisture). HAM-simulaties worden gebruikt bij zowel het ontwerp van nieuwe gebouwen, als de renovatie van bestaande gebouwen, om de prestaties en potentiële problemen te voorspellen van een gebouw. Hierbij wordt er rekening gehouden met warmte- en vochtopslag, latente warmte-effecten, vloeibaar transport en convectief transport onder realistische grens- en initiële condities [11]. Om deze simulaties zo waarheidsgetrouw mogelijk te kunnen uitvoeren, is er voldoende kennis vereist over de bouwmateriaalparameters [8].

In deze thesis wordt de aansluiting tussen het historisch metselwerk en het raam onderzocht. Dit bestaat uit een complexe en onvoorspelbare geometrie waardoor het HAM-transport moeilijk is in te schatten [6].



Figuur 7: Opbouwen HAM-simulaties: a) 1D b) van 1D naar 2D c) 2D

#### 2.3.1 1D simulaties

1D simulaties modelleren warmtestroming, luchtbeweging en vochttransport langs één dimensie. Hierdoor zijn ze minder complex dan 2D simulaties en gemakkelijker te implementeren [54]. 1D simulaties zijn vooral geschikt voor het analyseren van homogene bouwmaterialen zoals bv. isolatiematerialen. Bij historisch metselwerk, een heterogeen materiaal, kunnen de verschillende lagen afzonderlijk gemodelleerd worden om de individuele fysische eigenschappen, zoals vochtgehalte, porositeit en thermische geleidbaarheid, te evalueren. Wanneer het metselwerk als homogeen materiaal wordt beschouwd, zullen de verschillende lagen worden samengevoegd tot één materiaallaag. Dit kan leiden tot onnauwkeurigheden bij het modelleren van de warmtestroming, luchtbeweging en vochttransport door het metselwerk, vooral als er grote verschillen zijn tussen de fysische eigenschappen van de verschillende lagen [55]. Dit wil zeggen dat bij beoordeling van de duurzaamheid van metselwerk (vorstschade, zoutuitbloeiingen, schimmelgroei, enz.), de betrouwbaarheid van deze vereenvoudigde aanpak in twijfel moet worden getrokken [56]. De impact van deze onzekerheden is moeilijk in te schatten aangezien veel materiaaleigenschappen met elkaar zijn gecorreleerd. Zo kan bijvoorbeeld een toename van de absorptiecoefficiënt (A<sub>w</sub>) van de wand leiden tot

een toename van het vochtgehalte van een constructie, maar ook tot een snellere droging van de constructie [28].

Hoewel 1D simulaties minder nauwkeurig zijn dan 2D simulaties, bieden ze een snelle manier om een overzicht te krijgen van de thermische en vochtgerelateerde prestaties van gebouwcomponenten. Echter is hun nauwkeurigheid beperkt bij complexe scenario's met verschillende materialen, geometrieën en vochtstromen in meerdere richtingen [54]. Dit is vooral belangrijk bij historische metselwerken en raamaansluitingen, waarbij de geometrie vaak niet uniform is en er meerdere materialen en verbindingen aanwezig zijn.

#### 2.3.2 2D simulaties

2D simulaties bieden meer nauwkeurige en gedetailleerde informatie over de prestaties van de bouwschil, omdat ze rekening houden met de verschillende fysische eigenschappen in twee dimensies [56]. Dit resulteert in een meer gedetailleerde modellering van de warmtestroming, luchtbeweging en vochttransport. Bovendien bieden 2D-simulaties meer flexibiliteit, omdat het mogelijk is om verschillende aspecten, zoals geometrie, materiaaleigenschappen en klimaatparameters, onafhankelijk van elkaar te variëren en te onderzoeken [54]. Daarnaast kunnen ze meer informatie geven over de laterale verspreiding van vocht, bijvoorbeeld door regeninslag of door capillaire werking van vocht door metselwerk [55]. Hoewel 2D-simulaties meer nauwkeurigheid en flexibiliteit bieden, vereisen ze meer rekenkracht en kennis om uit te voeren en te analyseren dan 1D-simulaties. Het vereist ook een meer gedetailleerde geometrische modellering van het metselwerk, wat tijdrovend kan zijn [54], [55].

2D simulaties geven dus een meer realistische modellering van de werkelijke geometrie van het materiaal of de constructie, waardoor meer precieze simulatieresultaten kunnen worden verkregen, maar ze vereisen meer rekenkracht en meer tijd om te berekenen.

Het hygrothermisch gedrag van raamaansluitingen bij binnenisolatie zou moeten worden geëvalueerd aan de hand van 2D simulaties. Er is echter maar zeer beperkte kennis en onderzoek gedaan over 2D simulaties van bouwknopen in het algemeen, waardoor het een logischere optie is om te starten van 1D simulaties en stelselmatig op te bouwen naar 2D simulaties. Deze overgang van 1D simulaties naar 2D-simulaties zal in deze thesis uitvoerig worden geëvalueerd.

#### 2.4 Besluit

Dit hoofdstuk heeft de voordelen, nadelen en risico's uitgelegd van het plaatsen van binnenisolatie. De categorisering en beoordeling van verschillende isolatiesystemen zijn besproken in het toepassingsgebied van wanden en detaillering. Parameters die het hygrothermisch gedrag kunnen beïnvloeden zijn naar voor gebracht, om zo in het volgende hoofdstuk een juiste selectie te kunnen maken voor een waarheidsgetrouwe uitvoering van de simulaties. Er is dieper ingegaan op de problematiek bij het binnenisoleren van raamaansluitingen, waaruit gebleken is dat er slechts weinig onderzoek is uitgevoerd en er nog veel vragen onbeantwoord zijn. Hieraan is de nood aan 2D simulaties gekoppeld samen met de vereiste overgang tussen 1D en 2D HAM simulaties om de 2D simulaties correct te kunnen analyseren. In het volgende hoofdstuk zullen, naast het uitzetten van een onderzoeksplan, een aantal aannames en beperkingen van dit onderzoek worden besproken.

# Methodologie

#### 3.1 Nodige documentatie

In het kader van dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van cases als basis voor de verzameling van gegevens. De ambitie is om resultaten te verkrijgen die zo dicht mogelijk aanleunen bij realistische omstandigheden met een werkelijk voorkomende constructie. Indien er niet met cases wordt gewerkt zou de dikte van het metselwerk en het type isolatiemateriaal worden uitgekozen op basis van bijvoorbeeld veel voorkomende situaties, waardoor er onbewust bepaalde eigenschappen of kenmerken kunnen worden geselecteerd, die leiden tot een bepaalde uitkomst. Dit zou een gestuurd onderzoek opleveren dat bijgevolg niet representatief is voor de opgelegde ambitie.

Door gebruik te maken van cases kunnen concrete voorbeelden uit de praktijk worden geïntroduceerd en aan de hand hiervan complexe en abstracte fenomenen worden verklaard. Per case kunnen dan ook verschillende voorkomende constructies onderling met elkaar worden vergeleken. Zo kunnen de overeenkomsten en verschillen in kaart worden gebracht en kan zo worden geanalyseerd waarom bepaalde parameters in de ene situatie wel of niet van belang zijn.

Om het onderzoek zo breed mogelijk te maken, zijn er twee verschillende cases geselecteerd die een variëteit van uiteenlopende parameters, condities en materialen bevatten.



#### 3.1.1 De Vlaamse Hoeve Meise

Figuur 8: De Vlaamse Hoeve

De eerste geselecteerde case is de Vlaamse Hoeve (VH) in Meise van Archipelago. Deze heeft een muuropbouw die bestaat uit een metselwerkpakket van 41 cm dik, met een staand metselwerkverband, en een minerale wol van 20 cm dik, met een dampscherm. Bij het binnenisoleren van de raamaansluitingen zijn er nieuwe ramen toegevoegd, die op de thermische snede van de minerale wol

zijn geplaatst. Deze case beschikt over zeer uitgebreide informatie met onder andere de eigenschappen van het metselwerk en een 1D simulatierapport.



#### 3.1.2 Paardenmarkt Antwerpen

Figuur 9: Campus Paardenmarkt

Campus Paardenmarkt (PM) in Antwerpen van Bureau Bouwtechniek heeft een muuropbouw die bestaat uit een metselwerkpakket van 28 cm dik en een capillair-actief isolatiemateriaal, multipor, van 10 cm dik. Deze buitgevel is afgewerkt met een pleister. Bij het binnenisoleren van de raamaansluitingen zijn er nieuwe ramen toegevoegd, die op de thermische snede van de multipor zijn geplaatst met bovenaan toevoegingen van PIR-isolatie. Deze case beschikt over de eigenschappen van alle toegevoegde materialen en zeer gedetailleerde bouwdetails.

#### 3.2 Plan van aanpak

Het doel is om elke casus zo nauwkeurig mogelijk te construeren in een simulatieprogramma, zodat de resultaten zo dicht mogelijk bij de werkelijkheid komen te liggen. Hierbij is het dus de bedoeling dat de materiaalparameters, het binnen- en buitenklimaat een zo goed mogelijke imitatie weergeven van de werkelijke situatie, waardoor het verzamelen van informatie zeer belangrijk wordt.

Elke casus heeft drie verschillende bouwknopen van een raamaansluiting: een verticale doorsnede bovenaan, een verticale doorsnede onderaan en een horizontale doorsnede links of rechts. Deze bouwknopen worden geëvalueerd in een simulatieprogramma via een ééndimensionale opbouw, die stelselmatig wordt uitgebreid naar tweedimensionale opbouw. Dit gebeurt volgens een stappenplan. *Stap 1* zal de 1D analyse inhouden, bestaande uit twee onderdelen: met onderbreking van kalkmortel of zonder zie Figuur 10a. *Stap 2* is de overgang tussen 1D en 2D, deze zal de 1D opbouw uitbreiden door mortellagen toe te voegen onder en of bovenaan het metselwerk, waardoor er in het tweede luik van deze stap een volledige metselwerk opbouw bekomen wordt, zie Figuur 10b. In *stap 3* wordt er dan uiteindelijk overgegaan naar de 2D raamaansluitingen, zie Figuur 10c.

Door dit stappenplan te volgen kunnen de meer kritische zones worden ingeschat voordat de overgang naar het 2D detail wordt geëvalueerd. Hierbij wordt eerst de muuropbouw van voor het plaatsen van binnenisolatie, de bestaande toestand, vergeleken met de situatie na renovatie, de nieuwe toestand. Dit om te kunnen voorspellen welke materialen een impact hebben op de bekomen resultaten.



Figuur 10: Opbouwen HAM-simulaties: a) Stap 1: 1D , b) Stap 2: van 1D naar 2D , c) Stap 3: 2D

Bij elke stap per case wordt het reactiegedrag/post-processing geïnterpreteerd. Dit reactiegedrag wordt geïnterpreteerd via een berekening die het optreden van schadefenomenen, (vorst-dooischade, schimmel en houtrot), voorspelt. Op die manier worden eventuele problemen vastgesteld en vergeleken met andere constructies, en configuraties binnen een constructie, binnen de case. Na de berekening van het reactiegedrag van de configuraties van alle cases, zal de verwerking en analyse van de resultaten worden voorgesteld via samenvattende grafieken. Aangezien de volgende hoofdstukken van dit onderzoek de eerder besproken stappen van 1D naar 2D zullen uiteenzetten, worden de verschillende constructies, configuraties en scenario's per case ook daar toegelicht.

#### 3.3 HAM-simulaties

#### 3.3.1 Simulatieprogramma

De HAM-simulaties worden uitgevoerd met behulp van de Delphin 6.1 software van IBK (Institut Bauklimatic, Technische Universiteit Dresden) volgens de EN 15026-norm [57]. Deze norm beschrijft de praktische toepassing van de hygrothermische simulatiesoftware, die wordt gebruikt om het ééndimensionale warmte- en vochttransport in meerlaagse bouwschilcomponenten te voorspellen, die aan beide zijden worden blootgesteld aan klimaatomstandigheden. Het hygrothermische gedrag wordt berekend door de geometrie in te voeren in de Delphin 6.1 software en deze te bedekken met een computationeel raster van variabele grootte [45], [11]. Dit raster wordt gebruikt om de simulatie-efficiëntie te verbeteren. Een dicht rooster leidt tot een langere berekeningstijd, terwijl een grof rooster de precisie vermindert. Het discretisatierooster plaatst de rasterelementen dicht bij elkaar op de materiaalinterfaces, omdat daar meestal de meest opvallende hygrothermische veranderingen optreden. Tijdens het simuleren worden differentiaalvergelijkingen opgelost voor warmte- en vochttransport voor elk rasterelement per tijdseenheid. De randvoorwaarden worden bepaald door de gegevens van de aangrenzende rasterelementen te gebruiken, of indien er geen aangrenzende rasterelementen zijn, door de interne en externe klimaatgegevens te gebruiken [11].

#### 3.3.2 Aannames

Het warmte- en vochttransport is afhankelijk van de materiaaleigenschappen en de opgelegde randvoorwaarden aan de binnen- en buitenoppervlakken van de configuratie. Deze randvoorwaarden modelleren de reële omstandigheden waar de constructie tijdens zijn levensduur aan zal worden blootgesteld, bv. temperatuur, vochtigheid, windsnelheid en -richting, zonnestraling en neerslag. [45], [11].
#### <u>Randvoorwaarden</u>

In dit onderzoek wordt als buitenklimaat gekozen voor een "vochtreferentiejaar" (MRY). In tegenstelling tot een "testreferentiejaar" (TRY), dat gegevens van een gemiddeld meteorologisch jaar bevat, heeft een MRY gegevens van het meest kritische jaar en de slechtste vochtcondities die een constructie kan ondergaan één keer om de tien jaar tijd. Op die manier is een MRY specifiek toegespitst op het op het beoordelen van vochtgerelateerde schadefenomenen [28]. Door een studie van Vandemeulebroucke et al., bestaat er sinds kort een MRY van Brussel die gecreëerd is op basis van een klimaat index die kritisch is voor verschillende toepassingen, deze zal dan ook in dit onderzoek worden gebruikt [58]. De klimaatfiles van het MRY die worden ingeladen in de software bevatten gegevens over de buitentemperatuur, relatieve luchtvochtigheid aan de buitenkant, atmosferische tegenstraling, directe en diffuse straling, windsnelheid en windrichting op een horizontaal oppervlak [45]. Aan de hand van Figuur 11 en enkele testsimulaties, kan worden vastgesteld dat de periode van 15 tot 30 maart de meest kritische periode is van dit MRY, met daaropvolgend periode 15-30 november. Op Figuur 11 kan bevestigd worden dat er op deze momenten verschillende parameters tegelijkertijd ongunstig zijn en zorgen voor een verlaagde droging en verhoogd vochtgehalte. Aangezien de locaties van de uitgekozen cases (Antwerpen en



Figuur 11: MRY buitenklimaat grafieken parameters

Brussel) niet heel erg verschillen van klimaat, wordt in alle de cases gewerkt met hetzelfde MRY-klimaat. Daarnaast worden ook voor het binnenklimaat de MRY-klimaatfiles gebruikt, volgens de studie van Vandemeulebroecke et al., die opgesteld zijn voor de temperatuur (waarden tussen 20-25°C), en de relatieve vochtigheid (waarden tussen 40-65%), van binnen. Andere parameters zijn ingesteld volgens onder meer de studie van Calle et al. [28]. Zo is de langegolf-emissiviteit vastgelegd op 0,9, de korte golf-emissiviteit op 0,6 voor rode baksteen, en 0.2 voor witte pleister. De convectieve warmte- en dampoverdrachtscoëfficiënt van het buitenklimaat zijn ingesteld op 4 W/m<sup>2</sup>K en 2,44e-8 s/m, terwijl de binnenklimaatcoëfficiënten zijn vastgelegd op 8 W/m<sup>2</sup>K en 2.5e-08 s/m. Om een evenwicht te genereren in de constructie, zijn vier conditioneringsjaren gesimuleerd [45].

Voor de constructies wordt gekozen voor de oriëntatie die als de meest kritische wordt beschouwd. In het geval van België bevindt de kritische oriëntatie zich in het zuidwesten, daarom wordt voor elke casestudie de gevel geanalyseerd die het dichtst bij het zuidwesten is gesitueerd. Deze kan variëren per case ten gevolge van een andere geveloriëntatie, een meer kritische muuropbouw in combinatie met een minder kritische oriëntatie of meer regenbelasting of windstuwing aan de gevel met een minder kritische oriëntatie. Zoals eerder vermeld in §2.1.3 Relevante parameters, is de regenbelasting zelf afhankelijk van de geometrie van het gebouw, de hoogte, de locatie op de gevel en de windoriëntatie. De regenblootstellingscoëfficiënt in Delphin maakt het mogelijk om rekening te houden met eventuele luifels en beschermingen van de gevel (lage waarden) en slechte detaillering van dorpels of delen van het gebouw waar veel slagregen verzamelt (hoge waarden) [28]. In dit onderzoek zal voor elke configuratie de regenblootstellingscoëfficiënt varieren tussen de vastgelegde waarden 0.5/0.7/1.5.

Waarbij de waarde 0.5 overeenkomt met een normale belasting en waarde 1.5 overeenkomt met een hoge belasting.

Het is wel belangrijkrijk om op te merken dat verschillende secundaire effecten van slagregen (bijv. spatten van regendruppels, afvloeiing van regenwater langs het oppervlak) nog niet zijn geïmplementeerd in de huidige HAM-modellen [59]. Het selecteren van een hogere regenbelasting 0.7/1.5, staat in voor deze secundaire effecten.

#### Materiaaleigenschappen

In dit onderzoek zal worden gefocust op volsteens metselwerk, overeenstemmend met de twee uitgekozen casussen. Historische metselwerk is moeilijk te modelleren, zoals eerder besproken in §2.1.3 Relevante parameters. Vanwege de natuurlijke oorsprong van de aggregaten en de verschillende handmatige productieprocessen die in de loop van de tijd zijn gebruikt, zijn de materiaaleigenschappen van de gebruikte baksteen vaak onzeker [28]. In de geselecteerde case van de Vlaamse Hoeve zijn bepaalde eigenschappen van de baksteen bekend, door middel van gestandaardiseerde laboratoriumtesten. Echter is deze beschikbare informatie is nog niet voldoende om het hygrothermische gedrag van de baksteen volledig te voorspellen.



Figuur 12: Algemene beslissingsboom voor clustering met het vastgestelde clusterschema voor 15 stenen, volgens onderzoek Vanderschelden et al. [45]



Figuur 13: Clusterschema van degradatieprofielen: schimmel bovenaan, houtrot in het midden en vorstschade onderaan, volgens onderzoek Vanderschelden et al. [45]

In het onderzoek "On the potential of clustering approaches [...] in solid masonry constructions" van Vanderschelden et al, wordt er een flowchart, zie Figuur 12, weergegeven van de verschillende bakstenen beschikbaar in de Delphin software, met per cluster de gerelateerde eigenschappen en schadefenomenen. Deze baksteenclusters zijn opgesteld op basis van gelijkenissen in fysische eigenschappen en hun response gedrag bij dynamische blootstelling [45]. In dit onderzoek worden, op basis van deze gegeven clustering drie soorten stenen uitgekozen, elk uit een verschillende cluster. Op Figuur 13 zijn de uitgekozen bakstenen aangeduid met een gele markering.

Hierbij wordt baksteen ZK, van de Delphin Material Database, "Old Building Bricks - Dresden", gekozen voor zijn hoger risico op houtrot en vorst-dooischade en baksteen ZC wordt gekozen voor zijn hoger risico op schimmelgroei en vorst-dooischade. Baksteen ZG wordt geselecteerd aangezien deze baksteen meer gemiddeld presteert ten opzichte van de andere bakstenen, en daarnaast een risico heeft voor de drie schadefenomenen, juist niet in heel hoge mate.

Aangezien regenwaterinfiltraties als gevolg van inconsistenties in metselwerk moeilijk zijn te kwantificeren, wordt het metselwerk verondersteld perfect te zijn [28], [60]. Verder wordt er ook geen rekening gehouden met het zwaartekrachtseffect van afvloeiing aangezien over de invloed deze functie weinig informatie bekend is. Daarnaast wordt er door ontbreken van specifieke informatie geen rekening gehouden met aanwezige schade, vaak omdat deze ook niet aanwezig of waarneembaar is. Aangezien in beide cases gewerkt is met kalkcementmorel als mortel tussen de bakstenen, wordt dit geen variërende, maar een vaste parameter in dit onderzoek.

Zoals eerder aangegeven in §2.1.3 Relevante parameters, heerst er tussen alle materialen onderling een interfaceweerstand (IR). In dit onderzoek is in eerste instantie geen rekening gehouden met deze interface weerstand, wel zijn er enkele testen uitgevoerd om te kunnen inschatten wat de invloed is van deze weerstand tussen de mortellagen en de baksteen. Deze interfaceweerstand duidt op het feit dat het vochttransport door een samengestelde structuur afwijkt van het vochttransport doorheen elke laag afzonderlijk, wat resulteert in een vertraagde wateropname [61]. Uit onderzoek van Derluyn et al. is gebleken dat deze afwijking het gevolg is van enerzijds de aanwezigheid van een grensweerstand bij de interface tussen baksteen en mortel, en anderzijds wijzigingen in de eigenschappen van de mortel tijdens het uitharden [61], [62]. Beide fenomenen zijn afhankelijk van de omstandigheden waarin de mortel uithardt, droog of nat [62]. Hierbij is de IR gelijk aan 0 bij perfect hydraulisch contact, 2,5e<sup>10</sup> m/s bij natte uitharding en 5e10 m/s bij droge uitharding van het metselwerk [56]. In dit onderzoek wordt er voor de testen van uit gegaan dat de kalkmortel "wet cured" is, en dus zal overeenkomen met een interfaceweerstand van 2,5e<sup>10</sup> m/s. Daarnaast wordt er in het model een perfecte poriënstructuur aangenomen, waarbij een porie in baksteen naadloos overloopt in een porie in de mortel. Dit zal in de realiteit ook overeenstemmen met weerstand, waarmee geen rekening wordt gehouden.

Verder hebben de twee cases ook een andere dikte van het metselwerk, wat onder andere leidt tot verschillende metselwerkverbanden. Van de verschillende constructies worden de verschillende configuraties met een andere metselwerkopbouw onderzocht per case. Aangezien de gebruikte kalkmortel door zijn materiaaleigenschappen de steen kan bevochtigen, zie §2.1.3 Relevante parameters, kan de positie van deze kalkmortel een rol spelen in het hygrothermisch gedrag van de constructie en als gevolg ook invloed hebben op de schadefenomenen.

#### <u>Raamaansluitingen</u>

Na een aantal testen op raamaansluitingen is gebleken dat de glasramen van het schrijnwerk geen invloed hebben op de simulatie, aangezien deze wind en waterdicht zijn en deze net als de raamkaders worden verondersteld een U-waarde te hebben van 1.1 W/m<sup>2</sup>K. Hierdoor zullen de glaspanelen zelf worden weggelaten uit de simulaties om de efficiëntie te verhogen en de rekentijd te verlagen. Verder worden alle aansluitingen verondersteld luchtdicht te zijn, er wordt dus aangenomen dat alle materialen correct zijn geplaatst zonder eventuele defecten.

# 3.3.3 Postprocessing

Statistische risico-analyse op basis van de resultaten van de uitgevoerde simulaties kan het risico op schade in metselwerkconstructies identificeren [28]. Hierbij worden er, zoals besproken in §2.1.2 Schadegevallen, beoordelingscriteria van vorst-dooischade, schimmelgroei en houtrot gehanteerd. De resultaten hiervan zullen worden weergegeven in verschillende plots. Dit gebeurt aan de hand van scatterplots gecombineerd met boxplots om de lezer een snel inzicht geven in het gedrag van eigenschappen en hun relatie tot risico op degradatie. Aangezien er wordt gewerkt met categorische data, zal deze worden voorgesteld per configuratie/categorie om daarna de data te rangschikken volgens de andere gekozen variërende parameters. Bij de evaluatie van grafieken vertegenwoordigt elke afzonderlijke stip het risico op degradatie en wordt een kleurenschema gebruikt om de verschillende configuraties afzonderlijk te kunnen identificeren.

## Beoordelingscriteria voor vorst-dooischade

Onder onderzoekers wordt schade veroorzaakt door het bevriezen van water sterk bediscussieerd. Er zijn meerdere criteria die worden gebruikt en vergeleken [45]. In het onderzoek van Calle et al. worden deze verschillende criteria beschreven, waarbij het eerste criterium de maximale hoeveelheid kritische vries-dooicycli (FTC) uitdrukt, met het kritische vochtgehalte gelijk aan 25% van het effectieve vochtgehalte. Het tweede criteria is beschreven als de gemiddelde ijsmassadichtheid (IMD) die berekend wordt met inbegrip van de vriespuntdepressie, veroorzaakt door de optredende capillaire druk. Tenslotte wordt het derde en vierde criterium beschreven als de vocht/temperatuur gerelateerde spanning van de constructie tussen het buitenoppervlak en een diepte van 5 mm [44].

In deze studie zal in de Delphin 6.1 software gebruik gemaakt worden van het ijsmassavolume om de vorst-dooischade te berekenen op basis van het thermodynamisch evenwicht tussen het watergehalte in de ijsfase en de vloeibare fase. In de ijsmassavolumemethode wordt een cyclus geteld wanneer de dichtheid van de ijsmassa boven het porievolume het grensniveau overschrijdt, ingesteld op een limiet van 25%, gebaseerd op de studie van Mensinga et al. [26]. Mesinga gaf wel aan dat de kritieksgraad sterk afhangt van de poriestructuur, wat impliceert dat het criterium voor elk baksteentype anders is en deze vergelijkende studie compliceert [45].

# Beoordelingscriteria voor schimmelgroei

Ook voor schimmel zijn er verschillende beoordelingsmodellen aanwezig. Zoals in §2.1.2 Schadegevallen, al is aangehaald zal in deze studie worden gewerkt met het bijgewerkte VTT-model door Hukka en Viitanen. Het model houdt naast de vanzelfsprekende factoren zoals de temperatuur, de luchtvochtigheid en de aanwezigheid van voedingsstoffen, ook rekening met schimmelinitiatie, groeisnelheid en afname van groei tijdens drogere perioden [34], [45]. Op basis van de temperatuur en de luchtvochtigheid maakt het model gebruik van wiskundige vergelijkingen om de groei van schimmel in de tijd te voorspellen. Tabel 1 toont de schimmelindex die varieert van 0 tot 6, waarbij hogere waarden overeenkomen met ernstigere degradatie.

Onderstaande wiskundige vergelijkingen zijn overgenomen uit de studie van Hukka et al. en Viitanen et al., waarbij de schimmelgroei op het binnenoppervlak voorspeld is door het bijgewerkte VTT-model [32], [34], [29].

De kritische relatieve vochtigheid wordt gedefinieerd. Deze representeert de minimale vochtigheid waarbij schimmelgroei begint bij langdurige blootstelling.

$$RH_{\rm crit} = \begin{cases} -0.00267T^3 + 0.16T^2 - 3.13T + 100 \text{ when } T < 20^{\circ}\text{C} \\ RH_{\rm crit} \text{ when } T > 20^{\circ}\text{C} \end{cases}$$

De toename of afname van de schimmelvorming wordt berekend door het gebruik van een differentiaalvergelijking met tijdstappen uitgedrukt in uren.

$$\frac{dM}{dt} = \frac{k_1 k_2}{168(-0.68\ln(T) - 13.9\ln(RH) + 0.14W - 0.33SQ + 66.02)}$$

Factor k1 bepaalt de intensiteit van de groei, W is afhankelijk is van de houtsoort, SQ implementeert de oppervlaktekwaliteit en k2 definieert de vermindering van de groei wanneer de schimmelindex het maximale piekniveau van schimmel nadert.

$$k_2 = max[1 - \exp[2.3(M - M_{max})], 0]$$

Het verbeterd model (Viitanen en Ojanen, 2007) is uitgebreid voor andere materialen, naast dennenhout. Vandaar factoren k1, k2, A, B en C in de vergelijkingen staan. Deze zijn afhankelijk van het gevoeligheidsniveau van het materiaal. In Tabel 2 zijn verschillende klassen gedefinieerd, met de overeenkomstige parameters in Tabel 3. In deze studie zal gewerkt worden met klasse "Sensitive". De schimmelgroei zal in dit onderzoek worden geëvalueerd op verschillende soorten oppervlakken, waarbij geen van allen hoog sensitief is.

De maximale schimmelindex hangt af van de relatieve vochtigheid en de temperatuur:

$$M_{max} = A + B \cdot \frac{RH_{crit} - RH}{RH_{crit} - 100} - C \cdot \left(\frac{RH_{crit} - RH}{RH_{crit} - 100}\right)^2$$

Wanneer schimmel niet wordt blootgesteld aan voldoende vocht of temperatuur, neemt de groeisnelheid tijdens deze droge perioden af. De vertraging wordt beschreven door de wiskundige beschrijving.

$$\frac{dM}{dt} = \begin{cases} -0.000133, & \text{when } t - t_1 < 6h \\ 0,6h < & \text{when } t - t_1 < 24h \\ -0.000667 & \text{when } t - t_1 > 24h \end{cases}$$

Tabel 1: Classificatie van schimmelindexen volgens Viitanen et al. [34]

Index	Groei	Beschrijving	
0	Geen schimmelgroei	Sporen niet geactiveerd	
Ι	Kleine hoeveelheden schimmel op het oppervlak	Beginfase van groei	Microscopisch niveau
2	<10% dekking van schimmel op oppervlak		
3	IO-30% dekking van schimmel op het oppervlak of <50% dekking van schimmel (microscopisch klein)	Nieuwe sporen geproduceerd	Visueel detecteerbaar
4	30-70% dekking van schimmel op oppervlak of >50% dekking van schimmel (microscopisch klein)	Gematigde groei	
5	>70% dekking van schimmel op het oppervlak	Volop groei	
6	Zeer zware, dichte schimmelgroei bedekt bijna 100% van het oppervlak	Dekking rond de 100%	

Tabel 2: Schimmelgevoeligheidsklassen volgens Ojanen et al. [63],[64]

Gevoelligheidsklassen	Materialen in experiment	Materiaalgroepen
Very sensitive (vs)	Dennen spinthout	Onbehandeld hout; bevat veel voedingsstoffen voor biologische groei
Sensitive (s)	Gelijmde houten planken, PUR met papieroppervlak, Sparren	Geschaafd hout; papiergecoate producten, platen op houtbasis
Medium resistant (mr)	Beton, cellenbeton en cellenbeton, Glaswol, polyesterwol	Minerale vezels, op basis van cement of kunststof
Resistant (r)	PUR met gepolijst oppervlak	Glas- en metaalproducten, materialen met efficiënte beschermende compoundbehandelingen

Tabel 3: Parameters voor verschillende schimmelgevoeligheidsklassen volgens Ojanen et al. [63],[64]

Gevoelligheidsklassen	${f k_{ m I}}$ (als $M < 1$ )	$f k_2$ (als $M \geqslant 1$ )	M <sub>max</sub>	(invloed o	p k <sub>2</sub> )	RH <sub>min</sub> (%)
			А	В	С	
Very sensitive (vs)	1	2	1	7	2	80
Sensitive (s)	0.578	0.386	0.3	6	I	80
Medium resistant (mr)	0.072	0.097	0	5	1.5	85
Resistant (r)	0.033	0.014	0	3	1	85

# Beoordelingscriteria voor houtrot

Houtrot wordt in dit onderzoek berekend via de experimentele tests op grof dennenhout door Brischke en Rapp. In de uitgekozen cases zit geen houten structuur ingebed in de muur. Toch wordt houtrot berekend op 100 mm vanuit het binnenvlak van het metselwerk aangezien dit in andere projecten in de praktijk wel kan voorkomen en relevant kan zijn. Daarom wordt er dus ook geen houten balk gemodelleerd in de simulaties, maar is aangenomen dat de hypothetische houten balken in de muur blootgesteld wordt aan dezelfde relatieve vochtigheid en temperatuurgradiënten als het omringende metselwerk. Deze temperatuur en luchtvochtigheid worden geïmplementeerd in wiskundige vergelijkingen voor postprocessing, om de toename van houtrot in de tijd te voorspellen. Hierbij toont tabel 4 de vervalscore die varieert van 0 tot 4, waarbij hogere waarden overeenkomen met ernstigere degradatie.

