

Innovatief gevelsysteem met metselwerk en biobased isolatie: hygrothermische evaluatie via experimenten en HAM-simulaties

Ruben Van den Bossche

Studentennummer: 01907852

Promotoren: prof. dr. ir. arch. Marijke Steeman, prof. dr. ir.-arch. Nathan Van Den Bossche

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

Academiejaar 2023-2024

Voorwoord

Het zou onlogisch zijn om dit werk te starten zonder de mensen die het mee mogelijk maakten, daarom eerst een woord van dank. Bedankt aan iedereen die ervoor zorgde dat dit werk staat waar het nu staat.

Ten eerste zou ik graag mijn promotoren bedanken, prof. dr. ir. arch. Marijke Steeman en prof. dr. ir.-arch. Nathan Van Den Bossche. Zonder jullie had ik niet de kans gekregen om dit boeiende onderwerp te kunnen onderzoeken. Bedankt voor jullie raad, aanwijzingen en pragmatisch handelen op de cruciale momenten zoals het vinden van een aannemer voor de testopstellingen. Bedankt voor het richtinggevende advies op de momenten dat mijn enthousiasme tot een te breed onderzoeksveld leidde.

Daarnaast wens ik graag arch. Bart Vanden Driessche en arch. David Leune van BLAF architecten te bedanken. Voor de gesprekken in jullie kostbare tijd die leidden tot de inspiratie voor de onderzoekslijn in dit eindwerk. Voor de inspanningen om de nodige materialen aan te leveren voor de testopstellingen.

Niet in het minst dien ik ook mijn begeleiders te bedanken, ir. arch. Anke Blommaert en ir. arch. Bruno Vanderschelden. Jullie deur stond altijd voor mij open. Of het nu was om problemen te verhelpen in softwareprogramma's, één van mijn vele vragen te beantwoorden, samen kalkhennep uit te strooien in het labo na de werkuren of twee weken lang de testopstellingen (en het labo) te besprenkelen met water en kleurstof. Ook bedankt voor de raad wanneer ik met twijfels zat en om mee mijn toekomst richting te geven door het delen van jullie ervaringen.

Ook bedankt aan de gedreven vaklui die bijsprongen waar nodig om de testopstellingen tot een geslaagd resultaat te brengen. Bedankt aan Nicolas, Michael en Thomas voor jullie hulp en werk in het labo. Bedankt aan Jeffrey, Bjorn en Thomas, de metselaars van Denys, om 18 prachtige metselwerk-wanden af te leveren en de fijne gesprekken tussendoor, doorspekt met levenswijsheden van op en naast de werf. Bedankt aan Pieter van Arte Constructo, voor de leerrijke gesprekken en hulp bij het aanmaken van de kalkmortel. Je passie en volharding waren aanstekelijk.

Tot slot wil ik ook mijn gezin bedanken. Voor de welgekomen afwisseling in gespreksstof aan de keukentafel wanneer ik weer over dit eindwerk begon. Bedankt voor het luisterend oor en de motivatie wanneer het even tegenzat. En ja mama, ik ben af en toe gaan wandelen om een frisse neus te halen. Bedankt aan mijn vriendin Lotte, om samen met mij op een doordeweekse avond halsoverkop naar Kortrijk te rijden om de laatste bakstenen. Bedankt om de juiste kleuren te kiezen op mijn grafieken als ik het niet goed zag. Bedankt om er altijd en overal voor mij te zijn, om mijn geklaag aan te horen en om me er vervolgens weer bovenop te helpen met je motiverende woorden.

Ruben Van den Bossche, 30 mei 2024

Toelating tot bruikleen

De auteur geeft de toelating om deze masterproef voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de masterproef te kopiëren voor persoonlijk gebruik. Elk ander gebruik valt onder de bepalingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze masterproef.

The author gives permission to make this master dissertation available for consultation and to copy parts of this master dissertation for personal use. In all cases of other use, the copyright terms have to be respected, in particular with regard to the obligation to state explicitly the source when quoting results from this master dissertation.

30 mei 2024

Ruben Van den Bossche

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.

This master's dissertation is part of an exam. Any comments formulated by the assessment committee during the oral presentation of the master's dissertation are not included in this text.

Innovatief gevelsysteem met metselwerk en biobased isolatie: hygrothermische evaluatie via experimenten en HAM-simulaties

Auteur: Ruben Van den Bossche

Promotoren: prof. dr. ir. arch. Marijke Steeman, prof. dr. ir.-arch. Nathan Van Den Bossche

Begeleiders: ir. arch. Anke Blommaert, ir. arch. Bruno Vanderschelden

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

Academiejaar 2023-2024

Vakgroep Architectuur en Stedenbouw

Voorzitter: prof. dr. ir.-arch. Johan Lagae

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur

Universiteit Gent

Abstract

De energietransitie in de bouw geeft aanleiding tot grotere isolatiediktes, waardoor het vertrouwde concept van de spouwmuur onder druk komt te staan. In deze thesis wordt een innovatief gevelsysteem onderzocht, bestaande uit een zelfdragende buitenschil in metselwerk, met een achterliggend houtskelet en biobased isolatie. Dit systeem heeft al ingang in de praktijk gevonden via BLAF architecten, zowel in nieuwbouw- als renovatieprojecten. Bij renovaties vormt het de toepassing van binnenisolatie op een bestaande metselwerkwand. Er is echter nog weinig bekend over de exacte prestaties, daarom richt deze thesis zich op het hygrothermische gedrag van deze wandopbouw. De metselwerk schil moet voldoende regendichtheid garanderen wegens het wegvallen van de luchtspouw, de capillaire onderbreking in de constructie. Bovendien is de combinatie van binnenisolatie met vochtgevoelige biobased isolatie een aandachtspunt. Via experimenten wordt de regendichtheid van metselwerk in de praktijk onderzocht door een regenbelasting aan te brengen op 18 testopstellingen, met variatie in morteltype (cement, bastaard en kalk) en baksteen. Daarnaast wordt een meetcampagne uitgevoerd op een case study om inzicht te krijgen in het werkelijke gedrag van dit type wand. Tot slot worden 1D en 2D HAM-simulaties in Delphin uitgevoerd om enerzijds het hygrothermische gedrag op de lange termijn en degradatiefenomenen te bestuderen, en anderzijds om de overeenkomsten en verschillen tussen de experimenten, meetcampagne en simulaties te analyseren. Uit de experimenten bleek dat de regendichtheid van metselwerk primair afhankelijk is van het contactoppervlak tussen baksteen en mortel, meer nog dan van de metselwerkdikte. Daarnaast vertoonden de simulaties zonder spouw een verhoogd risico op houtdegradatie en verminderde thermische prestaties. Hierbij is de slagregenbelasting cruciaal en zo bleek uit de case study dat die vaak conservatief wordt ingeschat.

Trefwoorden: HAM-simulaties, berekeningstesten, metselwerk, houtskelet, biobased isolatie

Innovative façade system comprising masonry and bio-based insulation: hygrothermal assessment through experiments and HAM-simulations

Ruben Van den Bossche

Supervisor(s): prof. dr. ir. arch. Marijke Steeman, prof. dr. ir.-arch. Nathan Van Den Bossche, ir. arch. Anke Blommaert, ir. arch. Bruno Vanderschelden

Abstract – The transition towards a sustainable building industry necessitates large insulation packages, rendering the traditional cavity wall untenable. This thesis investigates an innovative façade system comprising a self-bearing outer masonry leaf and interior timber framing with bio-based insulation. This system is already implemented by BLAF architects, both in new construction and renovation projects, for which the latter involves the application of interior insulation to existing masonry walls. This thesis aims to expand the understanding of the hygrothermal behaviour of the wall system. The masonry must ensure the watertightness of the wall in the absence of the air cavity. The combination of interior insulation with moisture-sensitive bio-based insulation requires attention. The watertightness of masonry in practice is tested through experiments in which a water spray is applied to 18 test setups, varying the mortar type (cement, bastard and lime) and brick type. A monitoring campaign is conducted on a case study to gather insights into the performance of this wall type under realistic conditions. Finally, 1D and 2D HAM-simulations are carried out to evaluate the hygrothermal behaviour and degradation phenomena on the long term, and to analyze the similarities and differences between the experiments, monitoring campaign and simulations. The experiments revealed that the watertightness of masonry primarily depends on the contact interface between brick and mortar, more than the thickness of the masonry itself. The simulations without an air cavity indicated an increased risk of wood degradation and a decrease in thermal performance. Rain exposure proved to be crucial, and the case study revealed that its estimation is often conservative.

Keywords – HAM-simulations, watertightness testing, masonry, timber framing, bio-based insulation

I. INTRODUCTION

Innovative construction solutions help facilitate the transition to a sustainable building industry by efficiently managing materials. In this spirit, BLAF architects proposes an alternative to the traditional cavity wall: a wall system comprising a self-bearing outer masonry leaf and interior timber framing with bio-based insulation. According to BLAF, this involves two major improvements: eliminating thermal bridges caused by wall ties and reducing the use of ceramic material by 22-26 % per m² when using perforated construction bricks as can be seen in Figure 1.

To limit the scope of this research, a reference wall will be considered (see Figure 2) indicating 5 themes as a rationale for this research. The type of brick (1) allows variation in size, type and wall thickness to form a self-bearing masonry leaf. The mortar joint (2) is not only important for the moisture transport,

but lime mortar also contributes to circularity [1], although cement mortar is currently omnipresent. The combination of brick type and mortar will determine the watertightness of the masonry wall (3). Without air cavity, the masonry wall must rely on its buffering capacity to avoid rainwater penetration to the insulation material [2]. Cracks in masonry cause infiltration, values in literature ranging from 1% over 10.03% (good workmanship) to even 44.6% (bad workmanship) of the wind driven rain [2]-[4]. These phenomena can evidently lead to high moisture contents. Bio-based insulation materials such as lime hemp are capillary active and hygroscopic, allowing them to manage moisture through spreading, buffering, and drying out. However, they tend to contain more moisture on average compared to classic insulation materials [5]. Therefore, wood degradation [5] and the thermal performance of the insulation (4) are important concerns. Finally, some principles from the building practice of BLAF architects serve as a feedback mechanism: *Einfach Bauen*, *Trias Energetica* and building cost. The reference wall buildup by BLAF architects is conceived based on these principles.

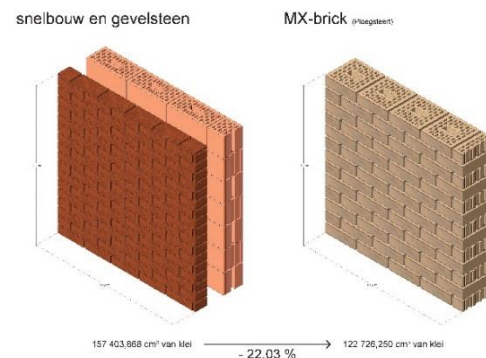


Figure 1 Reducing the use of ceramic material using a single self-bearing masonry leaf (BLAF architects).

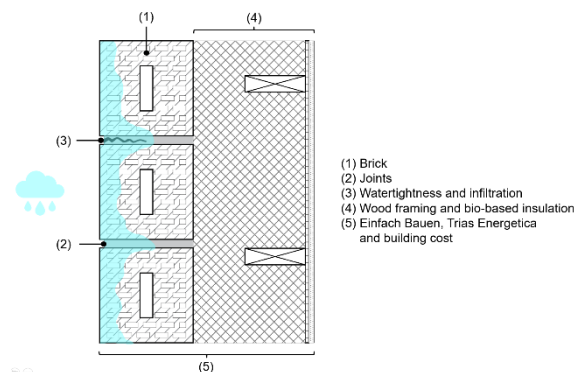


Figure 2 Reference wall with the 5 considered themes in this thesis.

II. EXPERIMENTS

A. Materials and methods

1) Materials

In the lab, 18 test setups of approx. 0.4 m x 0.6 m were built using 6 brick types (see Table 1) and 3 mortar types (cement, bastard and lime). The cement mortar (CEM) was made with grey cement, the bastard mortar (BAST) with white cement and natural hydraulic lime (NHL). The lime mortar (KALK) was a premixed NHL product from Arte Constructo, Unilit 1320. All types were executed as a single stretcher bond, except for type 4 (cross bond) and type 5 (double stretcher bond).

Table 1 Overview of the brick types used in the 18 test setups.

Type	Illustration	Brick type (producer)	Dimensions l x b x h (in mm)
Type 1		Decobloc (Ploegsteert)	288 x 88 x 138
Type 2		Decobloc (Ploegsteert)	288 x 138 x 138
Type 3		MX (Ploegsteert)	220 x 217 x 65
Type 4 & 5		Reclaimed brick (unknown)	ca. 180 x 85 x 50
Type 6		Carbstone (Carbstone)	290 x 190 x 140

The water absorption coefficient A_w of all materials was determined according to NBN EN ISO 15148. The bricks were oriented according to the moisture transport in the actual test setup. The results are displayed in Figure 3. As expected, the lime mortar had the highest A_w value of all mortars. Samples of Carbstone were not tested as there were no stones left.

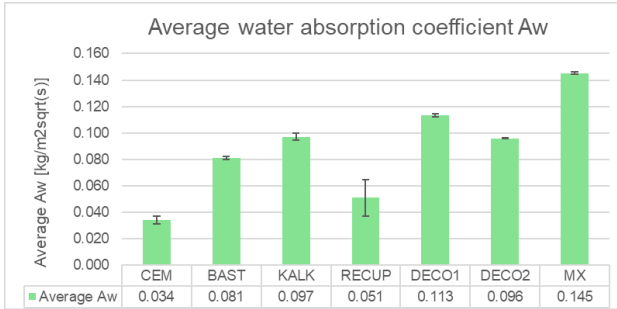


Figure 3 Average measured water absorption coefficient A_w .

The size of the walls was limited to facilitate continuous weighing of the setups during the test. The stones were not wetted before bricklaying. Each test setup was finished with a 100 mm dry lime hemp insulation layer (CaNaDry from Exie) and an 8 mm PMMA sheet to allow observation during the test.

2) Test protocol and evaluation methods

The test protocol comprises spraying the samples during 1 h with a spray rate of 2 l/min.m² based on EN 1027. No pressure difference was applied. During a typical rain event, pressure differences are limited to 50-150 Pa [2]. Moreover, a high rainfall intensity results often in a low pressure difference [7]. Finally, the pressure equalization occurs at the most airtight layer of the wall buildup, which will be the interior finishing. Thus, the rain event from the test protocol is extreme, but without considering the effect of wind.

The spray rate is applied by 2 nozzles with a circular full cone spray pattern of 120° distanced 400 mm apart following the guidelines of EN 1027 (see Figure 4). They were positioned symmetrically to the edges of the sample at a height of 50 mm below the top and at a horizontal distance of 190 mm from the exterior brick face. After calibration to account for the part of

the spray that misses the wall, a flow of 2.778 l/min.m² during the tests was measured. This can be considered conservative.

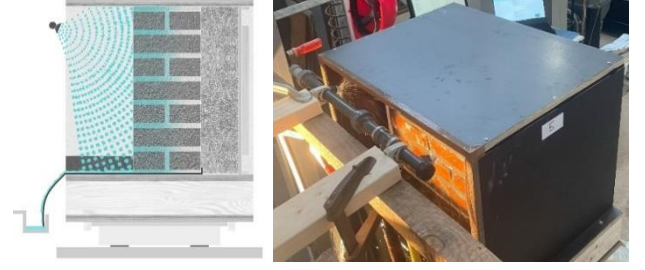


Figure 4 Section of the test setup (left) and actual test setup (right).

To evaluate the tests, different methods were used. Green UV tracer was mixed with the lime hemp shivs to visualize the moisture front in the lime hemp insulation. The tracer emits a yellow-green color upon contact with water, visible both under visible and UV light. After the test, the lime hemp insulation is excavated layer by layer to trace the moisture front. Using a manual building moisture meter, wet and dry zones can be identified on the inside of the masonry wall after excavation. Finally, each sample is weighed during the test on a KERN DE150K2DL scale (weighing range 150 kg, readability 5 g). The weight is logged on a lab pc every second using an RS-232 data cable. Hence, both qualitative and quantitative results are gathered in order to maximize the output of the test.

B. Results

1) Qualitative results

The qualitative results of the interior side of the wall after testing are shown in Figure 5. Clear edge effects are abstracted.

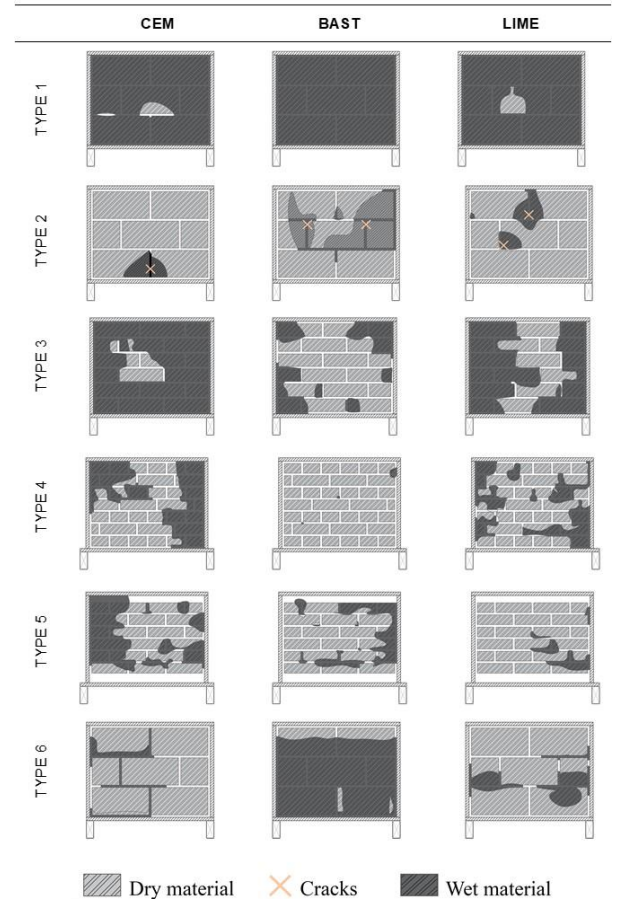


Figure 5 Schematic overview of all wet spots observed at the interior side of the wall after testing [12].

The following phenomena were observed:

- Infiltration occurs primarily through the joints. Even when no infiltration occurred, the joints were more humid, as confirmed by the moisture sensor.
- Infiltration starts and intensifies around the head joints due to poor compaction during construction [4][8].
- Infiltration through the bed joints leads to runoff and capillary absorption into the head joint above. This was confirmed by head joints that were half dry and half wet.
- The contact interface between brick and mortar is crucial. The UV tracer visualizes this (see Figure 6). In the type 4 setups, wet spots appeared where there was a continuous brick-mortar interface across the wall thickness at the header course. The surface texture also proved to be crucial for the interface: type 3 with its 22 cm MX stones, of which 3 faces were aesthetically finished with a sanded top layer, suffered more infiltration than the 14 cm type 2 walls.
- Cracks and workmanship are decisive for infiltration. The type 2 walls only showed wet spots at local defects, indicated with a cross in Figure 5.
- Deep infiltrations were observed for type 6, with values of 5-6 cm (CEM 6) and even 8 cm (BAST 6), due to the bad bonding between the carbstones and the mortar. Only in KALK 6, no deep infiltration occurred. This underlines the moisture buffering properties of pure NHL mortar.

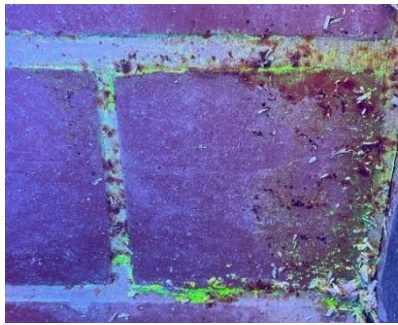


Figure 6 Distinct tracer activation at contact interface brick-mortar.

2) Quantitative results

The absorption curves of all 18 walls during the test are depicted in Figure 7. They were obtained by subtracting the dry weight of the setup from the actual weight during the test. Their values should be interpreted in a relative way, as edge effects contribute to the weight as well.

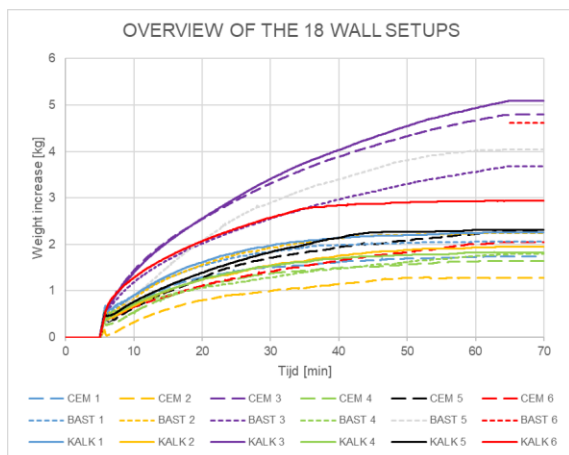


Figure 7 Absorption curves of the 18 walls during the test.

The following trends were identified by analyzing the curves:

- Walls with KALK generally showed the highest water uptake, followed by BAST and CEM. This trend is reflected in the experimental A_w -values shown in Figure 3.
- The type 3 setups (3.7-5 kg) absorb significantly more water than the others (1.2-2.2 kg), this can be attributed to the sanded contact interface and the slightly higher A_w -value. Hence, the importance of the contact interface.
- KALK 6 absorbed more water than CEM 6, yet no deep infiltration occurred. This underlines again the moisture buffering properties of pure NHL mortar.

III. SIMULATIONS

A. Materials and Methods

1) Evolution of Wall Types in BLAF's Practice (1D)

The first set of simulations investigates the evolution of wall buildups from protected insulation (air cavity and rainscreen) to exposed insulation in contact with the masonry leaf based on their susceptibility for infiltration based on Van Linden [2]. This is done by identifying 9 types of buildups, V1 to V9, from case studies from the archive of BLAF (see Figure 8).

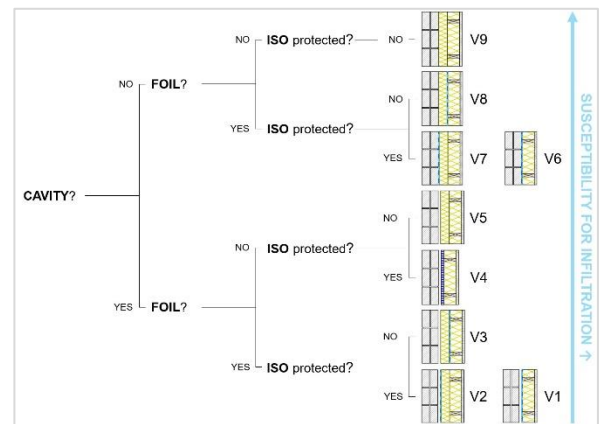


Figure 8: Classification tree identifying 9 wall buildup types from the practice of BLAF based on 3 decision levels: is there an air cavity, is there a rainscreen ("FOIL") and is the insulation ("ISO") protected?

In Delphin, 1D simulations are conducted on wall V1 to V9 with 19 cm OBBD ZK [499], 18/24/28 cm of MW/CEL/KH insulation [730/580/1829] and a vapour open interior finishing, with a 0.1 – 1 mm grid. The U-value of each wall is 0.15 W/m².K. The 15th simulation year is evaluated (equilibrium). The exterior and interior climate of Brussels are used (MRV) [9]. The orientation is SW and the Rain Exposure is set to 1.

2) One-Factor-at-a-Time Approach (1D)

The second set of simulations investigates the impact of certain parameters on the simulation results. Buildup V9 is now simulated, and 6 parameters are varied one by one:

- Rain Exposure: 0.5 – **1** – 1.25 – 2
- Brick type: ZA – ZB – ZD – ZF – ZG – ZI – **ZK** – ZL
- Masonry thickness: 9 cm – 14 cm – **19 cm**
- Orientation: N – E – **SW**
- Improved watertightness: **none** – watertight limewash (WD) – WD + 1% infiltration – WD + 10% infiltration – impregnated brick (HYDRO)
- Infiltration: **none** – 0.6% – 1% – 10%

The reference case for each parameter is indicated in **bold**.

3) Simulations of the Experimental Setup (2D)

Type 1, type 2, and type 4 are simulated in 2D. The materials for brick and lime hemp remain the same. Only lime [718] and bastard mortar [842] are simulated, as 1D simulations are a conservative approach for cement mortar [4]. The materials are scaled based on the experimental A_w -values from Figure 3, except for the lime mortar, as it produced unrealistic results. The simulations are executed with 3 values for the interface resistance (IR) for each mortar based on literature [4] (Table 2).

Table 2 Values for the interface resistance (IR), dry (DC) and wet cured (WC) based on literature [4].

	IR = 0 [m/s]	IR = DC [m/s]	IR = WC [m/s]
BAST	0	2.5E10	1.25E10
KALK	0	1E9	1E8

To obtain realistic results, the bricklaying process is translated into the simulation. A moisture content is assigned to the mortar to mimic the fresh mortar, 0.08 kg/kg (BAST) and 0.14 kg/kg [KALK]. To mimic the lab climate, T and RH are monitored with a Hobo U12-011 sensor during the two weeks prior to the tests. Based on these data a constant extrapolation was made for the period before. The walls are simulated from the moment they were constructed (12 march) to their testing date, resulting in a simulation duration of 42 days conditioning (BAST) and 44 days (KALK), followed by 1 h of spray (2.778 l/min.m²) and 1 h drying (the excavation period).

B. Results

1) Evolution of Wall Types in BLAF's Practice (1D)

In general, MW shows more variation than hygroscopic materials like CEL and KH. The average yearly RH also increases in this order. In V1, V4 and V6 the timber frame is located at the outside of the insulation, resulting in a higher risk for wood degradation. While a layer of insulation exterior to the timber frame, like in the other buildups, reduces the risk, the thermal performance of that outer insulation layer is lower.

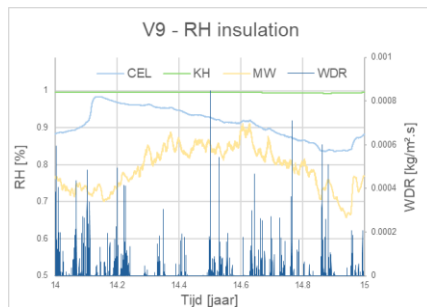


Figure 9 Variation of the RH in the insulation layer for buildup V9.

For the buildups with CEL, there was little difference in the number of FTC_{crit}. As long as there was a barrier against liquid moisture transport (cavity or rainscreen), there was no degradation risk for wood according to the dose-response model [6] and caking of CEL, which occurs at moisture content levels above 0.35 kg/kg [11]. The main concern is the loss of thermal performance, with an increase in heat flux of 6-10%.

When liquid transport is possible (V8 and V9), the degradation risk rises rapidly, and the heat flux increases up to 18%. Any contact with liquid water should be avoided for CEL.

For the buildups with KH, the number of FTC_{crit} decreased as KH made more contact with the masonry. This is due to the fine pore system of KH in Delphin, attracting moisture from the

brick. KH has an even higher moisture content than CEL, resulting in a heat flux increase of 20-30% over the heating season. The difference between setups where liquid moisture transport is possible and those where it isn't is smaller, as moisture condenses in KH when in contact with humid air, a typical hygroscopic phenomenon [5].

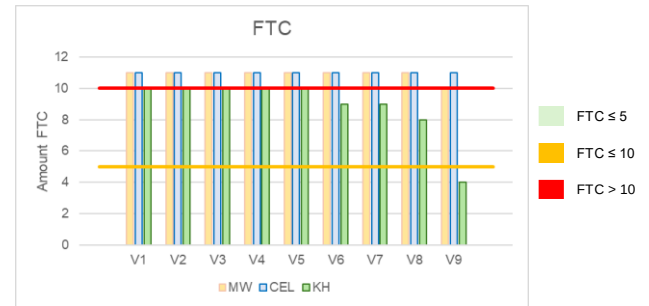


Figure 10 The amount of FTC_{crit} decreases as KH makes more contact with the masonry, due to its finer pore system attracting moisture.

None of the evaluated buildups exhibited a risk of mould on the interior wall surface, under the assumption of a controlled indoor climate [9] and due to the high level of insulation.

2) One-Factor-at-a-Time Approach (1D)

The influence of each parameter on the results was assessed through 3 criteria: freeze-thaw damage [10], wood decay [6] and increase of the heat flux during the heating season. The main findings per parameter are listed below.

Rain Exposure (RE): there is little to no degradation for RE=0.5. RE=1 already leads to unacceptable values for all degradation indicators. At higher RE values, there is an apparent decrease in wood decay due to moisture contents above 60 m%. The thermal performance of CEL deteriorates the most due to its sensitivity to liquid moisture (see Figure 11).

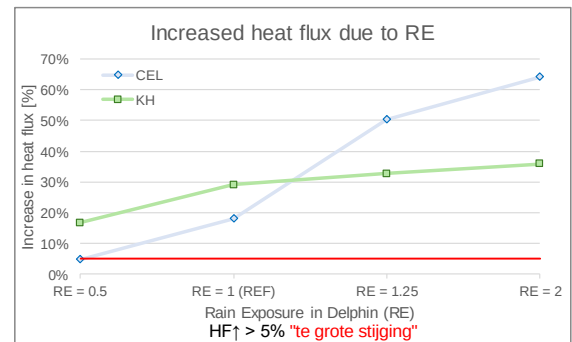


Figure 11 Increased heat flux due to RE, CEL deteriorates the most.

Brick type: modern brick ZI generally induces the least degradation and the best thermal performance. With regard to wood decay, the brick type barely seemed to have an impact on the simulation results with KH (see Figure 12).

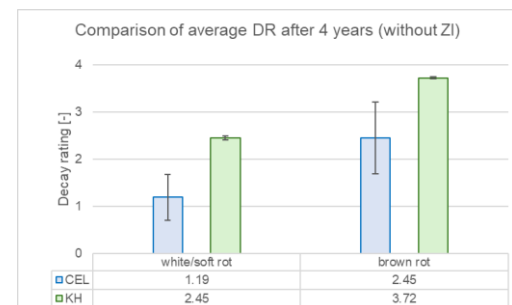


Figure 12 Comparison of the average Decay Rating (DR, EN 252) after 4 years for all historic brick types.

Masonry thickness: while it has lesser impact on degradation criteria, the thermal performance for CEL increases significantly from 9 to 19 cm, due to reduced liquid moisture transport to the inside of the masonry wall.

Orientation: SW proves to be critical in terms of moisture load, as N and E simulations do not experience degradation and thus exhibit significantly increased thermal performance.

Limewash and impregnation: these waterproof solutions effectively prevent nearly all forms of degradation. However, workmanship is crucial: 1% infiltration behind the limewash doesn't pose problems, but a 10% infiltration of the original rain load often aggravates the situation, leading to outcomes even worse than without this protective layer.

Infiltration: the impact on the degradation criteria seems rather limited because the reference scenario was already quite critical. In KH, there is once again an apparent decrease in wood decay due to moisture levels exceeding the critical threshold. Nevertheless, the impact on the thermal performance is significant. The heat flux increases up to 39% in CEL and 49% in KH during the simulated heating season.

3) Simulations of the Experimental Setup (2D)

The simulations of the experimental setup were compared to the experimental data from the watertightness test. The results for BAST 1 and KALK 1 are shown in Figure 13 as an example. The vertical difference between the curves of the test and the simulation results indicates the difference between reality and simulation model. In general, the test setup exhibits a higher moisture uptake than the simulations. Thus, the simulations are an underestimation of reality.

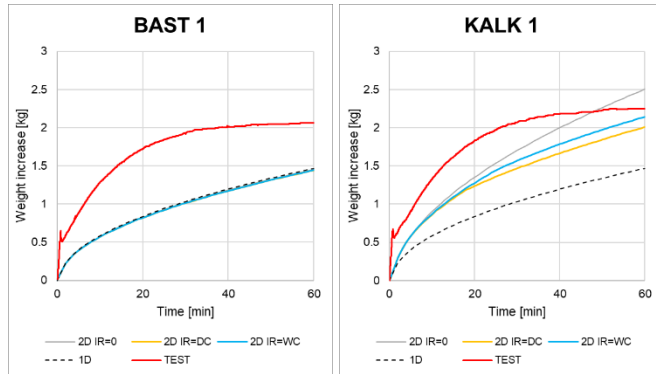


Figure 13 Comparison of the test results with the results of the 1D and 2D simulations for BAST 1 and KALK 1.

This is caused by several phenomena of increased moisture transport in reality, which should be represented by a source in Delphin. First, the contact interface has an important influence on the moisture transport as was observed in the experiments. Secondly, infiltration through cracks and imperfections is inherent in realistic masonry but is neglected in simulations. This results in rapid initial moisture transport and lateral wetting of dry material in the depth. This phenomenon slows down, resulting in the flattening of the test curve, which is not represented in the simulations. Finally, unwanted edge effects contribute to the test weight, as mentioned before.

The difference between 1D and 2D simulations depends on the mortar properties, as can be seen in Figure 13. When the mortar absorbs more than the brick, the 1D simulation is an underestimation of 2D and vice versa. The simulation of mortars yields qualitatively and quantitatively distinct results. The IR barely affects the results for BAST mortar but has a greater impact on the spreading of the KALK results.

This is illustrated in the moisture plots for KALK 1 (see Figure 14), as the joint wets the brick. When simulating an IR, the moisture front in the brick narrows because the joint cannot exchange its moisture to the brick. This results in a deeper and faster progression of the moisture front in the joint.

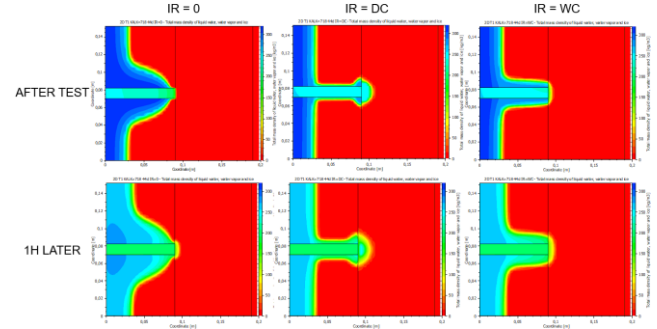


Figure 14 Moisture Content [kg/m³] plotted after the test and 1 h later for KALK 1. The impact of the IR is clear, especially for IR = DC.

The A_w -value of the lime mortar was not adjusted based on the experimental results as it led to unrealistic results. The lime mortar will thus overestimate the real moisture uptake, as can be observed in the fact that the simulated curve surpasses the test curve in Figure 13, which is rather unlikely to happen. Yet, the qualitative results align with prior research, including x-ray imaging of the moisture front in lime mortar [4].

IV. CASE STUDY: MONITORING CAMPAIGN

A. Materials and methods

1) Measurement data

The case study consists of a V8 type of wall with a 9 cm masonry leaf (Decobloc) and 40 cm lime hemp insulation. Nine sensors were used to monitor T and RH, mapping conditions in the wall, the indoor and outdoor climate as shown in Figure 15.

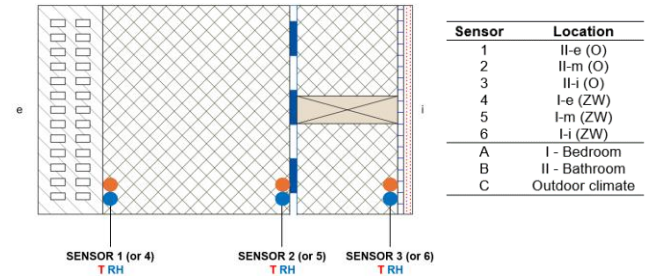


Figure 15 Assignment of all T and RH sensors in the wall buildup.

The T sensors are thermocouples type K (accuracy 0.1°C), while the RH sensors are HIH-4000 type (accuracy 3.5%). To measure the indoor and outdoor climate, Hobo sensors are used.

2) Simulations

The buildup of the case study is also simulated in 1D, following the same approach as described above. Infiltration was varied from 0% to 1% and 10%. The MRY climate was used [9], but the Rain Exposure in Delphin was calculated in detail following EN ISO 15927-3 as its importance emerged in the previous stages. This resulted in strongly reduced values of 0.248 – 0.341 for the SW orientation and 0.414 – 0.569 for the E orientation. The simulations were conducted over a 15 year-period, starting on April 26, 2023, and were evaluated during the 1st and 15th year to enable comparison with measurement data as well as long-term evaluation. This particular start date coincides with the construction of the façade.

B. Results

1) Measurement data

The T and RH results for the SW orientation of the monitoring period are shown in Figure 16. The thermal inertia of lime hemp is evident from the T data. The deeper in the construction, the more the temperature variations are dampened. In the last week, thermal damping of 8–9°C over 26 cm of lime hemp could be observed in combination with a phase shift of 13 to 15 h, which aligns with the literature [5]. The RH results confirm previous findings that high RH can occur in lime hemp due to its hygroscopic nature. It is worth noting that the outermost sensor in the walls stopped logging, likely due to moisture levels exceeding the critical threshold.

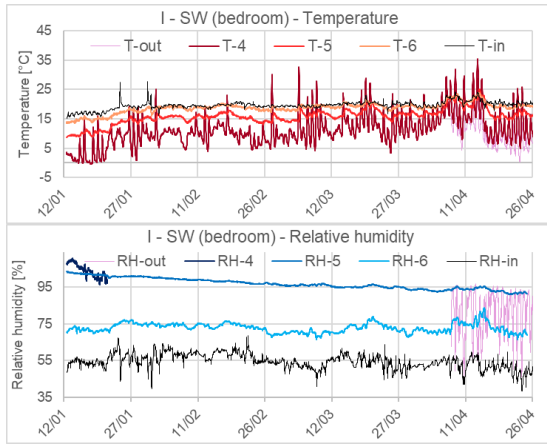


Figure 16 T and RH results (SW) during the monitored period.

2) Simulations

Similar tendencies were observed in the 1D simulations. The simulations, despite using a custom RE for the case study, were found to be an underestimation of the measurement data, thus the implementation of an infiltration source was justified.

The degradation criteria indicated no degradation risks in the 15th year of the simulation, thanks to the rainscreen (V8). Two important points should be noted: first, the simulated rainscreen is waterproof but is perforated by wall ties in reality and second, there are zones between the windows without rainscreen (V9). When simulating the V9 buildup in combination with an assumption of 10% infiltration for the critical SW orientation, wood decay (brown rot) occurs, as can be seen in Table 3. The heat flux increase varies between 5–20% without infiltration.

Table 3 Doses and Decay Rating for the V9 buildup.

Doses	SW - max		E - max	
	REF	10%	REF	10%
White/soft rot (1 y)	0	0.04	0	0
Brown rot (1 y)	0	0.18	0	0
White/soft rot (4 y)	0	0.49	0	0
Brown rot (4 y)	0	1.72	0	0

DR < 0.5 "acceptable" 0.5 ≤ DR < 1 "slight attack" DR > 1 "moderate to severe attack"

V. CONCLUSION AND DISCUSSION

The studied innovative façade system shows potential due to its simple construction and vapour-open buildup, but some hygrothermal considerations must be taken into account.

(1) The choice of **brick type** appeared less significant in the simulations, except for the modern brick ZI. While the masonry thickness exhibited little influence on long-term simulation results, it proved to be more important to ensure watertightness in the tests. However, the thickness was primarily influenced

by the contact interface. Furthermore, increased thickness offers the advantage of self-bearing capacity, eliminating the need for wall ties. This enhances thermal performance and simplifies the construction process.

(2) The **joints**, primarily the less compacted head joints, were identified as the main infiltration path. Test setups using lime mortar showed the highest absorption and moisture buffering, followed by bastard and cement, confirmed by the experimental A_w -values. Lime joints are thus the most watertight.

(3) The **interface** between mortar and brick proved crucial for infiltration in the experiments, as well as cracks and workmanship. These weren't included in the simulations, resulting in an underestimation of reality. To address this gap, a moisture source for **infiltration** should be introduced in the simulations, but its value remains highly uncertain, thus a range check should be used. While an IR in the 2D simulation added a resistance perpendicular to the interface, it did not account for the enhanced parallel moisture transport.

(4) In simulations involving **cellulose**, the absence of a capillary barrier (the air cavity or rainscreen) distinguished between acceptable and degradation-sensitive scenarios. Theoretically, cellulose insulation is viable if the wall is rain tight or impermeable through limewash or impregnation. However, experiments indicated the former is not always the case, stressing the importance of the latter's performance. However, simulations indicated that even a 10% infiltration of the original rain load significantly deteriorates the results.

For **lime hemp**, eliminating the air cavity was the main difference between acceptable and degradation-sensitive scenarios, as the rainscreen had less influence in the simulations due to the material's hygroscopic nature. The rain exposure was crucial for the occurrence of degradation in the critical SW orientation. Simulations conservatively estimated its value, as confirmed by detailed calculations in the case study. The monitoring campaign proved the thermal inertia of lime hemp and the occurrence of high relative humidities.

REFERENCES

- [1] Interreg FCRBE. (2021). *REUSE TOOLKIT - volle keramische steen*.
- [2] Van Linden, S. (2022). *Fourth Generation Watertightness: A Performance-Based Strategy to Control Rainwater Infiltration in Façade Systems* [Doctoral dissertation]. Faculty of Engineering and Architecture, Ghent University.
- [3] ASHRAE. (2016). *ASHRAE 160 - Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings*.
- [4] Calle, K. (2020). *Renovatie van historische gevels: redding of doodsteek?* Universiteit Gent.
- [5] Buildwise. (2020). *KALKHENNEP: Ontwerp- en uitvoerings-ondersteuning, bijlage 1 - analyse en simulatie van de bouwfysische prestaties van kalkhennepoepassingen*.
- [6] Brischke, C., & Rapp, A. O. (2008). Dose-response relationships between wood moisture content, wood temperature and fungal decay determined for 23 European field test sites. *Wood Science and Technology*, 42(6), 507–518.
- [7] Van Den Bossche, N., Lacasse, M. A., & Janssens, A. (2013b). A uniform methodology to establish test parameters for watertightness testing part II: Pareto front analysis on co-occurring rain and wind. *Building and Environment*, 63, 157–167.
- [8] Kahangi Shahreza, S., Niklewski, J., & Molnár, M. (2021). Experimental investigation of water absorption and penetration in clay brick masonry under simulated uniform water spray exposure. *Journal of Building Engineering*, 43, 102583.
- [9] Vandemeulebroucke, I., Caluwaerts, S., & Van Den Bossche, N. (2022). Decision framework to select moisture reference years for hygrothermal simulations. *Building and Environment*, 218, 109080.
- [10] Mensinga, P., Straube, J., & Schumacker, C. (2010). *Assessing the freeze-thaw resistance of clay brick for interior insulation retrofit projects*.
- [11] Langmans, J. (2013). *Feasibility of exterior air barriers in timber frame construction*.
- [12] Vanderschelden, B., Van den Bossche, R., Van Den Bossche, N., Cnudde, V., & De Kock, T. (2024). *The impact of lime as a replacement of cement-based mortar, on the water absorption and rain penetration of masonry*. SUBLine Conference.

Inhoudstafel

Voorwoord.....	I
Toelating tot bruikleen	II
Abstract	III
Extended abstract	IV
Inhoudstafel	X
Lijst van figuren	XIII
Lijst van tabellen	XIX
Lijst van afkeringen en symbolen	XXI
I. DEEL 1 – rationale: de experimentele bouwpraktijk van BLAF architecten	1
1. De visie van BLAF op bouwen	2
2. De bouwpraktijk van BLAF architecten	4
2.1. Centrale thema's als startpunt van het onderzoek	4
2.2. Selectie van wandopbouwen via cases	5
2.3. Typologische indeling van de wandopbouwen in de bouwpraktijk van BLAF op basis van infiltratiegevoeligheid	7
3. Van rationale naar methodologie	10
II. DEEL II – Literatuurstudie.....	11
1. Hygrothermisch en bouwfysisch gedrag van materialen	12
1.1. Context van HAM-simulaties en software Delphin 6	12
1.2. Basisprincipes hygrothermie en materiaaleigenschappen	13
2. Metselwerk	21
2.1. Baksteen	21
2.2. Voegen.....	23
2.3. Infiltratie	27
2.4. Degradatie	30
3. Spouw	31
4. Isolatie	32
4.1. Binnenisolatie.....	32
4.2. Biobased isolatiematerialen	35
4.3. Degradatie	45
5. Houtskelet	46
5.1. Koudebruggen en lokale effecten door de houtstructuur.....	46
5.2. Degradatie	46
6. Binnenafwerking.....	50
6.1. Dampopen bouwen.....	50

6.2.	Degradatie	50
III.	DEEL III – Experimenten	51
1.	Labotesten: berekening van metselwerk testmuren met kalkhennep-isolatie	52
1.1.	Ontwerp van de testmuren	52
1.2.	Uitvoering van de testmuren	54
1.3.	Ontwikkeling van een aangepast testprotocol	59
2.	Labotesten: capillaire absorptieproef ter bepaling van de waterabsorptiecoëfficiënt van de gebruikte materialen	66
3.	Uitvoering van de berekeningstesten	67
4.	Testresultaten van de berekeningstesten	68
4.1.	Kwalitatieve evaluatie	68
4.2.	Kwantitatieve evaluatie	75
5.	Conclusie	81
IV.	DEEL IV – HAM-simulaties	83
1.	Vergelijking van de types opbouwen uit de praktijk van BLAF (1D)	84
1.1.	Model en parameters: input, output en aannames	84
1.2.	Evaluatiecriteria	87
1.3.	Resultaten	90
1.4.	Conclusie	96
2.	Variaties en one-factor-at-a-time approach voor de meest onbeschutte wandopbouw (1D) .	97
2.1.	Model en parameters: input, output en aannames	97
2.2.	Evaluatiecriteria	98
2.3.	Resultaten	99
2.4.	Conclusie	107
3.	Simulatie van de testopstelling: invloed van mortel en het verschil tussen simulatie en realiteit (1D en 2D).....	108
3.1.	Model en parameters: input, output en aannames	108
3.2.	Resultaten en vergelijking met de testopstellingen	111
3.3.	Conclusie	117
V.	DEEL V – Case study: kIOB – meetcampagne van een eengezinswoning	119
1.	Projectinformatie	120
2.	Sensoren	121
3.	Meetresultaten	123
4.	Simulaties – validatie met meetcampagne Buggenhout	127
5.	Conclusie	133
VI.	DEEL VI – Algemene conclusie en reflectie	135
VII.	Referenties	139

VIII. Bijlagen.....	147
A. Technische fiches	148
A.1. Materialen	148
A.2. Sensoren.....	158
B. Inventarisatie van de wandopbouwen van BLAF.....	170
C. Datacollectie biobased isolatiematerialen.....	171
C.1. Per materiaal.....	171
C.2. Per parameter	177
D. Resultaten capillaire absorptieproef.....	178
E. Resultaten testmuren	180
F. Resultaten simulaties: one-factor-at-a-time approach	186
G. MRC en LCC van de gesimuleerde materialen (2D)	191

Lijst van figuren

Figuur 1: Kleibesparing door het gebruik van een enkele zelfdragende metselwerkschil (BLAF architecten).	2
Figuur 2: Type-wandopbouw met aanduiding van de 5 centrale thema's als startpunt van het onderzoek.	4
Figuur 3: Overzicht van de 33 geselecteerde wandopbouwen uit het archief van BLAF architecten.	6
Figuur 4: Boomschema met typologische classificatie (V1 tot V9) van de wandopbouwen van BLAF op basis van toenemende infiltratiegevoeligheid via 3 beslissingsniveaus (spouw, folie en beschutting)... ..	7
Figuur 5: Overzicht van de infiltratiegevoeligheid van de luchtspouw (Van Linden, 2022).	8
Figuur 6: Overzicht van de infiltratiegevoeligheid van diverse barrières, een regenscherm valt typisch onder de discontinue folies (Van Linden, 2022).	8
Figuur 7: Overzicht van de evolutie van de types wandopbouwen gebruikt door BLAF met metselwerk (M) aan de buitenzijde en houtskeletbouw (HSB) aan de binnenzijde doorheen de tijd. Hoe hoger op de grafiek, hoe meer infiltratiegevoelig de wandopbouw is (hoe minder beschermt de isolatie is).	9
Figuur 8: Binnenklimaat voor Brussel gebruikt in Delphin.	12
Figuur 9: Buitenklimaat (MRY voor Brussel) gebruikt in Delphin.	12
Figuur 10: De twee fasen voor het opvullen van een porie met vocht (Steeman, 2019).	16
Figuur 11: Typisch tweefasig verloop van capillaire opzuiging, de helling is A_w (A. Janssens, 2021).. ..	16
Figuur 12: Het vochtgehalte (w) in functie van de relatieve vochtigheid (ϕ): de volle lijn is adsorptie, de stippellijn is desorptie en de hysteresis tussen beide wordt duidelijk waargenomen (Steeman, 2010). ..	17
Figuur 13: Het tweefasig drogingsproces van poreuze materialen (Buildwise, 2014).	18
Figuur 14: Voorbeelden van een MRC en LCC van materialen (Calle & Van Den Bossche, 2021).	19
Figuur 15: Pieken in poriënvolumedistributie komen overeen met de steile delen van de MRC (Zhao, 2012).	19
Figuur 16: Totstandkoming van de curve voor vloeibaar vochttransport (liquid conductivity), deels experimenteel en deels via indirecte kalibratie op basis van waterabsorptie- en drogingstesten (Møller, 2014).	20
Figuur 17: Vertaling van de complexe werkelijkheid van metselwerk naar een simulatiemodel (Vanderschelden & Van Den Bossche, 2020).	21
Figuur 18: Boomschema met de clusters voor 15 bakstenen uit Delphin (Vanderschelden et al., 2022).	21
Figuur 19: BLAF 1.0 en 2.0 maken het mogelijk een steense muur van 1 steen breed te bouwen (foto's: BLAF).	22
Figuur 20: Boomste steen in rijnvorm (links) en boerkes formaat (rechts) (foto's: RotorDC).	22
Figuur 21: Carbonsteen van Carbstone, een geperste CO ₂ -negatieve steen in betonblokformaat.	22
Figuur 22: Contactoppervlak tussen een baksteen en dry cured mortel, waarbij slechts 30% van het oppervlak effectief contact maakte. Dit gebrekkig contact verklaart o.a. de hygrische grensweerstand (Calle et al., 2019).	25
Figuur 23: De drie beschermingsstrategieën tegen regenwaterinfiltratie: mass or moisture storage (links), screened or drained (midden) en face-sealed or perfect barrier (rechts) (Van Linden, 2022). .	27

Figuur 24: Categorisatie van buitenafwerkingen en infiltratiepercentages (Van Linden & Van Den Bossche, 2022).	28
Figuur 25: Glaser-diagram van een dampopen opbouw resulterend in inwendige condensatie (Vereecken, 2013).	32
Figuur 26: Werking van een capillair actief binnenisolatiesysteem (Vereecken, 2013).	34
Figuur 27: Prefab kalkhennepblok (Buildwise, 2020).	36
Figuur 28: Hennepvezel isolatie (Biobased Bouwen, 2024b).	36
Figuur 29: Houtvezelplaat (Steskens et al., 2013).	36
Figuur 30: Vlas (Willaert, 2019).	37
Figuur 31: Katoen (Willaert, 2019).	37
Figuur 32: Volumieke warmtecapaciteit en sorptie-eigenschappen van stro (Volf et al., 2015).	37
Figuur 33: Cellulose (Steskens et al., 2013).	38
Figuur 34: Vergelijking van de volumieke massa of dichtheid van de biobased isolatiematerialen.	39
Figuur 35: Vergelijking van de totale porositeit van de biobased isolatiematerialen.	39
Figuur 36: Vergelijking van de specifieke warmtecapaciteit van de biobased isolatiematerialen.	40
Figuur 37: Vergelijking van de warmtegeleidingscoëfficiënt van de biobased isolatiematerialen.	40
Figuur 38: Vergelijking van het dampdiffusieweerstandsgetal van de biobased isolatiematerialen.	41
Figuur 39: Vergelijking van de waterabsorptiecoëfficiënt van de biobased isolatiematerialen.	41
Figuur 40: Vergelijking van de moisture buffer value (MBV) van de biobased isolatiematerialen.	42
Figuur 41: De steel van de hennepplant met scheven en daarrond de vezels (VLAIO, 2020).	43
Figuur 42: Posities van het houtskelet bij ter plaatse gestorte kalkhennep (VLAIO, 2020).	46
Figuur 43: Curve voor bovenkritische relatieve vochtigheid uit WTA Merkblad 6-8-15.	47
Figuur 44: d_{MT} en d_T in functie van MC en T op basis van de factoren (rechts) (Brischke & Rapp, 2008).	48
Figuur 45: De curve met de Decay Rating (DR) voor witrot/zachtrot en bruinrot (Brischke & Meyer-Veltrup, 2016).	49
Figuur 46: Schimmelindex M in het geüpdatet VTT-model.	50
Figuur 47: Aanzichten van de 6 types metselwerkverbanden in de testmuren.	53
Figuur 48: Dwarse snede en plan van muur type 3 met de 10 cm kalkhennep-isolatielaag en plexiglas afwerking.	54
Figuur 49: De finale cementmortel, opmerkelijk donkerder van kleur door toedoen van het grijs cement.	54
Figuur 50: Aanmaak van de bastaardmortel in de betonmixer en rechts de finale, gladde specie.	55
Figuur 51: Aanmaak van de pure kalkmortel met links de "deegbolletjes" en rechts de finale, gladde specie.	55
Figuur 52: EPDM-afdichting die onder het metselwerk komt tegen ongewenste waterinfiltratie.	56
Figuur 53: Fotoverslag van het metselen van de testmuren met de belangrijkste stappen uitgelicht.	56
Figuur 54: Niet-gevulde hartvoeg in type 4 muur (links) en opgevulde hartvoeg in type 5 muur (rechts).	57

Figuur 55: Kringvormige patronen op het metselwerk na het metselen door onttrekken van vocht aan de mortel.....	57
Figuur 56: V.l.n.r. verlijmd EPDM-opstand, aandammen van de kalkhennep en plaatsing van de kleurstofkorrels.	58
Figuur 57: Het aanbrengen van zwelband bovenaan en tot slot de afgewerkte testkast.....	59
Figuur 58: Maximale bouwhoogtes afhankelijk van de ruwheidscategorie uit NBN B 25-002-1.....	59
Figuur 59: Illustratie van de hoogtewerking van infiltratie in isolatiemateriaal (Coupillie & Van Den Bossche, 2017). Hoe donkerder het blauw, hoe meer infiltratie in het gootje onderaan werd opgevangen.	60
Figuur 60: Als $A_{ab}/A_{rs} = 0.1$ wordt nog steeds 90% pressure equalization percentage (PEP) bereikt (Van Den Bossche et al., 2020).....	60
Figuur 61: Opstelling van de sproeiers ten opzichte van het proefstuk volgens EN 1027.....	61
Figuur 62: Kegelsnede van het theoretisch sproeigebied van de 2 sproeiers met het testvlak.....	61
Figuur 63: Overzicht van de testopstelling met sproeiers, betonplex kast en goot (boven); Zicht op het besproeide testvlak en zoom-in op de goot onderaan met druipneus tegen de zijkant (onder).	62
Figuur 64: Keuzeproces van de tracervloeistof voor het vochtfront in kalkhennep.....	63
Figuur 65: Selectie tracer fase 1 - links niet voldoende zichtbaar, midden en rechts gewenste zichtbaarheid.	63
Figuur 66: resultaat van de absorptieproeven op baksteen en kalkhennep met de 2 kleurstoffen.	64
Figuur 67: De conclusies op basis van het vooronderzoek om een geschikte tracer te selecteren om het vochtfront te visualiseren in kalkhennep.	64
Figuur 68: Tabellen uit de bedieningshandleiding van de vochtmeter om de digits correct te interpreteren.	65
Figuur 69: De proefstukken tijdens de capillaire absorptieproef.	66
Figuur 70: Resultaten van de capillaire absorptieproef.	66
Figuur 71: Doorsnede van de testopstelling met sproeiers en weegschaal. De EPDM watert af in de testwand.	67
Figuur 72: Reële opstelling tijdens een labotest.....	67
Figuur 73: Overzicht van de achterzijden van het metselwerk na de test.....	68
Figuur 74: Schematische aanduiding van de vochtzones op de achterzijde van het metselwerk, duidelijke randeffecten buiten beschouwing gelaten (Vanderschelden et al., 2024).	69
Figuur 75: Vochtmeting in een visueel droge zone waarbij de voeg vochtiger is dan de baksteen.....	70
Figuur 76: Lokale vlekken tracer in de kalkhennep ter hoogte van de stootvoegen, met en zonder UV.	70
Figuur 77: Links: KALK 1 - afstroomp Patronen vanuit de lintvoegen die naar beneden toe versmallen; rechts: BAST 5 – infiltratie door lintvoeg met runoff en capillaire absorptie in de stootvoeg.	71
Figuur 78: Golfvormig patroon in de steen met grotere stijghoogte nabij de voegen a.g.v. capillaire absorptie.	71
Figuur 79: Capillaire absorptie aan de stootvoeg en runoff uit de lintvoeg bovenaan gescheiden door droge plek.	71

Figuur 80: Verdunning en dus sterkere UV-activatie van de tracer op het contactoppervlak wijst op infiltratie.	72
Figuur 81: Puntsgewijze infiltraties rond de onderste hoeken van de stootvoegen bij de koppenlagen.	72
Figuur 82: Zaagtandpatroon (links), verschil tussen voeg tegen bezande kant en gezaagde kant (rechts).	73
Figuur 83: CEM 2 - scheur voorzijde (links) leidt tot lokale infiltratie aan de achterzijde (rechts).	73
Figuur 84: KALK 2 - scheuren en een gebroken hoek van een steen leiden tot lokale infiltratie aan de achterzijde.	73
Figuur 85: Diepe infiltraties bij BAST 6 (links en midden) en CEM 6 (rechts).	74
Figuur 86: Overzicht van de absorptiecurves voor de 18 testopstellingen gedurende de test.	75
Figuur 87: Van ruwe data tot de gecorrigeerde grafiek voor het natte gewicht van de opstelling.	76
Figuur 88: Vergelijking curves type 1. KALK 1 neemt logischerwijs het meeste water op.	77
Figuur 89: Vergelijking curves type 2. BAST 2 nam meer op dan KALK 2, dit kwam ook naar boven in de kwalitatieve waarnemingen waarbij de achterzijde van BAST 2 als enige vochtige plekken vertoonde in de steen.	77
Figuur 90: Vergelijking curves type 3 met opmerkelijk meer opname dan de andere testopstellingen.	78
Figuur 91: Vergelijking curves type 4. Kalk neemt logischerwijs het meeste water op.	78
Figuur 92: Vergelijking curves type 5. BAST 5 wordt niet beschouwd wegens randeffecten.	79
Figuur 93: Vergelijking curves type 6. KALK 6 nam meer vocht op dan CEM 6, terwijl er minder infiltratie werd geobserveerd in de isolatie. Dit wijst op de vochtbufferende kwaliteiten van pure kalkmortel.	79
Figuur 94: Vergelijking van de absorptiecurves per mortelsoort.	80
Figuur 95: Voorbeeld van een geometrische opbouw voor modellen V1 tot V9 in Delphin.	84
Figuur 96: Voorbeeld van de waardes voor de Wall Factor in EN ISO 15927-3:2009.	86
Figuur 97: Illustratie met aanduiding van alle gevraagde outputs in de 1D-simulaties.	87
Figuur 98: Overzicht van alle kwantitatieve criteria bij de 1D simulaties en de locaties waarop ze bekeken worden. Voor V1, V4 en V6 is de positie van het houtskelet afwijkend t.o.v. de rest van de opbouwen, daarom worden ze voor de duidelijkheid met een grijze achtergrond gemarkeerd in het deel rond de resultaten.	89
Figuur 99: Overzicht van de vochtgehaltes in opbouw V1 tot V9 voor de 3 isolatiematerialen in het 15e jaar.	90
Figuur 100: Overzicht van de RV in opbouw V1 tot V9 voor de 3 isolatiematerialen in het 15e jaar.	91
Figuur 101: Gemiddelde relatieve vochtigheid van de 3 isolatiematerialen op jaarbasis voor V1 en V9.	91
Figuur 102: Uit de MRC (links) blijkt dat KH meer fijne poriën heeft dan CEL en bij hoge RV zou damp kunnen condenseren in het materiaal. Het dampscherm (rechts) toont dit aan: de kalkhennep erbinnen blijft nu wel droog.	91
Figuur 103: Aantal FTC als indicator voor vorstschade in de baksteen voor opbouw V1 tot V9.	92
Figuur 104: Voorbeeld van de referentie-opbouw voor de one-factor-at-a-time approach (V9).	97

Figuur 105: Overzicht van de evolutie van het aantal kritische FTC met de slagregenbelasting (RE) uit Delphin.....	99
Figuur 106: Toename van de warmtestroom bij toename van de slagregenbelasting (RE).	100
Figuur 107: Overzicht van het aantal kritische FTC per baksteentype.	100
Figuur 108: Vergelijking van de gemiddelde DR na 4 jaar voor de historische bakstenen uit de simulaties.....	101
Figuur 109: Overzicht van het aantal kritische FTC bij toenemende baksteendikte.	102
Figuur 110: Slagregenbelasting volgens oriëntatie. Het zuidwesten (ZW) is duidelijk dominant (Calle, 2020).....	103
Figuur 111: Overzicht van het aantal kritische FTC bij een waterdichte kalei (WD) of hydrofobering.....	104
Figuur 112: Evolutie van het aantal kritische FTC voor een toenemend percentage infiltratie.....	105
Figuur 113: Geometrisch model van de 2D-simulaties voor type 1, type 2 en type 4.....	108
Figuur 114: Binnenklimaat gebruikt in de 2D simulaties, gebaseerd op actuele metingen in de laatste 2 weken.	110
Figuur 115: Het vochtgehalte in de gesimuleerde opstelling BAST 1 na de test en 1 uur later.....	111
Figuur 116: Het vochtgehalte in de gesimuleerde opstelling KALK 1 na de test en 1 uur later.	112
Figuur 117: X-ray van de capillaire absorptie van water in baksteen en kalkmortel na 2 minuten (Calle, 2020).....	112
Figuur 118: Vergelijking van de opnamecurves voor type 1 uit de testopstelling en de 2D simulaties.	113
Figuur 119: Het vochtgehalte in de gesimuleerde opstelling BAST 2 na de test en 1 uur later.....	114
Figuur 120: Het vochtgehalte in de opstelling KALK 2 na de test en 1 uur later.....	114
Figuur 121: Vergelijking van de opnamecurves voor type 2 uit de testopstelling en de 2D simulaties.	115
Figuur 122: Het vochtgehalte in de gesimuleerde opstelling BAST 4 na de test en 1 uur later.....	115
Figuur 123: Het vochtgehalte in de gesimuleerde opstelling KALK 4 na de test en 1 uur later.	116
Figuur 124: Vergelijking van de opnamecurves voor type 4 uit de testopstelling en de 2D simulaties.	116
Figuur 125: Axonometrie en foto vanaf de straatzijde van kLOB (BLAF, 2024).	120
Figuur 126: Wandopbouw kLOB (midden, eigen tekening) en foto's tijdens de werf (links en rechts, BLAF).....	120
Figuur 127: Plan met aanduiding van de locatie van de sensoren op de eerste verdieping.	121
Figuur 128: Aanduiding sensoren in de wandopbouw en nummering op basis van de locatie en diepte in de wand.	121
Figuur 129: Plaatsing van de sensoren in werffase, sensor 6 links en sensor 5 rechts (foto's: BLAF).	121
Figuur 130: V.l.n.r. thermokoppel K, HIH-4000, OM-DAQPRO-5300, OM-CP-OCTPRO en hun plaatsing (rechts).	122
Figuur 131: Binnensensor Hobo U12-011 en buitensensor Hobo Pro v2 (U23-002) met radiation shield.	122

Figuur 132: Niet opgevoegd metselwerk in Buggenhout op 26/04/2024.	123
Figuur 133: Temperatuur in de muren uitgezet met binnen- en buitentemperatuur gedurende de meetcampagne.	124
Figuur 134: Relatieve vochtigheid in de muren uitgezet met binnen- en buitenmetingen tijdens de meetcampagne.	125
Figuur 135: Zoom-in op de laatste week van de meetcampagne.	126
Figuur 136: Vergelijking van de thermische demping en faseverschuiving tussen O- en ZW-oriëntatie op 23/04.	126
Figuur 137: De opbouw van Buggenhout (type V8) gebruikt in de 1D simulaties voor de case study.	127
Figuur 138: Vergelijking van de temperatuur (T) tussen de meetdata en de simulatie gedurende de meetperiode.	129
Figuur 139: Vergelijking van de relatieve vochtigheid (RH) tussen de meetdata en de simulatie in de meetperiode.	130
Figuur 140: Overzicht van de vochtgehaltes in de wandopbouw van de case study in het 15e jaar voor de minimale en maximale slagregenbelasting (RE) en 3 infiltratiepercentages (0%, 1%, 10%). De field plots starten en eindigen op 26 april: we zien dus lente – zomer – herfst - winter.	131
Figuur 141: zone tussen de ramen waar geen regenscherm op het houtskelet werd geplaatst (links) en doorboringen van het regenscherm door spouwvakken (rechts).	132

Lijst van tabellen

Tabel 1: classificatie van Decay Rating (DR) volgens EN 252.	49
Tabel 2: Overzicht van de metselwerkblokken gebruikt voor de 6 types metselwerk en hun afmetingen.	52
Tabel 3: Voegratio voor een werkelijke gevel, theoretische en effectief uitgevoerde opstellingen.	57
Tabel 4: Uitbloei van zouten bij de types 2 en 3 met pure kalkmortel na 1 en 2 weken.	58
Tabel 5: Ratio's tussen nuttige en totale besproeide oppervlakte, theoretische en gecorrigeerde debieten voor alle types testopstellingen.	62
Tabel 6: Overzicht voor de 18 testopstellingen van droog gewicht, nat gewicht en opname.	76
Tabel 7: Hygrothermische parameters van de gebruikte materialen in simulaties V1-V9.	85
Tabel 8: Overgangscoefficienten voor conductie, diffusie en straling aan het oppervlak.	85
Tabel 9: Standaardaannames voor de correctiefactoren op de regenbelasting in Delphin 6.	86
Tabel 10: Conversietabel tussen de Rain Exposure (RE) in Delphin en de Wall Factor (W) uit EN 15927-3:2009.	86
Tabel 11: TOW 25/10 als indicator voor bovenkritische vochtigheid ter hoogte van de buitenzijde van het houtskelet voor opbouw V1 tot V9. Het pass/fail criterium is 1.92% (1 week per jaar).	92
Tabel 12: WTA Merkblad 6-8-15 als indicator van houtrot in de buitenzijde van het houtskelet voor opbouw V1 tot V9. Het pass-fail criterium is voor waarden > 0% (er kan houtrot plaatsvinden).	93
Tabel 13: Dose-response model met het aantal dosissen voor opbouw V1 tot V9. Daarnaast wordt dit vergeleken met het maximaal aantal dosissen op 1 jaar als een percentage.	93
Tabel 14: Decay Rating (DR) voor witrot/zachtrot en houtrot na 1 en 4 jaar voor opbouw V1 tot V9 (EN 252).	94
Tabel 15: Jaargemiddelde λ -waarde en toename ten opzichte van de droge toestand voor opbouw V1 tot V9.	94
Tabel 16: Toename van de warmtestroom (HF) gedurende het stookseizoen voor opbouw V1 tot V9.	95
Tabel 17: Evaluatie van het optreden van caking in de cellulose isolatie voor opbouw V1 tot V9. Het pass/fail criterium voor caking is 0.35 kg/kg vochtgehalte in massapercentage (m%).	95
Tabel 18: Overzicht en materiaaleigenschappen van de gebruikte bakstenen voor de simulaties V9.2.	97
Tabel 19: Overzicht en materiaaleigenschappen van de materialen gebruikt om kalei te modelleren (V9.5).	98
Tabel 20: Overzicht van de Decay Rating voor wit-/zachtrot en bruinrot bij toename in slagregenbelasting (RE).	99
Tabel 21: Overzicht van de Decay Rating (DR) voor wit-/zachtrot en bruinrot bij de verschillende baksteentypes.	101
Tabel 22: Toename van de warmtestroom per baksteentype.	101
Tabel 23: Overzicht van de Decay Rating (DR) voor wit-/zachtrot en bruinrot bij toename van de metselwerkdikte.	102
Tabel 24: Toename van de warmtestroom bij toename van de metselwerkdikte.	102

Tabel 25: Overzicht van de toename van de warmtestroom per oriëntatie.	103
Tabel 26: Overzicht van de Decay Rating (DR) voor wit-/zachtrot en bruinrot voor een aantal scenario's die de regendichtheid van het metselwerk verbeteren zoals waterdichte kalei (WD) en hydrofobering.....	104
Tabel 27: Overzicht van de toename van de warmtestroom bij een kalei of hydrofobering van het metselwerk.....	105
Tabel 28: Overzicht van het criterium voor caking in cellulose bij een kalei of hydrofobering van het metselwerk.....	105
Tabel 29: Overzicht van de Decay Rating (DR) voor wit-/zachtrot en bruinrot bij toename van de infiltratie.	106
Tabel 30: Overzicht van de toename van de warmtestroom bij toename van het infiltratiepercentage.	106
Tabel 31: Experimenteel bepaalde gemiddelde waarden voor de waterabsorptiecoëfficiënt (A_w).	108
Tabel 32: Waarden voor de interface resistance (IR), DC en WC staan respectievelijk voor dry en wet cured.....	109
Tabel 33: Waarden voor het aanmaakvocht in de bastaard- en kalkmortel.....	109
Tabel 34: Hygrothermische parameters van de gebruikte materialen in de 2D-simulaties.	109
Tabel 35: Voegratio's voor een representatieve gevel, de uitgevoerde testopstelling en het 2D simulatiemodel.....	110
Tabel 36: Schema van de simulatieduur voor de 2D-simulaties van de testopstelling.	111
Tabel 37: Overzicht van de materiaaleigenschappen gebruikt in de 1D simulaties voor de case study.	127
Tabel 38: Correctiefactoren op de regenbelasting in Delphin 6 tegenover de waardes voor de case study.	128
Tabel 39: Waardes voor de slagregenbelasting (RE) gebruikt in de simulaties voor de case study. .	128
Tabel 40: Overzicht van het aantal dosissen en de Decay Rating (DR) voor de hoogste regenbelasting (max) bij 0% (REF) en 10% infiltratie voor een opbouw zoals in de case study maar zonder regenscherm (type V9).....	131
Tabel 41: Overzicht van de jaarlijkse gemiddelde λ -waarde en stijging tegenover de droge toestand.	132
Tabel 42: Overzicht van de toename van de warmtestroom tijdens het stookseizoen.	132

Lijst van afkorting en symbolen

A	Oppervlakte	m ²
ACH	<i>Air changes per hour</i>	1/h
A _w	Waterabsorptiecoëfficiënt	kg/m ² .√s
B	Breedte	m
c	Soortelijke warmte of specifieke warmtecapaciteit	J/kg.K
C	Warmtecapaciteit	J/K
C _R	Factor voor terreinvariaties	-
C _T	Factor voor topografie	-
cp	Volumieke warmtecapaciteit	J/m ³ .K
d	Dikte	m
d	Dagelijkse dosis	-
E	Energie	J
H	Hoogte	m
IR	Hygrische grensweerstand (<i>hydraulic interface resistance</i>)	m/s
K _{l,eff}	Liquid conductivity bij effectieve verzadiging	s
L	Lengte	m
m	Massa	kg
M	Schimmelindex	-
MBV	Moisture buffer value	(k)g/m ² . ΔRH
MC	Vochtgehalte	-
O	<i>Obstacle factor</i>	-
pc, pc	Capillaire druk of druk in de poriën	log(Pa)
q	Warmtestroomdichtheid of warmteflux (heat flux)	J
R	Warmteweerstand	m ² .K/W
r	Straal	m
RH, RV	Relatieve Vochtigheid (<i>relative humidity</i>)	%
Sd	Equivalente luchtlaagdikte	m
T	Temperatuur	K of °C
t	Tijd	s, min, h
u	Vochtgehalte (massapercentage)	kg/kg, - of m%
U	Warmtedoorgangscoefficiënt	W/m ² .K
V	Volume	m ³
w	Vochtgehalte (massadichtheid)	kg/m ³
W	<i>Wall factor</i>	-

Griekse symbolen

α	Diffusiviteit	m ² /s
α	Contacthoek	°
β	Effusiviteit	W/m ² .K.s ^{0.5}
δ	Dampgeleidingscoëfficiënt	s
θ	Temperatuur	°C of K
θ ₈₀	Vochtgehalte bij 80% relatieve vochtigheid	m ³ /m ³
θ _{cap}	Capillair vochtgehalte	m ³ /m ³ of vol%
θ _{eff}	Effectief vochtgehalte	m ³ /m ³ of vol%
θ _{por}	Open porositeit	m ³ /m ³ of vol%
λ	Warmtegeleidingscoëfficiënt of conductiviteit	W/m.K

μ	Dampdiffusieweerstandsgetal	-
ρ	Massadichtheid of volumieke massa	kg/m ³
τ	Temperatuurfactor	-
ψ	Vochtgehalte (volumepercentage)	m ³ /m ³ , - of vol%
Ψ	Lineaire thermische transmissiecoëfficiënt	W/m.K

Subscripts en superscripts

0	Initieel of droog
a	Lucht
corr	Gecorrigeerd
crit	Kritisch
d	Droog
e	Buiten
eff	Effectief, effectieve verzadiging
i	Binnen
m	Midden
max	Maximum
min	Minimum
nut	Nuttig
out	Uitgaand
sat	Verzadiging
se	Buitenoppervlak
si	Binnenoppervlak
supply	Toevoer
theo	Theoretisch
tot	Totaal
w	Water of nat

Afkortingen

1D	Eendimensionaal
2D	Tweedimensionaal
BAST	Bastaardmortel
BLAF	BLAF architecten
Ca(OH) ₂	Calciumhydroxide
CaCO ₃	Calciumcarbonaat
CaO	Calciumoxide
CEL	Cellulose
CEM	Cement, cementmortel
CLS	<i>Canadian Lumber Standard</i> , constructiehout
CLT	<i>Cross laminated timber</i>
DC	<i>Dry cured</i>
DECO1	Decobloc baksteen van Ploegsteert, 9 cm dikte
DECO2	Decobloc baksteen van Ploegsteert, 14 cm dikte
DOS	<i>Degree of saturation</i>
DR	Decay rating
ETICS	External thermal insulation composite system
FTC	Vorst-dooicycli (<i>Freeze Thaw Cycles</i>)

GAB	Guggenheim, Anderson, de Boer vergelijking
H ₂ O	Water
HAM	Heat, Air and Moisture
HeV	Hennepvezel
HF	Heat flux
HoV	Houtvezelplaten
HSB	Houtskeletbouw
HW	Houtwol
HYDRO	Gehydrofobeerde baksteen
ISO	Isolatie
IVR	<i>Ice volume ratio</i>
KALK	Kalkmortel
KAT	Katoen
kgCO _{2e}	CO ₂ -equivalenten
KH	Kalkhennep
LCA	<i>Life cycle assessment</i>
LCC	Liquid conductivity curve
M	Metselwerk
m	Midden
MMD	<i>Moisture mass density</i>
MRC	Moisture retention curve
MRY	Moisture reference year
MW	Minerale wol
MX	Baksteen type MX van Ploegsteert
N	Noorden
NHL	<i>Natural hydraulic lime</i>
O	Oosten
OBBD	<i>Old building brick dresden</i>
P90	90 ^e percentiel
pC	Log(p _c), log(pc)
RE	<i>Rain factor</i>
RECUP	Recuperatiestein
REF	Referentietoestand
T1, T2, ..., T6	Muren type 1 t.e.m. 6, slaat op het type metselwerk
TOW	<i>Time-of-wetness</i>
TV	Technische voorlichting
UV	Ultraviolet
V1, V2, ..., V9	9 type-opbouwen (V = versie)
WC	<i>Wet cured</i>
WD	Waterdichte laag kalei
ZA, ZB, ..., ZQ	Baksteentypes van Zhao uit Delphin
ZW	Zuidwesten



DEEL 1 – rationale: de experimentele bouwpraktijk van BLAF architecten

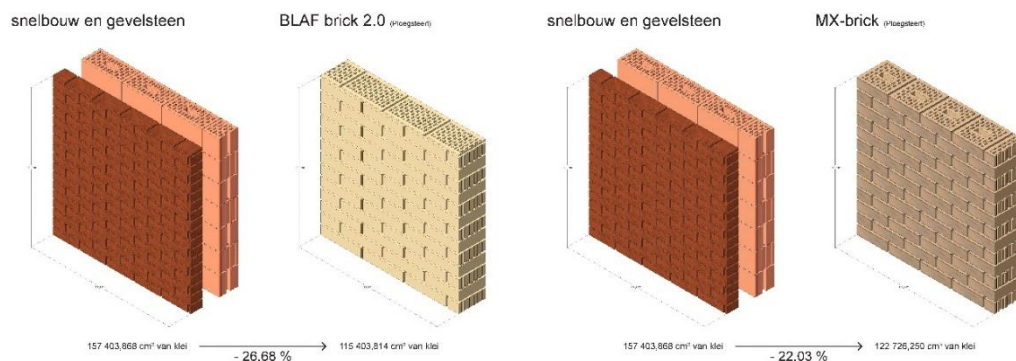
In dit deel wordt bij wijze van inleiding de visie en bouwpraktijk van BLAF architecten toegelicht. Het dient als vertrekpunt voor dit onderzoek, dat ontstond als een vraag naar het onderbouwen van een succesvolle experimentele bouwpraktijk met een innovatief wandsysteem. Het onderzoek start met het definiëren van de centrale thema's waarrond er gewerkt zal worden. Verder wordt er een selectie gemaakt van relevante wandopbouwen uit cases en het archief van BLAF architecten. Deze worden typologisch ingedeeld en er wordt een type-wandopbouw gedefinieerd om van te vertrekken binnen het onderzoek. Samen met de type-wandopbouw worden de centrale thema's vertaald in een methodologie.