Onderstaande wiskundige vergelijkingen zijn volledig overgenomen uit de studie van Brischke en Rapp [37].

Het effect van vochtgehalte en temperatuur en de groei van houtrot wordt beschreven door een dosis-responsfunctie. De dagelijkse dosis D wordt berekend met een temperatuurgeïnduceerde component DT, waarbij de dagelijkse temperatuur [°C] wordt gebruikt en de door het vochtgehalte geïnduceerde component DMC afhankelijk is van het dagelijkse gemiddelde vochtgehalte [%]. De parameters zijn gedefinieerd op een locatie van 100 mm van het binnenmetselwerk.

$$D = \frac{a.D_T(T) + D_{MC}(MC)}{a+1} \text{ if } D_{MC} > 0 \text{ and } > 0$$

$$D_T(T) = \begin{cases} 0 & \text{if } T \langle 0^\circ C \text{ or } T \rangle 40^\circ C \\ k \cdot T^4 + l \cdot T^3 - m \cdot T^2 + q^* T & \text{if } T > 0^\circ C \text{ and } T < 40^\circ C \end{cases}$$

 $D_{MC}(MC) = \begin{cases} 0 & \text{if } MC < 25\% \\ e.MC^5 - f.MC^4 + g \cdot MC^3 - h \cdot MC^2 + i.MC - j & \text{if } MC \ge 25\% \end{cases}$ 

De resultaten van het voorspellingsmodel en de experimentele resultaten van veldproeven zijn uitgerust met een Gompertz-functie en beschrijven met een houtdegradatie score voor het beoordeelde spinthout van grove dennen, volgens Tabel 4. Deze parameters zijn afhankelijk van materiaal [29].

$$DR(D(n)) = 4.\exp\left(-\exp\left(1.7716 - (0.0032^*D(n))\right)\right)$$

Doordat uit onderzoek van Vereecken en Roels volgt dat het risoco op houtrot toeneemt bij slechte luchtdichtheid rond de balkkop, wordt in dit onderzoek uitgegaan van een luchtdichte afdichting rond de balkkop [36]. Het is belangrijk om te weten dat er nog niet heel veel geweten is over de invloed van bepaalde parameters bij het berekenen van de Gompertz-functie. Daarnaast zijn er bij de uitgekozen cases geen houten balken in de metselwerkstructuur aanwezig, en is dus de houtsoort onbekend. Daarom zal er naast de berekening van de vervalscore, ook het aantal dosissen steeds worden weergegeven bij het presenteren van de resultaten.

Verval score	Classificatie
0	Geen aanval
1	Lichte aanval
2	Matige aanval
3	Ernstige aanval
4	Falen

Tabel 4: Verval score volgens NBN-EN 252 "Field test method for determining the relative protective effectiveness of a wood preservative in ground contact" uit CEN 2014

# 3.3.4 Beperkingen

Tijdens het onderzoek zijn vaak enkele beperkingen ondervonden, waarvan de simulatietijd en het opslaggeheugen de meest voorkomende zijn. Als gevolg van de hoeveelheid gekozen variërende parameters, ontstaat al snel een omvangrijk aantal simulaties per stap.

In Stap 1, de 1D-simulaties, is het mogelijk om het opbouwproces in het simulatieprogramma te automatiseren en de simulaties en post-processing in een loop te plaatsen. De rekentijd van de 1D-simulaties is onder controle, waarbij elke simulatie ongeveer 10-30 minuten duurt, afhankelijk van het aantal gebruikte materialen. Op deze manier kan Stap 1 worden uitgevoerd op een standaard PC, wat zorgt voor een snelle verwerking, zie Tabel 5 voor een concreet voorbeeld.

Daarentegen verloopt de 2<sup>e</sup> stap, de 1D-2D simulaties, wat moeilijker. De simulaties vergen aanzienlijk meer rekentijd, variërend van minimaal 1 tot 10 uur per simulatie, en in geval van complexe simulaties met veel materialen of een hoge regenbelastingscoëfficiënt kan dit oplopen tot 24 uur per simulatie, zie Tabel 5 voor een concreet voorbeeld. Sommige simulaties kunnen echter niet worden uitgevoerd vanwege vastlopen op een specifiek punt met intense regenval bij lage temperaturen. Gezien de hoge rekentijd die deze stap vereist, worden de simulaties uitgevoerd op de rekencomputer van de onderzoeksgroep bouwfysica. Hierop kunnen simultaan een twaalftal simulaties worden uitgevoerd, wat het gehele proces versnelt. Naast het feit dat de 1D-2D simulaties veel rekentijd in beslag nemen, leiden deze ook tot opslagproblemen. De 1D-2D simulaties vergen veel meer geheugen dan de 1D simulaties, vanwege de grotere hoeveelheid gegevens in de "output fieldplots" als gevolg van de 2D-rasterverdeling. Deze fieldplots zijn nodig om de output na de post-processing over de gehele configuratie te kunnen vergelijken. Dit probleem kan worden opgelost door meer opslagcapaciteit te voorzien via een externe harde schijf of minder output fieldplots te genereren.

Voor stap 3, de 2D aansluitingsdetails, zijn enkele tests uitgevoerd op een gewone pc en de rekencomputer van de onderzoeksgroep, waaruit blijkt dat voornamelijk de rekentijd een significante beperking vormt. Een enkele 2D-simulatie duurt al snel ongeveer vijftien tot twintig dagen, indien deze niet vastloopt, waardoor het niet haalbaar lijkt om alle variërende parameters te evalueren zoals in de vorige stappen. Aangezien het moeilijk is om specifieke parameters te selecteren op basis van de

gegevens uit de cases of de resultaten uit de vorige stappen, is besloten om te zoeken naar een alternatieve aanpak. Daarom is de HPC, Stevin Computing Infrastructure, van de UGent ingezet voor het simuleren van de 2D simulaties. Hierbij is er de mogelijkheid om alle 2D simulaties simultaan te starten op 25 cores, wat de rekentijd enorm vooruithelpt. De simulatie wordt elke drie dagen heropgestart met de uitkomst van de voorbije dagen als initiële condities. Hierbij verlopen sommige simulaties sneller als andere, afhankelijk van het soort baksteen, regenbelasting, en de geometrie van het aansluitingsdetail, zie Tabel 5 voor een concreet voorbeeld. In deze tabel valt ook op dat de opslag van de 2D-simulaties een grote beperking vormt.

Soort simulatie	Voorbeeld	Opslag	Tijd	Aantal Cores	PC
1D deel 1	1D_VH_C1_ZC_1.5_PintO	291 MB	14 min	1	Eigen
1D deel 1	1D_VH_C1_ZC_1.5_Iso	490 MB	42 min	1	Eigen
binnenisolatie					
1D deel 2	1D_VH_C3_ZC_1.5_PintO	296 MB	28 min	1	Eigen
1D deel 2	1D_VH_C3_ZC_1.5_Iso	494 MB	43 min	1	Eigen
binnenisolatie					
1D-2D deel 1	1D-2D_VH_C1_ZC_1.5_PintO	1,30 GB	1h 58min	1	UGent
1D-2D deel 1	1D-2D_VH_C1_ZC_1.5_Iso	2,47 GB	3h 44min	1	UGent
binnenisolatie					
1D-2D deel 2	1D-2D_VH_C3_ZC_1.5_PintO	2,86 GB	4h 53min	1	UGent
1D-2D deel 2	1D-2D_VH_C3_ZC_1.5_lso	5,16 GB	11h 15min	1	UGent
binnenisolatie					
2D Onder	2D_VH_O_ZG_0.7_Iso_HG	44,4 GB	2,6 d	25	HPC
Homogeen					
2D Onder	2D_VH_O_ZG_0.7_Iso	44,4 GB	2,5 d	25	HPC
2D Boven	2D_VH_B_ZG_0.7_Iso	35,5 GB	8,7 d	25	HPC
2D Horizontaal	2D_VH_H_ZG_0.7_Iso	-	+22 d	25	HPC

Tabel 5: Beperkingen van de simulatiestappen

# **4**. 1D-Simulaties

# 4.1 Vertaling naar 1D simulaties

In dit hoofdstuk zal de eerste stap, de 1D-simulaties, worden onderzocht. Deze stap bestaat uit twee onderdelen: Deel 1 geeft de metselwerkstructuur zonder mortelvoegen weer, terwijl Deel 2 de metselwerkstructuur met onderbrekingen door mortelvoegen weergeeft. Beide cases zullen deze twee stappen doorlopen, waardoor de verschillende constructies, bestaande uit configuraties, onderling vergeleken kunnen worden, zie §Benamingen, voor context bij de gebruikte naamgeving. Op deze manier kunnen er voorlopige conclusies worden getrokken over het degradatiegedrag van de constructie per configuratie. Aan de hand van de bevindingen uit de cases, kan dit verder worden geëvalueerd in de bredere context en praktijk.

# 4.2 Vlaamse Hoeve Meise

De eerste case betreft de Vlaamse Hoeve in Meise, opgevolgd door het bureau Archipelago. Deze case vertoont een uniforme wandopbouw langs alle gevels, waardoor de meest kritische gevel wordt bepaald op basis van de meest kritische oriëntatie. Hierdoor wordt er in het onderzoek en de simulaties gefocust op de verschillende wandopbouwconstructies aan de westzijde van het gebouw.

Voor de start van het onderzoek is de Vlaamse Hoeve (VH) grondig geanalyseerd. Samen met werfopvolger arch. Yannick Veny is een plaatsbezoek uitgevoerd en zijn de materiaaleigenschappen en afmetingen van de wandopbouw geanalyseerd. De detailtekeningen van de bouwknopen zijn ontleed, zorgvuldig bestudeerd en opnieuw geherconstrueerd op basis van werffoto's en in samenspraak met Archipelago, zie §Bijlage A..

# 4.2.1 Bestaande toestand

Eerst wordt de oorspronkelijk bestaande toestand onderzocht. Hierbij worden twee verschillende constructies van muuropbouwen geïdentificeerd bij de raamaansluitingen aan de westkant: een constructie met volledig volsteens metselwerk van 41cm dik in een staand metselwerkverband, en een constructie met metselwerk in combinatie met blauwe hardsteen.

Hieronder, in Figuur 14 en Figuur 15, wordt de documentatie van de analyse en het onderzoek van de Vlaamse Hoeve voorgesteld, meer informatie is terug te vinden in §Bijlage A..









Aanzicht: Westgevel



Locatie: Meise

Snede A: Door de westgevel

Figuur 14: Algemene infofiche Vlaamse Hoeve

# Materiaaleigenschappen bestaande toestand



Baksteen westgevel				
Parameter	Symbool	Eenheid	Gemiddelde waarde	
Densiteit	ρ	[kg/m³]	1854 kg/m³	
Waterabsorptiecoëfficiënt	$A_w$	[kg/s <sup>0.5</sup> m²]	0,1936 kg/s <sup>0.5</sup> m²	
Capillair vochtgehalte	w <sub>cap</sub>	[kg/m³]	144,2 kg/m³	

+ Delphin 6.1 | Old Building Brick Dresden ZC/ZG/ZK | ID : 491/495/499

#### Mortel

Geen specifieke gegevens over de gebruikte kalkmortel

> Delphin 6.1 | Lime cement mortar (low cement ratio) | ID : 718

Blauwe Hardsteen					
Densiteit	ρ	[kg/m³]	2687 kg/m³		
+ Delphin 6.1   Shell Limes	+ Delphin 6.1   Shell Limestone Facade Element   ID : 560				
Binnenpleister dampdicht (PintD)/dampopen (PintO)					
Dampdiffusieweerstand PintD	μ	[-]	12		
Waterabsorptiecoëfficiënt PintD	$A_w$	[kg/s <sup>0.5</sup> m²]	0,127 kg/s <sup>0.5</sup> m²		

[-]

[kg/s<sup>0.5</sup>m<sup>2</sup>]

0

0,250 kg/s<sup>0.5</sup>m<sup>2</sup>

+ Delphin 6.1 | Lime Plaster (historical) | ID : 148

μ

Dampdiffusieweerstand PintO

Waterabsorptiecoëfficiënt PintO Aw

Figuur 15: Materiaaleigenschappen bestaande toestand, Vlaamse Hoeve, Stap 1



De gedefinieerde configuraties uit Figuur 16 worden in deze eerste stap beschouwd als de zes verschillende simulatiegroepen, voortkomend uit de twee gedefinieerde constructies, die de basis zullen vormen voor het genereren van de verschillende scenario's. Hierbij behoren de bovenste configuraties per constructie tot deel 1 van stap 1 en de onderste vier tot deel 2 van stap 1. Per configuratie zijn er vaste en variabele parameters vastgelegd op basis van §3.3.2 Aannames. Deze parameters zijn hieronder weergegeven in Tabel 6.

Aangezien de materiaaleigenschappen van de bestaande binnenpleister onbekend zijn, wordt hier als binnenpleister gekozen voor een dampopen binnenpleister met een hogere absorptiecoëfficiënt (PIntO) en een dampdichtere binnenpleister (PIntD) met een lagere absorptiecoëfficiënt, zie Figuur 15 voor de materiaaleigenschappen.

Parameters Vlaamse Hoeve				
VARIABEL			VAST	
Regenbelasting			Oriëntatie	
0.5 0.7 1.5		1.5	West: 270°	
Soort baksteen			Soort mortel	
ZC	ZG	ZK	Kalkmortel	
Binnenpleister baksteen				
PintD		PintO		

1 volledige configuratie VH = 3 x regenbelasting + 3 x soort baksteen + 2 x binnenpleister

= 18 scenario's per configuratie

→ totaal 18 scenario's x 6 configuraties = 108 simulaties voor de bestaande toestand VH

#### Resultaten deel 1

Configuratie 1 (C1), uit constructie volsteens metselwerk, vertoont enkel bij een regenbelasting van 1.5 schade, zie gele stippen op Figuur 17, 18 en 19, grafieken "regenbelasting". Hierbij heeft baksteen ZK de hoogste kans op vorst-dooischade en het meeste risico op houtrot, baksteen ZC heeft het hoogste risico op schimmelgroei zie Figuur 17, 18 en 19 grafieken "baksteen". Deze bevindingen komen overeen met de clusterstudie van Vanderschelden et al. [45]. De grafiek "pleister" geeft het verschil weer in gebruik van een dampdichte, laag absorberende binnenpleister en een dampopen, hoger absorberende binnenpleister, voor exacte waarden zie Figuur 15. Hierbij blijft de vorst-dooischade steeds gelijk bij beide soorten binnenpleisters. Voor schimmel is er enkel schade als de binnenpleister dampopen en hoogabsorberend is en voor houtrot is er juist meer kans op schade als de binnenpleister dampdicht en laagabsorberend is. Dit is vanzelfsprekend voor schimmelgroei, aangezien een hoge absorptie op het binnenoppervlak zorgt voor meer vochtopname en dus is er een hogere kans op schimmelgroei. Daarentegen zorgt een lager absorptievermogen en dampdichtere binnenpleister voor een slechtere uitdroging van het metselwerk, waardoor er meer risico is op houtrot op 100mm van het binnenmetselwerk. Bij configuratie 2 (C2), blauwe hardsteen in combinatie met volsteens metselwerk, is er een totale afwezigheid van de drie uitgekozen schadefenomenen, zelfs bij de hoogste regenbelasting, zie oranje stippen op Figuur 17, 18 en 19, grafieken "regenbelasting".

Op Figuur 19 en 20 zijn de resultaten voor het risico op houtrot weergegeven, hierbij geeft Figuur 19 het aantal dosissen weer, en Figuur 20 de vervalscore volgens het vervalscoremodel van Brischke en Rapp [37]. Zoals besproken in §3.3.3 Postprocessing, is deze vervalscore sterk afhankelijk van het soort

hout, dat hier onbekend is, daarom wordt het risico op houtrot voornamelijk geëvalueerd volgens het aantal dosissen en dan vergeleken met de vervalscore. Als de resultaten van het aantal dosissen van Figuur 19 worden vergeleken met de waarden die omgerekend zijn naar het vervalscoremodel op Figuur 20, zijn hier niet veel verschillen op te merken, de verhoudingen onderling tussen de waarden en scenario's met de meest kritische piekwaarden blijven gelijk.

## Resultaten deel 2

De schimmelgroei en het risico op houtrot blijven relatief gelijk tussen configuratie 3 (C3) en 4 (C4), volsteens metselwerk. Bij de vorst-dooicycli zijn er wel bepaalde verschillen tussen de configuraties onderling, bij de constructie van het volsteens metselwerk. Zo is er een daling bij C4 ten opzichte van C3 en een daling van C3, C4 (deel 2) ten opzichte van C1 (deel 1), zie Figuur 17 grafiek "configuraties". Bij C5 en C6, constructie blauwe hardsteen in combinatie met volsteens metselwerk, is er net zoals deel 1, een totale afwezigheid van schade, zelfs bij de hoogste regenbelasting.







Figuur 18: Resultaten schimmelgroei bestaande toestand, Vlaamse Hoeve, Stap 1



Figuur 19: Resultaten houtrot, volgens aantal dosissen, bestaande toestand, Vlaamse Hoeve, Stap 1



Figuur 20: Resultaten houtrot, volgens vervalscore, bestaande toestand, Vlaamse Hoeve, Stap 1

## Vergelijking verschillende constructies

Uit de eerder besproken resultaten volgt dat constructie 1 (volsteens metselwerk) kritischer is dan constructie 2 (met blauwe hardsteen), voor de geëvalueerde schadefenomenen. Dit wordt verder onderzocht in Figuur 21, die de fieldplots van het gehele jaar in functie van de coördinaten van de constructie weergeeft, van het vochtgehalte (moisture content) en de relatieve vochtigheid van de twee constructies.



Figuur 21: Vergelijking vochtgehalte en relatieve vochtigheid van C1 en C2 (ZC, RF1.5, PIntO)

Voor deze fieldplots wordt gekozen voor het scenario met baksteen ZC, de meest kritische baksteen voor schimmelgroei en vorst-dooischade, een regenbelasting van 1.5 en een dampopen, hoger absorberende binnenpleister. Dit scenario heeft volgens de resultatengrafieken, (Figuur 17, 18 en 19), kans op schade, wat het makkelijker maakt om een verband te leggen tussen de resultaten en de fieldplots en zo de oorzaak hiervan te detecteren.

Bij C1 is te zien dat het metselwerk een vrij hoog vochtgehalte heeft door de regenbelasting. Dit in tegenstelling tot C2, waarbij de slagregen sterk wordt geremd door de laag absorberende blauwe hardsteen. Hierdoor zal het capillair vocht bij C2 niet infiltreren naar de binnenkant van het metselwerk, wat wel zal voorkomen in C1. Hoewel C1 geen beschermende blauwe hardsteen voor het metselwerk heeft, zal deze configuratie toch bij zeer hoge regenbelasting van 1.5, niet volledig verzadigd raken. In de zomerperiode is er duidelijk een droging te zien van het metselwerk, hoewel er nooit een volledige droging plaatsvindt. Wanneer er niet genoeg droging optreedt doordat er veel slagregen en weinig zonnestraling aanwezig is, zal het capillair vocht kunnen migreren naar de binnenpleister van de constructie. Zo zijn op de fieldplot de twee kritische punten van het MRY duidelijk waarneembaar, rond midden maart en eind november, zie §3.3.2 Aannames. Op deze momenten zal het risico op schimmelgroei dan ook stijgen, waarvan het resultaat, geëvalueerd over het gehele jaar, is weergegeven op de resultatengrafiek, Figuur 18.

Als C1 en C2 worden vergeleken is er een minder groot verschil te zien tussen de relatieve vochtigheid als tussen de moisture content fieldplots. Zo lijkt het dat de blauwe hardsteen de constructie goed zal beschermen tegen capillair vocht, zoals slagregen, maar minder goed tegen damptransport zoals de hoge relatieve vochtigheid van buiten. Als de relatieve vochtigheid wordt vergeleken kan er worden waargenomen dat deze weinig droogt in de zomerperiode. Deze hogere relatieve vochtigheid komt doordat het droogpotentieel te laag is na de hevige regenvallen. Het al dan niet beschermen tegen damptransport door de blauwe hardsteen is dus nog niet volledig duidelijk.

#### Vergelijking verschillende configuraties

Als de resultaten van deel 1 en deel 2 met elkaar worden vergeleken zijn er, zoals kort aangehaald in de resultaten, maar enkele kleine verschillen te zien. De kans op schimmelgroei en het risico op houtrot gedragen zich relatief gelijk in beide delen. Enkel bij het risico op vorst-dooischade zijn er enkele verschillen te zien bij de resultatengrafieken van Figuur 17, tussen deel 1 en deel 2, en tussen de configuraties van deel 2 onderling. Figuur 22 vergelijkt het ijsmassavolume (gelinkt aan vorst-dooischade) en relatieve vochtigheid (gelinkt aan de schimmelgroei) tussen de configuraties, opnieuw voor scenario ZC, regenbelasting 1.5 en een dampopen absorberende binnenpleister.



Figuur 22: Vergelijkingen deel 1 (C1) en deel 2 (C3 en C4) Bestaande Toestand, (ZC, RF1.5, PIntO): a) IJsmassavolume op 5mm van buitenmetselwerk, b) relatieve vochtigheid op binnenoppervlak

Figuur 22a bevestigt de resultaten van Figuur 17. Uit analyse blijkt dat C1 met een homogene metselwerkopbouw, kritischer presteert op het gebied van kans op vorst-dooischade, dan C3 en vooral C4. C4 heeft een metselwerkopbouw waarbij de verticale mortellaag dichter bij het meetpunt van de vorst-dooischade ligt dan bij C3. Deze kalkmortellaag heeft een hoge absorptiecoëfficiënt en kan op die manier vocht opnemen uit de constructie en verspreiden. Een mogelijke theorie zou dus kunnen zijn dat wanneer een mortellaag dicht bij een meetpunt ligt, en er meerdere mortellagen aanwezig zijn, zoals bij C4, er meer vocht in de mortellaag kan worden vastgehouden en zo minder vocht aanwezig is in de baksteen. Dit zou mogelijks kunnen verklaren waarom C1, zonder aanwezige mortellagen, het meest kritisch presteert op vlak van vorst-dooischade.

Bij de relatieve vochtigheidspiek op Figuur 22b is het verschil tussen de configuraties verwaarloosbaar klein, waardoor hier ook geen verschil is te zien bij de resultaten van schimmelgroei op Figuur 18.

#### Vergelijking interface weerstand

Uit de voorgaande evaluatie van de bestaande toestand blijken de verticale mortellagen een verschil te maken, maar op vlak van stijging in de schadefenomenen, een eerder verwaarloosbaar verschil. Dit is echter niet volledig correct, in de realiteit heerst er een interfaceweerstand (IR) tussen materiaallagen, zoals in de literatuurstudie en de methodologie aan bod kwam. In vorige simulaties is er aangenomen dat er perfect hydraulisch contact is tussen alle materiaallagen. Na het vergelijken van deze simulaties met- en zonder verticale mortellaag, wordt er nu een extra vergelijking gemaakt om de invloed van de interface weerstand tussen de materialen kort te onderzoeken. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de waarden die naar voor zijn geschoven in §3.3.2 Aannames, namelijk IR = 2,5e<sup>10</sup> m/s. Deze waarde geeft een weerstand tussen de materiaallagen mee op het gebied van vochtgeleidbaarheid, waardoor de vochttransportcapaciteit op de overgang tussen twee materialen zal dalen.

Voor deze vergelijking wordt opnieuw scenario ZC, RF1.5 en PIntO geselecteerd.



Figuur 23: Vergelijking C1, C3 en C3 met interface weerstand (ZC, RF1.5, PIntO) tussen de materiaallagen

Uit de Figuur 23c blijkt dat er door de IR van de kalkmortellaag veel minder vocht wordt doorgegeven. Dezelfde pieken rond 15 maart en 21 november zijn aanwezig, maar in veel minder sterke mate, doordat het capillaire vocht wordt tegengehouden door de weerstand van de kalkmortellaag. Daarnaast is er ook een vertraging op te merken in het verschijnen de piek, vooral bij de tweede piek op Figuur 23c is dit zeer duidelijk waar te nemen.

Na de berekening van de schadefenomenen kan worden besloten dat bij de configuratie met interface weerstand er geen houtrot en schimmel meer optreden. Het risico op vorst-dooischade blijft echter gelijk. Het is het evident dat de kans op houtrot is afgenomen, omdat deze voornamelijk wordt bepaald door het capillair vochttransport, dat nu wordt tegengehouden door de interface weerstand. Aangezien schimmelgroei in de bestaande toestand vooral afhankelijk is van het damp- en capillair transport vanuit het buitenklimaat, is het begrijpelijk dat deze afneemt door de toevoeging van de interface weerstand.

# 4.2.2 Nieuwe Toestand

Na het evalueren van de bestaande toestand, wordt de nieuwe toestand onderzocht. Bij de Vlaamse Hoeve wordt hierbij een zachte dampopen binnenisolatie toegevoegd met een cementering langs de binnenzijde van het metselwerk om de binnenconstructie te beschermen tegen vocht.

Hieronder, in Figuur 24, is de analyse van de materiaaleigenschappen van de nieuwe toestand na renovatie terug te vinden. Deze informatie is gebaseerd op de gegeven technische fiches die Archipelago bezorgde.

# Materiaaleigenschappen nieuwe toestand



Cementering			
Parameter	Symbool	Eenheid	Gemiddelde waarde
Densiteit	ρ	[kg/m³]	1600 kg/m³
Waterabsorptiecoëfficiënt	$A_w$	[kg/s <sup>0.5</sup> m <sup>2</sup> ]	0,033 kg/s <sup>0.5</sup> m² (W2, EN 998-1)
Dampdiffusieweerstand	μ	[-]	25
Warmtegeleiding	λ	[W/m.K]	0,83 W/m.K
+ Delphin 6.1   Barrier Pla	ister Sotano   [	0:489	
Glaswol			
Warmtegeleiding	λ	[W/m.K]	0,033 W/m.K
+ Delphin 6.1   Mineral W	ool   ID : -1		
Rotswol			
Warmtegeleiding	λ	[W/m.K]	0,037 W/m.K
+ Delphin 6.1   Mineral W	ool   ID : -1		
Dampdichte houtvezelplaat			
Dampdiffusieweerstand	μ	[-]	510
Warmtegeleiding	λ	[W/m.K]	0,14 W/m.K
+ Delphin 6.1   OSB  ID :	-1		
Gipsplaat			
Densiteit	ρ	[kg/m <sup>3</sup> ]	1150 kg/m³
Dampdiffusieweerstand	μ	[-]	13
Warmtegeleiding	λ	[W/m.K]	0,32 W/m.K
+ Delphin 6.1   Gypsum B	oard   ID : 81		
Leempleister			
Densiteit	ρ	[kg/m <sup>3</sup> ]	1800 kg/m³
Dampdiffusieweerstand	μ	[-]	7,5
Warmtegeleiding	λ	[W/m.K]	0,91 W/m.K
Waterabsorptiecoëfficiënt	$A_w$	[kg/s <sup>0.5</sup> m <sup>2</sup> ]	0,00022 kg/s <sup>0.5</sup> m² (W3 DIN 18947)

+ Delphin 6.1 | Lime Plaster Indoor| ID : 681

Figuur 24: Materiaaleigenschappen nieuwe toestand, Vlaamse Hoeve, Stap 1

Bij het bepalen van sommige materiaaleigenschappen van bijvoorbeeld de baksteen, cementering of de leempleister zijn de overeenkomstige normen, waarnaar is verwezen op de technische fiches, geraadpleegd. Veel gebruikte tabellen zijn Tabel 7, 8 en 9, waarbij de absorptiecoëfficiënt wordt weergegeven per waterabsorptieklasse. Deze waarden zijn omgezet naar de juiste eenheden (kg/s<sup>0.5</sup>m<sup>2</sup>), zodat ze konden worden ingevoerd in de Delphin material file.

Tabel 7: Classificatie van initiële opzuiging (IW) volgens NBN-EN 771-1 "Specification for masonry units" uit CEN 2015

Categorie	Waarden
IW1	$\leq$ 0.5 kg/m <sup>2</sup> .min
IW2	0.5-1.5 kg/m².min
IW3	1.5-4.0 kg/m².min
IW4	$\geq$ 4.0 kg/m <sup>2</sup> .min

Tabel 8: Classificatie van waterabsorptie (W) volgens NBN-EN 998-1 "Specification for mortar for masonry" uit CEN 2016

Categorie	Waarden
W0	Niet gespecifieerd
W1	$C \leq 0.4 \text{ kg/m}^2.\text{min}^{0.5}$
W2	$C \le 0.2 \text{ kg/m}^2.\text{min}^{0.5}$

Tabel 9: Classificatie van waterabsorptie (WS) volgens DIN-18947 "German classification of moisture adsorption capacity of earth plasters"

Categorie	Waarden
WS 1	≥ 3.5 g/m².h
WS 2	≥ 5.0 g/m².h
WS 3	≥ 6.5 g/m².h



Meetpunt houtrot

• Meetpunt schimmelgroei voor de isolatie

• Meetpunt schimmelgroei na de isolatie

Net zoals bij de bestaande toestand vormen de zes gedefinieerde configuraties uit Figuur 25 de basis voor de verschillende scenario's. Deze scenario's worden net zoals de bestaande toestand gegenereerd met de vaste en variabele parameters uit Tabel 6, §4.2.1 Bestaande toestand. Doordat van alle toegevoegde materialen de gegevens gekend zijn, zie Figuur 24, is de variatie van de binnenpleister hier niet meer nodig. Eén configuratie is dus gelijk aan 3 x regenbelasting + 3 x soort baksteen, wat slechts 9 verschillende scenario's per configuratie oplevert.  $\rightarrow$  totaal 9 scenario's x 6 configuraties = 54 simulaties voor de nieuwe toestand VH.

#### Resultaten deel 1

Als configuratie 1 (C1), volsteens metselwerk met binnenisolatie geanalyseerd wordt, kan worden gezien dat bijna in alle gevallen, het risico op schade is toegenomen ten opzichte van de bestaande toestand, zie Figuur 26-30. De kans op vorst-dooischade is gestegen, waarbij de piekwaarden zich bevinden bij baksteen ZC en een regenbelasting van 1.5, maar waarbij er ook al risico is op schade bij een regenbelasting van 0.5, zie figuur 26. Figuur 27 die de schimmelgroei evalueert, volgens schimmelgroei-index van Viitanen et al. [34], geeft een verhoogde kans op schimmelgroei tussen de cementering en de glaswol. Dit heeft te maken met condensvorming op de cementering, door het kritische binnenklimaat en door het verschil in temperatuur op de cementering, door het dikke isolatiepakket, maar zal nog later meer in detail worden onderzocht. Het risico op schimmelgroei wordt ook geanalyseerd op de houtskeletstructuur tussen de glaswol en de rotswol, en na de isolatie op de houtvezelplaat. Hierbij is er geen risico op schimmel op de houtvezelplaat na de isolatie, maar wel enige kans op schimmelgroei tussen de glaswol en rotswol, zie Figuur 28. Op vlak van houtrot, Figuur 29, blijft het risico eerder laag, enkel bij een hoge regenbelasting van 1.5 zal er geen tot een licht risico zijn volgens het vervalscoremodel volgens NBN-EN 252 uit CEN 2014. Als de resultaten van het aantal dosissen van Figuur 29 worden vergeleken met de waarden die omgerekend zijn naar het vervalscoremodel op Figuur 30, zijn hier opnieuw niet heel veel verschillen op te merken tussen de verhoudingen en de piekwaarden. Bij configuratie 2 (C2), blauwe hardsteen in combinatie met volsteens metselwerk, is de kans op schade op vlak van schimmelgroei toegenomen ten opzichte van de bestaande toestand, maar deze blijft wel iets lager als bij C1 zie Figuur 27. Op vlak van vorst-dooischade en houtrot heeft deze configuratie geen tot weinig kans op schade bij een regenbelasting van 0.5 en 0.7, zie Figuur 26 en Figuur 29.