1. De visie van BLAF op bouwen

BLAF architecten van Bart Vanden Driessche en Lieven Nijs uit Lokeren staat bekend om een ambitieuze en vernieuwende praktijk, steeds met oog voor experiment. Hierbij vertrekken ze voornamelijk vanuit opgebouwde praktijkervaring. Het duurzaamheidsdiscours is een rode draad doorheen hun werk, waarbij ze zowel op zoek gaan naar nieuwe vormen van ruimtegebruik als duurzame materialen en duurzaam materiaalgebruik. Doorheen de jaren gingen ze bovendien op zoek naar nieuwe manieren voor het concipiëren van een wand, vertrekkend vanuit de conclusie dat een spouwmuur voor BLAF niet de juiste manier is om een wand op te bouwen.

Hiervoor zien ze verschillende redenen. De stalen spouwankers die nodig zijn om een steeds verder en in dikte gereduceerd buitenspouwblad overeind te houden zorgen ten eerste voor de introductie van een extra materiaal (terwijl de ambitie net is om te besparen op gevelmaterialen). Ten tweede vormen ze ook koudebruggen doorheen de isolatielaag (wat afgestraft wordt in de EPB-berekening). Bovendien merkt BLAF vanuit de ervaring met het verbouwen van woningen met steens metselwerk dat vochtproblemen doorgaans weinig te relateren zijn aan waterdoorslag, op voorwaarde dat de muur boven- en onderaan voldoende bescherming geniet. Een uitgesproken ambitie is om terug te keren naar het gebruik van kalkmortel en via de recuperatie van gevelstenen bij te dragen aan een circulaire bouwpraktijk. Echter, daarover heerst tot op heden een grote onzekerheid over de (hygrothermische) prestaties en verwerkbaarheid in de praktijk. Daarom werkt BLAF momenteel louter met cementmortel.

Na een aantal renovatieprojecten met steens metselwerk maakt het bureau een evolutie door, met veel experimenten in hun bouwpraktijk in de zoektocht naar een waardig alternatief voor de spouwmuur met binnen- en buitenspouwblad. Ze gaan op zoek naar een monolithische gevelopbouw: er wordt gewerkt met slechts één keramische schil. Zo ontwikkelt het bureau eigen gevelstenen met het uitzicht en de kleisamenstelling van een gevelsteen maar de profilering van een snelbouwsteen. BLAF beoogt hiermee massieve muren te bouwen die niet alleen zelfdragend zijn, maar ook zo waterdicht mogelijk om de luchtspouw uit de wandopbouw te elimineren. Zo wordt het kleigebruk volgens BLAF met 22 tot zelfs 26% gereduceerd per m² wandopbouw zoals te zien is in Figuur 1.



Figuur 1: Kleibesparing door het gebruik van een enkele zelfdragende metselwerkschil (BLAF architecten).

Tot op heden is BLAF nog op zoek naar het ultieme formaat van baksteen dat draagkracht en waterdichtheid combineert én praktisch hanteerbaar blijft op de werf. Wanneer water toch zou infiltreren doorheen het metselwerk, zijn de achterliggende materialen en hun eigenschappen van cruciaal belang om degradatie te voorkomen. BLAF experimenteerde reeds met verschillende types isolatiematerialen zoals minerale wol en waaronder ook biobased materialen zoals cellulose, houtwol en kalkhennep tussen een houtskelet aan de binnenzijde van het metselwerk. Dit houtskelet is soms dragend, maar niet altijd. Op deze manier evolueert het bureau van een lichte buitenschil en zware binnenschil naar een zware buitenschil en lichte binnenschil. Op die manier wordt de warmte buitengehouden met thermische massa aan de buitenkant en behoudt men de baksteenesthetiek in het gevelzicht.

Tot op heden, met een maximale ingebruiknameperiode van ca. 15 jaar, werden er geen degradatieproblemen vastgesteld door het bureau, maar het lange termijn gedrag van het houtskelet en de (biobased) isolatiematerialen in combinatie met vocht verdient zeker verdere aandacht. Voorts kan binnenisolatie in bepaalde gevallen een oplossing bieden om het renovatieprobleem van ons gebouwenbestand in Vlaanderen aan te pakken.

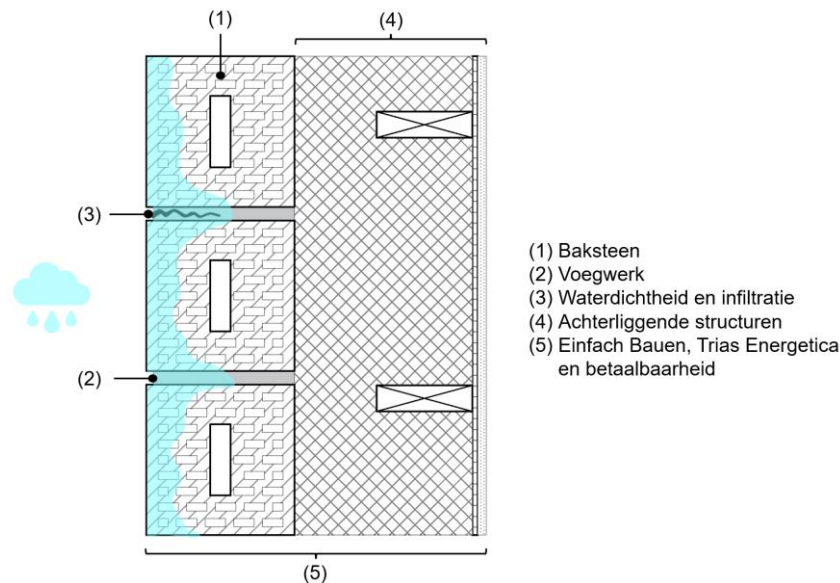
Daarnaast houdt BLAF vast aan een aantal principes voor hun projecten. Zo is er het begrip “Einfach bauen” dat in Duitsland zijn oorsprong vindt als reactie op de steeds toenemende complexiteit in de bouwpraktijk onder invloed van normen en bouwvoorschriften (Technische Universität München, 2021). Bovendien laat het systeem met houtskelet en een (dragende) metselwerk wand errond toe om na te denken over bouwvolgorde. Beide kunnen namelijk eerst worden uitgevoerd, maar dit heeft natuurlijk implicaties tijdens de werffase. Bovendien biedt dit systeem ook een zekere flexibiliteit als ontmantelbare architectuur, waarbij voor een interieurrenovatie zowel het houtskelet kan verwijderd worden, maar evengoed de metselwerk schil errond kan worden vervangen. Ook is het voor BLAF belangrijk om het nieuwe systeem reproduceerbaar te maken met verschillende (isolatie)producten die tevens courant te verkrijgen zijn. Voor isolatie ligt de voorkeur bij kalkhennep vanwege zijn relatief hoge massadichtheid. Het blijft steeds belangrijk om de betaalbaarheid van een bouwsysteem niet uit het oog te verliezen, want vaak wint het financiële van het duurzame op de markt. Tot slot is het Trias Energetica denken zoals uitgewerkt door de TU Delft (C. Duijvestein) een belangrijke pijler in de ontwerpcultuur van BLAF: beperk de energievraag, gebruik energie uit hernieuwbare bronnen en – indien nodig – gebruik eindige (fossiele) energiebronnen efficiënt (Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, 2013).

Gezien BLAF voor deze experimentele aanpak in hun bouwpraktijk zich vooral baseert op ervaring, kan het nuttig zijn om een aantal aannames en bevindingen die werden aangehaald in de voorgaande paragrafen te ondersteunen via onderzoek. Dit werd dan ook de aanleiding voor dit eindwerk.

2. De bouwpraktijk van BLAF architecten

2.1. Centrale thema's als startpunt van het onderzoek

Om het onderzoeksveld af te bakenen wordt het onderzoek benaderd vanuit een type-wandopbouw, afgebeeld in Figuur 2. Concreet wordt er gekeken naar buitenmuren waarbij de buitenschil wordt gevormd door metselwerk, met daarachter een lichte houtskeletstructuur als binnenschil. Daartussen wordt vervolgens geïsoleerd met een (biobased) isolatiemateriaal. Deze type-wandopbouw wordt doorheen het onderzoek bekeken in het licht van een aantal centrale thema's die vanuit de bouwpraktijk van en gesprekken met BLAF naar voor kwamen in paragraaf 1.



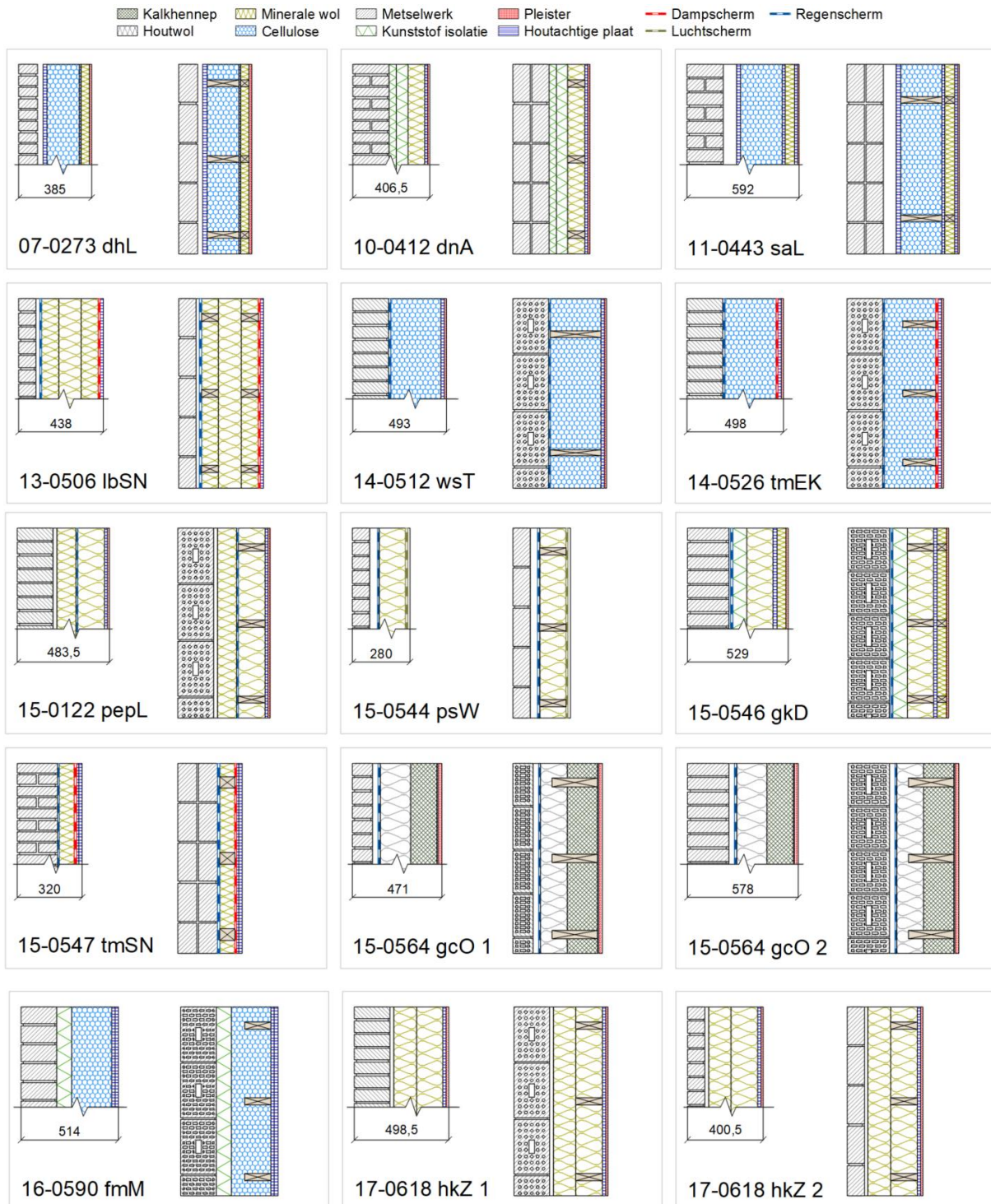
Figuur 2: Type-wandopbouw met aanduiding van de 5 centrale thema's als startpunt van het onderzoek.

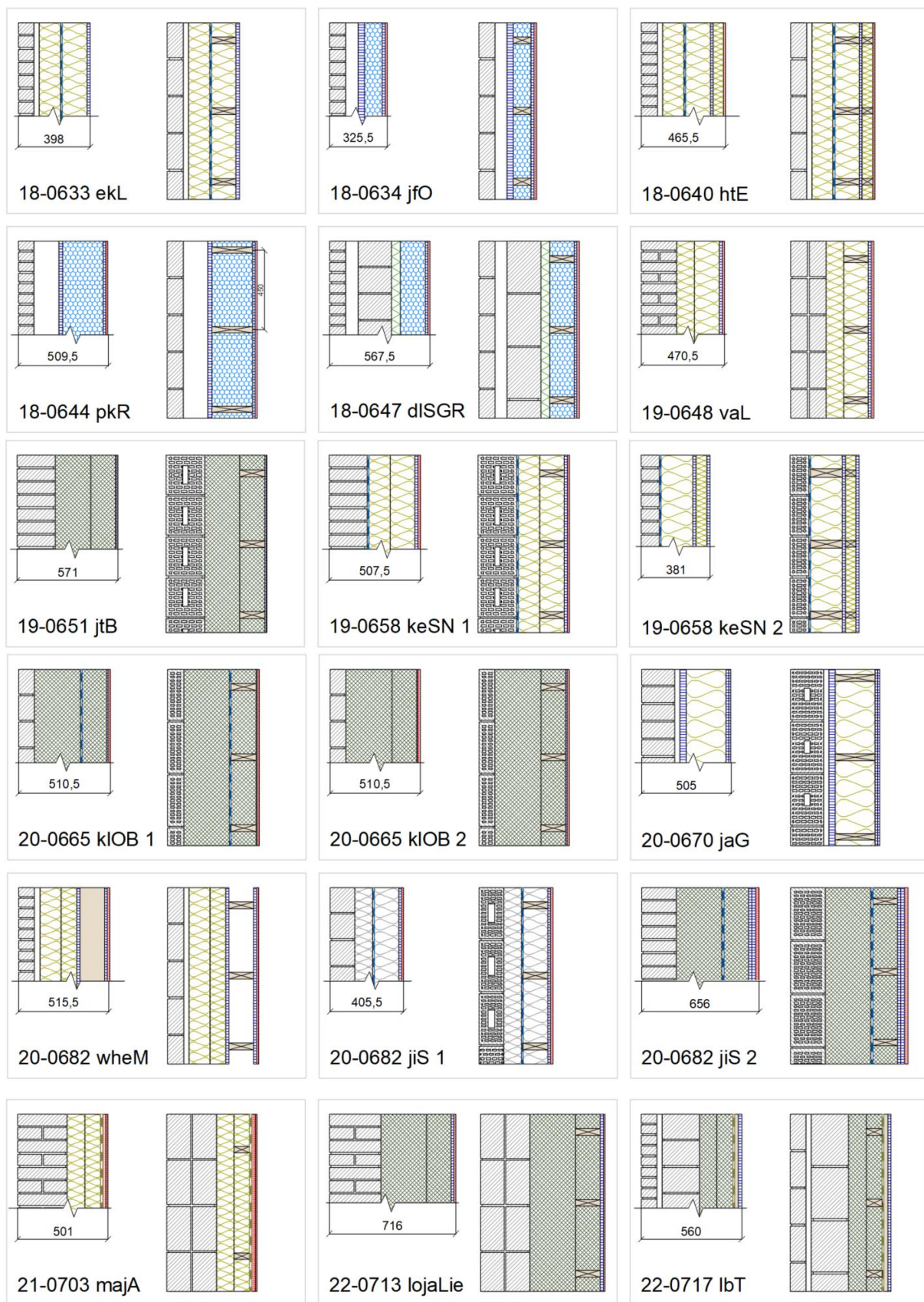
De volgende thema's vormen het startpunt van het onderzoek in dit eindwerk:

- (1) **Baksteen**: het beschouwen van verschillende soorten baksteen laat variatie toe in formaat, gewicht, type (geperforeerd of massief) en muurdikte. Het doel is de conceptie van massieve, zelfdragende muren, maar wat is de impact op het hygrothermisch gedrag van de wand?
- (2) **Voegwerk**: de bouwpraktijk is verstrengeld met het gebruik van cementmortel, maar er dient ook gekeken te worden naar een alternatief dat circulariteit mogelijk maakt zoals kalkmortel. Bovendien bestaan er ook bastaardmortels – een combinatie van cementmortel en kalkmortel.
- (3) **Waterdichtheid en infiltratie**: dit thema zal grotendeels bepaald worden door de voorgaande twee thema's. Het doel is om de luchtsponw uit de wandopbouw te weren, maar daardoor moet een zekere regendichtheid bekomen worden door de metselwerk buitenschil.
- (4) **Achterliggende structuren**: wanneer water effectief infiltreert, wordt de reactie van de achterliggende structuren van cruciaal belang. Daarom wordt er gekeken naar (degradatie van) het houtskelet, de gebruikte isolatiematerialen en de binnenafwerking. Dat laatste is bepalend voor het hygrothermisch karakter van de wand en bepaalt het dampdicht of dampopen karakter.
- (5) **Einfach Bauen, Trias Energetica en betaalbaarheid**: het blijft belangrijk om enkele centrale principes uit de praktijk van BLAF steeds in het achterhoofd te houden. Dit laatste thema wordt eerder gezien als een feedbackmechanisme om bij het uitwerken van variaties op de wandopbouw dicht bij de type-wandopbouwen van BLAF te blijven, aangezien zij deze volgens deze principes hebben geconcipeerd. De type-wandopbouwen worden hierna verkend.

2.2. Selectie van wandopbouwen via cases

Uit meer dan 200 projecten van BLAF alle wandopbouwen met metselwerk aan de buitenzijde en een houtskelet met isolatie aan de binnenzijde geselecteerd. Er werd een selectie gemaakt van 33 wandopbouwen. De projectcode is steeds volgens hetzelfde principe opgebouwd: de eerste 2 cijfers staan voor het jaar waarin het project werd gestart, de 4 cijfers erna zijn het intern projectnummer en tot slot volgt er nog een lettercombinatie. De kleine letters staan voor de bouwheer, de hoofdletter(s) voor de stad van het project. De wandopbouwen worden chronologisch getoond met horizontale en verticale snede. Voor een compleet overzicht van de opbouwen wordt verwezen naar bijlage B. In de legende worden de gebruikte materialen generisch verklaard. Links is steeds buiten, rechts is binnen.



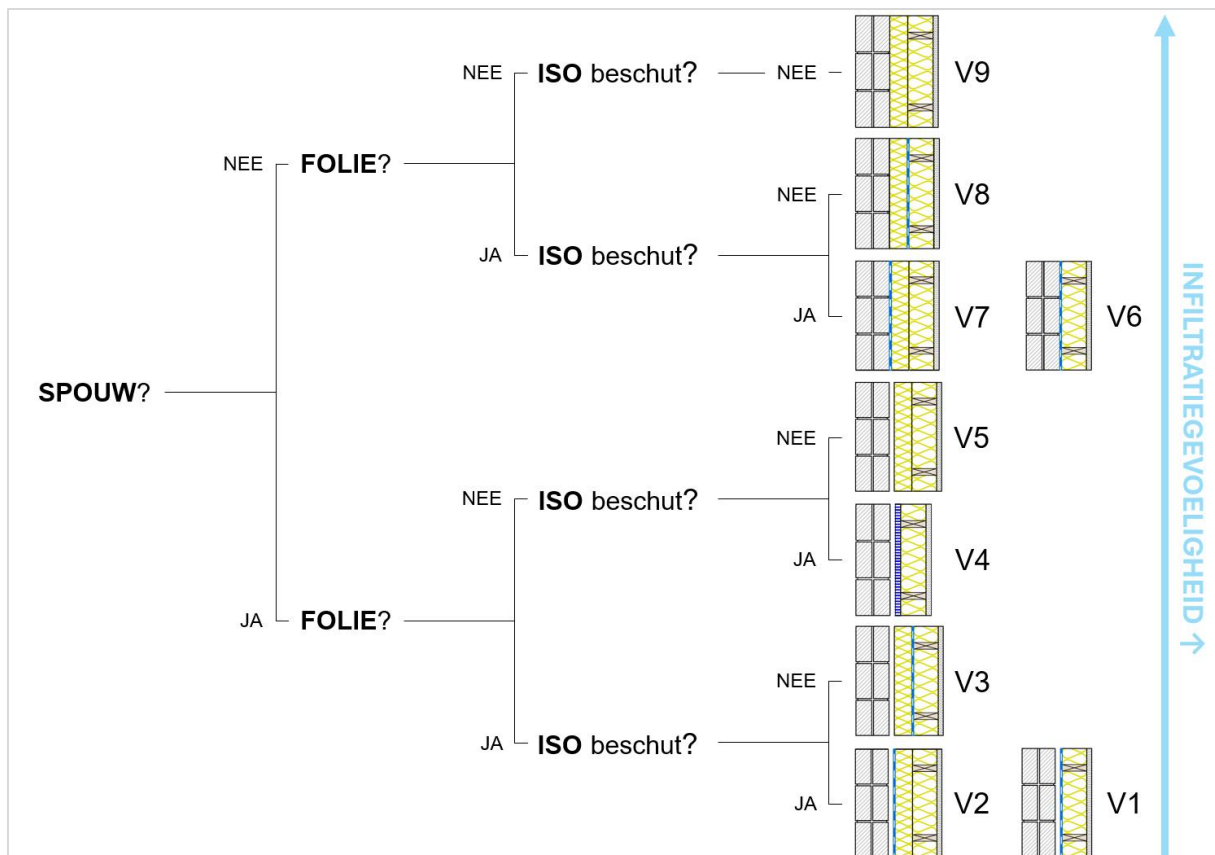


Figuur 3: Overzicht van de 33 geselecteerde wandopbouwten uit het archief van BLAF architecten.

Noot: de gebruikte informatie werd verzameld via het archief van BLAF architecten en is up-to-date tot december 2023. Enkele projecten zijn nog niet uitgevoerd, doch in uitvoeringsfase bij het schrijven.

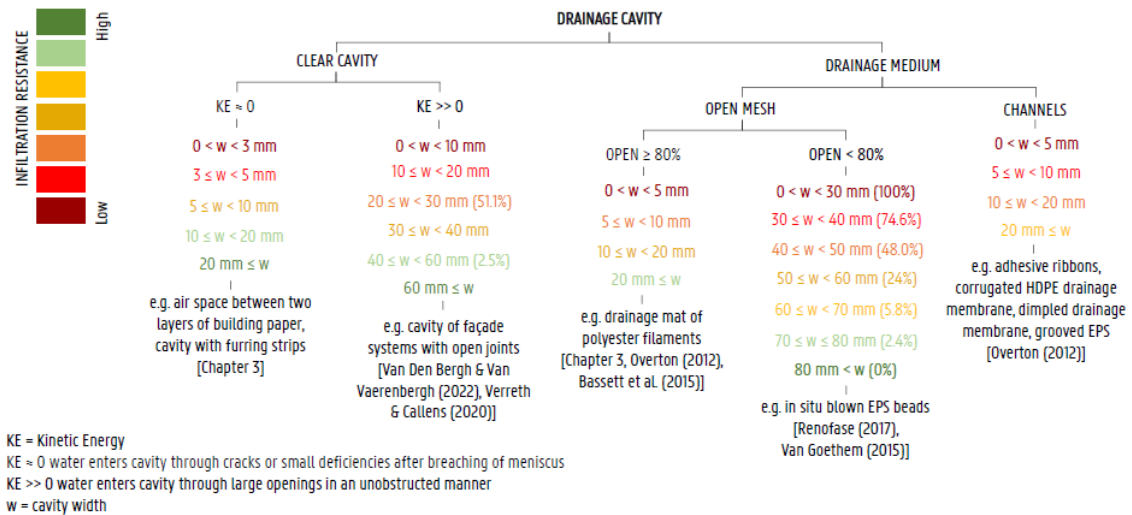
2.3. Typologische indeling van de wandopbouwen in de bouwpraktijk van BLAF op basis van infiltratiegevoeligheid

Deze 33 geselecteerde wandopbouwen worden vervolgens verder gecategoriseerd in 9 type-opbouwen V1 tot V9 op basis van hoe beschut de isolatie is voor het buitenmilieu en dus hoe goed de isolatie tegen infiltratie van water wordt afgeschermd. Globaal kan er een onderscheid worden gemaakt tussen muren met een regenscherm (folie), luchtspouw (spouw), beide of geen van beide. In sommige gevallen wordt de isolatie ook deels buiten de folie en dus onbeschut aangebracht. Deze categorisatie kan worden voorgesteld in een boomschema zoals Figuur 4 met 3 beslissingsniveaus: is er een folie, is er een spouw en is de isolatie beschut? Hoe hoger in het boomschema, hoe meer infiltratiegevoelig de opbouw is. V4 is de klassieke houtskeletbouw met een plaat aan de buitenzijde en metselwerk gevelafwerking.



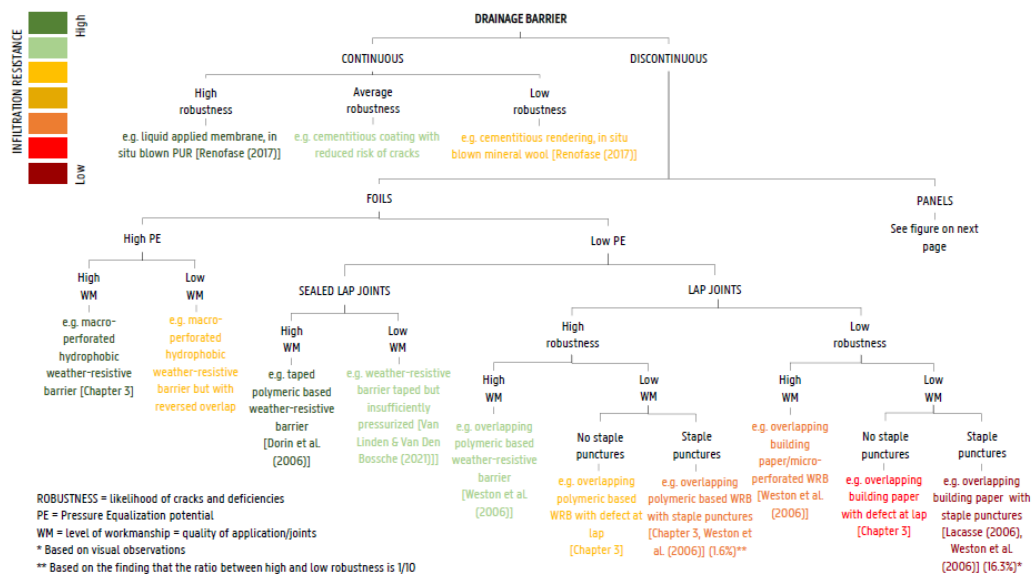
Figuur 4: Boomschema met typologische classificatie (V1 tot V9) van de wandopbouwen van BLAF op basis van toenemende infiltratiegevoeligheid via 3 beslissingsniveaus (spouw, folie en beschutting)

Hierbij wordt impliciet aangenomen dat een opbouw met spouw over het algemeen minder infiltratiegevoelig is dan een opbouw met regenscherm, hetgeen wordt bevestigd in het onderzoek van Van Linden (2022). Hoe groter de luchtspouw, hoe kleiner de kans dat water deze barrière kan overbruggen. Vanaf 20 mm spouw (hetgeen in alle geselecteerde wandopbouwen het geval is), wordt de spouw geclassificeerd als *low infiltration risk* (donkergroen) in Figuur 5.



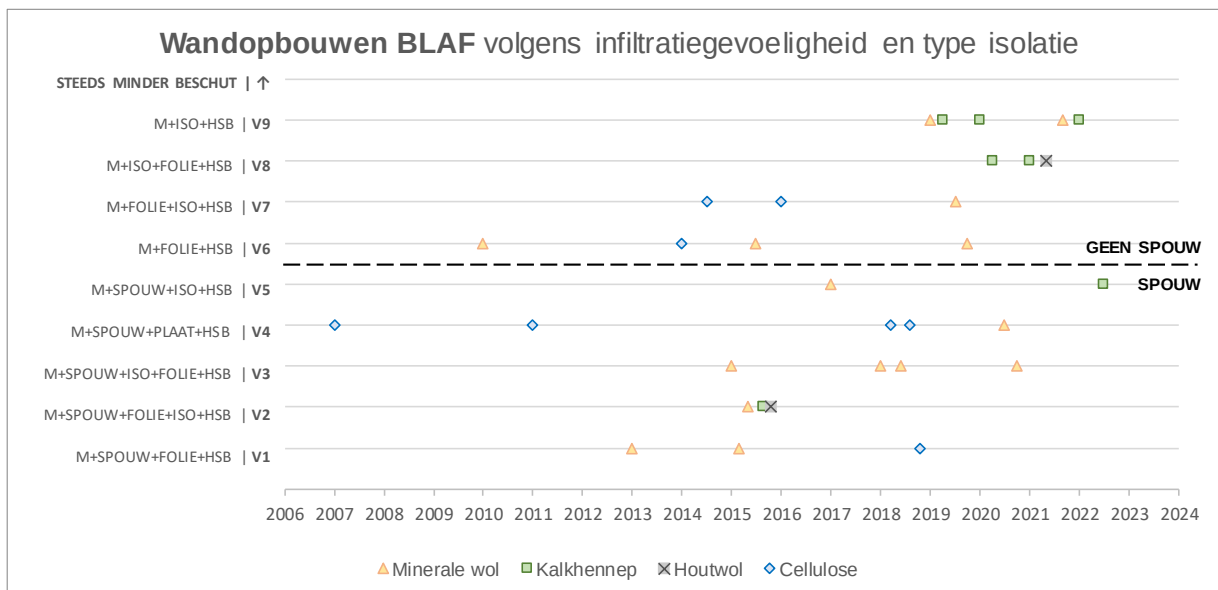
Figuur 5: Overzicht van de infiltratiegevoeligheid van de luchtspouw (Van Linden, 2022).

Voor de folie van het regenscherm, vaak uitgevoerd als een discontinu membraan, is infiltratiegevoeligheid een groter aandachtspunt zoals te zien is in Figuur 6. De regendichtheid van de uitvoering is namelijk sterk afhankelijk van de constructiewijze en het vakmanschap. Het dichten van naden in het regenscherm wordt doorgaans uitgevoerd met tape. Dit resulteert dan ook in een grotere onzekerheid wat betreft de weerstand tegen infiltratie.



Figuur 6: Overzicht van de infiltratiegevoeligheid van diverse barrières, een regenscherm valt typisch onder de discontinue folies (Van Linden, 2022).

Wanneer de types wandopbouwen zoals voorgesteld in het boomschema worden voorgesteld op een tijdslijn en we hierin alle beschouwde cases uitzetten, resulteert dit in onderstaande grafiek, Figuur 7. Hoe hoger het datapunt op de grafiek staat, hoe minder beschermt de isolatie is. De kleur van het datapunt stemt telkens overeen met het gebruikte isolatiemateriaal.



Figuur 7: Overzicht van de evolutie van de types wandopbouwen gebruikt door BLAF met metselwerk (M) aan de buitenzijde en houtskeletbouw (HSB) aan de binnenzijde doorheen de tijd. Hoe hoger op de grafiek, hoe meer infiltratiegevoelig de wandopbouw is (hoe minder beschermt de isolatie is).

Hieruit kunnen we alvast visueel enkele conclusies trekken. Doorheen de tijd wordt meer en meer gekozen voor minder beschutte wandopbouwen (stijgende tendens in de grafiek). In de eerste toepassingen kijkt BLAF duidelijk vooral richting het isolatiemateriaal cellulose, een veelgebruikt materiaal in de houtskeletbouw. Er wordt dan ook nog voornamelijk met een spouw gebouwd. Deze wandopbouwen zitten in de sfeer van de “klassieke” houtskeletbouw woning met metselwerk als gevelafwerking. Omstreeks 2015 verandert dit en wordt de spouw vaker achterwege gelaten. Ook wordt het pad van de kalkhennep-isolatie verkend. Wat opvalt is dat de toepassingen met cellulose typisch in een meer beschutte wandopbouw zitten en dat kalkhennep erg duidelijk naar voren komt in de meest open (minst beschutte) wandopbouwen. Minerale wol wordt zowat continu doorheen de tijd gebruikt en ook in alle types wandopbouwen, van onbeschermt tot beschermt. Sporadisch wordt ook houtwol toegepast, een ander biobased isolatiemateriaal.

3. Van rationale naar methodologie

In de voorgaande paragrafen werd eerst een beeld geschetst van de visie van BLAF op bouwen en hun vraag om een waardevolle experimentele praktijk kracht bij te zetten met hygrothermisch onderzoek. Vervolgens werden een aantal centrale thema's vooropgesteld om het onderzoeksveld af te bakenen. Deze centrale thema's werden besproken in paragraaf 2.1:

- (1) **Baksteen** : formaat, gewicht, type, muurdikte
- (2) **Voegwerk** : cementmortel, kalkmortel, bastaardmortel
- (3) **Waterdichtheid en infiltratie** : vochtbufferend systeem zonder luchtsponw
- (4) **Achterliggende structuren** : houtskelet en (biobased) isolatie
- (5) **Einfach Bauen, Trias Energetica en betaalbaarheid**

Deze centrale thema's werden toegepast op basis van een type-wandopbouw bestaande uit metselwerk, houtskelet met (biobased) isolatie en een binnenafwerking. In de paragrafen daarna werd via een overzicht van cases bovendien een typologische opdeling gemaakt in de evolutie van de wandopbouwen in de praktijk van BLAF architecten. De isolatie bleek steeds minder beschut. Er werd een indeling voorgesteld op basis van 9 types, V1 tot V9. Deze vormen het startpunt van dit onderzoek.

In de komende delen wordt het onderzoek thematisch uiteengezet. Er wordt een antwoord gezocht op 2 centrale vragen door het verdwijnen van de luchtsponw uit de wandopbouw. Enerzijds moet onderzocht worden hoe regendicht het metselwerk effectief is aangezien er op de vochtbufferende strategie wordt teruggevallen. Anderzijds moet er gekeken worden naar de impact van vocht op de vochtgevoelige biobased isolatie en het ingebedde houtskelet.

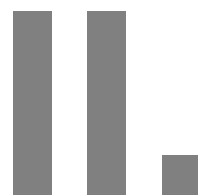
DEEL II – Literatuurstudie bevat een overzicht van de theoretische achtergrond die de lezer wegwijs maakt in het onderzoeksveld. Eerst wordt er algemeen ingegaan op bouwfysica en hygrothermie. Dit is zowel van belang om een aantal fenomenen te begrijpen en als basis voor de hygrothermische simulaties. Daarna wordt er laagsgewijs van buiten naar binnen ingegaan op de onderdelen van de type-wandopbouw: metselwerk, sponw, isolatie, houtskelet en binnenafwerking worden uiteengezet en er wordt ingegaan op mogelijke degradatiemechanismen.

DEEL III – Experimenten beschrijft het proces en de resultaten van een reeks berekeningstesten die werd uitgevoerd in het Testcentrum voor Gevelementen op 18 testopstellingen, met variaties in baksteen- en morteltype. Op deze manier worden realistische en praktijkgerichte gegevens verzameld.

Vervolgens wordt in DEEL IV – HAM-simulaties dieper ingegaan op het exacte lange termijn hygrothermisch gedrag van de wandopbouwen. Naar het model van de type-wandopbouwen worden simulaties in 1D uitgevoerd en geëvalueerd. Vervolgens worden ook een aantal simulaties gedaan om de testopstelling zo goed mogelijk te benaderen. Dit legt de link tussen de praktijk en de simulaties, waarbij er zowel in 1D als 2D wordt gesimuleerd om eventuele verschillen daartussen bloot te leggen.

Daarna worden in DEEL V via een case study de resultaten van een meetcampagne in een nieuwbouwproject van BLAF architecten te Buggenhout besproken. Via een aantal 1D simulaties wordt ook hier de link tussen praktijk en simulaties gelegd. De eerder opgedane inzichten uit het experimentele luik en de simulaties worden zo afgetoetst aan deze waardevolle informatiebron aan meetdata.

Tot slot worden de belangrijkste conclusies en inzichten gebundeld in DEEL VI – Algemene conclusie. Ook wordt er teruggekeken op de gemaakte keuzes en aannames, en worden er enkele suggesties voor verder onderzoek geformuleerd.



DEEL II – Literatuurstudie

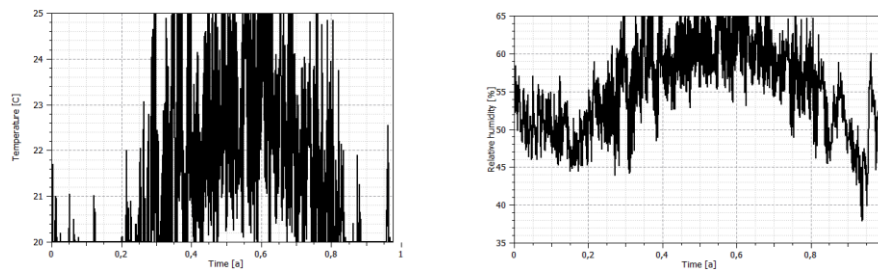
In dit deel wordt via de literatuurstudie een overzicht opgemaakt van de theoretische achtergrond die nuttig is in het kader van dit onderzoek. Er wordt van start gegaan via een algemeen kader toegespitst op hygrothermie en bouwfysica. Dit is van belang in het kader van de HAM-simulaties verderop. Er wordt kort ingeleid wat HAM-simulaties inhouden en vervolgens een overzicht gegeven van de bouwfysische fenomenen en grootheden. Daarna wordt er laagsgewijs ingegaan op de onderdelen van de te onderzoeken type-wandopbouw: metselwerk, spouw, isolatie, houtskelet en binnenafwerking. Zowel hun algemene principes als mogelijke degradatiefenomenen komen aan bod.

1. Hygrothermisch en bouwfysisch gedrag van materialen

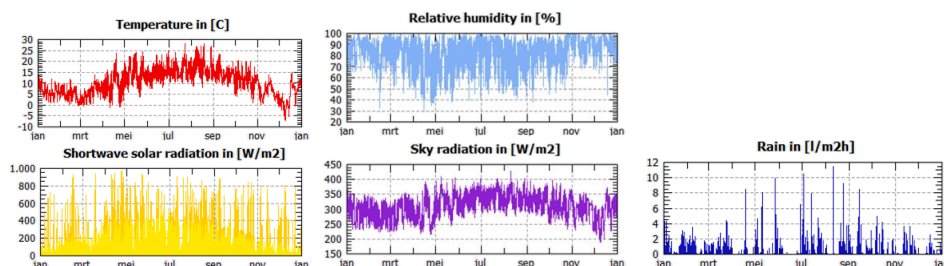
1.1. Context van HAM-simulaties en software Delphin 6

De hygrothermische evaluatie van een (gebouw)deel kan op verschillende wijzen worden uitgevoerd. Wanneer men analytisch te werk gaat, is er weinig flexibiliteit mogelijk. Via experimenteel onderzoek bekomt men de meest representatieve resultaten, maar het is erg duur en kost veel tijd. Om het hygrothermische gedrag van muren niet enkel via experimenten maar ook theoretisch te benaderen met de nodige flexibiliteit, wordt er dus gebruik gemaakt van HAM-simulaties. Dit zijn dynamische hygrothermische simulaties.

- **Hygrothermisch:** HAM staat voor *Heat* (warmte), *Air* (lucht) en *Moisture* (vocht: waterdamp en vloeibaar vocht). Concreet worden er vier evenwichtsvergelijkingen uitgerekend, volgens het principe waarbij opslag = influx – outflux. De formules en theoretische achtergrond hiervan kan men raadplegen in de handleiding van Delphin (Nicolai & Grunewald, 2005).
- **Dynamisch:** er kan aan weerszijden van de wand een dynamisch binnen- en buitenklimaat worden opgelegd. Binnen dit onderzoek wordt er – tenzij anders vermeld – gewerkt met het binnenklimaat voor Brussel en als buitenklimaat het *Moisture Reference Year* (MRY) van Brussel (Vandemeulebroucke et al., 2022), zoals in Figuur 8 en Figuur 9 is afgebeeld.



Figuur 8: Binnenklimaat voor Brussel gebruikt in Delphin.



Figuur 9: Buitenklimaat (MRY voor Brussel) gebruikt in Delphin.

Een *Moisture Reference Year* of MRY is 1 jaar met een representatieve vochtbelasting voor een bepaalde plaats en periode en wordt gebruikt om schadegevallen te simuleren in een bepaald klimaat (Vandemeulebroucke et al., 2022). Een MRY wordt gebruikt als alternatief voor een simulatie over 30 jaar, waardoor aangenomen wordt dat het MRY de P90 waarde vertegenwoordigt en dus een terugkeerperiode van 10 jaar heeft, het representeert een “extreem” jaar. De keuze van het MRY hangt doorgaans af van de muuropbouw en de te onderzoeken schadeverschijnselen. Een MRY is uiterst geschikt om degradatie door vocht te evalueren (Calle & Van Den Bossche, 2021).

Tot slot kan men een wandopbouw in Delphin definiëren via een aantal lagen en materialen. De materiaaleigenschappen vormen ook een belangrijke input voor het simulatiemodel. Het klimaat wordt aan weerszijden van de constructie aangebracht. Aan de overige kanten worden adiabatische condities toegekend. Door het toewijzen van de gewenste outputs kan men achteraf diverse karakteristieken zoals temperatuur en relatieve vochtigheden op verschillende plaatsen in de wand uitrekenen om bepaalde criteria te evalueren, waarover later meer in DEEL IV – HAM-simulaties.

1.2. Basisprincipes hygrothermie en materiaaleigenschappen

Een belangrijk deel van het onderzoek zal zich toespitsen op HAM-simulaties in het softwarepakket Delphin in DEEL IV van deze thesis. De materiaaleigenschappen spelen hierbij onder andere een grote rol en daarom worden de belangrijkste hygrothermische materiaalparameters kort aangehaald. Een overzicht van een complete materiaalkarakterisatie voor Delphin kan worden teruggevonden in het RIBuild onderzoeksproject (Møller, 2014). De vijf voornaamste parameters die men in het materialenmenu in Delphin kan ingeven zijn dichtheid ρ [kg/m³], dampdiffusieweerstandsgetal μ [-], warmtegeleidingscoëfficiënt λ [W/m.K], waterabsorptiecoëfficiënt A_w [kg/m².√s] en specifieke warmte c [J/kg.K]. Al deze parameters, aangevuld met algemene hygrothermische principes (zoals absorptie, droging of thermische inertie) en een aantal karakteristieken die het vochtgedrag in Delphin beter in kaart brengen (MRC en LCC) worden hierna uiteengezet, met het oog op de simulaties verderop.

1.2.1. Algemeen

Dichtheid ρ

De droge massadichtheid of volumieke massa van een materiaal (ρ) met als eenheid kg/m³ wordt bepaald volgens de formule $\rho_d = \frac{m_d}{V}$. Hierbij is m_d de droge massa [kg] en V het volume [m³].

Porositeit en vochtgehalte

De porositeit van een materiaal zal bepalen hoeveel vocht een poreus materiaal kan opnemen. De totale porositeit is de verhouding van alle poriën (open of gesloten) tegenover het totale volume van het materiaal. De open porositeit is het deel van de totale porositeit waarbij poriën toegankelijk zijn vanaf het materiaaloppervlak, als een verbonden netwerk (Hall & Hoff, 2021). Als eenheid wordt doorgaans m³/m³ of vol% gebruikt.

In Delphin wordt er onderscheid gemaakt tussen 3 niveaus van verzadiging: capillaire verzadiging, effectieve verzadiging en open porositeit. Zo wordt het capillair, effectief en vacuüm vochtgehalte bepaald (Grint et al., 2020).

- Het capillair vochtgehalte θ_{cap} [m³/m³] wordt gedefinieerd als de verzadiging op korte termijn en wordt bepaald via een capillaire absorptietest (Rode & Lund, 2016). Dit komt overeen met de verzadiging waarbij nog lucht ingesloten is in de poriën.
- Het effectieve vochtgehalte θ_{eff} [m³/m³] wordt gedefinieerd via de porositeit op lange termijn. Hierbij wordt het proefstuk lange tijd ondergedompeld tot effectieve verzadiging, bij 100% relatieve vochtigheid. Dit komt overeen met de verzadiging waarbij alle ingesloten lucht via diffusie is ontsnapt, ofwel de maximale verzadiging zonder vacuüm (Grint et al., 2020).
- De open porositeit θ_{por} [m³/m³] stemt dus overeen met het aaneengesloten poriënnetwerk waar de stroming van vloeibaar vocht effectief kan plaatsvinden. Deze maximale verzadiging van de poriën komt overeen met de verzadiging bij vacuüm omdat er anders steeds ingesloten lucht zal achterblijven (Rode et al., 2016).

Een aantal basisformules maken de omzetting mogelijk tussen het vochtgehalte (MC) als massapercentage, massadichtheid en volumepercentage (Rode & Lund, 2016):

$$w = \rho_0 * u \quad \left[\begin{array}{l} u = \frac{m_{H_2O}}{m_{droog}} \quad \left[\frac{kg}{kg}, -, m\% \right] \\ w = \frac{m_{H_2O}}{V_{materiaal}} \quad \left[\frac{kg}{m^3} \right] \\ \psi = \frac{V_{H_2O}}{V_{materiaal}} \quad \left[\frac{m^3}{m^3}, -, vol\% \right] \end{array} \right. \quad \psi = \frac{\rho_0}{\rho_w} * u$$

Hierbij telkens de massa's m in [kg] en de volumes V in [m³]. Verder is ρ_0 de droge dichtheid van het materiaal [kg/m³] en ρ_w de dichtheid van water gelijk aan 998 kg/m³.

1.2.2. Warmtetransport en warmteopslag

Warmtegeleidingscoëfficiënt λ

De warmtegeleidingscoëfficiënt of thermische conductiviteit λ van een materiaal geeft aan hoeveel energie (in J; of dus warmte) doorheen een materiaal met eenheidsdikte 1m en oppervlakte 1m² gaat, per eenheid van tijd (in s) en per graad temperatuurverschil (in K) tussen beide oppervlakken van het materiaal, resulterend in een eenheid W/m.K. Hoe lager de λ -waarde van een materiaal, hoe beter het isoleert. Doorgaans geldt dat materialen met een grotere volumieke massa een hogere λ -waarde hebben en hetzelfde materiaal zal doorgaans een hogere λ -waarde hebben bij hogere temperaturen. Bovendien isoleren poreuze materialen in droge toestand beter dan in natte toestand, omdat water een betere geleider is dan droge lucht (Rode et al., 2016).

Het belang van een lage λ -waarde voor isolatiematerialen wordt duidelijk via de formule voor de warmteweerstand. Hoe groter de λ -waarde, hoe groter de nodige dikte om een voldoende warmteweerstand of isolerend vermogen te bereiken. Dus, hoe dikker de wandopbouw.

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

Hierbij is R de warmteweerstand [m².K/W], d de dikte [m] en λ de warmtegeleidingscoëfficiënt [W/m.K].

Warmtecapaciteit C en specifieke warmtecapaciteit c

De warmtecapaciteit C van een materiaal geeft de hoeveelheid energie aan om een materiaal 1 graad in temperatuur te laten stijgen, uitgedrukt in J/K. De soortelijke warmte of specifieke warmtecapaciteit c is de hoeveelheid energie nodig om 1 kg van een materiaal 1 graad in temperatuur te laten stijgen. Het duidt dus op een vermogen om warmte op te slaan en heeft als eenheid J/kg.K. Beide parameters kunnen met elkaar in verband worden gebracht via de volumieke massa of massadichtheid ρ :

$$C = c \cdot \rho$$

Thermische inertie: diffusiviteit en effusiviteit

De thermische inertie van een materiaal is een maat voor de warmteopslag van een materiaal die zal plaatsvinden bij wisselende warmtestromen (Buildwise, 2020). Thermische inertie hangt samen met het afvlakken van temperatuurschommelingen (damping) en het vertraagd waarnemen van pieken in de buitentemperatuur binnen in een gebouw (faseverschuiving). Concreet wordt de thermische inertie van een materiaal begroot via twee parameters: de diffusiviteit en de effusiviteit. De diffusiviteit α [m²/s] van een materiaal bepaalt de snelheid waarmee temperatuur in een materiaal zal evolueren bij een thermische belasting aan de buitenzijde. Dit kan bijvoorbeeld door een verschil in dag-nacht temperatuur of bezonning. De effusiviteit β [W/m².K.s^{0.5}] is een maat voor de eenvoud waarmee een materiaal warmte uitwisselt met zijn omgeving. Hun respectievelijke formules:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$$

$$\beta = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c}$$

Hierbij zien we dus dat voorgenoemde parameters zoals de warmtegeleidingscoëfficiënt λ , volumieke massa ρ en specifieke warmtecapaciteit c de bepalende parameters zijn voor de diffusiviteit en effusiviteit. De diffusiviteit is recht evenredig met de thermische conductiviteit.

Warmtestroomdichtheid of warmteflux

De warmtestroomdichtheid of warmteflux (*heat flux*) geeft aan hoeveel energie (in J) getransporteerd wordt per eenheid van tijd (in s) en per eenheid van oppervlakte (in m²). Anders geformuleerd stelt het de warmteoverdracht via geleiding in een materiaal voor. Zo wordt een warmtestroomdichtheid q (in W/m²) bekomen:

$$q = \frac{\theta_{si} - \theta_{se}}{R}$$

Hierbij is θ_{si} de temperatuur van het binnenoppervlak [K], θ_{se} de temperatuur van het buitenoppervlak [K] en R de warmteweerstand [m².K/W]. Dit maakt duidelijk dat een warmtestroom wordt veroorzaakt door een verschil in temperatuur langs weerszijden van een constructie en dat via de warmteweerstand zowel de dikte d als de warmtegeleidingscoëfficiënt λ van de gebruikte materialen van belang zullen zijn. Bovendien is de warmtegeleidingscoëfficiënt zoals eerder vermeld vochtafhankelijk, ook in Delphin, waardoor ook de warmtestroom groter zal zijn indien bijvoorbeeld het isolatiemateriaal vochtig wordt (A. Janssens, 2021). Dit zal later een belangrijk beoordelingscriterium zijn wanneer de thermische prestaties van een wand in droge en natte toestand worden vergeleken.

1.2.3. Vochttransport en vochttopslag

Dampdiffusie: dampdiffusieweerstandsgetal μ

Door een verschil in temperatuur of relatieve vochtigheid aan beide zijden van een wand ontstaat een verschil in dampdruk, waardoor waterdamp zal migreren doorheen de constructie (Rode et al., 2016) via diffusie, een eerste vorm van vochttransport. De constructie zal hier een zekere weerstand tegen uitoefenen. Het dampdiffusieweerstandsgetal μ is een dimensieloze grootheid [-] die de verhouding weergeeft van de dampweerstand van een materiaal tegenover de dampweerstand van een laag lucht ($\mu = 1$) van dezelfde dikte. Anders verwoord geeft de μ -waarde aan hoeveel keer de dampdiffusieweerstand van een materiaal groter is dan die van een luchtlaag met dezelfde dikte volgens de volgende formule:

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta}$$

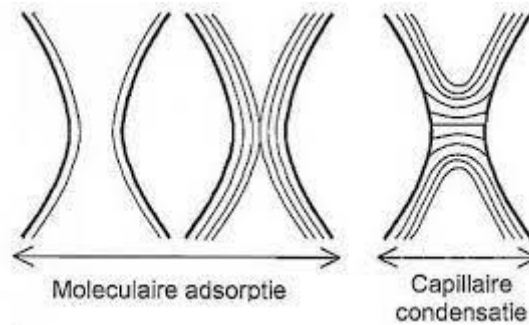
Hierbij is δ_a de dampgeleidingscoëfficiënt van stilstaande lucht [2.10⁻¹⁰s] en δ de dampgeleidingscoëfficiënt van het materiaal. Een kleinere μ -waarde betekent volgens de formule een meer dampopen karakter, waardoor waterdamp eenvoudiger kan worden getransporteerd via dampdiffusie doorheen het materiaal. Om dit inzichtelijker te maken wordt soms gewerkt met de μd - of Sd -waarde van een materiaal, ook wel de equivalente luchtlaagdikte genoemd, aangezien een Sd -waarde van 10 m betekent dat de materiaallaag met dikte d dezelfde dampdiffusieweerstand heeft als een luchtlaag van 10 m. De Sd -waarde (in m) kan via de volgende formule worden bepaald:

$$Sd = \mu * d$$

Hierbij wordt het dampdiffusieweerstandgetal dus vermenigvuldigd met de laagdikte d (in m).

Capillaire absorptie: waterabsorptiecoëfficiënt A_w

Een tweede vorm van vochttransport is de capillaire absorptie. In poreuze materialen in contact met vloeibaar vocht treedt adsorptie op via een netwerk van (al dan niet verbonden) poriën of holtes. Adsorptie is het proces waarbij een vast oppervlak moleculen aantrekt door fysische krachten en het poriënnetwerk vult met vocht. Dit gebeurt in twee fasen afgebeeld in Figuur 10: de eerste fase noemt men moleculaire adsorptie of laagsgewijze afzetting van water langsheen de rand van de porie. Deze fase duurt voort tot de laagjes zodanig zijn aangegroeid dat ze in contact komen met elkaar. Dit is het startpunt van de tweede fase, capillaire condensatie, typisch bij hoge relatieve vochtigheden (Steeman, 2019).



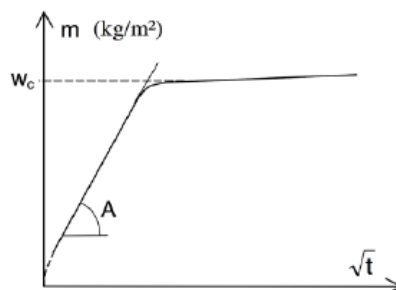
Figuur 10: De twee fasen voor het opvullen van een porie met vocht (Steeman, 2019).

Vocht kan zich op die manier voortbewegen door het materiaal – ook tegen de zwaartekracht in, tot een bepaalde stijghoogte afhankelijk van de zwaartekracht (Rode et al., 2016). De poriediameter speelt ook een belangrijke rol: hoe fijner de poriën van een materiaal, hoe groter de opzuigkracht (Steeman, 2019).

De waterabsorptiecoëfficiënt A_w geeft de snelheid aan waarmee vloeibaar vocht doorheen een materiaal wordt getransporteerd (Buildwise, 2020). Volgens de norm NBN EN ISO 15148 kan A_w bepaald worden door een proefstuk met zijn onderzijde in water te plaatsen en de snelheid op te meten van de gewichtstoename. De waterabsorptiecoëfficiënt wordt vervolgens bepaald uit:

$$m = A_w \cdot \sqrt{t}$$

Hierbij is m de opgenomen massa water per contactoppervlak [kg/m^2], t de tijd [s] en uiteindelijk A_w de waterabsorptiecoëfficiënt [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{s}}$]. De opname gebeurt typisch in twee fasen: capillaire opname tot de poriën van het proefstuk gevuld zijn en daarna een trage opname doordat ingesloten luchtballen verdwijnen tot een absoluut maximum, het saturatievochtgehalte (Buildwise, 2020). Door het gebruik van de vierkantswortel van de tijd als abscis en de massa van het geabsorbeerde water op de verticale as, wordt doorgaans een lineair verband waargenomen. De helling van de curve in Figuur 11 is de waterabsorptiecoëfficiënt A_w .

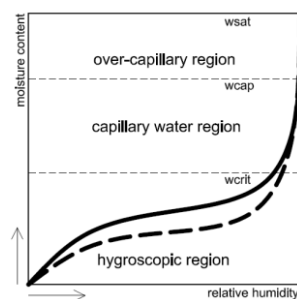


Figuur 11: Typisch tweefasig verloop van capillaire opzuiging, de helling is A_w (A. Janssens, 2021).

Hygroscopische sorptie: adsorptie, desorptie en hysteresis

Materialen die in staat zijn om vocht uit de omgeving op te nemen – zelfs zonder contact met vloeibaar vocht – worden hygroscopische materialen genoemd. De hoeveelheid van die vochtopname wordt bepaald door het aantal en de grootte van de toegankelijke poriën in het materiaal (i.e. de open porositeit) bij het bereiken van een evenwichtssituatie, waardoor het ook wel statische vochttopslag wordt genoemd (Buildwise, 2020). Het vochtgehalte w hangt samen met de relatieve vochtigheid van de omgeving en de methode om deze eigenschappen te begroten is beschreven in NBN EN ISO 12571. De vochttopslag wordt gemeten bij voorgeschreven relatieve vochtigheden. De extrapolatie van meetpunten naar een curve gebeurt wiskundig via het GAB-model (Buildwise, 2020).

Typisch wordt er voor organische materialen een verschil waargenomen tussen de curve bij vochttoename (adsorptie) of vochtafname (desorptie). Fysisch komt dit neer op bevochtiging en uitdroging van het materiaal (Evrard, 2008). Concreet zal een uitdrogend organisch materiaal bij dezelfde relatieve vochtigheid een hoger vochtgehalte hebben zoals te zien is in Figuur 12. Dit verschijnsel wordt in de literatuur aangeduid als hysteresis en wordt onder andere veroorzaakt door water dat in de grotere poriën achterblijft omdat de kleine poriën nog steeds volledig gevuld zijn – het *ink bottle effect* (Scheffler, 2008).

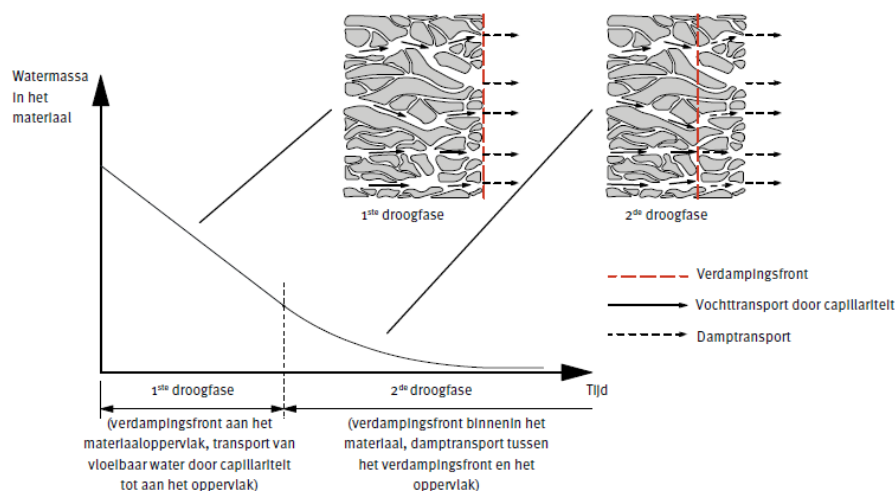


Figuur 12: Het vochtgehalte (w) in functie van de relatieve vochtigheid (ϕ): de volle lijn is adsorptie, de stippellijn is desorptie en de hysteresis tussen beide wordt duidelijk waargenomen (Steeman, 2010).

Door de verschillende sorptiecurves van materialen te vergelijken, wordt snel duidelijk welke materialen meer hygroscopisch van aard zijn, gezien deze curves steeds grotere waarden voor het vochtgehalte zullen tonen bij dezelfde relatieve vochtigheid. Ook zijn deze curves van belang voor de correcte modellering en interpretatie van het vochtgedrag van materialen in de HAM-simulaties via Delphin.

Droging van poreuze materialen

De droging van poreuze materialen verloopt volgens twee fasen (Buildwise, 2014; Meeusen, 2006). In de eerste fase verdampt het vocht via convectie aan het materiaaloppervlak en wordt steeds nieuw vocht aangevoerd via capillair vochttransport zolang het droogfront zich aan het materiaaloppervlak bevindt (Buildwise, 2014). Dit duurt typisch enkele dagen en wordt gekenmerkt door een hoge en constante droogsnelheid (lineair verloop). Vervolgens zal het droogfront zich doorheen het materiaal verplaatsen, of trekt het vochtfront zich dus terug. Dit heeft als gevolg dat het oppervlakte 'droog' is, terwijl het materiaal in de diepte nog vochtig is. Gezien het vocht dat uitdroogt moet diffunderen als waterdamp doorheen een steeds groter wordende droge materiaalzone, neemt de snelheid van uitdroging gestaag af. In theorie kan deze tweede fase tot wel jaren duren, afhankelijk van de eigenschappen van het poriënnetwerk (Buildwise, 2014; Meeusen, 2006). Dit vertaalt zich grafisch in een horizontale asymptoot in de tijd, zie Figuur 13.



Figuur 13: Het tweefasig drogingsproces van poreuze materialen (Buildwise, 2014).

Moisture Buffer Value (MBV)

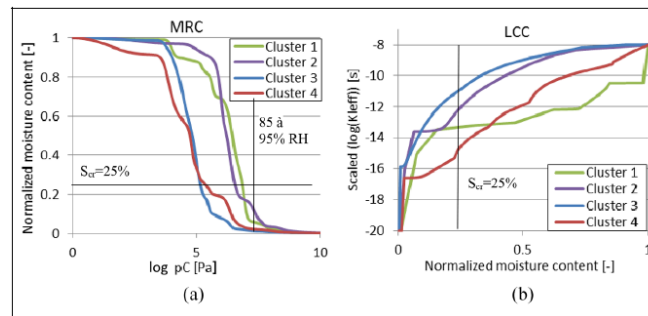
De *Moisture Buffer Value* (MBV) is een index gebaseerd op experimenteel onderzoek die een kwalitatieve vergelijking toelaat van hygroscopische materialen op basis van hun vochtbufferend vermogen of de capaciteit om vocht op te nemen en weer af te geven bij snelle vochtvariaties, in tegenstelling tot de statische vochttopslag bij sorptie. Deze dynamische vochtbuffering heeft een dempend effect op de schommelingen in de vochtigheid van het binnenklimaat (Palumbo et al., 2018).

De MBV wordt enerzijds experimenteel bepaald volgens het NORDTEST project (Rode et al., 2007), waarbij een materiaal cyclisch wordt blootgesteld aan hoge en lage relatieve vochtigheden. Eerst 16 uur aan 33% en vervolgens 8 uur aan 75%, een imitatie van een realistisch regime van vochtbelasting voor binnenruimtes. Het massaverschil wordt opgemeten en resulteert in de eenheid (k)g/m².ΔRH. Anderzijds wordt er in literatuur soms verwezen naar de ideale MBV, die kan berekend worden volgens een theoretische formule ontwikkeld door Rode et al. (2007), hetgeen in het kader van dit eindwerk te ver zou leiden. De praktische en ideale MBV kunnen enkel gelijk zijn voor homogene materialen, dit is belangrijk voor de correcte interpretatie van waarden uit literatuur.