#### Resultaten deel 2

De kans op schimmelgroei en het risico op houtrot blijven gelijk bij C3 en C4, volsteens metselwerk, evenals bij C5 en C6, blauwe hardsteen, zie figuur 26 en 29. Op vlak van vorst-dooischade blijven C3 en C4 gelijk, maar zijn er enkele schommelingen bij C5 en C6. Algemeen lijken er weinig verschillen te zijn. Vorst-dooischade per configuratie



Configuratie Baksteen Regenbelasting Figuur 26: Resultaten vorst-dooischade nieuwe toestand met binnenisolatie, Vlaamse Hoeve, Stap 1, Deel 1 (D1) en Deel 2 (D2)







Figuur 28: Resultaten schimmelgroei, gemeten tussen glaswol en rotswol, nieuwe toestand met binnenisolatie, Vlaamse Hoeve, Stap 1



 Figuur 29: Resultaten houtrot, aantal doses, nieuwe toestand met binnenisolatie, Vlaamse Hoeve, Stap 1

 Houtrot per configuratie
 Houtrot per soort baksteen

 Houtrot per configuratie
 Houtrot per soort baksteen



Figuur 30: Resultaten houtrot, vervalscore, nieuwe toestand met binnenisolatie, Vlaamse Hoeve, Stap 1

#### Vergelijking simulatierapport Archipelago

In het simulatierapport van Archipelago is er geen kans meer op schimmelgroei na toevoeging van de cementering. In de simulaties van dit onderzoek zijn dezelfde soort materialen gebruikt, maar is er wel een kans op schimmelgroei. De oorzaak hiervan ligt bij het verschil in het geselecteerde binnen- en buitenklimaat, waarbij in dit onderzoek, zoals eerder aangehaald, het MRY van Brussel volgens de studie van Vandemeulebroucke et al. wordt toegepast [58]. Deze MRY doorloopt het meest kritische jaar dat één keer zal optreden om de tien jaar. In het simulatierapport van Archipelago is een klimaatbestand voor Ukkel gebruikt, bepaald door de KULeuven. Daarnaast is het bijhorende binnenklimaat veel kritischer (er wordt geen rekening gehouden met ventilatie), als het toegepaste binnenklimaat van 50% relatieve vochtigheid, bij het simulatierapport van Archipelago. Verder wordt in dit onderzoek gewerkt met de meest kritische bakstenen, waarbij de materiaaleigenschappen zijn afgestemd op met de ontvangen meetgegevens van de bakstenen van de Vlaamse Hoeve. Bovendien zijn ook voor de andere materialen, alle materiaaleigenschappen van de verkregen technische fiches toegepast, aangezien dit het meeste zal overeenstemmen met de werkelijkheid.

De oorzaak van de toename van vocht wordt verder geanalyseerd aan de hand van Figuur 31, die de fieldplots weergeeft van scenario C1, baksteen ZC en een lage regenbelasting van 0.5.



Figuur 31: Nieuwe toestand, vergelijking vochtopslag (C1, ZC, RF0.5): a) Werkelijkheid met MRY, b) folie tussen rotswol en luchtdichte houtvezelplaat (sd=1500m), c) folie tussen metselwerk en cementering (sd=1500m), d) folie tussen rotswol en luchtdichte houtvezelplaat en folie tussen metselwerk en cementering (sd=1500m)

Categorie	Waarden
Dampopen folies	≤ 0.5 m
Dampremmende folies	0.5 m – 10 m
Dampwerende folies	10 m – 100 m
Dampschermen	100 m – 1500 m
Dampdichte folies	≥ 1500 m

Tabel 10: Classificatie van dampdichtheid volgens DIN 4108-3 "Protection against moisture subject to climate conditions"

Figuur 31a geeft de fieldplot weer van de constructie, volsteens metselwerk, gebaseerd op de gegevens van Archipelago en met toegepast MRY-klimaat. Hierop is te zien dat er een accumulatie van vocht is, na de cementering in de glaswol, die het risico op schimmelgroei zal veroorzaken. Aangezien er een lage regenbelasting is toegepast en er bijgevolg weinig capillair vocht infiltreert, is een eerste voorspelling dat de accumulatie van vocht komt vanwege de hogere relatieve vochtigheid van het binnenklimaat. Door afwezigheid van een dampdichte folie zou het kunnen dat vochtige lucht zal condenseren tegen de koude cementering. De toegepaste luchtdichte houtvezelplaat beschikt over een  $\mu$ -waarde van 510 en heeft dus overeenkomstig een sd-waarde van 0,015 x 510 = 8m, wat volgens Tabel 10, die gebaseerd

is op DIN 4108-3, niet voldoende dampwerend zou kunnen zijn. Na het uittesten van deze voorspelling, zie Figuur 31b, is er echter te zien dat het vochtgehalte slechts licht gedaald is.

Een tweede voorspelling is dat deze hoge schimmelgroei veroorzaakt wordt door het buitenklimaat. Aangezien er relatief weinig regenbelasting is in dit uitgekozen scenario, zou het eerder over diffusie van damptransport gaan, vanuit het buitenklimaat. In Figuur 31c wordt een test gedaan waarbij een folie met een sd-waarde van 1500m wordt toegevoegd tussen het metselwerk en de cementering. Hierop is te zien dat het vochtgehalte sterk is gedaald. Volgens MRY-gegevens zullen er steeds zeer hoge luchtvochtigheden optreden, §3.3.2 Aannames, wat gepaard gaat met veel waterdamp in de lucht. Deze waterdamp zal via diffusie doorheen het metselwerk bewegen, van een gebied met hogere concentratie naar een gebied met lagere concentratie, na de cementering. Doordat de cementering waterdicht is maar niet dampdicht, ( $\mu$  = 25 en sd = 0.25 m), kan capillair vocht moeilijk infiltreren, maar zal damptransport wel nog aan de binnenzijde geraken. Door de lage absorptie van de cementering is er ook een zeer trage droging. Als de temperaturen dalen in de winter zal de maximale relatieve vochtigheid worden bereikt, en zo de opgestapelde vochtige lucht gaan condenseren naar vloeibaar vocht. Dit vloeibaar vocht kan niet meer door de waterdichte cementering en droogt niet meer uit waardoor dit het risico op schade zal verhogen.

De schimmelgroei is echter na deze grote daling in het vochtgehalte door het toevoegen van de folie, niet sterk afgenomen, zie groene lijn op Figuur 32.



Aangezien er in de cementering nog steeds een hoge relatieve vochtigheid heerst en deze na de tweede test niet meer van buiten kan komen, wordt in voorspelling 3, voorspelling 1 en 2 gecombineerd, met een folie aan de cementering en een folie aan de houtvezelplaat, zie Figuur 31d. Deze folies zorgen ervoor dat de relatieve vochtigheid van het kritische binnenen buitenklimaat niet tot de cementering komen. Nu is er wel een groot verschil met de vorige testen en is er geen risico op schimmelgroei meer.

*Figuur 32: Relatieve vochtigheid gemeten tussen de cementering en de glaswol* 

Hieruit kan besloten worden dat de schimmelgroei van de Vlaamse Hoeve sterk afhankelijk is van het gekozen binnen- en buitenklimaat en dat het risico op schimmelgroei theoretisch kan worden opgelost met het toevoegen van dampdichte folies aan de cementering en aan de warme zijde van de isolatie.

#### Vergelijking verschillende constructies

Net zoals besproken in de bestaande toestand, is de constructie met volsteens metselwerk (C1) kritischer dan de constructie met de laag absorberende blauwe hardsteen (C2). Zoals op Figuur 33 is weergegeven, is het vochtgehalte veel lager bij C2, doordat de blauwe hardsteen weinig vocht zal absorberen. Dit brengt een lager risico op houtrot en vorst-dooischade met zich mee, wat de eerder besproken resultaten van Figuur 26 en 29 bevestigt.



Figuur 33: Vergelijking vochtgehalte en relatieve vochtigheid van C1 en C2 (ZC, RF0.7)

Als er wordt gekeken naar de accumulatie van het vloeibaar vocht na de cementering in de glaswol, is te zien dat deze wel sterk is afgenomen bij C2. Zoals eerder aangehaald komt dit hoog vochtgehalte voornamelijk door het damptransport van het buitenklimaat, dat oploopt achter de cementering, condenseert, en niet meer kan uitdrogen. Uit de verminderde accumulatie van vloeibaar vocht bij C2, kan worden afgeleid dat het vocht na de cementering vermindert met de verminderde capillaire opname door de kleinere poriën en lagere absorptie van de blauwe hardsteen. De relatieve vochtigheid fieldplot van de blauwe hardsteen, C2, blijft echter vrij gelijk met die van het volsteens metselwerk, C1. Opnieuw wordt bevestigd dat de blauwe hardsteen de constructie goed zal beschermen tegen capillair vocht, zoals slagregen, maar minder goed tegen damptransport zoals de hoge relatieve vochtigheid van buiten, waardoor het uiteindelijke risico op schimmelgroei bij C2 niet veel lager zal zijn dan C1. Op het vlak van winter- en zomerperiode kan worden waargenomen dat er een duidelijke droging is aan het oppervlak, maar deze droging in veel beperktere mate zichtbaar is dieper in de steen. Bij de relatieve vochtigheid is dit net andersom, dit door de toegepaste relatieve vochtigheid van het MRY van het

#### Vergelijking verschillende configuraties

Als de resultaten van deel 1 en deel 2 met elkaar worden vergeleken zijn er maar enkele kleine verschillen te zien. Het risico op vorst-dooischade, schimmelgroei en houtrot gedragen zich relatief gelijk in beide delen. Deze resultaten worden bevestigd in de grafieken van Figuur 34.

binnenklimaat, die rekening houdt met een hogere luchtvochtigheid binnen, in de zomermaanden.



Figuur 34: Vergelijkingen deel 1 (C1) en deel 2 (C3 en C4) nieuwe toestand, (ZC, RF1.5): a) IJsmassavolume op 5mm buitenmetselwerk, b) relatieve vochtigheid tussen cementering en binnenisolatie, c) Vochtgehalte op 100mm van binnenmetselwerk

In Figuur 34a is er weinig verschil te zien tussen de configuraties, dit komt omdat na toevoeging van het dikke isolatiepakket, zeker met een regenbelasting van 1.5, het metselwerk continu vochtig staat. Figuur 34b geeft een klein, verwaarloosbaar, verschil in relatieve vochtigheid weer, waarbij C1 en C3, met minder kalkmortelonderbrekingen, hierin het meest kritisch presteren. Bij Figuur 34c, die het risico op houtrot weergeeft, is dit omgekeerd. Dit zorgt ervoor dat, naast het bedenken van mogelijke theorieën, er nog geen direct verband kan gevonden worden.

Het belangrijkste is dat het verschil tussen de configuraties verwaarloosbaar klein is.

#### Vergelijking interface weerstand

Uit de evaluatie van de nieuwe toestand blijken de verticale mortellagen slechts een verwaarloosbaar verschil te maken. Aangezien dit, net zoals in de bestaande toestand is besproken, niet volledig correct is door de verwaarlozing van de interfaceweerstand in voorgaande simulaties, wordt bij de nieuwe toestand opnieuw een test gedaan. Hierbij wordt de interface weerstand geëvalueerd op de constructie volsteens metselwerk, scenario ZC, RF0.7, waarbij opnieuw gebruik wordt gemaakt van de waarden uit §3.3.2 Aannames, met een IR = 2.5e<sup>10</sup>m/s.



Figuur 35: Vergelijking C1, C3 en C3 met interface weerstand (ZC, RF0.7, PIntO) tussen de materiaallagen

Uit de Figuur 35c blijkt opnieuw dat er door de interface weerstand van de kalkmortellaag veel minder capillair vocht wordt doorgegeven. Dezelfde pieken rond 15 maart en 21 november zijn aanwezig maar in veel minder sterke mate, doordat het capillaire vocht wordt tegengehouden door de weerstand van de kalkmortellaag. Verder is het ook opmerkelijk dat de accumulatie van de vloeibaar vocht na de cementering sterk is gedaald. Opnieuw kan worden afgeleid dat het vocht na de cementering vermindert met de verminderde capillaire opname.

Zoals eerder aangehaald, is deze accumulatie van vloeibaar vocht na de cementering, niet het enige dat het risico op schimmelgroei veroorzaakt, maar speelt ook de kritische relatieve vochtigheid van het binnenklimaat hierin een rol. Dit is aangetoond in Figuur 31c en 31d, waarbij er na berekening van de schimmelgroei, zonder regenbelasting en damptransport van het buitenklimaat, het risico op schimmelgroei niet sterk daalde. Wanneer zowel het damptransport van het binnenklimaat en het buitenklimaat geëlimineerd wordt, neemt de schimmelgroei af. Daarom is het vanzelfsprekend dat het risico op schimmelgroei na het toevoegen van deze interface weerstand, relatief weinig is afgenomen, omdat enkel het vloeibaar vocht van het buitenklimaat wordt tegengehouden, niet het damptransport van het binnen- of buitenklimaat.

De kans op vorst-dooischade blijft, zoals bij de bestaande toestand, gelijk.

Het risico op houtrot valt geheel weg, dit door zijn sterke afhankelijkheid van het vloeibaar vocht in de constructie, dat wordt tegengehouden door de IR.

Om expliciet te kunnen inschatten hoeveel invloed de interface weerstand heeft op het risico op schimmelgroei, houtrot en vorst-dooischade moeten er meer testen worden uitgevoerd. Het is alleszins zeker dat de invloed niet te verwaarlozen valt, waardoor er rekening moet worden gehouden met het feit dat de aangenomen waarden in deze studie niet volledig zullen overeenkomen met de realiteit, en dus kritischer zijn dan de werkelijkheid.

#### 4.2.3 Vergelijking bestaande en nieuwe toestand

In onderstaande figuren 36 en 37 wordt de bestaande toestand 1D, vergeleken met de nieuwe toestand 1D, via drie fieldplots: vochtgehalte, relatieve vochtigheid en temperatuur. Voor deze vergelijking wordt het scenario met baksteen ZC, een regenbelasting van 0.7 en een dampopen absorberende binnenpleister geselecteerd, dit is meest aansluitend bij de werkelijke toestand waaraan de Vlaamse Hoeve zal worden blootgesteld.



Figuur 36: Bestaande toestand (ZC, RF0.7, PIntO): a) Vochtopslag [kg/m<sup>3</sup>], b) Relatieve vochtigheid [%], c) Temperatuur [°C]

Bij de bestaande toestand fieldplot van het vochtgehalte, Figuur 36a, is te zien dat er bij een regenbelasting van 0.7, de baksteen relatief droog blijft, op vlak van capillair vocht. De slagregen zal niet doordringen door de gehele doorsnede van het metselwerk. Op de fieldplot van de relatieve vochtigheid, zie Figuur 36b, is echter te zien dat de constructie gedurende het hele jaar een hoge relatieve vochtigheid heeft, en dat deze slecht uitdroogt in de zomerperiode. Dit komt mede doordat de relatieve vochtigheid van het MRY-binnenklimaat hoger is in de zomerperiode (~65%) dan in de winterperiode (~55%).



Figuur 37: Nieuwe toestand (ZC, RF0.7): a) Vochtopslag, b) Relatieve vochtigheid, c) Temperatuur

Bij de nieuwe toestand zal de hoeveelheid vloeibaar vocht sterk toenemen in het metselwerk, zie Figuur 37a, doordat na plaatsing van binnenisolatie de droging van het metselwerk langs de binnenzijde wordt tegengehouden. Zoals eerder besproken, zal via damptransport ook vloeibaar vocht accumuleren tussen de cementering en de glaswol. Daarnaast neemt ook de relatieve vochtigheid binnenin de constructie toe, dit door de verminderde droging na plaatsing van de binnenisolatie en door de afwezigheid van een voldoende dampdichte laag aan de warme zijde van de isolatie. Door het toevoegen van het dikke isolatiepakket van 20 cm zal de temperatuur van het metselwerk ook sterk dalen, waardoor de kans op vorst-dooischade zal toenemen, zie Figuur 36c.

# 4.2.4 Besluit Vlaamse Hoeve 1D

Na uitgebreid onderzoek naar vochtgerelateerde schade in zowel de bestaande als de nieuwe toestand van de Vlaamse Hoeve, kan algemeen worden geconcludeerd dat de kans op schade wel degelijk toeneemt na plaatsing van binnenisolatie, voor de drie geëvalueerde schadefenomenen. Hierbij is het begrijpen van de interactie tussen materiaaleigenschappen en het binnen- en buitenklimaat van cruciaal belang bij het evalueren van het hygrothermisch gedrag van een constructie.

Na de studie van de bestaande toestand kan besloten worden dat er in de praktijk zeker al schade kan optreden voor het plaatsen van binnenisolatie. Deze schade moet dan wel gepaard gaan met een hoge regenbelasting, een soort waterlek of plaatselijke schade, in combinatie met een kritische baksteen. Bovendien mag deze constructie dan niet beschermd worden door een laag absorberend materiaal langs de buitenzijde, zoals blauwe hardsteen in het geval van de Vlaamse Hoeve.

Na plaatsing van een dampdicht binnenisolatiesysteem kan de constructie niet langer aan beide zijden drogen, wat resulteert in een langere vochtigheidsduur van het metselwerk. Het beheersen van het inwendige vochttransport is dus van belang. Hierbij is het beperken van capillair vocht door bijvoorbeeld slagregen of opstijgend vocht, niet altijd voldoende. Het damptransport doorheen de constructie door diffusie moet ook worden beperkt, zowel langs de buitenzijde als de binnenzijde. Voor de binnenzijde zorgt een dampscherm (sd>1500) voor volledige bescherming tegen mogelijke condensatie van mogelijks kritische relatieve vochtigheid van binnen. Voor de buitenzijde zorgt een folie die zowel water als dampdicht is (sd>1500) voor bescherming tegen accumulatie van vocht na het metselwerk door beperkte droging.

Over het algemeen zijn homogene constructies, zonder onderbreking van verticale mortelvoegen, kritischer voor het risico op schade. Zo lijkt het alsof de mortellagen in de meeste gevallen eerder het vocht zullen vasthouden, en zo zorgen voor minder vocht in de baksteen. Dit zijn echter slechts theorieën die doorheen dit onderzoek nog verder moeten worden geëvalueerd, aangezien bij de 1D studie van de Vlaamse Hoeve het slechts gaat over beperkte verschillen die uiteindelijk eerder verwaarloosbaar zijn.

Na het testen van de interface weerstand blijken de onderbreking van de mortellagen echter het tegengestelde te zijn van verwaarloosbaar. Hierbij is aangetoond dat de interface weerstand in een mortellaag een soort barrière zal vormen, die het vloeibaar transport sterk zal verhinderen van infiltratie in de constructie. Daarnaast is er een vertraging te zien in de vochtopname van de constructie.

Concluderend benadrukken deze bevindingen het belang van het kiezen van geschikte materialen en folies, waarbij materiaaleigenschappen zoals de absorptiecoëfficiënt, poriënverdeling en dampdichtheid, doorslaggevend zijn voor het beperken van vochtgerelateerde problemen in de constructie met een kritiek buiten- en binnenklimaat.

# 4.3 Paardenmarkt Antwerpen



Foto rad

• 00



Snede B: Door de westgevel

Aanzicht: Westgevel

Plan gelijkvloers

Figuur 38: Algemene infofiche Paardenmarkt

De tweede case betreft de Paardenmarkt Blok A in Antwerpen, (nu campus s0 van UAntwerpen), opgevolgd door Bureau Bouwtechniek. Eerst wordt de oorspronkelijk bestaande toestand onderzocht. Hierbij worden de raamaansluitingen aan de westkant geanalyseerd. De gevel is volledig bepleisterd. Voor de start van het onderzoek is de Paardenmarkt grondig bestudeerd. Er is een plaatsbezoek geregeld via UAntwerpen met de hulp van Bureau Bouwtechniek, na de oplevering van de gehele site. Tijdens dit bezoek zijn de materiaaleigenschappen en afmetingen van de wandopbouw onderzocht, waarna een opvolgend gesprek met Bureau Bouwtechniek de laatste onduidelijkheden over de detailtekeningen van de bouwknopen verhelderde.

# 4.3.1 Bestaande toestand

Baksteen westgevel

Parameter

PextD/PintO

Bij de bestaande toestand zijn twee verschillende constructies geïdentificeerd bij de raamaansluitingen: volsteens metselwerk van 28cm met buitenpleisterwerk, en volsteens metselwerk zonder buitenpleisterwerk, om eventuele latere schade aan het buitenpleisterwerk mee te rekenen. Aangezien in de bestaande toestand de materiaaleigenschappen van de buiten- en binnenpleister niet gekend zijn, worden deze als variabele parameters geëvalueerd. Hieronder wordt de documentatie van de analyse en het onderzoek van de Paardenmarkt voorgesteld, meer informatie is terug te vinden in §Bijlage B.



Fonhoid

Gemiddelde waarde

Symbool

# Materiaaleigenschappen bestaande toestand

rurumeter	Symbool	Lennera	Gennadelae Waarde		
Geen specifieke gegevens over de gebruikte baksteen					
> Delphin 6.1   Old Building Brick Dresden ZC/ZG/ZK   ID : 491/495/499					
Mortel	Mortel				
Geen specifieke gegevens over de gebruikte kalkmortel					
> Delphin 6.1   Lime cement mortar (low cement ratio)   ID : 718					
Buitenpleister/Binnenpleister dampdicht (PintD)/dampopen (PintO)					
Dampdiffusieweerstand PextD/PintD	μ	[-]	12		
Waterabsorptiecoëfficiënt PextD/PintD	$A_w$	[kg/s <sup>0.5</sup> m²]	0,127 kg/s <sup>0.5</sup> m²		
Dampdiffusieweerstand PextO/PintO	μ	[-]	0		
Waterabsorptiecoëfficiënt	$A_{w}$	[kg/s <sup>0.5</sup> m²]	0,250 kg/s <sup>0.5</sup> m²		

+ Delphin 6.1 | Lime Plaster (historical) | ID : 148

Figuur 39: Materiaaleigenschappen bestaande toestand, Paardenmarkt, Stap 1



De gedefinieerde configuraties uit Figuur 40 worden in deze eerste stap beschouwd als de zes verschillende simulatiegroepen, voorkomend uit de twee gedefinieerde constructies, die de basis zullen vormen voor het genereren van de verschillende scenario's. Hierbij behoren de bovenste configuraties per constructie tot deel 1 van stap 1 en de onderste vier tot deel 2 van stap 1. Per configuratie zijn er vaste en variabele parameters vastgelegd op basis van §3.3.2 Aannames. Deze parameters zijn hieronder weergegeven in Tabel 11.

Aangezien de materiaaleigenschappen van de bestaande binnen- en buitenpleister onbekend zijn, wordt hier voor zowel de binnen-als buitenpleister gekozen voor een dampopen hoger absorberende pleister (PIntO, PExtO) en een dampdichtere lager absorberende pleister (PIntD, PExtD), zie Figuur 39 voor de materiaaleigenschappen.

Parameters Paardenmarkt				
VARIABEL			VAST	
Regenbelasting			Oriëntatie	
0.5	0	.7	1.5	Westen: 270°
Soort baksteen			Soort mortel	
ZC	Z	G	ZK	Kalkmortel
Buitenpleister ba	ksteen			
PextD			PextO	
Binnenpleister baksteen				
PintD			PintO	

Tabel 11: Parameters Paardenmarkt

1 volledige configuratie PM = 3 x Regenbelasting + 3 x soort baksteen + (2 x buitenpleister) + 2 x binnenpleister = 36 simulaties per configuratie met buitenpleister, 18 simulaties per configuratie zonder buitenpleister  $\rightarrow$  totaal 36 x 3 + 18 x 3 = 162 simulaties voor de bestaande toestand PM

#### Resultaten deel 1

Zowel configuratie 1 (C1), volsteens metselwerk met dampopen buitenpleister, als C2 zonder buitenpleister, vertonen beiden enkel bij een regenbelasting van 1.5 risico op schimmelgroei en houtrot, zie gele en oranje stippen op Figuur 42 en 43 grafieken "regenbelasting".

C1, met buitenpleister (dampopen/dampdicht) heeft geen kans op vorst-dooischade. Ook de schimmelgroei en de kans op houtrot blijven eerder aan de lage kant. Met een dampdichte buitenpleister is er zelfs helemaal geen kans op een vorm van schade, dit is duidelijk te zien op de buitenpleistergrafieken van Figuur 41, 42 en 43.

C2, zonder een beschermende buitenpleister, heeft zeer duidelijk meer kans op schade, met een toename in de kans op schimmelgroei, een hoger risico op houtrot en een toegenomen kans op vorst-dooischade. Hierbij heeft baksteen ZC de hoogste kans op vorst-dooischade en hoogste kans op schimmelgroei en baksteen ZK het grootste risico op houtrot zie grafieken "baksteen". Dit gedrag is opnieuw net zoals de clusterstudie van Vanderschelden et al. [45].

#### Resultaten deel 2

Het risico op houtrot en vorst-dooischade blijven gelijk bij C3 en C4, ten opzichte van C1, volsteens metselwerk met buitenpleister, en ook bij C5 en C6, ten opzichte van C2. Bij schimmelgroei is een klein verschil waar te nemen bij C3 ten opzichte van C1 en C4 en bij C5 ten opzichte van C2 en C6, zie Figuur 42 grafiek "configuraties". Dit verschil lijkt echter verwaarloosbaar klein.



Figuur 41: Resultaten vorst-dooischade bestaande toestand, Paardenmarkt, Stap 1



Figuur 42: Resultaten schimmelgroei bestaande toestand, Paardenmarkt, Stap 1



Figuur 43: Resultaten houtrot, volgens aantal dosissen, bestaande toestand, Paardenmarkt, Stap 1



Figuur 44: Resultaten houtrot, volgens vervalscore, bestaande toestand, Paardenmarkt, Stap 1

#### Vergelijking verschillende constructies

Uit de eerder besproken resultaten volgt dat constructie 1 (volsteens metselwerk met buitenpleister) logischerwijs minder kritisch is dan constructie 2 (zonder buitenpleister), voor de geëvalueerde schadefenomenen. Dit wordt verder onderzocht in Figuur 45, die de fieldplots van het gehele jaar in functie van de coördinaten van de constructie weergeeft, van het vochtgehalte (moisture content) en de relatieve vochtigheid van de twee constructies. Voor deze fieldplots wordt gekozen voor het scenario met baksteen ZC, RF 0.7 en een dampopen, hoger absorberende binnenpleister en een dampdichtere, minder absorberende buitenpleister.



Figuur 45: Vergelijking vochtopslag en relatieve vochtigheid van C1 en C2 (ZC, RF0.7, PIntO)

Bij C1 is te zien dat het metselwerk een zeer laag vochtgehalte heeft door de beschermende buitenpleister. Deze buitenpleister zal eveneens de constructie beschermen tegen damptransport. Dit in tegenstelling tot C2, waarbij de slagregen niet wordt geremd. Hierdoor is er bij C2 een toename in het metselwerk van het capillair vocht (zie moisture content) en damptransport (zie relatieve vochtigheid). Verder valt het ook op dat in beide constructies in de zomerperiode het metselwerk zal proberen uitdrogen.

#### Vergelijking verschillende configuraties



Als deel 1 en deel 2 met elkaar worden vergeleken zijn er algemeen weinig verschillen te zien. De kans op vorstdooischade en het risico op houtrot gedragen zich relatief gelijk in beide delen en het risico op schimmelgroei is slechts licht verschillend. Dit wordt bevestigd via het lage verschil in relatieve vohtigheid in Figuur 46.

Figuur 46: Vergelijking relatieve vochtigheid binnenoppervlak, deel 1 (C1) en deel 2 (C3 en C4) BT, (ZC, RF1.5, PExtO, PIntO) Het verschil in schimmelgroei wordt even van naderbij bekeken. In Figuur 46 worden de relatieve vochtigheid bij de schimmelgroeipiek tussen 15 en 30 maart uiteengezet. Hierin kan duidelijk worden waargenomen dat de paarse curve, C3 de hoogste relatieve vochtigheid bereikt van de grafiek, dit is van toepassing over het volledige jaar. Er is ook te zien dat het verschil tussen C1 en C4 verwaarloosbaar is, deze curves wisselen ook soms om van plaats. Voor schimmelgroei bij de bestaande toestand, lijkt het dus het meest kritische als de mortellaag zich dichter bij het buitenoppervlak bevindt. Dit blijft nog steeds een theorie, tot er een duidelijker verband kan worden opgemerkt.

#### Vergelijking interface weerstand

Op dezelfde manier zoals bij de Vlaamse Hoeve wordt er een test gedaan om de invloed van de interface weerstand tussen de materialen te onderzoeken. Voor deze vergelijking wordt scenario ZC, RF1.5, PIntO en PExtO geselecteerd.



Figuur 47: Vergelijking C1, C3 en C3 met interface weerstand (ZC, RF1.5, PExtO, PIntO) tussen de materiaallagen

Uit Figuur 47 blijkt dat dezelfde bevindingen als bij de Vlaamse Hoeve hier van toepassing zijn. Wat daarnaast opvalt is een hogere vochtopname vooraan in de baksteen. Dit is waarschijnlijk het gevolg van de verhindering van het vloeibaar vochttransport. Dit aanwezig vocht zal zich, door de IR, minder kunnen verspreiden en bijgevolg vooraan verzamelen aangezien het niet verder kan.

# 4.3.2 Nieuwe Toestand

Na het evalueren van de bestaande toestand, wordt de nieuwe toestand onderzocht. Bij de Paardenmarkt wordt als binnenisolatie een multipor van 10cm geplaatst. Deze multipor is voorzien van een waterdichte lijmmortel om de binnenconstructie te beschermen tegen vocht. Deze multipor met lijmmortel wordt geplaatst tegen de bestaande binnenpleister, die van gaten voorzien is om te verzekeren dat deze dampopen zou zijn. Hieronder, in Figuur 48, is de analyse van de materiaaleigenschappen van de nieuwe toestand na renovatie terug te vinden. Deze informatie is gebaseerd op de gegeven technische fiches die Bureau Bouwtechniek bezorgde.

Bij het bepalen van sommige materiaaleigenschappen van bijvoorbeeld de lijmmortel, binnen-en buitenpleister zijn opnieuw de overeenkomstige normen, waarnaar is verwezen op de technische fiches, geraadpleegd. Deze gegevens zijn terug te vinden in Tabel 8, §4.2.2 Nieuwe Toestand en zijn aangepast naar de juiste eenheden (kg/s<sup>0.5</sup>m<sup>2</sup>) voor in de Delphin material file.

# Materiaaleigenschappen nieuwe toestand

Lijmmortel					
Parameter	Symbool	Eenheid	Gemiddelde waarde		
Waterabsorptiecoëfficiënt	$A_w$	[kg/s <sup>0.5</sup> m²]	0,033 kg/s <sup>0.5</sup> m² (W2, EN 998-1)		
Dampdiffusieweerstand	μ	[-]	10		
Warmtegeleiding	λ	[W/m.K]	0,18 W/m.K		
+ Delphin 6.1   Glue Mortar   ID : 486					
Multipor					
Densiteit	ρ	[kg/m³]	115 kg/m³		
Warmtegeleiding	λ	[W/m.K]	0,043 W/m.K		
Dampdiffusieweerstand	μ	[-]	3		
Soortelijke warmte	С	[J/kg.K]	1300 J/kg.K		
+ Delphin 6.1   Multipor Minerally insulation board 2014   ID : 643					
Gipspleister					
Geen specifieke gegevens over de gebruikte gipspleister					
> Delphin 6.1   Gypsum Plaster   ID : 835					
Buitenpleistervernieuwing					
Waterabsorptiecoëfficiënt	A <sub>w</sub>	[kg/s <sup>0.5</sup> m <sup>2</sup> ]	0,033 kg/s <sup>0.5</sup> m <sup>2</sup> (W2, EN 998-1)		

+ Delphin 6.1 | Lime Plaster (historical) | ID : 148

Figuur 48: Materiaaleigenschappen nieuwe toestand, Paardenmarkt, Stap 1


Figuur 49: Configuraties nieuwe toestand, Paardenmarkt, Stap 1

Net zoals bij de bestaande toestand vormen de gedefinieerde configuraties uit Figuur 49, de zes verschillende simulatiegroepen. Hierbij behoren de bovenste configuraties per constructie opnieuw tot deel 1 van stap 1 en de onderste vier tot deel 2 van stap 1. Per configuratie zijn er vaste en variabele parameters vastgelegd, weergegeven in Tabel 11, §4.2.1 Bestaande toestand. Doordat alle gegevens geweten zijn van de gebruikte toegevoegde materialen is de variatie van de buitenpleister hier in principe niet meer nodig. Toch wordt deze nog meegenomen in dit onderzoek om te bekijken hoe groot het verschil kan zijn door te werken met een meer dampopen buitenpleister en geen buitenpleister. Eén configuratie is gelijk aan 3 x regenbelasting + 3 x soort baksteen + (2 x buitenpleister) + 2 x binnenpleister, wat 36 of 18 verschillende scenario's per configuratie oplevert.  $\rightarrow$  totaal 36 x 3 + 18 x 3 = 162 scenario's voor de nieuwe toestand PM

#### Resultaten deel 1

Als configuratie 1 (C1), volsteens metselwerk met binnenisolatie en buitenbepleistering, geanalyseerd wordt kan direct worden gezien dat opnieuw in alle gevallen de schade veel meer beperkt blijft dan bij C2, waarbij er geen beschermende buitenpleister aanwezig is. Als er bij C1 wordt vergeleken tussen de dampopen en de dampdichte buitenpleister is een groot verschil in schade te zien. Bij de dampdichtere buitenpleister is er bij schimmelgroei veel minder kans op schade en bij houtrot en vorst-dooischade is er geen kans op schade, zie Figuur 50, 51 en 52, de gele stippen op grafieken "buitenpleister". Het risico op schimmelgroei blijft wel steeds aanwezig, al is het in lichte mate. Wanneer de pleister een hogere absorptie heeft en meer dampopen is, verhogen de schadefenomenen sterk. Naast schimmel en houtrot is er bij een dampopen buitenpleister toch nog kans op vorst-dooischade, gemeten vanaf 5mm van het buitenmetselwerk. Dit gedrag stemt bijna overeen met het ontbreken van een buitenpleister, wat het doel van de bescherming volledig wegneemt.

Wanneer er schade zou zijn aan het pleisterwerk (C2) stijgt het risico op schimmelgroei, zie Figuur 51 grafiek "buitenpleister". Ook op vlak van vorstdooi-schade en houtrot zijn veel hogere piekwaarden wat als normaal kan gezien worden, aangezien de volsteense muur van de paardenmarkt relatief dun is (28cm), en dus snel volledig verzadigd is.

Als er wordt gekeken naar de invloed van de regenfactor valt het op dat voor vorst-dooischade en houtrot er enkel kans op schade zal optreden bij een regenfactor van 1.5. Hier heeft de regenfactor een grote impact in tegenstelling tot bij het risico op schimmelgroei, gemeten tussen de lijmmortel en de multipor, waarbij de waarden slechts lichtjes toenemen met stijgende regenbelasting. Dit is logisch omdat de schimmelgroei sterk afhankelijk is van het binnenklimaat en inwendige condensatie op de lijmmortel, terwijl de vorst-dooischade en het risico op houtrot sterk afhankelijk zijn van het buitenklimaat, de vochtopslag, en dus de regenbelasting. Er is nooit risico op schimmelgroei bij het meetpunt na de isolatie, waardoor dit meetpunt niet wordt afgebeeld in de onderstaande resultaten.



Figuur 50: Resultaten vorstdooi-schade nieuwe toestand met binnenisolatie, Paardenmarkt, Stap 1





Figuur 52: Resultaten houtrot, volgens het aantal dosissen, nieuwe toestand met binnenisolatie, Paardenmarkt, Stap 1



Figuur 53: Resultaten houtrot, volgens vervalscore, nieuwe toestand met binnenisolatie, Paardenmarkt, Stap 1

# Resultaten deel 2

Alle schadefenomenen blijven relatief gelijk tussen configuratie C3 - C4 en tussen C5 - C6. Als de resultaten expliciet worden vergeleken, zit er wel een klein verschil bij de vorst-dooischade, waarbij C5 af en toe een paar cycli lager scoort dan C6. Naast dit detail valt er verder geen verschil waar te nemen, waaruit voorlopig blijkt dat het geen groot verschil lijkt te zijn waar de mortellaag zich zal bevinden.

# Vergelijking verschillende constructies

Net zoals besproken in de bestaande toestand, is de constructie met volsteens metselwerk met buitenpleister (C1) minder kritisch dan de constructie zonder buitenpleister (C2). Zoals op Figuur 54 is weergegeven, is het vochtgehalte en de relatieve vochtigheid veel lager bij C1, doordat de beschermende buitenpleister het capillair- en damptransport zal verhinderen.

De fieldplots bevestigen dat de bekomen resultaten van Figuur 50-53, waarbij op de relatieve vochtigheid fieldplots is te zien dat de relatieve vochtigheid tussen de dampopen binnenpleister en lijmmortel, en tussen de multipor en lijmmortel, bij C2 hoger zal zijn dan bij C1.



Figuur 54: Vergelijking vochtopslag en relatieve vochtigheid van C1 en C2 (ZC, RF0.7)

#### Vergelijking verschillende configuraties

Als deel 1 en deel 2 met elkaar worden vergeleken zijn er algemeen opnieuw weinig verschillen te zien. De kans op vorst-dooischade, schimmelgroei en houtrot gedragen zich relatief gelijk in beide delen. Dit wordt bevestigd door onderstaande grafieken in Figuur 55. Het de relatieve vochtigheid (gelinkt aan het risico op schimmelgroei) lijkt bij de nieuwe toestand, tegengesteld aan de bestaande toestand, de configuratie met de mortellaag dichter bij het binnenoppervlak, licht kritischer te zijn, dan degene zonder mortellaag en dan degene met de mortellaag dichter bij het buitenoppervlak, zie Figuur 55a. Op vlak van ijsmassavolume is er geen verschil waarneembaar tussen de drie configuraties, zie Figuur 55b.



Figuur 55: Vergelijking deel 1 (C1) en deel 2 (C3 en C4) Nieuwe Toestand, (ZC, RF1.5, PExtO, PIntO): a) relatieve vochtigheid tussen de lijmmortel en multipor, b) IIsmassavolume 5mm in het buitenmetselwerk

#### Vergelijking interface weerstand

Op dezelfde manier zoals bij de Vlaamse Hoeve wordt er een test gedaan om de invloed van de interface weerstand tussen de materialen te onderzoeken. Voor deze vergelijking wordt scenario ZC, RF1.5, PIntO en PExtO geselecteerd.



Figuur 56: Vergelijking C1, C3 en C3 met interface weerstand (ZC, RF1.5, PExtO, PIntO) tussen de materiaallagen

Uit Figuur 56 blijkt dat dezelfde bevindingen als bij de Vlaamse Hoeve en de bestaande toestand van de Paardenmarkt hier van toepassing zijn. Opnieuw valt de vermindering in capillair transport op, en daarnaast ook de hogere vochtopname vooraan in de baksteen.



Figuur 57: Vergelijking van het risico op schimmelgroei, tussen de lijmmortel en multipor, C3 en C3 IR, Nieuwe Toestand, (ZC, RF1.5, PExtO, PIntO)

Hoewel er een veel lagere moisture storage wordt behaald in de dampopen binnenpleister tussen de lijmmortel en de baksteen, daalt de schimmelgroei relatief weinig, zie figuur 57. Dit komt doordat na het plaatsen van binnenisolatie schimmelgroei voornamelijk wordt veroorzaakt door condensatie van de hoge relatieve vochtigheid van het binnenklimaat, tegen het koudere lijmmorteloppervlak. De kans op vorst-dooischade stijgt, als gevolg van de vochtophoping vooraan in de baksteen. Het risico op houtrot valt geheel weg, aangezien deze wel sterk afhankelijk van de vochtopslag is op 100mm van het binnenoppervlak, hierbij wordt het vochtgehalte tegengehouden door de IR van de mortellaag.

#### 4.3.3 Vergelijking bestaande en nieuwe toestand

In onderstaande Figuur 58 en 59, wordt de bestaande toestand vergeleken met de nieuwe toestand via drie fieldplots: vochtopslag, relatieve vochtigheid en temperatuur. Voor deze vergelijking wordt het scenario met baksteen ZC, een regenbelasting van 0.7, een dampopen, hoger absorberende binnenpleister en een dampdichte en lager absorberende buitenpleister. Deze combinatie van parameters schetst de werkelijkheid van de Paardenmarkt.



Figuur 58: Bestaande toestand: a) Vochtopslag, b) Relatieve vochtigheid, c) Temperatuur (ZC, RF0.7, PExtD, PIntO)

Op de bestaande toestand vochtopslag- en relatieve vochtigheidfieldplot, Figuur 58a en 58b, is te zien dat er zeer weinig capillair- en damptransport door de beschermende pleister infiltreert in de constructie. Als er dan toch vocht door de buitenpleister dringt kan dit heel makkelijk worden gedroogd langs beide kanten van het metselwerk. In de zomerperiode is duidelijk te zien dat de baksteen bijna volledig kan uitdrogen.



Figuur 59: Nieuwe toestand: a) Vochtopslag, b) Relatieve vochtigheid, c) Temperatuur (ZC, RF1.5, PExtD, PIntO)

Als de bestaande toestand wordt vergeleken met de nieuwe toestand zijn er duidelijke verschillen te zien. Op de vochtopslagfieldplot (Figuur 59a) blijkt dat er nog steeds minimaal capillair vocht infiltreert door de beschermende buitenpleister. In tegenstelling hiermee laat de relatieve vochtigheidsfieldplot (Figuur 59b) zien dat damptransport van buiten nu meer kan doordringen door de buitenpleister tijdens de piekmomenten in maart en november, dit als gevolg van de belemmerde droging door toevoeging van binnenisolatie. Een gradiënt in de relatieve vochtigheid is waarneembaar, waarbij hoge relatieve vochtigheden wordt bereikt dicht bij de buitenzijde van het metselwerk en tussen het metselwerk en de dampopen binnenpleister. De hogere waarden dicht bij de buitenzijde van het metselwerk en metselwerk worden, net zoals bij de bestaande toestand, veroorzaakt door de slagregen. De hoge waarden bij de binnenpleister zijn waarschijnlijk het gevolg van het binnenklimaat, waarbij de lijmmortel en dampopen binnenpleister tijdens winterperiodes een koud oppervlak vormen waarop interne damp kan

condenseren. Hierbij zorgt de vochtbufferende, capillair actieve, multipor ervoor dat het vocht in de zomer wel nog kan uitdrogen. Op de temperatuurfieldplots (Figuur 59c) is duidelijk een toename van koude temperaturen in de winter waarneembaar. Door de toegevoegde isolatie wordt het metselwerk in de nieuwe toestand niet langer verwarmd van binnenuit, waardoor het minder beschermd is tegen het risico op vorst-dooischade.

# 4.3.4 Besluit Paardenmarkt 1D

In vorige onderdelen is de bestaande en de nieuwe toestand van de Paardenmarkt uitvoerig bestudeeerd. Net als bij de Vlaamse Hoeve blijkt de kans op vochtgerelateerde schade toe te nemen na plaatsing van binnenisolatie, voor de drie geëvalueerde schadefenomenen. Ook de conclusies die zijn genomen over de bestaande en nieuwe toestand blijven geldig bij de evaluatie van de Paardenmarkt.

Na plaatsing van een dampopen, capillair actief binnenisolatiesysteem kan de constructie wel nog aan beide zijden drogen, al blijkt uit het onderzoek de droging wel enigszins afgenomen. Wanneer de effecten van het buitenklimaat worden verhinderd door damp- en waterdichte bescherming, in dit geval de buitenpleister, kan een kritisch binnenklimaat nog steeds zorgen voor het optreden van schade door condensering op de koudere oppervlakken achter de binnenisolatie. Hierbij is wel te zien dat deze condensering nog kan uitdrogen doordat het binnenisolatiesysteem niet dampdicht is.

Over het algemeen lijken homogene constructies, zonder onderbreking van verticale mortelvoegen, zeker niet meer in alle gevallen kritischer te zijn voor het risico op schade. Dit moet dus verder onderzocht worden om een al dan niet aanwezig patroon te kunnen opmerken in het gedrag, per schadefenomeen. De verschillen tussen de homogene configuraties en configuraties onderbroken door verticale mortellagen blijven wel nog steeds verwaarloosbaar.

Na het testen van de interface weerstand blijken de onderbrekingen van de mortellagen opnieuw het tegengestelde te zijn van verwaarloosbaar. Hierbij is aangetoond dat naast het verhinderde capillaire transport, er een toename is van vocht in het begin van het metselwerk. Dit komt door de verminderde spreiding van het capillair vocht, als gevolg van de verhindering door de IR.

Concluderend zorgen deze extra bevindingen, uit de 1D-studie van de Paardenmarkt, voor een aanvulling en bevestiging van de bevindingen die zijn vastgesteld bij de Vlaamse Hoeve. Hierbij zijn er wel nog heel wat onzekerheden en ontbrekende details die verder moeten onderzocht. Vandaar is een aanvullende tussenstap nodig om het gedrag van het metselwerk in 1D-2D verder te evalueren, voordat er een volledige bouwknoop kan worden geanalyseerd.

# 5. Overgang 1D-2D

# 5.1 Vertaling naar 1D-2D simulaties

In dit hoofdstuk zal de tweede stap: 1D-2D worden onderzocht, die ook telkens bestaat uit twee onderdelen. *Deel 1* geeft de metselwerkstructuur met horizontale en verticale mortelvoegen weer, terwijl *Deel 2* de metselwerkstructuur verder opbouwt met een tweede laag bakstenen. Elke case zal deze twee delen doorlopen, waardoor de verschillende *constructies*, bestaande uit *configuraties*, onderling vergeleken kunnen worden. Daarnaast wordt er een extra vergelijking gemaakt met de resultaten van de 1D-studie. Op basis van deze benadering kunnen er conclusies worden afgeleid met betrekking tot het degradatiegedrag van de *configuraties* in elke *constructie*, evenals de verschillen tussen de meer complexe 1D-2D-overgangsopbouw en de 1D-studie.

# 5.2 Vlaamse Hoeve Meise

#### 5.2.1 Bestaande toestand

Opnieuw wordt eerst de bestaande toestand onderzocht, hierbij zijn de twee verschillende constructies van muuropbouwen, die zijn vastgelegd in Figuur 16, verder opgebouwd naar een volwaardige metselwerkstructuur. De materiaalparameters vastgelegd in Figuur 15, worden hier opnieuw toegepast. Tijdens het genereren van deze configuraties in Delphin 6.1 is er rekening gehouden met de adiabatische grens door steeds te zorgen dat de metselwerkopbouw doorsneden is door de helft van de baksteen/mortellaag. Zo kan de configuratie denkbeeldig gespiegeld worden en continu doorlopen.



De gedefinieerde configuraties uit Figuur 60 worden in deze tweede stap gebruikt als de zes verschillende simulatiegroepen, voorkomend uit de twee gedefinieerde constructies, die de basis zullen vormen voor het genereren van de verschillende scenario's. Hierbij behoren de linkse vier configuraties tot deel 1 van stap 2 en de rechtse twee tot deel 2 van stap 2. Per configuratie zijn de vaste en variabele parameters hetzelfde als bij stap 1 en terug te vinden in Tabel 6, §4.2.1 Bestaande toestand. Eén volledige configuratie VH is gelijk aan 3 x regenbelasting + 3 x soort baksteen + 2 x binnenpleister = 18 scenario's per configuratie  $\rightarrow$  totaal 18 x 6 = 108 simulaties voor de bestaande toestand VH 1D-2D.

#### Resultaten deel 1

Net als bij de 1D-studie van de Vlaamse Hoeve vertonen zowel C1-C2, volsteens metselwerk, enkel bij een regenbelasting van 1.5 schade, zie paarse en groene stippen op Figuur 61, 62 en 63 grafieken "regenbelasting". Bij het risico op schimmelgroei en houtrot schommelen de resultaten van de configuraties vanuit dezelfde constructie onderling, waarbij telkens C2, met meerdere verticale mortellagen, minder kritisch presteert. Daarnaast valt opnieuw op dat er bij baksteen ZC het meeste risico op schade is op vlak van vorst-dooischade en schimmelgroei. In C3 en C4, waarbij er blauwe hardsteen aanwezig is, is er net als bij stap 1, een totale afwezigheid van de drie schadefenomenen, zelfs bij de hoogste regenbelasting. Verder is het algemeen opmerkelijk dat de resultaten van het risico op houtrot sterk zijn gedaald ten opzichte van de 1D-studie, bij de vervalscore lijkt er zelfs bijna geen schade op te treden, zie Figuur 63 en 64.

#### Resultaten deel 2

Algemeen lijkt het risico op schade binnenin een constructie, bij de meer gedetailleerde configuratie C5, precies tussen de meest kritische configuratie C1 en minst kritische configuratie C2 te liggen. Dit verschil wordt verder onderzocht in §5.2.1 Bestaande toestand, deel kalkmortel.



Figuur 62: Resultaten schimmelgroei bestaande toestand, Vlaamse Hoeve, Stap 2



Figuur 63: Resultaten houtrot, volgens het aantal dosissen, bestaande toestand, Vlaamse Hoeve, Stap 2



Figuur 64: Resultaten houtrot, volgens de vervalscore, bestaande toestand, Vlaamse Hoeve, Stap 2

#### Vergelijking resultaten in kalkmortel

Figuur 65 geeft de resultaten weer van het risico op schade dat wordt gemeten in de baksteenlaag, zoals hierboven zijn besproken, naast de resultaten die zijn gemeten in de kalkmortellaag. Algemeen valt het op dat de resultaten gemeten in de kalkmortellaag een hoger risico hebben op schade dan de resultaten gemeten in de baksteen. Dit kan verklaard worden doordat de kalkmortel met zijn hoge absorptiecoëfficiënt, al het water zal verzamelen en het vocht gaat verdelen over het metselwerk, zoals besproken in §2.1.3 Relevante parameters. Aangezien de mortelvoegen als aders van het metselwerk de baksteen zullen bevochtigen, zullen zij het meeste vocht opslaan wat zal leiden tot meer risico op schade waar de kalkmortel zich bevindt.



Figuur 65: Vergelijking resultaten vorst-dooischade, schimmelgroei en houtrot gemeten in de baksteen versus in de kalkmortel

Naast het verschil van resultaten in de baksteen ten opzichte van de kalkmortel, is er ook een verschil in de positie van de verticale kalkmortelvoegen in het metselwerk, met andere woorden, het verschil door het alternerend metselwerkverband. Om dit verschil te kunnen evalueren wordt er een korte studie gedaan, waarbij er telkens wordt gemeten in de mortel en in de baksteen bij de twee verschillende metselwerkopbouwen. In Figuur 66 zijn de geëvalueerde meetpunten gegeven.



Figuur 66: Configuratie 5 met aanduiding meetpunten in metselwerk bovenaan, mortel en metselwerk onderaan

De kans op vorst-dooischade wordt vergeleken op basis van het ijsmassavolume gemeten op 5mm van het buitenmetselwerk, zie Figuur 67a. Het risico op schimmelgroei wordt vergeleken op basis van de relatieve vochtigheid op het binnenoppervlak op het piekmoment van 15 maart (zie Figuur 67b) en het risico op houtrot wordt vergeleken door het vochtgehalte op 100mm van het binnenmetselwerk te bekijken, zie Figuur 67c. Op basis van de eerder besproken resultaten wordt er gekozen voor configuratie 1 die risico heeft op schade bij volgend scenario: baksteen ZC, een regenbelasting van 1.5, en een dampopen binnenpleister.

Vooral bij Figuur 67a en 67c is het verschil groot tussen het meetpunt in de mortellaag en de baksteen. Deze meetpunten worden dan ook rechtstreeks gemeten op de mortellaag, terwijl de evaluatie van de relatieve vochtigheid van figuur 67c, na de mortellaag wordt gemeten op het binnenoppervlak.



Figuur 67: Configuratie 5 (ZC, RF1.5, PIntO): a) IJsmassavolume op 5mm van buitenmetselwerk, b) Relatieve vochtigheid binnenoppervlak rond 15 maart, c) Vochtopslag 100mm van binnenmetselwerk

Figuur 67 geeft extra bevestiging dat de mortellaag de meest kritische plaats is voor alle schadefenomenen. Daarnaast is ook te zien dat er tussen de metselwerkopbouwen, 20-1-20 en 9.5-1-20-1-9.5, geen merkbaar verschil waarneembaar is.

#### Vergelijking verschillende constructies

Net zoals bij de 1D simulaties is het duidelijk dat de constructie zonder blauwe hardsteen kritischer is dan degene met blauwe hardsteen. In Figuur 68 worden de twee verschillende opbouwen vergeleken om het inwendige vochttransport beter te begrijpen. Hierbij wordt gewerkt met het scenario: baksteen ZC, een regenbelasting van 0.7 en een dampopen binnenpleister, op de meest kritische dag, 15 maart.



Figuur 68: Vergelijking vochtopslag en relatieve vochtigheid van C5 en C6 (ZC, RF1.5, PIntO, Kritische dag 15 maart)

Figuur 68 bevestigt opnieuw het ontbreken van alle schadefenomenen bij de constructie met blauwe hardsteen. Dezelfde besluiten die bij stap 1 zijn gemaakt, zijn ook hier van toepassing bij een lagere regenbelasting. De blauwe hardsteen zal zorgen voor minder vochtopname, maar tegelijk ook voor vertraagde droging na vochtopname.

#### Vergelijking verschillende configuraties

Zoals eerder aangehaald zijn er in de resultaten meer verschillen te zien onderling tussen de configuraties, dan bij de 1D-simulaties. In Figuur 69 wordt het risico op schimmelgroei en het risico op houtrot vergeleken voor de drie configuraties met volsteens metselwerk, waarbij bij C5, de meest gedetailleerde configuratie, de meetpunten in beide metselwerkopbouwen worden weergegeven om een juiste vergelijking te kunnen maken. Ook hier wordt opnieuw gekozen voor het scenario baksteen ZC, een regenbelasting van 1.5, en een dampopen binnenpleister. De kleuren van de grafiek blijven steeds gelijk met de configuraties (C1, C2 en C5) van de eerder besproken resultaatgrafieken.



Figuur 69: Vergelijking configuraties deel 1 (C1) en deel 2 (C3 en C4), (ZC, RF1.5, PIntO) Bestaande toestand: a) relatieve vochtigheid binnenoppervlak, b) Vochtgehalte 100mm van het binnenmetselwerk

Op Figuur 69a wordt de relatieve vochtigheid van het binnenoppervlak vergeleken tussen de drie verschillende configuraties uit de constructie met volsteens metselwerk. De paarse en groene curve zijn de C1 en C2 uit deel 1, de gele en oranje zijn de twee verschillende metselwerkopbouwen van C5. Hierbij valt op dat beide curves van de meer gedetailleerde C5, minder kritisch zijn dan C1 en C2. Het lijkt dus alsof de minder gedetailleerde configuraties, minder kritisch zijn, dan de meer gedetailleerde. Daarnaast is C1 kritischer als C2, net zoals bij de 1D-studie. Het zou kunnen dat dit komt doordat in C2 meer verticale mortellagen aanwezig zijn, waardoor het vocht meer wordt vastgehouden in het metselwerk en minder wordt doorgegeven aan de binnenpleisterlaag. Bij de vochtopslagcurves van Figuur 69b, gedraagt het vochttransport van de metselwerkopbouw 20-1-20 zich zeer licht anders dan metselwerkopbouw 9.5-1-20-1-9.5. Dit andere gedrag komt waarschijnlijk doordat het meetpunt van het risico op houtrot van C2 direct naast een mortellaag zit, terwijl dit meetpunt bij C1 enkel omringt is door baksteen. Voor vorst-dooischade is er geen merkbaar verschil waar te nemen tussen de configuraties, vandaar dat deze niet is opgenomen tussen de grafieken.



Figuur 70: Vergelijking Moisture content van C1, C2 en C5 (ZC, RF0.7, PIntO, kritische dag 15 maart)

Op Figuur 70 worden de vochtopslag fieldplots, proportioneel, vergeleken. Het grootste verschil hierop is te zien bij de meer gedetailleerde configuratie, (C5), aan de kalkmortel, waarbij de verticale mortelvoegen algemeen meer uitlopers lijken te hebben in de metselwerkstructuur. De bakstenen worden via de verticale mortelvoeg bevochtigd, (die via de horizontale mortelvoeg wordt bevochtigd),

en buffert dan het vocht naar de baksteen, waarbij het opvalt dat de bevochtiging de richting aanneemt van de bevochtigingsrichting van horizontale mortelvoeg en dus eerder bevochtigt naar binnen toe. Als er een close up van Figuur 70 wordt genomen, verklaart dit waarom C2 | 9.5-1-20-1-9.5 een hoger risico heeft op houtrot dan C5, waar de bevochtiging van de mortellaag eerder richting de binnenkant gebeurt, waardoor het meetpunt van houtrot net voor de mortellaag een lagere vochtopslag heeft dan bij C2, waarbij er geen bevochtigsrichting aanwezig lijkt te zijn.



#### Vergelijking interface weerstand

Figuur 71: Vergelijking C1, C5 en C5 met interface weerstand (ZC, RF1.5, PIntO, kritische dag 15 maart) tussen de materiaallagen

Uit de evaluatie van de bestaande toestand blijken de mortellagen, de verticale samen met de horizontale, een effect te hebben, al is het eerder klein, op het hygrothermisch gedrag en schadefenomenen in de constructie. Net als bij 1D wordt de invloed van de interface weerstand tussen de mortellagen en de baksteen geanalyseerd om waarheidsgetrouwere resultaten te bekomen.

Uit Figuur 71 volgt opnieuw dat het capillair vocht wordt tegengehouden en dat deze verhindering zorgt voor minder goede vochtverdeling in het metselwerk en dus een hogere vochtopslag dichter bij het buitenoppervlak. Dit zorgt op vlak van risico op schade, voor hoger risico op vorst-dooischade en een lager risico op schimmelgroei en houtrot.

# 5.2.2 Nieuwe Toestand

Na het evalueren van de bestaande toestand, wordt de nieuwe toestand onderzocht. Hierbij worden de twee verschillende constructies muuropbouwen die zijn vastgelegd in Figuur 25, verder opgebouwd naar een volwaardige metselwerkstructuur net als de bestaande toestand. De materiaalparameters vastgelegd in Figuur 24, §4.2.1 Bestaande toestand, worden hier opnieuw toegepast.



Figuur 72: Configuraties nieuwe toestand met binnenisolatie, Vlaamse Hoeve, Stap 2

De gedefinieerde configuraties uit Figuur 72 worden in deze tweede stap gebruikt als de zes verschillende simulatiegroepen. Hierbij behoren de bovenste vier configuraties tot deel 1 van stap 2 en de onderste twee tot deel 2 van stap 2. Per configuratie zijn de vaste en variabele parameters hetzelfde als bij de bestaande toestand en terug te vinden in Tabel 6, §4.2.1 Bestaande toestand. Eén configuratie is net als bij de 1D-studie gelijk aan 3 x regenbelasting + 3 x soort baksteen, wat 9 verschillende scenario's per configuratie oplevert.  $\rightarrow$  totaal 9 x 6 = 54 scenario's voor de nieuwe toestand VH

#### Resultaten deel 1

Net zoals bij het besluit van de 1D-studie is opgemerkt, is er te zien dat, na plaatsing van binnenisolatie, alle schadefenomenen zijn toegenomen, waarbij nu ook bij lagere regenbelastingen er risico is op vorstdooischade en schimmelgroei, zie Figuur 73 en 75 grafieken "regenbelasting". Dezelfde algemene vaststellingen zijn van toepassing zoals besproken bij de nieuwe toestand in stap 1, §4.2.2 Nieuwe Toestand. Zo blijft C2, volsteens metselwerk in combinatie met blauwe hardsteen, in schade meer beperkt dan C1, zonder blauwe hardsteen.

#### Resultaten deel 2

Net zoals bij de bestaande toestand kan bij de nieuwe toestand worden waargenomen dat het risico op schade binnenin een constructie, bij de meer gedetailleerde configuraties (C5 en C6), precies tussen de meest kritische configuratie C1 en minst kritische configuratie C2 liggen. Dit verschil is goed te zien op Figuur 76, risico op houtrot, waarbij de gele stip precies tussen de paarse en groene stip ligt bij grafiek "configuraties".



Figuur 73: Resultaten vorst-dooischade nieuwe toestand met binnenisolatie, Vlaamse Hoeve, Stap 2



Figuur 74: Resultaten schimmelgroei nieuwe toestand met binnenisolatie, Vlaamse Hoeve, Stap 2



Figuur 75: Resultaten schimmelgroei gemeten tussen de glaswol en rotswol nieuwe toestand, Vlaamse Hoeve, Stap 2



Figuur 76: Resultaten houtrot, volgens het aantal dosissen, nieuwe toestand met binnenisolatie, Vlaamse Hoeve, Stap 2



Figuur 77: Resultaten houtrot, volgens de vervalscore, nieuwe toestand met binnenisolatie, Vlaamse Hoeve, Stap 2

#### Vergelijking resultaten in kalkmortel

Figuur 78 geeft, zoals in de bestaande toestand, de resultaten gemeten in de baksteenlaag, naast de resultaten gemeten in de kalkmortellaag. Vooral bij het risico op houtrot, valt het op dat de resultaten gemeten in de kalkmortel, hogere risico's op schade opleveren dan die in de baksteen. Opnieuw komt dit doordat de vochtopslag in de kalkmortel hoger ligt dan in de baksteen. Bij de schimmelgroei lijkt dit verschil te zijn verdwenen. Dit kan komen doordat de schimmelgroei na de plaatsing van binnenisolatie meer afhankelijk wordt van de relatieve vochtigheid van het binnenklimaat, waardoor het buitenklimaat en de buffering hiervan doorheen het metselwerk, op de schimmelgroei een beperktere invloed krijgt ten opzichte van de bestaande toestand.