Moisture Retention Curve (MRC) en Liquid Conductivity Curve (LCC)

Binnen Delphin worden een aantal extra vocht-gerelateerde parameters of curves gebruikt om het accuraat hygrothermisch gedrag van poreuze materialen te kunnen simuleren (Calle & Van Den Bossche, 2021; Møller, 2014; Vereecken & Roels, 2013). Het gaat om *moisture conductivity* of vochttransport (vloeibaar en damp) en *moisture storage* of vochttopslag.

De vochttopslag, weergegeven via de *Moisture Retention Curve* (MRC) wordt gemeten via evenwichtsvochtgehalten bij bepaalde relatieve vochtigheden in het hygroscopisch gebied (zie de paragraaf over hygroscopische sorptie) en bij 3-8 vooraf bepaalde drukken in het boven-hygroscopisch gebied (Møller, 2014). Op de abscis plaatst men de logaritme van de capillaire druk of de druk in de poriën (p_c , p_c), met als eenheid $[\log(\text{Pa})]$. Hierna wordt naar de logaritme van p_c ook verwezen in de notatie pC . Op de verticale as komt vervolgens het vochtgehalte (*moisture content*), al dan niet genormaliseerd, met als eenheid $[-]$ of $[\text{m}^3/\text{m}^3]$. Een voorbeeld is opgenomen in Figuur 14. In Delphin toont men in het materiaaloverzicht ter indicatie 2 waarden, θ_{80} – het vochtgehalte bij 80% relatieve vochtigheid – en θ_{eff} of θ_{sat} – het verzadigingsvochtgehalte.

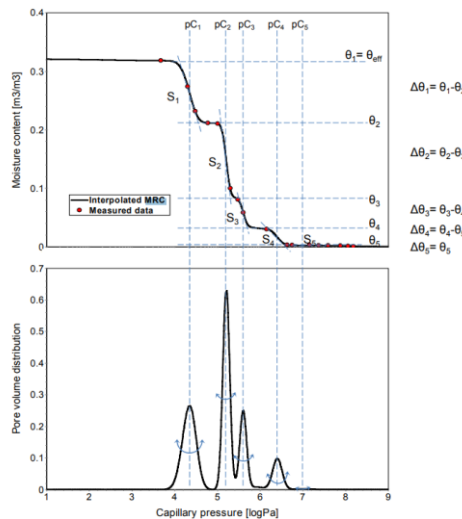


Figuur 14: Voorbeelden van een MRC en LCC van materialen (Calle & Van Den Bossche, 2021).

Het achterliggende idee van de MRC is afkomstig van de Young-Laplace vergelijking die de relatie beschrijft tussen de capillaire druk en de poriestraal:

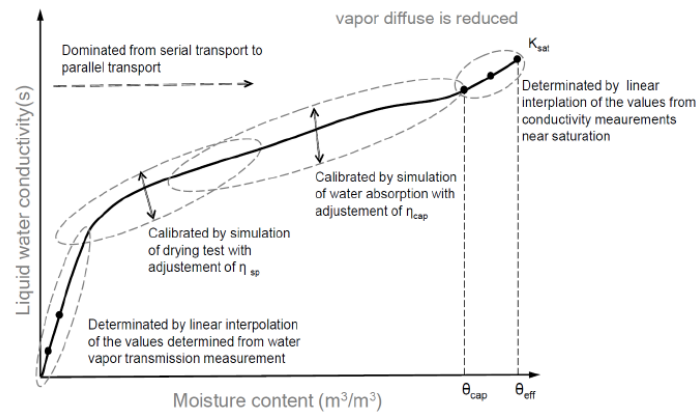
$$p_c = - \frac{2\sigma_l \cos(\alpha)}{r}$$

Hierbij is σ_l de oppervlaktespanning van water $[\text{N/m}]$, α de contacthoek van water $[\circ]$ en r de poriestraal $[\text{m}]$. Hieruit volgt dat de verdeling van de poriegrootte een belangrijke invloed heeft (Vanderschelden & Van Den Bossche, 2020). Het is namelijk zo dat de pieken in de distributie van het poriënvolume in Figuur 15 steeds samenvallen met de steile delen in de MRC (Zhao, 2012). De kleine poriën bevinden zich rechts in de MRC (hoge pC), de grote poriën links (lage pC).



Figuur 15: Pieken in poriënvolumedistributie komen overeen met de steile delen van de MRC (Zhao, 2012).

De curve voor vochttransport (*Liquid Conductivity Curve*, LCC) wordt via een proces van kalibratie en interpolatie direct en indirect opgemaakt uit verschillende materiaaltesten volgens Figuur 16. Op de abscis plaatst men het vochtgehalte, al dan niet genormaliseerd dus met eenheid [-] of [m³/m³], en op de verticale as de *liquid conductivity* met als eenheid [s]. Bij lage vochtgehalten gebeurt dit via meting van het damptransport, bij hogere vochtigheid via een drogingstest en waterabsorptie en tot slot bij hoge vochtigheid via een permeameter of infiltrometer experiment.



Figuur 16: Totstandkoming van de curve voor vloeibaar vochttransport (liquid conductivity), deels experimenteel en deels via indirecte kalibratie op basis van waterabsorptie- en drogingstesten (Møller, 2014).

Fysisch kan men de *liquid conductivity* interpreteren als hoe snel een druppel uitspreidt per seconde, mede afhankelijk van het vochtgehalte – vandaar de curve. In Delphin wordt steeds de parameter $K_{l,eff}$ [s] getoond in het materiaaloverzicht, dit is de *liquid conductivity* bij effectieve verzadiging en wordt bepaald via de volgende formule (Calle & Van Den Bossche, 2021):

$$K_{l,eff} = k \cdot \left(\frac{A_w^2}{\theta_{eff}} \right)$$

Hierbij is k een materiaal specifieke fitting parameter, A_w [kg/m²·√s] de waterabsorptiecoëfficiënt bepaald volgens de waterabsorptieproef en θ_{eff} het effectieve vochtgehalte. Hieruit blijkt dus ook dat de parameter A_w het vochttransport in Delphin mee karakteriseert.

2. Metselwerk

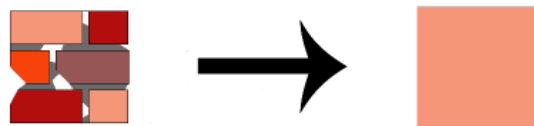
In simulaties speelt het gedrag van poreuze materialen een belangrijke rol om de realiteit te benaderen. Het accuraat modelleren van metselwerk als poreus materiaal, bestaande uit bakstenen en mortel, heeft een impact op de resultaten en het is belangrijk om inzicht te verwerven in welke parameters hierbij komen kijken. Ook worden een aantal materialen besproken die gebruikt zullen worden in het experimentele luik van dit onderzoek.

2.1. Baksteen

De baksteen bepaalt niet alleen het welgekennde uitzicht van de constructie, maar is ook enorm belangrijk voor het hygrothermische gedrag van een wand. Deze paragraaf zoomt kort in op een manier om bakstenen te implementeren in hygrothermische simulaties en beschrijft een aantal materialen die aan bod zullen komen in de experimenten.

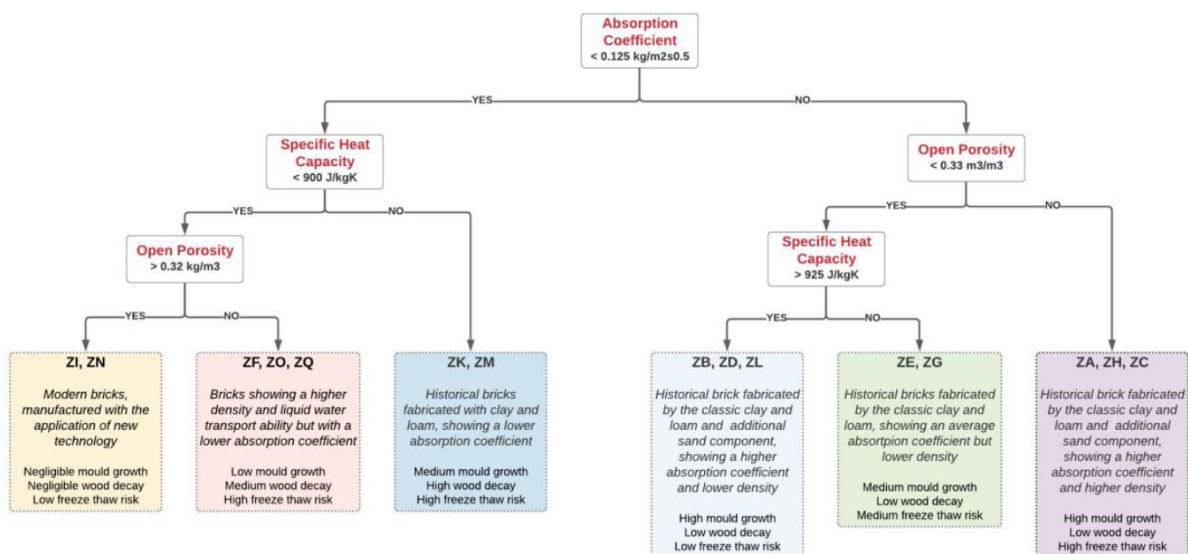
2.1.1. Implementatie in simulaties

De vertaling van de complexe werkelijkheid van metselwerk naar een simulatiemodel is niet vanzelfsprekend. Omdat er zowel wordt gekeken naar renovatieprojecten als naar nieuwbouw zijn de materiaalkarakteristieken niet altijd gekend. Bovendien zorgen imperfecties, scheuren en uitvoeringskwaliteit voor een groot aantal onzekerheden zoals afgebeeld in Figuur 17.



Figuur 17: Vertaling van de complexe werkelijkheid van metselwerk naar een simulatiemodel (Vanderschelden & Van Den Bossche, 2020).

Om op een doordachte wijze tewerk te gaan wordt er door Vanderschelden et al. een aanpak van *clustering* voorgesteld voor verschillende bakstenen uit Delphin (Vanderschelden et al., 2022). Op deze manier worden verschillende soorten bakstenen met gelijkaardige eigenschappen gebundeld en voorgesteld door 1 representatieve baksteen per cluster. De clustering werd uitgevoerd op basis van 3 degradatiecriteria: schimmelgroei op het binnenoppervlak, houtrot en vorstschade. De belangrijkste materiaaleigenschap bleek de waterabsorptiecoëfficiënt A_w te zijn, vandaar ook dat deze eigenschap bovenaan staat in het boomschema in Figuur 18. Op deze manier kan steeds de juiste materiaalkeuze worden gemaakt op basis van de eigenschappen die voor handen zijn.



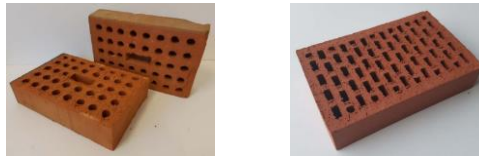
Figuur 18: Boomschema met de clusters voor 15 bakstenen uit Delphin (Vanderschelden et al., 2022).

2.1.2. Implementatie in experimenten

Vanuit de praktijk van BLAF worden een aantal bakstenen geselecteerd voor de testopstellingen in DEEL III. Algemeen worden er 3 types bakstenen getest:

- **Geperforeerde gevelstenen**

Deze gevelstenen vallen te situeren binnen de zoektocht van BLAF naar een manier om een zelfdragende buitenschil in metselwerk op te trekken. Het gaat om bakstenen gebakken met de klei van een gevelsteen en de profilering en het uitzicht van een klassieke snelbouwsteen. BLAF ontwikkelde in deze traditie in samenwerking met Wienerberger en Ploegsteert zo ook de BLAF 1.0 en 2.0 Bricks in Figuur 19. Deze stenen overbruggen de dikte van een steense muur maar zijn minder hoog dan een snelbouwsteen en sluiten beter aan bij het klassieke baksteenuiterlijk.



Figuur 19: BLAF 1.0 en 2.0 maken het mogelijk een steense muur van 1 steen breed te bouwen (foto's: BLAF).

- **Gerecupereerde massieve gevelstenen – “Boomse recuperatiesteen”**

Deze oranje-rode strengpersstenen danken hun naam aan de rijke kleigroeves in Boom. Ze zijn wijdverspreid in Vlaanderen en kleuren mee het baksteenpatrimonium. Ze komen voor in verschillende formaten zoals de rijnvorm (180 x 85 x 50 mm) en het boerkes formaat (170 x 90 x 65 mm) afgebeeld in Figuur 20. Deze stenen zijn zowel relevant bij renovatieprojecten met steense muren als nieuwbouwprojecten waarbij recuperatiesteen wordt gebruikt.



Figuur 20: Boomste steen in rijnvorm (links) en boerkes formaat (rechts) (foto's: RotorDC).

- **Geperste carbonstenen**

Carbonstenen zijn geperste CO₂-negatieve blokken zonder energie-intensief bakproces, in betonblokformaat zoals in Figuur 21. Ze blijven ook na de productie CO₂ opnemen dankzij carbonatatie. Ze bestaan hoofdzakelijk uit staalslakken, als bron van calciumoxide (CaO). Deze reageren met CO₂ en vormen calciumcarbonaat (CaCO₃). Aan het einde van hun levensduur worden ze gerecycleerd tot zand en grind (Carbstone, 2024). Hoewel het geen “bakstenen” zijn zoals de andere geteste materialen, worden ze meegenomen in de experimenten omdat er over dit nieuwe materiaal nog weinig onderzoek is gebeurd en er binnen de praktijk wel een zekere interesse voor bestaat. Hoewel het CO₂-negatieve narratief veelbelovend klinkt, dient vanuit duurzaamheidsperspectief wel de kanttekening gemaakt te worden dat de grondstoffen onlosmakelijk verbonden zijn met de (vervuilende) staalindustrie, een typisch voorbeeld van een industriële ecologie waarbij 2 industrieën elkaar in stand houden (Devlieger, 2023).



Figuur 21: Carbonsteen van Carbstone, een geperste CO₂-negatieve steen in betonblokformaat.

2.2. Voegen

Niet alleen de baksteen zelf, maar ook de connectie ertussen is van belang. Daarom wordt in deze paragraaf ingezoomd op de voegen in het metselwerk en de mogelijke impact ervan op het hygrothermisch gedrag en de regendichtheid van de wand.

2.2.1. Cementmortel of kalkmortel?

Vanaf het einde van de 19^e eeuw heeft de opkomst van mortels op cementbasis de historische en zachtere (kalk)mortels verstoet naar de marge van de bouwpraktijk. Dit betekende voor het hergebruik van keramische gevelmaterialen een drastische ommekeer van de eeuwenlange **circulaire traditie** naar een lineaire economie: de recuperatie van bakstenen werd plots veel moeilijker, zo niet onmogelijk (Interreg FCRBE, 2021). Kalkmortel wordt veel eenvoudiger losgemaakt van de baksteen dan cementmortel omwille van de hardheid en sterkere binding van de cementmortel met de bakstenen, hetgeen leidt tot scheuren bij het ontmantelen waardoor de baksteen onbruikbaar wordt (Fulleux & Vandenbulcke, 2023).

Naast circulaire aspecten zijn er ook minder **CO₂-emissies** verbonden aan het gebruik van kalkmortel ten opzichte van cementmortel (Berge, 2009). Dit is een belangrijk topic gezien de huidige bouwsector verantwoordelijk is voor 37% van de globale CO₂-uitstoot, waarvan 10% wordt uitgemaakt door de traditionele bouwmaterialen zoals beton, staal, aluminium, baksteen en glas (United Nations Environment Programme, 2022). Kalk heeft als voordeel dat het de mogelijkheid heeft om tot 90% van de CO₂ die vrijkomt bij de productie ervan weer te capteren via carbonatatie - ook gekend als de kalkcyclus (Berge, 2009). Kalk komt van nature voort als calciumcarbonaat (CaCO₃) in kalksteen en mergel. Eerst wordt deze kalksteen verbrand bij ca. 1000°C om ongebluste kalk of calciumoxide (CaO) te vormen, waardoor CO₂ vrijkomt. Vervolgens wordt deze calciumoxide geblust met water om zo gebluste kalk of calciumhydroxide (Ca(OH)₂) te vormen in een exotherm proces. Afhankelijk van de hoeveelheid water wordt een droog (luchthardend) of nat (hydraulisch, waterhardend) bindmiddel bekomen (Temmerman, 2016). Dankzij carbonatatie of uitharding is luchtkalk in staat om CO₂ te capteren en opnieuw calciumcarbonaat te vormen waardoor de kalkcyclus compleet is. De hydratatie of uitharding van hydraulische kalk gebeurt in contact met water (van Balen et al., 2003). In een kalkmortel wordt typisch zand toegevoegd als toeslagmateriaal. Hoewel kalkmortel binnen de circulariteitsbeweging terug aan een comeback werkt, blijkt dat in de restauratiepraktijk een voorgeschreven kalkmortel zo goed als altijd cement zal bevatten. Niemand lijkt nog te geloven dat men met alleen kalk, zand en water mortel kan maken (van Balen et al., 2003).

Bovendien is er ook een verschil tussen het **hygrothermisch gedrag** van cement- en kalkmortel. Zo wordt kalkmortel gekarakteriseerd door hogere transport- en opslagkarakteristieken dan cementmortel, waardoor metselwerk met kalkmortel beter waterdicht is dan met cementmortel (Calle, 2020). Of ook: kalkmortel gebruikt zijn vochtbufferend vermogen om zo lang mogelijk waterdicht te blijven, hetgeen veel minder het geval is bij cementmortel, zoals werd aangetoond via experimenteel onderzoek uitgevoerd door Calle (2020). Bovendien kan kalkmortel via de herverdeling van vocht lokale concentraties in vochtgehalte uitvlakken en hierdoor vocht gerelateerde schade fenomenen verzachten aan het oppervlak (Calle, 2020). Ook heeft kalkmortel een hogere elasticiteitsmodulus, waardoor er minder snel microscheuren zullen gevormd worden dan bij cement, hetgeen resulteert in minder infiltratie van water. Het grote verschil met cementmortel is de veel tragere uitharding van kalkmortel, die verschillende jaren in beslag kan nemen. Dit ligt mee aan de oorzaak ligt van het gigantische succes van cementmortels in een bouwpraktijk die meer dan ooit rond snelheid draait (van Balen et al., 2003).

2.2.2. Voegmortel

Een andere invloedsfactor voor het hygrothermisch contact van voegen is tweefasig voegen. Hierbij wordt eerst de stelmortel (*bed mortar*) aangebracht en in een tweede fase de voegmortel (*pointing mortar*). De impact hiervan wordt onderzocht door Calle (2020) in een serie waterdichtheidstesten, waarbij er tussen beide fasen 24 u wordt gelaten. De eerste infiltraties worden typisch geobserveerd in de verticale stootvoegen, omdat deze doorgaans minder verdicht zijn. Echter, voegmortel vergroot de waterdichtheid van de constructie, onder andere de hygrische grensweerstand (zie paragraaf 2.2.3 hieronder) tussen voegmortel en stelmortel draagt hiertoe bij. Dit kan bijvoorbeeld het gevolg zijn van een gedeeltelijke droging van de stelmortel voor de voegmortel wordt aangebracht, waardoor deze het aanmaakwater aanzuigt uit de verse voegmortel en het contactoppervlak imperfecties zal vertonen – resulterend in een weerstand.

Verder zijn het de continue contactoppervlakken van materialen die van de ene naar de andere kant van het metselwerk leiden die eerder gesatureerd raken in de experimenten. Zo blijkt dus dat de contactoppervlakken tussen de materialen net de infiltratie vergemakkelijken. Dit is het onderscheid tussen transport loodrecht op de voeg waarbij de hygrische grensweerstand een remmend effect uitoefent, en het transport parallel met het contactoppervlak. Het vermijden van continue oppervlakken tussen binnen- en buitenzijde van het metselwerk kan op die manier dus bijdragen aan de waterdichtheid, vanwege het feit dat er minimaal één voeg loodrecht moet worden gepasseerd.

Ook het aspect van uitvoeringskwaliteit en vakmanschap is belangrijk. Indien er door een gebrekkige uitvoering holtes tussen de materialen achterblijven, kunnen deze gezien worden als grote hygrische weerstanden, hetgeen leidt tot vochtaccumulatie achter de voegmortel en dus een groter risico op vorstschade (Calle, 2020).

In 1D simulaties is het te onderzoeken schadepatroon bij voorkeur niet specifiek gerelateerd aan de mortel, maar eerder een algemene schade voor de wandopbouw. Voor de evaluatie van vorstschade achter de voegmortel is een 2D simulatie onontbeerlijk (Calle, 2020). De materiaaleigenschappen van de materialen grenzend aan de voegmortel en stelmortel in 2D simulaties blijken meer impact te hebben op vorstschade dan de morteleigenschappen zelf: de herverdeling van vocht tussen de aangrenzende materialen speelt dus een belangrijke rol en alle materialen moeten weldegelijk worden beschouwd om dit fenomeen accuraat in te schatten.

Ook dient speciale aandacht te gaan naar het hervoegen van metselwerk (*repointing*). Het hervoegen van een bestaande gevel kan het hygrothermisch gedrag ervan en de risico's op schade drastisch beïnvloeden (Calle, 2020). Over het algemeen wordt het metselwerk waterdichter, zeker indien men kalkmortel gebruikt om op te voegen, omwille van verschillende redenen: er wordt meer vocht opgeslagen in de voegmortel en deze wordt slechts gedeeltelijk naar binnen herverdeeld. Bovendien wordt de infiltratie beperkt dankzij de hogere elasticiteitsmodulus van kalkmortel waardoor er minder microscheuren gevormd worden. Tot slot is het de hygrische grensweerstand tussen voeg- en stelmortel die waterinfiltratie tegengaat. Het aanbrengen van een voegmortel met niet-compatibele hygrische eigenschappen kan grote schade aanrichten in een bestaande metselwerkwand.

2.2.3. Contactoppervlak tussen mortel en baksteen: de hygrische grensweerstand

De hygrische grensweerstand of *hydraulic interface resistance* (IR) is een remmend effect op vloeibaar vochttransport langsheen het contactoppervlak tussen materialen. Dit kan theoretisch worden gezien als een extra materiaaldikte met een zekere permeabiliteit of resistiviteit die zich tussen twee materialen bevindt, zonder vochttopslagcapaciteit (Calle et al., 2019). Het capillair transport van vocht doorheen metselwerk wijkt af van dat in homogene materialen (Derluyn et al., 2011). Dit kent verschillende oorzaken die experimenteel werden vastgesteld (Calle et al., 2019; Vereecken & Roels, 2013).

Enerzijds wordt tijdens het uithardingsproces water onttrokken aan de verse mortel. Concreet neemt het aandeel grote poriën af voor nat uitgeharde, maar zeker voor droog uitgeharde mortels, afhankelijk van het type baksteen waarmee de mortel in contact komt. Ook komen kleine mortelpartikels terecht in de poriën van de aangrenzende bakstenen (hetgeen zorgt voor het dichtslibben van de poriën) en ontstaan er kleine luchtinsluitels aan het contactoppervlak (verdichtingsporiën), ook een vorm van discontinuïteit in het contactoppervlak zoals in Figuur 22. Ook het vormen van scheurtjes (*cracking*) van het contactoppervlak en een mismatch tussen fysische en chemische eigenschappen alsook de poriënstructuur van bakstenen en mortel worden genoemd als mogelijke verklaringen.



Figuur 22: Contactoppervlak tussen een baksteen en dry cured mortel, waarbij slechts 30% van het oppervlak effectief contact maakte. Dit gebrekkig contact verklaart o.a. de hygrische grensweerstand (Calle et al., 2019).

De implementatie van een IR in simulaties kan enerzijds door het toevoegen van een aparte weerstandslaag die vochttransport tussen materialen hindert (Vereecken & Roels, 2013) en anderzijds door het wijzigen van de materiaaleigenschappen van de aangrenzende materialen (Calle et al., 2019). Volgens Calle et al. (2019) is de eerste methode eenvoudiger toe te passen, maar mist deze precisie. Om die reden worden de morteleigenschappen gewijzigd afhankelijk van de uitharding, die een belangrijke parameter blijkt. Men onderscheidt hierbij drie uithardingswijzen, beproefd onder capillaire absorptie (Derluyn et al., 2011). Droge uitharding (*dry curing*) gebeurt tussen ovendroge bakstenen, natte uitharding (*wet curing*) gebeurt tussen capillair verzadigde bakstenen en uitharding (*mold curing*) in een mal, waarna de mortel tussen de bakstenen wordt geplaatst met kaolien – een stof die in theorie een IR gelijk aan 0 garandeert. In de praktijk zal mortel uitharden tussen de uitersten van *wet cured* en *dry cured* in (Temmerman, 2016). Daarom is een andere mogelijke manier van omgang met de onzekerheden van de IR om drie fictieve constanten (0 m/s , $2,5 \cdot 10^{10} \text{ m/s}$ en $5 \cdot 10^{10} \text{ m/s}$) te implementeren in de simulaties die respectievelijk staan voor een perfect hydraulisch contact, kleine en grote IR zoals in het onderzoek van Vereecken & Roels (2013).

Wat betreft de waarde van de IR kan er opnieuw een verschil in gedrag worden waargenomen tussen kalkmortels en cementmortels. Het onderzoek van Calle et al. (2019) spitst zich toe op kalkmortel en dat van Derluyn et al. (2011) op cementmortel, beide via capillaire absorptie (dus niet onder realistische omstandigheden van variërende benatting en droging). Het onderzoek van Derluyn et al. (2011) concludeert dat de uithardingswijze van cementmortel een niet verwaarloosbare IR veroorzaakt bij transport via capillaire absorptie loodrecht op het contactoppervlak. Voor *wet cured* en *dry cured* mortel wordt zo respectievelijk $1,25 \cdot 10^{10} \text{ m/s}$ en $2,50 \cdot 10^{10} \text{ m/s}$ bekomen. Algemeen kan men stellen dat de IR bij kalkmortels een grootteorde kleiner is dan bij cementmortels uit de literatuur, respectievelijk $1 \cdot 10^9 \text{ m/s}$ en $1 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ voor droge en natte uitharding (Calle, 2020). Het verschil met cementmortel valt mede te verklaren door de hoge vochttransporteigenschappen van kalkmortel, hoewel de exacte grootte vaak moeilijk te bepalen is vanwege de gevoeligheid voor kleine wijzigingen in de eigenschappen m.b.t. het vochttransport (Calle et al., 2019). Voor kalkcementmortel werd dan weer vastgesteld dat de IR een verwaarloosbare invloed heeft onder realistische omstandigheden (Vereecken & Roels, 2013).

Het is dus belangrijk om bij een simulatie de juiste keuze te maken van IR zodat het model de werkelijkheid zo goed mogelijk zou benaderen. Eerst dient er een onderscheid gemaakt te worden tussen de 3 uithardingswijzen (*wet curing*, *dry curing* en *mold curing*). Daarnaast is het ook belangrijk om de juiste waarde te implementeren. Deze varieert echter sterk in de literatuur, daarom kan er gekozen worden om een aantal grootte-orde te simuleren om het effect ervan te bekijken.

2.2.4. Homogenisatie van metselwerk in HAM-simulaties

Al deze voorgaande verschijnselen, bedenkingen en inzichten rond voegwerk tonen aan dat het hygrothermisch gedrag van metselwerk als een heterogeen materiaal bestaande uit voegen en baksteen een complex fenomeen is. Echter, vaak wordt bij (1D) simulaties het metselwerk gemodelleerd als een homogene materiaallaag, waarbij al deze zaken vereenvoudigd worden - hygrische grensweerstand, het effect van voegmortel maar ook de aanwezigheid op zich van voegen. Logischerwijs rijst dus de vraag wanneer men hier wel of niet mee moet rekening houden, gezien het feit dat 2D simulaties erg veel rekenkracht vergen. Voor de verschillende mortelsoorten geldt:

- Hoe dieper in de constructie, hoe groter het verschil tussen een 1D en 2D simulatie van metselwerk. Voor **cementmortel** geldt doorgaans dat de vochtgehaltes overschat worden in 1D simulaties, waardoor homogenisatie een conservatieve vereenvoudiging is (Calle, 2020).
- Ook Vereecken & Roels (2013) gaan in op het vraagstuk van homogenisatie – weliswaar met **bastaardmortel** als voegmateriaal. Dit is een belangrijk verschil voor de interpretatie van resultaten, gezien een kalkcementmortelvoeg doorgaans minder absorberend is dan baksteen, in tegenstelling tot een voeg in kalkmortel. In de absorptieproef bleek het sample bestaande uit enkel baksteen veel sneller verzadigd dan het sample met baksteen én voegen. Echter, bij blootstelling aan realistische klimaatcondities werd slechts een klein verschil geobserveerd tussen beide. Dit betekent niet alleen dat de hygrische grensweerstand verwaarloosbaar is in dit geval, maar ook dat een homogenisatie van het metselwerk is toegestaan. De randvoorwaarden in casu zijn een zuidwest oriëntatie en een relatief traditionele opbouw, dus de resultaten zijn volgens de auteurs geldig voor gelijkaardige cases.
- Vooral bij **kalkmortel** dient men omzichtig om te gaan met het homogeniseren van metselwerk in 1D simulaties, omdat dit door de hoge transport- en opslageigenschappen van kalkmortel kan leiden tot een onderschatting van het vochtgehalte diep in de constructie door de herverdeling van vocht. Calle (2020) stelt dat 1D simulaties betrouwbaar zijn zolang er geen schade verwacht wordt in de voegen aan het buitenoppervlak. Voor schadefenomenen dieper in de constructie dienen 2D simulaties zich aan.

Om schadefenomenen in de mortelvoeg te beoordelen (voegmortel en stelmortel) mag er logischerwijs geen homogenisatie van het model gebeuren. Hier zijn de eigenschappen van de aangrenzende materialen van te cruciaal belang (Calle, 2020). Een eerste voorwaarde om te homogeniseren is dus dat het onderzochte schadefenomeen niet met de voegen gerelateerd mag zijn. Verder ziet Calle (2020) nog een aantal andere voorwaarden. Zo moet men kunnen uitsluiten dat er *runoff* zou optreden – afstroom van water aan de achterzijde van bakstenen wanneer deze bij een hevige bui volledig verzadigd raken – of diepe infiltratie doorheen scheuren, beide veroorzaken namelijk hoge lokale vochtgehaltes.

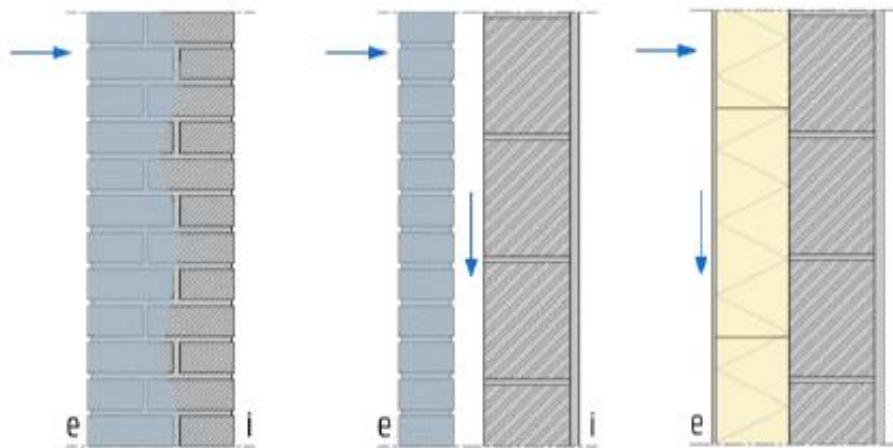
Hieruit blijkt dus dat er afhankelijk van het type mortel (kalk, cement of bastaard) omzichtig moet omgesprongen worden met de homogenisatie van metselwerk. De onderschatting van het vochtgehalte bij een homogenisatie van metselwerk met kalkmortel is een risico, voor cementmortel is het dan weer een conservatieve aanpak. Bij bastaardmortel is het verschil doorgaans kleiner.

2.3. Infiltratie

In de nieuwe wandopbouw van BLAF wordt het metselwerk gezien als regendichting. De vraag is niet alleen of, maar eventueel ook hoeveel water kan infiltreren doorheen het metselwerk, want dit kan grote gevolgen hebben voor de achterliggende materialen. Daarom zoomen we in op het concept infiltratie.

2.3.1. Concept

De klassieke driehoek van de bescherming tegen infiltratie in Figuur 23 wordt door Van Linden (2022) beschreven als de vochtbufferende muur (de klassieke steense muur – bufferen als strategie), afgeschermd of gedraineerd (spouwmuren met luchtspouw en een regenscherm aan de buitenzijde, hier dus gevormd door het metselwerk - tweetrapswaterdichting) en perfecte barrière (type ETICS - eentrapsdichting). De type-wandopbouw van BLAF bestaat uit een metselwerk buitenschil, een houtskelet binnenschil en isolatiemateriaal als vulling in het houtskelet én de spouw. Dus, deze beweging keert zich af van de van de spouwmuur en tweetrapswaterdichting en keert dus terug naar het principe van de vochtbufferende muur.



Figuur 23: De drie beschermingsstrategieën tegen regenwaterinfiltratie: mass or moisture storage (links), screened or drained (midden) en face-sealed or perfect barrier (rechts) (Van Linden, 2022).

BLAF ambieert dus een terugkeer naar het principe van de steense muur. De vraag is wat de optimale metselwerkdikte moet zijn in een dergelijk systeem. De randvoorwaarden van deze oefening zijn een balans tussen voldoende dikte om regendichtheid te garanderen (of infiltratie te beperken tot een 'aanvaardbaar' niveau) en het beperken van de dikte om te besparen in keramisch materiaal (en zo op de milieu-impact van de wandopbouw via het energie-intensieve bakproces). De infiltratie van water is namelijk geënt op drie te vervullen voorwaarden: er moet een opening zijn waarlangs het water kan binnentreden, een drijvende kracht en tot slot een waterbron (Van Linden, 2022).

- **Opening waarlangs water kan binnentreden**

Wanneer men in metselwerk rekent op de buffercapaciteit van de muur, blijft infiltratie mogelijk vanwege de beperkte dikte van het metselwerk in de huidige bouwpraktijk (Van Linden & Van Den Bossche, 2022). Bij steense muren is het risico op regendoorslag relatief groot, bij metselwerk vanaf anderhalve steen is de kans dan weer kleiner vanwege de grote buffercapaciteit en capillaire onderbreking van kopse voegen waardoor er geen continue connectie meer is tussen beide zijden van het metselwerk (Calle, 2020; Steskens et al., 2013). Dit laatste bleek ook uit het feit dat in een experimentele opstelling de continu doorlopende stenen het eerst verzadigd raakten (Calle, 2020).

Het belang van voegen blijkt uit de observaties waarbij de infiltratie hoofdzakelijk gebeurt aan het contactoppervlak tussen baksteen en mortel, bij de verticale kopvoegen (Van Linden & Van Den Bossche, 2022). Bovendien werd in een ander onderzoek zowel bij absorptie als onder

realistische klimaatvoorwaarden geobserveerd dat de lintvoegen de grootste infiltratie toonden, ondanks de lagere capillaire absorptiecoëfficiënt van de gebruikte kalkcementmortel (A_w) (Vereecken & Roels, 2013). Andere belangrijke factoren zijn de uitvoeringskwaliteit van de muur (Calle & Van Den Bossche, 2021) en de eigenschappen van de samenstellende materialen - baksteen en mortel, zie voorgaande paragrafen (Van Linden & Van Den Bossche, 2022).

- **Drijvende kracht**

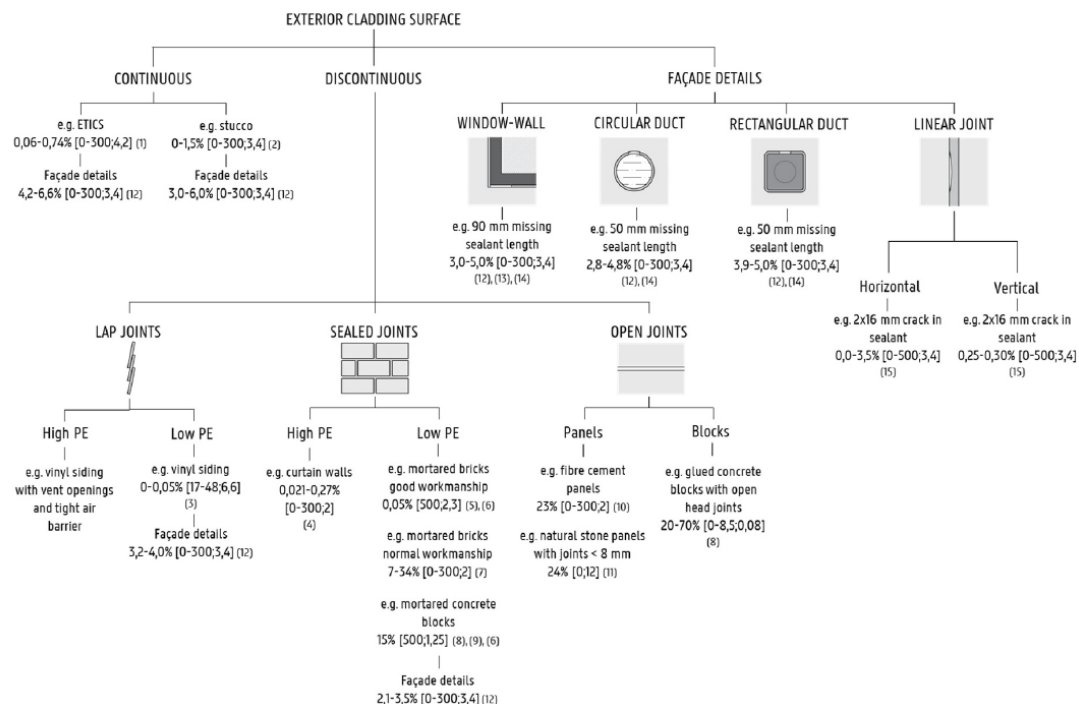
Men beschouwt het drukverschil over de wandopbouw doorgaans als de voornaamste drijvende kracht, maar dit is niet altijd het geval (Van Linden & Van Den Bossche, 2022). Het aflopen (*runoff*) van water over een verzadigde gevel zorgt via capillaire zuiging in kleine scheurtjes ook voor grote infiltratiewaarden zonder drukverschil, waaruit blijkt dat ook de *spray rate* in een test (equivalent van de regenbelasting) een belangrijke parameter is (Calle et al., 2020; Van Linden & Van Den Bossche, 2022). De invloedsfactoren voor de regenintensiteit zijn de oriëntatie van de gevel, gevelhoogte, terreinruwheid, bescherming van de gevel - bijvoorbeeld door een dakoversteek - en de neerslagcoëfficiënt (Calle, 2020; Steskens et al., 2013).

- **Waterbron**

De twee belangrijkste resterende onbekenden zijn de concrete hoeveelheid waterinfiltratie alsook de implementatie ervan in simulaties. Dit wordt behandeld in de volgende paragraaf

2.3.2. Hoeveelheid en implementatie in simulaties

De hoeveelheid infiltratie wordt door Van Linden & Van Den Bossche (2022) gedefinieerd als de hoeveelheid water die penetreert doorheen de buitenste bekleding en infiltreert richting de binnenzijde ervan. Daarbij wordt enerzijds de drainerende luchtsouw en/of anderzijds de drainerende laag bereikt afhankelijk van de grootte van de spouw. Als er geen spouw voorzien is, slaat dit op de materialen die niet bedoeld waren om nat te worden. Grootteordes van infiltratie worden voorgesteld in Figuur 24.



Figuur 24: Categorisatie van buitenafwerkingen en infiltratiepercentages (Van Linden & Van Den Bossche, 2022).

De twee voornaamste parameters voor een experimentele opstelling zijn enerzijds het besproeien (*spray rate*) en anderzijds het drukverschil (*pressure difference*) op de gevel. Hoe hoger het drukverschil, hoe groter de infiltratie. Dit geldt ook voor de besproeiing, behalve wanneer water begint af te lopen (*runoff*), dan neemt de infiltratie weer af (Van Linden & Van Den Bossche, 2022).

De begroting van de infiltratie gebeurt in de literatuur op verschillende niveaus van berekening en nauwkeurigheid. Het meest vereenvoudigde (en conservatieve) niveau werkt met een uniform infiltratiepercentage. Zo gaat ASHRAE 160 (2016) uit van een uniforme infiltratie van 1% van de slagregenbelasting op de *weather resistive barrier*. De representativiteit van deze waarde voor ons klimaat wordt in vraag gesteld gezien deze richtlijn is opgesteld voor het Noord-Amerikaans klimaat. Echter schrijft de nieuwe norm in België NBN EN 15026:2023 de waarde van 1% ook voor, aan te brengen net achter de afwerking. Deze waarde is vrij hoog, zo blijkt ook uit het STEAMlab21 onderzoek van (Steeleman et al., 2020) waar een waarde van 0.6% van de slagregenbelasting wordt gehanteerd, gebaseerd op eerder onderzoek (Geldof, 2016). Een volgend niveau is dat van de *water entry functions* door Moore, Xiao alsook Sahal en Lacasse, met als nadeel dat ze niet steeds afhangen van zowel het drukverschil als de besproeiing en dat er labotesten voor nodig zijn. Om dit euvel te vermijden werd een methode uitgewerkt op basis van een categorisatie van de buitenafwerkingen en typische infiltratiepercentages (Van Linden & Van Den Bossche, 2022).

De implementatie van deze waardes in numerieke simulaties gebeurt typisch als een fractie van de slagregenbelasting via een bronterm (Van Linden & Van Den Bossche, 2022). De infiltratie aan de binnenzijde van de spouw moet numeriek aangebracht worden op het buitenoppervlak van de binnenste muur (Calle et al., 2020). Echter is het realistischer om dit aan te brengen als een puntbron (*point source*) gezien infiltratie vaak een lokaal effect is. Calle et al. (2020) reiken een methode aan met 8 niveaus van implementatie, gaande van geen infiltratie over de besproken 1% infiltratie, puntbronnen en complexere methodes zoals iteratieve simulaties alsook methodes om rekening te houden met slechte uitvoeringskwaliteit (bijvoorbeeld mortelresten). De impact van scheurtjes op de uitkomst kan niet worden onderschat (Vereecken & Roels, 2013).

2.3.3. Normatief kader voor het testen van infiltratie

Met het oog op het bepalen van de waterdichtheid van de experimentele wandopbouwen van BLAF wordt er niet enkel gekeken naar simulaties, maar ook naar infiltratietesten. Een reële situatie wordt nagebootst door sproeiers met een zekere *spray rate* (regen) en al dan niet een drukverschil (wind). Enerzijds zijn er statische testprocedures waarbij het drukverschil stapsgewijs wordt verhoogd en de besproeiing constant wordt gehouden. Statische testprocedures worden beschreven in de volgende normen: de Nederlandse norm NEN 2778:2001 voor de waterdichtheid van constructies, ASTM E514/E514M-20 voor slagregenpenetratie en lekweerstand en NBN EN 1027, hetgeen vergelijkbaar is met het eerste deel van NEN 2778 (Calle, 2020; Van Linden & Van Den Bossche, 2022). Gezien NEN 2778 plaatsvindt bij saturatie, kunnen de resultaten echter enkel kwalitatief worden benaderd. Ook zijn er de cyclische testprocedures, waarbij het drukverschil snel varieert, zoals vastgelegd in NBN EN 12865:2001.

Indien slechts 1 test wordt uitgevoerd, wordt er best gekozen voor een statische test, gezien er tot wel 36% minder infiltratie optreedt bij een cyclische test (Calle et al., 2020; Van Linden & Van Den Bossche, 2022). Voorts zijn er ook nog de dynamische en windtunneltesten. Er dient wel opgemerkt te worden dat bovenstaande combinaties van spray rate en drukverschil overeenstemmen met weinig realistische worst-case scenario's. Een meer realistische benadering kan gevonden worden in de Pareto testprotocol ontwikkeld door (Van Den Bossche et al., 2013a), waarbij de combinatie gemaakt wordt tussen hoge spray rates met lage drukverschillen, gematigde waarden en lage spray rates met hoge drukverschillen. Dit stemt overeen met de realistische situaties waarin hoge windsnelheden zorgen voor een lagere regenintensiteit en vice versa.

2.4. Degradatie

Kristallisatie van zouten

Een eerste degradatiemechanisme voor bakstenen is de kristallisatie van zouten. Deze zouten kunnen in het materiaal zelf aanwezig zijn door het productieproces of afkomstig van externe bronnen, zoals strooizout of grondwater. Door de faseovergang bij kristallisatie wordt de kristallisatiedruk in het poriënsysteem van poreuze materialen groter dan de treksterkte van het materiaal, hetgeen leidt tot scheurvorming (Derluyn et al., 2014). De impact van zouten op metselwerk is echter erg onvoorspelbaar en complex, en wordt daarom niet verder onderzocht in het kader van dit eindwerk.

Vorstschade

Een tweede degradatiemechanisme is vorstschade in de buitenste laag van de baksteen. De fysische drijvende krachten achter dit schadefenomeen zijn het ijslensmechanisme en de hydrostatische druk (Calle, 2020):

- Hydrostatische druk: het water bevriest eerst in de grote poriën. Door de uitzetting in volume wordt water in de kleine poriën gestuwd. Dit watertransport zorgt voor wrijvingen in het poriënnetwerk en op die manier ontstaan trekspanningen bij snelle bevriezing.
- Ijslensmechanisme: waterdamp wordt aangetrokken door een verlaagde dampdruk boven een ijslens en bevriest. Ook hier groeit het ijs aan vanuit de grote poriën. Om te bevriezen in een kleine porie zijn hoge drukken nodig en bij een zwak materiaal zal er scheurvorming optreden.

Om vorstschade te beoordelen wordt er typisch gekeken op 5 mm diepte in het materiaal (Vanderschelden & Van Den Bossche, 2020). Zeker bij het toepassen van binnenisolatie vormt vorstschade een aandachtspunt in het metselwerk, door een wijziging van het hygrothermisch gedrag van de wand zoals zal worden besproken in paragraaf 4.1.

Er bestaan verschillende evaluatiecriteria voor vorstschade (K. Janssens et al., 2024), maar in dit eindwerk wordt gekozen voor het aantal kritische vorst-dooicycli FTC_{crit} (Mensinga et al., 2010). Daarbij wordt een kritisch verzadigingsgehalte S_{crit} gehanteerd. Deze verzadiging komt overeen met het minimale vochtgehalte waarbij het materiaal dilatatie vertoont na blootstelling aan vorst-dooi omstandigheden.

Uit het onderzoek van Mensinga et al. bleek deze kritische verzadiging weliswaar veel strenger voor historisch metselwerk (25-30%) dan voor de geteste moderne baksteen (87%). Voor de evaluatie van FTC_{crit} wordt telkens 1 FTC_{crit} geteld als de massadichtheid van het ijs 25% van de open porositeit overschrijdt, hetgeen eerder conservatief is. Daarom is het ook belangrijk in het kader van dit onderzoek om de resultaten van FTC_{crit} louter relatief te interpreteren, aangezien er zowel naar nieuwbouw- als renovatiecontext wordt gekeken. Ook kan de kanttekening gemaakt worden dat moderne bakstenen vandaag de dag in principe vorstbestand zijn bij productie. Uit de clustering van bakstenen in Delphin representeren ZI en ZN moderne bakstenen met een laag vorst-dooirisico (Vanderschelden et al., 2022).

3. Spouw

Het belang van een luchtspouw in een wandopbouw wordt klassiek gestaafd via twee argumenten. Ten eerste is er de versnelling van het droogproces, omdat de verdamping van binnen- en buitenspouwblad zo niet enkel naar de binnen- of buitenomgeving maar ook naar de spouw kan gebeuren. Ten tweede zou het risico op inwendige condensatie in de winter verkleinen, omdat de vochtige lucht die naar buiten diffundeert door de luchtstroming in de spouw wordt weggevoerd (Meeusen, 2006).

Het eerste blijkt echter niet geheel waar te zijn. Meeusen merkt op dat het argument van de droging van de spouw onjuist is zolang het buitenblad niet sterk dampremmend wordt afgewerkt (Meeusen, 2006). De reden hiervoor is dat tijdens de eerste droogfase slechts een beperkte verkorting wordt bereikt met een geventileerde spouw, en hoewel de tweede droogfase in theorie 4 maal korter is, zal die droogtijd in praktijk veel langer zijn dan de tijd tussen 2 regenbuien. Ook is de ventilatie van de spouw niet noodzakelijk om inwendige condensatie te verhinderen, opnieuw zolang het buitenblad niet sterk dampremmend wordt afgewerkt. Hierbij dient vermeld te worden dat Meeusen deze redeneringen stelt op basis van de bouwfysische vergelijkingen en theorie. Dit biedt dus weldegelijk mogelijkheden om te evolueren naar een wandopbouw waarbij de luchtspouw volledig wordt gevuld, zoals BLAF ambieert.

Echter zijn er ook andere studies die het tegendeel aantonen (Van Belleghem et al., 2015). Van Belleghem et al. tonen aan dat de ventilatie in de luchtspouw belangrijk is voor de droging van het binnenspouwblad, maar dat de droging van het buitenspouwblad wel onderworpen is aan de randvoorwaarden van de buitenomgeving. Vanderschelden et al. (2021) onderzoeken via simulaties biobased materialen in houtskeletbouw blootgesteld aan waterinfiltratie. Het ventilatiedebiet in de spouw blijkt bovendien doorslaggevend voor de degradatie, met name de schimmelgroei, en stijging in warmtestroom. Qua grootteordes van het ventilatievoud voor een spouw achter metselwerk wordt er gerekend met waardes tussen de 1 en 10 ACH of *air changes per hour* (Langmans et al., 2016).

Dit wijst op het risico dat de huidige dubbele beweging inhoudt: biobased materialen zijn enerzijds vochtgevoeliger, maar toch wordt er gezocht naar een eliminatie van de spouw, waardoor er minder ventilatie en drogingspotentieel is. In het kader van dit onderzoek zal er ook verder worden bekeken wat de impact is van de luchtspouw in de wandopbouwen.

4. Isolatie

In de te onderzoeken type-wandopbouw wordt er gewerkt met een metselwerk buitenschil en intern houtskelet met isolatie. De toepassing van binnenisolatie vormt steeds een bouwfysisch aandachtspunt. Daarom wordt er in dit onderdeel eerst ingegaan op het concept van binnenisolatie. De hygrothermische risico's van het systeem worden besproken en van daaruit worden de types binnenisolatie verkend. Vervolgens wordt er een overzicht gegeven van biobased isolatiematerialen en hun voornaamste eigenschappen. Ook wordt een gefundeerde keuze gemaakt voor de te beschouwen isolatiematerialen in dit onderzoek. Tot slot wordt er kort ingegaan op degradatie en performantie van het isolatiemateriaal.

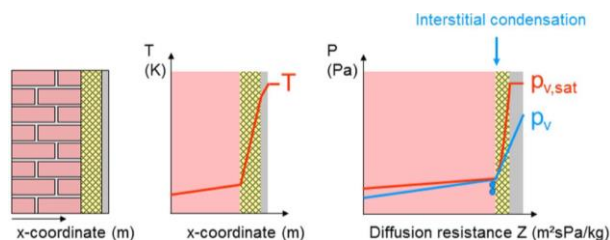
4.1. Binnenisolatie

Naast de klassieke spouwmuur met tweeklaps waterdichting en buitenisolatie kent het systeem van binnenisolatie vooral ingang in de praktijk als een van de technieken van na-isolatie om ons bestaande gebouwbestand energetisch te optimaliseren. Een van de belangrijkste drijfveren daarbij is dat het uitzicht van de (historische) gevels op die manier behouden wordt, tegenover pakweg buitenisolatie. Echter kent deze techniek een aantal belangrijke gevolgen, beperkingen en zelfs risico's door een wijziging van het hygrothermisch gedrag van de wandopbouw. Het is daarom belangrijk om hiervoor oog te hebben wanneer we dit systeem toepassen in zowel renovatie- als nieuwbouwscenario's, zoals gebeurt in de praktijk van BLAF architecten.

4.1.1. Hygrothermische risico's

Een eerste risico bevindt zich op het niveau van de constructie: door de binnenisolatie is de metselwerk buitenschil niet langer onderworpen aan het binnenklimaat. Dit resulteert in een groter verschil in hygrothermische randvoorwaarden en dus een grotere temperatuurgradiënt over het metselwerk en lage temperaturen in de buitenschil in de winter. Bovendien blijft het metselwerk ook langer vochtig, want de binnenisolatie verlaagt het drogingspotentieel naar de binnenomgeving. Hoge vochtbelastingen zijn dus uit den boze. De combinatie van een verhoogd vochtgehalte in de buitenste schil en de koudere temperaturen leidt tot een verhoogd risico op vorstschade (Vereecken, 2013). Het metselwerk dient dus vorstbestendig te zijn, of zeer vorstbestand (Steskens et al., 2013).

Ten tweede: wanneer men kiest voor een dampopen opbouw, neemt het risico op inwendige condensatie toe. Dit kan leiden tot de degradatie van achterliggende systemen zoals houtskelet en isolatie. De vochtige lucht komt zo in contact met een koud oppervlak, typisch tussen het metselwerk en de isolatie, en als de temperatuur van dat oppervlak onder het dauwpunt ligt ontstaat er condens zoals in Figuur 25 (Vereecken, 2013). Afhankelijk van het toegepaste isolatiemateriaal wordt het condensaat geabsorbeerd door het metselwerk of de isolatie. Dit leidt op zijn beurt tot degradatie van het isolatiemateriaal, thermische verliezen en schimmelvorming (Steskens et al., 2013).



Figuur 25: Glaser-diagram van een dampopen opbouw resulterend in inwendige condensatie (Vereecken, 2013).

Ten derde is de kans op oppervlaktecondensatie en schimmelgroei groter. Hierbij treedt er condensvorming op tegen een koud constructieoppervlak. Dit is vaak het gevolg van koudebruggen in de constructie en kan worden opgelost door voldoende te ventileren (Steskens et al., 2013). Vooral sterk absorberende isolatiematerialen zoals vlas veroorzaken beduidend meer degradatie van de binnenafwerking. Dit komt omdat er meer vocht wordt herverdeeld en er gedurende lange tijd wordt gebufferd, resulterend in schimmel (Vanderschelden et al., 2021). Deze degradatiefenomenen worden verderop behandeld in de paragrafen rond het houtskelet en de binnenafwerking.

Andere risico's omvatten vochtaccumulatie in het metselwerk vanwege de afname in drogingspotentieel door het toepassen van binnenisolatie, de uitbloei van zouten aan het verdampingsoppervlak (hetgeen kan leiden tot extra vorstschade), hygrothermische spanningen door een hogere temperatuurgradiënt die leiden tot scheuren in het metselwerk, de reductie van thermische inertie en tot slot de reductie van de thermische prestatie van de wandopbouw bij luchtlekken (Vereecken, 2013). Een correct uitgevoerde luchtdichting is dan ook van cruciaal belang, want de in- of exfiltratie van vochtige lucht kan op zijn beurt opnieuw leiden tot inwendige condensatie tegen een koud oppervlak.

Voorgenoemde risico's leiden tot een beperking van het toepassingsgebied van binnenisolatie via een aantal basisregels volgens Steskens et al. (2013). Zo is de buitenafwerking van de gevel maximaal dampopen – de μ -waarde is bij voorkeur lager dan 0.3 tot 0.5 (Buildwise, 2020) – en de slagregenbelasting op de gevel beperkt. Dit kan bijvoorbeeld door een dakoversteek of het beperken van de gevelhoogte. Het gebouw moet beschikken over een gecontroleerd binnenklimaat (ventilatie en verwarming, geen binnenklimaatklasse 4), een luchtdichte schil en zo weinig mogelijk koudebruggen. Koudebruggen zorgen er namelijk voor dat de toegevoegde waarde van extra isolatiedikte bij binnenisolatie stagneert (Steskens et al., 2013). Voor BLAF is dit een belangrijke reden om de binnen- en buitenschil beide zelfdragend te maken, zodat er niet langer koudebruggen worden gevormd.

4.1.2. Types binnenisolatiesystemen

Een typische opbouw bestaat uit een draagconstructie met isolatie, eventueel een dampscherm en de binnenafwerking. Hoewel er in principe geen geometrische beperking is op de isolatiedikte – hetgeen wel het geval is bij de na-isolatie van een luchtspon – houdt het een verlies van binnenruimte in bij renovatieprojecten. Zoals eerder aangehaald zorgt de aanwezigheid van de koudebruggen echter wel voor een plafond in de thermische verbetering die mogelijk is en is de nuttige isolatiedikte dus beperkt.

De keuze van het isolatiemateriaal is dus niet alleen cruciaal om een zeker niveau van thermische isolatie te garanderen, maar ook voor het hygrothermisch gedrag van de wand. Sommige isolatiematerialen zijn dampremmend (polystyreen, polyurethaan en cellenglas), andere lenen zich dan weer wel voor een dampopen opbouw (minerale wol, houtvezel, cellulose, kalkhennep...). De vorm van de isolatiematerialen varieert van platen over matten tot losse vlokken, en wordt mede bepaald door het type opbouw waarvoor gekozen wordt. De vochtgevoeligheid van het isolatiemateriaal zal bepalend zijn voor het hygrothermisch concept, gezien de dampopen isolatiematerialen doorgaans gevoelig zijn voor (hoge en langdurige) vochtbelastingen (Steskens et al., 2013).

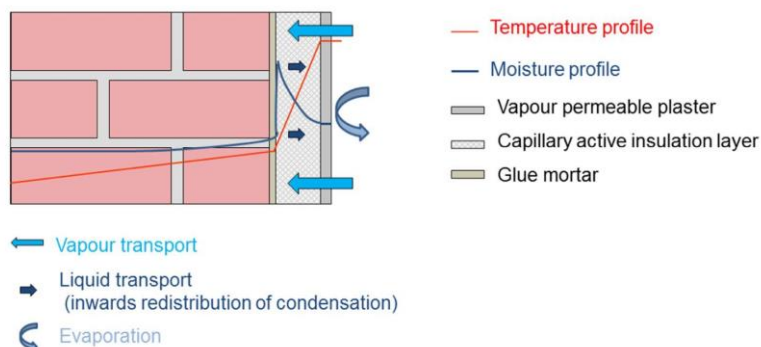
Doorgaans kunnen er dus 2 types systemen van isolatie worden onderscheiden: dampremmend of dampdicht (met dampscherm) en dampopen of capillair actief (zonder dampscherm):

- **Dampremmende of dampdichte systemen**

Dit systeem kan vormgegeven worden via dampremmende isolatie of dampopen isolatie in combinatie met een dampscherm. Echter, deze oplossingen beperken het drogingspotentieel van het metselwerk naar de binnenomgeving waardoor er weer andere vochtgerelateerde pathologieën kunnen opduiken (Vereecken & Roels, 2015). Zo kan er ook zomercondensatie optreden als vochtig metselwerk opdroogt door de zon (Vereecken, 2013). Dit resulteert namelijk in een dampstroom naar de binnenomgeving en condensvorming indien de binnenafwerking (te) dampdicht is, typisch op het scheidingsoppervlak tussen de isolatielaag en de binnenafwerking of het dampscherm. Om zowel het risico op inwendige condensatie te beheersen als het drogingspotentieel te blijven garanderen, wordt er tegenwoordig gekeken in de richting van capillair actieve en hygroscopische isolatiematerialen, die dankzij hun vochtbuffering de vorming van condensaat tegengaan.

- **Dampopen of capillair actieve systemen**

Capillair actieve materialen worden gekenmerkt door poriën van grootteorde 0.1 – 1 µm, resulterend in een hoger vloeibaar vochttransport (Vereecken & Roels, 2015). Dankzij deze eigenschap kunnen deze materialen vloeibaar water absorberen, herverdelen en afvoeren richting de binnenomgeving om daar uit te drogen. Zo vermijden ze inwendige condensatie en kunnen ze zonder een dampremmende laag in een dampopen opbouw worden toegepast, hetgeen positief is voor het drogingspotentieel van de wand (Steskens et al., 2013). Bovendien reageren dampopen opbouwen beter op accidentele vochtinfiltratie dan dampremmende systemen (Buildwise, 2020). Hygroscopische materialen gaan nog een stap verder: deze materialen kunnen vocht opnemen uit hun omgeving via waterdamp in vochtige lucht (hoge relatieve vochtigheden).



Figuur 26: Werking van een capillair actief binnenisolatiesysteem (Vereecken, 2013).

Dampopen bouwen vereenvoudigt bovendien de wandopbouw, want het minutieus aanbrengen van een dampscherm blijkt zelden een sinecure. Bovendien bezitten capillair actieve isolatiematerialen een zeker vochtbufferend vermogen, waardoor ze een regulerende werking hebben op het binnenklimaat door het opnemen en afgeven van vocht. Dit valt of staat echter met de eigenschappen van de binnenafwerking in Figuur 26, die dampopen moet zijn om vochtbuffering toe te laten (Vereecken, 2013).

Bovendien betekent dit ook dat de U-waarde van de muur doorgaans hoger is vanwege een hoger vochtgehalte. Daaruit volgt dat de thermische prestatie iets lager is en de relatieve vochtigheid in de binnenomgeving typisch hoger (Vereecken & Roels, 2015). Een ander aandachtspunt volgens Vereecken (2013) is de verhoogde gevoeligheid van dergelijke systemen voor geringe variaties in de opbouw, zoals wijzigingen in metselwerkdikte of het aanbrengen van een coating.

Enkele voorbeelden van capillair actieve materialen zijn kalkhennep, calciumsilicaat, houtvezelisolatie en cellenbeton. Echter zijn niet alle capillair actieve materialen ook biobased en vice versa, daarom wordt er in de volgende paragraaf dieper ingegaan op wat biobased materialen zijn om een duidelijk onderscheid te maken.

4.2. Biobased isolatiematerialen

De termen biobased materialen en natuurlijke materialen worden vaak door elkaar gebruikt. Echter verschillen ze nog licht van elkaar via hun respectievelijke definities:

- **Biobased materialen** zijn afkomstig van biomassa, maar kunnen eventueel fysisch, chemisch of biologisch behandeld worden (Biobased Bouwen, 2024a). Biomassa is materiaal van biologische oorsprong, exclusief materiaal uit geologische afzettingen en/of gefossiliseerd materiaal volgens NEN-EN 16575:2014. Concreet zijn dit grondstoffen die nagroeibaar zijn tijdens de levensduur van een gebouw en afkomstig zijn uit de levende natuur via veeteelt, tuin-, land- en bosbouw. Voorbeelden van biobased materialen zijn kalkhennep, cellulose en houtvezelplaten maar ook bijvoorbeeld minder voor de hand liggende materialen zoals bioplastics.
- **Natuurlijke materialen** hebben als onderscheidend kenmerk dat ze weinig bewerkt worden (Woonder, 2024). Ze zijn van plantaardige of minerale oorsprong en hebben hierdoor een lagere tot zelfs negatieve CO₂-uitstoot. Voorbeelden van natuurlijke materialen zijn kurk, stro, leem, hennep, kalk en gras.

Er kan dus gesteld worden dat alle natuurlijke materialen biobased zijn, maar niet omgekeerd. In het kader van dit onderzoek wordt er daarom in het algemeen gesproken over biobased materialen.

Biobased materialen met plantaardige grondstoffen worden beschouwd als *carbon sink*, gezien ze CO₂ opslaan door fotosynthese tijdens hun groei, hetgeen hen CO₂-negatief maakt (De Mets et al., 2023). Alles staat of valt weliswaar met hun einde levensduur, aangezien de opgeslagen CO₂ mogelijks weer vrijkomt afhankelijk van hun bestemming. Hoewel richtlijnen vooral focussen op operationele energie wordt er meer recent ook aandacht besteed aan de productie van bouwmaterialen, zowel in de academische wereld als maatschappelijk (Berge, 2009). Wanneer niet louter de operationele energie, maar ook de ingebedde energie van materialen wordt beschouwd, kunnen biobased materialen bijdragen aan duurzamere bouwsector.

Omdat de focus in dit onderzoek evenwel niet ligt op de karakterisatie van materialen, maar op de implementatie ervan in de experimentele wandopbouwen van BLAF werd er gekozen om op basis van een literatuurstudie de courante waarden voor de voornaamste hygrothermische parameters van de isolatiematerialen te implementeren in het onderzoek. In onderstaande paragrafen wordt een overzicht gegeven van de voornaamste biobased isolatiematerialen en worden de in de state-of-the-art gevonden waarden voor hun parameters vergeleken en besproken. Tot slot worden een aantal materialen geselecteerd voor dit onderzoek.

4.2.1. Overzicht biobased materialen

Biobased materialen kennen doorgaans gelijkaardige hygrothermische eigenschappen. Ze zijn dampopen en hygroscopisch, waardoor het risico op vochtaccumulatie en degradatie verkleint maar daartegenover staat wel dat hun λ -waarde doorgaans iets hoger ligt en er dus een grotere wanddikte nodig is om dezelfde isolatiewaarde te bereiken (Lawrence et al., 2013; Palumbo et al., 2018). Biobased materialen hebben verder ook goede akoestische en thermische eigenschappen, worden lokaal gewonnen en bevatten doorgaans minder schadelijke toxische stoffen.

Vochtgevoeligheid blijft een groot aandachtspunt voor al deze biodegradeerbare materialen en kan leiden tot degradatie (Vanderschelden et al., 2021). Bovendien zorgt de opslag van vocht ook voor een hogere thermische transmissie bij deze materialen (Bottino-Leone et al., 2019).

Hieronder lijsten we de belangrijkste kenmerken en aandachtspunten op per type isolatie.

- **Kalkhennep (KH)**

Kalkhennep is een composietmateriaal bestaande uit hennepscheven, kalk, water en eventueel additieven. De hennepscheven zijn een bijproduct van de productie van hennepvezels, die vaak gebruikt worden in de textielindustrie (Lawrence et al., 2013). Het bestaat zowel in de vorm van prefab blokken als in bulk, waarbij het droog of nat gestort wordt (Buildwise, 2020).



Figuur 27: Prefab kalkhennepblok (Buildwise, 2020).

- **Hennepvezel (HeV)**

Hennepvezels worden gewonnen uit de vezels die de hennepsteel omringen (Lawrence et al., 2013). Ze worden verwerkt en gebonden met polyester waarna er eventueel brandvertragers worden toegevoegd. Zo bekomt men matten of dekens uit “wol” voor spouw, dak en vloer (van Dam & van den Oever, 2019).



Figuur 28: Hennepvezel isolatie (Biobased Bouwen, 2024b).

- **Houtwolisolatie (matten) (HW)**

Houtwol wordt gemaakt door houtzaagsel of fijne houtkrullen tot vezels te herleiden en vervolgens te binden met polyolefine vezels en brandvertragers of schimmelwerende middelen zoals ammoniumfosfaat (Lawrence et al., 2013). Gezien er geen water wordt toegevoegd noemt men dit het droog procedé. Soms wordt het ook in de vorm van vlokken verkocht. De isolatie mag niet nat worden wegens zijn vochtgevoeligheid (Steskens et al., 2013).

- **Houtvezelplaten (HoV)**

Houtvezelplaten worden gemaakt van houtafval uit zagerijen door de splinters te weken in water (nat procedé, in tegenstelling tot houtwolisolatie) en tot platen te persen (Ekologio, 2016; Lawrence et al., 2013). Er worden doorgaans geen extra bindmiddelen toegevoegd, men rekent op de natuurlijke lignine-harsen in het hout. De isolatie mag niet nat worden vanwege de vochtgevoeligheid ervan (Steskens et al., 2013).



Figuur 29: Houtvezelplaat (Steskens et al., 2013).

- **Vlas**

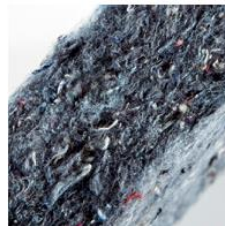
Vlas is net zoals hennep een jaarlijks groeiend gewas met een houtige kern omringd met vezels (Kymäläinen & Sjöberg, 2008). Vlasvezels worden met aardappelzetmeel of polyester gebonden tot matten of platen, met borax als brandvertrager en tegen aantasting door insecten (Lawrence et al., 2013). Vanwege de vochtgevoeligheid mag ook vlas niet (langdurig) nat worden, gezien het dan zijn isolerende werking verliest (Steskens et al., 2013). Vlas is sterk absorberend en toont in een onderzoek naar waterinfiltratie in houtskeletwanden dan ook sterke degradatie in contact met vocht (Vanderschelden et al., 2021).



Figuur 30: Vlas (Willaert, 2019).

- **Katoen (KAT)**

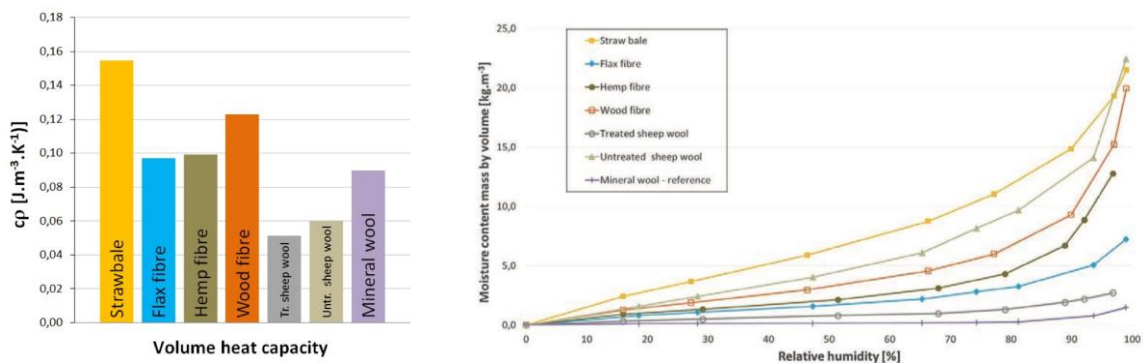
Ook het gebruik van (hergebruikte) cellulose houdende katoenvezels als isolatiemateriaal kent zijn ingang in de bouwpraktijk, maar is echter relatief duur waardoor het marktaandeel beperkt is, tenzij het bestaat uit gerecycleerd materiaal (van Dam & van den Oever, 2019). De bekendste fabrikant van katoenisolatie is Métisse.



Figuur 31: Katoen (Willaert, 2019).