Figuur 78: Vergelijking resultaten vorst-dooischade, schimmelgroei en houtrot gemeten in de baksteen versus in de kalkmortel

Naast het verschil van resultaten in de baksteen ten opzichte van de kalkmortel, is net als de bestaande toestand ook een verschil in het metselwerkverband. Om dit verschil te kunnen bekijken wordt er een korte studie gedaan waarbij er telkens wordt gemeten in de mortel en in de baksteen bij de twee verschillende metselwerkopbouwen.



Figuur 79: Configuratie 5 met aanduiding meetpunten in metselwerk bovenaan, mortel en metselwerk onderaan

Figuur 80 geeft de kans op de drie schadefenomenen opnieuw weer zoals bij de bestaande toestand. Op basis van de eerder besproken resultaten, wordt er gekozen voor configuratie 5, baksteen ZC en een regenbelasting van 0.7.



Figuur 80: Configuratie 5 Nieuwe toestand (ZC, RF0.7): a) IJsmassavolume op 5mm van buitenmetselwerk, b) Relatieve vochtigheid tussen cementering en glaswol, c) Vochtopslag 100mm van binnenmetselwerk

In Figuur 80 is er bevestiging te zien van de eerder geëvalueerde resultaten van Figuur 78. Zo is het duidelijk dat voor schimmelgroei in de nieuwe toestand geen verschil is waar gemeten wordt, aan de mortellaag, of aan beide metselwerkopbouwen. Hierbij wordt de schimmelgroei dan ook niet expliciet gemeten in de mortellaag, maar op de cementering dicht bij de mortellaag. Hierdoor is het logisch dat er minder effect is van de vochtigere mortellaag. Voor vorst-dooischade en houtrot is er wel een groot verschil tussen de resultaten van het meetpunt in de kalkmortel, dat veel kritischer is, of in beide metselwerkopbouwen. Naast het kritischere meetpunt in de kalkmortel, is er te zien dat er geen verschil lijkt te zijn tussen de twee metselwerkopbouwen 20-1-20 en 9.5-1-20-9.5-1.

#### Vergelijking verschillende constructies

In Figuur 81 worden de twee verschillende constructies vergeleken, waarbij er telkens de meest gedetailleerde configuraties worden uitgekozen, namelijk C5 en C6. Hierbij wordt gewerkt met scenario: baksteen ZC, een regenbelasting van 0.7, op de meest kritische dag, 15 maart.



Figuur 81: Vergelijking constructies NT, vochtopslag en relatieve vochtigheid van C5 en C6 (ZC, RF0.7, Kritische dag 15 maart)

Op Figuur 81 zijn net dezelfde fenomenen te zien als bij 1D §4.2.3 Vergelijking bestaande en nieuwe toestand. De blauwe hardsteen zal duidelijk beschermen tegen capillair transport, aangezien de vochtaccumulatie bij de constructie met blauwe hardsteen duidelijk verminderd is. De relatieve vochtigheid blijft bij beide constructies echter hetzelfde wat verklaart dat de blauwe hardsteen minder bescherming biedt tegen damptransport.

#### Vergelijking verschillende configuraties

Hieronder worden de relatieve vochtigheid tussen de cementering en glaswol en de vochtopslag op 100mm van het binnenmetselwerk vergeleken voor de drie configuraties met volsteens metselwerk, waarbij bij C5, de meest gedetailleerde configuratie, de meetpunten in beide metselwerkopbouwen worden weergegeven om een juiste vergelijking te kunnen maken. Ook hier wordt opnieuw gekozen voor het scenario baksteen ZC en een regenbelasting van 0.7.



Figuur 82: Vergelijkingen deel 1 (C1) en deel 2 (C3 en C4) Nieuwe Toestand, (ZC, RF0.7: a) relatieve vochtigheid tussen multipor en lijmmortel, b) Vochtopslag 100mm van binnenmetselwerk

Figuur 82 bevestigt de besproken resultatengrafieken uit Figuur 74 en 76. Het valt op dat C1 steeds de meest kritische configuratie is, met een metselwerkopbouw van 20-1-20. De meer gedetailleerde configuraties C5 en C6, met onderling weinig verschil, liggen hier exact tussen. Het lijkt alsof de andere twee curven, C1 en C2, een soort offset zijn van C5, en dat door de 2D simulaties uit te voeren, exacter de juiste waarde tussen de twee uitersten kan worden bepaald. Hoe meer gedetailleerd de constructies, hoe kleiner het verschil tussen beide metselwerkopbouwen. Als dit verder kan worden aangetoond, wil dit zeggen dat er onderling ook geen verschil hoort te zijn tussen de metselwerkopbouwen, aangezien de hele constructie met elkaar in verbinding staat.



Figuur 83: Vergelijking Moisture content van C1, C2 en C5 (ZC, RF0.7, kritische dag 15 maart)

Op Figuur 83 worden de vochtopslag fieldplots van C1, C2 en C5, proportioneel, vergeleken. Het grootste verschil is hetzelfde als bij de bestaande toestand. Bij C5 zijn uitlopers te zien van het capillair vochttransport aan de mortelvoegen richting de binnenstructuur. Het capillair vocht lijkt op bepaalde momenten dus kritischer in de meer gedetailleerde configuratie, terwijl de resultaten van de schadefenomenen iets anders zeggen. Dit heeft natuurlijk ook te maken met het feit dat de schadefenomenen steeds op dezelfde punten worden geëvalueerd. Daarom is het belangrijk om een overzicht te bekijken over de gehele constructie waarbij kan geconcludeerd worden dat het waarschijnlijk complexer is dan in de grafieken van figuur 82 wordt voorgesteld.

#### Vergelijking interface weerstand

Na een interface weerstand toe te voegen aan de kalkmortellagen en de cementering blijken opnieuw dezelfde bevindingen als de 1D-studie en de bestaande toestand. Dit toont dus opnieuw aan dat de IR wel degelijk het capillair transport verhindert en hierdoor een hoger vochtgehalte veroorzaakt, vooraan in de steen.





# 5.2.3 Vergelijking bestaande en nieuwe toestand

In onderstaande Figuur 85 en 86, wordt de bestaande toestand vergeleken met de nieuwe toestand via drie fieldplots: vochtopslag, relatieve vochtigheid en temperatuur. Hierbij wordt gekozen voor het scenario dat het meeste aansluit bij de werkelijkheid van de Vlaamse Hoeve: volsteens metselwerk zonder blauwe hardsteen, baksteen ZC met een regenbelasting van 0.7. Na evaluatie van het volledige jaar, wordt opnieuw de meest kritische dag geselecteerd: 15 maart.





Figuur 86: Nieuwe toestand: a) Vochtopslag, b) Relatieve vochtigheid, c) Temperatuur (ZC, RF0.7, 15maart)

De vochtopslagfieldplot van de nieuwe toestand buffert meer vocht aan de buitenzijde van het metselwerk, zie groene kleur op Figuur 86a, ten opzichte van de gele kleur, bestaande toestand, op Figuur 85a. De relatieve vochtigheid van de nieuwe toestand is gestegen tot de grens tussen de glaswol en minerale wol, dit is opnieuw hoger dan de bestaande toestand. De temperatuurfieldplot van 15 maart toont aan dat bij de nieuwe toestand de koude wordt buitengehouden door de isolatie, en bij de bestaande toestand het metselwerk de temperatuur aanneemt van binnen.

# 5.3.4 Vergelijking 1D en overgang 1D-2D

Om een goede vergelijking te kunnen maken worden de vochtopslag fieldplots van deel 1 (BT), Figuur 87, en deel 2 (NT), figuur 88, geanalyseerd. Hierbij zijn Figuur 87a en 87b configuraties uit stap 1D en Figuur 87c en 87d configuraties uit stap 1D-2D. Voor deze vergelijking wordt gekozen voor het scenario met baksteen ZC, een regenbelasting van 1.5 en een dampopen, absorberende binnenpleister voor de bestaande toestand. Voor de 1D-2D fieldplots wordt dag 31 december uitgekozen aangezien bij de fieldplot van 15 maart door volledige verzadiging verschillen moeilijker kunnen worden vastgelegd.



Figuur 87: Bestaande toestand, vergelijking vochtopslag 1D en 1D-2D (ZC, RF1.5, PIntO, 31 december): a) 1D C1 BT, b) 1D C3 BT, c) 1D-2D C1 BT, d) 1D-2D C5 BT

De bestaande toestand geeft een duidelijk verschil weer tussen 1D (zie zwart kader voor vergelijking zelfde tijdsperiode) en 1D-2D. Hierbij wordt voor de 1D-2D configuratie de maand december volledig doorlopen, waarbij er te zien is dat er weinig tot geen verschil optreedt in de fieldplot gedurende deze periode. De laatste grote regenperiode eind november, droogt dus veel sneller uit bij de 1D-2D configuraties dan bij de 1D configuraties.



Figuur 88: Nieuwe toestand, vergelijking vochtopslag 1D en 1D-2D (ZC, RF0.7, PIntO, 31 december): a) 1D C1 NT, b) 1D C3 NT, c) 1D-2D C1 NT, d) 1D-2D C5 NT

De nieuwe toestand, Figuur 88, geeft opnieuw een duidelijk verschil tussen 1D en 1D-2D. Hierbij wordt voor de 1D-2D configuratie de maand december opnieuw volledig doorlopen, waarbij te zien is dat het metselwerk nooit zo vochtig zal staan als deze in de 1D fieldplot weergeeft. De laatste grote regenperiode eind november, droogt dus opnieuw veel sneller uit bij de 1D-2D configuraties dan bij de 1D configuraties.

Uit deze vaststellingen zou logischerwijze moeten volgen dat de 1D simulaties kritischer zijn dan de 1D-2D simulaties. Om dit verder te onderzoeken worden de resultaten van vorst-dooischade, schimmelgroei en houtrot vergeleken die zijn bepaald in §4.2.1, 4.2.2 en §5.2.1, 5.2.1.

Als de resultaten stap 1 (1D) en stap 2 (1D-2D) met elkaar worden vergeleken zijn er verschillen te zien. Door de nauwkeurigheid van de simulaties te verhogen door van 1D naar 2D simulaties te gaan, lijken de waarden van de schadefenomenen van de 1D-2D resultaten een daling te ondergaan ten opzichte van de 1D resultaten. Hierbij blijven de resultaten van 1D-2D die zijn gemeten in de kalkmortel wel nog steeds hoger liggen als de homogene 1D-studie.

Als de resultaten worden vergeleken met onderstaande grafieken uit Figuur 89 en 90, bevestigt dit deze daling. Hierop is te zien dat de 1D configuraties zich, zowel in de bestaande als nieuwe toestand, steeds een pak kritischer gedragen op vlak van alle schadefenomenen: vorst-dooischade, schimmelgroei en houtrot.



Figuur 89: Bestaande toestand vergelijkingen stap 1 (1D) en stap 2 (1D-2D), (ZC, RF1.5, PIntO): a) IJsmassavolume op 5mm buitenmetselwerk, b) relatieve vochtigheid binnenpleister, c) Vochtopslag 100mm van binnenmetselwerk



Figuur 90: Nieuwe toestand vergelijkingen stap 1 (1D) en stap 2 (1D-2D), (ZC, RF1.5): a) IJsmassavolume op 5mm buitenmetselwerk, b) relatieve vochtigheid tussen cementering en glaswol, c) Vochtopslag 100mm van binnenmetselwerk

#### 5.2.5 Besluit Vlaamse Hoeve 1D-2D

In vorige onderdelen is de bestaande en de nieuwe toestand van de Vlaamse Hoeve uitvoerig uiteengezet in 1D-2D omgeving, wat meer gedetailleerde en correcte resultaten oplevert. Hoewel het algemeen gedrag hetzelfde blijft, kan er besloten worden dat het toevoegen van een horizontale laag kalkmortel aan de configuraties toch voor andere resultaten en schommelingen zorgt. Door deze 1D-2D analyse kunnen er meer gedetailleerde oorzaken en verbanden worden gelegd over het hygrothermisch gedrag van een constructie. Zo is er een duidelijke stijging van het risico op schade te zien wanneer er gemeten wordt in de kalkmortel voor alle geëvalueerde schadefenomenen. Wanneer er een dampdicht isolatiesysteem wordt toegevoegd aan de constructie verdwijnt dit verschil tussen de baksteen en de kalkmortel volledig voor het risico op schimmelgroei, waaruit kan worden afgeleid dat het hygrothermisch gedrag na renovatie sterk verandert. Voor het risico op schimmelgroei toont dit opnieuw aan dat na renovatie en toevoeging van binnenisolatie, het schadefenomeen sterker wordt beïnvloed door de relatieve vochtigheid van binnenklimaat, waardoor andere parameters en eigenschappen belangrijker worden. Voor de kans op vorst-dooischade en houtrot blijft het verschil tussen de kalkmortel en baksteen wel bestaan, wat aantoont dat deze schadefenomenen na toevoeging van binnenisolatie, net als ervoor, nog steeds afhankelijk zijn van de slagregen en de hoeveelheid vloeibaar vocht binnenin de constructie.

Naast de evaluatie van de horizontale kalkmortel wordt het verschil in metselwerkopbouw vergeleken, waarbij kan worden aangetoond dat meer gedetailleerde constructies kleinere verschillen geven tussen beide metselwerkopbouwen. Dit zou willen zeggen dat er onderling ook geen verschil hoort te zijn tussen de metselwerkopbouwen, aangezien de hele constructie met elkaar in verbinding staat, maar dit moet nog verder onderzocht worden.

Tenslotte kan na de vergelijking van de 1D-studie met de 1D-2D-studie worden besloten dat algemeen de waarden van 1D veel kritischer lijken te zijn dan degene van 1D-2D. Bij vorst-dooischade en houtrot dalen de waarden bij 1D naar 1D-2D, maar stijgen de waarden wel ten opzichte van 1D wanneer het meetpunt wordt gekozen in de mortellaag. Zo ligt de 1D-2D stap eigenlijk tussen de twee uiterste waarden van de homogene 1D stap.

# 5.3 Paardenmarkt Antwerpen

#### 5.3.1 Bestaande toestand

Opnieuw wordt eerst de bestaande toestand onderzocht, hierbij worden de twee verschillende constructies van muuropbouwen die zijn vastgelegd in Figuur 40. verder opgebouwd naar een volwaardige metselwerkstructuur. De materiaalparameters vastgelegd in Figuur 39 van §4.3.1 Bestaande toestand, worden hier opnieuw toegepast.



Figuur 91: Configuraties bestaande toestand, Paardenmarkt Stap 2

De gedefinieerde configuraties uit Figuur 91 worden in deze tweede stap gebruikt als de zes verschillende simulatiegroepen. Hierbij behoren de linkse vier configuraties tot deel 1 van stap 2 en de rechtse twee tot deel 2 van stap 2. Per configuratie zijn de vaste en variabele parameters hetzelfde als bij stap 1 en terug te vinden in Tabel 11 van §4.3.1 Bestaande toestand. Eén volledige configuratie PM is dus weer gelijk aan 3 x regenbelasting + 3 x soort baksteen + (2 x buitenpleister) + 2 x binnenpleister = 36 simulaties per configuratie met buitenpleister, 18 simulaties per configuratie zonder buitenpleister  $\rightarrow$  totaal 36 x 3 + 18 x 3 = 162 simulaties voor de bestaande toestand PM 1D-2D.

#### Resultaten deel 1

Net als bij de simulaties van de Paardenmarkt 1D vertonen zowel C1-C2, volsteens metselwerk met buitenpleister, als C3-C4 zonder buitenpleister, enkel bij een regenbelasting van 1.5 schade, zie D1 Figuur 92, 93 en 94 grafieken "regenbelasting". Bij geen van de configuraties of regenbelastingen is er nu kans op vorst-dooischade, zie Figuur 92. Dezelfde algemene vaststellingen zijn van toepassing zoals besproken bij de nieuwe toestand in stap 1, §4.3.2 Nieuwe Toestand. Zo is er opnieuw geen kans op een vorm van schade bij een dampdichte, laag absorberende buitenpleister. Wat ook opvalt is dat de kans op houtrot, net zoals bij de 1D-2D van de Vlaamse Hoeve, sterk is gedaald ten opzichte van de 1D simulaties.

#### Resultaten deel 2

Algemeen lijkt het risico op schade bij de meer gedetailleerde configuraties, C5 en C6 opnieuw gedaald ten opzichte van hun voorgangerconfiguraties, C1-C2 en C3-C4. Het valt ook weer op dat er een verschil zit tussen de configuraties onderling, C1-C2-C5 en C3-C4-C6, net zoals bij de Vlaamse Hoeve.



Figuur 92: Resultaten vorst-dooischade bestaande toestand, Paardenmarkt, Stap 2



Figuur 93: Resultaten schimmelgroei bestaande toestand, Paardenmarkt, Stap 2



Figuur 94: Resultaten houtrot volgens het aantal dosissen, bestaande toestand, Paardenmarkt, Stap 2



Figuur 95: Resultaten houtrot volgens de vervalindex, bestaande toestand, Paardenmarkt, Stap 2

# Vergelijking resultaten in kalkmortel

Figuur 96 geeft, zoals bij de Vlaamse Hoeve, de resultaten gemeten in de baksteenlaag, naast de resultaten gemeten in de kalkmortellaag. Algemeen valt het weer op dat de resultaten gemeten in de kalkmortellaag een hoger risico hebben op schade dan de resultaten gemeten in de baksteen.



Figuur 96: Vergelijking resultaten vorst-dooischade, schimmelgroei en houtrot gemeten in de baksteen versus in de kalkmortel

Naast het verschil van resultaten in de baksteen ten opzichte van de kalkmortel, is er net als bij de Vlaamse Hoeve ook een verschil in het metselwerkverband. De korte studie over dit verschil is terug te vinden in §Bijlage B, waaruit kan besloten worden dat opnieuw de mortellaag de meest kritische plaats is voor schade en dat er tussen de twee verschillende metselwerkopbouwen niet veel verschil zit.

#### Vergelijking verschillende constructies

Net zoals bij de 1D simulaties is het duidelijk dat de configuraties zonder buitenpleister veel kritischer zijn dan degene met een beschermende buitenpleister. In Figuur 97 worden de twee verschillende opbouwen vergeleken om het inwendige vochttransport beter te begrijpen.



Figuur 97: Vergelijking vochtopslag en relatieve vochtigheid van C5 en C6 (ZC, RF0.7, PExtD, PIntO | PExtZ, PIntO, Kritische dag 15 maart)

Bij C5 geraakt de slagregen niet door de buitenpleister waardoor het vocht de binnenkant van de constructie niet bereikt. Dit in tegenstelling tot C6 waarbij het vocht wel duidelijk wordt gebufferd in de baksteen en het binnenoppervlak kan infiltreren via de mortellagen. Het is duidelijk te zien dat de horizontale mortellaag een belangrijke rol zal spelen in het verdelen van het vocht. Ook bij de relatieve vochtigheid is er aan de grens van de mortellaag en de binnenpleister een kleine uitloper te zien, dit bevestigt vorige vaststellingen in verband met de hogere kans op schade dicht bij de mortellagen.

#### Vergelijking verschillende configuraties

Zoals eerder aangehaald zijn er duidelijk meer verschillen te zien onderling tussen de configuraties, dan bij de 1D-simulaties. Degene die het sterkste opvalt is het verschil in risico op schimmelgroei. Hieronder wordt de relatieve vochtigheid vergeleken voor de drie configuraties met buitenpleister, waarbij bij C5, de meest gedetailleerde configuratie, de meetpunten in beide metselwerkopbouwen worden weergegeven om een juiste vergelijking te kunnen maken. Ook hier wordt opnieuw gekozen voor het scenario baksteen ZC, een regenbelasting van 1.5, en een dampopen buiten- en binnenpleister.



Figuur 98: Vergelijking relatieve vochtigheid binnenoppervlak, deel 1 (C1, C2) en deel 2 (C5) BT, (ZC, RF1.5, PExtO, PIntO)

Op Figuur 98 valt het op dat beide curves van de meer gedetailleerde C5, tussen de twee uiterste curven liggen van C1 en C2. Dit wil opnieuw zeggen dat wanneer de configuratie meer gedetailleerd is, en het verschil in metselwerkopbouw wordt gemeten in éénzelfde configuratie, de waarden meer naar elkaar toegroeien. Dit komt doordat bij de meer gedetailleerdere simulatie, de interactie tussen beide metselwerkopbouwen wordt meegerekend, waardoor het verschil kleiner wordt.

#### Vergelijking interface weerstand

Na een interface weerstand toe te voegen aan de kalkmortellagen blijken opnieuw dezelfde bevindingen als de 1D-studie en de 1D-2D van de Vlaamse Hoeve. Dit toont dus opnieuw aan dat de IR wel degelijk het capillair verhindert en hierdoor een hoger vochtgehalte veroorzaakt vooraan in de steen. De analyse hiervan is terug te vinden in §Bijlage B.

#### 5.3.2 Nieuwe Toestand

Na het evalueren van de bestaande toestand, wordt de nieuwe toestand onderzocht. Hierbij worden de twee verschillende constructies muuropbouwen die zijn vastgelegd in Figuur 49, verder opgebouwd naar een volwaardige metselwerkstructuur net als de bestaande toestand. De materiaalparameters vastgelegd in Figuur 48, §4.3.2 Nieuwe Toestand, worden hier opnieuw toegepast.



Meetpunt schimmelgroei na de isolatie

Uit de gedefinieerde configuraties uit Figuur 99 behoren de linkse vier configuraties tot deel 1 van stap 2 en de rechtse twee tot deel 2 van stap 2. Per configuratie zijn de vaste en variabele parameters hetzelfde als bij de bestaande toestand en terug te vinden in Tabel 11, §4.3.1 Bestaande toestand. Eén configuratie is gelijk aan 3 x regenbelasting + 3 x soort baksteen + (2 x buitenpleister) + 2 x binnenpleister, wat 36 of 18 verschillende scenario's per configuratie oplevert.  $\rightarrow$  totaal 36 x 3 + 18 x 3 = 162 scenario's voor de nieuwe toestand PM

#### Resultaten deel 1

Als Figuur 100, 101, 102 worden vergeleken met de resultaten van de bestaande toestand is opnieuw het risico op schade sterk toegenomen. Dezelfde algemene vaststellingen zijn van toepassing zoals bij de bespreking van de nieuwe toestand, §4.3.2 Nieuwe Toestand.

Wanneer de exacte resultaten worden vergeleken met de nieuwe toestand van de 1D-studie, §4.3.2 Nieuwe Toestand, lijkt het alsof er een algemene daling is gebeurd bij het risico op houtrot en vorstdooischade, waarbij de toepassing van een dampdichte buitenpleister, de configuratie opnieuw totaal geen risico heeft op schade. Bij de schimmelgroei ligt dit iets complexer. Wanneer de 1D resultaten worden vergeleken met 1D-2D valt het op dat er een grotere spreiding is tussen de resultaten, waarbij bij een dampopen buitenpleister de schade is toegenomen, dus de 1D-2D situatie kritischer is. In tegenstelling tot de dampopen buitenpleister, is de schade van de dampdichte buitenpleister gedaald, vandaar de grotere spreiding.

#### Resultaten deel 2

Algemeen lijkt het risico op houtrot en vorst-dooischade bij de meer gedetailleerde configuraties, C5 en C6 opnieuw tussen de waarden van hun voorgangerconfiguraties, C1-C2 en C3-C4, te liggen. Opnieuw geven C1 en C3, waarbij de mortelvoeg het dichtste bij het buitenoppervlak zit, de meest kritische resultaten. Het verschil in schimmelgroei lijkt eerder verwaarloosbaar klein te zijn.



Figuur 100: Resultaten vorst-dooischade nieuwe toestand met binnenisolatie, Paardenmarkt, Stap 2



Figuur 102: Resultaten houtrot volgens het aantal dosissen, nieuwe toestand met binnenisolatie, Paardenmarkt, Stap 2



Figuur 103: Resultaten houtrot volgens de vervalindex, nieuwe toestand met binnenisolatie, Paardenmarkt, Stap 2

#### Vergelijking resultaten in kalkmortel

Figuur 104 geeft, zoals bij de bestaande toestand, de resultaten gemeten in de baksteenlaag, naast de resultaten gemeten in de kalkmortellaag. Algemeen valt het weer op dat het risico op vorst-dooischade en houtrot, gemeten in de kalkmortellaag, een hoger risico hebben op schade dan de resultaten gemeten in de baksteen. Het risico op schimmel blijft, net zoals de nieuwe toestand van de Vlaamse Hoeve, volledig gelijk.



Figuur 104: Vergelijking resultaten vorst-dooischade, schimmelgroei en houtrot gemeten in de baksteen versus in de kalkmortel

Naast het verschil van resultaten in de baksteen ten opzichte van de kalkmortel, is net als Vlaamse Hoeve ook een verschil in het metselwerkverband. De korte studie, die dezelfde resultaten oplevert als de Vlaamse Hoeve, is terug te vinden in §Bijlage B, waaruit kan besloten worden dat opnieuw de mortellaag de meest kritische plaats is voor schade en dat er tussen de twee verschillende metselwerkopbouwen niet veel verschil zit.

#### Vergelijking verschillende constructies

In Figuur 105 worden de twee verschillende constructies vergeleken om het inwendige vochttransport beter te begrijpen. Van elke constructie wordt de meest gedetailleerde configuratie uitgekozen, namelijk C5 en C6. Opnieuw is te zien dat de buitenpleister zowel het capillair- als damptransport tegenhoudt.



Figuur 105: Configuratie 5 en 6 (ZC, RF1.5, PExtD, PIntO, Kritische dag 15 maart): vochtopslag en RH

#### Vergelijking verschillende configuraties

Zoals eerder aangehaald zijn er duidelijk meer verschillen te zien onderling tussen de configuraties, dan bij de 1D-simulaties. Hieronder worden de relatieve vochtigheid (gemeten tussen de lijmmortel en multipor), het vochtgehalte (gemeten op 100mm van het binnenmetselwerk) en het ijsmassavolume (gemeten 5mm in het buitenmetselwerk) vergeleken voor de drie configuraties met buitenpleister, waarbij C5, de meest gedetailleerde configuratie, de meetpunten in beide metselwerkopbouwen worden weergegeven om een juiste vergelijking te kunnen maken. Ook hier wordt opnieuw gekozen voor het scenario baksteen ZC, een regenbelasting van 1.5, en een dampopen buiten- en binnenpleister.



Figuur 106: Vergelijkingen deel 1 (C1, C2) en deel 2 (C5) Nieuwe Toestand, (ZC, RF1.5, PExtO, PIntO): a) IJsmassavolume op 5mm buitenmetselwerk, b) relatieve vochtigheid tussen multipor en lijmmortel, c) Vochtopslag 100mm van binnenmetselwerk

Figuur 106 bevestigt de besproken resultaten uit figuur 100, 101 ,102. Zo is er wel degelijk een groter verschil tussen de configuraties bij het risico op vorst-dooischade (grafiek ijsmassavolume 106a) en het risico op houtrot (grafiek vochtgehalte 106c), dan bij het risico op schimmelgroei (grafiek relatieve vochtigheid 106b), waardoor deze waarden bij de resultaten dus ook dicht bij elkaar liggen en geen verschil te zien is. Bij het risico op vorst-dooischade en houtrot is opnieuw de paarse curve, met mortellaag het dichtste bij het buitenoppervlak, de meest kritische. Voor de relatieve vochtigheidsgrafiek die invloed heeft op de schimmelgroei wisselt dit om, dit valt te verklaren doordat het risico op houtrot en vorst-dooischade beide eerder worden bepaald door de aanwezigheid van vloeibaar vocht. Daarentegen wordt het risico op schimmelgroei bepaald door de relatieve vochtigheid. In de bestaande toestand zonder binnenisolatie wordt de schimmelgroei voornamelijk bepaald door het damptransport van buiten. Na plaatsing van binnenisolatie verandert het hygrothermisch gedrag waardoor, zoals eerder aangehaald, de relatieve vochtigheid van binnen een belangrijkere rol speelt bij het risico op schimmelgroei. Zo is er ook te zien dat bij de nieuwe toestand een hoge regenbelasting veel minder invloed heeft op de stijging van het risico op schimmelgroei ten opzichte van de bestaande toestand. Dit is waarschijnlijk de reden waarom de grafiek ook wisselt ten opzichte van de andere schadefenomenen en ten opzichte van de bestaande toestand. Naast deze theorie, blijft de 1D-2D configuratie geen verschil tonen tussen de metselwerkopbouwen, wat bewijst dat dit verschil in de

eerste plaats niet de realiteit is, doordat alles in werkelijkheid is verbonden met elkaar, zoals eerder besproken.

#### Vergelijking interface weerstand

Na een interface weerstand toe te voegen aan de kalkmortellagen blijken opnieuw dezelfde bevindingen als bij de 1D-studie. De analyse hiervan is terug te vinden in §Bijlage B.

#### 5.3.3 Vergelijking bestaande en nieuwe toestand

In onderstaande Figuur 107 en 108, wordt de bestaande toestand vergeleken met de nieuwe toestand via drie fieldplots: vochtopslag, relatieve vochtigheid en temperatuur. Voor deze vergelijking wordt het scenario met baksteen ZC, een regenbelasting van 0.7, een dampopen hoger absorberende, bestaande, binnenpleister en een dampdichte en lager absorberende buitenpleister. Deze combinatie van parameters schetst de werkelijkheid van de Paardenmarkt.



Figuur 107: Bestaande toestand: a) Vochtopslag, b) Relatieve vochtigheid, c) Temperatuur (ZC, RF0.7, PExtD, PIntO, 15maart)



Figuur 108: Nieuwe toestand: a) Vochtopslag, b) Relatieve vochtigheid, c) Temperatuur (ZC, RF0.7, PExtD, PIntO, 15maart)

De vochtopslagfieldplot van de nieuwe toestand heeft veel vochtigere mortellagen dan die van de bestaande toestand. Dit duidt op het feit dat de constructie duidelijk minder goed kan drogen langs de binnenzijde. Aan de binnenzijde van het metselwerk lijken de mortellagen ook het meeste vocht op te slaan, zie gradiënt van oranje naar geel op Figuur 108a. De relatieve vochtigheid van de nieuwe toestand is enorm gestegen ten opzichte van de bestaande. Ook hier blijft het vocht/damp vastzitten in het midden van de constructie. Vanaf het midden kan wel worden gezien dat er een bepaalde droging is langs de buiten- en binnenzijde, door de dampopen multipor.

# 5.3.4 Vergelijking 1D en overgang 1D-2D

Om een goede vergelijking te kunnen maken worden de vochtopslag fieldplots van deel 1 (BT), figuur 109 en deel 2 (NT), Figuur 110, geanalyseerd. Hierbij zijn Figuur 109a en 109b configuraties uit stap 1D en figuur 109c en 109d configuraties uit stap 1D-2D. Voor deze vergelijking wordt gekozen voor het scenario met baksteen ZC, een regenbelasting van 1.5 en een dampopen, absorberende buiten- en binnenpleister. Voor de 1D-2D fieldplots wordt dag 31 december uitgekozen aangezien bij de fieldplot van 15 maart door volledige verzadiging verschillen moeilijk kunnen worden vastgelegd.



Figuur 109: Bestaande toestand, vergelijking vochtopslag 1D en 1D-2D (ZC, RF1.5, PExtO, PIntO, 31 december): a) 1D C1 BT, b) 1D C3 BT, c) 1D-2D C1 BT, d) 1D-2D C5 BT

De bestaande toestand, Figuur 109, geeft een duidelijk verschil weer tussen 1D en 1D-2D. Net als bij de Vlaamse Hoeve is er te zien dat de laatste grote regenperiode eind november, veel sneller uitdroogt bij de 1D-2D configuraties dan bij de 1D configuraties.



Figuur 110: Nieuwe toestand, vergelijking vochtopslag 1D en 1D-2D (ZC, RF1.5, PExtO, PIntO, 31 december): a) 1D C1 NT, b) 1D C3 NT, c) 1D-2D C1 NT, d) 1D-2D C5 NT

Op de nieuwe toestand, Figuur 110, is ook te zien dat het metselwerk nooit zo vochtig zal staan als de 1D fieldplot weergeeft. Bij de nieuwe toestand kan er ten opzichte van de bestaande toestand ook worden gezien dat het nu veel langer duurt om na de regenbui van eind november de constructie opnieuw droog te krijgen. Bij de bestaande toestand duurt dit maar enkele dagen, terwijl dit in de nieuwe toestand een maand in beslag neemt en ze nog niet volledig is uitgedroogd. Verder kan ook worden gezien dat in Figuur 110c en 110d een verschil is in uitdroging van het vocht. Wanneer beide fieldplots onder elkaar worden gezet is het zeer duidelijk dat Figuur 110c een bredere oranje zone heeft in het metselwerk dan Figuur 110d, wat een hogere vochtbelasting met zich meebrengt.

Uit deze vaststellingen zou logischerwijze moeten volgen dat de 1D simulaties kritischer zijn dan de 1D-2D simulaties. Om dit verder te onderzoeken worden de resultaten van vorst-dooischade, schimmelgroei en houtrot vergeleken die zijn bepaald in §4.3 en §5.3. Als deze resultaten worden vergeleken met onderstaande grafieken uit Figuur 111 en 112, bevestigt dit dat de 1D-studie kritischer is dan de 1D-2D-studie voor de geëvalueerde schadefenomenen. Enkel bij het risico op schimmelgroei is het complexer. Dit is ook al eerder besproken in de resultaten, er is ten opzichte van 1D een zekere spreiding in de waarden gekomen bij 1D-2D. Er is een stijging in het risico op schimmelgroei bij de dampopen buitenpleister, en een daling in risico op schimmelgroei bij de dampopen buitenpleister, en een daling in risico op schimmelgroei bij de dampopen dampopen buitenpleister geëvalueerd, vandaar de daling.



Figuur 111: Bestaande toestand vergelijkingen stap 1 (1D) en stap 2 (1D-2D), (ZC, RF1.5, PExtO, PIntO): a) IJsmassavolume op 5mm buitenmetselwerk, b) relatieve vochtigheid binnenpleister, c) Vochtopslag 100mm van binnenmetselwerk



Figuur 112: Nieuwe toestand vergelijkingen stap 1 (1D) en stap 2 (1D-2D), (ZC, RF1.5, PExtO, PIntO): a) IJsmassavolume op 5mm buitenmetselwerk, b) relatieve vochtigheid binnenpleister, c) Vochtopslag 100mm van binnenmetselwerk

#### 5.3.5 Besluit Paardenmarkt 1D-2D

In vorige onderdelen is de bestaande en de nieuwe toestand van de Paardenmarkt uitvoerig onderzocht in 1D-2D omgeving, wat meer gedetailleerde en correcte resultaten oplevert. De conclusies die zijn genomen in het besluit van de Vlaamse Hoeve blijven geldig bij de evaluatie van de Paardenmarkt.

Door deze 1D-2D studie kan opnieuw worden aangetoond dat er een stijging is op het risico van schade wanneer er gemeten wordt in de kalkmortel en dat het hygrothermisch gedrag na renovatie verandert. Het risico op houtrot en vorst-dooischade wordt zowel na als voor toevoeging van binnenisolatie bepaald door de aanwezigheid van vloeibaar vocht, terwijl het risico op schimmelgroei sterk afhankelijk is van de relatieve vochtigheid van buiten voor renovatie. Na plaatsing van binnenisolatie verandert het hygrothermisch gedrag, waardoor de relatieve vochtigheid van binnen een belangrijkere rol speelt bij het risico op schimmelgroei. Bovendien toont de 1D-2D configuratie een afnemend en verwaarloosbaar klein verschil tussen de metselwerkopbouwen. Dit geeft opnieuw aan dat het alternerend

metselwerkverband in realiteit minder invloed heeft, doordat alle elementen in werkelijkheid ook met elkaar verbonden zijn. Voor dit verschil, aanwezig in de 1D en 1D-2D studies, moet dus worden opgepast aangezien het niet overeenkomt met de werkelijkheid.

Tenslotte kan na de vergelijking van de 1D-studie met de 1D-2D-studie worden besloten dat algemeen de waarden van 1D veel kritischer lijken te zijn dan degene van 1D-2D. Bij de kans op schimmelgroei moet er wel worden opgepast om deze conclusie te maken, want dit vertoont een complexer gedrag.

# 6. 2D-Simulaties

# 6.1 Vertaling naar 2D simulaties

In het dit hoofdstuk zal de derde stap: 2D worden uiteengezet, die slechts één onderdeel bevat: de nieuwe toestand. De bestaande toestand zal hier niet worden geëvalueerd aangezien er te weinig gegevens zijn over de gebruikte materialen, positie van het raam, diktes van de gebruikte materialen... In deze stap zal elke bouwknoop afzonderlijk worden gesimuleerd en geëvalueerd: Onder en Boven. Aan de hand van voorgaande 1D en 1D-2D simulaties kunnen kritische zones worden aangeduid als meetpunt per bouwknoop. Op deze manier kunnen er conclusies worden getrokken over het degradatiegedrag van de cases per bouwknoop en kan dit vergeleken worden met de geanalyseerde constructies uit Hoofdstuk 4 en 5.

# 6.2 Vlaamse Hoeve Meise

Eerst is er een onderzoek gedaan naar de raamaansluitingen van de Vlaamse Hoeve, waarbij de detailtekeningen vergeleken zijn met de uitvoering van de nieuwe gerenoveerde toestand. Hierbij zijn de detailtekeningen opnieuw gegenereerd en terug te vinden in Figuur 114, Figuur 122. De oorspronkelijke detailtekeningen en werffoto's waarop deze details zijn gebaseerd zijn terug te vinden in §Bijlage A., stap 3. De extra materialen en eigenschappen die er door de uitbreiding van het constructiedetail extra bijkomen, zijn terug te vinden hieronder, in Figuur 113.

Telkens zullen eerst de bouwknopen apart worden geëvalueerd. Dit gebeurt aan de hand van één uitgekozen scenario. Bij de Vlaamse Hoeve wordt er in de vorige hoofdstukken voornamelijk gewerkt met de meest kritische baksteen op vlak van vorst-dooischade en schimmelgroei, namelijk baksteen ZC. Aangezien voor de 2D-simulaties de rekentijd van baksteen ZC en ZK meer als dubbel zolang oploopt als baksteen ZG, wordt hier wegens te hoge calculatietijd verder gewerkt met ZG (aangepast naar de gegeven parameters van de Vlaamse Hoeve). Als regenbelasting wordt gekozen voor 0.7, hierin worden mogelijke ophopingen van water aan de hoeken van de raamaansluitingen en het ontbreken van enkele vensterbanken bij sommige ramen bijgerekend. Na deze evaluatie per knoop zullen de eerder variërende parameters ook worden geëvalueerd en alle scenario's in enkele overzichtsgrafieken worden samengevat.
### Extra materiaaleigenschappen raamaansluiting



Merantihout				
Parameter	Symbool	Eenheid	Gemiddelde waarde	
Densiteit	ρ	[kg/m³]	640 kg/m³	
+ Delphin 6.1   Spruce Ra	dial  ID : 696			
Gelakte Multiplex				
Densiteit	ρ	[kg/m³]	503 kg/m³	
Warmtegeleiding	λ	[W/m.K]	0,13 W/m.K	
+ Delphin 6.1   OSB Board	ID : -1   Wa	tertight, Vaportig	ht	
Flexifoam				
Dampdiffusieweerstand	μ	[-]	510	
Warmtegeleiding	λ	[W/m.K]	0,14 W/m.K	
+ Delphin 6.1   Polyurethanschaum   ID : -1   Watertight				
Raamkader				
Geen specifieke gegevens over de gebruikte houten raamkader				
$\frac{1}{R_e} + \frac{\lambda_{meranti}}{d} + \frac{\lambda_{equivalent}}{d} + \frac{1}{R_i} = U_f \cong 1, 1W/m^2 K \rightarrow \lambda_{equivalent} \text{ berekenen}$				

> Delphin 6.1 | Spruce Radial| ID : 696 | Watertight, Vaportight

Figuur 113: Materiaaleigenschappen nieuwe toestand, Vlaamse Hoeve, Stap 3

#### 6.2.1 Raamaansluiting verticale snede onderaan

Het raamaansluitingsdetail onderaan is stap voor stap opgebouwd in Delphin 6.1. Hierbij is een iets abstractere versie gegenereerd van figuur 114, waarbij de schuine delen horizontaal zijn geplaatst met verticale regenbelasting.

Voor het houten raamkader is een equivalente lambda-waarde berekend, zodat het volledige raamkader overeenkomt met een U-waarde van 1.1W/m<sup>3</sup>K.



Figuur 114: Raamaansluiting verticale snede onderaan met aangegeven meetpunten, Vlaamse Hoeve, Stap 3



#### Resultaten

Bovenstaande resultaten in Figuur 115 geven de schadefenomenen in de raamaansluiting weer bij een regenbelasting van 0.7 en baksteen ZG. Wat opvalt is dat de schade toeneemt naarmate er verder wordt gemeten van de raamaansluiting, er lijkt dus geen extra schade te worden veroorzaakt door de raamaansluiting zelf. Wanneer deze resultaten worden vergeleken met hetzelfde scenario uit stap 2: 1D-2D, §5.2.2 Nieuwe Toestand (zie Figuur 116), is te zien dat er eerder een algemene daling is van de schadefenomenen. Dit wordt verder onderzocht aan de hand van fieldplots van het vochtgehalte, de relatieve vochtigheid en de temperatuur, opnieuw in vergelijking met de 1D-2D overgang uit stap 2.



Figuur 116: Resultaten schadefenomenen 1D-2D, C5, ZG, RF0.7, Vlaamse Hoeve, Stap 2

Figuur 115: Resultaten schadefenomenen verticale snede onderaan, Vlaamse Hoeve, Stap 3

#### Evaluatie hygrothermisch gedrag

Moisture content [kg/m<sup>3</sup>] | ZG | RF0.7 | 15-03



Figuur 117a geeft de fieldplot van de moisture content van de raamaansluiting proportioneel weer. Net zoals in de vorige stappen is er een accumulatie van capillair vocht te zien na de cementering, hoewel deze kleiner is dan de twee eerder geëvalueerde constructies uit de overgang van 1D-2D, zie figuur 117b, volsteens metselwerk met blauwe hardsteen en 117C, volsteens metselwerk.

Het raamaansluitingsdetail aan het raam is afgesloten van damp- en capillair vochttransport door een

Figuur 117: Moisture content fieldplot (ZG, RF0.7, 15-03): a) Stap 3, Raamaansluiting verticale snede onderaan, b) Stap 2, constructie blauwe hardsteen en volsteens metselwerk, c) Stap 2, constructie volsteens metselwerk

damp- en waterdichte laag verf op de multiplexvenstertablet. Hierbij moet wel gezegd worden dat wanneer deze verflaag beschadigd zou raken, deze aansluiting een heel ander vochtgedrag zou vertonen. Naast de damp- en waterdichte afsluiting van de nieuw toegevoegde venstertablet, is de blauwe hardsteen bij de raamaansluiting breder en licht uitkragend. Dit zorgt voor een hogere bescherming tegen slagregen aan de blauwe hardsteen, en zorgt daarnaast voor bescherming voor het onderliggende metselwerk van slagregen. Daarnaast zal deze blauwe hardsteen ook zorgen voor een verminderde droging. Verder zorgt het contact tussen de blauwe hardsteen en het metselwerk wel voor een hoger capillair vochtgehalte onder de blauwe hardsteen, al lijkt dit ook geen invloed te hebben op de schadefenomenen en de accumulatie van vocht na de cementering. Deze accumulatie heeft, zoals eerder besproken, te maken met het vloeibaar transport, dat door de dikkere blauwe hardsteen meer wordt tegengehouden, waardoor een lagere accumulatie ontstaat. Verder valt het op dat er bovenaan aan de blauwe hardsteen meer vocht binnenin de constructie kan infiltreren, doordat de blauwe hardsteen nu ook bovenaan wordt bevochtigd, dit geeft wel een kritischer verloop aan dan bij figuur 117b, al lijkt dit niet veel impact te hebben op de schadefenomenen. Bij de binnenconstructie lijkt de vochtophoping geleidelijk aan toe te nemen naarmate er dieper gegaan wordt in de constructie en dus afstand genomen wordt van de raamaansluiting en de blauwe hardsteen. Algemeen lijkt het dus dat de raamaansluiting (figuur 117a) op het eerste zicht een minder kritische situatie oplevert dan de geëvalueerde wandopbouwen van stap 1 en stap 2 (figuur 117b, 117c).

Figuur 118a geeft de fieldplot van de relatieve vochtigheid van de raamaansluiting proportioneel weer. Hierbij is gezocht naar de periode waarbij de relatieve vochtigheid het meest kritisch is. Dit is bij deze raamaansluiting rond 11 augustus, volgens het gebruikte MRY. Op de fieldplot van figuur 118a is te zien dat er toch nog een hoge relatieve vochtigheid wordt gemeten net voor de houtvezelplaat. Hierbij moet wel gezegd worden dat de meest kritische dag is geselecteerd, waardoor het lijkt alsof de aansluiting steeds deze hoge relatieve vochtigheden heeft, wat niet het geval is. De blauwe hardsteen, met extra bevochtiging van bovenaan, zal het damp doorgeven naar het metselwerk en zo ook naar de binnenzijde

de constructie. van In vergelijking met de fieldplot van figuur 118b is het duidelijk dat deze extra bevochtigingskant van de blauwe hardsteen invloed heeft ор de relatieve luchtvochtigheid. In vergelijking met figuur 118c, zonder de beschermende blauwe hardsteen lijkt de relatieve vochtigheid veel verder tot de binnenconstructie te geraken.

Relatieve vochtigheid [%] | ZG | RF0.7 | 11-08







a)

b)

c)

Figuur 119: Temperatuur fieldplot (ZG, RF0.7, 09-12): a) Stap 3, Raamaansluiting verticale snede onderaan, b) Stap 2, constructie blauwe hardsteen en volsteens metselwerk, c) Stap 2, constructie volsteens metselwerk

figuur 119, Op ор de temperatuurfieldplot, is op vlak van vorst-dooischade de meest kritische dag uitgekozen, 9 december, bij het gebruikte MRY. Het valt op dat aan de raamaansluiting, er meer warmte ontsnapt naar buiten, de lagere door iets warmteweerstand, ten opzichte van figuur 119b en 119c.

Dit zorgt voor een lagere kans op vorst-dooischade door hogere temperaturen in het metselwerk. Daarnaast zorgt dit wel voor een lokale verlaging van de oppervlaktetemperatuur, dat een hogere kans op condensering van het vochtige binnenklimaat met zich meebrengt.

#### Vergelijking interface weerstand

Moisture content [kg/m<sup>3</sup>] | ZG | RF0.7 | 15-03

IR | Moisture content [kg/m<sup>3</sup>] | ZG | RF0.7 | 15-03



Figuur 120: Vergelijking Raamaansluiting verticale snede onderaan met interface weerstand (ZG, RF0.7, 15-03)

Wanneer er net zoals in stap 1 en 2 een interface weerstand wordt toegevoegd tussen de kalkmortellagen, de baksteen en de blauwe hardsteen, wordt er op het vlak van moisture content weinig verschil geobserveerd, zie Figuur 120. Aan de blauwe hardsteen is wel een kleine stijging van het vochtgehalte te zien, daarnaast is er na de blauwe hardsteen ook een kleine afname van vochtgehalte te zien in de baksteen. Hoewel deze verschillen kleiner zijn, komen ze wel overeen met de vaststellingen en conclusies uit de vorige stappen. Wanneer de schadefenomenen worden geëvalueerd is er geen enkel verschil in de resultaten op te merken met of zonder IR.



Figuur 121: Vergelijking homogenisatie Raamaansluiting verticale snede onderaan (ZG, RF0.7, 15-03)

Er is een test gedaan om een schatting te kunnen doen over de invloed van het homogeniseren van het metselwerk, zie Figuur 121. Algemeen gezien zijn de waarden van het risico op schimmelgroei gedaald ten opzichte van een meer gedetailleerd opbouw. Dit komt niet overeen met de constataties uit de vorige stappen, die stellen dat een gedetailleerdere structuur eerder minder kritisch gedrag vertoont. Daarnaast is te zien op Figuur 121b dat de vochtaccumulatie na de cementering bijna volledig verdwenen is. Wanneer niet gedetailleerde elementen, zoals de homogene metselwerkstructuur, worden gecombineerd met een zeer gedetailleerde bouwknoop, zoals deze raamaansluiting, blijken de mortellagen een zeer belangrijke rol te spelen en worden ze plots onmisbaar voor de correctheid van het bepalen van het hygrothermisch gedrag van de constructie. Hierbij kan enkel worden aangenomen dat de extra horizontale bevochtigingszijde een grote invloed heeft op de constructie, aangezien de verticale mortellagen nu ook rechtstreekser kunnen worden bevochtigd. Door de nu rechtstreeksere bevochtiging van zowel de horizontale als verticale mortellagen, oefenen de mortellagen een grotere invloed uit op het vochtgedrag van de constructie. Dit in tegenstelling tot de 1D-2D studie, waarbij er slechts impact is van het binnen- en buitenklimaat op twee verticale vlakken, waardoor enkel de horizontale mortellaag zal instaan voor het vervoeren van damp en vocht naar de binnenconstructie.

#### 6.2.2 Raamaansluiting verticale snede bovenaan

Het raamaansluitingsdetail bovenaan is stap voor stap opgebouwd in Delphin 6.1. Hierbij is een iets abstractere versie gegenereerd van Figuur 122, waarbij de schuine delen opnieuw horizontaal zijn geplaatst met verticale regenbelasting.



Figuur 123: Raamaansluiting verticale snede bovenaan, Vlaamse Hoeve, Stap 3

Bovenstaande resultaten in Figuur 123 geven de schadefenomenen in de raamaansluiting weer bij een regenbelasting van 0. 7 en baksteen ZG. Wat opvalt is dat opnieuw de schade toeneemt naarmate er verder wordt gemeten van de raamaansluiting. Wanneer deze resultaten worden vergeleken met hetzelfde scenario uit stap 2: 1D-2D, §5.2.2 Nieuwe Toestand (zie Figuur 116), is te zien dat er sterke daling is van de schadefenomenen.



Figuur 124: Raamaansluiting verticale snede bovenaan (ZG, RF0.7): a) Moisture content 15-03, b) Relatieve vochtigheid, 11-08

Figuur 124a geeft de fieldplot van de moisture content van de raamaansluiting proportioneel weer. Als deze wordt vergeleken met de vorig stappen is er nu geen accumulatie van capillair vocht meer te zien na de cementering. Dit betekent dat het raamaansluitingsdetail bovenaan minder kritisch is dan het raamaansluitingsdetail onderaan. Dit komt doordat er nu maar één verticale kant is waar de slagregen op kan vallen, terwijl bij het detail onderaan het water ook bovenaan door de blauwe hardsteen kon infiltreren. Daarnaast lijkt de extra open kant onderaan aan de blauwe hardsteen, die nu niet kan gebruikt worden als extra bevochtigingskant en beschermd is van slagregen, in zal staan voor droging. Deze droging via damptransport verklaart het ontbreken van de accumulatie van het capillair vocht na de cementering en het lagere vochtgehalte in het metselwerk ten opzichte van de 1D-2D studie.

Het lager risico op schimmel is duidelijk waar te nemen op Figuur 124b die de fieldplot van de relatieve vochtigheid weergeeft. Ook hier is een daling te zien waardoor er nu ook het risico op schimmelgroei tussen de glaswol en minerale wol verdwijnt. Als de fieldplot van de relatieve vochtigheid van de raamaansluiting wordt vergeleken met de 1D-2D overgang fieldplots, is te zien dat de 1D-2D overgang veel kritischere resultaten geeft. Dit door de extra droging van het metselwerk aan de raamaansluiting.

#### 6.2.4 Raamaansluitingen overzicht

Het verschil in baksteen en het verschil in regenbelasting is geëvalueerd met de beschikbare resultaten. Door de hoge simulatietijd konden niet alle scenario's worden vergeleken. Wat wel algemeen kon worden vastgesteld is dat er een verhoging is, in het risico op schade, bij een hogere regenbelasting, net zoals in de vorige hoofdstukken is vastgesteld. Hierbij neemt zowel de vorst-dooischade, het risico op houtrot en de kans op schimmelgroei sterk toe. Na de isolatie en op de interieurvlakken is er nooit kans op schimmelgroei.

#### 6.2.5 Besluit Vlaamse Hoeve 2D

In dit deel zijn de raamaansluitingen van de nieuwe toestand van de Vlaamse Hoeve onderzocht, ontleed en geanalyseerd, in 2D omgeving. Dezelfde bevochtigingsfenomenen zijn aanwezig zoals in de 1D stap en 1D-2D stap. Het verschil tussen de raamaansluitingen en de 1D-2D stap is dat het buiten- en binnenklimaat nu zowel in de horizontale als verticale dimensie kunnen aangrijpen op de bouwknoop, in plaats van enkel verticaal. Hierdoor blijven de bevochtigingsfenomenen wel hetzelfde maar is het bevochtigingpatroon binnenin de constructie veranderd.

Algemeen kan vastgesteld worden dat de extra horizontale dimensie zowel een positief als negatief effect kan hebben op de geëvalueerde raamaansluiting. Aan de ene kant kan deze dimensie worden blootgesteld aan extra slagregen en waterdamp van het buitenklimaat, wat resulteert in een extra bevochtigingszijde voor de constructie. Deze bevochtigingszijde heeft een nadelig effect, doordat er een extra hoeveelheid vocht kan infiltreren in de constructie. Aan de andere kant kan deze extra dimensie ook zorgen voor droging van de constructie, waardoor het geïnfiltreerde vocht sneller kan uitdrogen, wat zorgt voor een positief effect op de constructie.

Uit de bevindingen van de raamaansluitingen van de Vlaamse Hoeve kan niet worden afgeleid dat de raamaansluiting onderaan kritischer wordt door de extra bevochtigingzijde. Dit fenomeen wordt tegengehouden door een verder uitstekende dorpel die het vloeibaar transport meer kan tegenhouden.

De raamaansluiting bovenaan is minder kritisch door de extra mogelijke droging langs de onderzijde die beschermd wordt van slagregen.

Na het testen van de interface weerstand blijken de vaststellingen van de 1D-studie en de 1D-2D-studie overeen te komen met de observaties van deze 2D-studie. Opnieuw is aangetoond dat de interface weerstand in de mortellaag het capillair transport zal verhinderen in de constructie, en daarnaast zal zorgen voor een toename van vocht in het begin van het metselwerk. Dit lijkt bij de 2D-studie geen invloed te hebben op de schadefenomenen en is daarnaast minder opvallend waar te nemen bij de Vlaamse Hoeve.

Als het metselwerk in de raamaansluiting wordt gehomogeniseerd naar een volledige baksteenstructuur zonder mortellagen, blijken de resultaten die het risico op schade evalueren, dit keer gedaald te zijn ten opzichte van een gedetailleerde metselwerkstructuur. Daarnaast is het capillair transport afgenomen. Dit toont aan dat de onderbrekende mortellagen, die het vocht transporteren naar de binnenconstructie, hier een grote rol spelen. Dit roept uiteraard vragen op, aangezien er bij de 1D-studie en de 1D-2D-studie net het tegengestelde is vastgesteld. Het lijkt alsof de extra horizontale bevochtigingszijde een grote invloed hierin heeft, aangezien de verticale mortellagen zo rechtstreekser kunnen worden bevochtigd. Door deze rechtstreeksere bevochtiging van zowel de horizontale als verticale mortellagen, kunnen de mortellagen een groter invloed uitoefenen op het vochtgedrag van de constructie.

Concluderend benadrukken deze bevindingen het belang van de geometrie, het aantal extra bevochtigings- of drogingsvlakken en de gekozen materialen bij de raamaansluiting.

#### 6.3 Paardenmarkt Antwerpen

Er is een onderzoek gedaan naar de raamaansluitingen van de Paardenmarkt, waarbij de detailtekeningen vergeleken zijn met de uitvoering van de nieuwe gerenoveerde toestand. Hierbij zijn de detailtekeningen opnieuw gegenereerd en terug te vinden in Figuur 126, Figuur 132. De oorspronkelijke detailtekeningen en werffoto's waarop deze details zijn gebaseerd, zijn terug te vinden in §Bijlage B, stap 3. De extra materialen en eigenschappen die er door de uitbreiding van het constructiedetail extra bijkomen, zijn terug te vinden hieronder, in Figuur 125.

Opnieuw zullen eerst de bouwknopen apart worden geëvalueerd. Dit gebeurt aan de hand van één uitgekozen scenario. Bij de Paardenmarkt wordt er gewerkt met de meest kritische baksteen op vlak van vorst-dooischade en schimmelgroei, baksteen ZC. Als regenbelasting wordt gekozen voor 0.7, hierin wordt mogelijke schade van het pleisterwerk en ophoping van water aan de hoeken van de raamaansluiting bijgerekend. Na deze evaluatie per knoop zullen de eerder variërende parameters worden geëvalueerd en alle scenario's in enkele overzichtsgrafieken worden samengevat. Hierbij worden de scenario's van een dampopen buitenpleisterwerk en zonder pleisterwerk niet verder onderzocht, aangezien ze niet overeenkomen met de realiteit en aangezien het 2D simuleren ergens tot een minimum moet gehouden worden door de simulatietijd en de opslag.

### Materiaaleigenschappen Raamaansluiting



PIR					
Parameter	Symbool	Eenheid	Gemiddelde waarde		
Dampdiffusieweerstand	μ	[-]	40		
Warmtegeleiding	λ	[W/m.K]	0,038 W/m.K		
+ Delphin 6.1   Polystyrol	platte - extrud	iert   ID : -1   Wa	tertight		
PUR-schuim					
Warmtegeleiding	λ	[W/m.K]	0,035 W/m.K		
Densiteit	ρ	[kg/m³]	25 kg/m³		
+ Delphin 6.1   Polyuretha	anschaum   ID	:-1   Watertight			
Multiplex					
Geen specifieke gegevens over de gebruikte multiplex					
> Delphin 6.1   OSB Board	ID : -1				
Buitenpleister dagkanten	Buitenpleister dagkanten				
Waterabsorptiecoëfficiënt	$A_w$	[kg/s <sup>0.5</sup> m²]	0,033 kg/s <sup>0.5</sup> m² (W2, EN 998-1)		
+ Delphin 6.1  Lime Cement Plaster   ID : 145					
Blauwe Hardsteen					
Geen specifieke gegevens over de aanwezige blauwe hardsteen dorpel					
> Delphin 6.1   Shell Limestone Facade Element   ID : 560					
Nieuwe kalkcementmortel					
Geen specifieke gegevens over de gebruikte bastaardmortel					
> Delphin 6.1   Lime Cement Mortar   ID : 143					
Raamkader					

Geen specifieke gegevens over de gebruikte aluminium raamkader

 $\frac{1}{R_e} + \frac{\lambda_{aluminium}}{d} + \frac{\lambda_{equivalent}}{d} + \frac{1}{R_i} = U_f \cong 1, 1W/m^2K \rightarrow \lambda_{equivalent} \text{ berekenen}$ 

> Delphin 6.1 | Aluminium alloys | ID : -1 | Watertight, Vaportight

Figuur 125: Materiaaleigenschappen nieuwe toestand, Paardenmarkt, Stap 3

#### 6.3.1 Raamaansluiting verticale snede onderaan

Het raamaansluitingsdetail onderaan is stap voor stap opgebouwd in Delphin 6.1. Hierbij is een iets abstractere versie gegenereerd van Figuur 126, waarbij de schuine delen horizontaal zijn geplaatst met verticale regenbelasting. Daarnaast is het dunne aluminiumprofiel, omwille van het beperken van de rekentijd, vervangen door een waterkering die loopt tot over de blauwe hardsteen (sd =10.000m).



Figuur 126: Raamaansluiting verticale snede onderaan, Paardenmarkt, Stap 3

#### <u>Resultaten</u>



Figuur 127: Raamaansluiting verticale snede onderaan, Paardenmarkt, Stap 3

Bovenstaande resultaten in Figuur 127 geven de schadefenomenen in de raamaansluiting weer bij een regenbelasting van 0.7 en baksteen ZC. Wat opvalt is dat de schade opnieuw toeneemt naarmate er verder wordt gemeten van de raamaansluiting, er lijkt dus geen extra schade te worden veroorzaakt door de raamaansluiting zelf. Wanneer deze resultaten worden vergeleken met hetzelfde scenario uit stap 2: 1D-2D, §5.3.2 Nieuwe Toestand (zie Figuur 128), is te zien dat er eerder een stijging is van de schadefenomenen. Dit wordt verder onderzocht aan de hand van fieldplots van het vochtgehalte, de relatieve vochtigheid en de temperatuur, opnieuw in vergelijking met de 1D-2D overgang uit stap 2.



Figuur 128: Resultaten schadefenomenen 1D-2D, C5, ZG, RF0.7, Paardenmarkt, Stap 2

#### Evaluatie hygrothermisch gedrag

#### Moisture content [kg/m<sup>3</sup>] | ZC | RF0.7 | 15-03



Figuur 129: Moisture content fieldplot (ZC, RF0.7): a) Stap 3, Raamaansluiting verticale snede onderaan, b) Stap 2, constructie volsteens metselwerk en lager absorberende buitenpleister

Figuur 129a geeft de fieldplot van de moisture content van de raamaansluiting proportioneel weer. Hierbij is de legende van het moisture content maximum verplaatst naar 80kg/m<sup>3</sup> aangezien de vochtverdeling in de fieldplot dan leesbaarder wordt. Zoals eerder vermeld is het aluminiumprofiel hier vervangen door een waterkering die 5cm over de blauwe hardsteen loopt. Op de meest kritische dag, 15 maart, is te zien dat de blauwe hardsteen dorpel vocht opneemt en doorgeeft aan de buitenpleister. Deze buitenpleister geeft het vochtgehalte door aan de kalkmortel, waarna het de binnenconstructie snel bereikt, door de dunnere muurdikte. Hierbij is het opvallend dat de bakstenen bijna volledig afwezig

blijven bij het capillair transport.

Er kan gesteld worden dat de extra bevochtigingskant van de dorpel zorgt voor een stijging in het vochtgehalte en zo ook een stijging in de kans op schade. Deze schade wordt wel veroorzaakt door de raamaansluiting, wat deze kritischer maakt dan het eerder geëvalueerde 1D-2D metselwerk van figuur 129b. In figuur 129b valt het op dat het vocht minder ver moet worden gebufferd in het capillair actieve isolatiemateriaal, aangezien er minder vocht aanwezig is en zo ook minder droging nodig is.

Figuur 130a geeft de relatieve vochtigheid weer over de gehele constructie. Bij de Paardenmarkt is de meest kritische relatieve vochtigheid deze van 15 maart. De fieldplot van de relatieve vochtigheid lijkt hetzelfde patroon als het moisture content fieldplot aan te nemen (figuur 130a). Hierbij is het damptransport hoger door de driezijdige mogelijkheid voor damptransport de van blauwe hardsteendorpel. Wanneer er meer afstand zou worden genomen van de raamaansluiting en dit damptransport slechts éénzijdig wordt langs de buitenpleister, zal de relatieve vochtigheid minder ver geraken in de constructie.