- **Stro**

Stro is een typisch bijproduct van de voedingsindustrie, vooral afkomstig van tarwe (Lawrence et al., 2013). Het stro wordt verpakt tot balen die vaak moeten herwerkt worden tot een praktische maat voor constructieve toepassingen. Stro heeft de hoogste volumieke warmtecapaciteit c_p en de hoogste hygroscopische eigenschappen van de onderzochte materialen door Volf et al. (2015), waaronder hennepvezel, vlas, houtwol en minerale wol. De resultaten worden voorgesteld in Figuur 32.



Figuur 32: Volumieke warmtecapaciteit en sorptie-eigenschappen van stro (Volf et al., 2015).

- **Cellulose (CEL)**

Cellulose komt voor in de vorm van platen of vlokken gemaakt van gerecycleerd krantenpapier en is erg vochtgevoelig, daarom mag het niet (langdurig) nat worden (Steskens et al., 2013; Willaert, 2019). Bovendien is ook cellulose onvoldoende hygroscopisch, waardoor een dampremmend membraan in principe nodig is in de wandopbouw (Buildwise, 2020). Wel wordt een zekere hygroscopiciteit aangetoond door het dempende effect van cellulose op de relatieve vochtigheidsmetingen in het onderzoek van Steeman et al. (2020) vergeleken met minerale wol. Hiertegenover staat dan weer dat cellulose trager zal drogen.



Figuur 33: Cellulose (Steskens et al., 2013).

- **Niet beschouwde biobased materialen**

Enkele biobased materialen werden wel verkend via de literatuur maar zullen niet worden opgenomen in het kader van deze masterproef. Het gaat om schapenwol, vanwege zijn hoge milieu-impact door de schapenkweekemissies aangezien het niet uitsluitend als restproduct wordt beschouwd (Willaert, 2019).

Ook kurk zal niet worden opgenomen om 2 redenen. Ten eerste is kurk beduidend dampdichter dan de meeste biobased materialen, met een μ -waarde van 25 tot 30 (Bottino-Leone et al., 2019; Willaert, 2019). Merk bovendien op dat voor kurk als isolatiemateriaal soms nieuwe kurk wordt gebruikt, waarbij een kurkeik eerst 25 jaar oud moet zijn en dan slechts een oogstcyclus van 9 jaar heeft (Willaert, 2019). Er zijn in dat geval betere biobased alternatieven met kortere oogstcycli, al is er geen bezwaar tegen gerecycleerde kurkkorrels bijvoorbeeld.

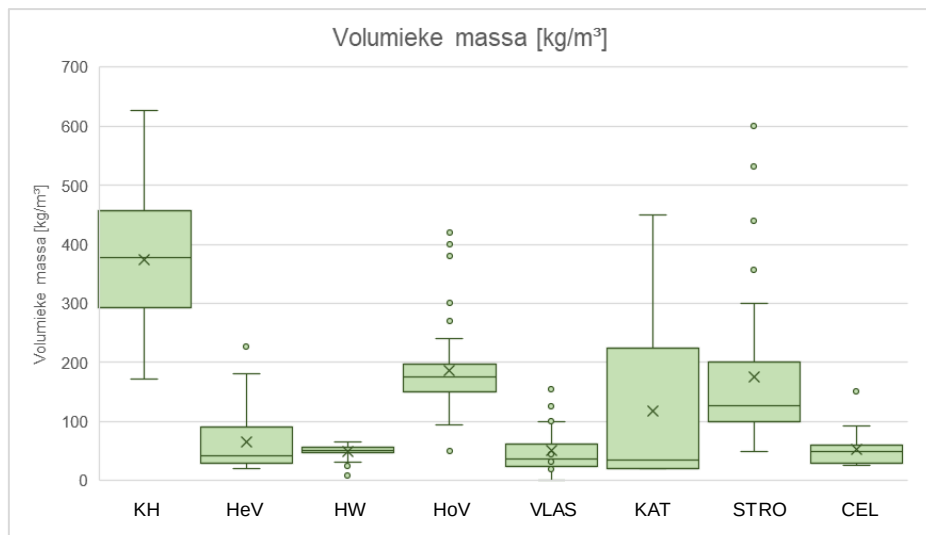
Ook wordt er in de literatuur gewag gemaakt van kippenveren (antimicrobieel te behandelen), turf en veenmos (niet lokaal beschikbaar in ons land, tegenover pakweg Finland) en maïs-sodium alginaat (niet commercieel verkrijgbaar), maar vanwege hun respectievelijke beperkingen worden ook zij niet weerhouden (Fedorik et al., 2021).

4.2.2. Gekende materiaaleigenschappen via literatuuroverzicht

Naast een literatuurstudie werd in het kader van deze thesis ook een datacollectie uitgevoerd met betrekking tot de bovenvermelde biobased isolatiematerialen. De resultaten worden hieronder via boxplots per parameter weergegeven en besproken. De resultaten in tabelvorm zijn te raadplegen in bijlage C.

- **Volumieke massa ρ [kg/m³]**

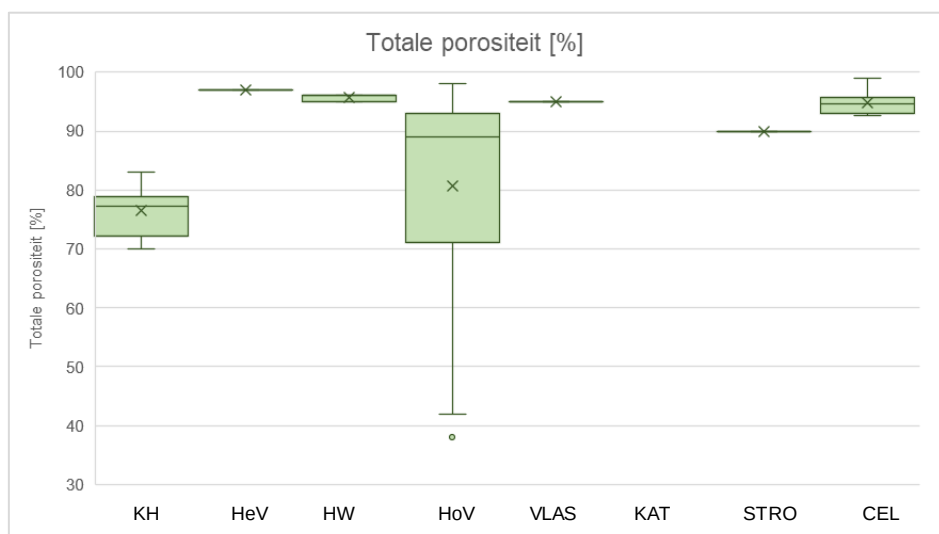
De meeste isolatiematerialen in Figuur 34 hebben een dichtheid die varieert tussen de 30 en 200 kg/m³, enkel kalkhennep heeft doorgaans een hogere dichtheid, tussen de 300 en 450 kg/m³.



Figuur 34: Vergelijking van de volumieke massa of dichtheid van de biobased isolatiematerialen.

- **Totale porositeit [%]**

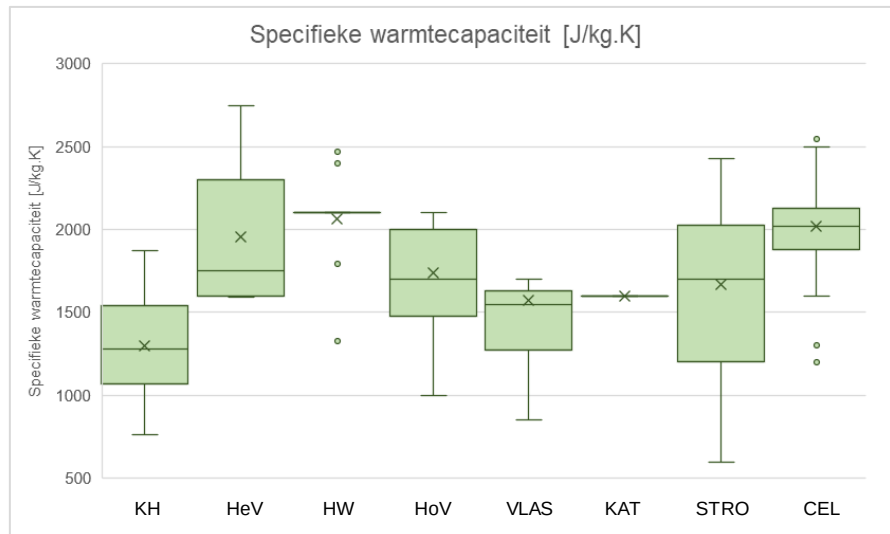
Afgezien van de erg uiteenlopende resultaten voor de houtvezelplaten in Figuur 35 – te wijten aan een aantal specifieke materialen uit de Delphin database met 40-50 % porositeit, liggen alle isolatiematerialen opnieuw in dezelfde grootteorde van 90-100% porositeit. Opnieuw zien we dat kalkhennep hier ietwat afwijkt van de rest, het toont zich minder poreus met waardes tussen 70 en 80%. Dit valt te verklaren door de hogere dichtheid.



Figuur 35: Vergelijking van de totale porositeit van de biobased isolatiematerialen.

- **Specifieke warmtecapaciteit c [J/kg.K]**

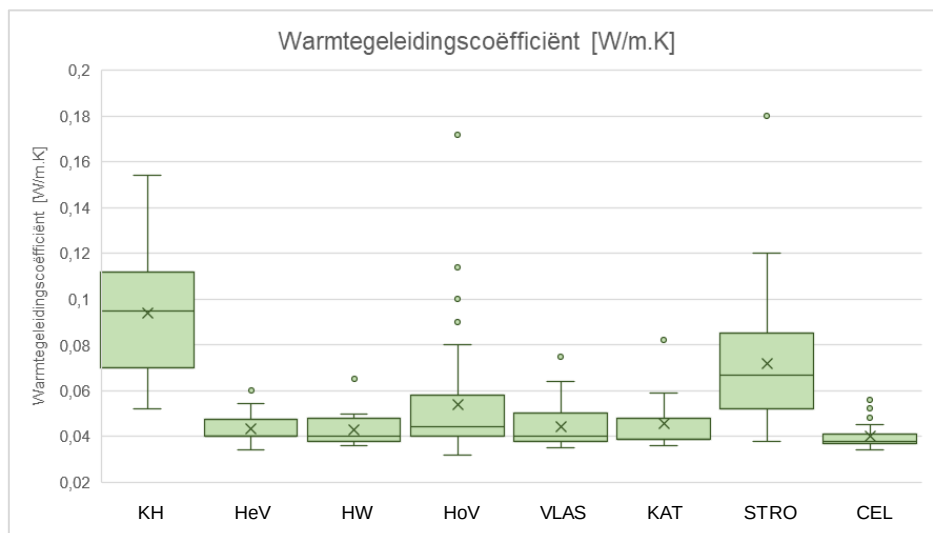
In het algemeen valt er doorgaans minder spreiding te noteren wat betreft de specifieke warmtecapaciteit in Figuur 36, en dat is ook hier het geval. De meeste waarden liggen tussen de 1000 en 2000 J/kgK, waarbij kalkhennep neigt naar de ondergrens van het spectrum.



Figuur 36: Vergelijking van de specifieke warmtecapaciteit van de biobased isolatiematerialen.

- **Warmtegeleidingscoëfficiënt λ [W/m.K]**

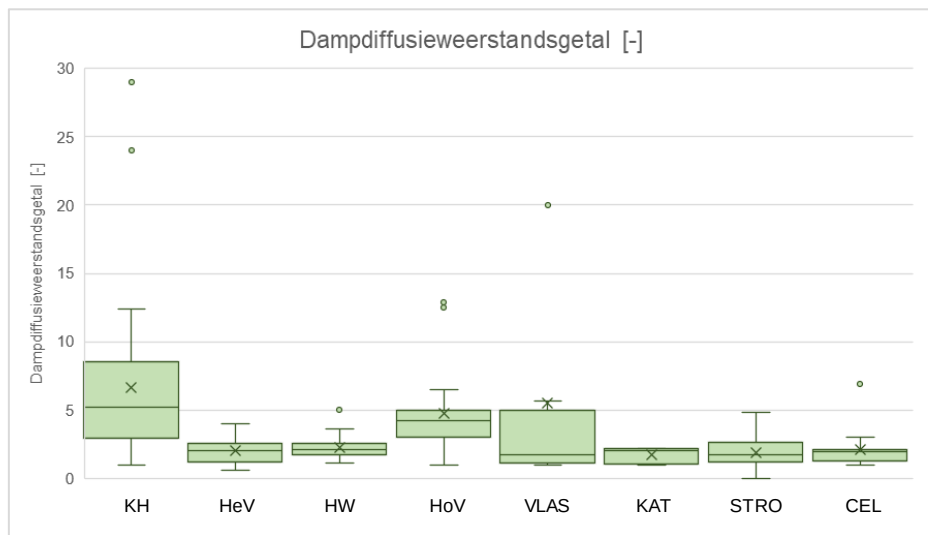
Wat betreft de warmtegeleidingscoëfficiënt liggen de meeste materialen van vezelachtige oorsprong of in vlokform in dezelfde grootteorde van 0.04 tot 0.06 W/m.K in Figuur 37. Stro en ook kalkhennep tonen doorgaans iets hogere waarden, in het geval van kalkhennep wordt dit verklaard door de verschillende samenstellingen (prefab, ter plaatse gestort nat of droog...). Een droge kalkhennepmix zoals die van producent Exie bestaat uit losse scheven heeft ook een λ -waarde van 0.06 W/m.K. Bij stro hangt de λ -waarde samen met de oriëntatie van de strohalmen, wat tot wel 38% verschil oplevert (Platt et al., 2022).



Figuur 37: Vergelijking van de warmtegeleidingscoëfficiënt van de biobased isolatiematerialen.

- **Dampdiffusieweerstandsgetal μ [-]**

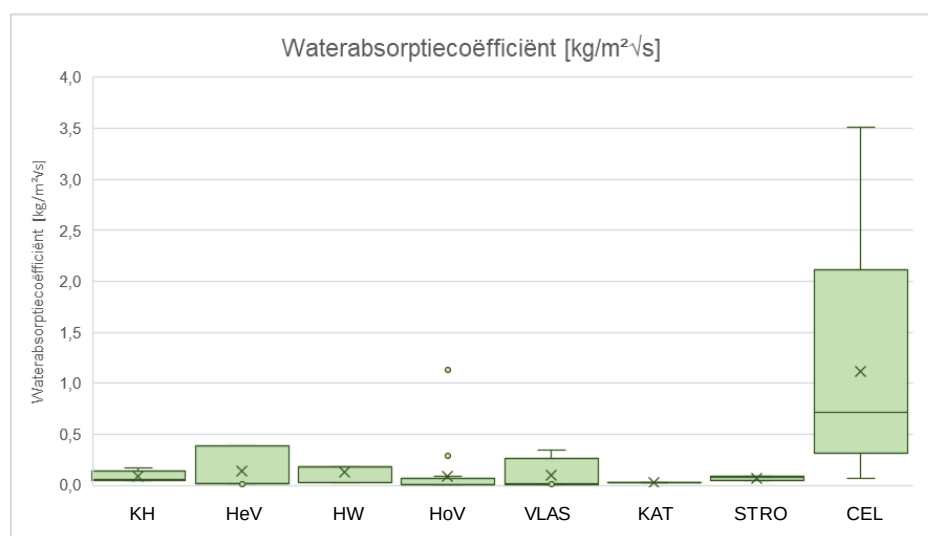
Alle biobased isolatiematerialen hebben een dampdiffusieweerstandsgetal kleiner dan 10, het zijn dus allemaal dampopen materialen. In typische isolatiediktes van 20 cm betekent dit een Sd-waarde van maximaal 2 m (met $\mu = 10$). Ter vergelijking: vaak wordt de grens voor dampopen materialen gelegd op een Sd-waarde van minder dan 20 m (soms zelfs 5 m). De hogere waarden bij kalkhennep zijn opnieuw te wijten aan enkele specifieke samenstellingen van kalkhennepbeton en worden als eerder uitzonderlijk beschouwd. Voor kalkhennep kan worden uitgegaan van een typische μ -waarde van 1.1 tot 3, de mediaan uit de datacollectie in Figuur 38 ligt echter iets hoger, te wijten aan de hogere dichtheid en dus lagere porositeit.



Figuur 38: Vergelijking van het dampdiffusieweerstandsgetal van de biobased isolatiematerialen.

- **Waterabsorptiecoëfficiënt A_w [kg/m²√s]**

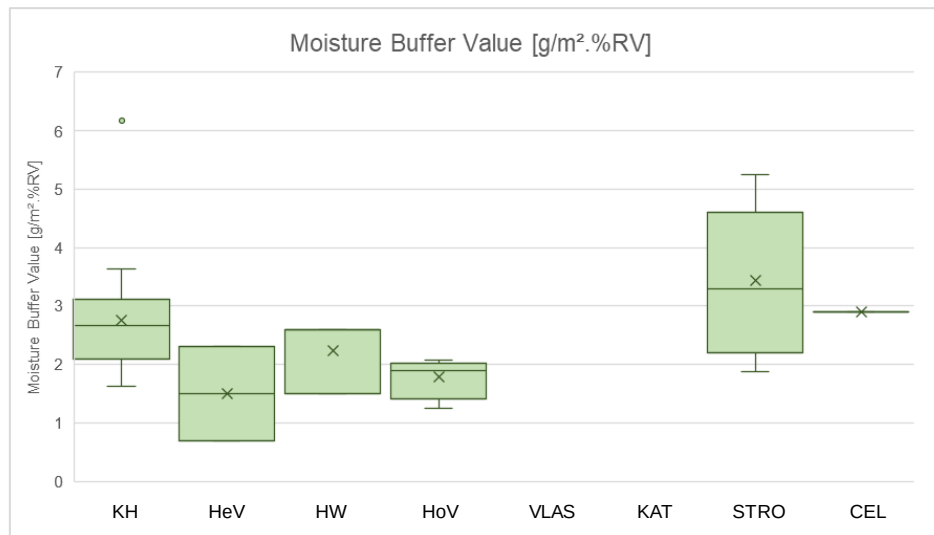
Cellulose toont zich op basis van de waterabsorptiecoëfficiënt een sterk absorberend materiaal in vergelijking met de rest in Figuur 39. Contact met vloeibaar vocht dient dus te allen tijde vermeden te worden voor cellulose. Dit verklaart mee waarom cellulose in de wandopbouwen van BLAF (Figuur 7) en bij uitbreiding in het algemeen typisch in de meer gesloten opbouwen wordt toegepast zoals het klassieke houtskelet. De extremen komen echter opnieuw door een paar specifieke materialen uit de Delphin database. Alle andere isolatiematerialen tonen vergelijkbare waarden tussen 0 en 0.5 kg/m²√s.



Figuur 39: Vergelijking van de waterabsorptiecoëfficiënt van de biobased isolatiematerialen.

- **Moisture Buffer Value MBV [g/m².%RV]**

De waarden voor de *Moisture Buffer Value* in Figuur 40 zijn van dezelfde grootteorde voor alle beschouwde isolatiematerialen. Daarmee classificeren ze qua vochtbufferend vermogen volgens het NORDTEST protocol allemaal van *moderate* (0.5 – 1 g/m².%RV) over *good* (1 – 2 g/m².%RV) tot *excellent* (> 2 g/m².%RV). Voor vlas en katoen werden geen waarden gevonden in de literatuur.



Figuur 40: Vergelijking van de moisture buffer value (MBV) van de biobased isolatiematerialen.

Merk ook zeker op dat er doorgaans veel minder waarden werden gevonden in de literatuur wat betreft de hygrische eigenschappen. Deze blijven vaak onderbelicht.

De bepaling van gemiddelde, mediaan, minimum en maximum alsook het aantal teruggevonden waarden per hygrothermische parameter wordt ter volledigheid achteraan in bijlage C via tabellen verder uiteengezet, alsook de overzichtstabellen van deze datacollectie met de waarden per materiaal, inclusief bronnen. Bovendien wordt het ook aangegeven indien er voor de materialen een sorptiecurve, MRC of LCC werd gegeven in de beschouwde publicaties.

4.2.3. Selectie van isolatiematerialen in dit onderzoek

Om het onderzoeksveld verder af te bakenen wordt er gekozen voor 3 isolatiematerialen. Vanuit de analyse van de praktijk van BLAF architecten in Figuur 7 komen minerale wol, kalkhennep en cellulose duidelijk naar voor als de meest gebruikte materialen in de type-wandopbouw.

Minerale wol (MW): referentie

Hoewel minerale wol (MW) geen biobased materiaal is wordt het beschouwd om in de simulaties verderop een vergelijking te kunnen maken qua hygrothermisch gedrag met de biobased isolatiematerialen, omdat minerale wol een goed gekend bouw materiaal is. MW is namelijk één van de meest courant gebruikte isolatiematerialen in de huidige bouwsector, zo blijkt ook uit de studie van de cases van BLAF architecten. Een belangrijk verschil met biobased materialen is dat MW onvoldoende hygroscopisch is en daarom in principe een dampscherm vereist in de wandopbouw (Buildwise, 2020). Het is dus ook een dampopen materiaal en mag in geen enkel geval nat worden (Steskens et al., 2013).

Cellulose (CEL)

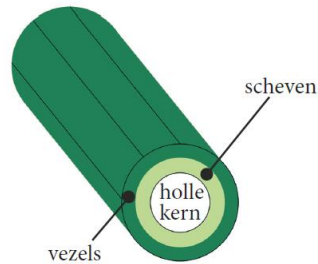
Ook cellulose zal beschouwd worden in de simulaties. Het is een veelgebruikt materiaal in de houtskeletbouw en is doorgaans goed gekarakteriseerd in de Delphin materialenbank. In de praktijk van BLAF wordt het eerder in de gesloten wandopbouwen gebruikt, vanwege de vochtgevoeligheid van het materiaal. Via de simulaties kan een vergelijking tussen de verschillende opbouwen worden gemaakt.

Kalkhennep (KH)

Kalkhennep is een isolatiemateriaal dat een sterke opmars kent in de duurzame bouwpraktijk. Ook in de praktijk van BLAF wordt het sinds enkele jaren ingezet. Omdat kalkhennep uitgebreid aan bod komt in dit onderzoek, wordt er verder ingezoomd op de eigenschappen van dit atypisch composietmateriaal.

- **Samenstelling en vorm van kalkhennep**

De **hennepscheven** (Figuur 41) worden gewonnen door het houterige deel van de steel van de hennepplant fijn te hakken. Hennep is een snelgroeiend gewas met een oogstcyclus korter dan zes maanden en vergt geen hoge grondkwaliteit, waardoor het vaak lokaal beschikbaar is en kan geteeld worden zonder pesticiden.



Figuur 41: De steel van de hennepplant met scheven en daarrond de vezels (VLAIO, 2020).

Er zijn verschillende redenen waarom kalk het meest geschikte **bindmiddel** voor kalkhennep is (Evrard & De Herde, 2010). De hoge dampdoorlatendheid maakt een volledige droging mogelijk en de open poriënstructuur laat het water door. De hoge pH-waarde beschermt tegen aantasting door schimmels en bacteriën en de flexibiliteit (lage elasticiteitsmodulus) van kalk zorgt voor een verhoogde bestendigheid tegen scheurtjes en impact. Tot slot bereikt men zo een lagere warmtegeleidingscoëfficiënt dan wanneer men cement als bindmiddel zou kiezen. Typisch wordt er gekozen voor hydraatkalk of luchtkalk in Vlaanderen, de lage vorstbestendigheid en begindruksterkte worden gecompenseerd door het toevoegen van hydraulische bestanddelen, waardoor echter het dampopen karakter en de flexibiliteit afnemen (VLAIO, 2020).

Het kalkhennepmengsel wordt verwerkt in **verschillende vormen** gaande van prefab geperste blokken – zonder een CO₂-intensief bakproces (Buildwise, 2020) – tot ter plaatse aangebrachte mengsels: nat gestort, gespoten (voornamelijk in Wallonië en Frankrijk) of droog ingeblazen. Deze worden gestort in een tijdelijke (OSB) of permanente bekisting, waarbij materialen zoals de houtvezelplaat, riet, bamboe, bestaand metselwerk of magnesiumoxideplaten frequent worden gebruikt (VLAIO, 2020). Bij voorkeur blijven beide zijden dampopen.

- **Einde levensduur en LCA**

Wanneer kalkhennep einde gebruik is in een gebouw is het bovendien makkelijk te hergebruiken, recycleren en te verwijderen, hetgeen veelbelovend is voor de renovatie van bijvoorbeeld erfgoed (Evrard & De Herde, 2010). Wanneer het niet hergebruikt zou worden in de bouwsector, wordt het doorgaans gebruikt als grondaanvulling, lichtgewicht aggregaat of zelfs grondverbeteraar om de pH-waarde van de bodem te verhogen (Ip & Miller, 2012).

Resultaten van Life Cycle Assessment (LCA) onderzoek tonen aan dat kalkhennep in staat is om tot 1.84 kgCO₂/kg op te slaan (Ip & Miller, 2012). LCA-onderzoek naar wandopbouwen uit kalkhennep wijzen op waarden van -26.52 kgCO_{2e} (CO₂-equivalenten) voor een wand van 30cm met 3cm kalk-zandpleister aan beide zijden en -48.45 kgCO_{2e} voor een wand van 55cm met 3cm kalkpleister aan elke zijde. Deze waarde is het resultaat van de CO₂-opslag door de hennep tijdens het groeiproces, maar ook van het gebruik van kalk. Hoewel de productie van kalk CO₂ uitstoot kan luchtkalk – in tegenstelling tot cement – tijdens zijn gebruiksduur tot 90% van deze CO₂ opnieuw opnemen via carbonatatie en vormt zo een gesloten kalkcyclus (Berge, 2009).

- **Algemene eigenschappen**

Twee bepalende parameters voor de eigenschappen zijn de porositeit en densiteit of dichtheid ρ van het kalkhennep mengsel. In de literatuur zien we hier duidelijk een vrij grote spreiding op de resultaten, respectievelijk variërend tussen 60-90% (hoe minder verdichting, hoe hoger de porositeit) en 400-600 kg/m³ doorgaans (Seng et al., 2019; VLAIO, 2020). Echter worden in de huidige bouwpraktijk in Vlaanderen typisch lichtere mengsels gebruikt, gemiddeld naar schatting 350 kg/m³ (VLAIO, 2020)..

Hoewel de mechanische eigenschappen van kalkhennep niet toereikend zijn om als een structureel materiaal te worden beschouwd, is het wel zelfdragend met een mechanische weerstand van 0.5 tot 1 MPa en elasticiteitsmodulus van 0.05 tot 0.1 GPa (Evrard, 2008). Brzyski et al. (2020) toonden bovendien aan dat de grootte van de scheven ook een impact heeft op de eigenschappen van het mengsel: hoe fijner de scheven, hoe hoger de sterkte, waterabsorptiecoëfficiënt, waterdamp-doorlatendheid en λ -waarde maar hoe lager de specifieke warmtecapaciteit.

- **Hygrothermische eigenschappen: warmteopslag en warmtetransport**

De warmtegeleidingscoëfficiënt of λ -waarde hangt af van een aantal factoren (Buildwise, 2020). Zo zal een hogere dichtheid en verdichting leiden tot een hogere λ -waarde (wegens minder lucht), zullen prefab blokken voor dezelfde dichtheid een lagere λ -waarde halen en zal de loodrechte oriëntatie van het proefstuk (verdichting loodrecht op de richting van de warmtestroom, d.i. een muurelement) leiden tot een hogere dichtheid en λ -waarde dan een parallelle oriëntatie (vloer- of dakelementen).

Logischerwijs zal de λ -waarde ook stijgen met de relatieve vochtigheid. Typische waarden variëren tussen 0.056 en 0.100 W/mK (To Bio or not to Bio, 2024). Bovendien wijst de hogere spreiding van onderzoeksresultaten van Palumbo et al. (2018) er mogelijks op dat kalkhennep een verhoogde gevoeligheid kent voor variaties in de vochtigheid. Bij verzadiging van het materiaal kan de λ -waarde toenemen tot het vier- of vijfvoud van de droge waarde (VLAIO, 2020). Naast de voelbare warmte is er in principe ook latente warmte door de condensatie van vocht in een constructie, maar dit heeft in de praktijk weinig invloed omdat dit vocht op zich ook weer verdampt en is dus verwaarloosbaar. De λ -waarde volstaat voor de karakterisatie van het warmtetransport (Buildwise, 2020).

Wat betreft de warmteopslag wordt er gekeken naar de specifieke warmtecapaciteit en thermische inertie van kalkhennep. De specifieke warmtecapaciteit c schommelt in de literatuur tussen 1200 en 1600 J/kgK. Voor de inertie is de diffusiviteit α is erg laag, wat betekent dat de temperatuurwijzigingen doorheen het materiaal ook traag zullen verlopen (Evrard, 2008). Concreet zal de warmte of koude van de buitenomgeving zich slechts traag voortplanten naar binnen toe. De effusiviteit β is dan weer doorgaans lager dan metselwerk, maar hoger dan de klassieke isolatiematerialen. Hierdoor is het minder goed in staat om warmte uit te wisselen met de omgeving dan metselwerk of beton, wat in de zomer nadelig is om koelte op te slaan (Buildwise, 2020). Er vindt dus zowel een faseverschuiving van 15 uur plaats (tegenover 5 uur in minerale wol) – tussen de piek in buitentemperatuur en het moment waarop die de binnenomgeving bereikt – als een demping tot 92%, vergeleken met slechts 38% in minerale wol (Lawrence et al., 2013).

Hoewel de thermische inertie van kalkhennep dus goed is, is het doorgaans niet bepalend voor het zomercomfort van een gebouw omdat het merendeel van de warmte niet via de muren maar via de beglazing het huis binnentreedt (Buildwise, 2020). Een open vraag is ook of thermische inertie in het toekomstig klimaat wel wenselijk is, aangezien de warmte eens ze binnen is weer moeilijk buiten raakt. Hierop speelt BLAF in door met een lichte binnenschil te werken en thermische inertie aan de buitenzijde te concentreren via het metselwerk.

- **Hygrothermische eigenschappen: vochttopslag en vochttransport**

Het dampdiffusieweerstandsgetal μ ligt typisch tussen 1 en 3 (To Bio or not to Bio, 2024). De hogere waarden in literatuur kunnen worden verklaard door een hogere dichtheid en dus lagere porositeit (Buildwise, 2020). De vochttopslag wordt uitgedrukt via de hygroscopische sorptie en hangt ook af van de bouwmethode. Over het algemeen is de vochttopslag gelijkaardig, maar ligt hoger indien het gaat om prefab blokken of het mengsel meer wordt verdicht, indien kleinere scheven worden gebruikt en als de hoeveelheid kalkbindmiddel hoger ligt (Buildwise, 2020). Vergeleken met andere materialen wordt kalkhennep gezien als een sterk hygroscopisch materiaal: bij normale relatieve vochtigheden (30-60%) wordt er reeds een aanzienlijke hoeveelheid vocht opgeslagen uit vochtige lucht (Buildwise, 2020).

Dit is positief voor de vochtbuffering, uitgedrukt via de *Moisture Buffer Value* (MBV), waarvoor de literatuur waarden geeft tussen 1.9 en 3.5 g/m²%RV – geïnclassificeerd als *excellent* volgens het NORDTEST protocol (Rode et al., 2007). De waterabsorptie van kalkhennep vertoont twee fases: eerst een korte maar zeer sterke wateropname van ca. 3 uur, en daarna een langer deel met veel lagere wateropname. Wanneer kalkhennep in contact komt met waterinfiltraties betekent dit dat er zeer snel en veel water kan getransporteerd worden, waardoor slagregenbescherming erg belangrijk is (Buildwise, 2020). De waterabsorptiecoëfficiënt A_w die werd teruggevonden in de literatuur varieert tussen 0.050 en 0.150 kg/m².√(s).

Wat betreft de droging zijn er verschillende factoren die van belang zijn zoals het seizoen de kalkhennep geplaatst wordt, de bezonning van de gevel, de bewoning van het huis en de dikte van het isolatiepakket (Buildwise, 2020). Dampremmende lagen zijn logischerwijs uit den boze gezien ze het hygroscopisch gedrag belemmeren en er mag zeker nooit langs twee zijden dampdicht worden afgewerkt. Droging gebeurt voornamelijk naar de binnenomgeving, zoals typisch is voor dampopen materialen met een hoge dampdoorlatendheid (De Mets et al., 2023).

- **Conclusie**

Het grootste voordeel van kalkhennep is het hygrothermisch gedrag, de combinatie van dynamisch gedrag en de invloed van inertie (vocht en warmte). Hoewel de stationaire U-waarde in een kalkhennep wand niet de laagste is vergeleken met de klassieke isolatiematerialen, levert de inertie van kalkhennep via simulaties tot wel 10% energiebesparing op per jaar wanneer er rekening wordt gehouden met dynamische parameters zoals zon, wind en regen (Evrard, 2008).

Dit duidt nogmaals op het belang van dynamische hygrothermische simulaties (Lawrence et al., 2013). Ook een weldoordacht ontwerp is cruciaal, om de blootstelling aan (slag)regen te beperken. Het grootste aandachtspunt voor kalkhennep blijft namelijk de overmatige opname van vocht, met verminderde thermische prestaties en zelfs degradatie tot gevolg. Om die redenen is het ook geschikter als binnenisolatie dan als buitenisolatie, waar conventionele isolatiematerialen zich meer robuust tonen (De Mets et al., 2023).

4.3. Degradatie

De vochtgevoeligheid van biobased isolatiematerialen werd al enkele keren aangehaald als een aandachtspunt. Hoewel ze dankzij hun hygroscopisch karakter vocht bufferen, herverdelen en drogen is vochtaccumulatie een aandachtspunt. Bij hoge vochtgehaltes is er het gevaar van schimmelvorming, al beschermt de pH-waarde van kalkhennep tegen schimmels en bacteriën (Evrard & De Herde, 2010). Bij cellulose wordt het fenomeen van *caking* waargenomen indien het vochtgehalte 0.35 kg/kg overschrijdt (Langmans, 2013). Hierbij zorgt het vocht voor het vormen van klompen in de cellulose, wat kan leiden tot het inzakken van de isolatie in de spouw, hetgeen problematisch is voor de isolatiewaarde.

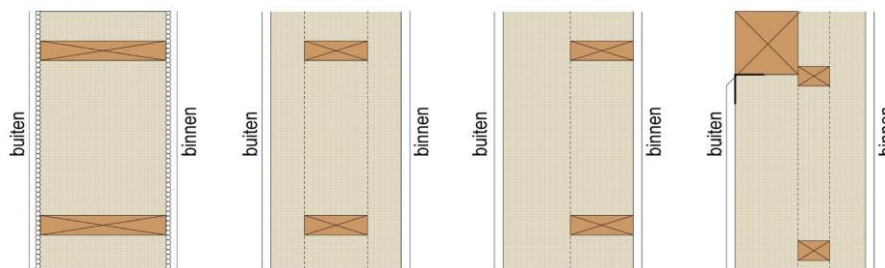
Naast vochtaccumulatie en degradatie speelt ook de thermische prestatie van het isolatiemateriaal een belangrijke rol. Door hun hygroscopische aard zullen biobased isolatiematerialen typisch meer vocht bevatten, resulterend in een hogere λ -waarde en hogere warmtestroom (meer transmissieverliezen). Via de HAM-simulaties kunnen deze fenomenen dynamisch in kaart worden gebracht.

5. Houtskelet

In de wandopbouw van BLAF wordt aan de binnenzijde van het metselwerk gewerkt met een houtskelet. Het houtskelet is dragend wanneer de verdiepingvloeren mee worden afgedragen, dit is echter niet altijd het geval. In enkele renovatieprojecten wordt er een niet-dragend stijl- en regelwerk met isolatie opgevuld. Eerst wordt er ingegaan op koudebruggen en lokale effecten door de houten stijlen. Vervolgens wordt er in meer detail stilgestaan bij houtdegradatie. Dit is een aandachtspunt wegens biobased isolatie als binnenisolatie en de vochtgevoeligheid van hout.

5.1. Koudebruggen en lokale effecten door de houtstructuur

De aanwezigheid van het houtskelet in de isolerende laag heeft een verstorend effect op het 1D-warmte- en vochttransport. Zo zorgt het hout met zijn hogere λ -waarde voor koudebruggen, weliswaar met een beperkte impact. Dit blijkt uit de waarde van de lineaire thermische transmissiecoëfficiënt $\Psi < 0.01$ W/m.K uit onderzoek op kalkhennepwanden met houtskelet (Grudzińska & Brzyski, 2019). De beste thermische prestaties worden bekomen voor een intern houtskelet, waarbij het skelet centraal zit in de isolatielaag en niet uitgelijnd is met één van beide zijden (Figuur 42) – wat vaak gebeurt om praktische redenen (VLAIO, 2020). Echter bestaat er geen consensus in de literatuur, want ook de uitlijning met het binnenmilieu wordt als meest performante opstelling benoemd (Grudzińska & Brzyski, 2019).



Figuur 42: Posities van het houtskelet bij ter plaatse gestorte kalkhennep (VLAIO, 2020).

Ook wat betreft het hygrisch gedrag zorgt het houtskelet voor lokale effecten. De houten stijlen verhinderen namelijk lokaal de uitdroging van de binnenafwerking of het midden tussen twee stijlen kan de meest vochtige plaats zijn aan de koude zijde van de isolatie omdat het dampopen isolatiemateriaal de dampstroom het minste afremt (Coupillie et al., 2017). Al deze lokale verstoringen en effecten kunnen in bepaalde gevallen een reden zijn voor de nood aan 2D simulaties om mogelijke degradatie-fenomenen correct in te kunnen schatten.

5.2. Degradatie

Koudebruggen en binnenisolatie kunnen leiden tot een verhoogde kans op degradatie. Om het risico vooraf te kunnen voorspellen wordt er klassiek gebruik gemaakt van verschillende degradatiemodellen om het complexe proces van houtrot, schimmelvorming of zelfs biodegradatie door organismen in te schatten. Deze modellen maken gebruik van de oppervlakte- of materiaaltemperatuur en relatieve vochtigheid als parameters, maar voor elk aantastingsmechanisme zijn de kritieke waarden verschillend (Vereecken & Roels, 2012). Het nadeel is dat de modellen gebaseerd zijn op experimenteel werk of aannames. Sommige modellen beschouwen de derde belangrijke invloedsfactor, de blootstellingsduur, niet (Vereecken & Roels, 2012). Ook speelt de aanwezigheid van een voedingsbodem een belangrijke rol. De modellen worden overlopen in toenemende mate van complexiteit.

Temperatuurfactor

Een eerste eenvoudig en rudimentair model, IEA-Annex 14 (IEA, 1991), werkt met de temperatuurfactor, waarbij via een temperatuurratio wordt gewerkt om degradatie in te schatten:

$$\tau = \frac{\theta_{s,min} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \geq 0.7$$

Hierbij staat $\theta_{s,min}$ voor de minimale oppervlaktetemperatuur (°C) van het binnenoppervlak, θ_i en θ_e zijn de binnen- en buitentemperatuur (°C). Het ratio 0.7 komt overeen met een risico van 5% op schimmel. Het nadeel van dit model is dat de vochtigheid slechts indirect in beschouwing wordt genomen (Vereecken & Roels, 2012).

Time-of-wetness (TOW)

Een ander relatief simplistisch model is *Time-of-wetness* (TOW). Hierin wordt de tijd dat het materiaal bovenmatig vochtig is vergeleken met de totale beschouwde periode volgens de volgende formule:

$$TOW = \frac{\text{cyclic wet period } (RH \geq RH_{crit})}{\text{cyclic period (wet + dry)}}$$

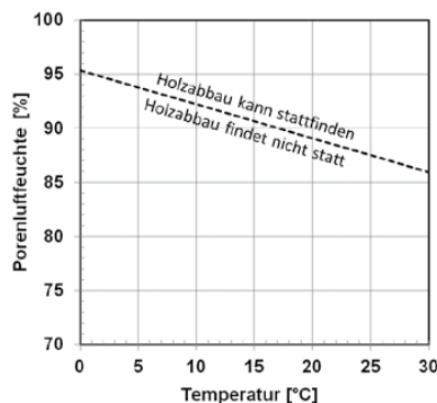
Enkele nadelen van deze methode zijn dat er geen gradatie in gunstige relatieve vochtigheden voor schimmelgroei wordt voorzien, geen criterium wordt opgelegd aan de waarde van TOW en tot slot dient het criterium dan ook niet op zichzelf gebruikt te worden (Vereecken & Roels, 2012). Het kan echter wel een eerste indicatie geven van welk deel van het jaar het materiaal bovenkritisch vochtig is. Voor degradatie wordt bijvoorbeeld een RH_{crit} van 95% gehanteerd (Vereecken, Van Gelder, et al., 2015). Viitanen hanteert het criterium TOW 25/10 voor massief hout, waarbij een vochtgehalte van 25 m% bij een temperatuur hoger dan 10°C maximaal 168 uur per jaar (1 week) mag optreden om houtrot te vermijden (Viitanen, 1996).

WTA Merkblad 6-8-15

Een iets meer geavanceerde variant op TOW is de curve uit WTA Merkblad 6-8-15, waarbij de bovenkritische relatieve vochtigheid (RH) ook afhankelijk wordt van de temperatuur T (Kehl, 2013). Via het aantal overschrijdingsuren kan ook hier een ratio voor bovenkritische vochtigheid worden bepaald. De vergelijking van de rechte wordt als volgt bepaald:

$$RH = 95 - \frac{15}{50} * T$$

Een groot nadeel van deze methode blijft dat er opnieuw geen gradatie in gunstige condities voor degradatie wordt gemaakt – de afstand boven curve in Figuur 43 wordt niet beschouwd (Vanderschelden & Van Den Bossche, 2020).



Figuur 43: Curve voor bovenkritische relatieve vochtigheid uit WTA Merkblad 6-8-15.

VTT-model

Het VTT-model is een empirisch model om het risico op schimmelvorming te bepalen gebaseerd op een beperkt aantal experimenten via een te berekenen schimmelindex M (Hukka & Viitanen, 1999). De grootste beperking van het model is dat het louter is opgesteld voor sparren en zachthout van dennen (Vereecken & Roels, 2012). Om die reden werd een geüpdatet VTT-model uitgebracht (Viitanen & Ojanen, 2007), waarin een uitbreiding werd voorzien voor andere bouwmaterialen via vier *mould sensitivity classes* (om niet alle materialen te hoeven beschouwen) en een aantal mathematische aanpassingen. Echter vallen afwerkingsmaterialen nog steeds uit de boot en worden er tekortkomingen opgemerkt voor houtskeletwanden vanwege de fluctuerende randvoorwaarden (Vereecken & Roels, 2012). Daarom wordt dit model ook niet gebruikt om houtdegradatie te beoordelen in dit onderzoek.

Dose-response model

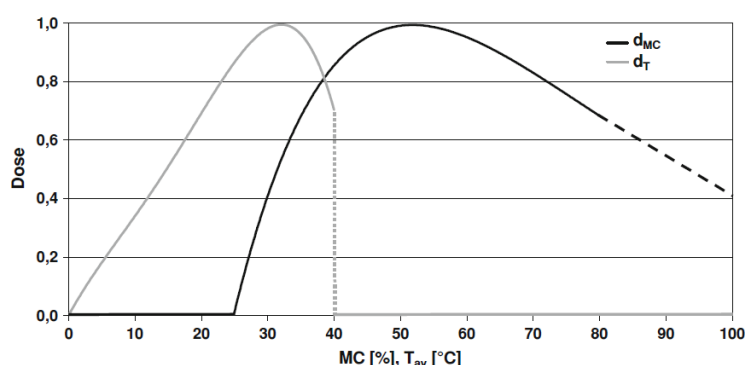
Het dose-response model reikt een directe relatie aan tussen de directe materiaaltoestand via het vochtgehalte (MC) en de temperatuur van het hout, met degradatie (Brischke & Rapp, 2008). Er is geen directe relatie tussen het klimaat en degradatie, maar steeds een invloed van het materiaal, vandaar dat er direct wordt gemonitord op het materiaal zelf. De dagelijkse dosis d wordt berekend op basis van een component d_{MC} op basis van het dagelijkse gemiddelde vochtgehalte in [%] en d_T op basis van de dagelijkse gemiddelde temperatuur in [°C] volgens de volgende formule (Brischke & Meyer-Veltrup, 2016; Brischke & Rapp, 2008):

$$d = \frac{a * d_T(T) + d_{MC}(MC)}{a + 1} \quad \text{voor } d_{MC} > 0 \text{ en } d_T > 0$$

$$d_{MC} = \begin{cases} 0, & MC < 25\% \\ e * MC^5 - f * MC^4 + g * MC^3 - h * MC^2 + i * MC - j, & MC \geq 25\% \end{cases}$$

$$d_T = \begin{cases} 0, & T < 0^\circ\text{C} \text{ of } T > 40^\circ\text{C} \\ -k * T^4 + l * T^3 - m * T^2 + q * T, & T > 0^\circ\text{C} \text{ en } T < 40^\circ\text{C} \end{cases}$$

Merk op dat in de oorspronkelijke publicatie bij de k-term een minteken ontbreekt. De waarden voor de factoren worden ter volledigheid hieronder opgelijst in Figuur 44.



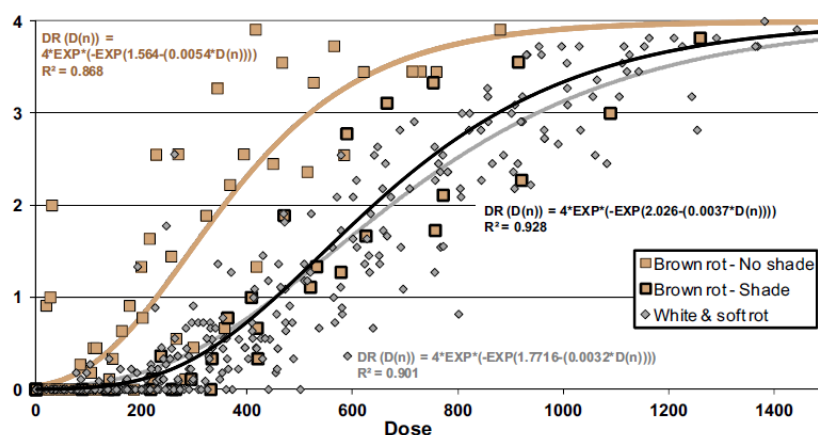
FACTOR	WAARDE
a	3.2
e	6.75E-10
f	3.50E-07
g	7.18E-05
h	7.22E-03
i	0.34
j	4.98
k	1.80E-06
l	9.57E-05
m	1.55E-03
q	4.17E-02

Figuur 44: d_{MT} en d_T in functie van MC en T op basis van de factoren (rechts) (Brischke & Rapp, 2008).

Met de totale dagelijkse dosis kan een inschatting van houtdegradatie worden gemaakt aan de hand van curves voor een *Decay Rating* (DR) voor n dagen. Gezien het specifieke karakter van bruinrot – typisch resulterend in snellere degradatie dan witrot of zachtrot – werd daarvoor ook een apart model ontwikkeld (Brischke & Meyer-Veltrup, 2016). Respectievelijk voor witrot/zachtrot en bruinrot wordt dit:

$$DR(d(n)) = 4 * \exp \left(- \exp \left(1.7716 - (0.0032 * d(n)) \right) \right)$$

$$DR(d(n)) = 4 * \exp \left(- \exp \left(1.564 - (0.0054 * d(n)) \right) \right)$$



Figuur 45: De curve met de Decay Rating (DR) voor witrot/zachtrot en bruinrot (Brischke & Meyer-Veltrup, 2016).

De waarden voor de *Decay Rating* op de verticale as in Figuur 45 worden uitgedrukt volgens EN 252:2014 op een schaal van 0 tot 4. Indien er gesimuleerd wordt over een periode van n = 365 dagen kan de curve hiertoe verschaald te worden. Om het risico op houtrot te beperken mag DR = 1 in principe niet overschreden worden gedurende een periode van 30 jaar.

DR	Classificatie
0	No attack
1	Slight attack
2	Moderate attack
3	Severe attack
4	Failure

Tabel 1: classificatie van Decay Rating (DR) volgens EN 252.

Een belangrijke opmerking bij het dose-response model is dat het gebaseerd is op empirisch onderzoek waar in de open lucht proefstukken werden blootgesteld aan degradatie. Mogelijks is dit niet 1 op 1 te vertalen naar hout omringd door isolatiemateriaal zoals in een houtskeletwand (en dus niet blootgesteld aan de lucht), maar dergelijke modellen bestaan momenteel nog niet.

Conclusie degradatiemodellen

Het probleem met alle modellen is dat de conclusie vaak samenhangt met het beschouwde degradatiemodel. Om een geïnformeerde keuze te maken tussen deze modellen en hun toepassingsgebied werden deze kort verkend via de relevante literatuur. Bovendien is de vergelijking tussen verschillende modellen lastig vanwege de modelspecifieke factoren. Het complexe proces van houtdegradatie blijft echter moeilijk te voorspellen via mathematische modellen. Een van de twistpunten is bovendien of en hoe periodes met ongunstige omstandigheden voor schimmeligroei moeten meegerekend worden, bijvoorbeeld als stagnatie of als achteruitgang van de schimmelpopulatie (Vereecken, Vanoirbeek, et al., 2015). Vanwege deze onzekerheden zullen een aantal houtdegradatiecriteria geëvalueerd worden.

6. Binnenafwerking

6.1. Dampopen bouwen

Tot slot is de binnenafwerking van groot belang voor het hygrothermisch gedrag van de wand, zoals eerder vermeld. Het algemene devies voor de binnenafwerking luidt: zo dampopen mogelijk. Op deze manier worden de vochtbufferende eigenschappen van de biobased isolatie optimaal benut (Vereecken, 2013) en wordt het risico op condensvorming verkleind. De lagere buffercapaciteit wordt weerspiegeld in een lagere MBV (Vereecken & Roels, 2015). Voor kalkhennep werd aangetoond dat enkel leempleister als afwerking geen reducerend effect had op de MBV (Latif et al., 2015).

Voor de binnenafwerking wordt vaak wordt de keuze gemaakt tussen pleister of bouwplaten of een combinatie van beide, zoals gipskartonplaten of platen uit houtachtige materialen (OSB, spaanplaat en houtvezelplaat). Het gevaar met sommige van die producten is dat ze een zeker niveau van dampdichtheid bezitten door een hoge dampdiffusieweerstand. Concreet voor kalkhennep wordt kalk- of leempleister aangeraden, en dient men gipskartonplaten of verflagen te vermijden (VLAIO, 2020).

Dit betekent echter ook dat een banale dampdichte verflaag door de bewoners het hygrothermisch concept van de dampopen wand teniet kan doen en toont aan dat ook de binnenafwerking een belangrijke functie vervult in de wandopbouw, meer dan louter esthetisch. De binnenafwerking is allesbepalend voor het dampopen karakter van de wand.

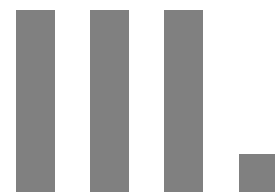
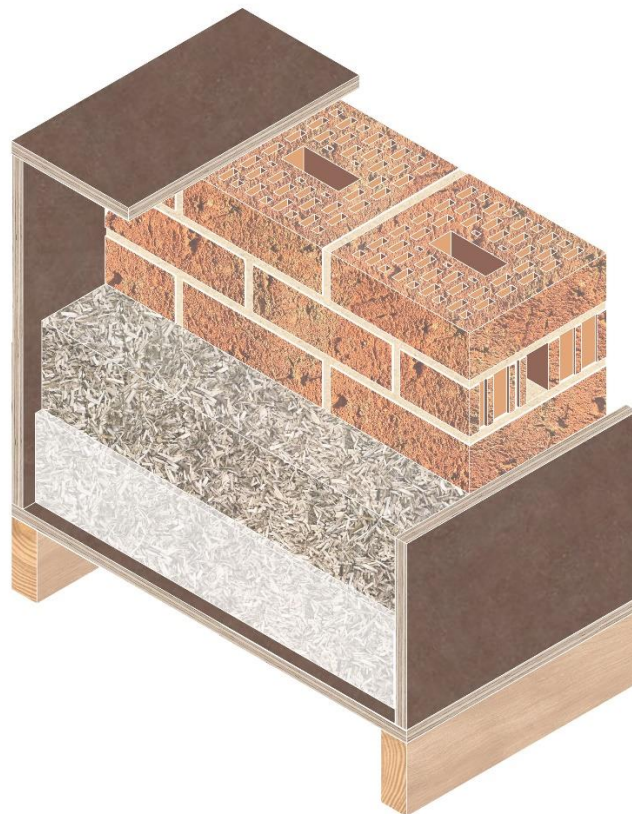
6.2. Degradatie

Een mogelijk risico voor de binnenafwerking is schimmelvorming op het oppervlak bij langdurige hoge vochtigheden. Een mogelijk evaluatiecriterium is het geüpdatet VTT-model (Viitanen & Ojanen, 2007). De evaluatie gebeurt aan de hand van een schimmelindex M zoals weergegeven in Figuur 46.

Index	Growth Rate	Description
0	No growth	Spores not activated
1	Small amounts of mold on surface (microscope)	Initial stages of growth
2	<10% coverage of mold on surface (microscope)	—
3	10%–30% coverage of mold on surface (visual)	New spores produced
4	30%–70% coverage of mold on surface (visual)	Moderate growth
5	>70% coverage of mold on surface (visual)	Plenty of growth
6	Very heavy and tight growth	Coverage around 100%

Figuur 46: Schimmelindex M in het geüpdatet VTT-model.

In het geüpdatet model werd een uitbreiding voorzien voor andere bouwmaterialen dan hout, gegroepeerd in vier *mould sensitivity classes* (Vereecken & Roels, 2012). Er worden echter geen afwerkingsmaterialen beproefd bij de experimentele basis van dit model. Conservatief kan er dus gekozen worden voor *very sensitive (vs)* als *mould sensitivity class* en D1 – *decline 0.1* als *mould decline rate class*. Zolang de parameters gelijk genomen worden, kan er op deze manier relatief gekeken worden om het risico op schimmelvorming tussen de wandopbouwen te vergelijken. Het dient nogmaals benadrukt te worden dat deze resultaten geenszins absoluut mogen worden geïnterpreteerd.



DEEL III – Experimenten

1. Labotesten: berekening van metselwerk testmuren met kalkhennep-isolatie

Om naast theoretische simulaties en de monitoring van een case study extra inzicht te verwerven in het hygrothermisch gedrag van de wandopbouw in de realiteit werd beslist om een aantal testmuren te bouwen om te beproeven in het Testcentrum voor Gevelelementen via berekeningstesten. De gebruikte materialen worden bovendien gekarakteriseerd via een capillaire absorptieproef.

1.1. Ontwerp van de testmuren

Om verschillende varianten te kunnen testen werd gekozen om de testmuren klein te houden qua formaat en in te zetten op voldoende verschillende wandopbouw. Bovendien kunnen de muren zo ook gewogen worden om het verloop van opgenomen vocht bij het testen in kaart te brengen. Daartoe diende het gewicht beperkt te worden tot 150 kg. Rekening houdend met de verschillende baksteenformaten, werd gekozen voor testmuren van ca. 60 x 40 cm in aanzicht. De breedte werd bepaald op basis van de maat van 2 of 3 strekken, naargelang het type baksteen. Het ontwerp van de testmuren wordt hierna laagsgewijs besproken, van buiten naar binnen in de wandopbouw.

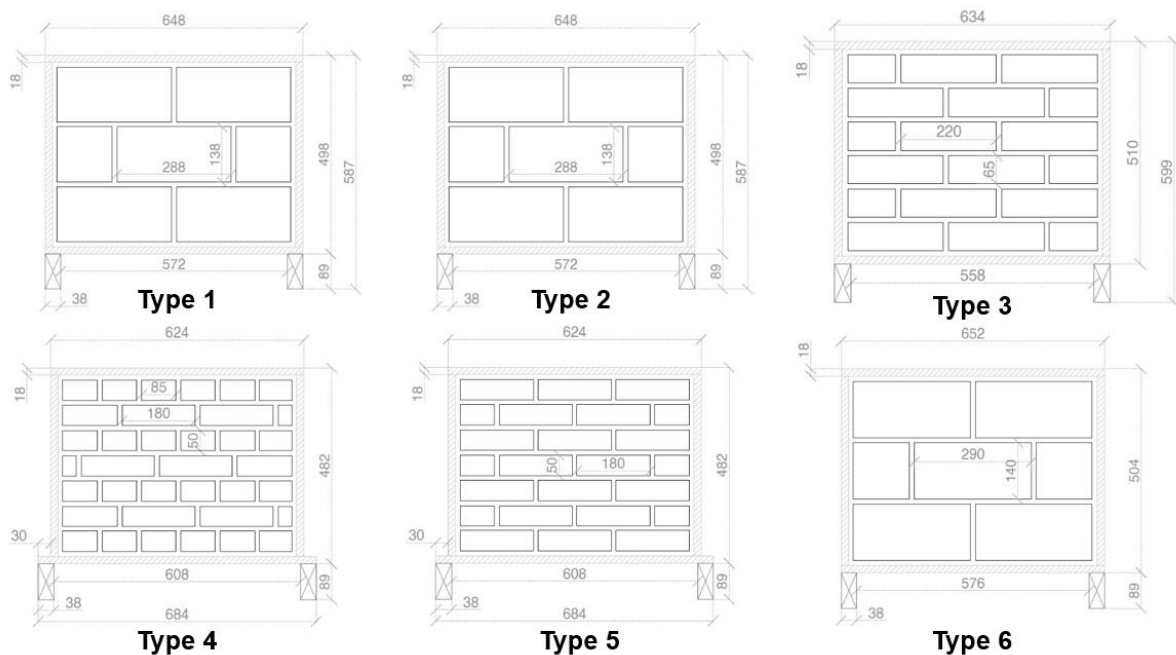
Bakstenen en metselwerkverbanden

Uit de analyse van de praktijk van BLAF werden uiteindelijk 6 types metselwerk gekozen, voorgesteld in Tabel 2. BLAF werkt vaak met gevelstenen in snelbouwformaat, gebakken uit klei voor gevelstenen en met perforaties. Een veelgebruikt voorbeeld is de Decobloc serie van Ploegsteert. Deze wordt in 9 (type 1) en 14 (type 2) cm getest, om de impact van metselwerkdikte te vergelijken. Ook wordt een MX-steen (type 3) getest uit het gamma van Ploegsteert. Dit is een steen die vaak terugkeert in de praktijk van BLAF architecten die bovendien qua opbouw erg lijkt op hun eigen stenen - de BLAF Bricks - en resulteert in een muurdikte van ca. 22 cm, waarmee ook geperforeerd steens metselwerk getest wordt.

Tabel 2: Overzicht van de metselwerkblokken gebruikt voor de 6 types metselwerk en hun afmetingen.

Type	Illustratie	Steentype (fabrikant)	Afmetingen L x B x H (in mm)
Type 1		Decobloc (Ploegsteert)	288 x 88 x 138
Type 2		Decobloc (Ploegsteert)	288 x 138 x 138
Type 3		MX (Ploegsteert)	220 x 217 x 65
Type 4 en 5		Boomse Recupsteen type rijnvorm (-)	ca. 180 x 85 x 50
Type 6		Carbonsteen (Carbstone)	290 x 190 x 140

De laatste 3 types metselwerk zijn allemaal massieve metselwerkstenen. Zo wordt er met Boomse recuperatiesteen van het formaat “rijnvorm” - afkomstig van een afbraakwerf uit het Gentse - in 2 verbanden een steense muur van 18 tot 19 cm gemetseld. Zo wordt een voor de praktijk alomtegenwoordig kruisverband (type 4) uitgevoerd, alsook een halfsteens verband (type 5) bestaande uit 2 parallelle rijen strekken per laag. Daarbij ontstaat een doorlopende hartvoeg, die vanuit het onderzoek van Calle mogelijks een belangrijke impact kan hebben op de vochtinfiltratie (Calle & Van Den Bossche, 2021). Tot slot worden ook testmuren met een muurdikte van 19 cm opgetrokken met de innovatieve Carbonsteen van Carbstone (type 6). Een beschrijving van dit materiaal werd gegeven in paragraaf 2.1.2. Alle metselwerkverbanden worden getoond in Figuur 47.



Figuur 47: Aanzichten van de 6 types metselwerkverbanden in de testmuren.

Mortel

Deze 6 types metselwerk worden in 3 reeksen uitgevoerd, resulterend in 18 testmuren. Zo wordt elk type metselwerk getest met pure kalkmortel, bastaardmortel (half cement, half kalk) en cementmortel. Zo wordt er naast het verschil in baksteendikte, metselwerkverband en vol/hol metselwerk ook gekeken naar de impact van het type mortel. Vaak wordt in de bouwpraktijk (vooral bij renovaties), wanneer men met kalkmortel werkt, cement toegevoegd voor de verwerkbaarheid (van Balen et al., 2003). Daarom werd er gekozen om ook bastaardmortel te testen.

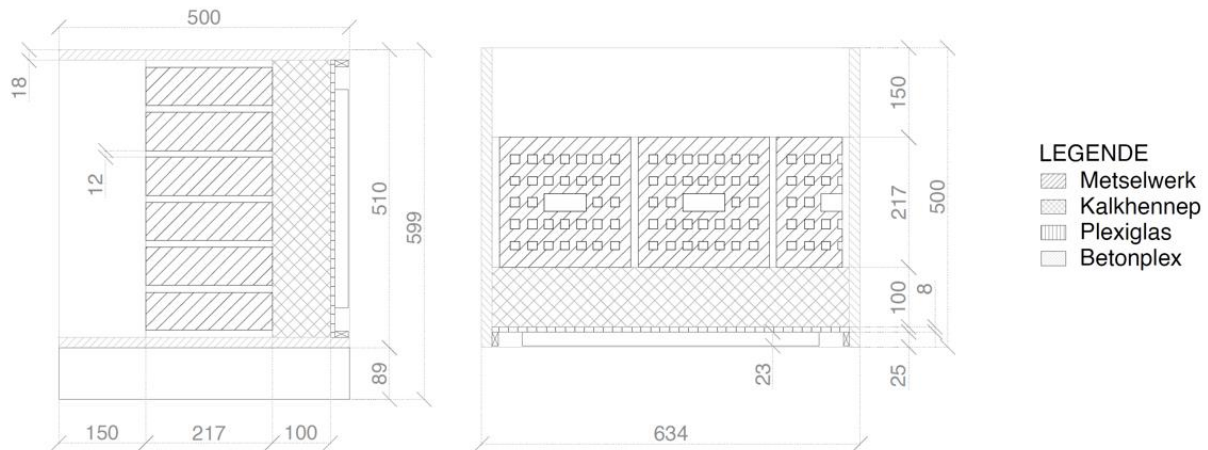
Kalkhennep

Achter het metselwerk wordt vervolgens in elke testmuur een laag van 10 cm kalkhennep voorzien van het type CaNaDry van Exie, een droog te storten mix die ook representatief is voor de praktijk van BLAF architecten (Exie, 2024). Zo kan het effect van eventuele regendoorslag in de isolatie worden bestudeerd. BLAF gebruikt bovendien een vuistregel waarbij men ervan uitgaat dat de eerste 10 cm in een kalkhennepwand het vocht voldoende kan bufferen. Hierdoor zou het houtskelet - dat op enige afstand achter het metselwerk staat – niet aangetast worden door vochtproblemen. Deze vuistregel zal ook worden geëvalueerd in de testen en simulaties.

Binnenafwerking

In de praktijk van BLAF wordt het houtskelet aan de binnenzijde klassiek dichtgemaakt met houtvezelplaten of OSB, al dan niet met een dampscherm. De binnenafwerking bestaat dan uit gipskartonplaten of een pleisterlaag. In de testopstelling wordt echter gekozen om de kalkhennep laag af te werken met een plexiglas plaat zoals afgebeeld in Figuur 48. Op deze manier is het mogelijk om eventuele regendoorslag ook al tijdens de test visueel op te merken.

Tot slot worden de testmuren ingewerkt in een betonplex omkasting met houten steunblokken als voet.



Figuur 48: Dwarse snede en plan van muur type 3 met de 10 cm kalkhennep-isolatielaag en plexiglas afwerking.

1.2. Uitvoering van de testmuren

Op 12 en 13 maart 2024 werden in het Testcentrum voor Gevelelementen door 2 metselaars van Denys 18 testmuren gemetseld zoals hiervoor beschreven. Om representatief te zijn voor de bouwpraktijk, was het belangrijk dat de metsers zowel ervaring hadden in restauratie (met kalkmortel) als in nieuwbouw.

Receptuur van de gebruikte mortels

De cementmortel in Figuur 49 werd aangemaakt op basis van grijs cement CEM II/C-M (S-L) 32.5 N. In de betonmixer wordt 10 tot 11 liter water samen met 75 ml luchtbelvormer, in de volksmond gekend als "mortelvet", gemengd met 40 kg zand. Daar voegt men al draaiend 1 ½ emmer van 10 liter grijs cement aan toe. De metselaars beschreven het draaien van de mortel eerst in grote vallende klompen, maar naarmate de mortel plastificeert gebeurt dit meer geleidelijk en zo voelen zij aan wanneer een mortel klaar is. Dit was steeds na 3 tot 4 minuten.



Figuur 49: De finale cementmortel, opmerkelijk donkerder van kleur door toedoen van het grijs cement.

Voor de bastaardmortel in Figuur 50 werd gewerkt met een 1:1 verhouding voor kalk (Saint-Astier NHL 3.5) en wit cement CEM II/B-LL 42.5 N, samen goed voor $\frac{3}{4}$ van een emmer van 10 liter. Hier wordt 5 tot 6 liter water aan toegevoegd alsook 40 kg rijnzand 0/2. Voor een goede verwerkbaarheid wordt 75 ml luchtbelvormer (Sika Airmix) toegevoegd. Eerst voegt men aan de betonmixer het water en de luchtbelvormer toe, daarna het zand en tot slotte cement en kalk. Dit laat men draaien gedurende 3 tot 4 minuten tot de mortel voldoende geplastificeerd is.



Figuur 50: Aanmaak van de bastaardmortel in de betonmixer en rechts de finale, gladde specie.

Voor de pure kalkmortel in Figuur 51 werden kant- en klare zakken van leverancier Arte Constructo gebruikt. Het gaat om de Unilit 1320 metsel- en voegmortel, op basis van het bindmiddel Unilit fen xa (natuurlijke hydraulische kalk) en voorgemengd met zand waardoor er enkel water moet worden toegevoegd. De technische fiche kan worden teruggevonden in bijlage A.1. Deze zakken van 25 kg werden met 5 tot 6 liter water gemengd in een kuip en gemengd met een mortelmixer. Het mengen verloopt typisch in 2 fasen: eerst wordt de mortel op "deegbolletjes" getrokken, na ca. 3 minuten mengen verkrijgt men tot slot een gladde specie. Deze is klaar voor gebruik vanaf er een glans op komt. De mortel werd aangemaakt in het bijzijn van de leverancier, die via zijn expertise met het product een representatieve mortel kon afleveren. Belangrijk om te vermelden is dat de doorwinterde metselaars sceptisch waren over de verwerkbaarheid van een pure kalkmortel, maar aangenaam verrast waren over de finale gladde mortelspecie. Dit soort misverstanden in de praktijk leidt er soms nodeloos toe dat er naar cement wordt gegrepen in plaats van pure kalkmortel.

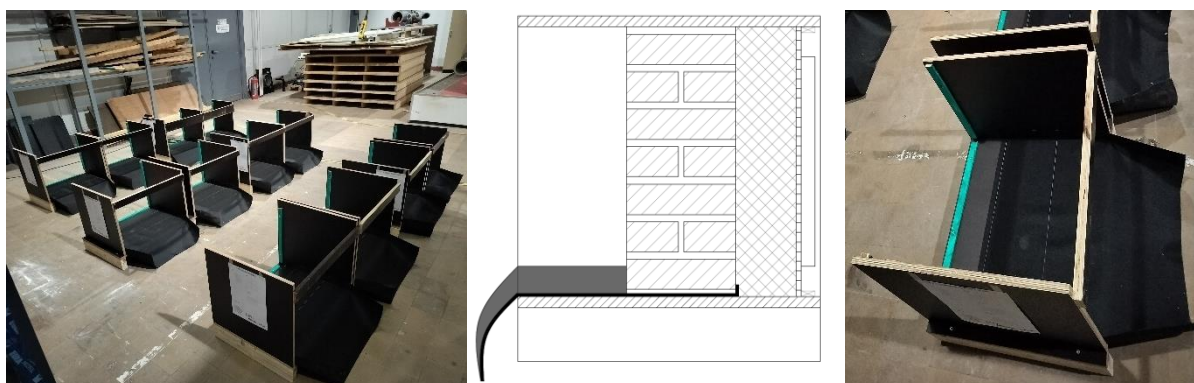


Figuur 51: Aanmaak van de pure kalkmortel met links de "deegbolletjes" en rechts de finale, gladde specie.

Algemeen dient opgemerkt te worden dat het gebruikte rijnzand gezien de periode van het jaar relatief nat was, waardoor de hoeveelheden aanmaakwater kunnen verschillen naargelang het zomer of winter is. Er werd in het kader van dit onderzoek gekozen om de metsers en leverancier de hierboven beschreven recepturen te laten bepalen op basis van hun expertise en ervaring, om een maximale representativiteit met de werkelijkheid te bekomen.

Uitvoeringswijze

Eerst wordt in de betonplex kasten nog een EPDM-membraan aangebracht met zijdelingse opstanden dat doorloopt tot onder het metselwerk zoals in Figuur 52. Zo wordt er goede afwatering verzekerd naar de goot van de testwand en bovendien dient het membraan om te vermijden dat er ongewenst stagnerend water van de beregening kan infiltreren langs de bodem van de kast. Merk op dat de kasten nog niet volledig worden dichtgemaakt om de metselaars genoeg bewegingsvrijheid te geven. Daarom wordt de bovenkant nog niet bevestigd, in de plaats daarvan wordt een tijdelijke lat bevestigd voor de stevigheid.



Figuur 52: EPDM-afdichting die onder het metselwerk komt tegen ongewenste waterinfiltratie.

Op 12 maart worden de muren in kalkmortel en bastaardmortel uitgevoerd en op 13 maart de muren in cementmortel. De metselaars werken vanaf de zijde waar de isolatie tegenkomt. Het metselwerk wordt niet extra nat gemaakt of bevochtigd. Het proces wordt getoond in Figuur 53. Eerst wordt een mortelbed voorzien als lintvoeg boven op de EPDM-afdichting. De bakstenen worden telkens in de specie geplaatst waarbij men op de koppen meestal met het truweel al mortel aanbrengt – dit is de methode die de beste verdichting van de stootvoegen garandeert (Kahangi Shahreza et al., 2021). De stootvoegen worden vervolgens verder gevuld door mortel neer te gooien van ca. 30 cm hoogte en verder aan te dammen met het truweel. Er wordt meegaand opgevoegd door met een voeger de uitpuilende mortelresten af te krabben (er worden echter geen voegen uitgekrabd) en met de voeger opnieuw het residu aan te dammen in overblijvende gaten. Tot slot worden de voegen geborsteld. Bovenaan wordt een mortellaag aangebracht tot op de hoogte van de zijwanden.



Figuur 53: Fotoverslag van het metselen van de testmuren met de belangrijkste stappen uitgelicht.

Specifiek voor de steense muren in recuperatiesteen dient opgemerkt te worden dat de hartvoeg (de voeg die ontstaat midden in de muur tussen 2 bakstenen) typisch niet wordt gevuld met mortel, dit wordt dan ook zo toegepast in de muren van type 4 (kruisverband). In de type 5 muren (halfsteens verband) werd aan de metselaars gevraagd om de hartvoeg weldegelijk op te vullen, om het effect van een continue metselwerkvoeg in het midden van de steense muur na te bootsen.

Het verschil is duidelijk zichtbaar in Figuur 54. Bovendien moet opgemerkt worden dat bij het metselen vaak de mortelrupsen uitpuilen. Deze worden dan wel verwijderd aan de zichtzijden, maar in het midden van de muur gebeurt dit doorgaans niet en zo ontstaan alsnog mortelbruggen.



Figuur 54: Niet-gevulde hartvoeg in type 4 muur (links) en opgevulde hartvoeg in type 5 muur (rechts).

Theoretisch en praktisch uitgevoerd voegratio

Om de resultaten te kunnen vertalen naar de praktijk of te vergelijken met andere berekeningen wordt het ratio tussen bakstenen en voegen voor alle gevelverbanden bepaald. Tabel 3 hieronder toont de theoretische (zoals op plan) en uitgevoerde (rekening houdend met het afkitten van de onderrand en zijranden van het metselwerk tegen de betonplex omkasting) voegratio's. Ter vergelijking wordt voor een realistische gevel van een woning van 2 verdiepen (breedte 5 meter, hoogte 6 meter) ook het voegratio berekend.

Tabel 3: Voegratio voor een werkelijke gevel, theoretische en effectief uitgevoerde opstellingen.

	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5	Type 6
Gevel 5 m x 6 m	0.115	0.115	0.199	0.267	0.243	0.114
Theoretische opstelling	0.157	0.157	0.243	0.351	0.382	0.155
Uitgevoerde opstelling	0.117	0.117	0.207	0.319	0.352	0.115

Over het algemeen liggen de voegratio's voor de opstellingen tussen praktijk en opstelling dicht bij elkaar, behalve voor de Boomse recuperatiesteen (type 4 en 5). Dit is te verklaren door de onregelmatige geometrie van de stenen waar niet op kan ingespeeld worden bij het ontwerp. Bovendien kozen de metsers ook een grotere module (= hoogte van 1 voeg en 1 steen) dan vooraf voorzien was.

Waarnemingen na het metselen

Doordat de bakstenen droog gemetseld worden, beginnen ze vocht te onttrekken aan de mortel. Dit is duidelijk zichtbaar in Figuur 55 via een kringvormig patroon aan het metselwerkoppervlak. Na verloop van tijd raakt heel het metselwerkoppervlak verzadigd. Dit proces is vooral gevaarlijk wanneer de stenen te veel water onttrekken aan de voegen waardoor de mortel water tekortkomt voor de hydratatie-reacties. Dit noemt het verbranden van de mortel en kan leiden tot verminderde samenhang in de mortel en dus een slechte hechting tussen bakstenen en mortel in het contactoppervlak.



Figuur 55: Kringvormige patronen op het metselwerk na het metselen door onttrekken van vocht aan de mortel.

Na 1 week droging is er duidelijk zichtbare uitbloei van zouten op het metselwerk aanwezig bij de Decobloc 14 cm (type 2) en de MX stenen (type 3). Dit verschijnsel manifesteert zich het meest uitgesproken bij de muren met pure kalkmortel en cementmortel afgebeeld in Tabel 4.

Tabel 4: Uitbloei van zouten bij de types 2 en 3 met pure kalkmortel na 1 en 2 weken.

	Na 1 week droging	Na 2 weken droging
Type 2		
Type 3		

Plaatsing van de kalkhennep en afdichten van de betonplex kasten

Eerst wordt de EPDM in een opstand van 1 cm verlijmd tegen de achterzijde van het metselwerk en onderaan gedicht. Logischerwijs wordt de onderste zone van de muur dan ook niet als representatief beschouwd. Na respectievelijk 5 en 6 weken droging wordt de kalkhennep-isolatie geplaatst tegen de cementmortel en bastaardmortel/kalkmortel muren. Dit gebeurt laagsgewijs en de kalkhennep wordt met een lat uitgevlakt maar niet verdicht, volgens de voorschriften van plaatsing van Exie. De resulterende densiteit varieert tussen de 190 en 230 kg/m³ met een gemiddelde van 219 kg/m³, iets hoger dan de droge densiteit van 175 kg/m³ op basis van de technische fiche. Deze verhoging valt toe te kennen aan het feit dat de kalkhennep niet (oven)droog werd geleverd en de variatie door het verder uitdrogen van de kalkhennep voor het effectieve storten.



Figuur 56: V.l.n.r. verlijmde EPDM-opstand, aandammen van de kalkhennep en plaatsing van de kleurstofkorrels.

Om de 2 cm wordt vervolgens een lijn kleurstofkorrels aangebracht tegen de achterzijde van het metselwerk, zoals in Figuur 56. De dosering, op basis van de eerdere tracertests, bedraagt 0.4 g per kubus van 10 x 10 x 10 cm kalkhennep. Op deze manier wordt een uniforme concentratie bekomen.

Wanneer kalkhennep en kleurstof geplaatst zijn wordt bovenaan een geslotencellige zwelband aangebracht en wordt de bovenplaat vastgeschroefd. Tot slot worden aan de voorzijde de onderrand en zijranden van het metselwerk gedicht met siliconen. Dit voorkomt ongewenste capillaire absorptie van stagnerend water aan de voorzijde en infiltratie langs de zijkanten doordat de muren door uitdrogingskrimp loskwamen van de betonplex omkasting. Bovenaan zorgt de zwelband voor de waterdichte afwerking.

De afgewerkte testkast ziet er vervolgens uit zoals in Figuur 57.



Figuur 57: Het aanbrengen van zwelband bovenaan en tot slot de afgewerkte testkast.

1.3. Ontwikkeling van een aangepast testprotocol

In de volgende paragrafen wordt het testprotocol voor de experimenten toegelicht. Eerst wordt er ingegaan op de beregeningsnormen en de bepaling van het sproeidebiet. Daarna worden de evaluatie- en observatiemethodes voor de testopstelling vastgelegd.

1.3.1. Testdebiet en (geen) drukverschil: afweging beregeningsnormen

Zoals eerder besproken in paragraaf 2.3.3 van de literatuurstudie bestaan er verschillende normen om een beregeningstest uit te voeren. De keuze voor de testparameters is hierbij van cruciaal belang en de gemaakte beslissingen worden hieronder toegelicht.

Aangepaste testprocedure

Gezien er slechts één testreeks wordt uitgevoerd wordt er bij voorkeur gekozen voor een statische test (Van Linden & Van Den Bossche, 2022). Als basis wordt er vertrokken vanuit EN 1027, vergelijkbaar met het eerste deel van NEN 2778. Die norm werd eerst overwogen – aangezien het de enige Europese norm is met een beregeningstest voor metselwerk - maar resulteert in een lager debiet of *spray rate*¹, vandaar wordt er conservatief gekozen voor EN 1027 en een gewenste *spray rate* van 2 l/min.m².

In principe hoort hier bovendien een stapsgewijs toenemend drukverschil bij. De beschouwde wandopbouwen van BLAF bestaan uit een houtskelet draagstructuur, waarbij volgens tabel 11 uit TV 257 een waterdichtheid moet gegarandeerd worden tot 450 Pa. Deze drukverschillen komen in de norm NBN B 25-002-1 overeen met blootstellingsklasse W4, waarvan in Figuur 58 hieronder wordt aangegeven hoe dit zich vertaalt in maximale bouwhoogtes afhankelijk van de ruwheidscategorie van het terrein. Voor de laag- en middelhoogbouwtoepassingen waarin de onderzochte wandopbouwen worden gebruikt is dit duidelijk ruimschoots voldoende.

Blootstellingsklassen		Klasse W4			
		Referentiesnelheid - v_{30} (m/s)			
		26	25	24	23
Ruwheidscategorieën		Referentiehoogte (z_e) (m)			
Kustgebied	0	8m			
Platteland	I	12m	17m	26m	40m
Landelijk gebied	II	22m	31m	44m	65m
Voorstad - Bos	III	55m	75m	100m	100m
Stad	IV	100m	100m	100m	100m

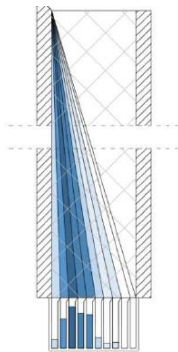
Figuur 58: Maximale bouwhoogtes afhankelijk van de ruwheidscategorie uit NBN B 25-002-1.

Voor een drukverschil van 450 Pa schrijft EN 1027 bovendien een beproevingsduur van 1 uur voor. Er wordt echter om praktische redenen gekozen om dit drukverschil in de testen achterwege te laten om

¹ NEN 2778 rekent met 500 l/h per moduul, waarbij een moduul 2.5 x 2.5 m meet. Omgerekend komt dit neer op 1.33 l/min.m², wat lager is dan de voorgeschreven 2 l/min.m² uit EN 1027

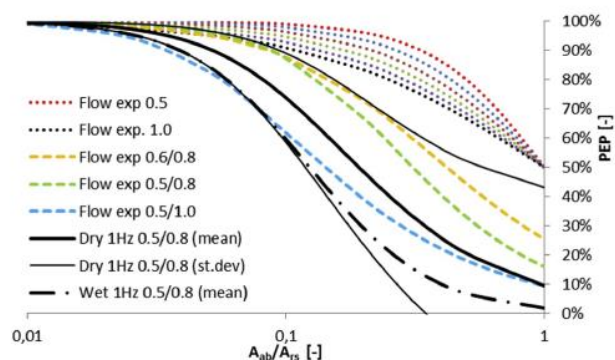
een continue weging van de testmuren tijdens de berekening mogelijk te laten (zie verder). Wel worden de beproevingsduur van 1 uur en de *spray rate* van 2 l/min.m² zoals hierboven bepaald behouden.

Het weglaten van het drukverschil is bovendien voor de onderzochte configuraties geen ongefundeerde aanname. Ten eerste zijn deze testen op kleine testmuren slechts verkennende en relatief te vergelijken testen om te kijken naar het verschil in baksteentypes, mortels en de impact van het toevoegen van 10 cm kalkhennep. Om absolute uitspraken te doen over de regendichtheid dienen eventueel in verder onderzoek (verdiepings)hoge testwanden te worden getest, want ook de hoogtewerking kan ervoor zorgen dat regenwater dieper infiltreert in de isolatie zoals hieronder in Figuur 59 (Coupillie & Van Den Bossche, 2017). Daarin is via de gootjes onderaan ook te zien dat de isolatie dichtst bij het metselwerk niet altijd diegene is die het meeste waterinfiltratie zal ervaren.



Figuur 59: Illustratie van de hoogtewerking van infiltratie in isolatiemateriaal (Coupillie & Van Den Bossche, 2017). Hoe donkerder het blauw, hoe meer infiltratie in het gootje onderaan werd opgevangen.

Ten tweede is het niet zo dat een drukverschil een noodzakelijke voorwaarde voor infiltratie is, zoals soms verkeerdelijk wordt gedacht, en zo blijkt dat ook bij 0 Pa drukverschil al infiltratie plaatsvindt (Van Goethem et al., 2015) – zeker wanneer er een continue interface tussen baksteen en mortel de weerskanten van de muur verbindt (Calle, 2020). Bovendien wordt het drukverschil normaliter opgevangen door de meest luchtdichte laag in de constructie. Stel dat het metselwerk (A_{rs} of *rain screen*) in de testen een luchtdichtheid zou hebben die 10% is van het (luchtdichte) plexiglas (A_{ab} of *air barrier*, in de realiteit de binnenaafwerking), dan is er nog steeds meer dan 90% drukegalisatie (PEP of *pressure equalization percentage*) over het metselwerk volgens Figuur 60 (Van Den Bossche et al., 2020).



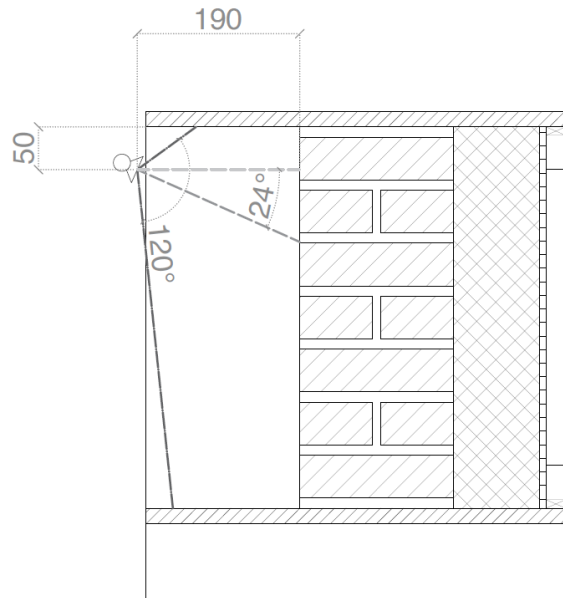
Figuur 60: Als $A_{ab}/A_{rs} = 0.1$ wordt nog steeds 90% pressure equalization percentage (PEP) bereikt (Van Den Bossche et al., 2020).

Tot slot zijn de drukverschillen in de werkelijkheid tijdens een regenbui niet hoger dan 50 tot 150 Pa, heel wat lager dan de opgelegde testdrukken. In 95% van de regenbuien is het drukverschil beperkt tot 300 Pa (Van Linden, 2022). Bovendien betekent een hoge regenintensiteit in de realiteit doorgaans een lager luchtdrukverschil en vice versa (Van Den Bossche et al., 2013b, 2013a).

Er wordt dus gekozen voor een sproeidebiet van 2 l/min.m² zonder drukverschil. Dit kan worden geïnterpreteerd als een extreme regenbui, zonder het effect van wind.

Configuratie testwand

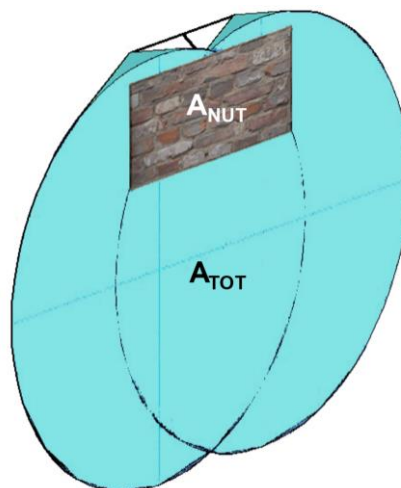
Voor de opstelling van de sproeiers en het proefstuk wordt opnieuw EN 1027 als leidraad genomen. De testwand uit het Testcentrum voor Gevelementen is conform de norm voorzien van sproeiers met tussenafstand 400 mm en *nozzles* met een *circular full cone* sproeipatroon volgens de gewenste 120°. De sproeiers worden steeds op een horizontale afstand van 190 mm aangebracht van het metselwerk buitenoppervlak en op 50 mm van de bovenrand. Bovendien worden ze symmetrisch opgesteld ten opzichte van de zijranden van het proefstuk. Het eindresultaat is afgebeeld in Figuur 61.



Figuur 61: Opstelling van de sproeiers ten opzichte van het proefstuk volgens EN 1027.

Theoretische correctie sproeidebiet

Om de gewenste 2 l/min.m² op de testmuren te krijgen is het nuttig om voor deze kleine opstellingen te berekenen hoeveel water effectief op de metselwerk wand terecht zal komen. Een deel van het water zal immers via de wanden van de betonplex kast gewoon weer wegvloeien. Een eerste manier om dit na te gaan is via een theoretische berekening.



Figuur 62: Kegelsnede van het theoretisch sproeigebied van de 2 sproeiers met het testvlak.

Voor elke sproeiconus wordt de kegelvormige sproeizone uitgezet in 3D zoals in Figuur 62. Door een kegelsnede te nemen tussen het testvlak van het metselwerk met de kegelvormige sproeizone kan de totale (ellipsvormige) besproeide oppervlakte op dit vlak door de 2 sproeiers worden bepaald,

A_{tot} , 2 sproeiers. Door de doorsnede van deze ellips te nemen met het rechthoekige testvlak wordt de nuttige besproeide oppervlakte bepaald, A_{nut} , 2 sproeiers. Door het gewenste debiet van 2 l/min.m² te vermenigvuldigen met de te besproeien oppervlakte wordt een theoretisch debiet (aan de pomp) bekomen in l/min. Door dit theoretisch debiet te delen door het ratio A_{nut}/A_{tot} wordt een gecorrigeerd debiet bekomen, dat hoger is om te compenseren voor het deel water dat naast het testvlak zal vallen en rechtstreeks wordt afgevoerd. In Tabel 5 hieronder worden de bekomen ratio's, theoretische en gecorrigeerde debieten getoond per type testopstelling.

Tabel 5: Ratio's tussen nuttige en totale besproeide oppervlakte, theoretische en gecorrigeerde debieten voor alle types testopstellingen.

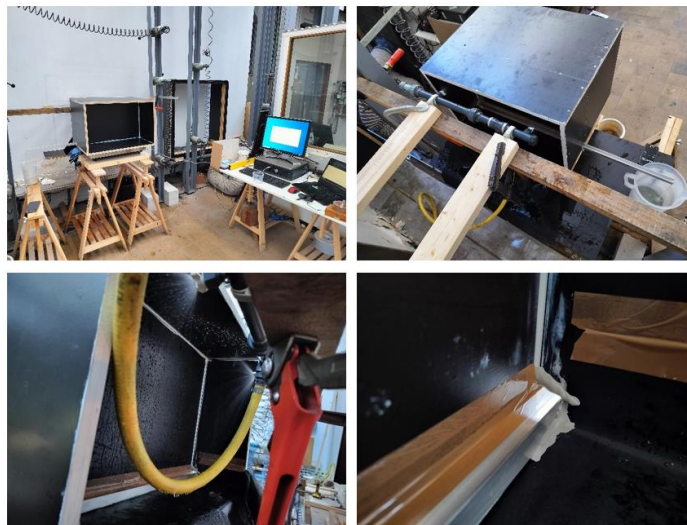
	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5	Type 6
Ratio A_{NUT}/A_{TOT} [-]	0.136	0.136	0.139	0.128	0.128	0.139
Debiet (theo) [l/min]	0.565	0.565	0.567	0.524	0.524	0.577
Debiet (corr) [l/min]	4.146	4.146	4.091	4.113	4.113	4.146

A_{NUT} = nuttige besproeide oppervlakte, A_{TOT} = totale besproeide oppervlakte, theo = theoretisch, corr = gecorrigeerd

De theoretische debieten liggen voor alle opstellingen tussen de 0.5 en 0.6 l/min aan de pomp, en gezien de vrij lage ratio's van nuttige besproeide oppervlakte resulteert dit in gecorrigeerde debieten van 4 tot 4.2 l/min. Dit is een correctie met factor 6 tot 8, hetgeen vrij hoog lijkt. Daarom wordt besloten het sproeidebiet ook praktisch te bepalen, omdat er met verschijnselen zoals druppels die indirect toch op het testvlak zouden terechtkomen in deze berekening geen rekening kan worden gehouden.

Praktische bepaling sproeidebiet

Om het debiet praktisch te bepalen wordt een kast met testvlak 0.6 m breed en 0.4 m hoog gedurende 10 minuten beregend zoals in Figuur 63. Onderaan het testvlak wordt via een U-vormige goot het water dat wordt opgevangen door het testvlak afgevoerd naar een maatbeker. Om te vermijden dat water vanop de zijkanten van de kast ook in de goot afvloeit wordt een druipneus gevormd boven de goot.



Figuur 63: Overzicht van de testopstelling met sproeiers, betonplex kast en goot (boven); Zicht op het besproeide testvlak en zoom-in op de goot onderaan met druipneus tegen de zijkant (onder).

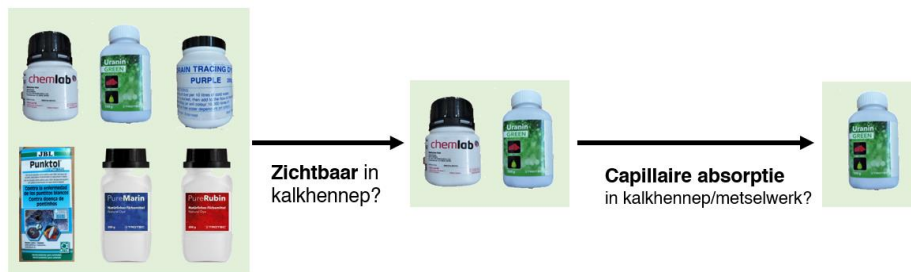
Het debiet aan de pomp wordt iteratief gewijzigd om de gewenste 2 l/min.m² te bekomen, hetgeen voor het testvlak van 0.6 m x 0.4 m overeenkomt met 0.48 l/min in de maatbeker. Voor een instelling aan de debietregelaar van de pomp van de testwand met 1.0 – 1.1 l/min wordt uiteindelijk op 10 minuten 4.9 l water bekomen ofwel 0.49 l/min, wat net iets hoger is dan nodig, hetgeen conservatief is. Merk op dat dit slechts een factor 2 verschilt ten opzichte van de theoretisch berekende debieten. Concreet betekent dit dat ongeveer 50% van het gesproeide water terechtkomt op het testvlak. De instelling van dit debiet van 1.0 – 1.1 l/min wordt dan ook weerhouden, gezien het de realiteit in de opstelling het beste benadert.

1.3.2. Evaluatie- en observatiemethodes

EN 1027 schrijft een zogenaamd *pass/fail* criterium voor bij de test: de waarneming van water aan de binnenzijde van het metselwerk ofwel water op plaatsen die niet bedoeld zijn om nat te worden. Opnieuw is dit criterium niet zomaar toepasbaar gezien de specifieke opbouw van de testmuren met een achterliggende laag kalkhennep-isolatie. Omdat er dus niet visueel kan worden beoordeeld aan de achterzijde van het metselwerk tijdens de test worden er andere evaluatie- en observatiemethodes gebruikt om maximaal informatie uit de testen te halen met de specifieke focus van dit onderzoek in het achterhoofd. Zo wordt er gekozen voor een tracervloeistof om het vochtfront te visualiseren in kalkhennep en continue weging tijdens de testen. Ook laat de plexiglas afwerking visuele inspectie toe. Tot slot wordt er via een vochtmeter na het verwijderen van de kalkhennep laag een relatieve vergelijking gemaakt van de oppervlaktevochtigheid.

Visualisatie van de infiltratie in de kalkhennep

Ten eerste kan er via de plexiglas achterzijde tijdens de test visueel worden bekeken of er effectief tot 10 cm diep infiltratie zou optreden in de kalkhennep. Vervolgens wordt het vochtfront via tracervloeistof in kaart gebracht. Zo kan de ruimtelijke verdeling van de infiltraties verder in detail bestudeerd worden.



Figuur 64: Keuzeproces van de tracervloeistof voor het vochtfront in kalkhennep.

De zoektocht naar een correct functionerende tracer omvat een aantal voorbereidende testen. Er wordt vertrokken van 6 verschillende kleurstoffen afgebeeld in Figuur 64. In een eerste testfase wordt getest of een kleurstof voldoende zichtbaar is in kalkhennep. Dit gebeurt door met een titreerpijpet simpelweg 50ml water met kleurstof in verschillende doseringen langs boven in te brengen in een kubus van 10 x 10 x 10 cm kalkhennep. Enkel methyleenblauw van Chemlab en uranine UV groen van Trotec zijn voldoende zichtbaar in acceptabele concentraties zoals te zien is in Figuur 65.



Figuur 65: Selectie tracer fase 1 - links niet voldoende zichtbaar, midden en rechts gewenste zichtbaarheid.

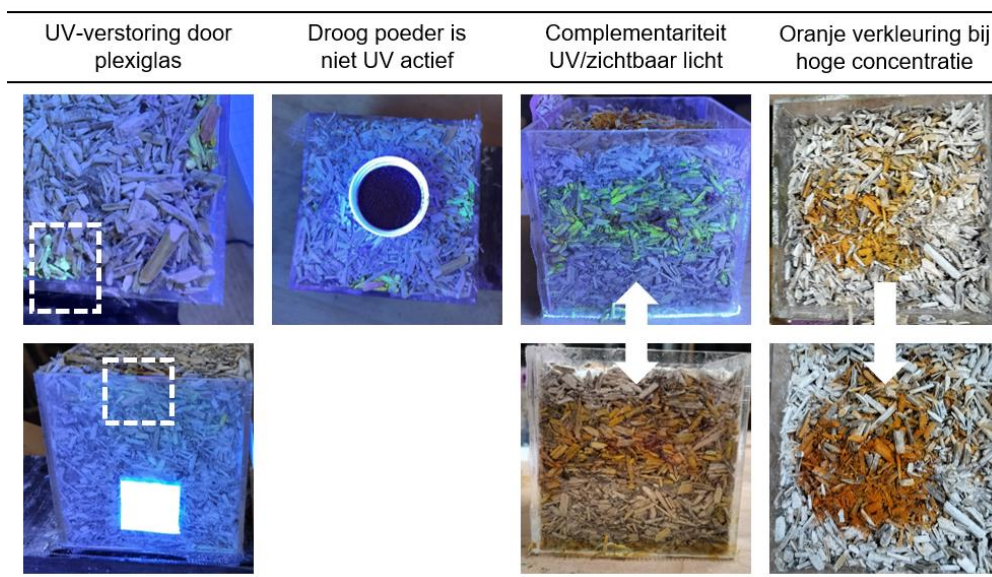
In een tweede testfase wordt getest of de kleurstof ook meegevoerd kan worden doorheen baksteen en kalkhennep via capillair vochttransport, en dus tegen de zwaartekracht in. Bovendien werden de kalkhennep samples getest met groene kleurstof opgelost in water (1 GR-KW), korrels continu over de hoogte (2 GR-KC), korrels enkel onderaan in de kalkhennep (3 GR-KO) en blauwe kleurstofkorrels onderaan in de kalkhennep (4 BL-KO), zoals weergegeven in Figuur 66. Na de absorptieproeven werd duidelijk dat uranine UV groen de enige kleurstof was die mee optrok met het vochtfront. De bevinding dat het methyleenblauw duidelijk niet het vochtfront volgt maar slechts een beperkte hoogte opstijgt, is in overeenstemming met eerder onderzoek (Brepoels & Kox, 2017).



Figuur 66: resultaat van de absorptieproeven op baksteen en kalkhennep met de 2 kleurstoffen.

Na deze twee testfases werd besloten dat enkel uranine UV groen geschikt was. Tot slot kunnen uit deze testen enkele conclusies worden getrokken die belangrijk zijn voor de correcte interpretatie van de tracersporen in een materiaal. Ze worden voorgesteld in Figuur 67 en hieronder opgesomd:

- Plexiglas breekt het licht zodanig dat de UV-zichtbaarheid verminderd is.
- Het droge poeder is niet UV-actief en zal dus niet oplichten zonder contact met water.
- De kleur bij zichtbaar licht en de UV-activiteit zijn complementair: hoe hoger de concentratie kleurstof, hoe intenser de zichtbare kleur maar hoe lager de concentratie kleurstof, hoe intenser de UV-zichtbaarheid.
- Het groen verkleurt richting oranje bij erg hoge concentraties.



Figuur 67: De conclusies op basis van het vooronderzoek om een geschikte tracer te selecteren om het vochtfront te visualiseren in kalkhennep.

Bovendien is het duidelijk te zien hoe het gekleurde vochtfront in de rechtse afbeeldingen van Figuur 67 de losse kalkdeeltjes samentrekt tot een soort van klomp, vergelijkbaar aan wat er in cellulose gebeurt met *caking*.

Vochtmeting van de achterzijde van het metselwerk

Met de vochtmeter (type Hydromette UNI 1 van GANN) kan via een capacitieve hoogfrequente meetmethode een vochtmeting worden uitgevoerd op bouwmaterialen (GANN, 2016). De verandering van het elektrische veld door materiaal en vocht wordt gemeten en digitaal weergegeven in digits. Dit gebeurt eenvoudigweg door de kogelonde B 50 in contact te brengen met het te onderzoeken materiaal, bijvoorbeeld de baksteen of mortelvoeg in dit geval. De handschakelaar wordt ingesteld op meetmodus M en het af te lezen meetbereik voor bouwvocht op het scherm varieert van 0 tot 199 digits. De vochtmeter wordt steeds vastgehouden met een handschoen en louter door dit contact met de handsonde wordt al een waarde van 4 digits bereikt, het handvat wordt zoals voorgeschreven steeds in de onderste helft vastgehouden. De fabrikant hanteert als richtwaarde voor woonruimtes “droog” van 20-40 digits en “vochtig” van 80-140 digits. De volgende tabel in Figuur 68 kan worden gebruikt om de meetwaardes te interpreteren. Echter zullen de resultaten vooral relatief worden geïnterpreteerd om “droge” en “natte” zones te identificeren.

Ruw gewicht kg/m ²	Relatieve luchtvochtigheid					
	30 — 50 — 70 — 80 — 90 — 95 — 100					
	Weergave in digits					
	zeer droog	normaal droog	half- droog	vochtig	zeer vochtig	nat
Tot 600	10 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 90	90 - 110	> 100
600 - 1200	20 - 30	30 - 50	50 - 70	70 - 100	100 - 120	> 120
1200 - 1800	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100	110 - 130	> 130
> 1800	30 - 50	50 - 70	70 - 90	90 - 120	120 - 140	> 140

Figuur 68: Tabellen uit de bedieningshandleiding van de vochtmeter om de digits correct te interpreteren.

Continue weging van de testmuren tijdens de test

De testmuren worden tijdens de berekeningstest op een plateauweegschaal geplaatst en continu gewogen. Deze weegschaal (type KERN DE150K2DL) kan objecten wegen tot 150 kg en heeft een leesbaarheid *d (readability)* van 2 g / 5 g in een meetgebied van 60 kg / 150 kg. De afmetingen van het plateau zijn 522 x 406 mm. De weegschaal wordt via een RS-232 datakabel met een computer verbonden in het labo en kan op deze manier automatisch een continue weging doorsturen. Deze wordt via de *event log* van de software 232key omgezet in tekstbestanden en verder bewerkt tot er 1 waarde per seconde wordt overgehouden. Als er meerdere waarden per seconde werden doorgestuurd, wordt het gemiddelde genomen.

Door de curves voor de gewichtstoename te vergelijken voor de verschillende muren tijdens de test, waarbij de randvoorwaarden en kalkhennep-isolatielaag in alle gevallen dezelfde zijn, kan het verschil in waterabsorptie door het metselwerk worden bestudeerd. Zo kan enerzijds het verschil tussen kalk-, bastaard- en cementmortel voor dezelfde bakstenen worden bekeken en anderzijds wordt het ook mogelijk om uitspraken te doen over het verschil tussen de diverse bakstenen. De resultaten dienen weliswaar relatief of vergelijkend te worden geïnterpreteerd. Er zijn te veel onzekerheden (zoals het stagnerend water beneden in de kast dat zal meegerekend worden) om de resultaten ook absoluut betekenis te geven, maar aangezien dit voor alle muren geldt is het wel mogelijk om relatief te kijken.

2. Labotesten: capillaire absorptieproef ter bepaling van de waterabsorptiecoëfficiënt van de gebruikte materialen

Om de karakteristieken van de gebruikte materialen in de testopstellingen beter in te kunnen schatten worden een aantal materiaalsamples beproefd onder capillaire absorptie volgens NBN EN ISO 15148. Zo kan de waterabsorptiecoëfficiënt A_w bepaald worden. Deze parameter is een belangrijke parameter voor het vochttransport in materialen. Dit helpt bovendien om de input voor de 2D simulaties verderop te corrigeren en zo de werkelijkheid beter te kunnen benaderen. De waterabsorptiecoëfficiënt schaalt namelijk de curve voor het vloeibaar vochttransport (LCC) in Delphin, zie paragraaf 1.2.3.

- Proefstukken en testopstelling

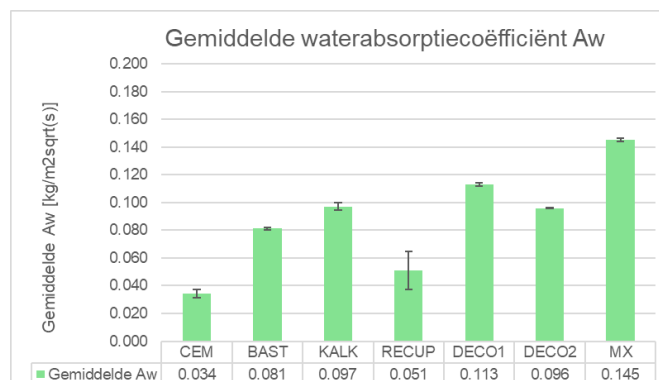
Tijdens het metselen van de muren werden mortelprisma's van ca. 4 x 4 x 9 cm gemaakt. Uit de overschot aan bakstenen werden ook proefstukken verzameld. Van de carbonsteen was er geen overschot, deze werd dan ook niet beproefd. Van elke baksteen werden er 3 proefstukken getest. Enkel van de MX-steen waren er slechts 2 stenen over en van de recuperatiesteen werden 8 samples getest wegens het onregelmatig karakter. De bakstenen werden getest volgens de oriëntatie zoals ze in de testopstelling gebruikt zouden worden, met hun zichtzijde ondergedompeld zoals in Figuur 69. De Decobloc 14 cm stenen werden doorgezaagd vanwege het meetbereik op de precisieweegschaal en de resultaten werden gesuperponeerd.



Figuur 69: De proefstukken tijdens de capillaire absorptieproef.

- Resultaten

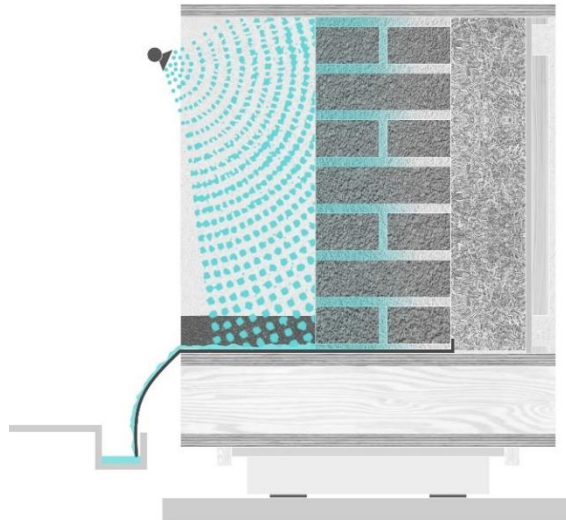
De resultaten zijn opgenomen in Figuur 70. Logischerwijs heeft de pure kalkmortel de hoogste waarde van A_w onder de mortels. Ook blijkt dat er een grotere onzekerheid rust op de recuperatiesteen, te verklaren door de aard van de recuperatiesteen die niet uit een uniform fabrieksproces komt, alsook defecten zoals scheuren en afgebroken hoeken. Decobloc 2 heeft een lagere waarde voor A_w dan Decobloc 1 wegens de onderbreking van het vochtspad door de handgreep. Voor de opnamecurves en een overzicht van alle proefstukken, zie bijlage D.



Figuur 70: Resultaten van de capillaire absorptieproef.

3. Uitvoering van de berekeningstesten

De berekeningstesten worden uitgevoerd in de weken van 15 en 22 april. Tijdens de eerste week worden de cementmortel muren getest. Tijdens de tweede week worden de bastaard- en kalkmortel muren getest. De opstelling bestaat uit sproeiers van de testwand en de testmuur op een weegschaal zoals in Figuur 71 en Figuur 72. Via de datakabel wordt de weging continu uitgelezen naar een computer zoals eerder beschreven.



Figuur 71: Doorsnede van de testopstelling met sproeiers en weegschaal. De EPDM watert af in de testwand.



Figuur 72: Reële opstelling tijdens een labotest.

De werkwijze tijdens de testen is zo uniform mogelijk om de resultaten maximaal te kunnen vergelijken. Voor en na de testen wordt de weegschaal gekalibreerd en de sproeiers afgesteld. Elke muur wordt gedurende 1 uur berekend en continu gewogen. Vervolgens wordt de kast eraf gehaald en de volgende kast klaargezet om te testen. Telkens 1 uur na de test wordt de kalkhennep-isolatielaag laagsgewijs afgegraven en gedocumenteerd. Daarna wordt een vochtmeting met de GANN-sensor uitgevoerd.

Tijdens de uitvoering van de testen werd de debietinstelling van de testwand niet meer gewijzigd. Echter werd er bij de kalibraties van het opvangen water vastgesteld dat het praktische debiet gewijzigd was naar 2.778 l/min.m^2 , hetgeen dus iets hoger ligt dan de minimaal vereiste 2 l/min.m^2 . Dit is dus een conservatieve waarde. Dit zorgt niet voor grote verschillen tussen de testen want er werd bij alle testen ook afstroom (*runoff*) geobserveerd. De waarden zijn dus relatief te vergelijken. Wanneer er afstroom optreedt, neemt de infiltratie af (Van Linden & Van Den Bossche, 2022). Bij een verhoogd debiet zal er dus wat meer afstromen, maar dit heeft geen grote invloed op de absorptie en infiltratie door de muur.

4. Testresultaten van de berekeningstesten

4.1. Kwalitatieve evaluatie

De kwalitatieve evaluatie van de testresultaten bestaat uit het afgraven van de kalkhennep en tegelijk het in kaart brengen van het vochtfront via de tracervloeistof. Deze visuele evaluatie wordt aangevuld met vochtmetingen via de GANN-sensor, die het onderscheid maken tussen “droge” en “natte” zones.

4.1.1. Overzicht

In Figuur 73 wordt een overzicht getoond van de achterzijde van het metselwerk na afloop van de testen. Om deze resultaten systematisch te verklaren worden de fenomenen per soort behandeld in paragraaf 4.1.2, maar eerst worden een aantal zaken besproken voor een correcte interpretatie van de resultaten.



Figuur 73: Overzicht van de achterzijden van het metselwerk na de test.

Een volledig gekleurd binnenoppervlak betekent enkel en alleen dat de tracer is afgegaan en dat er dus contact is geweest met vloeibaar vocht of erg hoge vochtigheden. Dit betekent echter niet dat deze muur slechter uit de test komt dan een muur met meer droge zones, want de infiltraties kunnen bijvoorbeeld erg oppervlakkig zijn in het eerste geval en lokaal erg diep in het tweede geval. Bovendien kunnen effecten zoals de afstroom van water aan de achterzijde (*runoff*) een steen nat doen lijken, terwijl enkel het oppervlak nat is en het waterfront zich nog niet zo ver bevindt in de steen. Ook kunnen een aantal infiltraties verklaard worden door randeffecten en die zijn niet representatief voor de gehele opstelling. Om die reden zullen ze ook niet worden beschouwd, tenzij ze aan een duidelijke oorzaak te linken zijn. Concreet gaat het om de volgende randeffecten:

- Mortelkrimp aan de zijranden

Door de mortelkrimp scheurden zowat alle muren los van de testkast aan de randen. Hoewel dit fenomeen niet te voorkomen valt én er door middel van een silicone kit aan de voorzijde een extra veiligheid werd toegepast levert dit soms een vertekend beeld op met infiltratie aan de randen.

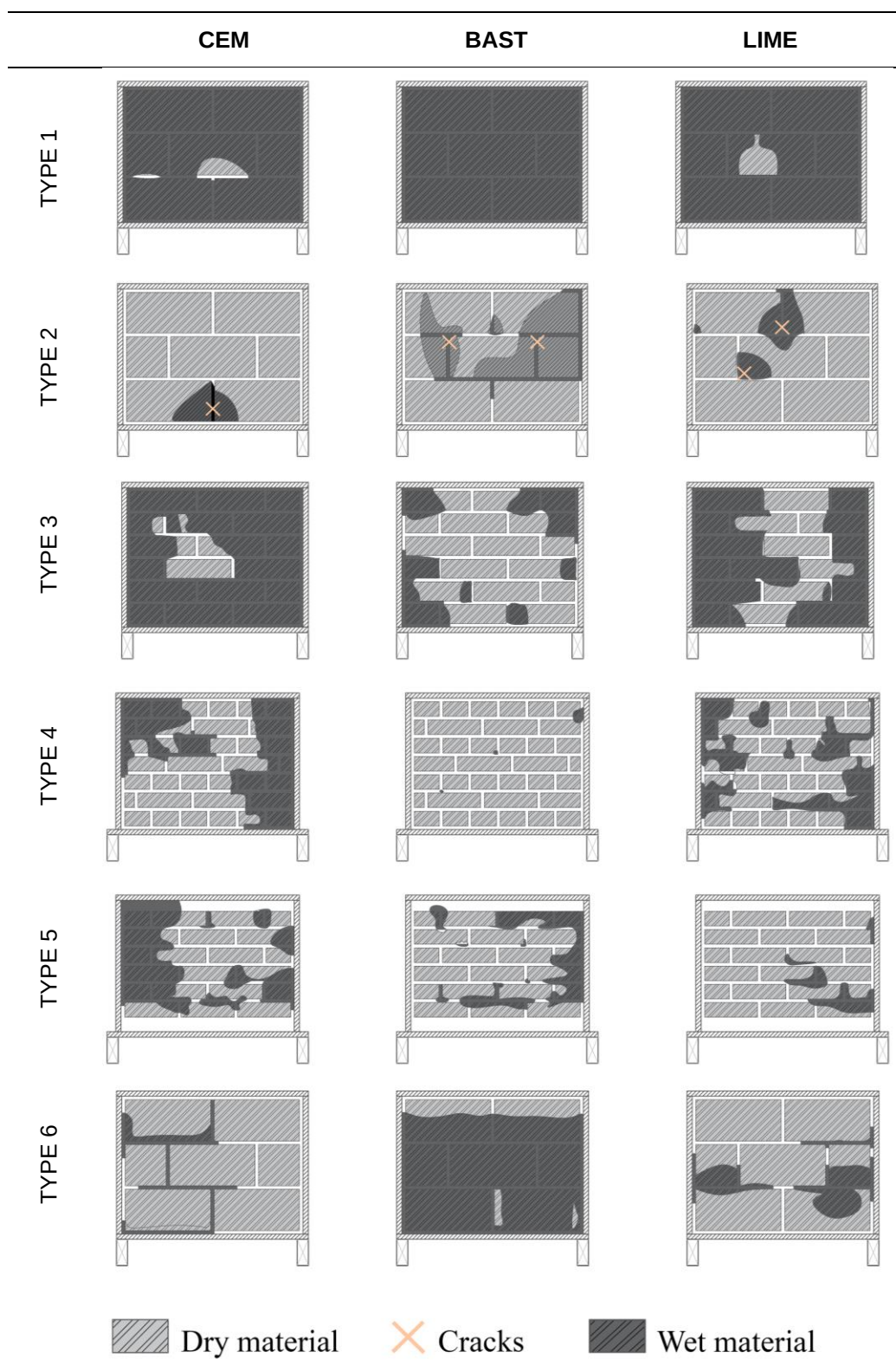
- Capillaire absorptie aan de onderrand

Ook het effect van capillaire absorptie onderaan in het metselwerk door het stagnerend water kan zorgen voor een vertekend beeld nabij de onderrand. De silicone kit aan de voorzijde zorgt hier opnieuw voor een aanvullende veiligheid, maar in enkele muren werd absorptie toch waargenomen.

- Slechte hechting van de mortellaag aan de bovenrand

Tot slot werden voor een aantal muren ook infiltraties aan de bovenrand waargenomen doordat de bovenste lintvoeg een minder goede hechting vertoont met het metselwerk. Sommige van die mortellagen zijn bovendien zeer dun en oppervlaktescheuren vertonen ook daar lokale infiltratie over de muurdiepte, terwijl de mortel in de massa op dezelfde diepte als die punten droog bleef.

Vervolgens laten we de randeffecten waar we zeker van zijn buiten beschouwing. Wanneer we de vochtzones aanduiden op de achterzijde van het metselwerk bekomen we onderstaande tekeningen in Figuur 74. Hierna worden de verschillende fenomenen geïdentificeerd en besproken die aan de basis van deze vlekkenpatronen liggen.



Figuur 74: Schematische aanduiding van de vochtzones op de achterzijde van het metselwerk, duidelijke randeffecten buiten beschouwing gelaten (Vanderschelden et al., 2024).

4.1.2. Fenomenen

Hoewel de infiltraties op het eerste gezicht gekenmerkt worden door een gekleurde vlek en de droge zones visueel droog zijn, is het verhaal bij een gedetailleerde analyse veel genuanceerder dan dat. Uit de vlekpatronen kan heel wat worden afgeleid over de precieze toedracht van de infiltratie. Daarom worden hieronder de belangrijkste infiltratiefenomenen die terugkeren in de opstellingen besproken.

- **Infiltratie verloopt in eerste instantie via de voegen**

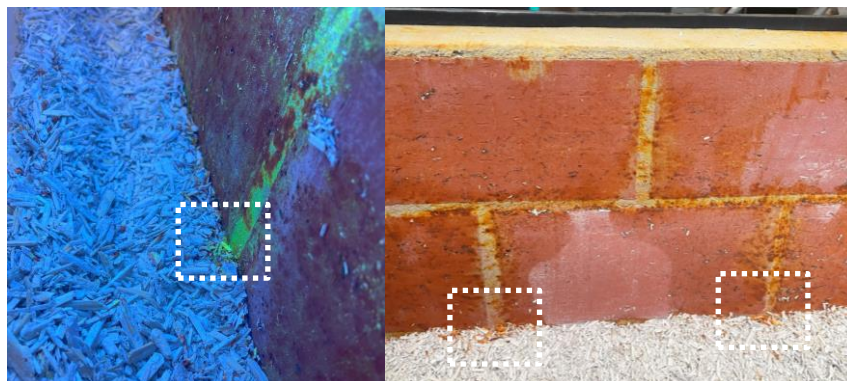
Het vochttransport doorheen een mortelvoeg gebeurt doorgaans sneller dan doorheen een baksteen. Hierdoor doen de eerste infiltraties zich typisch voor ter hoogte van de voegen, hetgeen bevestigd wordt in de literatuur (Calle, 2020). Dit vertaalt zich ook op het eerste gezicht in de testresultaten wanneer er ook nog veel zones droog zijn: de gekleurde vlekken bevinden zich rondom de voegen en volgen vaak deze vorm. Na een tijd wordt dit minder goed zichtbaar, naarmate een groter deel van het binnenoppervlak volledig (oppervlakkig) nat is. Omgekeerd, zonder infiltratie – in zones waar nog geen tracer afging – blijkt uit de vochtmeting dat de voegen al vochtiger zijn dan het metselwerk, zie Figuur 75.



Figuur 75: Vochtmeting in een visueel droge zone waarbij de voeg vochtiger is dan de baksteen.

- **Infiltratie rond de stootvoegen**

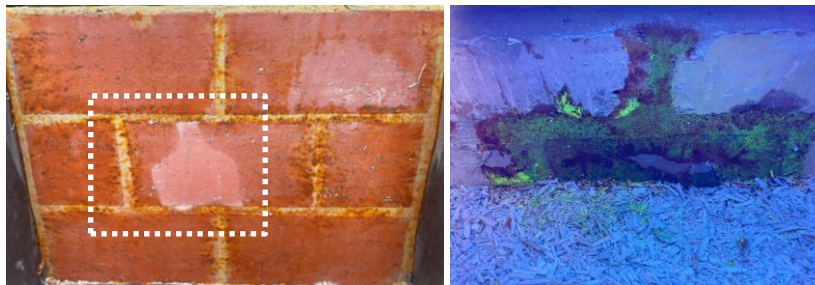
Rond de stootvoegen wordt doorgaans meer infiltratie waargenomen. De tracer is er doorgaans meer UV actief, wat wijst op een grotere verdunning met water. Bovendien zien we systematisch bij het afgraven van de kalkhennep dat er een kleine zone gekleurde scheven ligt rond de stootvoegen tegenover oppervlakkige activatie achter de stenen. De verklaring hiervoor is dat de infiltratie meestal start rond de stootvoegen, omdat deze typisch minder verdicht zijn door de uitvoering (Calle, 2020). Het is vooral het aanduwen van de mortel die tot gebrekkige verdichting leidt. Een oplossing is het bestrijken van de koppen met mortel of *buttering* voor ze te plaatsen (Kahangi Shahreza et al., 2021). Door de gebrekkige verdichting komt er sneller en gedurende langere tijd water door de stootvoegen dan door de steen, die pas veel later verzadigd zal zijn. Dit effect is duidelijk waarneembaar bij de opstellingen van type 1 in Figuur 76.



Figuur 76: Lokale vlekken tracer in de kalkhennep ter hoogte van de stootvoegen, met en zonder UV.

- **Infiltratie rond de lintvoegen, afstroom naar beneden of capillaire absorptie naar boven**

Ook vanuit de lintvoegen wordt infiltratie waargenomen. Gezien het horizontaal verloop van de voeg kan er minder water in de voeg worden vastgehouden: in een stootvoeg zal een afstromende druppel makkelijker worden opgenomen door de mortel eronder. Dit is niet het geval in de lintvoegen, waardoor er afstroom of *runoff* ontstaat. Deze patronen van afstromend vocht versmallen typisch naar onderen toe, zoals zichtbaar is bij KALK 1. Hoewel de type 1 opstellingen aan het oppervlak quasi volledig nat lijken, zal moeten blijken uit de simulaties of dit door *runoff* of verzadiging van de baksteen komt. Omgekeerd, in de buurt van de stootvoegen wordt het geïnfiltreerde water vanuit de lintvoeg capillair opgezogen via de stootvoegen. Dit gebeurt bijvoorbeeld bij BAST 5, de droge plek in de steen in Figuur 77 maakt een onderscheid duidelijk met het randeffect eronder – dat niet beschouwd wordt.



Figuur 77: Links: KALK 1 - afstroompatronen vanuit de lintvoegen die naar beneden toe versmallen; rechts: BAST 5 – infiltratie door lintvoeg met runoff en capillaire absorptie in de stootvoeg.

Het verschijnsel van capillaire absorptie in de stootvoeg vanuit de lintvoeg is te onderscheiden van infiltratie door de stootvoeg, aangezien het fenomeen zich typisch op het contactoppervlak bevindt tussen baksteen en mortel (en niet over de hele voegbreedte), zoals te zien is bij CEM 6. Dit wordt bevestigd door vochtmetingen in deze stootvoegen waarbij de ene kant van de voeg droog is en de andere nat. Ook versmalt de vochtboog in het naastgelegen materiaal typisch naar boven toe. Hierdoor tekent zich in de steen, zoals in Figuur 78, een golfvormig patroon af door de grotere stijghoogte nabij de stootvoegen, hetgeen nog duidelijker wordt bij KALK 4. Ook in KALK 4 is het dubbele effect van afstroom en capillaire absorptie langs het contactoppervlak bovendien goed te onderscheiden door een droge zone ertussen in Figuur 79.



Figuur 78: Golfvormig patroon in de steen met grotere stijghoogte nabij de voegen a.g.v. capillaire absorptie.



Figuur 79: Capillaire absorptie aan de stootvoeg en runoff uit de lintvoeg bovenaan gescheiden door droge plek.

- **Het contactoppervlak tussen baksteen en mortel is van cruciaal belang**

Uit het vorige fenomeen blijkt dat het contactoppervlak tussen baksteen en mortel een belangrijke rol speelt. Deze hypothese wordt bevestigd door een aantal andere vaststellingen. Ten eerste is in sommige muren de tracer duidelijk meest UV actief en dus verdund door water net op het contactoppervlak, zoals in Figuur 80.



Figuur 80: Verdunning en dus sterkere UV-activatie van de tracer op het contactoppervlak wijst op infiltratie.

In de opstellingen van type 4 wordt een laag koppen en strekken afgewisseld. Dit betekent dat er telkens om de andere laag continue baksteen-mortel interfaces zijn tussen binnen en buiten. Net in die lagen met een continue interface worden de infiltraties typisch waargenomen, zowel via de stootvoeg als lintvoeg. Dit is het meest uitgesproken bij BAST 4, de muur die op het minste aantal locaties infiltraties vertoont (afgezien van randeffecten). Daar worden op 2 locaties namelijk puntsgewijze infiltraties geobserveerd nabij de onderste hoek van de baksteen in de stootvoeg. Dit fenomeen werd ook waargenomen in eerder onderzoek (Calle, 2020). Ook KALK 4 vertoont lokale infiltraties in de stootvoegen van de koppenlagen, zie Figuur 81.



Figuur 81: Puntsgewijze infiltraties rond de onderste hoeken van de stootvoegen bij de koppenlagen.

De textuur van het contactoppervlak speelt ook een grote rol. We zien de evolutie tussen type 1 (9cm metselwerk) en type 2 (14 cm metselwerk) van een quasi volledig nat binnenoppervlak naar enkele lokale infiltraties. Type 3 (22 cm metselwerk) vertoont echter contra-intuïtief opeens weer veel infiltratie. De verklaring hiervoor ligt in de oppervlakteafwerking van de MX-stenen. Deze zijn namelijk langs 3 zijden bezand om esthetische redenen. De hypothese wordt bevestigd nabij de geslepen halve stenen. Waar een zaagsnede zit is de stootvoeg nog droog, maar waar de bezande kant zit treedt er sterke infiltratie op. Zo ontstaat een zaagtandpatroon van de natte zone langsheen de bezande kanten, zoals aangeduid in Figuur 82. De ruwe oppervlaktetextuur van de carbonsteen bij type 6 zorgt ook voor een slechte hechting met de mortel en dus veel infiltratie, voornamelijk doorheen de lintvoegen. Het gevolg is afstroom en capillaire absorptie in de stootvoegen, zoals aangehaald bij CEM 6 en zichtbaar in Figuur 73.



Figuur 82: Zaagtandpatroon (links), verschil tussen voeg tegen bezande kant en gezaagde kant (rechts).

Hieruit kan geconcludeerd worden dat het contactoppervlak tussen mortel en baksteen belangrijker is dan de dikte van het metselwerk voor de regendichtheid van de opbouw. Dit komt het sterkst tot uiting bij de muren van type 3, die ondanks hun 22 cm dikte meer infiltratie tonen dan type 2.

- **Scheuren (cracks) en uitvoeringskwaliteit (workmanship): allesbepalend voor infiltratie**

Zoals hierboven aangehaald zien we een groot verschil tussen type 1 en type 2 muren. Door de extra metselwerkdikte treden er in type 2 muren enkel nog lokale infiltraties op. Deze plekken zijn vaak 1 op 1 te verklaren door een gebrek van het metselwerk aan de voorzijde. Bij CEM 2 is de stootvoeg niet volledig opgevoegd. Het resultaat is een scheur op het contactoppervlak tussen de baksteen en voeg en een sterke infiltratie aan de achterzijde die voor de rest droog bleef. De hypothese dat de infiltratie verloopt langs dat contactoppervlak wordt bevestigd door een hogere capillaire stijghoogte aan de achterzijde in de steen aan de kant van de scheur in Figuur 83. Bij KALK 2 in Figuur 84 zorgen scheuren in het contactoppervlak en een afgebroken hoek van een steen ook voor lokale infiltraties aan de achterzijde. Hieruit blijkt dus dat het opvoegen van metselwerk bij een lage uitvoeringskwaliteit voor lokale infiltraties kan zorgen in een normaal regendichte muur. Het belang van het opvoegen is in overeenstemming met eerder onderzoek (Calle, 2020). Ook in BAST 2 zijn de plaatselijke infiltraties te wijten aan afgebroken hoeken.



Figuur 83: CEM 2 - scheur voorzijde (links) leidt tot lokale infiltratie aan de achterzijde (rechts).



Figuur 84: KALK 2 - scheuren en een gebroken hoek van een steen leiden tot lokale infiltratie aan de achterzijde.

- **Oppervlakkige versus diepe infiltraties**

In zowat alle beschouwde testopstellingen waren de infiltraties oppervlakkig en kwamen ze niet verder dan de eerste centimeter van de kalkhennep laag. Echter, in de type 6 muren werden diepe infiltraties vastgesteld, namelijk bij CEM 6 en BAST 6. Het gaat om infiltraties tot 5-6 cm (CEM 6) en zelfs 8 cm diep (BAST 6) in de kalkhennep laag zoals te zien in Figuur 85. De verklaring hiervoor ligt in de slechte hechting tussen carbonsteen en mortel waardoor er veel water infiltreert doorheen het contactoppervlak. Opmerkelijk is wel dat er bij KALK 6 enkel oppervlakkige infiltraties werden vastgesteld. Dit toont het vochtbufferend vermogen aan van de pure kalkmortel tegenover de cement- en bastaardmortel.



Figuur 85: Diepe infiltraties bij BAST 6 (links en midden) en CEM 6 (rechts).

4.1.3. Conclusie resultaten per type muur

Met de fenomenen uit de voorgaande paragraaf in het achterhoofd is het mogelijk om een aantal tendensen te identificeren eigen aan de types metselwerk. Type 1 tot 3 zijn muren in halfsteens verband bestaande uit stenen in snelbouwformaat. Door zijn beperkte dikte bleek type 1 (9 cm) niet regendicht. Dankzij de extra metselwerkdikte bleek type 2 (14 cm) al heel wat minder infiltratiegevoelig, met uitzondering van lokale defecten zoals scheuren. Hoewel de muren van type 3 (22 cm) nog eens 8 cm dikker waren, zorgde de textuur van het contactoppervlak voor meer infiltratie dan verwacht.

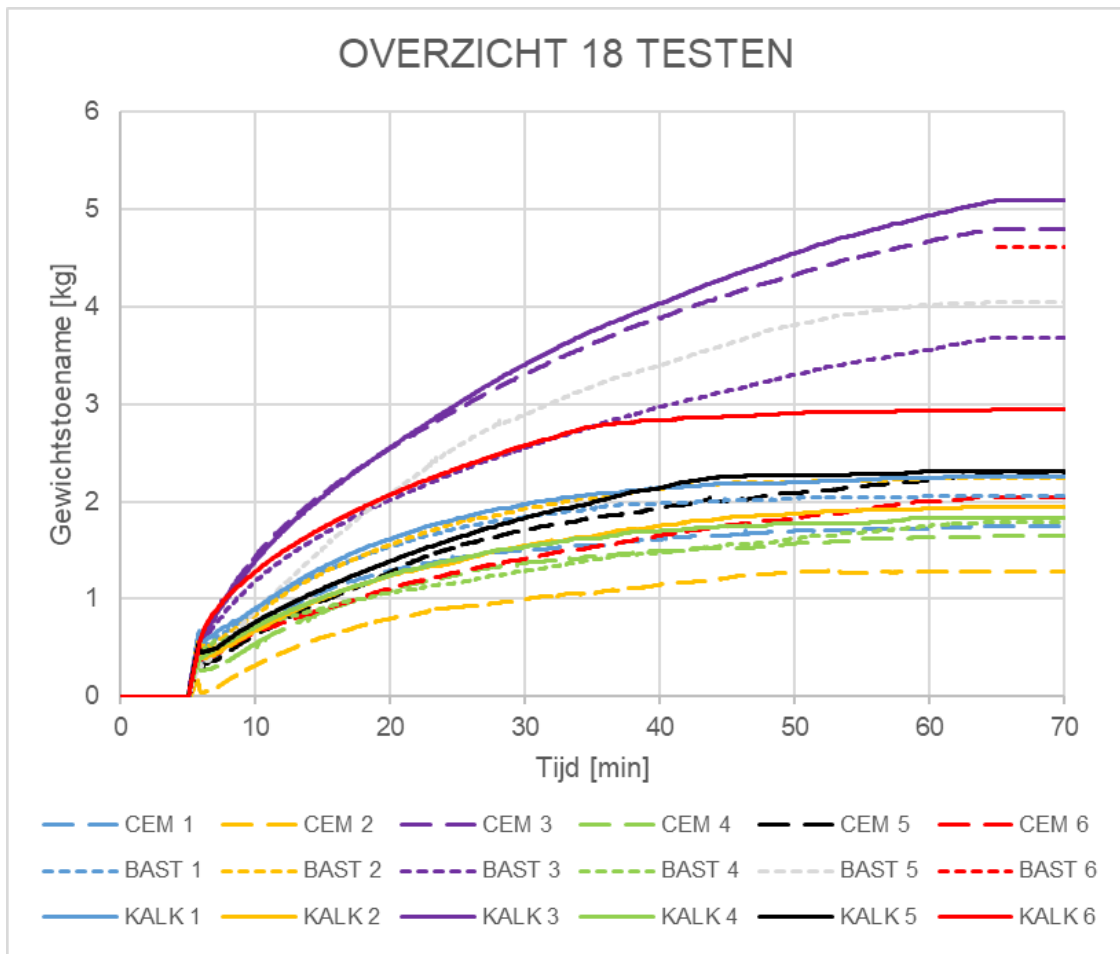
Types 4 tot 6 bestaan uit massief steens metselwerk (19 cm). Type 4 en 5 bestaan uit Boomse recuperatiesteen. In het kruisverband van type 4 (19cm) bleek de koppenlaag de voornaamste oorzaak van infiltratie, vanwege de continue interface baksteen-mortel tussen binnen en buiten. In het halfsteens verband van type 5 zijn de resultaten tussen binnen en buiten moeilijker 1 op 1 te vertalen wegens de hartvoeg in het midden. Wel is duidelijk dat deze hartvoeg geen significante verbetering van de regendichtheid betekent. Enkel bij type 6 werd diepe infiltratie waargenomen, toe te kennen aan veel infiltratie door de slechte hechting tussen de ruwe carbonsteen en de mortel. Bij de pure kalkmortel werd geen diepe infiltratie waargenomen voor type 6 dankzij het vochtbufferend vermogen ervan.

Voor een compleet overzicht van de resultaten per testopstelling wordt verwezen naar bijlage E.

4.2. Kwantitatieve evaluatie

4.2.1. Overzicht

In Figuur 86 worden de absorptiecurves weergegeven van de 18 opstellingen tijdens de test. Om deze uiteenlopende resultaten systematisch te verklaren worden de curves per type en per mortel verklaard in respectievelijk paragraaf 4.2.2 en 4.2.3, maar eerst dienen nog een aantal algemene zaken te worden verduidelijkt voor de interpretatie van de resultaten en de totstandkoming van de curves.



Figuur 86: Overzicht van de absorptiecurves voor de 18 testopstellingen gedurende de test.

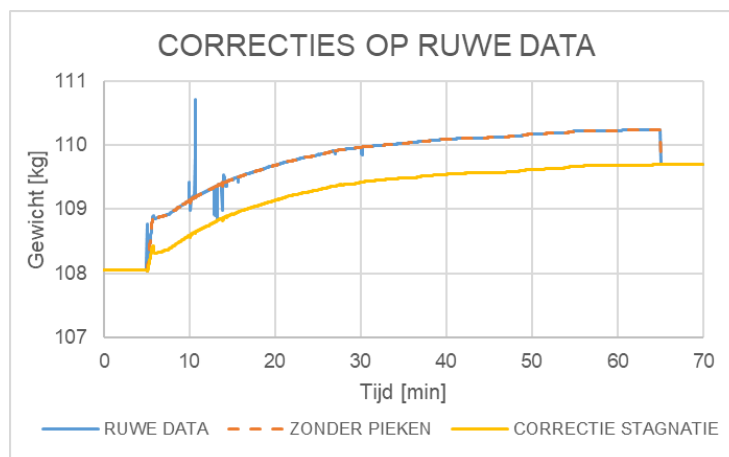
De curves hierboven zijn het resultaat van een postprocessing op de ruwe meetdata van de weegschaal. Bij meerdere logs werd gewerkt met een gemiddelde waarde per seconde. Voor en na de test van 60 minuten wordt 5 minuten droge en natte toestand behouden, resulterend in 70 minuten op de x-as. Wegens een technische storing op de weegschaal ontbreekt de curve voor bastaardmortel. Wel werd het nat en droog gewicht uitgezet om een idee te geven qua grootteorde in vergelijking met de rest.

Het droge en natte gewicht van alle opstellingen wordt in Tabel 6 weergegeven. Zonder de randeffecten zal dit natte gewicht in theorie iets lager moeten zijn dan de gemeten waarden, maar dit is niet exact te begroten. Door het grote aantal onzekerheden is het dus aangewezen om de waardes voor de vochtopname enkel relatief te interpreteren om de verschillende curves met elkaar te kunnen vergelijken. De curves tonen in functie van de vergelijkbaarheid steeds de gewichtstoename, waarbij de droge toestand van de natte toestand werd afgetrokken.

Tabel 6: Overzicht voor de 18 testopstellingen van droog gewicht, nat gewicht en opname.

	CEM 1	CEM 2	CEM 3	CEM 4	CEM 5	CEM 6
Droog [kg]	55,7	81,7	128,6	108,1	106,5	141,2
Nat [kg]	57,5	83,0	133,4	109,7	108,8	143,3
Opname [kg]	1,7	1,3	4,8	1,6	2,3	2,1
	BAST 1	BAST 2	BAST 3	BAST 4	BAST 5	BAST 6
Droog [kg]	54,4	74,4	120,6	105,0	102,4	136,1
Nat [kg]	56,5	76,6	124,3	106,8	106,4	140,7
Opname [kg]	2,1	2,2	3,7	1,8	4,1	4,6
	KALK 1	KALK 2	KALK 3	KALK 4	KALK 5	KALK 6
Droog [kg]	55,4	81,7	126,1	108,6	108,2	137,8
Nat [kg]	57,7	83,7	131,2	110,4	110,5	140,7
Opname [kg]	2,3	1,9	5,1	1,8	2,3	2,9

Voorts werden een aantal correcties op de ruwe data toegepast, ter illustratie afgebeeld in Figuur 87. Accidentele pieken in de weging door het aanraken van de weegschaal bij het begin en einde van de proef werden manueel weg gefilterd. Het gewicht van het stagnerend water vooraan in de testkast werd begroot door het water weg te halen aan het einde van elke test. Dit resulteerde in een sprong gelijk aan het gewicht van het gestagneerd water. De correctie gebeurt lineair in het begin van de test tot het stagnerend water een evenwicht bereikt na 40 tot 60 seconden, vanaf dan is de correctie constant.



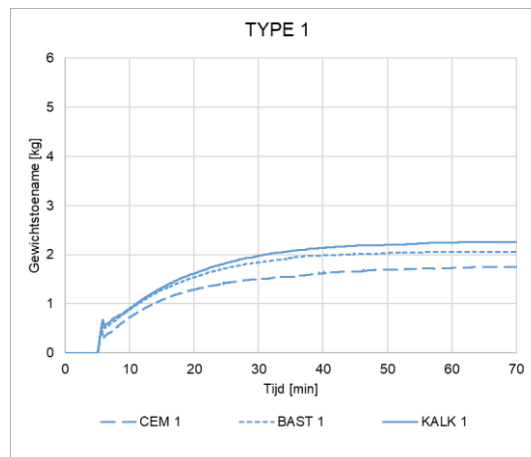
Figuur 87: Van ruwe data tot de gecorrigeerde grafiek voor het natte gewicht van de opstelling.

4.2.2. Vergelijking per metselwerktype: invloed van de mortelsoort

Om inzicht te krijgen in het verloop van de curves worden de resultaten eerst bekeken per type baksteen, zo kan het gedrag van de mortels vergeleken worden want alle andere randvoorwaarden zijn gelijk.

- **Type 1**

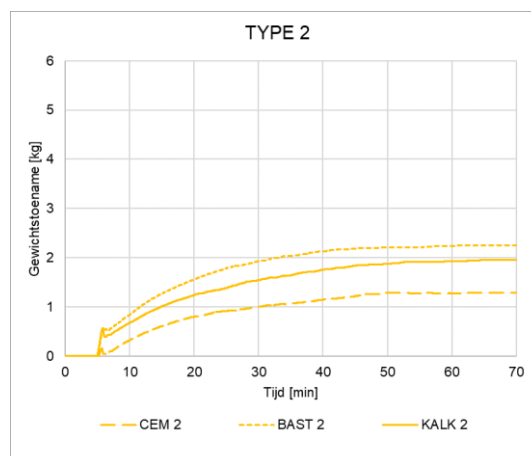
Uit de kwalitatieve analyse bleek dat de infiltraties bij type 1 vrij gelijkaardig en uniform over het oppervlak voorkwamen. Wanneer we naar de curves kijken in Figuur 88, zien we dan ook een logisch resultaat. De kalkmortel neemt het meeste water op, gevolgd door de bastarmortel. De cementmortel neemt het minste water op. Dit is in overeenstemming met eerder onderzoek, waarbij er minder afstroom werd waargenomen bij kalkmortel aan de sproeizijde (Calle, 2020). Dit kan verklaard worden door het hoger vochtbufferend vermogen van kalkmortel en is in overeenstemming met de experimentele A_w -waarden. De wateropname ligt rond de 2 kg.



Figuur 88: Vergelijking curves type 1. KALK 1 neemt logischerwijs het meeste water op.

- **Type 2**

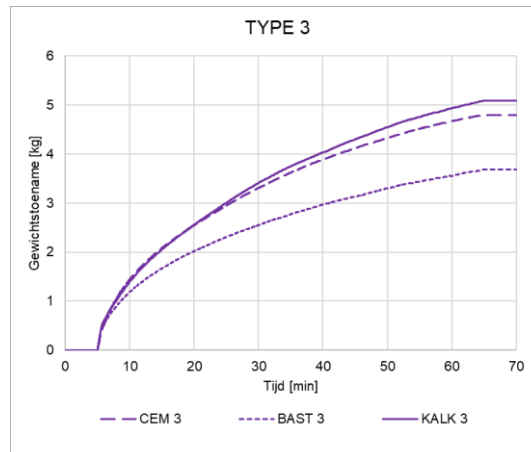
Bij de type 2 muren in Figuur 89 krijgen we een enigszins vertekend beeld. Hier is het de opstelling met bastarmortel die het meest opname vertoont. Dit kan verklaard worden door het feit dat er aan de achterzijde duidelijk natte zones zichtbaar zijn bij BAST 2, waar er bij CEM 2 en KALK 2 enkel lokale infiltraties optreden en de achterzijde voor de rest droog is. De wateropname blijft rond de 2 kg en is iets lager dan bij type 1, te verklaren door de lagere waarde van de waterabsorptiecoëfficiënt voor Decobloc 14 cm.