Het verschil tussen figuur 130a en 130b is dat de relatieve vochtigheid van de



Relatieve vochtigheid [%] | ZC | RF0.7 | 15-03

Raamaansluiting verticale snede onderaan, b) Stap 2, constructie volsteens metselwerk en lager absorberende buitenpleister

raamaansluiting sterk wordt gestuurd door het extra damptransport afkomstig van het buitenklimaat.

Daarentegen zal figuur 130b, het volsteens metselwerk met buitenpleister, door de kleinere mogelijkheid tot infiltratie van damptransport, sterker worden bepaald door het binnenklimaat.



Figuur 131: Temperatuur fieldplot (ZC, RF0.7): a) Stap 3, Raamaansluiting verticale snede onderaan b) Stap 2, constructie volsteens metselwerk en lager absorberende buitenpleister

Op figuur 131 wordt de temperatuurverdeling over de constructie weergegeven. Hierbij is er een daling in de warmteweerstand aan de raamaansluiting. Als de temperatuur van beide constructies wordt vergeleken is deze van de raamconstructie kritischer voor vorst-dooischade door de hogere vochtbelasting. Langs de andere kant zorgt de lagere warmteweerstand wel voor hogere temperaturen in het metselwerk, wat de kans op vorstdooischade verlaagd.

#### 6.3.2 Raamaansluiting verticale snede bovenaan

Het raamaansluitingsdetail bovenaan is stap voor stap opgebouwd in Delphin 6.1. Hierbij is een iets abstractere versie gegenereerd van Figuur 132, waarbij het alumiumprofiel dat uitloopt tot aan de baksteen is aangepast naar een EPDM (sd > 1500).





Figuur 133: Resultaten schadefenomenen verticale snede bovenaan, Paardenmarkt, Stap 3

Bovenstaande resultaten in Figuur 133 geven de schadefenomenen in de raamaansluiting weer bij een regenbelasting van 0.7 en baksteen ZC. Wat opvalt is dat opnieuw de schade toeneemt naarmate er verder wordt gemeten van de raamaansluiting. Wanneer deze resultaten worden vergeleken met hetzelfde scenario uit stap 2: 1D-2D, §5.3.2 Nieuwe Toestand (zie Figuur 128), is te zien dat er eerder een stijging is van de schadefenomenen. Dit wordt verder onderzocht aan de hand van fieldplots van het vochtgehalte, de relatieve vochtigheid en de temperatuur, opnieuw in vergelijking met de 1D-2D overgang uit stap 2.

#### Evaluatie hygrothermisch gedrag

Moisture content [kg/m³] | ZC | RF0.7 | 15-03





Figuur 134: Raamaansluiting verticale snede bovenaan (ZC, RF0.7): a) Moisture content 15-03, b) Relatieve vochtigheid, 11-08

Figuur 134a geeft de fieldplot van de moisture content van de raamaansluiting proportioneel weer. Op de meest kritische dag, 15 maart, is te zien dat de binnenpleister en de lijmmortel veel vocht opnemen en vasthouden en hierdoor gevoeliger zullen zijn voor schimmelgroei. Deze vochtopname neemt af

dichter bij de raamaansluiting, dit komt door de beschermende waterkering langs de buitenzijde aan het raamprofiel. Wat verder opvalt is een vochtaccumulatiestip net boven het raamprofiel. Deze accumulatie komt door de waterkering die een brug zal vormen voor de vochtige baksteen naar de binnenconstructie. Of dit in de werkelijkheid zal gebeuren is afhankelijk van de plaatsing van de waterkering, al dan niet in combinatie met het aluminium profiel. Op Figuur 135 is te zien dat op het ene detail een waterkering is toegepast en op het andere eerder een profieltje, aangezien dit profieltje niet rechtstreeks in verbinding staat met het metselwerk, zal dit uitsteeksel de gevormde brug tegengaan en er dus geen vochtaccumulatie plaatsvinden.

Figuur 134b geeft de relatieve vochtigheid weer over de gehele constructie. Opnieuw is duidelijk te zien dat in de buurt van de raamaansluiting een afname is van de kritischere relatieve vochtigheid. Daarnaast is opnieuw het verzamelpunt met de vochtbrug aan het raamprofiel duidelijk te zien. Hoewel dit weinig invloed heeft op de geëvalueerde schadefenomenen, kan dit nefast zijn voor de materialen errond, vooral als er sprake is van weinig droging. Als de raamaansluiting wordt vergeleken met het volsteense metselwerk met buitenpleister, is te zien dat opnieuw de wandopbouw kritischer lijkt te zijn dan de raamaansluiting zelf. Verder weg van het raamprofiel lijkt de relatieve vochtigheid wel te stijgen, opnieuw door de extra mogelijkheid tot damptransport van onderaan. Dit zorgt ervoor dat de uiteindelijke resultaten die het risico op schimmelgroei weergeven, toch hoger zijn dan de 1D-2D studie.





Figuur 135: gegeven detailtekeningen raamaansluiting verticale snede bovenaan: a) waterkering aan de buitenzijde zoals in de simulatie, b) stalen profiel aan de buitenzijde als verlenging van het raamprofiel





Figuur 136: Overzicht schimmelgroei gemeten tussen de lijmmortel en de multipor, raamaansluitingen Paardenmarkt Bovenen Onderaansluting

Uit Figuur 136 kan worden afgeleid dat schimmelgroei fluctueert met veranderende regenbelasting en toepassing van een andere baksteen. Deze verschillen zijn echter niet groot.



Figuur 137: Overzicht schimmelgroei gemeten boven multipor, aan het raamkader, raamaansluitingen Paardenmarkt Bovenen Onderaansluting

Uit Figuur 137 kan worden afgeleid dat er een klein risico op schimmelgroei kan optreden na de isolatie, aan het raamprofiel bij hogere regenbelastingen.



Figuur 138: Aanduiding meetpunt risico op schimmelgroei gemeten boven multipor, aan het raamkader

Het risico op houtrot en vorst-dooischade blijft in alle scenario's gelijk door de beschermende buitenpleister.

#### 6.3.6 Besluit Paardenmarkt 2D

In dit deel zijn de raamaansluitingen van de nieuwe toestand van de Paardenmarkt onderzocht, ontleed en geanalyseerd, in 2D omgeving. De conclusies die zijn genomen in het besluit van de Vlaamse Hoeve blijven geldig bij de evaluatie van de Paardenmarkt.

Door deze 2D studie kan opnieuw worden aangetoond dat de bevochtigingsfenomenen hetzelfde blijven ten opzichte van de 1D- en 1D-2D-studie, maar is het bevochtigingpatroon binnenin de constructie opnieuw is veranderd. Uit de bevindingen van de raamaansluitingen van de Paardenmarkt kan worden bevestigd dat de raamaansluiting onderaan kritischer wordt door de extra bevochtigingzijde. Bij de Paardenmarkt is dit leesbaar in de resultaten die het risico op schade evalueren, dit doordat het metselwerk veel dunner is, en de impact van de extra bevochtigingszijde is daarom veel groter. De raamaansluiting bovenaan is minder kritisch, door de extra mogelijke droging langs de onderzijde die beschermd wordt van slagregen. In het geval van de Paardenmarkt is dit minder duidelijk door de extra bevochtiging via onder andere de waterkeringsbrug.

Het geeft meer informatie over het andere gedrag van de Paardenmarkt door zijn andere geometrie en verschillende geselecteerde materialen bij de raamaansluiting, benadrukt de uniekheid van het hygrothermisch gedrag per soort raamaansluiting. Dit maakt uniform onderzoek moeilijk door de zoveel mogelijke variaties van deze raamaansluitingen.

## Discussie

De bevindingen van dit onderzoek ondervinden enkele beperkingen en mogelijke gebieden voor verdere onderzoeken.

Een eerste beperking van dit onderzoek is dat er gebruik is gemaakt van slechts twee verschillende cases. Zo is de generaliseerbaarheid van de bevindingen beperkt, aangezien de resultaten mogelijks te specifiek zijn voor de onderzochte cases en niet representatief zijn voor andere situaties. Daarnaast is er ook opgemerkt dat de keuze van de verschillende materialen en hun materiaaleigenschappen van groot belang zijn voor een correct onderzoek. Zo kan de keuze van een andere soort baksteen een grote invloed hebben op het uiteindelijke hygrothermisch gedrag en bijgevolg ook op het risico van schade. Toekomstig onderzoek kan zich richten op het vergroten van de generaliseerbaarheid en validiteit, door een groter aantal cases te onderzoeken en de invloed van verschillende materiaaleigenschappen op het hygrothermisch gedrag van een constructie te analyseren.

Verder is het essentieel om bij het interpreteren van dit onderzoek, rekening te houden met de onderliggende aannames die zijn gemaakt. Eén van de belangrijkste aannames is het gebruik van een Moisture Reference Year (MRY) voor het binnen- en buitenklimaat. Dit MRY bevat gegevens over het meest kritische jaar dat een constructie kan ondergaan één keer om de tien jaar tijd. Het herhaaldelijk simuleren van ditzelfde kritische jaar achter elkaar, zoals in dit onderzoek is gedaan, zorgt ervoor dat de exacte resultaten minder representatief kunnen zijn voor de werkelijkheid.

Hoewel de invloed van de interface weerstand wel kort is geëvalueerd, geeft dit geen zekerheid over het verwaarlozen van de interface weerstand in de simulaties en de correctheid van de resultaten van dit onderzoek met de werkelijkheid. Ook de grootheid van deze interface weerstand is nog een grote onzekerheid. Daarnaast mag het niet vergeten worden dat de kritieke punten verbonden met de schadefenomenen in de constructie, wel geëvalueerd zijn, maar dat dit niet overeenkomt met een beoordeling van de gehele constructie.

Tenslotte is er nog maar weinig onderzoek op het gebied van 2D-simulaties, wat vergelijkingen maken bemoeilijkt. Dit onderzoek markeert slechts het begin hiervan en brengt praktische uitdagingen met zich mee, zoals simulatietijd en opslaggeheugen.

Verder onderzoek is nodig, zowel op het gebied van algemene 2D-simulaties als op het gebied van specifieke bouwknopen. De raamaansluitingen zijn in dit onderzoek niet uitgebreid onderzocht vanwege de eerder besproken beperkingen, waardoor er ruimte is voor verdere verkenning en eventuele generalisatie.

# 8. Conclusie

In dit onderzoek is het toepassen van binnenisolatie aan raamaansluitingen in volsteens metselwerk onderzocht, met als doel inzicht te verkrijgen over de effecten van binnenisolatie op het hygrothermisch gedrag van de constructie, en de eventuele verandering in het risico op vochtgerelateerde schade, zoals schimmelgroei, vorst-dooischade en houtrot. Uit de literatuur bleek dat, er onderzoek ontbreekt naar binnenisolatie bij bouwknopen, waarbij raamaansluitingen een kritieke bouwknoop vormen met een hogere kans op schadeproblemen na plaatsing van binnenisolatie. Door middel van onderzoek aan de hand van HAM-simulaties, werd in deze thesis de invloed van binnenisolatie op het hygrothermisch gedrag van metselwerk, opgebouwd tot raamaansluitingen, nagegaan.

Het onderzoek omvatte twee casestudies, namelijk de Vlaamse Hoeve in Meise en de Paardenmarkt in Antwerpen. Door het volgen van een systematisch stappenplan werden 1D-studies van metselwerkstructuren uitgebreid naar 2D-raamaansluitingen, waarbij per stap de oorspronkelijke toestand werd vergeleken met de toestand na plaatsing van binnenisolatie.

In het eerste luik werd een 1D-studie verricht om vochtgerelateerde schade in zowel de bestaande als de nieuwe toestand van beide cases te onderzoeken. De resultaten wezen over het algemeen uit dat de kans op schade toeneemt na plaatsing van binnenisolatie, met betrekking tot schimmelvorming, vorstdooischade en houtrot. De aanwezigheid van de binnenisolatie belemmert het droogproces aan beide zijden van de constructie, wat resulteert in een verlengde vochtigheidsduur van het metselwerk. Hierdoor werd geconcludeerd dat de beheersing van het interne vochttransport van essentieel belang is. Bij constructies met een kritisch binnen- en buitenklimaat werd aangetoond dat zowel het capillairals het damptransport kan beperkt worden via dampdichte en waterdichte folies zowel langs de binnenals buitenzijde. Bijgevolg werd het snel duidelijk dat de keuze van geschikte materialen en folies een beslissende rol spelen bij het minimaliseren van vochtgerelateerde problemen in constructies. Hierbij werd vastgesteld dat materiaaleigenschappen zoals absorptiecoëfficiënt, poriënverdeling en dampdichtheid zorgvuldig moeten geanalyseerd worden alvorens de materialen te gebruiken in een constructie.

In het tweede luik van het onderzoek werd een overgangsstudie uitgevoerd van 1D naar 2D, als voorbereiding op het daadwerkelijke 2D-onderzoek. Hierbij werden de configuraties van de 1D-studie, stap voor stap omgezet naar een gedetailleerde metselwerkstructuur. Uit deze overgangsstudie bleek dat het toevoegen van een horizontale kalkmortellaag aan de constructies leidt tot andere resultaten en variaties in het gedrag van de constructie.

Opvallend was dat het risico op schade aanzienlijk stijgt wanneer metingen worden uitgevoerd in de kalkmortel, ongeacht het specifieke schadefenomeen dat wordt geëvalueerd. Echter, bij het toevoegen van een isolatiesysteem verdwijnt het verschil in gedrag tussen de baksteen en de kalkmortel volledig voor wat betreft het risico op schimmelgroei. Dit wees erop dat het hygrothermisch gedrag ingrijpend verandert na de renovatie, waarbij de relatieve vochtigheid van het binnenklimaat een belangrijkere rol speelt bij het beïnvloeden van het risico op schimmelgroei. Het risico op vorst-dooischade en houtrot daarentegen blijft wel verschillen tussen de kalkmortel en de baksteen, wat aantoont dat deze schadefenomenen, zowel vóór als na de toevoeging van binnenisolatie, nog steeds afhankelijk zijn van de invloed van slagregen van het buitenklimaat en de hoeveelheid vloeibaar vocht binnen de constructie.

Daarnaast werd ook het verschil in de alternerende metselwerkopbouw geëvalueerd, waarbij werd aangetoond dat gedetailleerdere 2D-constructies kleinere verschillen vertonen tussen de verschillende metselwerkopbouwen, dan de 1D-constructies. Dit suggereerde dat er in werkelijkheid geen significant verschil is tussen de metselwerkopbouwen, aangezien de gehele constructie met elkaar verbonden is. Verder werd de invloed van de weerstand tussen de materiaallagen getest door middel van de interfaceweerstand. Hieruit bleek dat deze weerstand het capillaire transport belemmert, en dat er een toename is van vocht in het begin van het metselwerk, als gevolg van de verminderde spreiding van het capillair vocht.

Over het algemeen werd geconcludeerd dat de waarden verkregen uit de 1D-2D analyse minder kritisch zijn dan die verkregen uit de 1D-analyse. Bij vorst-dooischade en houtrot dalen de waarden van de 1D-analyse naar de 1D-2D-analyse, maar bij metingen in de mortellaag stijgen de waarden ten opzichte van de 1D-analyse. Hieruit bleek dat de 1D-2D-stap eigenlijk tussen de twee uiterste waarden van de homogene 1D-analyse ligt.

In het derde en laatste luik van dit onderzoek, werden de vaststellingen van zowel de 1D- als 1D-2Dstudie gebruikt als inzicht voor het analyseren van het hygrothermisch gedrag van de uiteindelijke 2D raamaansluitingen. Hierbij werd aangetoond dat de bevochtigingsfenomenen die voorkomen bij de raamaansluitingen, in grote lijnen overeenkomen met de eerdere studies, maar dat het bevochtigingspatroon binnenin de constructie verandert door de extra horizontale dimensie. Er werd vastgesteld dat deze toegevoegde dimensie zowel positieve als negatieve effecten heeft op de raamaansluitingen. Enerzijds kan het zorgen voor extra bevochtiging door slagregen en waterdamp van het buitenklimaat, wat nadelig is voor de constructie. Anderzijds kan het ook zorgen voor snellere droging, wat gunstig is voor het verwijderen van geïnfiltreerd vocht.

Specifiek werd besloten dat de onderste raamaansluiting kritischer is door de extra bevochtigingszijde, en de bovenste raamaansluiting minder kritisch is vanwege de extra droogmogelijkheid aan de onderzijde die beschermd wordt tegen slagregen. Hierbij moet wel de kanttekening worden gemaakt dat dit fenomeen kan worden tegengehouden door constructiespecifieke elementen zoals een uitstekende dorpel die het damptransport vermindert.

Verder onderzoek naar de interfaceweerstand bevestigt de vaststellingen van de 1D- en 1D-2D-studie, terwijl het homogeniseren van het metselwerk resulteert in lagere risico's op schade, dat de 1D- en 1D-2D-studie eerder tegenspreekt. Er werd vastgesteld dat hierbij de extra horizontale bevochtigingszijde een grote invloed heeft op de constructie, waardoor de verticale mortellagen ook rechtstreekser kunnen worden bevochtigd. Door de rechtstreeksere bevochtiging van zowel de horizontale als verticale mortellagen, oefenen de mortellagen een grotere invloed uit op het vochtgedrag van de constructie waardoor ze onmisbaar worden bij het correct analyseren van het hygrothermisch gedrag.

De conclusie van dit onderzoek is dat het hygrothermisch gedrag van constructies afhankelijk is van verschillende variabelen, waaronder geometrie, bevochtigings- en drogingsvlakken en materiaalkeuze. Een nauwkeurige analyse en modellering zijn essentieel om schade te voorkomen en duurzame ontwerpen te waarborgen.

In een breder perspectief tonen de bevindingen van dit onderzoek aan dat gedetailleerde 2D-analyse een waardevol instrument kan zijn om het hygrothermisch gedrag van constructies beter te begrijpen. Het biedt inzichten die anders mogelijk over het hoofd zouden worden gezien. Hierbij kan dit onderzoek een hulp zijn voor toekomstige onderzoeken, waarbij gedetailleerde 2D-analyse wordt toegepast om een meer algemene formulering te ontwikkelen voor het hygrothermisch gedrag van bouwknopen, om zo het vochtgedrag nauwkeuriger te kunnen voorspellen. Richtlijnen en normen gebaseerd op deze kennis kunnen helpen bij het maken van weloverwogen beslissingen om zo duurzame en vochtbestendige constructies te kunnen ontwerpen na het plaatsen van binnenisolatie.

# Bibliografie

- J. Straube en C. Schumacher, 'Interior Insulation Retrofits of Load-Bearing Masonry Walls in Cold Climates', *Journal of Green Building*, vol. 2, nr. 2, pp. 42–50, mei 2007, doi: 10.3992/jgb.2.2.42.
- [2] E. Vereecken en S. Roels, 'A comparison of the hygric performance of interior insulation systems: A hot box-cold box experiment', *Energy Build*, vol. 80, pp. 37–44, 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.04.033.
- [3] N. F. Jensen, T. R. Odgaard, S. P. Bjarløv, B. Andersen, C. Rode, en E. B. Møller, 'Hygrothermal assessment of diffusion open insulation systems for interior retrofitting of solid masonry walls', *Build Environ*, vol. 182, sep. 2020, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107011.
- [4] T. K. Hansen, 'Hygrothermal performance of internal insulation in historic buildings', DTU Civil Engineering Report, Technical University of Denmark , 2019.
- [5] M. Harrestrup en S. Svendsen, 'Internal insulation applied in heritage multi-storey buildings with wooden beams embedded in solid masonry brick façades', *Build Environ*, vol. 99, pp. 59– 72, apr. 2016, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.01.019.
- [6] H. M. Künzel, D. Zirkelbach, A. Karagiozis, A. Holm, en K. Sedlbauer, 'Simulating Water Leaks in External Walls to Check the Moisture Tolerance of Building Assemblies in Different Climates', in International Conference on Durability of Building Materials and Components, Istanbul, 2008.
  Geraadpleegd: 18 december 2022. [Online]. Beschikbaar op: https://publica.fraunhofer.de/handle/publica/358093
- [7] N. Van Den Bossche, A. Janssens, en J. Moens, 'Design principles for pressure moderated window frames', in *Canadian Conference on Building Science and Technology, 12th*, Derome D, Red., Montreal, Canada: National Building Envelope Council, 2009, pp. 545–556.
- [8] A. Bishara, 'Energy-efficient renovation with internal insulation', in *Energy-Efficient Retrofit of Buildings by Interior Insulation: Materials, Methods, and Tools*, Elsevier, 2021, pp. 367–383. doi: 10.1016/B978-0-12-816513-3.00012-5.
- [9] M. Morelli, L. Rønby, S. E. Mikkelsen, M. G. Minzari, T. Kildemoes, en H. M. Tommerup, 'Energy retrofitting of a typical old Danish multi-family building to a "nearly-zero" energy building based on experiences from a test apartment', *Energy Build*, vol. 54, pp. 395–406, nov. 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.07.046.
- [10] H. Hens, *Bouwfysica : warmte- en massatransport*, 8e, gewijzigde druk dr. Leuven : Acco, 2014.
- [11] J. Little, C. Ferraro, B. Arregi, en À. Eachdraidheil Alba, Assessing risks in insulation retrofits using hygrothermal software tools Heat and moisture transport in internally insulated stone walls Historic Environment Scotland. 2015. [Online]. Beschikbaar op: www.historicscotland.gov.uk/technicalpapers
- [12] K. Calle, T. de Kock, V. Cnudde, en N. Van Den Bossche, 'Liquid moisture transport in combined ceramic brick and natural hydraulic lime mortar samples: Does the hygric interface resistance dominate the moisture transport?', *J Build Phys*, vol. 43, nr. 3, pp. 208–228, nov. 2019, doi: 10.1177/1744259119857762.
- [13] S. P. Bjarløv, G. R. Finken, en T. Odgaard, 'Retrofit with interior insulation on solid masonry walls in cool temperate climates An evaluation of the influence of interior insulation materials

on moisture condition in the building envelope', in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, nov. 2015, pp. 1461–1466. doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.171.

- [14] M. Guizzardi, D. Derome, R. Vonbank, en J. Carmeliet, 'Hygrothermal behavior of a massive wall with interior insulation during wetting', *Build Environ*, vol. 89, pp. 59–71, jul. 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2015.01.034.
- [15] E. Vereecken en S. Roels, 'Binnenisolatie van muren in historische gebouwen: systemen, risico's en aandachtspunten', in *Proceedings WTA Studiedag 'Energetische ingrepen in monumenten: een duurzaam verhaal?!*', 2017, p. 17/11.
- [16] A. Abdul Hamid en P. Wallentén, 'Hygrothermal assessment of internally added thermal insulation on external brick walls in Swedish multifamily buildings', *Build Environ*, vol. 123, pp. 351–362, okt. 2017, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.05.019.
- [17] E. Vereecken en S. Roels, 'Capillary active interior insulation: a discussion', Brussels, okt. 2016.Geraadpleegd: 18 december 2022. [Online]. Beschikbaar op: kuleuven.limo.libis.be
- T. de Mets, A. Tilmans, E. Vereecken, en S. Roels, 'Capillair actieve isolatiesystemen: een innovatieve oplossing voor binnenisolatie?', 2019. Geraadpleegd: 18 december 2022. [Online]. Beschikbaar op: https://www.buildwise.be/nl/publicaties/buildwise-artikels/2019-05.04/
- [19] P. Steskens, X. Loncour, A. Acke, en J. Wijnants, 'Binnenisolatie van Buitenmuren', 2012.[Online]. Beschikbaar op: www.wtcb.be
- [20] F. Dobbels, 'Detaillering van binnenisolatie: praktijkgids', 2017. [Online]. Beschikbaar op: www.renofase.be
- [21] U. Berardi, 'The benefits of using aerogel-enhanced systems in building retrofits', in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2017, pp. 626–635. doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.576.
- [22] Y. Govaerts *e.a.*, 'Performance of a lime-based insulating render for heritage buildings', *Constr Build Mater*, vol. 159, pp. 376–389, jan. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.10.115.
- [23] G. de Meersman, N. Van Den Bossche, en A. Janssens, 'Long term durability of Vacuum Insulation Panels: determination of the Sd-value of MF-2 foils', in *6th International Building Physics Conference, IBPC 2015*, 2015. doi: https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.212.
- [24] K. Calle en N. Van Den Bossche, 'Analysis of different frost indexes and their potential to assess frost based on HAM simulations', in *ProXIV DBMC 14th International Conference On Durability* of Buildings Materials and Components, G. de Schutter, N. de Belie, A. Janssens, en N. Van Den Bossche, Red., Gent: RILEM Publications S.A.R.L., 2017, pp. 61–62.
- [25] T. Trainor, 'Freeze-Thaw Damage and Insulation Projects: A Homeowner's Guide', 2014. Geraadpleegd: 1 februari 2023. [Online]. Beschikbaar op: buildingsciencelabs.com
- [26] J. Straube, C. Schumacher, en P. Mensinga, 'Assessing the Freeze-Thaw Resistance of Clay Brick for Interior Insulation Retrofit Projects', in *Proceedings of Buildings XI, ASHRAE/DOE Conference*, Clearwater Beach, Florida, 2010.
- [27] G. Fagerlund Lund, 'Critical degrees of saturation at freezing of porous and brittle materials', Institutionen för byggnadsteknik, Tekniska högskolan i Lund, 1973.
- [28] K. Calle en N. Van Den Bossche, 'Sensitivity analysis of the hygrothermal behaviour of homogeneous masonry constructions: Interior insulation, rainwater infiltration and hydrophobic treatment', *J Build Phys*, vol. 44, nr. 6, pp. 510–538, mei 2021, doi: 10.1177/17442591211009937.
- [29] H. Viitanen en T. Ojanen, 'Improved Model to Predict Mold Growth in Building Materials', in Proceedings of the 10th Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings Conference ASHRAE, 2007.

- [30] N. Campbell, T. McGrath, S. Nanukuttan, en S. Brown, 'Monitoring the hygrothermal and ventilation performance of retrofitted clay brick solid wall houses with internal insulation: Two UK case studies', *Case Studies in Construction Materials*, vol. 7, pp. 163–179, dec. 2017, doi: 10.1016/j.cscm.2017.07.002.
- [31] E. Goes, 'Vochthuishouding in gebouwen: schadeoorzaken koudebruggen binnenklimaat', Brussel, 1984. Geraadpleegd: 1 februari 2023. [Online]. Beschikbaar op: www.buildwise.be
- [32] E. Vereecken en S. Roels, 'Review of mould prediction models and their influence on mould risk evaluation', *Build Environ*, vol. 51, pp. 296–310, mei 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2011.11.003.
- [33] E. Vereecken, K. Vanoirbeek, en S. Roels, 'A preliminary evaluation of mould prediction models based on laboratory experiments', in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, nov. 2015, pp. 1407–1412. doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.162.
- [34] A. Hukka en H. A. Viitanen, 'A mathematical model of mould growth on wooden material', Springer-Verlag, 1999.
- [35] E. Schoeters, 'Biologische aantastingen in hout', 2005. Geraadpleegd: 1 februari 2023. [Online]. Beschikbaar op: www.monumentenwacht.be
- [36] E. Vereecken en S. Roels, 'Wooden beam ends in combination with interior insulation: An experimental study on the impact of convective moisture transport', *Build Environ*, vol. 148, pp. 524–534, jan. 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.10.060.
- [37] C. Brischke en A. O. Rapp, 'Dose-response relationships between wood moisture content, wood temperature and fungal decay determined for 23 European field test sites', *Wood Sci Technol*, vol. 42, nr. 6, pp. 507–518, aug. 2008, doi: 10.1007/s00226-008-0191-8.
- [38] T. Odgaard, S. P. Bjarløv, en C. Rode, 'Interior insulation Experimental investigation of hygrothermal conditions and damage evaluation of solid masonry façades in a listed building', *Build Environ*, vol. 129, pp. 1–14, feb. 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.11.015.
- [39] B. Blocken en J. Carmeliet, 'The influence of the wind-blocking effect by a building on its winddriven rain exposure', *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 94, nr. 2, pp. 101–127, feb. 2006, doi: 10.1016/j.jweia.2005.11.001.
- [40] I. Vandemeulebroucke, K. Calle, S. Caluwaerts, T. de Kock, en N. Van Den Bossche, 'Does historic construction suffer or benefit from the urban heat island effect in ghent and global warming across Europe?', *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 46, nr. 11, pp. 1032–1042, 2019, doi: 10.1139/cjce-2018-0594.
- [41] B. Blocken en J. Carmeliet, 'A review of wind-driven rain research in building science', *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 92, nr. 13, pp. 1079–1130, 2004, doi: 10.1016/j.jweia.2004.06.003.
- [42] I. Vandemeulebroucke, S. Caluwaerts, en N. Van Den Bossche, 'Climate data for hygrothermal simulations of Brussels', *Data Brief*, vol. 44, p. 108491, okt. 2022, doi: 10.1016/J.DIB.2022.108491.
- [43] K. Calle en N. Van Den Bossche, 'Towards understanding rain infiltration in historic brickwork', 2017. [Online]. Beschikbaar op: www.sciencedirect.com/www.elsevier.com/locate/procedia1876-6102
- [44] K. Calle en N. Van Den Bossche, 'Probabilistic assessment of the impact of material properties on the risk of frost damage in masonry constructions', 2019, doi: 10.1051/matecconf/201928.
- [45] B. Vanderschelden, K. Calle, en N. Van Den Bossche, 'On the potential of clustering approaches for hygrothermal material properties based on three degradation risks in solid masonry

constructions', *J Build Phys*, vol. 46, nr. 1, pp. 882–922, jul. 2022, doi: 10.1177/17442591221085734.

- [46] K. Calle en N. Van Den Bossche, 'Do interface resistances matter in historic masonries?-Analysis based on X-ray tomography and heat, air and moisture modelling', in 7th International Building Physics Conference, Syracuse, NY, sep. 2018. doi: https://doi.org/10.14305/ibpc.2018.be-2.03.
- [47] A. Tilmans, P. Steskens, en S. Roels, 'Isolatie langs de binnenzijde van bestaande muren: diagnose', 2013. Geraadpleegd: 1 februari 2023. [Online]. Beschikbaar op: www.buildwise.be
- [48] Vlaams Energieagentschap, 'Binnenisolatie van buitenmuren', 2013. Geraadpleegd: 1 februari 2023. [Online]. Beschikbaar op: www.energiesparen.be
- [49] X. Loncour, A. Tilmans, P. Staekens, S. Roels, en E. Vereecken, 'Isolatie langs de binnenzijdevan bestaande muren: systemen en dimensionering', 2013. Geraadpleegd: 1 februari 2023.
  [Online]. Beschikbaar op: www.buildwise.be
- [50] M. Arce, S. García-Morales, en N. Van Den Bossche, 'A new test standard to evaluate the watertightness of window-wall interfaces', in *14th International Conference on Durability of Building Materials and Components*, Ghent, 2017.
- [51] S. van Linden en N. van den Bossche, 'Review of rainwater infiltration rates in wall assemblies', Building and Environment, vol. 219. Elsevier Ltd, 1 juli 2022. doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109213.
- [52] S. van Linden en N. Van Den Bossche, 'Watertightness performance of face-sealed versus drained window-wall interfaces', Elsevier Ltd, jun. 2021. doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107824.
- [53] R. Pfluger, 'Variations and design options in renovation with internal insulation', in *Energy-Efficient Retrofit of Buildings by Interior Insulation: Materials, Methods, and Tools*, Elsevier, 2021, pp. 301–324. doi: 10.1016/B978-0-12-816513-3.00001-0.
- [54] J. Berger, S. Gasparin, W. Mazuroski, en N. Mendes, 'An efficient two-dimensional heat transfer model for building envelopes', nov. 2021, doi: 10.1080/10407782.2020.1836936.
- [55] W. A. Dalgliesh, S. Cornick, en P. Mukhopadhyaya, 'Hygrothermal performance of building envelopes: uses for 2D and 1D simulation', in 10th Conference on Building Science and Technology, Canada: National Research Council of Canada. NRC Institute for Research in Construction, mei 2005.
- [56] E. Vereecken en S. Roels, 'Hygric performance of a massive masonry wall: How do the mortar joints influence the moisture flux?', *Constr Build Mater*, vol. 41, pp. 697–707, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.12.024.
- [57] J. Grunewald, P. Häupl, en M. Bomberg, 'Towards an Engineering Model of Material Characteristics for Input to Ham Transport Simulations - Part 1: An Approach', *J Build Phys*, vol. 26, nr. 4, pp. 343–366, 2003, doi: 10.1177/1097196303026004002.
- [58] I. Vandemeulebroucke, S. Caluwaerts, en N. Van Den Bossche, 'Decision framework to select moisture reference years for hygrothermal simulations', *Build Environ*, vol. 218, jun. 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109080.
- [59] M. Arce-Recatalá, S. García-Morales, en N. Van Den Bossche, 'Quantifying Wind-driven Rain Intrusion - A Comparative Study on the Water Management Features of Different Types of Rear-Ventilated Facade Systems', in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, jun. 2020. doi: 10.1051/e3sconf/202017223007.
- [60] M. Morelli en S. Svendsen, 'Investigation of interior post-insulated masonry walls with wooden beam ends', *J Build Phys*, vol. 36, nr. 3, pp. 265–273, jan. 2013, doi: 10.1177/1744259112447928.