Figuur 89: Vergelijking curves type 2. BAST 2 nam meer op dan KALK 2, dit kwam ook naar boven in de kwalitatieve waarnemingen waarbij de achterzijde van BAST 2 als enige vochtige plekken vertoonde in de steen.

- **Type 3**

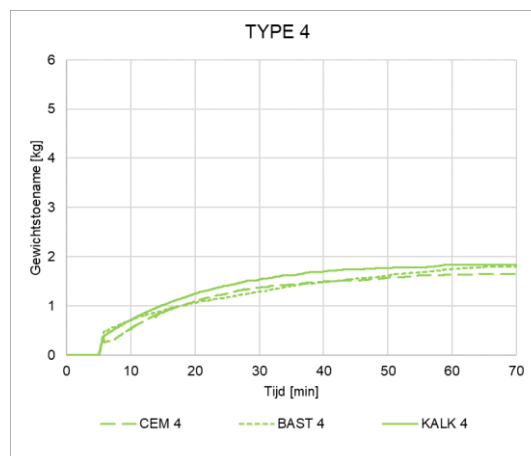
Uit de kwalitatieve analyse bleek dat de achterzijde van BAST 3 globaal droger is gebleven dan bij CEM 3 en KALK 3. We zien hier in Figuur 90 opnieuw het meeste opname bij de kalkmortel, gevolgd door de cementmortel. De bastaardmortel toont een beduidend lagere wateropname, hetgeen te verklaren valt door de achterzijde van het metselwerk die relatief droog bleef. Wel dient opgemerkt te worden dat de wandopbouw hier beduidend meer water heeft opgenomen dan de voorgaande 2 wandopbouwen, tussen de 3.5 en 5 kg. De infiltratie langs het contactoppervlak tussen de bezande bakstenen en mortel kan hier als voornaamste reden worden aangewezen. Voorts lag de waterabsorptiecoëfficiënt van de MX-stenen van alle geteste materialen ook het hoogste.



Figuur 90: Vergelijking curves type 3 met opmerkelijk meer opname dan de andere testopstellingen.

- **Type 4**

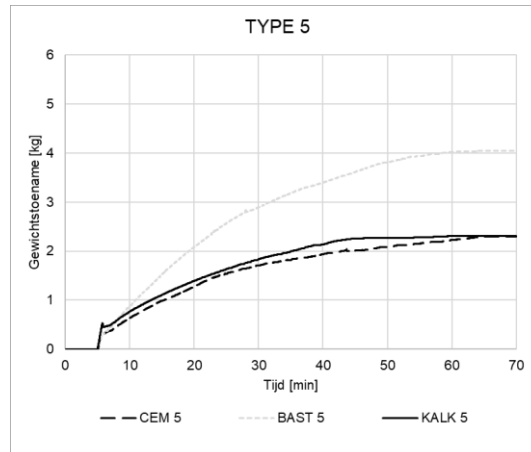
De steense muren in kruisverband tonen onderling gelijkaardige infiltraties, waarbij BAST 4 het minste infiltratievlekken toont. Op de grafiek in Figuur 91 zien we opnieuw de logische tendens waarbij de kalkmortel meer water opneemt dan de bastaardmortel en cementmortel. Wel blijft BAST 4 stijgen op het einde in tegenstelling tot de andere twee curves. Een mogelijke verklaring is de afwezigheid van infiltraties aan de achterzijde van BAST 4. De andere twee opstellingen hebben dit wel en de curves vlakken mogelijk af doordat er na een initiële fase met snelle wateropname via de infiltraties een vertraging van dit proces optreedt. Dit komt omdat het materiaal rond het vochtbad na deze eerste fase met zijdelingse bevochtiging ook vochtig is en nu minder snel water opneemt. Er wordt opnieuw rond de 2 kg water opgenomen door de muren over het hele testverloop.



Figuur 91: Vergelijking curves type 4. Kalk neemt logischerwijs het meeste water op.

- **Type 5**

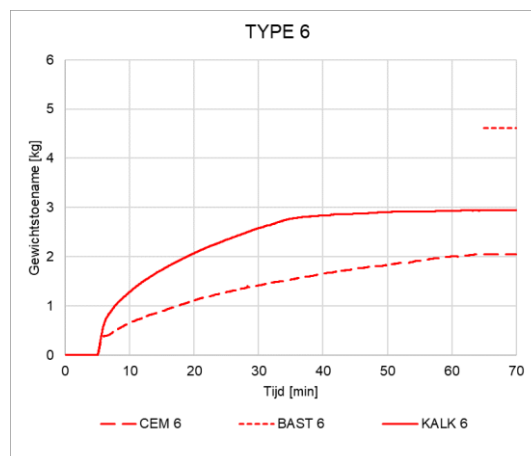
Uit de kwalitatieve analyse van de achterzijdes lijkt KALK 5 het meest regendicht, gevolgd door CEM 5. Bij BAST 5 zijn er duidelijk randeffecten te zien, deze worden niet beschouwd maar kunnen dus weldegelijk het gewicht beïnvloeden. Dit is ook zichtbaar in de curves in Figuur 92: BAST 5 ligt significant hoger dan de andere twee en neemt ongeveer 4 kg water op. Deze resultaten zijn dan ook niet representatief, vandaar worden ze in het lichtgrijs weergegeven. Voorts zien we opnieuw dat de kalkmortel het meeste opneemt. De opstellingen met KALK en CEM nemen iets meer dan 2 kg vocht op. De opgevulde hartvoeg zorgt ook hier niet voor een significante verbetering.



Figuur 92: Vergelijking curves type 5. BAST 5 wordt niet beschouwd wegens randeffecten.

- **Type 6**

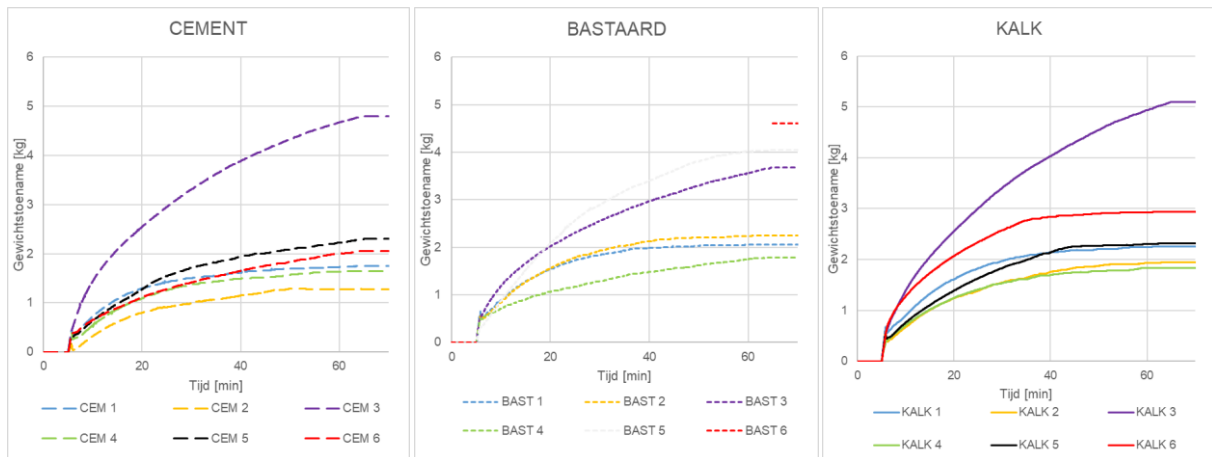
Bij type 6 werden diepe infiltraties vastgesteld in de opstellingen met cement- en bastaardmortel. Bij CEM 6 en KALK 6 situeert de infiltratie zich rond enkele lintvoegen, bij BAST 6 is de gehele achterzijde nat vanaf een zekere hoogte. Ook werd al vermeld dat de resultaten van de weging voor BAST 6 verloren gingen door een technische storing, maar het wordt in Figuur 93 wel duidelijk dat deze muur (buitensporig) veel heeft opgenomen, zo'n 4-5 kg. Hoewel KALK 6 geen diepe infiltratie toonde, werd er wel meer opgenomen dan bij CEM 6, waar de infiltratie lokaal tot 5-6 cm diep kwam. Dit wijst opnieuw op het vochtbufferend effect van de kalkmortel, aangezien er in de kalkhennep-isolatie nauwelijks kleurstof werd aangetroffen.



Figuur 93: Vergelijking curves type 6. KALK 6 nam meer vocht op dan CEM 6, terwijl er minder infiltratie werd geobserveerd in de isolatie. Dit wijst op de vochtbufferende kwaliteiten van pure kalkmortel.

4.2.3. Vergelijking per mortel: invloed van het metselwerktype

Wanneer we de curves vergelijken door ze samen te zetten per mortelsoort in Figuur 94 zien we meteen weer enkele duidelijke trends. De meeste curves liggen redelijk gegroepeerd en tonen dus een gelijkaardig gedrag met een opname bij de kalk- en bastaardmortels die typisch rond de 2 kg ligt. Bij de cementmortels ligt de opname iets meer gespreid, met ook lagere waarden tot minimaal 1.3 kg. De type 3 opbouw met de bezande MX-stenen is echter niet alleen overall de hoogste curve maar toont zich ook sterk afwijkend van de rest want de wateropname ligt bovendien veel hoger, tussen 3.5 en 5 kg. De curve voor BAST 5 toonde een buitensporige gewichtstoename door randeffecten en wordt daarom niet beschouwd en weergegeven in het lichtgrijs.



Figuur 94: Vergelijking van de absorptiecurves per mortelsoort.

Het afvlakken van de opnamecurves kan zoals eerder aangehaald verklaard worden doordat er via scheuren en andere onvolkomenheden in eerste instantie snel water wordt opgenomen. Dit zorgt voor zijdelingse bevochtiging van het dieper gelegen materiaal, wat in tweede instantie dan weer een vertraging van de wateropname veroorzaakt omdat het materiaal reeds vochtig is.

5. Conclusie

In dit deel werd het experimenteel onderzoek in het kader van deze thesis behandeld. Eerst werd **het ontwerp en de uitvoering van de testopstellingen** beschreven. Er werden 18 testopstellingen gebouwd: 6 soorten baksteen gecombineerd met 3 mortels (cement-, bastaard- en kalkmortel). Een belangrijk inzicht hierbij is de goede verwerkbaarheid van de pure kalkmortel – hoewel dit in de praktijk soms onterecht wordt onderschat. Vervolgens werd ook het **testprotocol** voor een berekeningstest bepaald, waarbij zonder drukverschil een uur lang minstens 2 l/min.m² werd gespreeid op de testmuren.

Een eerste deel van de experimentele resultaten spitst zich toe op het bepalen van de **waterabsorptiecoëfficiënt A_w** van de gebruikte materialen. Zo bleek kalkmortel de hoogste waarde van A_w te hebben, gevolgd door bastaard- en cementmortel. Het materiaal met de grootste spreiding op de resultaten bleek de recuperatiesteen, ondanks het grootste aantal geteste proefstukken.

Via een **kwalitatieve analyse van de resultaten** van de berekeningstest werden de infiltratiepatronen aan de achterzijde van het metselwerk verklaard via enkele fenomenen. Ze worden hieronder opgelijst:

- Infiltratie van regenwater verloopt **eerst via de voegen**. Rond de stootvoegen wordt versterkte infiltratie opgemerkt als gevolg van de mindere verdichting bij de uitvoering ervan. Ook rond de lintvoegen worden infiltraties geobserveerd, met afstroom naar beneden en capillaire absorptie naar boven tot gevolg aan de achterzijde van het metselwerk.
- Het **contactoppervlak** tussen mortel en baksteen is cruciaal. Verbranding van mortel kan leiden tot een slechte hechting in het contactoppervlak. Een continu contactoppervlak tussen binnen en buiten zoals in de koppenlagen van type 4 resulteerde dan ook in lokale infiltraties rond de stootvoegen. De hartvoeg in type 5 zorgde echter niet voor significante verbeteringen van de regendichtheid. Ook de textuur van de baksteen bleek cruciaal voor de hechting met de mortel. In de type 6 muren met de ruwe carbonsteen werd diepe infiltratie waargenomen tot in de isolatie, in de type 3 muren zorgde het bezande oppervlak van de MX-steen voor meer infiltratie dan doorheen de dunnere metselwerkschil van type 2. Uit al deze vaststellingen blijkt dus dat het contactoppervlak veel bepalender is voor regendichtheid dan de metselwerkdikte.
- **Scheuren en de uitvoeringskwaliteit** van metselwerk zijn allesbepalend. Quasi regendichte opstellingen vertoonden enkel nog infiltratie rond lokale defecten.

Vervolgens werden ook de curves voor de gewichtstoename tijdens de berekeningstest vergeleken in een **kwantitatieve analyse van de resultaten**. Hieruit werden de volgende conclusies getrokken:

- De opstellingen met kalkmortel toonden de hoogste wateropname, gevolgd door bastaardmortel en cementmortel. Dit werd ook bevestigd via de experimentele waterabsorptiecoëfficiënten.
- De type 3 opstellingen toonden significant meer wateropname dan alle andere opstellingen, te wijten aan het bezande contactoppervlak en de iets hogere waterabsorptiecoëfficiënt. Hieruit blijkt opnieuw het belang van het contactoppervlak tussen mortel en baksteen.
- De type 6 opstellingen met BAST en CEM vertoonden diepe infiltratie in het isolatiemateriaal. Hoewel de opstelling met KALK veel meer water had opgenomen, werd er enkel oppervlakkige infiltratie aangetroffen. Dit toont het vochtbufferend vermogen van pure kalkmortel aan.

Hierbij dient in het achterhoofd gehouden te worden dat alle resultaten relatief dienen geïnterpreteerd te worden. Ongewenste fenomenen zoals randeffecten dragen namelijk bij aan de gewichtstoename tijdens de test, waardoor de exacte waarde van de wateropname minder betekenis heeft.

IV.

DEEL IV – HAM-simulaties

In dit deel worden 3 reeksen hygrothermische simulaties uitgevoerd in Delphin 6.1.6 als studie op de type-wandopbouw van BLAF zoals gedefinieerd in Deel I. De eerste reeks bevat 1D simulaties die de evolutie onderzoeken van de wandopbouwen V1 tot V9 uit Figuur 7 waarbij de isolatie steeds meer onbeschut is. De tweede reeks voert een one-factor-at-a-time approach uit in 1D voor de meest onbeschutte wandopbouw. Het doel is om te identificeren welke parameters een bepaalde impact hebben op het resultaat. Zo kan er op zoek gegaan worden naar optimalisatie. Tot slot bevat de derde reeks een aantal 1D en 2D simulaties om een vergelijking te maken tussen de experimentele opstellingen en de simulaties. Ook wordt zo het effect van 1D tegenover 2D simulaties onderzocht, en kan ingeschat worden of er in de simulaties een onder- of overschatting van de realiteit gebeurt.

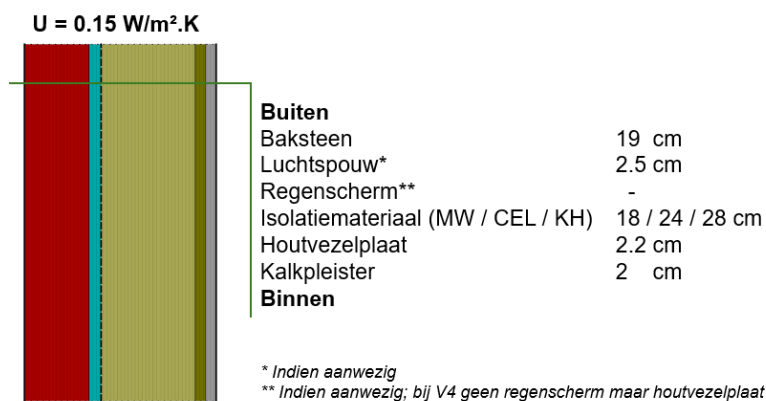
1. Vergelijking van de types opbouwen uit de praktijk van BLAF (1D)

In dit eerste deel van de HAM-simulaties wordt onderzocht wat de impact is van de evolutie naar steeds minder beschutte isolatie in de wandopbouwen van BLAF, type V1 tot V9. In het eerste onderdeel worden de opbouw van het simulatiemodel en de gemaakte keuzes en aannames toegelicht. In het tweede onderdeel worden de resultaten van de simulaties besproken en vergeleken, op kwalitatieve en kwantitatieve wijze. De kwalitatieve evaluatie verloopt via een aantal plots uit Delphin, de kwantitatieve evaluatie maakt gebruik van eerder beschreven degradatiemodellen om de duurzaamheid op lange termijn te beoordelen. Tot slot worden de nodige conclusies getrokken uit de resultaten.

1.1. Model en parameters: input, output en aannames

Geometrie

De wandopbouwen worden gedefinieerd volgens een aantal materiaallagen om zo de opbouwen V1 tot V9 uit Deel 0 te representeren. Een voorbeeld voor V1 met aanduiding van de materialen en diktes is gegeven in Figuur 95. De hoogte is altijd 1 m.



Figuur 95: Voorbeeld van een geometrische opbouw voor modellen V1 tot V9 in Delphin.

Voor de **baksteen** wordt gekeken naar een steense muur (19cm) in het materiaal *Old Building Brick Dresden ZK* [ID=499]. Deze baksteen is kritisch wanneer er naar houtdegradatie wordt gekeken (Vanderschelden & Van Den Bossche, 2020) en werd vanwege de combinatie met een achterliggende houtskeletbouw gekozen.

De **luchtpouw** bestaat uit het materiaal *Air gap 25mm (vertical)* [16]. Om het effect van spouwventilatie in rekening te brengen wordt een *Field Condition* toegevoegd met een ventilatievoud van 5 ACH. Dit is een gemiddelde waarde gebaseerd op onderzoek waarbij het ventilatievoud in een spouw achter metselwerk tussen de 1 en 10 ACH bedraagt (Langmans et al., 2016).

Als **regenscherm** wordt een dampopen gevelfolie gemodelleerd via een *Contact Condition* met Sd-waarde 0.05 m op basis van een technische fiche, zie bijlage A.1. Enkel in V4 (klassieke houtskeletbouw met metselwerk gevelafwerking) wordt het regenscherm vervangen door een houtvezelplaat aan de buitenzijde van het houtskelet.

Voor het **isolatiemateriaal** worden de 3 meest gebruikte isolatiematerialen uit de praktijk van BLAF beschouwd zoals besproken in Deel I, Figuur 7: MW, CEL en KH. De gekozen materialen zijn respectievelijk *Mineral Wool 032* [730], *Blown-in Cellulose* [580] en *Hemp concrete turned, 50% soda lime* [1829]. De diktes worden bepaald zodat voor de wandopbouw een vergelijkbare U-waarde wordt bekomen van ca. $U = 0.15 \text{ W/m}^2\text{.K}$ (passiefhuishnorm). Het houtskelet wordt niet gemodelleerd, maar in V1, V4 en V6 is het houtskelet in principe aanwezig over de volledige isolatiedikte. Bij de andere types wordt een CLS houtskelet van 14 cm uitgelijnd met de binnenzijde van de isolatie. Deze configuratie werd gekozen als meest representatief vanuit de studie van de type-wandopbouwen van BLAF.

Als **binnenafwerking** wordt gekozen voor dampopen materialen zodat alle resulterende opbouwen dampopen zijn. Er wordt gewerkt met een houtvezelplaat – *Wood Fibre Insulation Board* [270] – en een kalkpleister - *Lime Plaster* [629] in courante diktes.

Het **grid** wordt gediscrètiseerd tussen 0.1 mm (min) en 1 mm (max). Tot slot worden de hygrothermische parameters van de gebruikte materialen weergegeven in Tabel 7. Gezien de simulaties in de minerale wol in eerste instantie leidden tot onrealistische vochtophopingen in de eerste 2 cm, werden θ_{eff} , θ_{por} en θ_{cap} gedecimeerd. In de realiteit zou dit overeenkomen met het afstromen van druppels aan de binnenzijde van het metselwerk. Gezien de waterabsorptiecoëfficiënt gelijk aan 0 is en er geen vloeibaar vochttransport (geen LCC) mogelijk was en wel vochttopslag in de minerale wol bleef het water onnatuurlijk ophopen.

Tabel 7: Hygrothermische parameters van de gebruikte materialen in simulaties V1-V9.

NAAM	ρ [kg/m³]	λ [W/m.K]	c [J/kg.K]	μ [-]	θ_{80} [m³/m³]	θ_{eff} [m³/m³]	θ_{por} [m³/m³]	A_w [kg/m²·s]	Kleff [s]
Old Building Brick Dresden ZK [499]	1,734.1	0.657	919	24.5	0.015	0.324	0.346	0.107	2.47E-09
Air gap 25mm (vertical) [16]	1.3	0.138	1050	0.4	1.00E-05	1.000	1.000	1.00E-07	0
Hemp concrete turned, 50% soda lime [1829]	402.9	0.062	828	6.9	0.019	0.567	0.848	0.097	4.55E-06
Blown-in Cellulose [580]	55.2	0.048	2544	2.0	0.006	0.780	0.926	0.563	3.46E-06
Mineral Wool 032 [730*]	37.0	0.032	840	1.0	6.782	0.09	0.09	0.000	No
Wood Fibre Insulation Board [270]	150.0	0.042	2000	3.0	0.018	0.600	0.981	0.070	2.16E-08
Lime Plaster [629]	1,498.4	0.412	802	9.3	0.034	0.430	0.435	0.019	1.84E-10

* = aangepaste eigenschappen

Klimaat

Er wordt zoals vermeld in paragraaf 1.1 gekozen voor het MRY van Vandemeulebroucke et al. als buitenklimaat van Brussel (Vandemeulebroucke et al., 2022). Ook wordt het binnenklimaat van Brussel gebruikt gezien de dynamische aard ervan. De oriëntatie wordt ingesteld op zuidwest (ZW), deze oriëntatie is doorgaans kritisch voor vochtgerelateerde schadefenomenen gezien de dominante windrichting in België ZW is en resulteert in de hoogste slagregenbelasting (*wind driven rain*). De overgangscoëfficiënten voor conductie, diffusie en straling aan het oppervlak worden weergegeven in Tabel 8 en zijn gebaseerd op de Delphin manual (Nicolai & Grunewald, 2005).

Tabel 8: Overgangscoëfficiënten voor conductie, diffusie en straling aan het oppervlak.

COËFFICIËNT	WAARDE
Outdoor Heat Conduction	
Exchange coefficient for still air [W/m².K]	4
Slope coefficient for moving air [J/m³.K]	4
Exponent for moving air [-]	1
Long Wave Radiation	
Emission coefficient [-]	0.9
Short Wave Radiation	
Absorption coefficient [-]	0.7
Outdoor Vapor Diffusion	
Exchange coefficient for still air [s/m]	2.44E-08
Slope coefficient for moving air [s²/m²]	2.44E-08
Exponent for moving air [-]	1
Indoor Heat Conduction	
Exchange coefficient for still air [W/m².K]	8
Indoor Vapor Diffusion	
Exchange coefficient for still air [s/m]	2.5E-08

Wat betreft de slagregenbelasting worden alle gegevens overgenomen uit het buitenklimaat van Brussel. Er wordt gekozen voor een *Rain Exposure* (RE) gelijk aan 1. Deze waarde komt overeen met een *Wall Factor* (W) van 0.4 volgens de norm EN ISO 15927-3, zoals te zien is in Figuur 96. Dit komt dus overeen met de gemiddelde regenbelasting op een laagbouw.

Description of wall	Average value	Distribution
Two-storey gable	0,4	

Figuur 96: Voorbeeld van de waarden voor de Wall Factor in EN ISO 15927-3:2009.

De invoer van de RE is belangrijk en er moet rekening gehouden worden met de impliciete aannames die in het regenmodel van Delphin 6 gebeuren op basis van EN ISO 15927-3:

$$I_s = \frac{2}{9} \sum v * r^{\frac{8}{9}} * \cos(D - \theta)$$

Hierbij is I_s de *wind field period index* [l/m^2], v de gemiddelde uurlijkse windsnelheid [m/s], r de totale uurlijkse hoeveelheid neerslag in mm [l/m^2], D de gemiddelde uurlijkse windrichting [$^\circ$] en θ de richting van de wand [$^\circ$]. Vervolgens worden op I_s een aantal correcties uitgevoerd:

$$I_{WS} = I_s * C_R * C_T * O * W$$

Hierbij is C_R een factor voor terreinvariaties, C_T een factor voor de topografie, O de *Obstacle Factor* en W de *Wall Factor*. Delphin maakt hiervoor de volgende aannames, weergegeven in Tabel 9:

Tabel 9: Standaardaannames voor de correctiefactoren op de regenbelasting in Delphin 6.

FACTOR	WAARDE DELPHIN
C_R	1.007
C_T	1.0
O	0.8
W	0.4

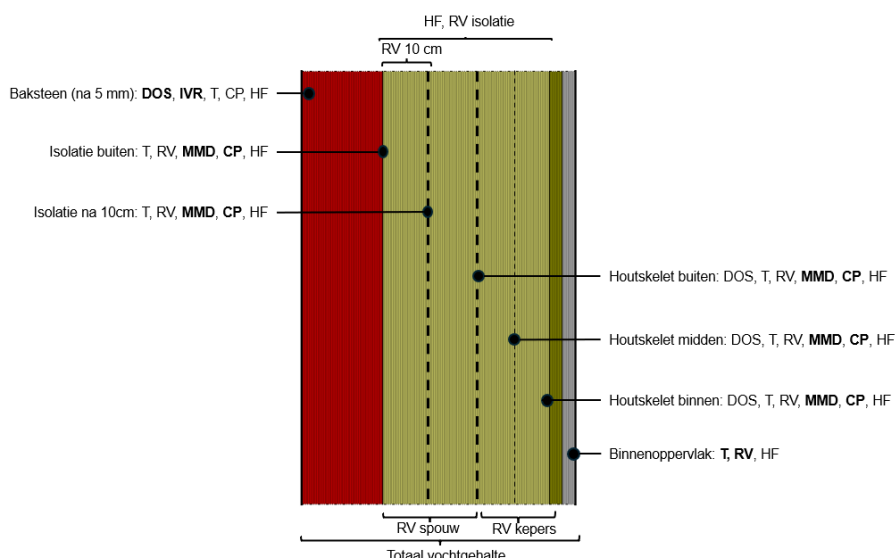
Volgens EN ISO 15927-3 komt dit overeen met een laagbouw (= hoogte van 10 m boven de grond) in terreincategorie II (= open omgeving met enkele bomen en verspreide bebouwing), een vlakke topografie en het dichtstbijzijnde obstakel bevindt zich 80 tot 100 m ver. Het dient geen betoog dat dit dus zeer conservatieve en extreme aannames zijn. Via de RE kan men in Delphin een correctie toepassen op al deze factoren. Ter illustratie wordt in Tabel 10 een conversie getoond om via de RE correcties toe te passen op de *Wall Factor* W uit de norm, als de andere factoren ongewijzigd blijven:

Tabel 10: Conversietabel tussen de Rain Exposure (RE) in Delphin en de Wall Factor (W) uit EN 15927-3:2009.

RE (Delphin)	W (EN 15927-3)
0.5	0.2
0.75	0.3
1.0	0.4
1.25	0.5
1.5	0.6
2	0.8

Outputs

Via het aanmaken van *output files* kan data worden opgeslagen met informatie rond de dynamische evolutie van allerlei hygrothermische parameters, die nodig zijn voor de evaluatie van de resultaten. Een overzicht van de opgevraagde output in alle wandopbouw wordt bij wijze van illustratie voor een generieke wandopbouw weergegeven in Figuur 97. De opgevraagde grootheden zijn temperatuur (T [$^\circ C$]), relatieve vochtigheid (RV [%]), *degree of saturation* (DOS [%]), *ice volume ratio* (IVR [%]), capillaire dampdruk (CP [Pa]) en *moisture mass density* (MMD [kg/m^3]). De locaties zijn gekozen in functie van de evaluatiecriteria, die in paragraaf 1.2 worden toegelicht.



Figuur 97: Illustratie met aanduiding van alle gevraagde outputs in de 1D-simulaties.

Instellingen simulatie en simulatieduur

Via de *output grids* wordt de resolutie en tijdsperiode bepaald waarover de data van de *output files* wordt verzameld. Het is belangrijk dat er geen vochtaccumulatie meer optreedt zodat er op het moment van evaluatie een evenwichtssituatie in de wand is. Deze evenwichtssituatie wordt bereikt volgens EN 15026:2023 wanneer jaarlijkse het gemiddelde vochtgehalte over een periode van 5 jaar minder dan 1% stijgt. Daarom wordt na iteratieve simulaties gekozen voor een simulatieduur van 15 jaar. De *output grids* worden zo gedefinieerd dat er in het 15^e jaar data met uurlijkse resolutie wordt verzameld.

Voorts wordt er gerekend met het *equilibrium ice model* omdat er ook naar vorstschade zal worden gekeken. De initiële temperatuur en relatieve vochtigheid worden ingesteld op 20°C en 90%, afgestemd op het bereiken van de evenwichtssituatie na 15 jaar.

1.2. Evaluatiecriteria

Kwalitatieve evaluatie

Om eerst een globaal inzicht te krijgen in het algemene gedrag van de wandopbouwen in de simulaties worden een aantal kwalitatieve evaluaties gemaakt. Zo wordt er gebruik gemaakt van *fieldplots* die de evolutie van parameters zoals het vochtgehalte en de relatieve vochtigheid tonen doorheen de tijd. Daarnaast wordt ook gekeken naar de relatieve vochtigheden in de isolatiematerialen om verschillen in hun gedrag te begrijpen.

Kwantitatieve evaluatiecriteria

Om een vergelijking te maken tussen de hygrothermische prestaties van de muren worden een aantal kwantitatieve evaluatiecriteria gehanteerd. Het is belangrijk om steeds in het achterhoofd te houden dat alle resultaten relatief en dus vergelijkend moeten worden geïnterpreteerd. Vaak wordt er gebruik gemaakt van de verkeerslichtmethode: 3 gradaties voorgesteld door rood, oranje en groen van niet aanvaardbaar tot aanvaardbaar. Waar nodig wordt de interpretatie van deze kleurcode verder uiteengezet. Hieronder worden kort alle evaluatiecriteria toegelicht:

- **Schimmelvorming op het binnenoppervlak**

Schimmelvorming wordt geëvalueerd op het binnenoppervlak van de wandopbouw via het geüpdatet VTT-model in de webtool HAMalyser (zie vorstschade). Het concept van de schimmelindex M werd eerder al toegelicht in paragraaf 6.2.

- **Vorstschade in de baksteen**

Om vorstschade te evalueren wordt het aantal kritische vorst-dooicycli (FTC_{crit}) geëvalueerd via de webtool HAMalyser². Het concept van FTC_{crit} werd toegelicht in paragraaf 2.4. Vorstschade wordt geëvalueerd op een kritische 5 mm diepte in de baksteen.

- **Houtdegradatie**

Houtdegradatie wordt geëvalueerd op de buitenste positie van het houtskelet, die het meest vochtig en dus kritisch is. Afhankelijk van de opbouw en de isolatiedikte varieert dus ook de positie van het houtskelet, zie Figuur 98. Er worden 3 modellen toegepast, in toenemende mate van complexiteit en betrouwbaarheid:

- Time-of-wetness 25/10 (TOW) (Viitanen, 1996):

Een vochtgehalte van 25 m% bij een temperatuur hoger dan 10°C mag maximaal 168 uur per jaar (1 week) optreden om houtrot te vermijden. Het concept van TOW 25/10 werd toegelicht in paragraaf 5.2.

- WTA Merkblad 6-8-15 (Kehl, 2013):

De resultaten mogen de kritische (T, RV)-curve niet overschrijden of er kan houtrot plaatsvinden. Indien de curve toch overschreden wordt, wordt een TOW uitgedrukt als het aantal uren bovenkritisch per jaar in %. Het concept van WTA Merkblad 6-8-15 werd toegelicht in paragraaf 5.2.

- Dose-response model (Brischke & Meyer-Veltrup, 2016; Brischke & Rapp, 2008):

Het totaal aantal dosissen gedurende het evaluatiejaar wordt bekeken en ook uitgedrukt als een percentage van het maximale aantal dosissen dat mogelijk is in 1 jaar. De *Decay Rating* (DR) voor witrot, zachtrot en bruinrot wordt bepaald volgens EN 252 en uitgezet op 1 jaar (= gedurende het evaluatiejaar) en 4 jaar (= om te vergelijken met de curves in Brischke & Meyer-Veltrup (2016)). Het concept van het dose-response model werd toegelicht in paragraaf 5.2.

Aangezien er in de 1D simulaties geen hout wordt gemodelleerd moeten er een aantal aannames gemaakt worden. Omdat we in de buitenste positie van de houten stijl geïnteresseerd zijn, wordt verondersteld dat de relatieve vochtigheid in het isolatiemateriaal op die plaats in evenwicht is met de relatieve vochtigheid als er een houtmateriaal had gezeten. Wat betreft het vochtgehalte is dit verhaal enigszins complexer. Er wordt daarom aangenomen dat de capillaire druk in het isolatiemateriaal in evenwicht is met het hout. Op basis van trimodale en quadmodale van Genuchten fittings voor de MRC wordt voor de vurenhout materialen uit Delphin (*spruce*) het vochtgehalte berekend uit de capillaire druk. Met dit vochtgehalte kunnen vervolgens de nodige berekeningen worden uitgevoerd.

De keuze voor vurenhout is gebaseerd op het feit dat dit een veelgebruikte houtsoort voor houtskeletbouw is. Er wordt uiteindelijk gekozen voor het materiaal *Spruce tangential (from Saxony)* [713], gezien dit materiaal in eerder onderzoek de beste overeenkomst met de praktijk opleverde via experimenten (Habtie et al., 2022). Bovendien wordt er geen kops hout (*longitudinal*) beschouwd op de plaats van evaluatie aangezien we in de zone onder de kroonlijst evalueren wat betreft de regenbelasting. Kops hout kan bijvoorbeeld echter wel aanwezig zijn onderaan in de constructie aan de uiteindes van de stijlen, en is relevant als er vocht zou accumuleren onderaan het houtskelet.

² HAMalyser webtool ontwikkeld door Universiteit Gent: <https://hamalyser.shinyapps.io/HAMalyserUK/>

- **Performantie van het isolatiemateriaal**

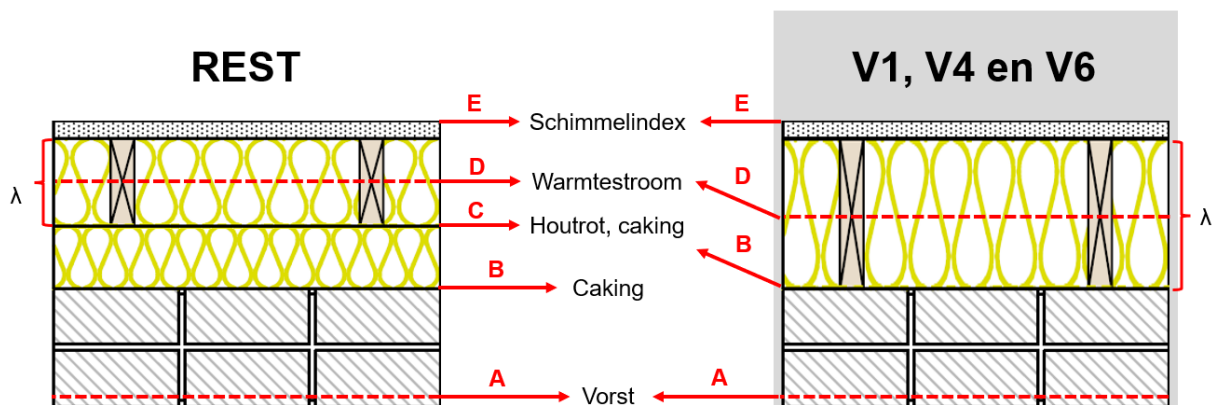
Bij gebrek aan degradatiemodellen in biobased isolatie worden een aantal criteria voor de performantie onder vochtbelasting afgetoetst:

- Er mag geen vochtaccumulatie meer optreden (EN 15026:2023): de stijging van het gemiddelde jaarlijkse vochtgehalte over een periode van 5 jaar moet minder dan 1% bedragen. Deze voorwaarde is bij voorbaat voldaan door de simulatieduur (cf. supra).
- Thermische performantie
 - De actuele vochtafhankelijke λ -waarde wordt vergeleken met de λ -waarde in droge toestand. De werkelijke jaargemiddelde λ -waarde van de isolatie tussen het houtskelet wordt bepaald en er wordt uitgedrukt via een percentage hoeveel deze hoger is op jaarbasis. Als criterium geldt doorgaans een maximale stijging van 5%.
 - De warmtestroom (HF) uit de simulaties wordt vergeleken met de warmtestroom in een simulatie zonder regenbelasting ("droge toestand"). De gemiddelde jaarlijkse stijging van de warmtestroom door vocht in de isolatie wordt bepaald en uitgedrukt als een percentage. De locatie is steeds het midden van het houtskelet, om schommelingen aan binnen- en buitenzijde te vermijden. Als criterium geldt doorgaans dat de stijging maximaal 5% mag zijn.

Voor cellulose bestaat er echter wel een specifiek degradatiecriterium:

- *Caking* van cellulose: voor cellulose wordt het criterium van caking bij 0.35 kg/kg uitgerekend (Langmans, 2013). Het specifieke risico in een wand is dat de isolatie inzakt door klompvorming en er ongeïsoleerde holtes ontstaan bovenaan. Ook het maximaal optredende vochtgehalte (in kg/kg) en een TOW, het aantal uren overschrijding van deze 0.35 kg/kg, worden bepaald. De locatie voor de evaluatie is de buitenzijde van de isolatie en 10 cm diep in de isolatie.

Een overzicht van alle kwantitatieve criteria en hun locaties wordt gegeven in Figuur 98. In opbouw V1, V4 en V6 zit het houtskelet tot de buitenzijde van de isolatielaag (locatie B). Deze positie zal vaak kritischer blijken en is niet zomaar vergelijkbaar met de andere opbouwen, daar zit het houtskelet tot locatie C. Om die redenen worden V1, V4 en V6 steeds met een grijze achtergrond getoond bij de resultaten om het onderscheid duidelijk te maken.



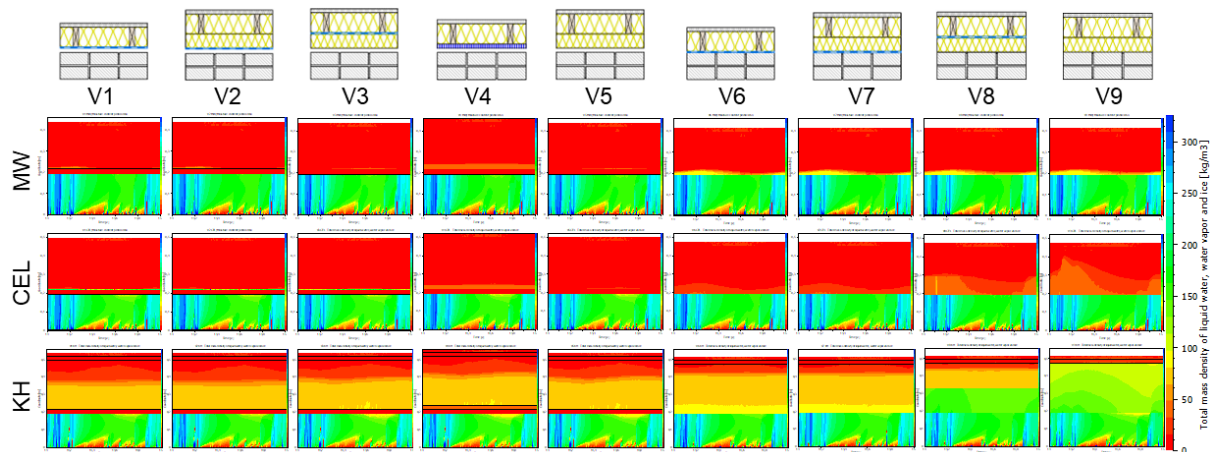
Figuur 98: Overzicht van alle kwantitatieve criteria bij de 1D simulaties en de locaties waarop ze bekeken worden. Voor V1, V4 en V6 is de positie van het houtskelet afwijkend t.o.v. de rest van de opbouwen, daarom worden ze voor de duidelijkheid met een grijze achtergrond gemarkeerd in het deel rond de resultaten.

Voorts is het belangrijk dat de resultaten niet absoluut mogen geïnterpreteerd worden. Het gaat over zowel de modellen als de criteria die de complexe werkelijkheid benaderen, maar dit biedt geen uitsluit. Wel kan er relatief gekeken worden naar verschuivingen en tendensen in de opbouwen.

1.3. Resultaten

Kwalitatieve resultaten

Om een globaal overzicht te krijgen van de tendensen in de wandopbouw wordt hieronder in Figuur 99 **het vochtgehalte** voor het 15^e evaluatiejaar getoond voor opbouw V1 tot V9, start in januari en einde in december. De rode kleur duidt op de laagste vochtgehaltes (“droog”), blauw op de hoogste vochtgehaltes (“nat”). Daarbij is het verschil in hygrothermisch gedrag tussen de isolatiematerialen meteen zichtbaar. Het referentiemateriaal, minerale wol (MW), bevat quasi geen vocht behalve in de winterperiode wanneer er vocht doorheen de steense muur tot binnen komt. De biobased materialen cellulose (CEL) en kalkhennep (KH) zijn vochtbufferend van aard en vertonen een aantal verschillen.



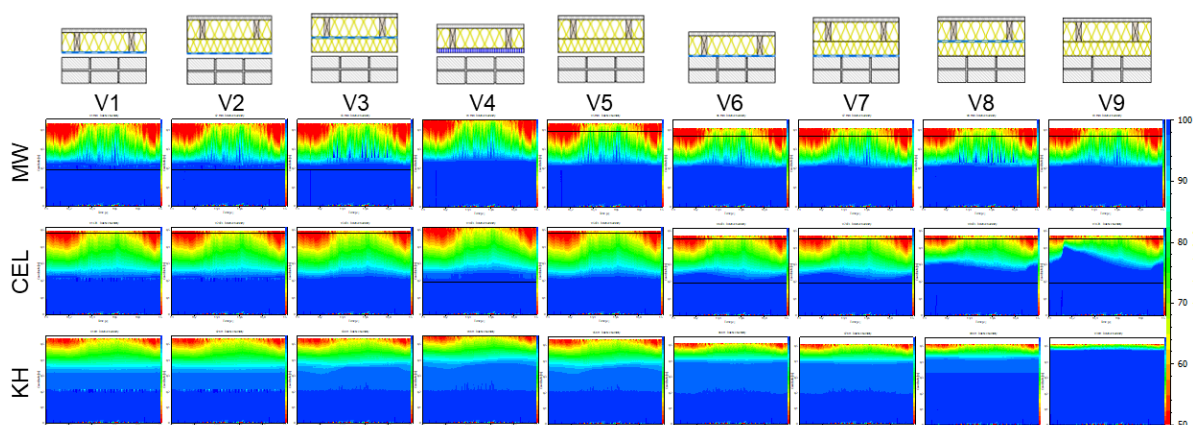
Figuur 99: Overzicht van de vochtgehaltes in opbouw V1 tot V9 voor de 3 isolatiematerialen in het 15e jaar.

De cellulose-isolatie in Figuur 99 blijft namelijk relatief droog zolang er minstens een spouw of een regenscherm een barrière vormt voor het vloeibaar vochttransport. Vanaf V8 is er isolatie die in direct contact staat met vloeibaar vochttransport vanuit het metselwerk en dan zien we oranje verkleuringen in de cellulose, wijzend op een hoger vochtgehalte. In V8 zit er na 10 cm nog een regenscherm waardoor het vocht in het begin van het jaar niet herverdeeld raakt en zorgt voor een gele piek tot tegen het regenscherm. In V9 zit er geen regenscherm meer en zien we de piek meer naar binnen herverdelen. In de zomer raakt het vocht echter nog zo goed als uitgedroogd. In het metselwerk zien we echter minder uitdroging in de zomer vanaf de luchtspouw wegvalt. Dit valt te verklaren doordat de cellulose-isolatie nu uitdroogt naar het metselwerk in plaats van naar de luchtspouw.

In kalkhennep is het afwijkend gedrag nog groter zoals blijkt uit Figuur 99. Zelfs met een spouw én regenscherm vindt er vochtophoping plaats in de isolatie die bovendien nauwelijks uitgedroogd raakt in de zomer. Er wordt nauwelijks schommeling geobserveerd op jaarbasis, zeker als de luchtspouw wegvalt. Hoe minder beschermt de isolatie wordt, hoe dieper het vochtfront in het isolatiemateriaal reikt en hoe vochtiger de isolatie wordt, te zien aan de verkleuring richting geel en zelfs groen. In de volledig open opbouw (V9) is er wel een schommeling op jaarbasis waarneembaar, maar de piek ligt veel later dan bij cellulose, wat erop wijst dat er meer inertie of vertraging op het vochtbufferend gedrag zit. Het is echter frappant dat het vocht steeds de spouw en het regenscherm overbrugt en toch vormt het regenscherm zoals in V8 een duidelijke barrière tussen de gekleurde zones. Dit vereist een meer gedetailleerde analyse hierna. Voorts zien we in het metselwerk vanaf V6 dat het opnemen van vocht in kalkhennep een drogend effect heeft op de vochtpieken in de baksteen. Dit uit zich in de donkerblauwe zones die gemilderd worden.

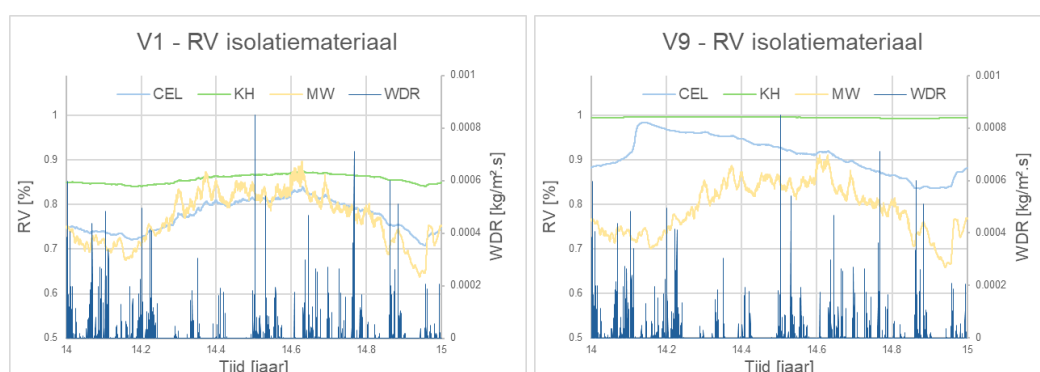
Vervolgens kijken we naar **de relatieve vochtigheid** (RV) in de isolatiematerialen via Figuur 100. Opnieuw zien we logische tendensen: minerale wol verloopt sterk via pieken. Deze worden uitgevlakt in cellulose door het vochtbufferend karakter. In kalkhennep worden ze nog meer uitgevlakt tot er bijna geen variatie meer optreedt op jaarbasis. Globaal ligt de relatieve vochtigheid ook hoger in cellulose en kalkhennep, te zien aan de kleurschakeringen.

Opnieuw geldt: hoe meer open de wandopbouw is, hoe hoger de RV is en hoe dieper de zone waarin dat geldt. In opbouw V9 zien we een erg hoge RV in de volledige KH isolatie, het hele jaar door.



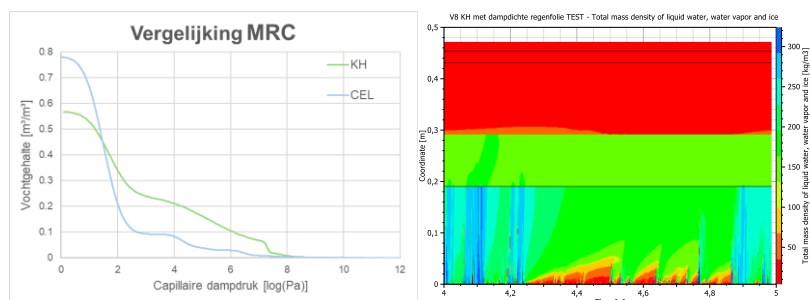
Figuur 100: Overzicht van de RV in opbouw V1 tot V9 voor de 3 isolatiematerialen in het 15e jaar.

Wanneer we ter illustratie eens de gemiddelde relatieve vochtigheid van het isolatiemateriaal vergelijken voor opbouw V1 en V9 in Figuur 101 zien we de eerder benoemde tendensen terug. Er treedt de meeste variatie op in de minerale wol en over het algemeen is de relatieve vochtigheid er lager. Vervolgens stijgt dit voor cellulose en kalkhennep en vakt de schommeling uit.



Figuur 101: Gemiddelde relatieve vochtigheid van de 3 isolatiematerialen op jaarbasis voor V1 en V9.

Deze hoge RV in kalkhennep leiden tot de hypothese dat het vochtfront in Figuur 99 te verklaren valt door condensatie in de fijne poriën van KH, typisch hygroscopisch gedrag. Hierdoor wordt het vocht in de lucht omgezet in vloeibaar vocht achter de luchtspouw of het dampopen regenscherm. Om dit te staven worden in Figuur 102 ter vergelijking de MRC van KH en CEL getoond. Daarin is duidelijk dat er al bij hogere capillaire drukken (in de kleinere poriën) hogere vochtgehalten optreden omdat KH een fijner poriënsysteem heeft. De hypothese wordt bevestigd door een dampdichte laag te simuleren op de positie van het regenscherm in V8, waardoor het damptransport wegvalt en de KH erbinnen droog blijft.



Figuur 102: Uit de MRC (links) blijkt dat KH meer fijne poriën heeft dan CEL en bij hoge RV zou damp kunnen condenseren in het materiaal. Het dampscherm (rechts) toont dit aan: de kalkhennep erbinnen blijft nu wel droog.

Kwantitatieve resultaten

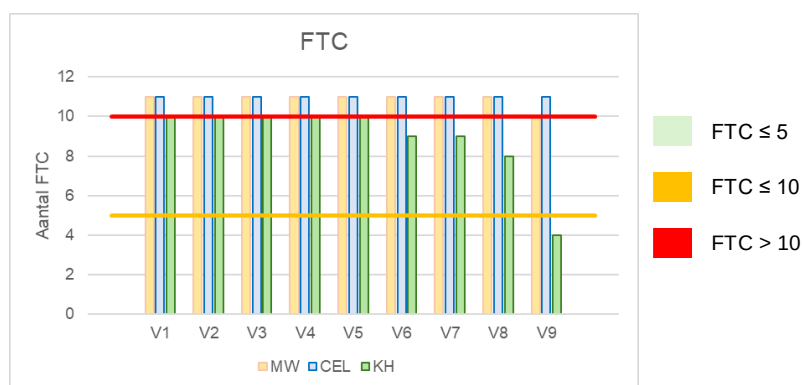
Hieronder worden de evaluatiecriteria in de vorm van degradatie-indicatoren getoond en besproken voor de opbouwen V1 tot V9. Nogmaals dient benadrukt te worden dat deze resultaten relatief geïnterpreteerd moeten worden. Voor de definitie van de locaties wordt verwezen naar Figuur 98.

- **Schimmelvorming op het binnenoppervlak (locatie E)**

In alle wanden was de schimmelindex M gelijk aan 0. Deze wordt dan ook verder niet meer beschouwd. Dit is logisch gezien de hoge isolatiegraad van de wanden en het opgelegde binnenklimaat. Bij een gecontroleerd binnenklimaat worden er geen schimmelproblemen verwacht.

- **Vorstschade in de baksteen (locatie A)**

Vervolgens zetten we het aantal kritische vorst-dooicycli (FTC) uit, met de criteria in het verkeerslicht volgens HAMalyser. Daarin zien we dat er geen verschil is voor het risico op vorstschade in de wandopbouwen met cellulose. Bij minerale wol resulteert de opbouw V9 net in een lager aantal FTC. Bij kalkhennep is het verschil echter het grootst: vanaf de luchtsponw wegvallt en vanaf er dus contact is tussen de kalkhennep en het metselwerk (al dan niet met een regenscherm ertussen), neemt het aantal FTC af. Opbouw V9 vertoont zo het laagste risico op vorstschade. Dit bevestigt wat we eerder zagen bij de kwalitatieve evaluatie: doordat kalkhennep het vocht onttrekt aan de baksteen is de baksteen over het algemeen droger en is er dus minder kans op vorstschade. Ook dient opgemerkt te worden dat baksteen in de nieuwbouwcontext typisch vorstbestand is. Dit criterium is echter wel relevant bij de renovatie met binnenisolatie van een steense metselwerkmuur.



Figuur 103: Aantal FTC als indicator voor vorstschade in de baksteen voor opbouw V1 tot V9.

- **Houtrot (locatie B of C)**

De resultaten van het criterium **TOW 25/10** zijn voorgesteld in Tabel 11. Gezien het houtskelet voor V1, V4 en V6 tot verder komt (locatie B) geven zij een vertekend beeld wat betreft de tendens voor de andere opbouwen met houtskelet op locatie C, vandaar staan ze in het grijs aangeduid. Zo blijkt dat er in MW meer dan een week (1.92%) per jaar bovenkritische vochtigheid optreedt op de buitenste positie van het houtskelet vanaf de luchtsponw wegvallt in V7. Voor CEL is dit pas het geval vanaf CEL rechtstreeks in contact staat met de baksteen en dus vloeibaar vochttransport mogelijk is (V8). Bij KH is er sprake van bovenkritische vochtigheid voor meer dan een week per jaar vanaf de isolatie niet door een luchtsponw én regenscherm wordt gescheiden van het metselwerk. In opbouw V9 is het houtskelet in locatie C 92% van het jaar bovenkritisch vochtig.

Tabel 11: TOW 25/10 als indicator voor bovenkritische vochtigheid ter hoogte van de buitenzijde van het houtskelet voor opbouw V1 tot V9. Het pass/fail criterium is 1.92% (1 week per jaar).

TOW 25/10	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9
MW	55%	0.1%	0.6%	59%	0.5%	56%	4.3%	8%	7%
CEL	57%	0%	0%	59%	0%	56%	0%	33%	62%
KH	58%	0%	16%	62%	40%	57%	89%	83%	92%

Houtskelet locatie B
XX% Acceptabel
 XX% TOW > 1.92% "meer dan 1 week bovenkritisch"

Vervolgens worden de resultaten van **WTA Merkblad 6-8-15** voorgesteld in Tabel 12. Dit criterium rekent uit of er houtrot kan plaatsvinden (>0%), de percentages in de tabel stellen voor hoeveel tijd per jaar dat de condities gunstig zijn voor het ontwikkelen van houtrot. Grosso modo zien we dezelfde trends terug als bij TOW 25/10. De overeenkomstige percentages liggen over het algemeen hoger dan bij TOW 25/10. Waar er geen bovenkritische vochtigheid optrad in TOW 25/10 vindt er ook geen houtrot plaats volgens WTA, behalve voor KH V2. Het WTA criterium blijkt dus nog conservatiever te zijn. Dit kan verklaard worden doordat WTA Merkblad wordt uitgerekend op basis van relatieve vochtigheid en TOW 25/10 op basis van de capillaire dampdruk, gerelateerd aan het vochtgehalte in het materiaal via de MRC. We zagen in de kwalitatieve evaluatie al erg hoge waarden voor de relatieve vochtigheid terug in kalkhennep.

Tabel 12: WTA Merkblad 6-8-15 als indicator van houtrot in de buitenzijde van het houtskelet voor opbouw V1 tot V9. Het pass-fail criterium is voor waarden > 0% (er kan houtrot plaatsvinden).

WTA Merkblad 6-8-15	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9
MW	100%	32.2%	27%	100%	32.9%	100%	50%	61.3%	55.7%
CEL	100%	0%	0%	100%	0%	100%	4%	86%	95%
KH	100%	32%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

 Houtskelet locatie B
  XX%
  Acceptabel
  XX%
 WTA > 0% "houtrot kan plaatsvinden"

Tot slot worden de resultaten van het **dose-response model** weergegeven in Tabel 13, steeds met het aantal dosissen en welk percentage van de maximale jaarlijkse dosis (365) dit representeert. Dit model is complexer en dus ook genuanceerder dan de vorige twee indicatoren. Wanneer het houtskelet op de buitenste positie (locatie B) zit in V1, V4 en V6 wordt er steeds vrij sterke houtdegradatie voorspeld. De laag spouwisolatie in V2 zorgt er bijvoorbeeld voor dat dit risico uit V1 vervalt omdat het houtskelet dieper in de opbouw zit, die voorts identiek is. Voor de opbouwen met MW treedt er quasi geen houtrot op, enkel in V8 zijn er een (verwaarloosbaar) aantal dosissen. Bij CEL zijn het enkel V8 en V9 waar er houtrot optreedt. Het grootste verschil is echter merkbaar bij KH, pas vanaf V7 wordt er houtrot voorspeld.

Tabel 13: Dose-response model met het aantal dosissen voor opbouw V1 tot V9. Daarnaast wordt dit vergeleken met het maximaal aantal dosissen op 1 jaar als een percentage.

Dose-response model		V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9
MW	dosissen	157	0	0	158	0	139	0	2	0
	% t.o.v. jaarlijks maximum	43%	0%	0%	43%	0%	38%	0%	1%	0%
CEL	dosissen	155	0	0	145	0	164	0	88	141
	% t.o.v. jaarlijks maximum	42%	0%	0%	40%	0%	45%	0%	24%	39%
KH	dosissen	121	0	0	130	0	132	149	150	193
	% t.o.v. jaarlijks maximum	33%	0%	0%	36%	0%	36%	41%	41%	53%

 Houtskelet locatie B

Het aantal dosissen vertaalt zich in de *decay rating* (DR) voor witrot/zachtrot en bruinrot volgens EN 252 in Tabel 14. De evaluatieperiode bedroeg 1 jaar, maar de resultaten kunnen geëxtrapoleerd worden naar 4 jaar om vergelijkbaar te zijn met de evaluatieperiode van Brischke en Meyer-Veltrup uit Figuur 45 (Brischke & Meyer-Veltrup, 2016). De maximale waarde van DR is steeds 4 (falen). Hieruit blijkt opnieuw dat er vooral degradatie kan verwacht worden wanneer het houtskelet tot aan de buitenzijde van de isolatie loopt zoals in V1, V4 en V6. Daarnaast vormen de opbouwen V8 maar vooral V9 voor CEL het grootste risico. Logischerwijs dient dan ook de combinatie tussen vloeibaar vocht en cellulose vermeden te worden. Wat betreft de opbouwen met KH neemt het risico vooral sterk toe in de meest onbeschutte wandopbouwen gezien de kalkhennep-isolatie rond het houtskelet daar een hoog vochtgehalte heeft, zoals bleek uit de kwalitatieve resultaten.

Tabel 14: Decay Rating (DR) voor witrot/zachtrot en houtrot na 1 en 4 jaar voor opbouw V1 tot V9 (EN 252).

Decay Rating (DR) - EN 252		V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9
MW	Witrot/zachtrot (1 jaar)	0.11	0	0	0.12	0	0.09	0	0	0
	Bruinrot (1 jaar)	0.52	0	0	0.52	0	0.42	0	0	0
	Witrot/zachtrot (4 jaar)	1.83	0	0	1.84	0	1.48	0	0	0
	Bruinrot (4 jaar)	3.41	0	0	3.42	0	3.15	0	0	0
CEL	Witrot/zachtrot (1 jaar)	0.11	0	0	0.10	0	0.12	0	0.05	0.10
	Bruinrot (1 jaar)	0.50	0	0	0.45	0	0.56	0	0.21	0.43
	Witrot/zachtrot (4 jaar)	1.78	0	0	1.59	0	1.95	0	0.60	1.53
	Bruinrot (4 jaar)	3.38	0	0	3.25	0	3.49	0	1.97	3.19
KH	Witrot/zachtrot (1 jaar)	0.07	0	0	0.08	0	0.08	0.10	0.11	0.17
	Bruinrot (1 jaar)	0.33	0	0	0.38	0	0.39	0.47	0.48	0.74
	Witrot/zachtrot (4 jaar)	1.14	0	0	1.31	0	1.36	1.66	1.69	2.44
	Bruinrot (4 jaar)	2.81	0	0	3.00	0	3.04	3.30	3.32	3.72

DR < 0.5 "acceptable" 0.5 ≤ DR < 1 "slight attack" DR > 1 "moderate to severe attack" Houtskelet locatie B

In principe zou de DR de waarde 1 niet mogen overschrijden gedurende een periode van 30 jaar, de minimale levensduur van constructiehout. Echter wordt dit criterium duidelijk niet gehaald vanaf er houtrot optreedt. Het gaat hier namelijk om een erg conservatieve beschouwing en daarom dienen er enkele kanttekeningen gemaakt te worden om de resultaten breder te kaderen:

- De keuze van de houtsoort heeft een invloed op het aantal dosissen door de vorm van de MRC. De keuze in dit onderzoek werd gemaakt op basis van de beste overeenkomst tussen simulaties van vurenhout en experimenteel onderzoek (Habtie et al., 2022).
- Het criterium uit het dose-response model van MC = 25 m% is een absolute ondergrens voor de ontwikkeling van schimmels (Brischke & Rapp, 2008).
- Het dose-response model is gebaseerd op hout blootgesteld aan de buitenlucht, de reactie in een constructie zoals hier het geval is stelt niet dezelfde randvoorwaarden.
- Het gebruikte klimaat is een MRY, een jaar met extreme vochtbelasting dat wordt gesimuleerd als vervanging van een 30-jarige simulatie. Bovendien werd er in dit onderzoek om een evenwicht te bereiken een periode van 15 jaar met het MRY gesimuleerd. Ook de aannames voor de *Rain Exposure* in Delphin zijn eerder extreem, zie paragraaf 1.1.

• Thermische performantie van het isolatiemateriaal

Omdat de eigenschappen van MW in Delphin werden aangepast werd ook de vochtafhankelijke λ -waarde verschaald. Hierdoor zullen de resultaten voor de λ -waarde en warmtestroom in MW niet worden beschouwd. Bovendien ligt de focus vooral op de thermische performantie van de hygroscopische isolatiematerialen. Eerst wordt in Tabel 15 de **jaarlijks gemiddelde λ -waarde** van het isolatiemateriaal gegeven alsook de toename ten opzichte van de λ -waarde in droge toestand voor CEL en KH. Opnieuw vormt het contact met vloeibaar vocht voor CEL bij V8 en V9 een aandachtspunt, hetgeen resulteert in een sterkere toename van de λ -waarde en dus verlaagde thermische performantie. Door het hoge vochtgehalte in KH is de toename van de λ -waarde van de isolatie tussen het houtskelet echter veel groter dan bij CEL. In V9 wordt zelfs een verdubbeling van de λ -waarde genoteerd. Bij verzadiging van het materiaal kan de λ -waarde zelfs toenemen tot het vier- of vijfvoud van de droge waarde (VLAIO, 2020). Hoewel hygroscopische materialen veel hygrothermische voordelen kennen door hun vochtregulerend gedrag, is dit natuurlijk ook een belangrijke keerzijde. De opbouwen voldoen niet aan het criterium van de 5% stijging voor λ .

Tabel 15: Jaargemiddelde λ -waarde en toename ten opzichte van de droge toestand voor opbouw V1 tot V9.

λ -waarde		V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9
CEL	$\lambda_{\text{gem,jaar}}$	0.052	0.051	0.051	0.052	0.051	0.054	0.051	0.052	0.055
	% stijging	8%	6%	6%	8%	6%	12%	6%	8%	15%
KH	$\lambda_{\text{gem,jaar}}$	0.089	0.075	0.079	0.092	0.080	0.099	0.091	0.097	0.124
	% stijging	44%	21%	27%	49%	29%	60%	47%	56%	101%

Houtskelet locatie B XX% $\lambda \uparrow < 5\%$ "acceptabel" XX% $\lambda \uparrow > 5\%$ "te grote stijging"

Vervolgens bekijken we ook de **toename van de warmtestroom gedurende het stookseizoen** ter hoogte van het midden van het houtskelet (locatie D) in Tabel 16. Deze volgt over het algemeen dezelfde stijgende tendens naarmate de isolatie minder beschut is, maar stijgt niet even hard mee in KH. De grootste verschillen zitten opnieuw in de overgang naar V8 en V9, vanaf de isolatiematerialen in contact kunnen staan met vloeibaar vocht. Opnieuw wordt het criterium voor een maximale stijging met 5% van de warmtestroom in een vochtig materiaal niet gehaald.

Tabel 16: Toename van de warmtestroom (HF) gedurende het stookseizoen voor opbouw V1 tot V9.

Toename warmtestroom	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9
CEL	9%	8%	8%	8%	8%	11%	11%	14%	18%
KH	18%	18%	19%	21%	19%	23%	23%	30%	29%

Houtskelet locatie B
 XX% HF < 5% "acceptabel"
 XX% HF > 5% "te grote stijging"

Een plausibele verklaring voor het feit dat de λ -waarde bij KH sterker stijgt dan de warmtestroom is omdat er met de volledig droge λ -waarde wordt vergeleken, terwijl voor de warmtestroom vergeleken wordt met een simulatie zonder regen maar waar dus wel nog een zekere hoeveelheid vocht in het materiaal zit omwille van dampdiffusie en condensatie uit de omgevingslucht.

Hier dienen echter opnieuw een aantal kanttekeningen gemaakt te worden die de conservatieve aard van de simulaties alsook de onzekerheden op het model duiden:

- Het klimaat is een MRY, er wordt na 15 jaar geëvalueerd en de *Rain Exposure* in Delphin is erg conservatief resulterend in een erg hoge vochtbelasting in de simulaties.
- Het gesimuleerde materiaal voor KH is niet zomaar representatief voor elke soort KH, echter was dit het enige beschikbare in de database van Delphin. Een uitgebreide materiaal-karakterisatie zou meer zekerheid kunnen bieden. Ook heeft het materiaal in de simulaties ook een erg fijn poriënsysteem waardoor er condensatie optreedt bij hoge luchtvochtigheid.
- Het hydraulisch contact tussen de isolatiematerialen en de baksteen wordt ideaal verondersteld in de simulaties. Dit komt sterk tot uiting in KH, aangezien die door het fijner poriënsysteem zelfs vocht onttrekt aan de baksteen zoals in de kwalitatieve resultaten werd gezien. In de werkelijkheid sluiten de scheven niet goed aan op het metselwerk waardoor er geen ideaal hydraulisch contact zal zijn en dus minder uitwisseling van vloeibaar vocht. Dit zou kunnen vertaald worden in een grensweerstand zoals tussen baksteen en mortel, maar hier bestaat geen onderzoek over.

• **Caking in cellulose (locatie B en na 10 cm)**

Tot slot wordt er geëvalueerd of er *caking* optreedt in de cellulose-isolatie. De evaluatie gebeurt voor de buitenste positie van de isolatie (locatie B) en 10 cm diep in de isolatie. De resultaten worden weergegeven in Tabel 17. *Caking* treedt op vanaf een vochtgehalte van 0.35 kg/kg, maar ook het maximale vochtgehalte als massapercentage (m%) wordt getoond. Tot slot wordt een *time-of-wetness* (TOW) met de overschrijding van het criterium voor *caking* getoond.

Tabel 17: Evaluatie van het optreden van *caking* in de cellulose isolatie voor opbouw V1 tot V9. Het pass/fail criterium voor *caking* is 0.35 kg/kg vochtgehalte in massapercentage (m%).

Caking in cellulose		V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9
CEL - locatie B	caking?	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
	max m%	50%	50%	49%	45%	48%	61%	61%	123%	111%
	TOW	62%	62%	51%	51%	50%	100%	100%	100%	100%
CEL - na 10 cm	caking?	nee	nee	nee	nee	nee	nee	nee	ja	ja
	max m%	13%	13%	14%	14%	14%	14%	14%	54%	94%
	TOW	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	42%	68%

Houtskelet locatie B
 XX% m% < 35% "geen caking"
 XX% m% > 35% "caking"

Op de buitenste positie van de isolatie (locatie B) treedt *caking* overal op in de simulaties. Echter kan dit soms te maken hebben met lokale effecten in de eerste cel van de simulatie. Daarom wordt er aanvullend op 10 cm diepte in de isolatie gekeken (locatie C). Daar treedt *caking* enkel nog op bij de 2 opbouwen V8 en V9 waar vloeibaar vochttransport naar de cellulose-isolatie mogelijk is. De hoge massapercentages dienen in de context van de lage densiteit van cellulose te worden gezien.

1.4. Conclusie

Algemeen geldt dat minerale wol veel meer variatie in vochtgehalte toont op jaarbasis, dit vlakt af bij cellulose en zeker bij kalkhennep. Ook neemt het gemiddelde vochtgehalte in de isolatiematerialen respectievelijk toe. We onthouden ook dat er gesimuleerd wordt met een erg hoge en conservatieve vochtbelasting via het MRY op de wanden voor de kritische zuidwestelijke oriëntatie.

Bij opbouw V1, V4 en V6 loopt het houtskelet tot de buitenzijde van de isolatie. Dit zorgt steeds voor een verhoogd risico op houtdegradatie. Zo bewijst een laag spouwisolatie (of dus een dieper gelegen houtskelet) zijn nut in de andere opbouwen: doorgaans is er minder houtdegradatie, maar door het hoge vochtgehalte is de thermische performantie van die buitenste laag isolatie weliswaar sterk verlaagd.