- [61] L. Temmerman, N. Van Den Bossche, 'Onderzoek naar de invloed van historische mortels op het hygrothermisch gedrag van metselwerk', 2016.
- [62] H. Derluyn, H. Janssen, en J. Carmeliet, 'Influence of the nature of interfaces on the capillary transport in layered materials', *Constr Build Mater*, vol. 25, nr. 9, pp. 3685–3693, sep. 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.03.063.
- [63] T. Ojanen, H. Viitanen, K. Lähdesmäki, en R. Peuhkuri, 'Mold Growth Modeling of Building Structures Using Sensitivity Classes of Materials', in *Proceedings Build. XI*, Florida, 2010.
- [64] T. Ojanen, R. Peuhkuri, H. Viitanen, K. Lähdesmäki, J. Vinha, en K. Salminen, 'Classification of material sensitivity-New approach for mould growth modeling', in *9th Nordic symposium on building physics 2*, 2011, pp. 867–874.

# BIJLAGE A.

De Vlaamse Hoeve











Aanzicht: Westgevel



Snede A: Door de westgevel

Algemene infofiche Vlaamse Hoeve

# Stap 1 | Bestaande Toestand

## Materiaaleigenschappen bestaande toestand



	Baksteen westgevel				
ymbool	Eenheid	Gemiddelde waarde			
	[kg/m³]	1854 kg/m³			
w	[kg/s <sup>0.5</sup> m²]	0,1936 kg/s <sup>0.5</sup> m²			
'cap	[kg/m³]	144,2 kg/m³			
<b>y</b>	mbool v	mbool Eenheid [kg/m³] v [kg/s <sup>0.5</sup> m²] cap [kg/m³]			

+ Delphin 6.1 | Old Building Brick Dresden ZC/ZG/ZK | ID : 491/495/499

Mortel		
	Geen specifieke	gegeven

>

Geen specifieke gegevens over de gebruikte kalkmortel

Delphin 6.1	Lime cement mor	tar (low cement	ratio)   ID : 718
-------------	-----------------	-----------------	-------------------

Blauwe Hardsteen				
Densiteit	ρ	[kg/m³]	2687 kg/m³	
+ Delphin 6.1   Shell Limestone Facade Element   ID : 560				
Binnenpleister dampdicht (PintD)/dampopen (PintO)				
Dampdiffusieweerstand PintD	μ	[-]	12	
Waterabsorptiecoëfficiënt PintD	$A_w$	[kg/s <sup>0.5</sup> m²]	0,127 kg/s <sup>0.5</sup> m²	
Dampdiffusieweerstand PintO	μ	[-]	0	
Waterabsorptiecoëfficiënt PintO	$A_w$	[kg/s <sup>0.5</sup> m²]	0,250 kg/s <sup>0.5</sup> m²	

+ Delphin 6.1 | Lime Plaster (historical) | ID : 148

Materiaaleigenschappen bestaande toestand, Vlaamse Hoeve, Stap 1



Parameters Vlaamse Hoeve				
VARIABEL			VAST	
Regenbelasting			Oriëntatie	
0.5	0.7	1.5	West: 270°	
Soort baksteen			Soort mortel	
ZC	ZG	ZK	Kalkmortel	
Binnenpleister ba	iksteen			
PintD		PintO		

Stap 1: Parameters Vlaamse Hoeve



Resultaten vorst-dooischade bestaande toestand, Vlaamse Hoeve, Stap 1



Resultaten schimmelgroei bestaande toestand, Vlaamse Hoeve, Stap 1



Resultaten houtrot, volgens aantal dosissen, bestaande toestand, Vlaamse Hoeve, Stap 1



Resultaten houtrot, volgens vervalscore, bestaande toestand, Vlaamse Hoeve, Stap 1



Vergelijking vochtgehalte en relatieve vochtigheid van C1 en C2 (ZC, RF1.5, PIntO)



Vergelijkingen deel 1 (C1) en deel 2 (C3 en C4) Bestaande Toestand, (ZC, RF1.5, PIntO): a) IJsmassavolume op 5mm van buitenmetselwerk, b) relatieve vochtigheid op binnenoppervlak



Vergelijking C1, C3 en C3 met interface weerstand (ZC, RF1.5, PIntO) tussen de materiaallagen

# Stap 1 | Nieuwe Toestand

## Materiaaleigenschappen nieuwe toestand



Cementering				
Parameter	Symbool	Eenheid	Gemiddelde waarde	
Densiteit	ρ	[kg/m³]	1600 kg/m³	
Waterabsorptiecoëfficiënt	$A_w$	[kg/s <sup>0.5</sup> m <sup>2</sup> ]	0,033 kg/s <sup>0.5</sup> m² (W2, EN 998-1)	
Dampdiffusieweerstand	μ	[-]	25	
Warmtegeleiding	λ	[W/m.K]	0,83 W/m.K	
+ Delphin 6.1   Barrier Pla	ster Sotano   [	D:489		
Glaswol				
Warmtegeleiding	λ	[W/m.K]	0,033 W/m.K	
+ Delphin 6.1   Mineral W	ool   ID : -1			
Rotswol				
Warmtegeleiding	λ	[W/m.K]	0,037 W/m.K	
+ Delphin 6.1   Mineral W	ool   ID : -1			
Dampdichte houtvezelplaat				
Dampdiffusieweerstand	μ	[-]	510	
Warmtegeleiding	λ	[W/m.K]	0,14 W/m.K	
+ Delphin 6.1   OSB  ID :	-1			
Gipsplaat				
Densiteit	ρ	[kg/m³]	1150 kg/m³	
Dampdiffusieweerstand	μ	[-]	13	
Warmtegeleiding	λ	[W/m.K]	0,32 W/m.K	
+ Delphin 6.1   Gypsum Board   ID : 81				
Leempleister				
Densiteit	ρ	[kg/m³]	1800 kg/m³	
Dampdiffusieweerstand	μ	[-]	7,5	
Warmtegeleiding	λ	[W/m.K]	0,91 W/m.K	
Waterabsorptiecoëfficiënt	Aw	[kg/s <sup>0.5</sup> m <sup>2</sup> ]	0,00022 kg/s <sup>0.5</sup> m <sup>2</sup> (W3 DIN 18947)	

+ Delphin 6.1 | Lime Plaster Indoor| ID : 681

Materiaaleigenschappen nieuwe toestand, Vlaamse Hoeve, Stap 1



Resultaten schimmelgroei, gemeten op cementering, nieuwe toestand met binnenisolatie, Vlaamse Hoeve, Stap 1



Resultaten schimmelgroei, gemeten tussen glaswol en rotswol, nieuwe toestand met binnenisolatie, Vlaamse Hoeve, Stap 1



Resultaten houtrot, aantal doses, nieuwe toestand met binnenisolatie, Vlaamse Hoeve, Stap 1



Resultaten houtrot, vervalscore, nieuwe toestand met binnenisolatie, Vlaamse Hoeve, Stap 1



Nieuwe toestand, vergelijking vochtopslag (C1, ZC, RF0.5): a) Werkelijkheid met MRY, b) folie tussen rotswol en luchtdichte houtvezelplaat (sd=1500m), c) folie tussen metselwerk en cementering (sd=1500m), d) folie tussen rotswol en luchtdichte houtvezelplaat en folie tussen metselwerk en cementering (sd=1500)



Vergelijking vochtgehalte en relatieve vochtigheid van C1 en C2 (ZC, RF0.7)



Vergelijkingen deel 1 (C1) en deel 2 (C3 en C4) nieuwe toestand, (ZC, RF1.5): a) IJsmassavolume op 5mm buiten-metselwerk, b) relatieve vochtigheid tussen cementering en binnenisolatie, c) Vochtgehalte op 100mm van binnenmetselwerk



Vergelijking C1, C3 en C3 met interface weerstand (ZC, RF0.7, PIntO) tussen de materiaallagen





Bestaande toestand (ZC, RF0.7, PIntO): a) Vochtopslag [kg/m<sup>3</sup>], b) Relatieve vochtigheid [%], c) Temperatuur [°C]



Nieuwe toestand: a) Vochtopslag, b) Relatieve vochtigheid, c) Temperatuur (ZC, RF0.7, PIntO)

## Stap 2 | Bestaande Toestand





Resultaten vorstdooi-schade bestaande toestand, Vlaamse Hoeve, Stap 2



Resultaten schimmelgroei bestaande toestand, Vlaamse Hoeve, Stap 2





Resultaten houtrot, volgens het aantal dosissen, bestaande toestand, Vlaamse Hoeve, Stap 2



Resultaten houtrot, volgens de vervalscore, bestaande toestand, Vlaamse Hoeve, Stap 2


Vergelijking resultaten vorst-dooischade, schimmelgroei en houtrot gemeten in de baksteen versus in de kalkmortel



Configuratie 5 met aanduiding meetpunten in metselwerk bovenaan, mortel en metselwerk onderaan



Configuratie 5 (ZC, RF1.5, PIntO): a) IJsmassavolume op 5mm van buitenmetselwerk, b) Relatieve vochtigheid binnenoppervlak rond 15 maart, c) Vochtopslag 100mm van binnenmetselwerk



Vergelijking vochtopslag en relatieve vochtigheid van C5 en C6 (ZC, RF1.5, PIntO, Kritische dag 15 maart)



Vergelijking configuraties deel 1 (C1) en deel 2 (C3 en C4), (ZC, RF1.5, PIntO) Bestaande toestand: a) relatieve vochtigheid binnenoppervlak, b) Vochtgehalte 100mm van het binnenmetselwerk,



Vergelijking Moisture content van C1, C2 en C5 (ZC, RF0.7, PIntO, kritische dag 15 maart)



Vergelijking C1, C5 en C5 met interface weerstand (ZC, RF1.5, PIntO, kritische dag 15 maart) tussen de materiaallagen





Resultaten vorst-dooischade nieuwe toestand met binnenisolatie, Vlaamse Hoeve, Stap 2



Resultaten schimmelgroei nieuwe toestand met binnenisolatie, Vlaamse Hoeve, Stap 2



Resultaten schimmelgroei gemeten tussen de glaswol en rotswol nieuwe toestand, Vlaamse Hoeve, Stap 2



Resultaten houtrot, volgens het aantal dosissen, nieuwe toestand met binnenisolatie, Vlaamse Hoeve, Stap 2



Resultaten houtrot, volgens de vervalscore, nieuwe toestand met binnenisolatie, Vlaamse Hoeve, Stap 2



Vergelijking resultaten vorst-dooischade, schimmelgroei en houtrot gemeten in de baksteen versus in de kalkmortel



Configuratie 5 met aanduiding meetpunten in metselwerk bovenaan, mortel en metselwerk onderaan



Configuratie 5 Nieuwe toestand (ZC, RF0.7): a) IJsmassavolume op 5mm van buitenmetselwerk, b) Relatieve vochtigheid tussen cementering en glaswol, c) Vochtopslag 100mm van binnenmetselwerk



Vergelijking constructies NT, vochtopslag en relatieve vochtigheid van C5 en C6 (ZC, RF0.7, Kritische dag 15 maart)



Vergelijkingen deel 1 (C1) en deel 2 (C3 en C4) Nieuwe Toestand, (ZC, RF0.7: a) relatieve vochtigheid tussen multipor en lijmmortel, b) Vochtopslag 100mm van binnenmetselwerk



Vergelijking Moisture content van C1, C2 en C5 (ZC, RF0.7, kritische dag 15 maart)



Vergelijking C1, C5 en C5 met interface weerstand (ZC, RF0.7, kritische dag 15 maart) tussen de materiaallagen



Bestaande toestand: a) Vochtopslag, b) Relatieve vochtigheid, c) Temperatuur (ZC, RF0.7, PIntO, 15maart)



Nieuwe toestand: a) Vochtopslag, b) Relatieve vochtigheid, c) Temperatuur (ZC, RF0.7, 15maart)



Bestaande toestand, vergelijking vochtopslag 1D en 1D-2D (ZC, RF1.5, PIntO, 31 december): a) 1D C1 BT, b) 1D C3 BT, c) 1D-2D C1 BT, d) 1D-2D C5 BT



Bestaande toestand, vergelijking vochtopslag 1D en 1D-2D (ZC, RF1.5, PIntO, 31 december): a) 1D C1 NT, b) 1D C3 NT, c) 1D-2D C1 NT, d) 1D-2D C5 NT



Bestaande toestand vergelijkingen stap 1 (1D) en stap 2 (1D-2D), (ZC, RF1.5, PIntO): a) IJsmassavolume op 5mm buitenmetselwerk, b) relatieve vochtigheid binnenpleister, c) Vochtopslag 100mm van binnenmetselwerk



Nieuwe toestand vergelijkingen stap 1 (1D) en stap 2 (1D-2D), (ZC, RF1.5): a) IJsmassavolume op 5mm buitenmetselwerk, b) relatieve vochtigheid tussen cementering en glaswol, c) Vochtopslag 100mm van binnenmetselwerk

## Stap 3 | Nieuwe Toestand

#### Extra materiaaleigenschappen raamaansluiting

Merantihout						
Parameter	Symbool	Eenheid	Gemiddelde waarde			
Densiteit	ρ	[kg/m³]	640 kg/m³			
+ Delphin 6.1   Spruce Radial  ID : 696						
Gelakte Multiplex						
Densiteit	ρ	[kg/m³]	503 kg/m³			
Warmtegeleiding	λ	[W/m.K]	0,13 W/m.K			
+ Delphin 6.1   OSB Board   ID : -1   Watertight, Vaportight						
Flexifoam						
Dampdiffusieweerstand	μ	[-]	510			
Warmtegeleiding	λ	[W/m.K]	0,14 W/m.K			
+ Delphin 6.1   Polyurethanschaum   ID : -1   Watertight						
Raamkader						

Geen specifieke gegevens over de gebruikte houten raamkader

 $\frac{1}{R_e} + \frac{\lambda_{meranti}}{d} + \frac{\lambda_{equivalent}}{d} + \frac{1}{R_i} = U_f \cong 1, 1W/m^2K \rightarrow \lambda_{equivalent} \text{ berekenen}$ 

> Delphin 6.1 | Spruce Radial| ID : 696 | Watertight, Vaportight

Materiaaleigenschappen bestaande toestand, Vlaamse Hoeve, Stap 1







Raamaansluiting verticale snede onderaan met aangegeven meetpunten, Vlaamse Hoeve, Stap 3



Resultaten schadefenomenen verticale snede onderaan, Vlaamse Hoeve, Stap 3



Resultaten schadefenomenen 1D-2D, C5, ZG, RF0.7, Vlaamse Hoeve, Stap 2

Moisture content [kg/m<sup>3</sup>] | ZG | RF0.7 | 15-03



Relatieve vochtigheid fieldplot (ZG, RF0.7, 11-08): a) Stap 3, Raamaansluiting verticale snede onderaan, b) Stap 2, constructie blauwe hardsteen en volsteens metselwerk, c) Stap 2, constructie volsteens metselwerk



Relatieve vochtigheid [%] | ZG | RF0.7 | 11-08

Relatieve vochtigheid fieldplot (ZG, RF0.7, 11-08): a) Stap 3, Raamaansluiting verticale snede onderaan, b) Stap 2, constructie blauwe hardsteen en volsteens metselwerk, c) Stap 2, constructie volsteens metselwerk



Temperatuur fieldplot (ZG, RF0.7, 09-12): a) Stap 3, Raamaansluiting verticale snede onderaan, b) Stap 2, constructie blauwe hardsteen en volsteens metselwerk, c) Stap 2, constructie volsteens metselwerk



Vergelijking Raamaansluiting verticale snede onderaan met interface weerstand (ZG, RF0.7, 15-03)



Vergelijking homogenisatie Raamaansluiting verticale snede onderaan (ZG, RF0.7, 15-03)





Raamaansluiting verticale snede bovenaan (ZG, RF0.7): a) Moisture content 15-03, b) Relatieve vochtigheid, 11-08



Raamaansluiting horizontale snede, Vlaamse Hoeve, Stap 3



Raamaansluiting horizontale snede, Vlaamse Hoeve, Stap 3

# BIJLAGE B.

De Paardenmarkt

#### Stap 1 | Bestaande Toestand











Snede B: Door de westgevel

Aanzicht: Westgevel Algemene infofiche Paardenmarkt

## Stap 1 | Bestaande Toestand

#### Materiaaleigenschappen bestaande toestand

 This and	- or other	Total .	TER
 - Care Car	5	The for	in the second
 No + C & MY	- 17	Į	

Baksteen westgevel							
Parameter	Symbool	Eenheid	Gemiddelde waarde				
Geen specifieke gegevens over de gebruikte baksteen							
> Delphin 6.1   Old Building Brick Dresden ZC/ZG/ZK   ID : 491/495/499							
Mortel							
Geen specifieke gegevens over de gebruikte kalkmortel							
> Delphin 6.1   Lime cement mortar (low cement ratio)   ID : 718							
Buitenpleister/Binnenpleister dampdicht (PintD)/dampopen (PintO)							
Dampdiffusieweerstand PextD/PintD	μ	[-]	12				
Waterabsorptiecoëfficiënt PextD/PintD	$A_w$	[kg/s <sup>0.5</sup> m²]	0,127 kg/s <sup>0.5</sup> m²				
Dampdiffusieweerstand PextO/PintO	μ	[-]	0				
Waterabsorptiecoëfficiënt PextD/PintO	$A_w$	[kg/s <sup>0.5</sup> m²]	0,250 kg/s <sup>0.5</sup> m²				

+ Delphin 6.1 | Lime Plaster (historical) | ID : 148

Materiaaleigenschappen bestaande toestand, Paardenmarkt, Stap 1



Configuraties bestaande toestand, Paardenmarkt, Stap 1

Meetpunt houtrot Meetpunt schimmelgroei

Parameters Paardenmarkt				
VARIABEL			VAST	
Regenbelasting			Oriëntatie	
0.5	0	.7	1.5	Westen: 270°
Soort baksteen			Soort mortel	
ZC	Z	G	ZK	Kalkmortel
Buitenpleister baksteen		·		
PextD			PextO	
Binnenpleister baksteen				
PintD			PintO	

Parameters Paardenmarkt



Regenbelasting



Baksteen





Resultaten schimmelgroei bestaande toestand, Paardenmarkt, Stap 1





Resultaten houtrot, volgens aantal dosissen, bestaande toestand, Paardenmarkt, Stap 1



Resultaten houtrot, volgens vervalscore, bestaande toestand, Paardenmarkt, Stap 1





Vergelijking C1, C3 en C3 met interface weerstand (ZC, RF1.5, PExtO, PIntO) tussen de materiaallagen

#### Stap 1 | Nieuwe Toestand

#### Materiaaleigenschappen nieuwe toestand

·	

Lijmmortel						
Parameter	Symbool	Eenheid	Gemiddelde waarde			
Waterabsorptiecoëfficiënt	$A_w$	[kg/s <sup>0.5</sup> m²]	0,033 kg/s <sup>0.5</sup> m² (W2, EN 998-1)			
Dampdiffusieweerstand	μ	[-]	10			
Warmtegeleiding	λ	[W/m.K]	0,18 W/m.K			
+ Delphin 6.1   Glue Mortar   ID : 486						
Multipor						
Densiteit	ρ	[kg/m³]	115 kg/m³			
Warmtegeleiding	λ	[W/m.K]	0,043 W/m.K			
Dampdiffusieweerstand	μ	[-]	3			
Soortelijke warmte	С	[J/kg.K]	1300 J/kg.K			
+ Delphin 6.1   Multipor Minerally insulation board 2014   ID : 643						
Gipspleister						
Geen specifieke gegevens over de gebruikte gipspleister						
> Delphin 6.1   Gypsum Plaster   ID : 835						
Buitenpleistervernieuwing						
Waterabsorptiecoëfficiënt	A <sub>w</sub>	[kg/s <sup>0.5</sup> m <sup>2</sup> ]	0,033 kg/s <sup>0.5</sup> m <sup>2</sup> (W2, EN 998-1)			
+ Delphin 6.1   Lime Plaste	+ Delphin 6.1   Lime Plaster (historical)   ID : 148					

Materiaaleigenschappen nieuwe toestand, Paardenmarkt, Stap 1



Configuraties nieuwe toestand, Paardenmarkt, Stap 1

c

RF0.5



Resultaten vorstdooi-schade nieuwe toestand met binnenisolatie, Paardenmarkt, Stap 1

RF1.5

RF0.7

Regenbelasting

...

zc

zк

ZG

Baksteen

149



Resultaten houtrot, volgens het aantal dosissen, nieuwe toestand met binnenisolatie, Paardenmarkt, Stap 1



Resultaten houtrot, volgens vervalscore, nieuwe toestand met binnenisolatie, Paardenmarkt, Stap 1



Vergelijking vochtgehalte en relatieve vochtigheid van C1 en C2 (ZC, RF0.7)



Vergelijking deel 1 (C1) en deel 2 (C3 en C4) Nieuwe Toestand, (ZC, RF1.5, PExtO, PIntO): a) relatieve vochtigheid tussen de lijmmortel en multipor, b) IJsmassavolume 5mm in het buitenmetselwerk



Vergelijking C1, C3 en C3 met interface weerstand (ZC, RF1.5, PExtO, PIntO) tussen de materiaallagen



Bestaande toestand: a) Vochtopslag, b) Relatieve vochtigheid, c) Temperatuur (ZC, RF0.7, PExtD, PIntO)



Nieuwe toestand: a) Vochtopslag, b) Relatieve vochtigheid, c) Temperatuur (ZC, RF1.5, PExtD, PIntO)

## Stap 2 | Bestaande Toestand



Configuraties bestaande toestand, Paardenmarkt Stap 2



Resultaten vorst-dooischade bestaande toestand, Paardenmarkt, Stap 2



Resultaten schimmelgroei bestaande toestand, Paardenmarkt, Stap 2



Resultaten houtrot volgens het aantal dosissen, bestaande toestand, Paardenmarkt, Stap 2



Resultaten houtrot volgens de vervalindex, bestaande toestand, Paardenmarkt, Stap 2



Vergelijking resultaten vorst-dooischade, schimmelgroei en houtrot gemeten in de baksteen versus in de kalkmortel



Configuratie 5 met aanduiding meetpunten in metselwerk bovenaan, mortel en metselwerk onderaan



Configuratie 5 (ZC, RF1.5, PExtD, PIntO, Kritische dag 15 maart): relatieve vochtigheid van binnenoppervlak,



Configuratie 5 (ZC, RF1.5, PExtD, PIntO, Kritische dag 15 maart): vochtopslag 100mm van binnenmetselwerk,



Vergelijking vochtopslag en relatieve vochtigheid van C5 en C6 (ZC, RF0.7, PExtD, PIntO | PExtZ, PIntO, Kritische dag 15 maart)



Vergelijking C1, C5 en C5 met interface weerstand (ZC, RF1.5, PExtO, PIntO, kritische dag 15 maart) tussen de materiaallagen

## Stap 2 | Nieuwe Toestand



Configuraties bestaande toestand, Paardenmarkt Stap 2

Meetpunt schimmelgroei voor de isolatie
Meetpunt schimmelgroei na de isolatie





Pleister





Regenbelasting

Baksteen Resultaten vorst-dooischade nieuwe toestand met binnenisolatie, Paardenmarkt, Stap 2 Schimmelgroei per configuratie Schimmelgroei per soort buitenpleister mortel en multipor



Resultaten schimmelgroei nieuwe toestand met binnenisolatie, Paardenmarkt, Stap 2





Resultaten houtrot volgens de vervalindex, nieuwe toestand met binnenisolatie, Paardenmarkt, Stap 2



Vergelijking resultaten vorst-dooischade, schimmelgroei en houtrot gemeten in de baksteen versus in de kalkmortel



Meetpunt vorst-dooischade

- Meetpunt houtrot
- Meetpunt schimmelgroei voor de isolatie
- Meetpunt schimmelgroei na de isolatie

#### Configuratie 5 met aanduiding meetpunten in metselwerk bovenaan, mortel en metselwerk onderaan



Configuratie 5 Nieuwe toestand (ZC, RF0.7): a) IJsmassavolume op 5mm van buitenmetselwerk, b) Relatieve vochtigheid tussen cementering en glaswol, c) Vochtopslag 100mm van binnenmetselwerk



Configuratie 5 en 6 (ZC, RF1.5, PExtD, PIntO, Kritische dag 15 maart): vochtopslag en RH



Vergelijkingen deel 1 (C1) en deel 2 (C3 en C4) Nieuwe Toestand, (ZC, RF1.5, PExtO, PIntO): a) IJsmassavolume op 5mm buitenmetselwerk, b) relatieve vochtigheid tussen multipor en lijmmortel, c) Vochtopslag 100mm van binnenmetselwerk





Figuur 139: Vergelijking C1, C2 en C2 met interface weerstand (ZC, RF1.5, PExtO, PIntO) tussen de materiaallagen



Bestaande toestand: a) Vochtopslag, b) Relatieve vochtigheid, c) Temperatuur (ZC, RF0.7, PExtD, PIntO, 15maart)



Nieuwe toestand: a) Vochtopslag, b) Relatieve vochtigheid, c) Temperatuur (ZC, RF0.7, PExtD, PIntO, 15maart)



Bestaande toestand, vergelijking vochtopslag 1D en 1D-2D (ZC, RF1.5, PExtO, PIntO, 31 december): a) 1D C1 BT, b) 1D C3 BT, c) 1D-2D C1 BT, d) 1D-2D C1 BT



Nieuwe toestand, vergelijking vochtopslag 1D en 1D-2D (ZC, RF1.5, PExtO, PIntO, 31 december): a) 1D C1 NT, b) 1D C3 NT, c) 1D-2D C1 NT, d) 1D-2D C5 NT



Bestaande toestand vergelijkingen stap 1 (1D) en stap 2 (1D-2D), (ZC, RF1.5, PExtO, PIntO): a) IJsmassavolume op 5mm buitenmetselwerk, b) relatieve vochtigheid binnenpleister, c) Vochtopslag 100mm van binnenmetselwerk



Nieuwe toestand vergelijkingen stap 1 (1D) en stap 2 (1D-2D), (ZC, RF1.5, PExtO, PIntO): a) IJsmassavolume op 5mm buitenmetselwerk, b) relatieve vochtigheid binnenpleister, c) Vochtopslag 100mm van binnenmetselwerk
## Stap 3 | Nieuwe Toestand

## Materiaaleigenschappen Raamaansluiting



PIR			
Parameter	Symbool	Eenheid	Gemiddelde waarde
Dampdiffusieweerstand	μ	[-]	40
Warmtegeleiding	λ	[W/m.K]	0,038 W/m.K
+ Delphin 6.1   Polystyrolplatte - extrudiert   ID : -1   Watertight			
PUR-schuim			
Warmtegeleiding	λ	[W/m.K]	0,035 W/m.K
Densiteit	ρ	[kg/m³]	25 kg/m³
+ Delphin 6.1   Polyurethanschaum   ID : -1   Watertight			
Multiplex			
Geen specifieke gegevens over de gebruikte multiplex			
> Delphin 6.1   OSB Board	ID : -1		
Buitenpleister dagkanten			
Waterabsorptiecoëfficiënt	$A_w$	[kg/s <sup>0.5</sup> m²]	0,033 kg/s <sup>0.5</sup> m² (W2, EN 998-1)
+ Delphin 6.1  Lime Cement Plaster   ID : 145			
Blauwe Hardsteen			
Geen specifieke gegevens over de aanwezige blauwe hardsteen dorpel			
> Delphin 6.1   Shell Limestone Facade Element   ID : 560			
Nieuwe kalkcementmortel			
Geen specifieke gegevens over de gebruikte bastaardmortel			
> Delphin 6.1   Lime Cement Mortar   ID : 143			
Raamkader			
Geen specifieke gegevens over de gebruikte aluminium raamkader			

 $\frac{1}{R_e} + \frac{\lambda_{aluminium}}{d} + \frac{\lambda_{equivalent}}{d} + \frac{1}{R_i} = U_f \cong 1, 1W/m^2K \rightarrow \lambda_{equivalent} \text{ berekenen}$ 

> Delphin 6.1 | Aluminium alloys | ID : -1 | Watertight, Vaportight

Materiaaleigenschappen nieuwe toestand, Paardenmarkt, Stap 3











Blauwe hardsteen Buitenpleister 10mm Metselwerk 28mm Binnenpleister 10mm Lijmmortel 5mm Multipor 100mm Gipspleister 10mm Multiplex 15mm

Meetpunt vorst-dooischade Meetpunt houtrot

Meetpunt vochtgehalte midden

Meetpunt schimmelgroei voor de isolatie Meetpunt schimmelgroei na de isolatie

Raamaansluiting verticale snede onderaan, Paardenmarkt, Stap 3





Resultaten schadefenomenen 1D-2D, C5, ZG, RF0.7, Paardenmarkt, Stap 2





Moisture content fieldplot (ZC, RF0.7): a) Stap 3, Raamaansluiting verticale snede onderaan, b) Stap 2, constructie volsteens metselwerk en lager absorberende buitenpleister



Relatieve vochtigheid [%] | ZC | RF0.7 | 15-03

Relatieve vochtigheid fieldplot (ZC, RF0.7): a) Stap 3, Raamaansluiting verticale snede onderaan, b) Stap 2, constructie volsteens metselwerk en lager absorberende buitenpleister



Temperatuur fieldplot (ZC, RF0.7): a) Stap 3, Raamaansluiting verticale snede onderaan b) Stap 2, constructie volsteens metselwerk en lager absorberende buitenpleister





Resultaten schadefenomenen verticale snede bovenaan, Paardenmarkt, Stap 3



Raamaansluiting verticale snede bovenaan (ZC, RF0.7): a) Moisture content 15-03, b) Relatieve vochtigheid, 11-08





Gegeven detailtekeningen raamaansluiting verticale snede bovenaan: a) waterkering aan de buitenzijde zoals in de simulatie, b) stalen profiel aan de buitenzijde als verlenging van het raamprofiel

Relatieve vochtigheid [%] | ZG | RF0.7 | 15-03



Raamaansluiting verticale snede onderaan, Paardenmarkt, Stap 3



Raamaansluiting verticale snede onderaan, Paardenmarkt, Stap 3