Voor de andere opbouwen met **cellulose** geldt verder:

- De verschillende opbouwen hadden geen effect op het risico op vorstschade in het metselwerk.
- Zolang er minstens een barrière aanwezig is tegen het vloeibaar vochttransport (luchtspouw of regenscherm) is er normaal geen gevaar voor degradatie. Dit zowel wat betreft houtdegradatie als *caking* van het isolatiemateriaal. Wel dient er rekening gehouden te worden met 6 – 10% verlies aan thermische performantie door het hygroscopisch karakter van cellulose.
- Wanneer er vloeibaar vochttransport mogelijk is (V8 en V9) nemen de degradatiefenomenen snel toe, alsook de warmtestroom tot 18%. Cellulose is een vochtgevoelig materiaal en contact met vloeibaar vocht dient dan ook onder alle omstandigheden vermeden te worden.
- Een mogelijke oplossing is het hydrofoberen van het metselwerk. Hoewel dit in een nieuwbouwcontext een plausibele oplossing lijkt, is dit in een renovatiecontext met onregelmatig metselwerk veel minder vanzelfsprekend. Wel lijkt de toepassing van cellulose mogelijk achter anderhalf steens metselwerk, dat in theorie regendicht is. De praktijk uit de experimenten toont echter dat de regendichtheid in de realiteit sterk afhangt van lokale defecten en uitvoeringskwaliteit.

Voor de andere opbouwen met **kalkhennep** geldt verder:

- Het risico op vorstschade in de baksteen daalt naarmate de kalkhennep-isolatie meer contact maakt met het metselwerk en er vocht aan onttrekt door zijn fijner poriënsysteem.
- Vanaf de luchtspouw verdwijnt uit de opbouwen stijgt het risico op houtdegradatie gevoelig doordat het vochtfront in de kalkhennep-isolatie dieper reikt. Opbouw V9 met kalkhennep heeft de hoogste *decay rating* voor houtdegradatie van alle gesimuleerde opbouwen.
- Globaal is kalkhennep vochtiger dan cellulose en varieert het vochtgehalte minder op jaarbasis. Dit resulteert bovendien in een verminderde thermische performantie, met 20 – 30% toename van de warmtestroom op locatie D tijdens het stookseizoen als gevolg.
- Een aantal bedenkingen werden geformuleerd omtrent het kalkhennep materiaal in de simulaties en de vertaling van de resultaten naar de werkelijkheid. Er treedt condensatie op in het materiaal door het erg fijne poriënsysteem en het hydraulisch contact in de simulaties wordt ideaal verondersteld. Daarom vormen de simulaties een conservatieve inschatting van de werkelijkheid.

Geen van de beschouwde opbouwen toonde enig risico voor schimmelvorming op het binnenoppervlak, ervan uitgaande dat het binnenklimaat voldoende gecontroleerd is.

Een aantal parameters zoals de slagregenbelasting, oriëntatie, de metselwerkdikte, het verbeteren van de regendichtheid van het metselwerk en tot slot infiltratie kwamen naar boven als belangrijk. In het volgende deel wordt hun impact onderzocht.

2. Variaties en one-factor-at-a-time approach voor de meest onbeschutte wandopbouw (1D)

In dit tweede deel van de HAM-simulaties wordt via een *one-factor-at-a-time approach* gekeken naar de impact van bepaalde parameters op de simulatieresultaten. De opbouw van dit deel is analoog aan het deel hiervoor, maar dit keer wordt er gevarieerd op de meest onbeschutte wandopbouw, V9. Opnieuw wordt eerst het simulatiemodel en de gemaakte keuzes toegelicht, daarna worden de resultaten besproken en daaruit worden de nodige conclusies getrokken.

2.1. Model en parameters: input, output en aannames

De referentie-opbouw van het simulatiemodel is analoog met V9 uit paragraaf 2.3 en wordt getoond in Figuur 104. Tenzij anders vermeld hieronder, worden dezelfde instellingen behouden.



Figuur 104: Voorbeeld van de referentie-opbouw voor de one-factor-at-a-time approach (V9).

In deze reeks simulaties wordt telkens 1 parameter gevarieerd om te kijken welke impact deze heeft op de resultaten. De volgende parameters worden één voor één in een aantal variante simulaties gewijzigd:

- **V9.1: Slagregenbelasting of Rain Exposure (RE)**

Gezien de impliciete aannames van Delphin 6 omtrent de regenbelasting zoals vermeld in paragraaf 1.1, wordt de RE gevarieerd om een aantal scenario's te bekijken. Het referentiescenario is RE = 1. Tussen haken wordt steeds de overeenkomstige *wall factor* (W) gegeven. Er wordt gekozen voor zowel hogere als lagere slagregenbelasting:

- RE = 0.5: milderende van de conservatieve aannames in Delphin (W = 0.2)
- RE = 1.25: regenbelasting onder de kroonlijst volgens EN ISO 15927-3:2009 (W = 0.5)
- RE = 2: effect van een lekkende dakgoot of afstroom van hogere geveldelen (W = 0.8)

- **V9.2: Baksteentype**

Op systematische wijze wordt uit elk cluster van Vanderschelden et al. (2022) minimaal 1 baksteensoort gesimuleerd, hun eigenschappen zijn opgenomen in Tabel 18. Het referentiescenario is ZK [499]. De bakstenen uit het cluster met de hoge waterabsorptie-coëfficiënt (ZB, ZD, ZL) worden allemaal gesimuleerd.

Tabel 18: Overzicht en materiaaleigenschappen van de gebruikte bakstenen voor de simulaties V9.2.

NAAM	ρ [kg/m³]	λ [W/m.K]	c [J/kg.K]	μ [-]	θ_{80} [m³/m²]	θ_{eff} [m³/m²]	θ_{por} [m³/m²]	A_w [kg/m²√s]	K_{leff} [s]
Old Building Brick Dresden ZA [490]	1.835,6	0,528	815	15,7	0,005	0,283	0,307	0,182	2,91E-11
Old Building Brick Dresden ZB [533]	1.769,2	0,789	1000	8,6	0,009	0,334	0,349	0,150	1,72E-09
Old Building Brick Dresden ZD [492]	1.619,5	0,403	953	10,5	0,004	0,361	0,389	0,381	2,09E-09
Old Building Brick Dresden ZF [494]	1.975,7	1,012	846	41,1	0,007	0,169	0,254	0,017	5,90E-11
Old Building Brick Dresden ZG [495]	1.715,2	0,543	920	22,2	0,007	0,322	0,356	0,137	8,64E-10
Old Building Brick Dresden ZI [497]	1.736,4	0,456	881	21,3	0,017	0,320	0,345	0,034	3,03E-09
Old Building Brick Dresden ZK [499]	1.734,1	0,657	919	24,5	0,015	0,324	0,346	0,107	2,47E-09
Old Building Brick Dresden ZL [500]	1.676,5	0,522	934	13,2	0,005	0,344	0,367	0,357	1,96E-08

- **V9.3: Baksteendikte**

Naast het referentiescenario met een steense muurdikte (19 cm), worden ook 2 andere gangbare formaten van metselwerk buitenschil gesimuleerd:

- 9 cm dikte: dit komt overeen met het klassieke halfsteense gevelparement en is weliswaar niet zelfdragend, zoals Decobloc 9 cm uit de experimenten.
- 14 cm dikte: dit komt overeen met de breedte van een snelbouwsteen zoals Decobloc 14 cm uit de experimenten. Het is een zelfdragend tussenformaat.

- **V9.4: Oriëntatie**

Hoewel de meest kritische oriëntatie voor vochtbelasting het zuidwesten (ZW) is (referentiescenario), worden ook nog andere oriëntaties gesimuleerd ter vergelijking:

- Noord (N): door de lage bezonningsgraad is deze oriëntatie in ons klimaat de koudste.
- Oost (O): nuttige oriëntatie i.f.v. vergelijkbaarheid met de case study in DEEL V.

- **V9.5: Kalei en hydrofobering**

Om de regendichtheid van metselwerk te verbeteren wordt vaak een laag kalei aangebracht, een schildertechniek waarbij een dunne kalkpleister gezet wordt op de buitenzijde van het metselwerk. Een andere techniek is het hydrofoberen van metselwerk. In het referentiescenario wordt er natuurlijk uitgegaan van een opbouw zonder deze wijzigingen. In Delphin worden een aantal varianten gesimuleerd om de verbeterde regendichtheid te bekijken:

- Waterdichte kalei (WD): hiervoor wordt 2 mm kalkpleister (zie Tabel 19) gemodelleerd op de buitenzijde van het metselwerk, met *flag* “water tight”. Om het effect van straling te corrigeren voor de witte gevelafwerking wordt de absorptiecoëfficiënt voor kortgolvlige straling in het buitenklimaat verlaagd tot 0,4.
- Realistische kalei: door scheuren of de uitvoeringskwaliteit zal een laag kalei in de praktijk nooit volledig waterdicht zijn. Er wordt via een bronterm 1% en 10% infiltratie toegevoegd achter het metselwerk als range check, gezien de onzekerheid van de werkelijke infiltraties. Voor de rest analoog aan de waterdichte laag kalei.
- Gehydrofobeerde baksteen: we maken gebruik van een gehydrofobeerde baksteen uit Delphin zoals in Tabel 19. De baksteen in kwestie is behandeld met een waterafstotend middel en is zo in principe waterdicht.

Tabel 19: Overzicht en materiaaleigenschappen van de materialen gebruikt om kalei te modelleren (V9.5).

NAAM	ρ [kg/m ³]	λ [W/m.K]	c [J/kg.K]	μ [-]	θ_{80} [m ² /m ³]	θ_{eff} [m ² /m ³]	θ_{por} [m ² /m ³]	Aw [kg/m ² .s]	K_{leff} [s]
Lime Plaster (fine) [150]	1.520,0	0,800	850	51,0	0,058	0,380	0,430	0,071	4,57E-11
OBBD ZQ with hydrophobic treatment [534]	1.970,0	1,050	852	123,9	0,003	0,179	0,257	0,010	1,00E-11

- **V9.6: Infiltratie**

Zoals bleek uit de literatuurstudie en de experimenten is metselwerk in de realiteit nooit ideaal zoals in een simulatiemodel. Het referentiescenario gaat uit van ideaal metselwerk en dus 0% infiltratie. Daarom wordt via een bronterm ook het effect van infiltratie bekeken. De bronterm wordt uniform aangebracht over de eerste 5 cm van de isolatie, met waardes uit de literatuur:

- 0.6 % (Geldof, 2016)
- 1 % (ASHRAE, 2016)
- 10 % (Van Linden, 2022)

Dit resulteert in totaal in 22 varianten met 3 isolatiematerialen (MW, CEL en KH), ofwel 66 combinaties.

2.2. Evaluatiecriteria

Dezelfde evaluatiecriteria als hierboven in paragraaf 1.2 worden gehanteerd. Echter wordt er niet meer uitgebreid ingegaan op het kwalitatieve gedrag van de verschillende opbouwen gezien dit eerder verkennend was. Voor de *field plots* van het vochtgehalte wordt verwezen naar bijlage F.

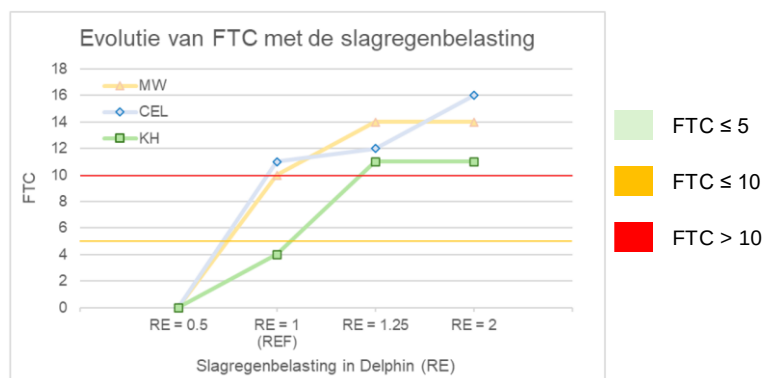
2.3. Resultaten

De resultaten worden hieronder besproken gegroepeerd per parameter die gewijzigd wordt. Zo kan er gekeken worden naar de impact ervan op de simulatieresultaten. Algemeen wordt de schimmelindex M opnieuw buiten beschouwing gelaten, deze was overal 0. Voor houtrot wordt enkel nog het dose-response model en meer bepaald de *Decay Rating (DR)* getoond, gezien deze de meest genuanceerde resultaten opleverde in het eerste deel van de simulaties. De thermische performantie wordt geëvalueerd met de toename van de warmtestroom in het stookseizoen. *Caking* wordt enkel nog expliciet beschouwd bij het effect van kalei en hydrofobering. Voor een compleet overzicht van de kwantitatieve resultaten van de degradatie-indicatoren wordt verwezen naar bijlage F.

Slagregenbelasting of *Rain Exposure (RE)* (V9.1)

• Vorstschade in de baksteen (locatie A)

In Figuur 105 wordt het resultaat van de simulaties getoond met de variatie in FTC op basis van de veranderende slagregenbelasting (RE). Via de trendlijnen wordt de tendens gevisualiseerd. Er is logischerwijs een duidelijk stijgend verband tussen een toename in de slagregenbelasting en het risico op vorstschade in het metselwerk. Het laagste risico op vorstschade is voor de opbouwen met KH, gezien de isolatie vocht onttrekt aan de bakstenen. Hoewel MW en KH stagneren tussen RE = 1.25 en RE = 2, blijft het aantal FTC voor CEL stijgen. Bij RE = 0.5 is er geen risico op vorstschade.



Figuur 105: Overzicht van de evolutie van het aantal kritische FTC met de slagregenbelasting (RE) uit Delphin.

• Houtrot (locatie C)

De invloed van de slagregenbelasting op de houtdegradatie via de *Decay Rating (DR)* wordt voorgesteld in Tabel 20. Gezien er geen vloeibaar vochttransport mogelijk is in MW oogt deze zeer rooskleurig, om die reden wordt er verder niet op ingegaan. Voor RE = 0.5 is het risico op houtdegradatie al significant lager voor KH, tot zelfs onbestaande voor CEL.

Tabel 20: Overzicht van de Decay Rating voor wit-/zachtrot en bruinrot bij toename in slagregenbelasting (RE).

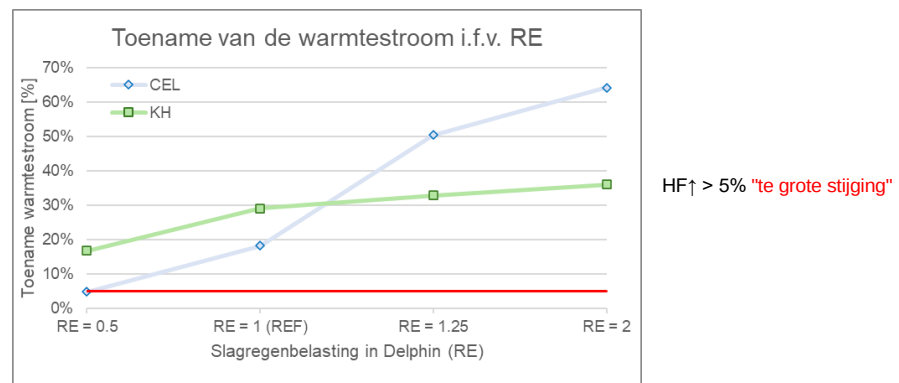
Decay Rating (DR) - EN 252		RE = 0.5	RE = 1 (REF)	RE = 1.25	RE = 2
MW	Witrot/zachtrot (1 jaar)	0	0	0.01	0.02
	Bruinrot (1 jaar)	0	0	0.04	0.05
	Witrot/zachtrot (4 jaar)	0	0	0.01	0.03
	Bruinrot (4 jaar)	0	0	0.04	0.14
CEL	Witrot/zachtrot (1 jaar)	0.00	0.10	0.14	0.10
	Bruinrot (1 jaar)	0.00	0.43	0.63	0.45
	Witrot/zachtrot (4 jaar)	0.00	1.53	2.15	1.61
	Bruinrot (4 jaar)	0.00	3.19	3.59	3.26
KH	Witrot/zachtrot (1 jaar)	0.05	0.17	0.16	0.15
	Bruinrot (1 jaar)	0.24	0.74	0.70	0.68
	Witrot/zachtrot (4 jaar)	0.74	2.44	2.34	2.29
	Bruinrot (4 jaar)	2.24	3.72	3.68	3.66

DR < 0.5 "acceptable" 0.5 ≤ DR < 1 "slight attack" DR > 1 "moderate to severe attack"

Verder wordt een contra-intuïtief resultaat bekomen als de RE verder opgevoerd wordt: voor de hogere waarden van RE (2 bij CEL, 1.25 en 2 bij KH) begint het risico op vochtdegradatie af te nemen. Dit is eigen aan het dose-response model in Figuur 44: het minimum voor houtrot ligt op 25 m%, het optimum ligt tussen 50 en 60 m% en daarna zal het vochtgehalte te hoog liggen waardoor houtrot minder waarschijnlijk wordt. Hoewel dit dus onterecht lijkt op een positieve evolutie in de tabellen, betekent dit dat de vochtgehalten in het hout dus meer dan 60 m% zullen bedragen.

- **Thermische performantie van het isolatiemateriaal (locatie D)**

De toename van de warmtestroom wordt in Figuur 106 uitgezet tegenover de toename in slagregenbelasting. Hoewel KH reeds voor RE = 0.5 een vrij sterke toename van de warmtestroom kent, is de stijging gering tegenover CEL. Voor RE = 0.5 voldoet de toename van de warmtestroom in CEL nog aan het criterium met een stijging van minder dan 5%, maar daarna stijgt deze snel en tot veel hogere waarden dan in KH. Dit toont nogmaals de gevoeligheid voor vloeibaar vocht aan van CEL. KH lijkt op dit vlak robuuster te zijn.

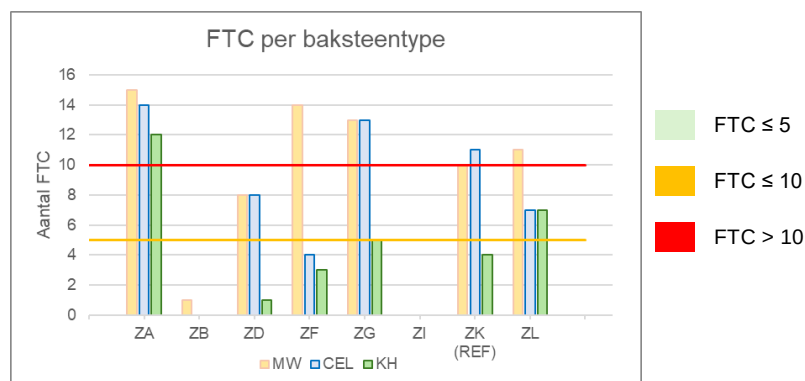


Figuur 106: Toename van de warmtestroom bij toename van de slagregenbelasting (RE).

Baksteentype (V9.2)

- **Vorstschade in de baksteen (locatie A)**

De resultaten in Figuur 107 tonen aan dat de keuze van de juiste baksteensoort in Delphin erg belangrijk is als de focus op vorstschade ligt, vanwege de uiteenlopende resultaten. Globaal zien we wel dat een opbouw met KH minder vorstgevoelig is dan de overeenkomstige opbouw met CEL of MW, gezien het onttrekken van vocht aan de baksteen door KH. Voorts valt ook op dat er quasi geen risico op vorstschade is voor baksteen ZB en ZI. ZI komt overeen met een moderne baksteen. ZK is duidelijk niet het meest kritisch voor vorstschade, maar dit degradatiefenomeen is dan ook niet de kernfocus van dit onderzoek. De risico's op vorst liggen in lijn met eerder onderzoek (Vanderschelden et al., 2022).



Figuur 107: Overzicht van het aantal kritische FTC per baksteentype.

- **Houtrot (locatie C)**

Uit Tabel 21 blijkt dat baksteen ZK voor CEL ook eerder een conservatieve keuze is. Enkel ZF en ZL voorspellen meer degradatie. Bij KH valt het op dat zowat alle bakstenen resulteren in dezelfde grootteorde van DR, op 1 uitzondering na. Baksteen ZI, de baksteensoort die de moderne baksteen representeert, resulteert zowel voor CEL als KH voor het laagste degradatierisico in het hout. Na 4 jaar blijft ook de DR voor het kritische bruinrot onder 1.

Tabel 21: Overzicht van de Decay Rating (DR) voor wit-/zachtrot en bruinrot bij de verschillende baksteentypes.

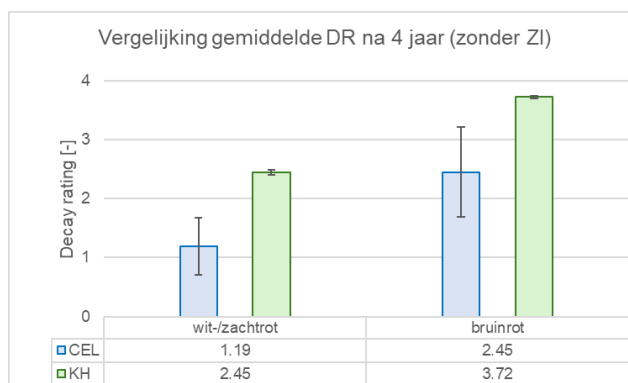
Decay Rating (DR) - EN 252		ZA	ZB	ZD	ZF	ZG	ZI	ZK (REF)	ZL
MW	Witrot/zachtrot (1 jaar)	0	0	0	0	0	0	0	0
	Bruinrot (1 jaar)	0	0	0	0	0	0	0	0
	Witrot/zachtrot (4 jaar)	0	0	0	0	0	0	0	0
	Bruinrot (4 jaar)	0	0	0	0	0	0	0	0
CEL	Witrot/zachtrot (1 jaar)	0.09	0	0.05	0.14	0.04	0	0.10	0.14
	Bruinrot (1 jaar)	0.39	0	0.23	0.63	0.16	0	0.43	0.63
	Witrot/zachtrot (4 jaar)	1.37	0	0.72	2.15	0.41	0	1.53	2.16
	Bruinrot (4 jaar)	3.05	0	2.19	3.59	1.52	0	3.19	3.59
KH	Witrot/zachtrot (1 jaar)	0.16	0.18	0.17	0.16	0.18	0.03	0.17	0.16
	Bruinrot (1 jaar)	0.73	0.80	0.77	0.71	0.78	0.11	0.74	0.72
	Witrot/zachtrot (4 jaar)	2.41	2.56	2.49	2.35	2.51	0.21	2.44	2.37
	Bruinrot (4 jaar)	3.70	3.76	3.74	3.68	3.74	0.90	3.72	3.69

DR < 0.5 "acceptable"

0.5 ≤ DR < 1 "slight attack"

DR > 1 "moderate to severe attack"

Uit bovenstaande tabel viel dus al op dat het type baksteen minder lijkt uit te maken voor het resultaat van de houtdegradatie in een opbouw met KH, met uitzondering van de moderne baksteen ZI. Deze hypothese wordt bevestigd door de DR na 4 jaar voor alle historische baksteenmaterialen te vergelijken. De gemiddelde DR wordt getoond in Figuur 108, uit de foutenbalken blijkt dat de spreiding op de resultaten voor KH minimaal is. De verschillende baksteentypes hebben echter meer invloed op de resultaten voor CEL, met een grotere foutenbalk tot gevolg.



Figuur 108: Vergelijking van de gemiddelde DR na 4 jaar voor de historische bakstenen uit de simulaties.

- **Thermische prestatie van het isolatiemateriaal (locatie D)**

Tot slot wordt de thermische prestatie van het isolatiemateriaal vergeleken via de toename van de warmtestroom in Tabel 22. Opnieuw blijkt hieruit dat vooral de moderne baksteen ZI hier tot een significant minder verlies van thermische prestatie leidt dan de andere historische baksteenmaterialen.

Tabel 22: Toename van de warmtestroom per baksteentype.

Toename warmtestroom	ZA	ZB	ZD	ZF	ZG	ZI	ZK (REF)	ZL
CEL	19%	10%	13%	21%	13%	7%	18%	17%
KH	30%	25%	28%	30%	28%	19%	29%	31%

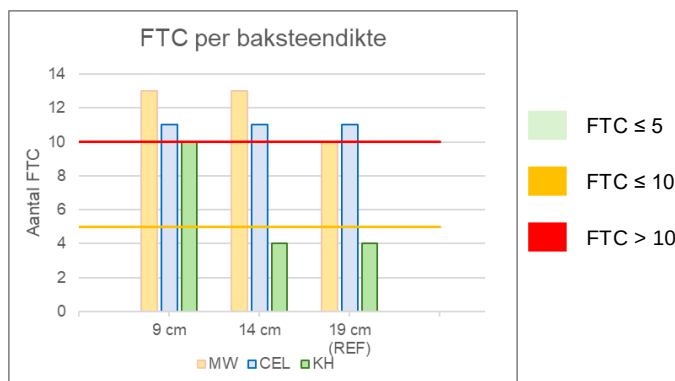
XX% HF↑ < 5% "acceptabel"

XX% HF↑ > 5% "te grote stijging"

Baksteendikte (V9.3)

• Vorstschade in de baksteen (locatie A)

Een toename in baksteendikte zorgt voor een afname in het risico op vorstschade voor een opbouw met KH, zo blijkt uit Figuur 109. Het grootste verschil zit in de overgang van 9 cm naar 14 cm dikte. Voor CEL blijft het risico op vorstschade constant over de 3 gesimuleerde baksteendiktes.



Figuur 109: Overzicht van het aantal kritische FTC bij toenemende baksteendikte.

• Houtrot (locatie C)

Uit Tabel 23 blijkt dat de metselwerkdikte een beperkte invloed heeft op het risico voor houtdegradatie volgens het dose-response model. De Decay Rating (DR) daalt wel licht als de dikte toeneemt, maar dit verschil is erg beperkt. Dit geldt voor alle gesimuleerde isolatiematerialen.

Tabel 23: Overzicht van de Decay Rating (DR) voor wit-/zachtrot en bruinrot bij toename van de metselwerkdikte.

Decay Rating (DR) - EN 252		9 cm	14 cm	19 cm (REF)
MW	Witrot/zachtrot (1 jaar)	0.01	0.01	0
	Bruinrot (1 jaar)	0.04	0.04	0
	Witrot/zachtrot (4 jaar)	0.02	0.01	0
	Bruinrot (4 jaar)	0.07	0.04	0
CEL	Witrot/zachtrot (1 jaar)	0.11	0.10	0.10
	Bruinrot (1 jaar)	0.49	0.45	0.43
	Witrot/zachtrot (4 jaar)	1.73	1.60	1.53
	Bruinrot (4 jaar)	3.35	3.25	3.19
KH	Witrot/zachtrot (1 jaar)	0.17	0.17	0.17
	Bruinrot (1 jaar)	0.76	0.75	0.74
	Witrot/zachtrot (4 jaar)	2.48	2.45	2.44
	Bruinrot (4 jaar)	3.73	3.72	3.72

DR < 0.5 "acceptable" 0.5 ≤ DR < 1 "slight attack" DR > 1 "moderate to severe attack"

• Thermische performantie van het isolatiemateriaal (locatie D)

Dezelfde trend komt terug wat betreft de toename van de warmtestroom in Tabel 24. De winst door het toenemen van de baksteendikte is beperkt voor KH, bij CEL levert dit echter wel een halvering op. De steense muur van 19 cm beschermt dan ook beter tegen vloeibaar vocht. Het status quo voor KH kan verklaard worden door de inertie op het vochtbufferend gedrag en het condenseren van vochtige omgevingslucht in het materiaal bij hoge relatieve vochtigheden. Hierdoor zorgt de dikte van het metselwerk na 15 jaar simulaties met het MRY klimaat mogelijks voor minder verschil.

Tabel 24: Toename van de warmtestroom bij toename van de metselwerkdikte.

Toename warmtestroom	9 cm	14 cm	19 cm (REF)
CEL	35%	24%	18%
KH	30%	30%	29%

XX% HF↑ < 5% "acceptabel" XX% HF↑ > 5% "te grote stijging"

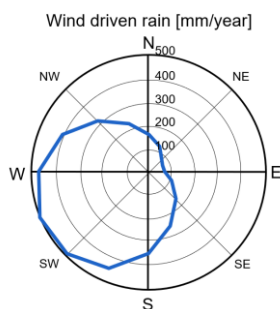
Oriëntatie (V9.4)

- **Vorstschade in de baksteen (locatie A)**

Zowel de N als de O oriëntatie resulteren in 0 kritische FTC. Er is door de verminderde vochtbelasting op die oriëntaties dan ook geen kans meer op vorstschade in de simulaties.

- **Houtrot (locatie C)**

Zowel de N als de O oriëntatie resulteren in 0 dosissen tijdens het evaluatiejaar en dus treedt er ook geen houtdegradatie op volgens het dose-response model. Dit is een logisch gevolg van het Belgische klimaat, waarin de ZW-oriëntatie een kritische slagregenbelasting inhoudt (zie Figuur 110). Vandaar wordt de ZW-oriëntatie ook in alle andere simulaties gehanteerd als *worst case*.



Figuur 110: Slagregenbelasting volgens oriëntatie. Het zuidwesten (ZW) is duidelijk dominant (Calle, 2020).

- **Thermische performantie van het isolatiemateriaal (locatie D)**

Wanneer we de toename van de warmtestroom vergelijken in Tabel 25 zien we opnieuw het duidelijke effect van de lagere vochtbelasting op de niet-kritische oriëntaties. In de oostelijke oriëntatie blijft de toename van de warmtestroom voor het eerst onder het criterium voor zowel KH als CEL. Ook voor de noordelijke oriëntatie vallen de resultaten goed mee, daar wordt het criterium echter wel licht overschreden voor KH. De noordelijke oriëntatie ontvangt het minste bezonning en zal daardoor slechter uitdrogen. Ook is de slagregenbelasting volgens Figuur 110 er nog iets hoger.

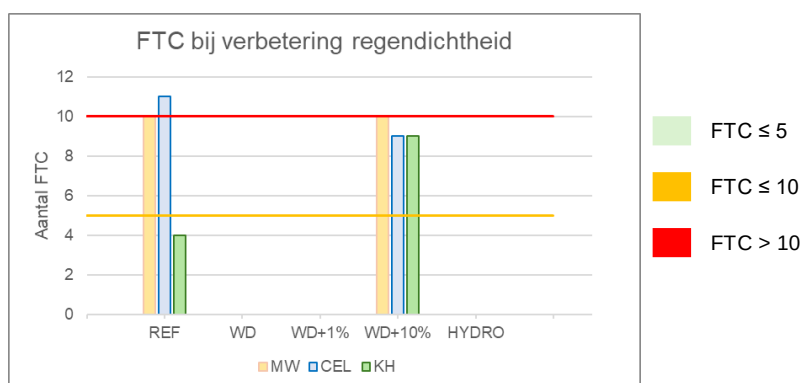
Tabel 25: Overzicht van de toename van de warmtestroom per oriëntatie.

Toename warmtestroom	N	O	ZW (REF)
CEL	1%	1%	18%
KH	7%	5%	29%
XX% HF↑ < 5% "acceptabel"	XX% HF↑ > 5% "te grote stijging"		

Kalei en hydrofobering (V9.5)

• Vorstschade in de baksteen (locatie A)

Het risico op vorstschade uit het referentiescenario in Figuur 111 verdwijnt wanneer de muur wordt gehydrofobeerd of afgewerkt met een waterdichte (WD) kalei. Het belang van de uitvoeringskwaliteit blijkt uit de simulaties met infiltratie: het systeem met kalei is voldoende robuust en toont geen risico op vorstschade bij 1% infiltratie, maar bij 10% infiltratie neemt het risico op vorstschade weer toe. In een opbouw met KH is het gunstig effect van de kalei niet enkel verdwenen, het verhoogt zelfs het risico op vorstschade doordat het opgebouwde vocht niet eenvoudig kan uitdrogen uit de muur.



Figuur 111: Overzicht van het aantal kritische FTC bij een waterdichte kalei (WD) of hydrofobering.

• Houtrot (locatie C)

Uit Tabel 26 blijkt dat een gehydrofobeerde baksteen of perfect uitgevoerde laag kalei het risico op houtrot in de wandopbouw elimineert, zowel voor CEL als KH. Opnieuw blijkt het belang van de uitvoeringskwaliteit uit de simulaties: een infiltratiepercentage van 1% leidt niet tot problemen, maar indien er 10% van de slagregenbelasting doorheen de kalei raakt is het risico op houtrot zelfs hoger dan zonder kalei bij 100% regenbelasting. Bij KH lijkt dit risico opnieuw af te nemen, maar dit is opnieuw omdat de vochtgehalten van meer dan 60 m% het optimum voor houtrot overstijgen.

Tabel 26: Overzicht van de Decay Rating (DR) voor wit-/zachtrot en bruinrot voor een aantal scenario's die de regendichtheid van het metselwerk verbeteren zoals waterdichte kalei (WD) en hydrofobering.

Decay Rating (DR) - EN 252		REF	WD	WD+1%	WD+10%	HYDRO
MW	Witrot/zachtrot (1 jaar)	0	0	0	0	0
	Bruinrot (1 jaar)	0	0	0	0	0
	Witrot/zachtrot (4 jaar)	0	0	0	0	0
	Bruinrot (4 jaar)	0	0	0	0	0
CEL	Witrot/zachtrot (1 jaar)	0.10	0	0	0.14	0
	Bruinrot (1 jaar)	0.43	0	0	0.61	0
	Witrot/zachtrot (4 jaar)	1.53	0	0	2.09	0
	Bruinrot (4 jaar)	3.19	0	0	3.56	0
KH	Witrot/zachtrot (1 jaar)	0.17	0	0	0.12	0
	Bruinrot (1 jaar)	0.74	0	0	0.56	0
	Witrot/zachtrot (4 jaar)	2.44	0	0	1.96	0
	Bruinrot (4 jaar)	3.72	0	0	3.49	0
DR < 0.5 "acceptable"		0.5 ≤ DR < 1 "slight attack"		DR > 1 "moderate to severe attack"		

Zo blijkt dat een waterwerende laag zoals kalei een gevaar inhoudt wat betreft lokale infiltraties door kleine defecten, bijvoorbeeld plaatselijke scheurtjes. In de realiteit kan dit geïnterpreteerd worden als het water dat vlot naar binnen raakt en zich verdeelt in de materialen van de wandopbouw maar echter weer moeilijk naar buiten raakt. Daarom is het dampopen karakter van kalei belangrijk zodat er via diffusie voldoende vocht kan uitdrogen.

- **Thermische performantie van het isolatiemateriaal (locatie D)**

Wat de thermische performantie in Tabel 27 betreft, zien we dat ook hier grote winsten worden geboekt door het simuleren van een kalei in de opbouw. Ook met de hydrofobering voldoet het resultaat nog aan het criterium voor de toename van de warmtestroom gedurende het stookseizoen in de CEL opbouw.

Tabel 27: Overzicht van de toename van de warmtestroom bij een kalei of hydrofobering van het metselwerk.

Toename warmtestroom	REF	WD	WD+1%	WD+10%	HYDRO
CEL	18%	0%	0%	14%	4%
KH	29%	0%	3%	16%	10%

XX% HF↑ < 5% "acceptabel" XX% HF↑ > 5% "te grote stijging"

- **Caking in cellulose (locatie B en na 10 cm)**

Omdat een kalei of hydrofobering in theorie het vloeibaar vochttransport verhindert, wordt er nog eens ingezoomd op de toepassing van cellulose in een dergelijk systeem. Uit Tabel 28 blijkt dat er geen *caking* optreedt zolang de kalei waterdicht genoeg is. Na iteratieve simulaties blijkt dat er *caking* optreedt net achter het metselwerk (locatie B) vanaf er 2 tot 3 % infiltratie wordt toegevoegd in de simulatie. Voor hydrofobering is er wel nog *caking* net achter het metselwerk, maar niet meer op 10 cm diepte.

Tabel 28: Overzicht van het criterium voor caking in cellulose bij een kalei of hydrofobering van het metselwerk.

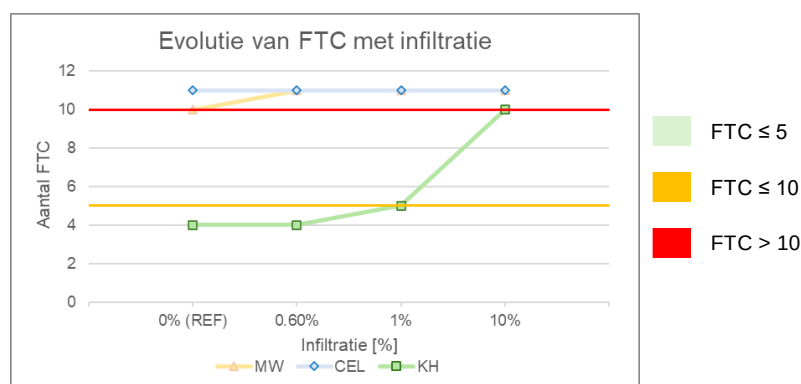
Caking in cellulose	REF	WD	WD+1%	WD+10%	HYDRO
CEL - locatie B	caking?	ja	nee	nee	ja
	max m%	111%	26%	29%	93%
	TOW	100%	0%	0%	100%
CEL - na 10 cm	caking?	ja	nee	nee	ja
	max m%	94%	12%	12%	84%
	TOW	68%	0%	0%	100%

XX% m% < 35% "geen caking" XX% m% > 35% "caking"

Infiltratie (V9.6)

- **Vorstschade in de baksteen (locatie A)**

De infiltratie, bijvoorbeeld door microscheuren in het metselwerk, heeft weinig invloed op de vorstschade bij MW en CEL, deze bereiken vanaf er infiltratie optreedt een plateau voor FTC=11 in de simulaties van Figuur 112. Waar het risico op vorstschade initieel aanvaardbaar was voor KH, neemt dit toe tot dezelfde grootteorde als MW en CEL wanneer er 10% infiltratie optreedt.



Figuur 112: Evolutie van het aantal kritische FTC voor een toenemend percentage infiltratie.

- **Houtrot (locatie C)**

Wanneer er een bronterm wordt toegevoegd aan de simulaties is de impact op de houtdegradatie via de *Decay Rating* (DR) weergegeven in Tabel 29. Voor MW loopt de DR snel op maar dit geeft mogelijk een vertekend beeld aangezien de infiltratie wordt toegewezen aan de eerste 5 cm isolatie en het houtskelet zich al na 4 cm isolatie bevindt. Voor CEL neemt de houtdegradatie nog licht toe onder invloed van infiltratie. In KH lijkt het risico op degradatie af te nemen, maar opnieuw is dat een schijnbare afname omdat het optimum vochtgehalte reeds gepasseerd werd. Omgerekend treden er dus vochtgehalten boven 60 m% op in het houtskelet.

Tabel 29: Overzicht van de Decay Rating (DR) voor wit-/zachtrot en bruinrot bij toename van de infiltratie.

Decay Rating (DR) - EN 252		0% (REF)	0.60%	1%	10%
MW	Witrot/zachtrot (1 jaar)	0	0.07	0.14	0.30
	Bruinrot (1 jaar)	0	0.34	0.63	1.21
	Witrot/zachtrot (4 jaar)	0	1.16	2.16	3.21
	Bruinrot (4 jaar)	0	2.84	3.60	3.93
CEL	Witrot/zachtrot (1 jaar)	0.10	0.10	0.11	0.14
	Bruinrot (1 jaar)	0.43	0.48	0.51	0.62
	Witrot/zachtrot (4 jaar)	1.53	1.68	1.79	2.12
	Bruinrot (4 jaar)	3.19	3.31	3.39	3.58
KH	Witrot/zachtrot (1 jaar)	0.17	0.17	0.16	0.16
	Bruinrot (1 jaar)	0.74	0.73	0.73	0.70
	Witrot/zachtrot (4 jaar)	2.44	2.42	2.40	2.32
	Bruinrot (4 jaar)	3.72	3.71	3.70	3.67

DR < 0.5 "acceptable" 0.5 ≤ DR < 1 "slight attack" DR > 1 "moderate to severe attack"

- **Thermische prestatie van het isolatiemateriaal**

Tot slot wordt ook de thermische prestatie geëvalueerd met behulp van Tabel 30. Een bronterm van 10% leidt in CEL en KH tot respectievelijk 39 en 49% toename van de warmtestroom gedurende het stookseizoen, 20% meer dan in het referentiescenario dat al relatief kritisch was. Het is duidelijk dat het hier om een significant verlies van thermische prestatie gaat.

Tabel 30: Overzicht van de toename van de warmtestroom bij toename van de infiltratiepercentage.

Toename warmtestroom	0% (REF)	0.6%	1%	10%
CEL	18%	20%	21%	39%
KH	29%	46%	46%	49%

XX% HF↑ < 5% "acceptabel" XX% HF↑ > 5% "te grote stijging"

2.4. Conclusie

In dit onderdeel werden variaties op opbouw V9 gesimuleerd en doormiddel van een *one-factor-at-a-time approach* werd er ingezoomd op een aantal parameters en hun impact op de simulatieresultaten. De impact werd bekeken aan de hand van een drietal indicatoren: vorstschade, houtdegradatie en thermische performantie. Hieronder worden per parameter kort de belangrijkste bevindingen herhaald:

- **Slagregenbelasting of *Rain Exposure* (RE)**

Wanneer de RE afneemt tot 0.5 verkleint het risico op degradatiefenomenen sterk tot volledig in KH en CEL. Bij een toename tot RE = 2 is er echter een schijnbare afname van de houtdegradatie door vochtgehaltes boven 60 m%. Ook de thermische performantie van beiden gaat achteruit. Dit uit zich het meest bij CEL vanwege de gevoeligheid van het materiaal voor vloeibaar vocht.

- **Baksteentype**

De simulaties met de moderne baksteen ZI vertonen over de hele lijn het minste degradatie en de beste thermische performantie. Specifiek voor houtdegradatie bleek het baksteentype – met uitzondering van baksteen ZI – nauwelijks een invloed te hebben op de simulatieresultaten met KH.

- **Baksteendikte**

Deze parameter heeft een beperkte invloed op de vorstschade en houtdegradatie, enkel de overgang van 9 naar 14 cm metselwerk met KH toont een significante verbetering van het risico op vorstschade. De thermische performantie verbetert echter sterk voor CEL in een opbouw met 19 cm metselwerk: de toename van de warmtestroom wordt gehalveerd tegenover 9 cm metselwerk.

- **Oriëntatie**

De ZW-oriëntatie blijkt duidelijk het meest kritisch. De N en O oriëntatie vertonen geen risico op vorstschade en houtdegradatie. De thermische performantie is dan ook significant beter.

- **Kalei en hydrofobering**

Een hydrofobering en zeker een laag kalei op het metselwerk sluiten quasi elk degradatiefenomeen uit. Alles staat of valt echter met de uitvoeringskwaliteit van deze technieken: 1% infiltratie doorheen de laag kalei levert geen problemen op maar bij 10% doorslag van de originele regenbelasting is de situatie vaak zelfs erger dan zonder deze middelen voor de regendichtheid. Zolang de laag kalei waterdicht genoeg is treedt er in theorie geen *caking* op en is de toepassing van CEL mogelijk.

- **Infiltratie**

Het risico op vorstschade blijft constant voor CEL bij de gesimuleerde infiltratiepercentages, bij KH neemt het risico toe. De toename van houtdegradatie is eerder beperkt omdat het referentiescenario al vrij kritisch was. In KH treedt opnieuw een schijnbare afname van de houtdegradatie op. De grootste impact van infiltratie situeert zich op de thermische performantie, met een toename van de warmtestroom tot 39% in CEL en 49% in KH tijdens het stookseizoen.

De slagregenbelasting blijkt een belangrijke parameter maar de waarde ervan is erg onzeker in de realiteit en wordt vaak conservatief overschat. Daarom wordt er dieper op ingegaan in DEEL V wanneer de wandopbouw van een case study wordt gesimuleerd. Tot hiertoe werd er in de 1D simulaties een homogene laag baksteen gesimuleerd voor het metselwerk. In het volgende onderdeel van de simulaties worden 2D simulaties uitgevoerd en vergeleken met de testopstellingen, waarbij er onder andere gekeken wordt naar het effect van het simuleren van mortel, de relatie tussen realiteit en simulatie en het verschil tussen 1D en 2D simulaties.

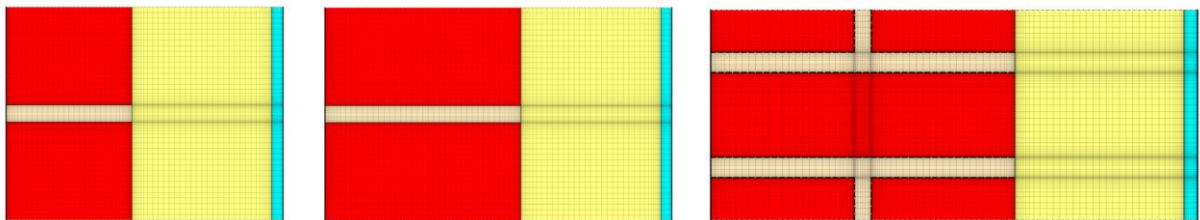
3. Simulatie van de testopstelling: invloed van mortel en het verschil tussen simulatie en realiteit (1D en 2D)

In dit derde deel van de HAM-simulaties worden een aantal 1D en 2D simulaties uitgevoerd ter vergelijking met de experimentele opstellingen uit DEEL III. Op deze manier wordt niet alleen gekeken naar de overeenkomsten en verschillen tussen experimenten en simulaties, ook wordt er ingeschat of de simulaties een onder- of overschatting van de realiteit vormen. Door zowel 1D als 2D simulaties uit te voeren kan het verschil tussen beide en de impact op het resultaat worden bekeken.

3.1. Model en parameters: input, output en aannames

Geometrie

Er wordt gekozen om 3 types testopstellingen te simuleren in 2D om de vergelijking te maken, weergegeven in Figuur 113. Enerzijds wordt er gekeken naar de muren type 1 en type 2, uit 9 en 14 cm Decobloc. De reden hiervoor is omdat in de testopstellingen de 9 cm dikte niet regendicht bleek, in tegenstelling tot de 14 cm dikte. Ten derde wordt ook type 4 gemodelleerd, de steense muur met recuperatiesteen in kruisverband. Gezien de vereiste rekenkracht wordt het geometrisch model beperkt tot een symmetrische situatie die te extrapoleren valt naar de testopstellingen op ware grootte.



Figuur 113: Geometrisch model van de 2D-simulaties voor type 1, type 2 en type 4.

De materialen in Delphin zullen worden aangepast om zo goed mogelijk aan te sluiten bij de experimentele opstellingen, daarom worden hieronder nog eens de experimentele waarden voor de waterabsorptiecoëfficiënt A_w weergegeven in Tabel 31. Deze werden bepaald in paragraaf 2.

Tabel 31: Experimenteel bepaalde gemiddelde waarden voor de waterabsorptiecoëfficiënt (A_w).

	CEM	BAST	KALK	RECUP	DECO1	DECO2	MX
Gemiddelde A_w [kg/m ² ·√s]	0.034	0.081	0.097	0.051	0.113	0.096	0.145

Wat betreft de **baksteen** wordt er gekozen voor *Old Building Brick Dresden ZK* [499]. Deze is het best vergelijkbaar met de andere simulaties en sluit qua A_w -waarde goed aan bij de beproefde bakstenen. De A_w -waarde van ZK wordt aangepast naar de bekomen experimentele waarden voor de Decoblocs en recuperatiesteen. Dit zorgt voor het schalen van de LCC.

Wat betreft de **mortel** wordt er enkel gekeken naar bastaardmortel en kalkmortel. In de Delphin database is geen materiaal aanwezig om cementmortel te simuleren en bovendien zijn 1D simulaties doorgaans een conservatieve aanpak als er cementmortel wordt gebruikt (Calle, 2020).

Concreet worden de volgende mortels gekozen uit de database:

- **Bastaardmortel (BAST):** *Lime cement mortar [842]*. Deze bastaardmortel is gebaseerd op kalk en cement in een 1:1 verhouding. Dit is dezelfde verhouding als in de testopstellingen. De A_w -waarde in Delphin lag bovendien niet ver van de experimenteel bepaalde waarde. Het materiaal wordt op basis van de experimentele waarde geschaald.
- **Kalkmortel (KALK):** *Lime cement mortar (low cement ratio) [718]*. Deze bastaardmortel leunt het dichtste aan bij een kalkmortel vanwege het lage cementgehalte. Er werd eerst geopteerd om het materiaal te schalen volgens de experimentele A_w , maar door het groot verschil met de waarde uit Delphin zelf ($A_w = 0.49 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$) resulteerde dit in kwantitatief én kwalitatief onrealistische resultaten. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de LCC in Delphin in verschillende gebieden op basis van verschillende testen moet worden bepaald. Door enkel te schalen op basis van A_w en bij een dergelijk grote aanpassing, leidt dit tot onrealistische uitkomsten. Daarom werd er uiteindelijk beslist om dit materiaal niet te verscalen. Hierop wordt verder ingegaan bij de bespreking van de resultaten in paragraaf 3.2.

Uit de literatuurstudie en experimentele resultaten bleek eerder al het belang van het **contactoppervlak**. Daarom worden de simulaties steeds uitgevoerd met een range check op de *interface resistance* (IR): geen IR (0), *dry cured* (DC) en *wet cured* (WC). De volgende waarden worden als *contact condition* ingevoerd volgens Tabel 32 op basis van eerder onderzoek (Calle, 2020):

Tabel 32: Waarden voor de interface resistance (IR), DC en WC staan respectievelijk voor dry en wet cured.

	IR = 0 [m/s]	IR = DC [m/s]	IR = WC [m/s]
Bastaardmortel	0	2.5E10	1.25E10
Kalkmortel	0	1E9	1E8

Gezien er meegaand werd opgevoegd wordt er geen IR tussen voeg- en stelmortel beschouwd zoals in het onderzoek van Calle (2020). Om de werkelijkheid beter te benaderen wordt er via een *initial condition* wel **aanmaakvocht** toegevoegd aan de mortel. Dit staat in de realiteit voor het water in de verse mortel na het metselen. Het massapercentage aan vocht wordt bepaald op basis van de mortelrecepturen uit paragraaf 1.2, rekening houdende met het feit dat er steeds een deel water verdwijnt bij de hydratatie van mortel. Hiervoor werd een gangbare aanname gemaakt van een water-cement ratio van 0.28. Zo werden de volgende waarden bekomen voor het aanmaakvocht, weergegeven in Tabel 33:

Tabel 33: Waarden voor het aanmaakvocht in de bastaard- en kalkmortel.

	Aanmaakvocht [kg/kg]
Bastaardmortel	0.08
Kalkmortel	0.14

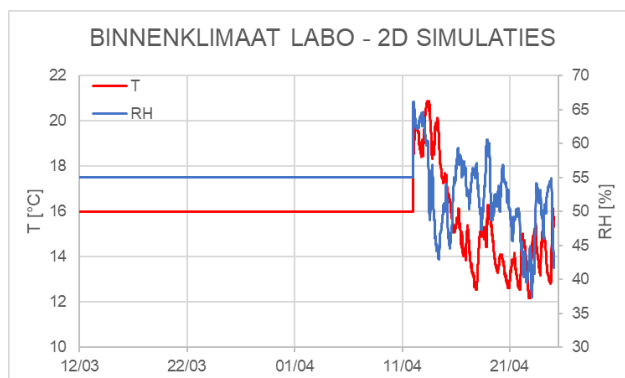
Aan de bakstenen wordt geen aanmaakvocht toegevoegd. De bakstenen worden verondersteld in evenwicht te zijn met het klimaat in het labo aangezien zij daar al enige tijd lagen voor de uitvoering. Bovendien werden zij voor de uitvoering van de muren niet extra nat gemaakt. Het model wordt vervolledigd met een laag van 10 cm kalkhennep en een plexiglasplaat. De discretisatie van het **grid** werd na iteratieve simulaties vastgelegd op 0.2 mm (min) tot 4 mm (max). Het grid is minder fijn dan in de 1D simulaties om de rekentijd te beperken. De hygrothermische parameters worden hieronder getoond in Tabel 34, voor de MRC en LCC van baksteen en mortel wordt verwezen naar bijlage G.

Tabel 34: Hygrothermische parameters van de gebruikte materialen in de 2D-simulaties.

NAAM	STAAT VOOR	ρ [kg/m ³]	λ [W/m.K]	c [J/kg.K]	μ [-]	θ_{80} [m ² /m ²]	θ_{eff} [m ² /m ²]	θ_{por} [m ² /m ²]	A_w [kg/m ² ·s]	Kleff [s]
OBBD ZK [499]	Decobloc 9 cm	1734.1	0.657	919	24.5	0.015	0.324	0.346	0.097	2.01E-04
OBBD ZK [499]	Decobloc 14 cm	1734.1	0.657	919	24.5	0.015	0.324	0.346	0.113	2.75E-04
OBBD ZK [499]	Recupsteen	1734.1	0.657	919	24.5	0.015	0.324	0.346	0.051	5.60E-06
Hemp concrete turned, 50% soda lime [1829]	Kalkhennep	402.9	0.062	828	6.9	0.019	0.567	0.848	0.097	4.55E-01
Lime cement mortar [842]	Bastaardmortel	1876.1	0.803	758	41.3	0.058	0.223	0.292	0.081	4.05E-07
Lime cement mortar (low cement ratio) [718]	Kalkmortel	1739.2	1.050	1057	28.3	0.039	0.259	0.344	0.494	5.27E-04
Glass [72]	Plexiglas	2.4	0.800	1	200.0	1.50E-08	1.50E-06	1.60E-06	0	0

Klimaat

De testopstellingen worden gesimuleerd vanaf het punt dat ze gemetseld waren tot aan de uitvoering van de test. Om het binnenklimaat in het labo na te bootsen werd een aangepast klimaat gedefinieerd zoals in Figuur 114. Vanaf 2 weken voor de test werd het binnenklimaat in het labo via een Hobo U12-011 sensor gemonitord voor temperatuur en relatieve vochtigheid. Op basis van hun gemiddeldes werd een constante aanname gedaan voor de periode ervoor waarvan er geen data was.



Figuur 114: Binnenklimaat gebruikt in de 2D simulaties, gebaseerd op actuele metingen in de laatste 2 weken.

Aangezien het om een binnenklimaat gaat, werden effecten van wind, langgolvlige en kortgolvlige straling in Delphin verwaarloosd. De regenbelasting gedurende de test werd gemodelleerd als een *imposed flux* van 2.778 l/min.m² zoals in de testen. De waarde voor de Rain Exposure bleef ongewijzigd op 1.

Outputs

Om het gedrag van de muren kwalitatief en kwantitatief te vergelijken werd er gekozen voor 2 outputs:

- **Kwalitatief:** *field plots* van het vochtgehalte in kg/m³. Zo kan er bekeken worden of het vochttransport vooral langs de bakstenen of de voegen verloopt doorheen de tijd.
- **Kwantitatief:** het totale vochtgehalte van de muur wordt uitgerekend in kg. Zo kan ook een curve bepaald worden voor de wateropname door het droge gewicht ervan af te trekken. Gezien de muren van type 1 en type 2 niet uit massief maar geperforeerd metselwerk bestaan, wordt een correctie op het gewicht toegepast in functie van het perforatiegehalte, dat voor type 1 en type 2 respectievelijk 37% en 36% bedraagt. Tot slot wordt het gewicht uit het verkleinde simulatiemodel verschaald naar de afmetingen van de testopstelling. Die resulterende curve wordt vergeleken met de curve voor wateropname uit de testen.

Echter zal er wegens het voegratio opnieuw een kleine afwijking op de resultaten zijn. Afhankelijk van het vochttransport in de voeg kan dit een over- of onderschatting betekenen. Ter volledigheid worden in Tabel 35 de voegratio's gegeven:

Tabel 35: Voegratio's voor een representatieve gevel, de uitgevoerde testopstelling en het 2D simulatiemodel.

	Type 1 en 2	Type 4
Gevel 5 m x 6 m	0.115	0.267
Uitgevoerde opstelling	0.117	0.319
Simulatie	0.086	0.240

De gesimuleerde voegratio's vormen dus een onderschatting van de testopstelling en de representatieve gevel. Een verklaring hiervoor is dat de stootvoegen in de simulatie niet worden beschouwd. Wel ligt het voegratio in de simulatie van type 4 dichter bij de representatieve gevel in de werkelijkheid dan de uitgevoerde opstelling. Het toepassen van een correctie hierop is echter te complex door de interactie tussen baksteen en mortel in de 2D simulaties.

Instellingen simulatie en simulatieduur

Gezien de muren met kalk- en bastaardmortel op dezelfde dag (12 maart) werden gemetseld is hun start dezelfde. De muren met kalkmortel werden echter laatst getest, daarom duurt de simulatie ervan 2 dagen langer. De schema's van de simulatie worden in onderstaande Tabel 36 getoond:

Tabel 36: Schema van de simulatieduur voor de 2D-simulaties van de testopstelling.

	Uitdroging mortel	Berekening	Droging na test
Bastaardmortel	42 d	1 u	1 u
Kalkmortel	44 d	1 u	1 u

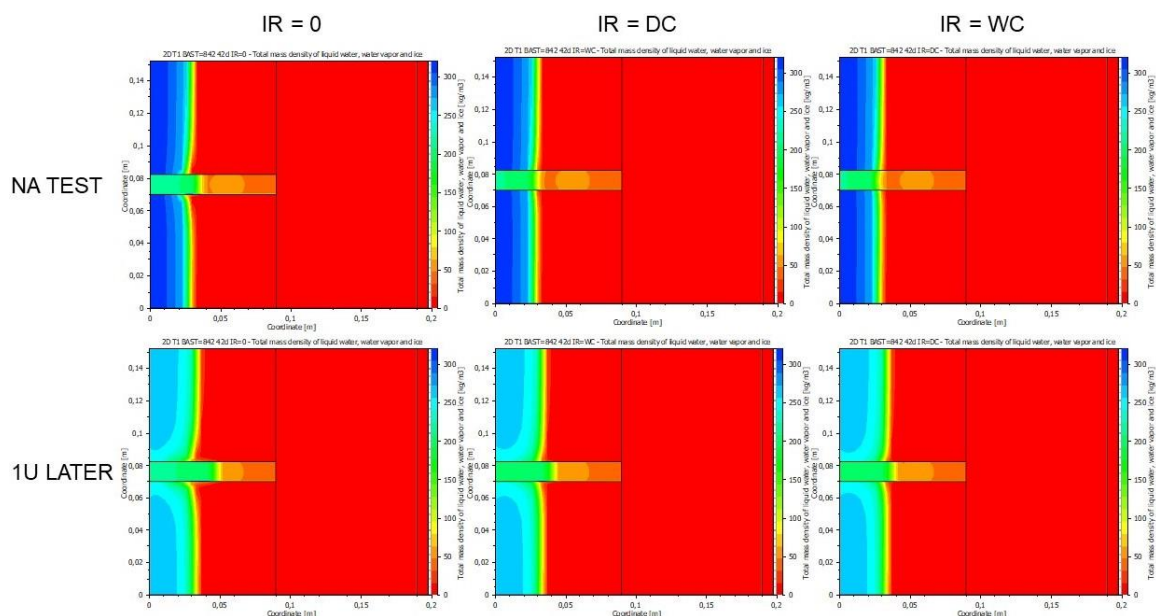
Bemerkt ook dat er via het aanmaakvocht en het simuleren van de uitdroging van de mortel in de muren getracht werd om de realiteit zo goed mogelijk te benaderen. Echter dient opgemerkt te worden dat de laag kalkhennep tijdens de droging nog niet aanwezig was in de realiteit. Om dit accurater te simuleren konden bijvoorbeeld iteratieve simulaties worden uitgevoerd waarbij eerst enkel het metselwerk met aanmaakvocht werd gesimuleerd. Net voor de test kan dan kalkhennep worden toegevoegd en alle toestandsparameters van het materiaal cel per cel overgezet worden op de nieuwe simulatie als initiële randvoorwaarden. Dit is echter een erg complex gegeven en werd om die reden niet beschouwd.

3.2. Resultaten en vergelijking met de testopstellingen

Hieronder worden de resultaten van de 2D simulaties besproken en vergeleken met de testresultaten. Het is belangrijk om in het achterhoofd te houden dat het voornamelijk gaat om een kwalitatieve vergelijking. De onzekerheden op de kwantitatieve vergelijking worden waar nodig verder toegelicht.

3.2.1. Type 1 (T1) – Decobloc 9 cm

Eerst worden de kwalitatieve resultaten getoond na 1 uur berekening (= na test) en 1 uur later. Tijdens dat uur treedt er namelijk nog herverdeling van vocht op en na dat uur kan er vergeleken worden met de waarneming van de achterzijde van de muur tijdens het afgraven van de kalkhennep na de test.

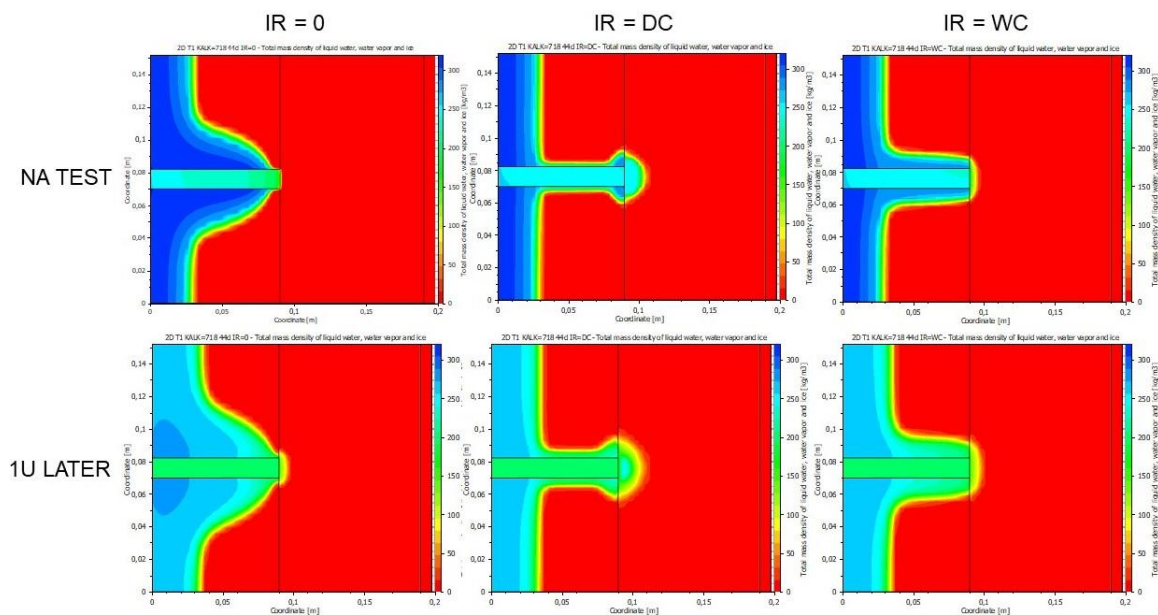


Figuur 115: Het vochtgehalte in de gesimuleerde opstelling BAST 1 na de test en 1 uur later.

In de voeg bij BAST 1 in Figuur 115 is er na ca. 5 cm nog een geïsoleerde vocht lens zichtbaar met een deel aanmaakvocht dat niet volledig uitgedroogd was. Bij de bastaardmortel is het vochttransport via de voeg beperkt. Ook is er slechts een kleine impact zichtbaar van de IR: zonder IR is het de steen die de voeg verder bevochtigt, vandaar dat de vochtfronten in de steen afbuigen naar de voeg. Wanneer er een IR wordt gehanteerd, is deze uitwisseling moeilijker door de extra weerstand. Dit vertaalt zich in een minder diep vochtfront in de voeg en een recht vochtfront in de baksteen dat niet afbuigt. In

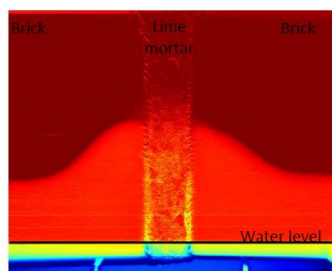
tegenstelling tot de simulatie kwam het water in de testopstelling al tot aan de binnenzijde van het metselwerk na de test. Dit valt eerder te verklaren door *runoff* vanuit de voegen, na infiltratie door het versterkte vochttransport via het contactoppervlak tussen baksteen en mortel, dan door verzadiging van de baksteen, gezien het vochtfront in de baksteen zich niet zo ver bevindt in de simulaties.

Bij kalkmortel is het vochttransport via de voeg in Figuur 116 sterker aanwezig en meer uitgesproken. Het water raakt bovendien dieper. De impact van de IR is bij de KALK simulaties uitgesproken aanwezig. Het is hier de voeg die de steen bevochtigt dieper in het materiaal. Door het toevoegen van een IR vindt er minder uitwisseling plaats tussen voeg en baksteen waardoor de vochtige zone in de baksteen rond de voeg vernauwt en minder diep in de baksteen raakt. Hierdoor blijft er meer vocht gevangen in de voeg en zal het vochtfront zich sneller en dieper voortplanten in de voeg. Dit komt het sterkst tot uiting bij de *dry cured* simulatie. Hier raakt het vochtfront rond de voeg een 2-tal cm diep in de isolatie. Ook is er rond de voeg aan de achterzijde van het metselwerk bevochtiging van de baksteen vanuit de voeg. In de experimenten kwam dit overeen met capillaire absorptie (naar boven) en *runoff* (naar onder).



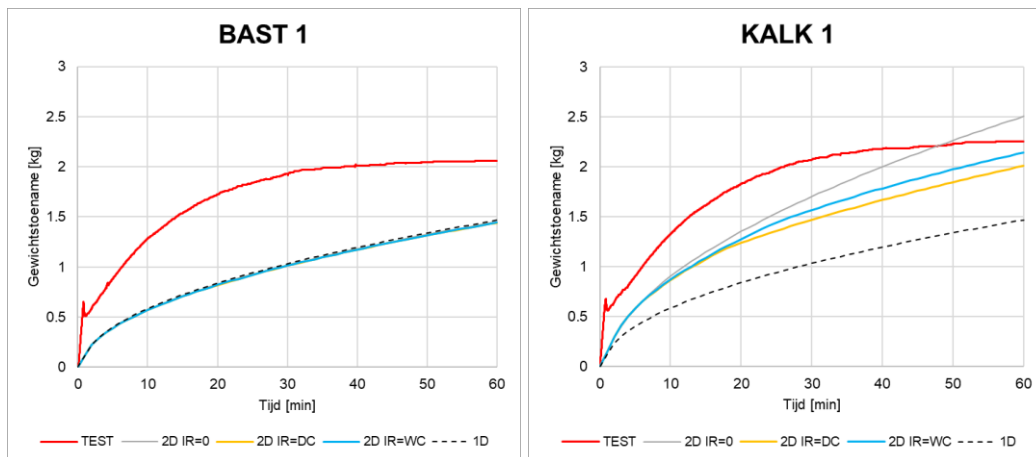
Figuur 116: Het vochtgehalte in de gesimuleerde opstelling KALK 1 na de test en 1 uur later.

Hoewel het vochtfront in de testen ook tot de binnenkant van het metselwerk kwam, dient er wel gezegd te worden dat de absorptiecoëfficiënt A_w van de kalkmortel in de simulaties hier niet werd aangepast en dus relatief hoog is tegenover de experimenteel bepaalde waarde. Het verschalen van het materiaal louter op basis van deze experimentele waarde leidde tot een onrealistisch resultaat waarin de voeg zich quasi waterdicht toonde in de simulaties. Door de A_w -waarde nu niet aan te passen is het kwalitatief gedrag op deze manier wel in overeenstemming met wat van een kalkmortelvoeg wordt verwacht volgens eerder onderzoek zoals in Figuur 117 (Calle, 2020). De berekeningstest uit dit onderzoek kan vergeleken worden met de capillaire absorptieproef uit het onderzoek van Calle aangezien er aan de buitenzijde een continue waterfilm op het metselwerk stond door *runoff* gedurende de test.



Figuur 117: X-ray van de capillaire absorptie van water in baksteen en kalkmortel na 2 minuten (Calle, 2020).

Vervolgens vergelijken we de curves voor de vochtopname tussen de 2D simulaties en de test in Figuur 118. De 1D simulatie toont een onderschatting ten opzichte van de test in beide gevallen. Door het beperkte verschil in vochtgehalte tussen voeg en baksteen is er bij BAST 1 minder verschil tussen de 1D en 2D simulatie. Tegenover de 2D simulatie is de 1D simulatie een lichte overschatting doordat de voegen in de simulatie iets droger zijn dan de baksteen. Bij de kalkmortel zien we echter het omgekeerde: doordat het vochttransport versterkt wordt door de voeg, zoals zichtbaar in de *field plots* in Figuur 116, vormt de 1D simulatie een onderschatting van de vochtopname. De resultaten van de 2D simulatie zijn allicht een overschatting van de werkelijkheid doordat de A_w -waarde van de kalkmortel niet werd aangepast. Ze overschrijden dan ook het testresultaat, wat weinig waarschijnlijk is gezien fenomenen zoals infiltratie en het versterkt vochttransport langsheen het contactoppervlak niet zijn opgenomen in de simulatie.



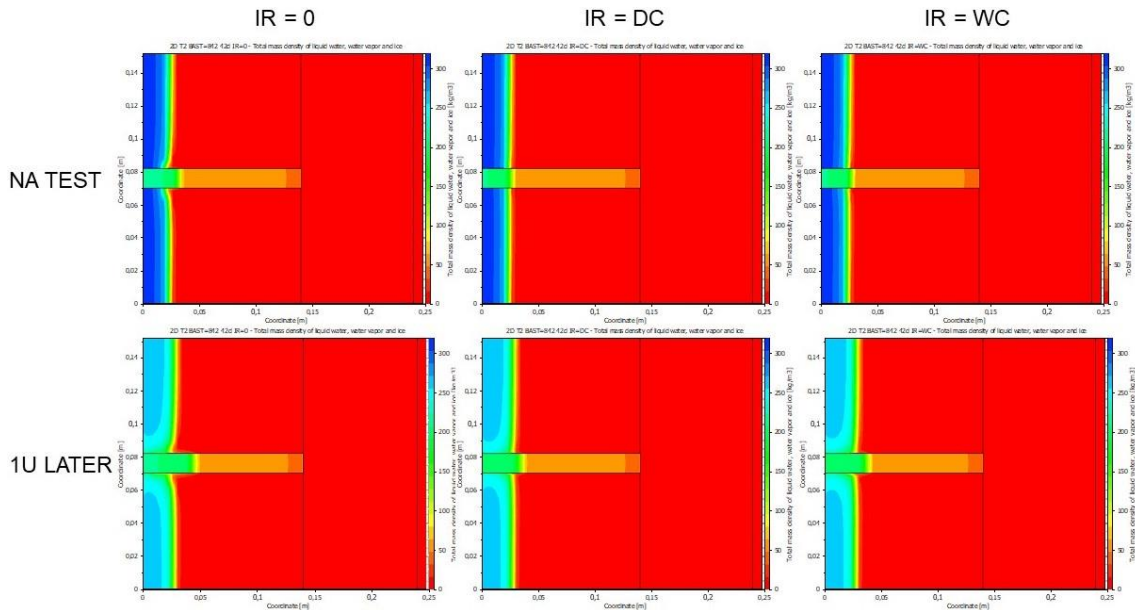
Figuur 118: Vergelijking van de opnamecurves voor type 1 uit de testopstelling en de 2D simulaties.

Wat ook opvalt is dat de *interface resistance* (IR) bij bastaardmortel nauwelijks een impact heeft op de 2D simulatieresultaten. Dit is in overeenstemming met de literatuur (Vereecken & Roels, 2013). Voor kalkmortel is de spreiding op de resultaten als gevolg van de variatie in IR beduidend groter.

Om kwantitatieve 2D resultaten te bekomen in de logische range tussen de test en de 1D simulatie moest de waterabsorptiecoëfficiënt van de kalkmortel uit Delphin verlaagd worden tot de experimenteel bepaalde waarde. Dit zorgde dan weer voor een kwalitatief onlogisch resultaat waarbij de voeg zich quasi waterdicht toonde. Een oplossing zou een completere en meer realistische karakterisatie zijn die rekening houdt met hoe de LCC in Delphin correct verschaald kan worden. Het verscalen louter op basis van A_w zorgt voor een onrealistisch resultaat. Dit valt buiten het kader van dit eindwerk.

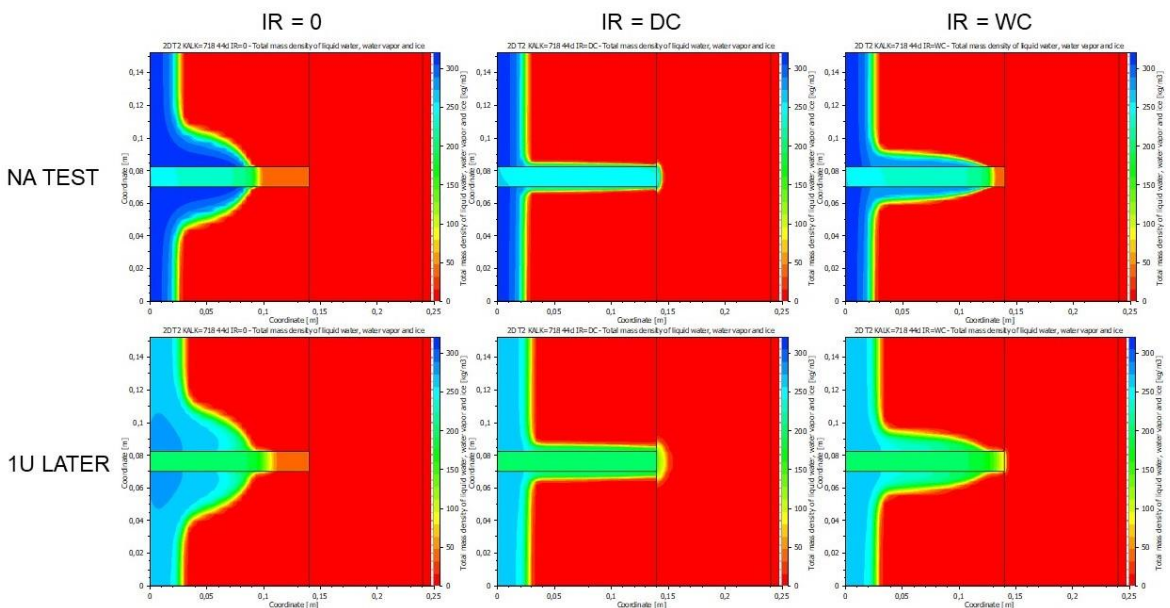
3.2.2. Type 2 (T2) – Decobloc 14 cm

Kwalitatief zien we gelijkaardige trends bij BAST 2 en KALK 2. Bij de bastaardmortel in Figuur 119 is het effect van de IR minder zichtbaar maar is het wel duidelijk dat de voeg meer bevochtigd wordt vanuit de steen voor IR = 0, resulterend in een dieper vochtfront.



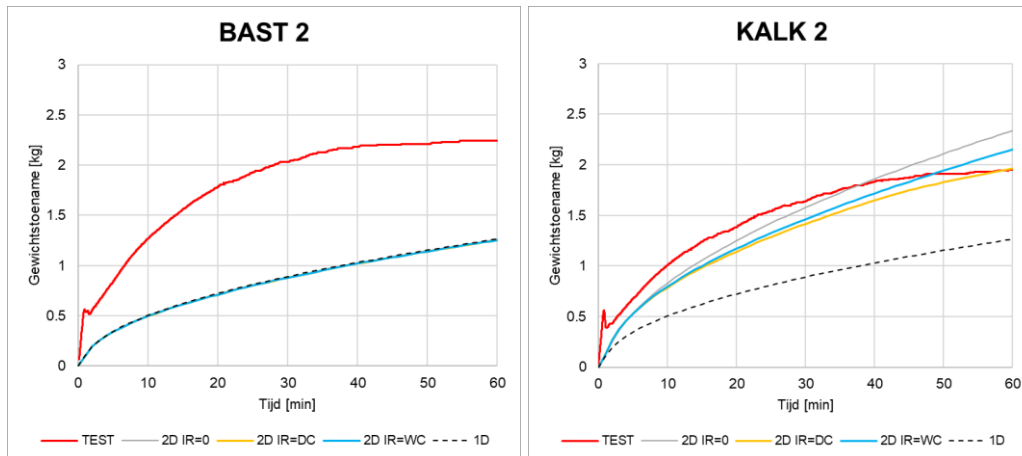
Figuur 119: Het vochtgehalte in de gesimuleerde opstelling BAST 2 na de test en 1 uur later.

In de simulaties met kalkmortel in vertoont de IR visueel een grotere impact op de vorm van het vochtfront. Zo wordt duidelijk dat het vochtfront zich sneller naar binnen verplaatst door de voeg als de IR groter is. Voor IR = 0 bevindt het vochtfront zich namelijk na de test op ca. 10 cm diepte, voor IR = WC is dit 13 cm en voor IR = DC heeft het vochtfront de kalkhennep al bereikt. In de testen bleek type 2 behalve een aantal lokale infiltraties regendicht. Dit wijst er weer op dat de A_w van de kalkmortel mogelijks een overschatting van de werkelijkheid is. Bovendien ligt de werkelijkheid steeds tussen DC en WC in, waardoor ook in de simulaties na een uur het vochtfront allicht niet de achterzijde van de voeg zou halen.



Figuur 120: Het vochtgehalte in de opstelling KALK 2 na de test en 1 uur later.

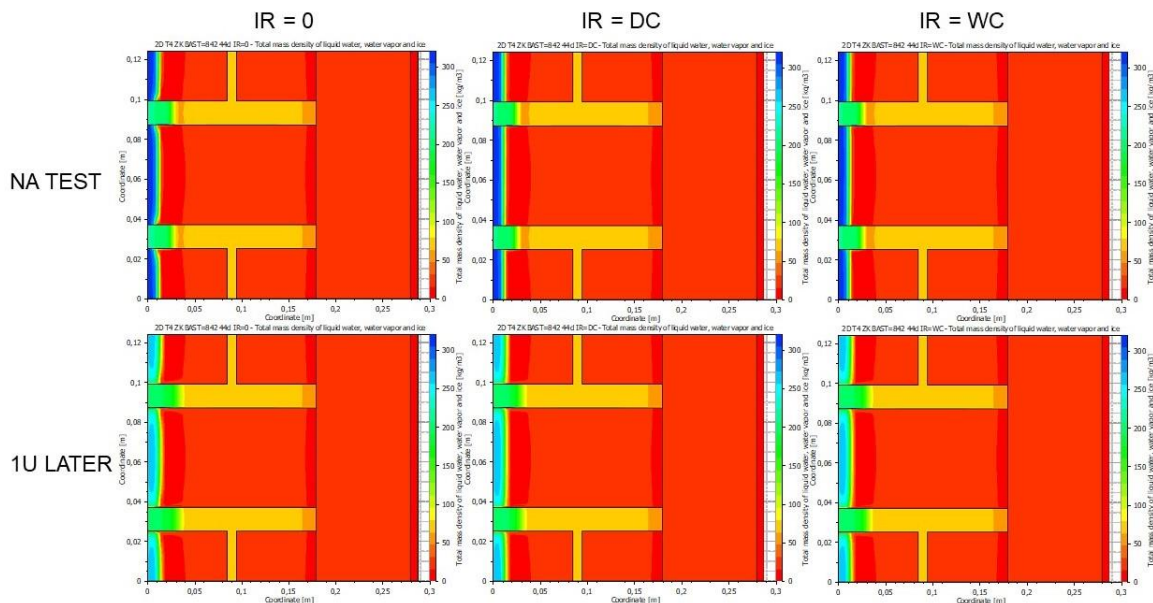
Wanneer we tot slot de kwantitatieve resultaten vergelijken zien we een analoog verhaal als bij type 1. We zien over het algemeen dat de gesimuleerde resultaten van type 2 net als de testresultaten een lagere totale wateropname tonen dan bij type 1, te wijten aan de lagere water-absorptiecoëfficiënt A_w van de Decobloc 14 cm tegenover de Decobloc 9 cm. De 2D simulaties overschrijden hier opnieuw de testcurve en vormen een overschatting van de vochtopname door de A_w -waarde van de kalkmortel.



Figuur 121: Vergelijking van de opnamecurves voor type 2 uit de testopstelling en de 2D simulaties.

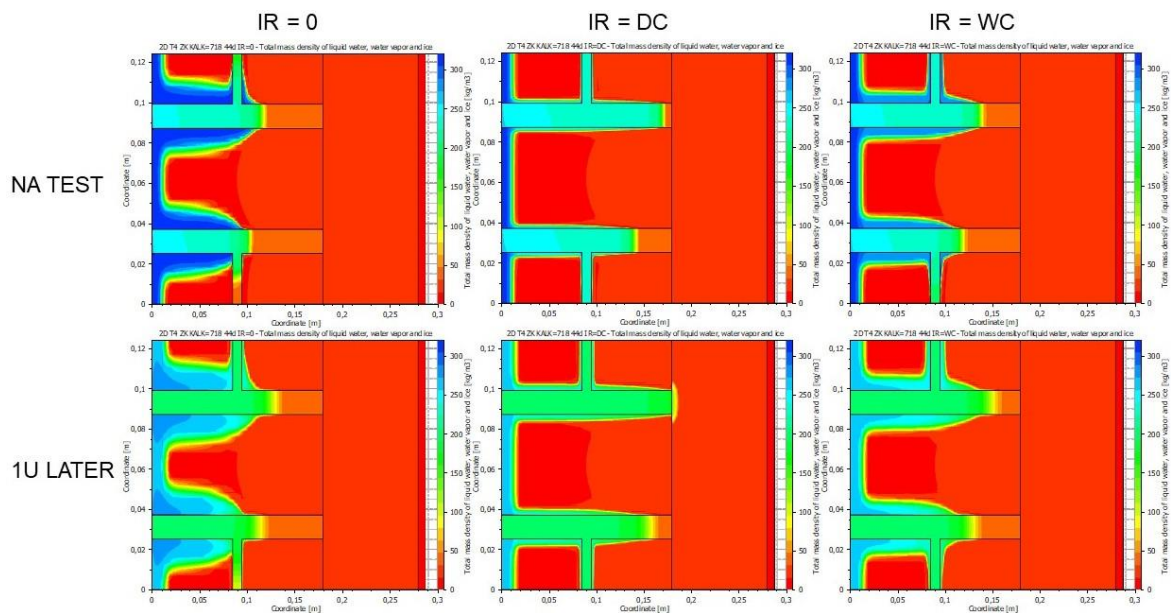
3.2.3. Type 4 (T4) – Recuperatiestein in kruisverband 18 cm

Tot slot bekijken we ook voor de type 4 muren de simulatiere resultaten. In Figuur 122 staan de kwalitatieve resultaten van BAST 4 afgebeeld. Door de grotere muurdikte is het aanmaakvocht minder uitgedroogd geraakt, resulterend in de oranje kleur in de voegen. De vochtfronten bevinden zich minder diep in de recuperatiestein dan bij type 1 en 2 vanwege de lagere absorptiecoëfficiënt A_w , die ongeveer de helft bedraagt van de Decoblocs. Dit betekent dan ook dat de voeg uit bastarmortel nu meer absorbeert dan de baksteen, tegenover type 1 en 2. Het vochtfront in de voegen is dan ook dieper gelegen. De invloed van de IR is gering maar blijkt uit het afbuigen van de vochtfronten in de baksteen bij IR = 0 en de rechte vochtfronten wanneer deze extra weerstand in het contactoppervlak wel wordt gemodelleerd. Het is duidelijk dat het vochtfront nergens de binnenzijde bereikt, hetgeen overeenkomt met de testopstellingen. De exacte diepte in het metselwerk kan echter niet worden geverifieerd.



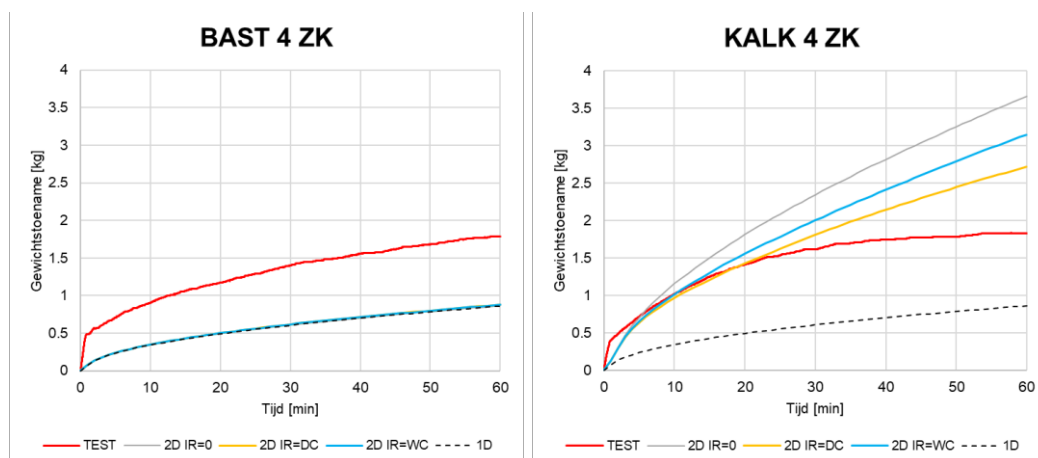
Figuur 122: Het vochtgehalte in de gesimuleerde opstelling BAST 4 na de test en 1 uur later.

De resultaten voor KALK 4 in Figuur 123 liggen in lijn van wat eerder werd geobserveerd voor type 1 en type 2. De voeg is dominant in het vochttransport en de invloed van de IR is duidelijk zichtbaar zoals eerder beschreven. Ook hier komt het vochtfront niet tot binnen, wat in overeenstemming is met de uitgevoerde testen. Enkel als er wordt gesimuleerd met een *dry cured* IR is dit wel net het geval in de voeg na herverdeling, maar de realiteit ligt altijd tussen *dry* en *wet cured* in. Merk op dat de oranje zone in de voegen door het aanmaakvocht duidelijk minder vochtig is dan bij de bastaardmortel. Ook in de realiteit is deze verbeterde droging te verwachten dankzij het meer dampopen karakter van kalkmortel.



Figuur 123: Het vochtgehalte in de gesimuleerde opstelling KALK 4 na de test en 1 uur later.

Tot slot kijken we naar de kwantitatieve resultaten voor type 4 in Figuur 124. Doordat de bastaardmortel voeg nu een hogere A_w -waarde heeft dan het metselwerk is de 1D simulatie nu een lichte onderschatting van de 2D simulatie voor BAST 4. Voor KALK 4 wordt er een sterke overschatting geobserveerd, zowel van de testresultaten als de 1D simulatie, door de A_w -waarde van de kalkmortel. Deze bevochtigt namelijk een groot deel van de steen rondom de voeg wanneer er geen IR aanwezig is. Wanneer er wel een IR wordt gemodelleerd dringt het vocht dieper door in de voegen, resulterend in het hogere gewicht. Het verder aanpassen van de materiaaleigenschappen voor de kalkmortel is echter niet geoorloofd, gezien de experimentele waarde van A_w resulteerde in een onrealistisch kwalitatief gedrag.



Figuur 124: Vergelijking van de opnamecurves voor type 4 uit de testopstelling en de 2D simulaties.

3.3. Conclusie

In dit onderdeel werden een aantal 1D en 2D simulaties uitgevoerd naar het model van de testopstellingen. Het verticale verschil tussen de curves van de test en de simulaties zegt iets over het **verschil tussen de realiteit en het simulatiemodel**. In het algemeen vertoont de testopstelling steeds een hogere vochtopname dan de simulaties. Het tekort in de simulaties kan vertaald worden in een bronterm. Of ook: de simulaties vormen een onderschatting van de werkelijkheid. Dit vanwege een aantal fenomenen van versterkt vochttransport in de realiteit, waar een bronterm voor zou staan:

- In het **contactoppervlak** tussen baksteen en mortel treedt versterkt vochttransport op als gevolg van de hechting tussen de baksteen en mortel die niet ideaal is in de realiteit, met een netwerk aan kleine holtes tot gevolg. Het water volgt de weg van de minste weerstand en zal zo infiltreren langs het contactoppervlak, waarvan het belang al duidelijk werd uit de testopstellingen in DEEL III.
- **Infiltratie** door scheuren, barsten en imperfecties is inherent aan metselwerk in de werkelijkheid. Dit verloopt initieel vrij snel en zorgt voor zijdelingse bevochtiging van droog materiaal in de diepte. Het fenomeen vertraagt weer doordat het materiaal rond het infiltratiepad bevochtigd raakt. Dit is een verklaring voor het afvlakken van de testcurves, iets wat niet terugkomt in de simulaties.
- Ongewenste fenomenen zoals **randeffecten** dragen bij aan de gewichtstoename tijdens de test. Zonder deze effecten zou de testcurve dus iets lager liggen.

Wat betreft het **verschil tussen 1D en 2D simulaties** geldt dat de 1D simulatie een onderschatting is van de 2D simulatie wanneer de voeg meer absorbeert dan de baksteen, en omgekeerd. Het simuleren van de **mortels** zorgt wel voor een duidelijk verschillend resultaat, kwalitatief en kwantitatief. Er werd vastgesteld dat het simuleren van een *interface resistance* (IR) een beperkte impact heeft op de resultaten bij bastaardmortel. Wanneer er echter kalkmortel wordt gesimuleerd heeft de IR een grotere impact op de spreiding van de resultaten: de voeg zal het vocht niet kwijtraken aan de omliggende baksteen, resulterend in een versnelde en dus diepere voortplanting van het vochtfront doorheen de voeg. De waarde voor de IR zal in de realiteit tussen de uitersten van *dry* en *wet cured* liggen.

Tot slot dient vermeld te worden dat de simulaties slechts een benadering vormen van de werkelijkheid en dat er een aantal **onzekerheden** mee gepaard gaan:

- In het symmetrisch model voor de 2D simulaties is er een onderschatting van het voegratio tegenover de testopstellingen. Afhankelijk van de A_w -waardes van baksteen en voegmateriaal kan dit zorgen voor een onder- of overschatting op de kwantitatieve resultaten. Dit valt echter niet zomaar te corrigeren door de interactie in de simulatie tussen voeg en baksteen.
- De absorptiecoëfficiënt van de kalkmortel werd niet gewijzigd op basis van de experimentele waarde van A_w omdat het leidde tot een kwalitatief onrealistisch resultaat. Hierdoor zal de kalkmortel in de simulaties kwantitatief aanleiding geven tot een overschatting van de werkelijke vochtopname. Dit kwam onder andere naar boven in het feit dat de opnamecurve van de 2D simulaties uitkwam boven de testcurve, hetgeen omwille van de hierboven vermelde fenomenen eerder onlogisch lijkt. Het aanpassen naar een tussenliggende waarde voor A_w zou echter louter giswerk zijn en is niet wetenschappelijk te onderbouwen. Andere opties zoals verdere materiaaltesten zijn er binnen het tijdsbestek van dit eindwerk niet meer.



DEEL V – Case study: kLOB – meetcampagne van een eengezinswoning

Tot slot wordt er ingegaan op een case study. In een eengezinswoning te Buggenhout werd een meetcampagne uitgevoerd met sensoren op verschillende dieptes in 2 buitenmuren. Dit levert niet alleen waardevolle informatie op over het werkelijke gedrag van de type-wandopbouwen van BLAF met kalkhennep, maar maakt het ook mogelijk om de inzichten uit de vorige hoofdstukken te vergelijken met de realiteit. Hierna worden ten eerste de meetdata besproken. Tot slot worden ook simulaties uitgevoerd met dezelfde wandopbouw ter vergelijking.

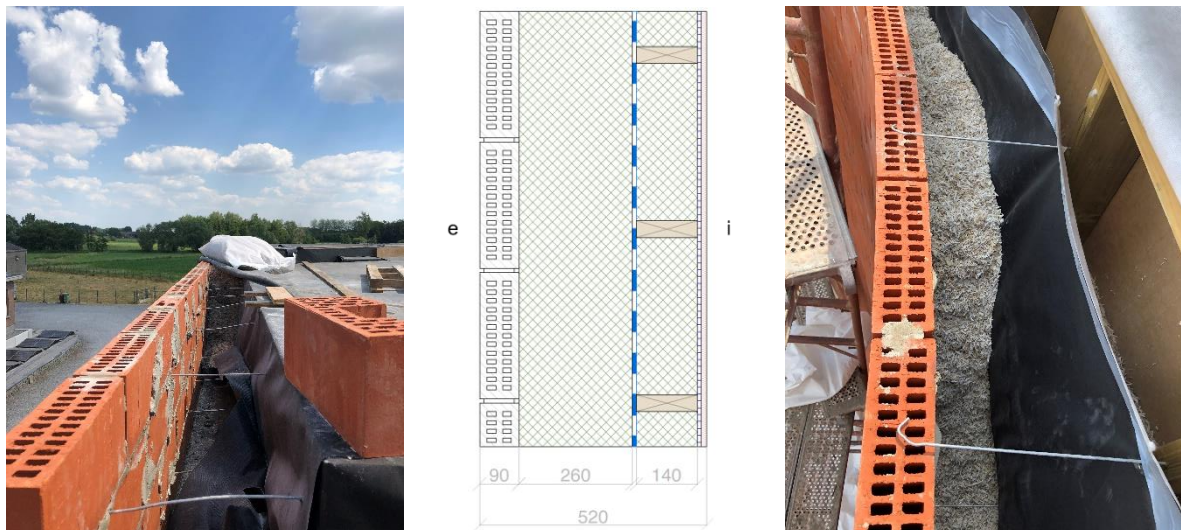
1. Projectinformatie

Het project kLOB van BLAF (Figuur 125) werd opgeleverd in april 2024. Het is een eengezinswoning te Buggenhout opgebouwd volgens een zeshoek met concaaf afgeronde zijden ingeschreven in een rechthoek. Door het terugtrekken van de gebouwschil ontstaan ommuurde buitenruimtes aan inkom en leefruimte. De circulatie binnenin gebeurt rond een centrale kern met trap. Het project is gebouwd met een metselwerk buitenschil rond een houten structuur met los gestorte kalkhennep-isolatie (type CaNaDry, zie bijlage A.1) van fabrikant Exie. De interne scheidingswanden zijn uitgevoerd in CLT.



Figuur 125: Axonometrie en foto vanaf de straatzijde van kLOB (BLAF, 2024).

De wandopbouw bestaat concreet (van buiten naar binnen) uit 9 cm Decobloc, 26 cm spouw opgevuld met kalkhennep, regenscherp, 14 cm houtskelet opgevuld met kalkhennep en als binnenaafwerking een dampopen houtvezelplaat en gipskartonplaten. Ook werden sommige wanden afgewerkt met leempleister. De Decobloc is zoals eerder gezegd een steen van Ploegsteert opgebouwd zoals een snelbouwsteen maar de klei van een gevelsteen. De buitenschil in metselwerk wordt wegens zijn beperkte dikte (9 cm) verankerd aan het houtskelet via spouwankers, zichtbaar in Figuur 126.

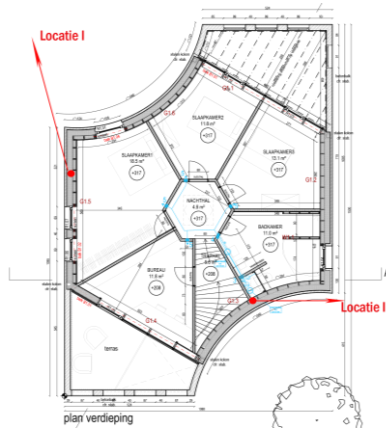


Figuur 126: Wandopbouw kLOB (midden, eigen tekening) en foto's tijdens de werf (links en rechts, BLAF).

2. Sensoren

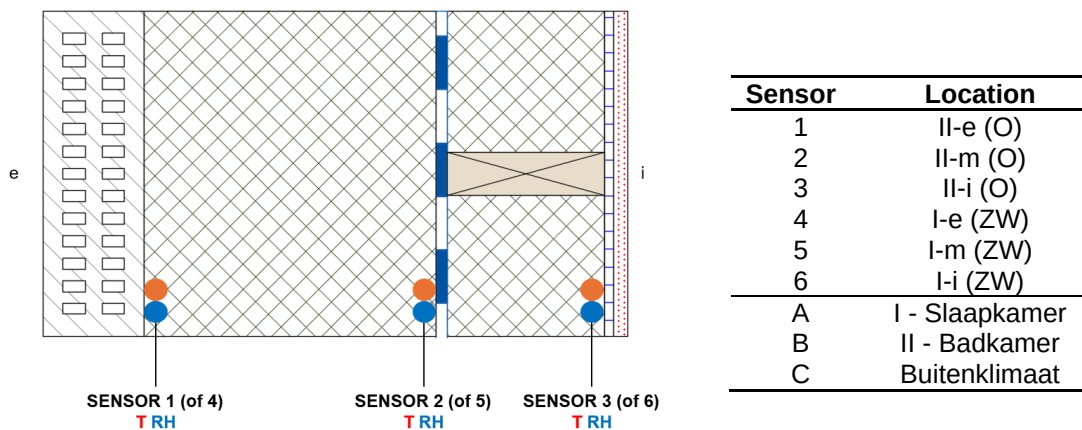
2.1. Positionering

Op donderdag 8 juni 2023 werden de sensoren ter plaatse gebracht en werd hun plaatsing besproken. Er werd beslist om 2 gevels te monitoren (zuidwest en oost), zo kan het effect van oriëntatie op bevochtiging en droging worden bestudeerd. De sensoren met oriëntatie zuidwest bevinden zich in de buitenmuur van de slaapkamer (locatie I). De sensoren met oriëntatie oost bevinden zich in de buitenmuur van de badkamer (locatie II). Ze worden beiden voorzien op de verdieping 1, zie Figuur 127.

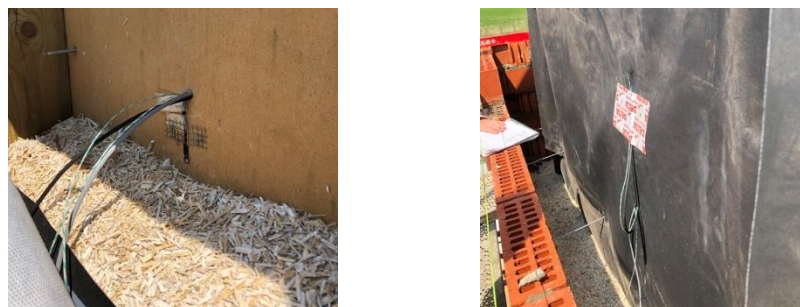


Figuur 127: Plan met aanduiding van de locatie van de sensoren op de eerste verdieping.

De sensoren monitoren temperatuur (T) en relatieve vochtigheid (RH) in de muren op 3 dieptes zoals in Figuur 128 en Figuur 129. De buitenste sensor ("e") komt op de binnenzijde van het metselwerk, de middelste sensor ("m") op de buitenzijde van het regenscherm en de binnenste sensor ("i") op de houtvezelplaat. Ook het binnenklimaat en buitenklimaat worden gemonitord voor T en RH via sensoren.



Figuur 128: Aanduiding sensoren in de wandopbouw en nummering op basis van de locatie en diepte in de wand.



Figuur 129: Plaatsing van de sensoren in werffase, sensor 6 links en sensor 5 rechts (foto's: BLAF).

2.2. Technische informatie

Voor de temperatuur worden thermokoppels type K (meetnauwkeurigheid 0.1°C) gebruikt en voor de relatieve vochtigheid wordt de sensor type HIH-4000 (meetnauwkeurigheid 3.5%) gebruikt. Het loggen van de data gebeurt voor de relatieve vochtigheden met een OM-DAQPRO-5300 en voor de temperatuur met de OM-CP-OCTPRO. Ze worden in de berging geïnstalleerd zoals in Figuur 130.



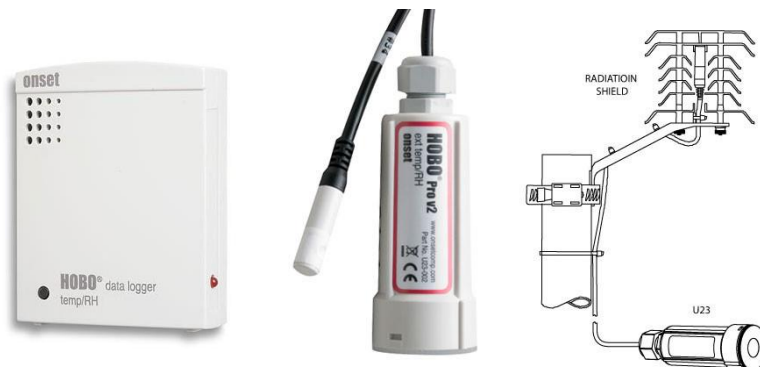
Figuur 130: V.l.n.r. thermokoppel K, HIH-4000, OM-DAQPRO-5300, OM-CP-OCTPRO en hun plaatsing (rechts).

De temperatuurdata rechtstreeks bruikbaar uit de logger was, maar voor de relatieve vochtigheden diende eerst een omzetting te gebeuren. Die sensoren genereren een output in millivolt (mV). Om dit te vertalen in relatieve vochtigheden in % wordt de volgende formule uit de technische fiches (bijlage A.2) gehanteerd:

$$RH = \frac{\frac{V_{out}}{V_{supply}} - 0.16}{0.0062 * (1.0546 - 0.00216 * T)}$$

Hierbij is RH de relatieve vochtigheid [%], V_{out} de spanning uit de datalogger [mV], V_{supply} de bronspanning gelijk aan 5 V en T de temperatuur op dat moment [°C]. Hoewel het meetgebied voor de sensoren van de relatieve vochtigheid in theorie 0 tot 100% bedraagt, dient men rekening te houden met een reversibele shift van 3% boven de 90% RH. Concreet betekent dit dat er voor de erg hoge waarden van relatieve vochtigheid (> 95%) weinig zekerheid bestaat over de exacte vochtigheid, en kan er dus enkel worden aangenomen dat het materiaal erg vochtig is.

Verder wordt ook het binnenklimaat in de ruimtes achter de sensoren opgevolgd door middel van Hobo U12-011 sensoren. Deze hebben een meetnauwkeurigheid op de T van 0.35°C en voor de RV van 2.5% (in een meetgebied van 10 tot 90%). Om een idee te hebben van het lokale buitenklimaat wordt gebruik gemaakt van een Hobo Pro v2 (U23-002). Deze sensor heeft een meetnauwkeurigheid van 0.2°C (in een meetgebied van 0 tot 70°C) en 2.5% RV (in een meetgebied van 0 tot 90%). Om verstoringen door bezonning of schaduw te beperken wordt de sensor geplaatst in een *radiation shield*, de Hobo RS3-B, zoals afgebeeld in Figuur 131. Voor meer informatie over de sensoren wordt verwezen naar bijlage A.2.



Figuur 131: Binnensensor Hobo U12-011 en buitensensor Hobo Pro v2 (U23-002) met radiation shield.

3. Meetresultaten

3.1. Algemeen

Het resultaat van de metingen in Buggenhout tussen 12 januari 2024 en 26 april 2024 wordt hieronder getoond en besproken. Alle temperatuursensoren waren gedurende deze periode operationeel. Bij 2 van de 6 relatieve vochtigheidssensoren werd er echter geen data weerhouden. Sensor 4 gaf gedurende een week nog signaal met erg hoge relatieve vochtigheden maar viel daarna net als sensor 1 terug op waarden die niet logisch te verklaren waren. Allicht kan dit gerelateerd worden aan het feit dat deze sensoren zich bevinden op de positie met de hoogste vochtbelasting, het gaat om de 2 sensoren die op de binnenzijde van het metselwerk werden bevestigd. Bij het afsluiten van de meetcampagne in het kader van deze thesis op 26 april 2024 was de buitenmuur namelijk nog niet opgevoegd zoals te zien in Figuur 132. Hier kan vloeibaar vocht dus een grote rol spelen. Aangezien de sensoren weerstand meten krijgen we onrealistische waarden wanneer er zich een druppel op de sensor bevindt.



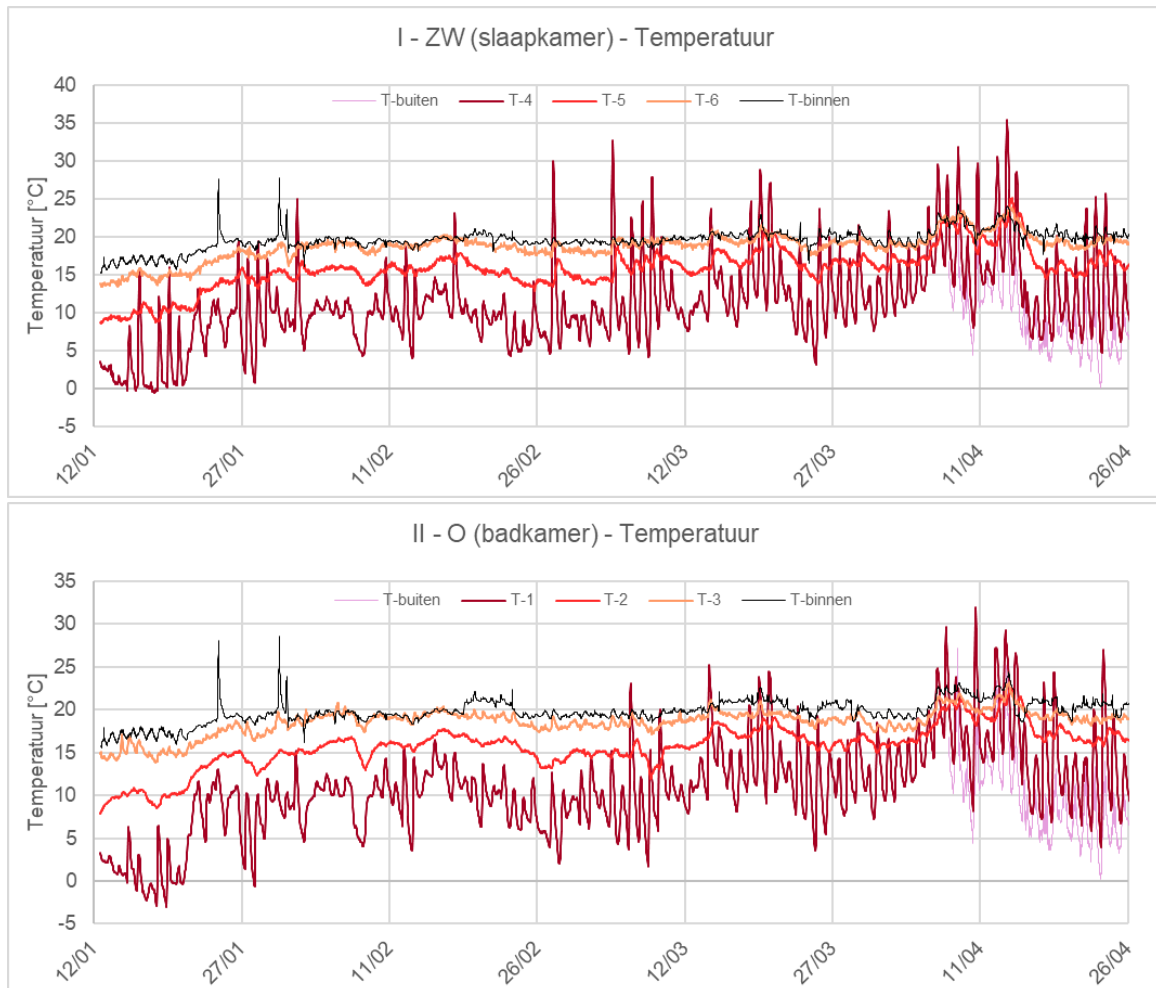
Figuur 132: Niet opgevoegd metselwerk in Buggenhout op 26/04/2024.

Bovendien gaat het om muren met Decobloc 9 cm, waarbij ook in de experimentele testen eerder bleek dat deze wandopbouw niet regendicht is – zelfs indien opgevoegd. Het is goed mogelijk dat deze sensoren terug betrouwbare resultaten doorgeven vanaf de zomerperiode, wanneer de muur voldoende is uitgedroogd, maar dit valt buiten het tijds kader van deze thesis. Door een technische storing op de logger ontbreken bovendien de resultaten van de relatieve vochtigheid van de laatste 2 dagen.

Ook hebben de sensoren voor binnen- en buitenklimaat niet altijd op de juiste positie gelegen. De buitensensor werd op het einde van de meetcampagne buiten geplaatst, de meetdata zijn dan ook tot die periode beperkt. De binnensensoren hebben enige tijd in dezelfde ruimte gelegen, maar ook deze werden correct geplaatst aan het einde van de meetcampagne en hier wordt wel alle data beschouwd.

3.2. Temperatuur

Over het algemeen zien we in Figuur 133 een gelijkaardige tendens bij de temperatuursensoren ZW en O, waarbij de temperaturen iets hoger liggen in de zuidwestelijke muur. Ook zijn de piektemperaturen voor de sensor achter het metselwerk (1 en 4) daar significant hoger, gezien de oriëntatie is dit te wijten aan de bezonning. Verder ligt de buitenluchttemperatuur buiten lager dan de temperatuur achter het metselwerk in de constructie, dit valt te verklaren doordat het stralingsaandeel wordt uitgesloten door de buitensensor met *radiation shield*.



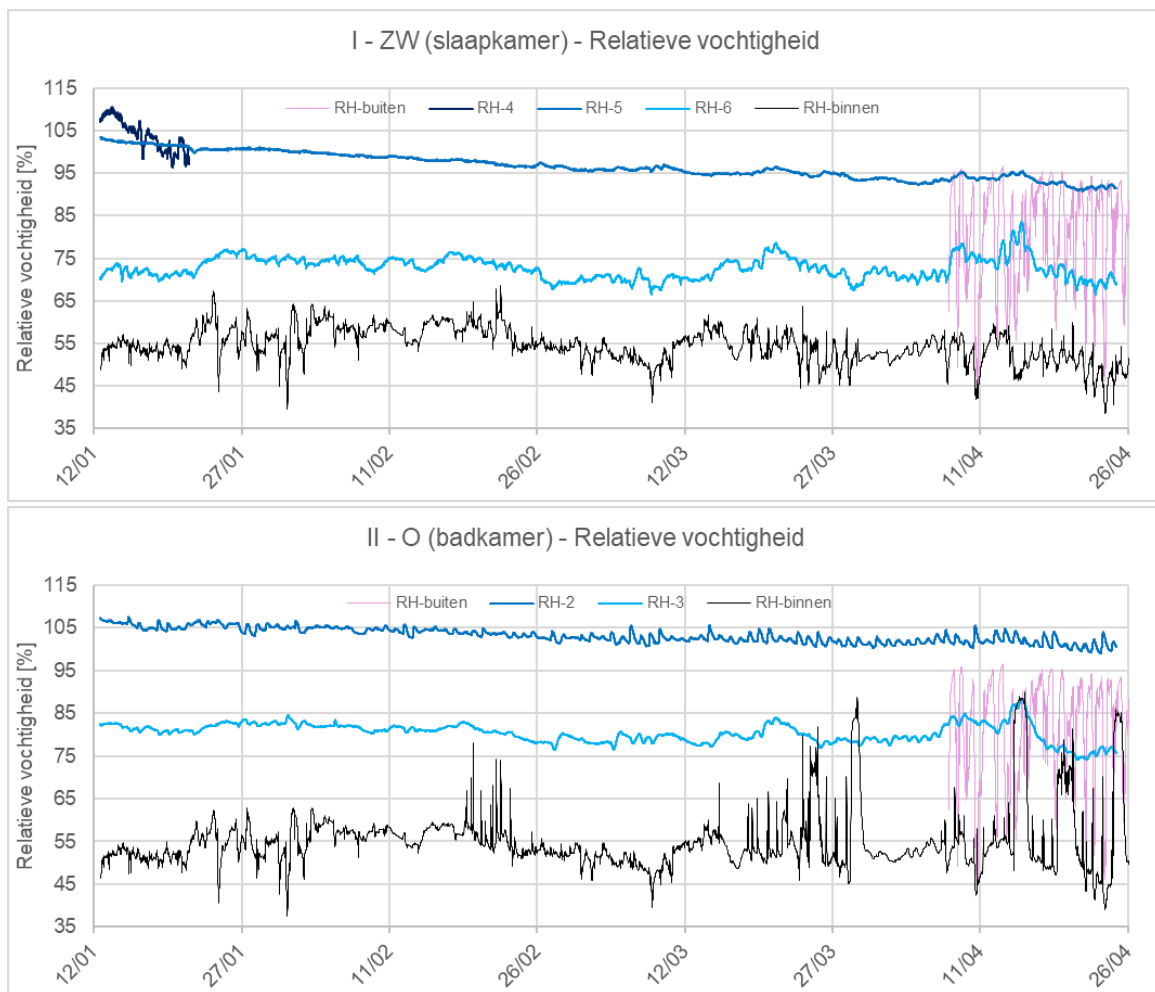
Figuur 133: Temperatuur in de muren uitgezet met binnen- en buitentemperatuur gedurende de meetcampagne.

Het dempende effect van de thermische inertie van kalkhennep op de temperatuur wordt bovendien duidelijk zichtbaar als men de sensoren op verschillende dieptes vergelijkt. Hoe dieper in de constructie, hoe meer de variaties worden uitgevlakt. Aan het einde van de meetcampagne, wanneer ook de temperatuur van de buitenlucht wordt weergegeven, zien we de temperatuur evolueren van grillige variaties meegaand met de buitenomgeving naar sterk gedempte en meer constante temperaturen die de binnenomgeving volgen.

3.3. Relatieve vochtigheid

Vervolgens vergelijken we de relatieve vochtigheden in de wandopbouw in Figuur 134. De sensoren op de binnenste locatie variëren mee met de binnenomgeving, zij het op gedempte wijze en bij hogere waarden. De relatieve vochtigheid is over het algemeen vrij hoog en relatief constant, al is een duidelijk dalende trend zichtbaar die kan worden toegekend aan het uitdrogen van de wand tijdens het voorjaar.

Wanneer we echter ZW en O vergelijken wordt een op het eerste gezicht contra-intuïtief resultaat bekomen. Waar de ZW-oriëntatie doorgaans kritisch is voor vocht, zien we hier consistent voor alle sensoren hogere metingen voor de O-oriëntatie. Dit kan te wijten zijn aan een (hoger) initieel vochtgehalte dat door de oriëntatie minder snel uitdroogt. Er kan ook worden opgemerkt dat sensor 4 bij de ZW-oriëntatie – weliswaar bij erg hoge relatieve vochtigheden – toch nog een week operationeel was. De oostelijke sensor 1 was op dat moment ook al niet meer functioneel, hetgeen kan wijzen op hogere vochtgehalten net achter het metselwerk. Mogelijks dient er dus ook gekeken te worden naar de regenbelasting op de gevels. In de HAM-simulaties wordt daarop verder ingegaan.

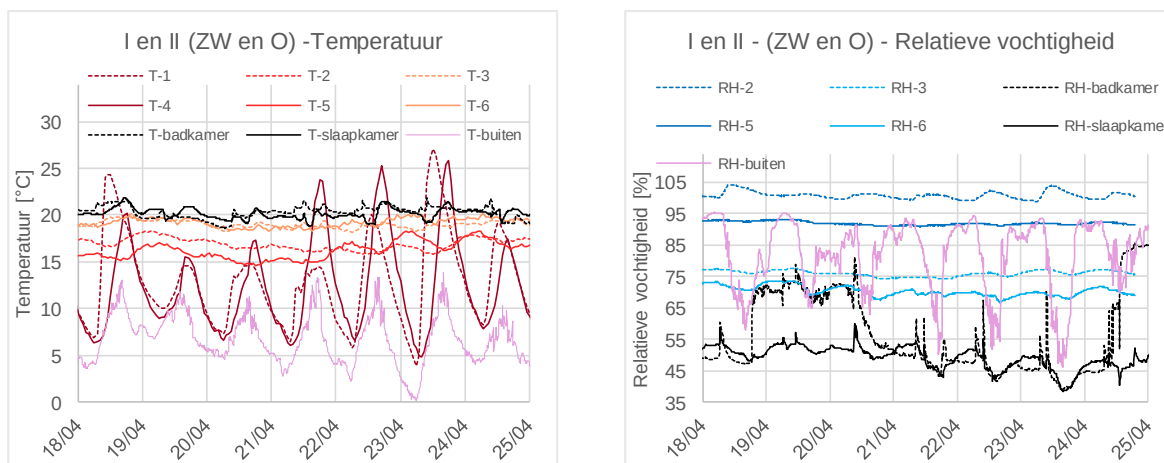


Figuur 134: Relatieve vochtigheid in de muren uitgezet met binnen- en buitenmetingen tijdens de meetcampagne.

Uit deze resultaten is ook beter zichtbaar dat de sensoren voor het binnenklimaat vaak in dezelfde ruimte hebben gelegen, allicht de slaapkamer. Omstreeks de periodes van 18/02 tot 24/02, van 17/03 tot 30/03 en van 07/04 tot 26/04 lag de tweede sensor weldegelijk in de badkamer, resulterend in de duidelijk hogere vochtpieken.

3.4. Thermische inertie: faseverschuiving en damping

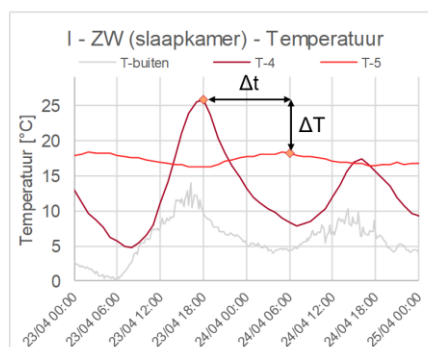
Om het effect van faseverschuiving en damping meer in detail te bekijken wordt ingezoomd op de laatste week van de meetcampagne en worden temperatuur en relatieve vochtigheid voor de 2 meetlocaties hieronder naast elkaar geplaatst. De dagelijkse variatie in temperatuur en relatieve vochtigheid vertaalt zich vooral in de materialen nabij binnen- en buitenoppervlakken in schommelingen. Hoe dieper in de constructie, hoe constanter het verloop in Figuur 135.



Figuur 135: Zoom-in op de laatste week van de meetcampagne.

Het dempende effect van de thermische inertie van kalkhennep wordt nog beter duidelijk in Figuur 136. Wanneer we kijken naar 23/04, de dag met de grootste temperatuurvariatie – het is bij grote temperatuurverschillen dat thermische inertie het meest van belang is – zien we een thermische damping van ongeveer 8-9°C over de 26 cm kalkhennep die ertussen ligt. Meer dan dat, er is ook een faseverschuiving tussen het tijdstip van de maxima op beide locaties van bijna 13u in de zuidwestelijke wand en bijna 15u in de oostelijke wand. Dit is in overeenstemming met wat in de literatuur wordt beschreven en wordt gezien als een grote troef van kalkhennep als isolatiemateriaal (Buildwise, 2020). Bemerk ook dat de piek achter het metselwerk in de oostelijk georiënteerde wand meer dan 5u vroeger op de dag ligt dan die in de zuidwestelijke wand, vanwege de bezonning.

Vergelijking maxima	O	ZW
<u>Na het metselwerk</u>		
T _{max} [°C]	27,3	26,3
Tijdstip (23/04) [hh:mm]	11:35	17:05
<u>Op het regenscherm</u>		
T _{max} [°C]	18,2	18,5
Tijdstip (24/04) [hh:mm]	2:15	5:55
<u>Thermische inertie</u>		
Damping ΔT [°C]	9,1	7,8
Faseverschuiving Δt	14h 40'	12h 50'



Figuur 136: Vergelijking van de thermische damping en faseverschuiving tussen O- en ZW-oriëntatie op 23/04.

4. Simulaties – validatie met meetcampagne Buggenhout

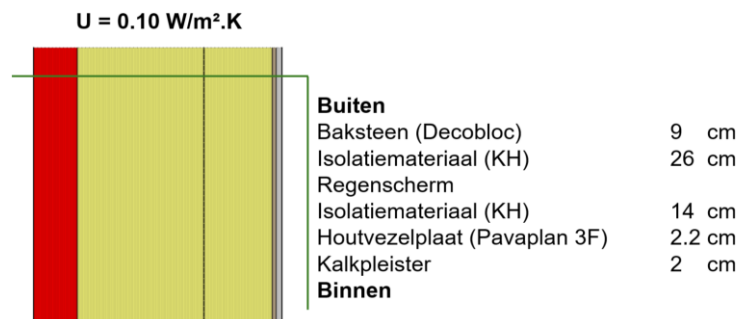
Tot slot volgen hierna een aantal 1D simulaties van de wandopbouw van Buggenhout analoog met de simulaties uit DEEL IV. Waar nodig worden de opbouw van het model en de gemaakte aannames nog toegelicht. Daarna worden de resultaten besproken. Enerzijds worden ze vergeleken met de meetdata, anderzijds wordt er gekeken naar dezelfde evaluatiecriteria als voorheen in het 15^e evaluatiejaar.

4.1. Model en parameters: input, output en aannames

Tenzij specifiek anders vermeld worden dezelfde aannames en instellingen gehanteerd als voor de simulaties van opbouw V1 tot V9 in DEEL IV.

Geometrie

De opbouw in Buggenhout op de locaties van de sensoren is een opbouw type V8, waarbij er een regenscherm wordt aangebracht op het houtskelet en de spouw volledig gevuld wordt met isolatie. De opbouw wordt schematisch voorgesteld in Figuur 137 met materialen en diktes, de hoogte is altijd 1 m.



Figuur 137: De opbouw van Buggenhout (type V8) gebruikt in de 1D simulaties voor de case study.

De gebruikte materialen worden getoond in Tabel 37. De baksteen, Decobloc 9 cm, wordt opnieuw gerepresenteerd door baksteen ZK zoals in de 2D simulaties. Het regenscherm wordt analoog gemodelleerd als voorheen via een *contact condition*. Het grid wordt gediscrètiseerd tussen 0.1 mm (min) en 1 mm (max).

Tabel 37: Overzicht van de materiaaleigenschappen gebruikt in de 1D simulaties voor de case study.

NAAM	ρ [kg/m³]	λ [W/m.K]	c [J/kg.K]	μ [-]	θ_{80} [m²/m²]	θ_{eff} [m²/m²]	θ_{por} [m²/m²]	A_w [kg/m²√s]	K_{leff} [s]
Old Building Brick Dresden ZK [499]	1,734.1	0.657	919	24.5	0.015	0.324	0.346	0.107	2.47E-09
Hemp concrete turned, 50% soda lime [1829]	402.9	0.062	828	6.9	0.019	0.567	0.848	0.097	4.55E-06
Wood Fibre Insulation Board [270]	150.0	0.042	2000	3.0	0.018	0.600	0.981	0.070	2.16E-08
Lime Plaster [629]	1,498.4	0.412	802	9.3	0.034	0.430	0.435	0.019	1.84E-10

Aangezien er werd vastgesteld bij het laatste plaatsbezoek dat de gevel nog niet was opgevoegd, wordt er ook gesimuleerd met een bronterm voor infiltratie. Er wordt zowel een check van de robuustheid van de wandopbouw gedaan via de 1% van ASHRAE als 10.03% infiltratie toegevoegd (Van Linden, 2022), aangezien de echte waarde voor de infiltratie onzeker is.

Klimaat

Het gebruikte buitenklimaat is opnieuw het MRY voor Brussel, ook het binnenklimaat voor Brussel wordt gebruikt. Wel werd er vastgesteld in de *one-factor-at-a-time approach* in DEEL IV dat de invoer van de slagregenbelasting RE in Delphin van cruciaal belang is. Daarom worden alle factoren specifiek uitgerekend op basis van de *case study* volgens EN ISO 15927-3 om tot slot de RE te corrigeren. De volgende aannames worden daarbij gemaakt:

- Factor voor terreinvarianties C_R : de kroonlijsthoogte in Buggenhout bedraagt 6.2 m. Gezien de ligging kan de terreinklasse zowel worden geïnterpreteerd als II-landbouwgebied of III-buitenwijk. Beiden worden uitgerekend.
- Factor voor de topografie C_T : wegens de vlakke topografie blijft deze factor hetzelfde.
- *Obstacle factor* O: het eerstvolgende bouwwerk van dezelfde hoogte bevindt zich langs de ZW oriëntatie op 9 m (huis van de burens) en langs de O oriëntatie op 35 m (huis overzijde straat).
- *Wall factor* W: gezien de sensoren zich bevinden ter hoogte van de verdiepingsvloer van het eerste verdiep wordt de waarde 0.4 gehanteerd.

Dit resulteert in de volgende factoren volgens Tabel 38:

Tabel 38: Correctiefactoren op de regenbelasting in Delphin 6 tegenover de waarden voor de case study.

FACTOR	WAARDE DELPHIN	BUGGENHOUT
C_R	1.007	0.666 (III) - 0.916 (II)
C_T	1.0	1
O	0.8	0.3 (ZW) – 0.5 (O)
W	0.4	0.4

Gezien deze factoren afwijken van de standaardaannames in Delphin, kan de RE gevarieerd worden om hun product te corrigeren. Zo worden de resulterende waarden voor de slagregenbelasting RE specifiek voor de case study in Buggenhout bekomen in Tabel 39. Dit leidt duidelijk tot een sterke vermindering van de slagregenbelasting. Dit bevestigt dat de aannames in Delphin conservatief zijn.

Tabel 39: Waarden voor de slagregenbelasting (RE) gebruikt in de simulaties voor de case study.

	ZW	O
	min - max	min - max
Rain Exposure (RE)	0.248 – 0.341	0.414 – 0.569

In totaal werden er 12 scenario's doorgerekend: 2 oriëntaties (ZW en O), 2 waarden voor de slagregenbelasting (min en max) en 3 varianten op de regendichtheid (0%, 1% en 10% infiltratie).

Outputs

Naast de outputs voor de degradatie-indicatoren zoals in de andere simulaties worden ook op de locaties van de sensoren T en RV opgevraagd om zo een kwalitatieve vergelijking te kunnen maken met de meetdata.

Instellingen simulatie en simulatieduur

Er wordt opnieuw gekozen voor een simulatieduur van 15 jaar. Het is echter belangrijk om te vermelden dat de start van het simulatiejaar steeds op 26 april ligt. Deze datum is ook de einddatum van de meetdata. Zo komt de vergelijking tussen de meetdata en de simulatie aan het einde van het eerste jaar. Dit stemt ook overeen met het werfverloop: er vond een voorlopige controle van het metselwerk plaats in april 2023 en volgens werffoto's was het metselwerk al volledig afgewerkt in juni 2023.

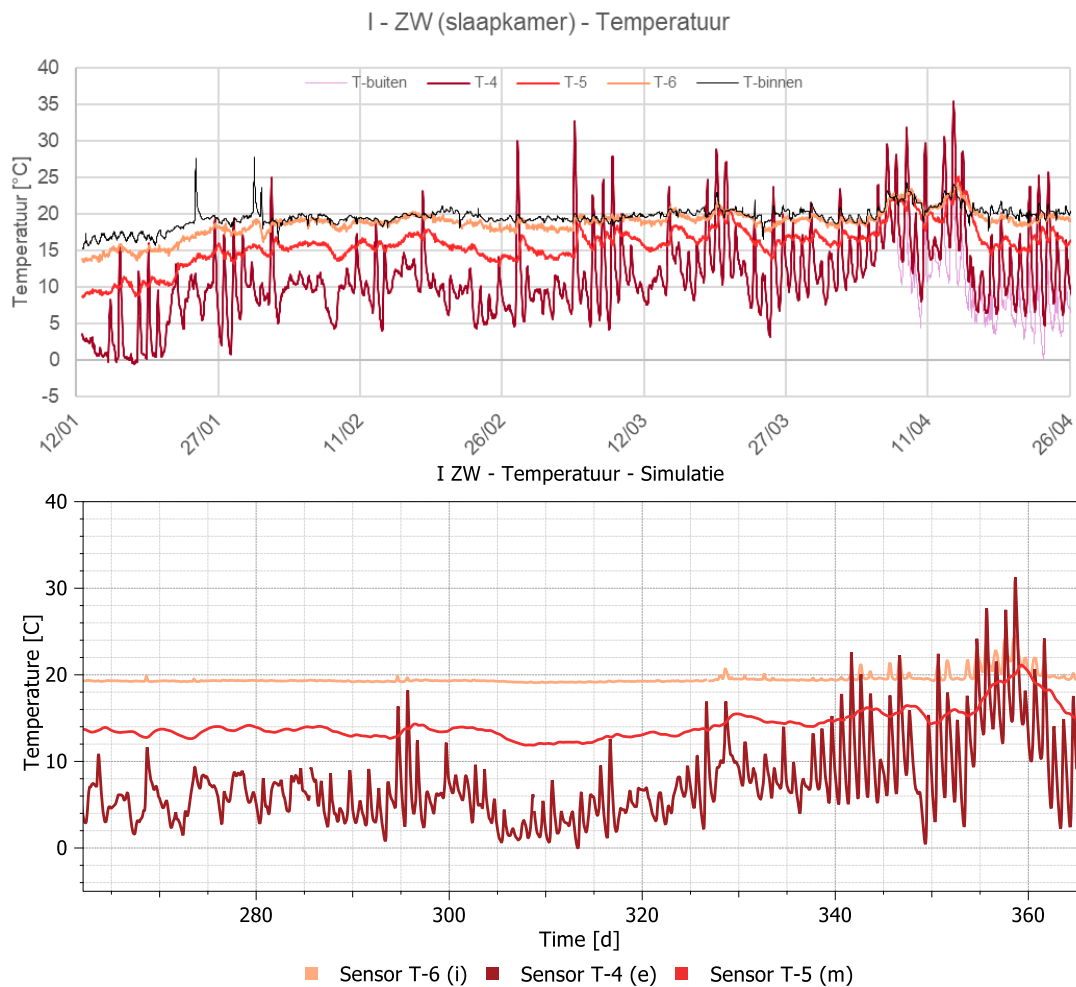
De *output grids* worden zo ingesteld dat er tijdens het 1^e en 15^e jaar uurlijkse data wordt verzameld. Zo kan er in het 1^e jaar vergeleken worden met de meetdata en in het 15^e jaar een evaluatie van de degradatie-indicatoren gebeuren na het bereiken van evenwicht.

4.2. Resultaten

Vergelijking met de meetdata in het 1^e simulatiejaar

- **Temperatuur (T)**

Om te kijken of het materiaal in de simulaties kwalitatief dezelfde tendensen vertoont als waargenomen in de metingen wordt de meetdata voor de ZW-oriëntatie vergeleken met de simulaties gedurende de meetperiode in Figuur 138.



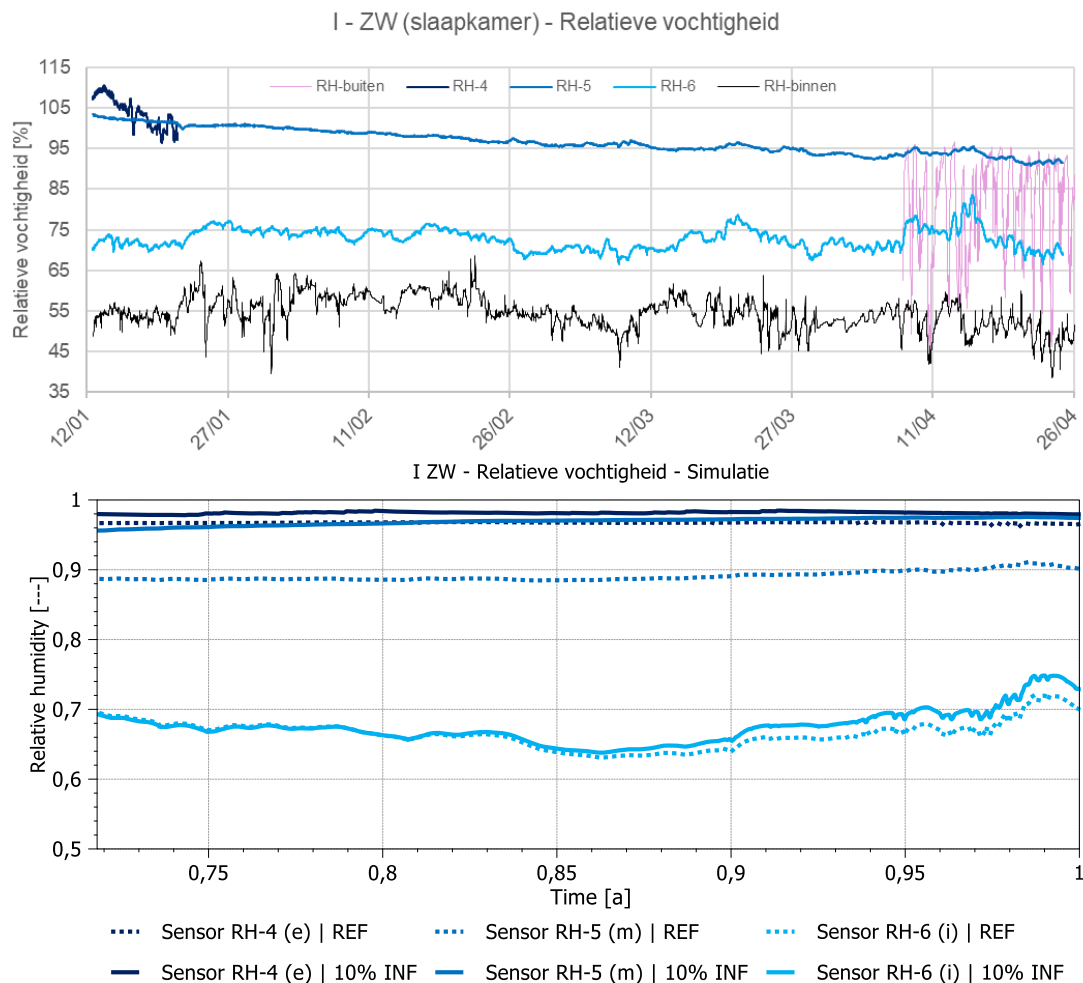
Figuur 138: Vergelijking van de temperatuur (T) tussen de meetdata en de simulatie gedurende de meetperiode.

Globaal bevestigt dit inderdaad de waarnemingen uit de meetdata: de buitenste sensor toont veel variatie en volgt het buitenklimaat. Hoe dieper in de constructie, hoe meer de pieken uitgevlakt worden.

Een nauwkeurige match wat betreft de waardes tussen metingen en simulaties is logischerwijs niet mogelijk omdat er niet met hetzelfde klimaat werd gewerkt. Een mogelijke optimalisatie is om met gemeten klimaatdata te werken, bijvoorbeeld via Vlinder-stations of het KMI. De eerste piste werd verkend maar bevat geen stralingsdata en werd om die reden niet weerhouden, de tweede piste was niet meer haalbaar binnen het tijdsbestek van dit eindwerk.

- **Relatieve vochtigheid (RV)**

Vervolgens wordt ook de RV vergeleken in Figuur 139. De waarden worden zowel voorgesteld zonder infiltratie (streeplijn) als met 10% infiltratie als indicatie voor het niet opvoegen van de gevel (volle lijn).



Figuur 139: Vergelijking van de relatieve vochtigheid (RH) tussen de meetdata en de simulatie in de meetperiode.

De binnenste sensor RH-4 bevindt zich zoals in de metingen beduidend lager dan de andere 2 sensoren. Opnieuw heeft het geen nut om de waarden te gaan vergelijken gezien er niet met dezelfde klimaatvoorwaarden werd gesimuleerd. Wel is het ook duidelijk in de simulaties dat de sensoren buiten het regenscherm (RH-5 en RH-6) zich op erg hoge relatieve vochtigheden bevinden, zeker als er infiltratie wordt beschouwd. Dit is een mogelijke verklaring voor de uitval van sensor RH-4. Ook in de 1D simulaties eerder werden er hoge relatieve vochtigheden vastgesteld in de kalkhennep-isolatielaag.

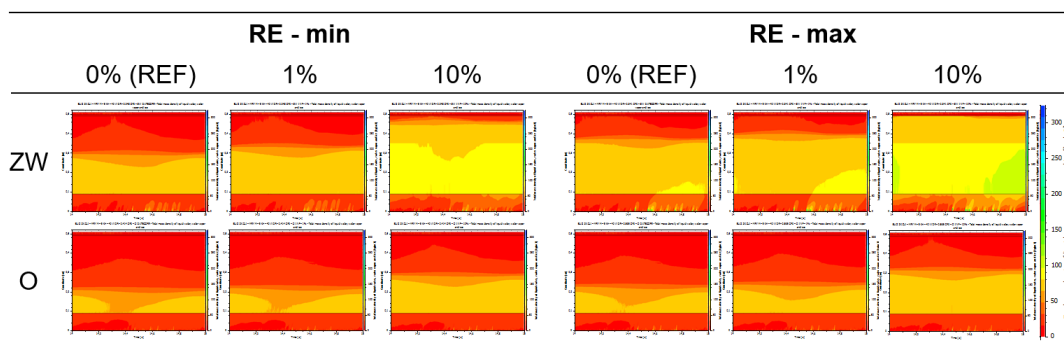
Dit betekent ook dat er nood is aan een bronterm om dezelfde grootteorde van relatieve vochtigheden uit te komen als in de metingen. De ideale opbouw in de simulaties vormt dus mogelijk een onderschatting van de werkelijkheid, zoals bleek uit het verschil tussen de simulaties en experimenten.

Evaluatie van degradatie-indicatoren voor de wandopbouw in het 15^e simulatiejaar

• Degradatie

De gesimuleerde opbouwen blijven volgens de beschouwde degradatie-indicatoren risicovrij. De vochtgehaltes voor de simulaties tijdens het evaluatiejaar worden voorgesteld in Figuur 140. De start en het einde van het jaar ligt op 26 april.

- De **schimmelindex M** is 0 in alle simulaties, dus er is geen risico voor schimmelvorming op het binnenoppervlak. Gezien de grote isolatiedikte (40 cm) en het gecontroleerd binnenklimaat in de simulaties is dit een logische uitkomst.
- Het **aantal kritische FTC** is 0 in alle simulaties. Er is dus ook geen risico op vorstschade in de simulaties. Dit kan verklaard worden door de verlaagde slagregenbelasting op de gevels.
- Het aantal dosissen is 0 in alle simulaties. Dit betekent dus ook dat de **Decay Rating (DR)** volgens het dose-response model in alle simulaties 0 is, ook bij 10% infiltratie. In dat geval is er voor de ZW-oriëntatie met de maximale RE een jaargemiddeld vochtgehalte in het hout van 20.5 m%, hetgeen onder de kritische 25 m% voor het dose-response model blijft. Dit valt deels te verklaren door de verlaagde slagregenbelasting tegenover de conservatieve aannames in Delphin, maar vooral ook omdat de opbouw een regenscherm bevat net voor het houtskelet (type V8). Het effect ervan is duidelijk afgetekend in Figuur 140 als de grens tussen de gele en oranje kleur in de ZW opbouwen met 10% infiltratie.



Figuur 140: Overzicht van de vochtgehaltes in de wandopbouw van de case study in het 15e jaar voor de minimale en maximale slagregenbelasting (RE) en 3 infiltratiepercentages (0%, 1%, 10%). De field plots starten en eindigen op 26 april: we zien dus lente – zomer – herfst – winter.

Ter vergelijking, wanneer we dezelfde opbouwen simuleren zonder regenscherm (type V9) wordt er weldegelijk houtdegradatie voorspeld zoals te zien is in Tabel 40. We zien namelijk dat er bij 10% infiltratie voor de ZW-oriëntatie en de hoogste slagregenbelasting weldegelijk houtrot wordt verwacht. Over een evaluatieperiode van 4 jaar blijft dit acceptabel voor wit- en zachtrot maar het agressievere bruinrot zorgt wel voor een degradatierisico. Evenwel dient er gezegd te worden dat deze simulaties van conservatieve aard zijn gezien ze na een periode van 15 jaar met het MRY worden geëvalueerd.

Tabel 40: Overzicht van het aantal dosissen en de Decay Rating (DR) voor de hoogste regenbelasting (max) bij 0% (REF) en 10% infiltratie voor een opbouw zoals in de case study maar zonder regenscherm (type V9).

	ZW - max		O - max	
	REF	10%	REF	10%
Dosissen	0	80	0	0
Witrot/zachtrot (1 jaar)	0	0.04	0	0
Bruinrot (1 jaar)	0	0.18	0	0
Witrot/zachtrot (4 jaar)	0	0.49	0	0
Bruinrot (4 jaar)	0	1.72	0	0

DR < 0.5 "acceptable" 0.5 ≤ DR < 1 "slight attack" DR > 1 "moderate to severe attack"

Het risico op houtrot waar er geen regenscherm zit is een aandachtspunt voor bepaalde zones van de gevel waar er tussen de ramen geen regenscherm werd geplaatst om praktische redenen zoals in Figuur 141. Bovendien wordt de metselwerk buitenschil door zijn beperkte dikte (9 cm) ondersteund door spouwvakken. Deze doorboren puntsgewijs het regenscherm waardoor in de praktijk zeker niet al het vloeibaar vochttransport zal worden tegengehouden. Dit euvel kan verholpen worden met een grotere baksteendikte en dus een zelfdragende buitenschil, waardoor spouwankers overbodig worden.



Figuur 141: zone tussen de ramen waar geen regenscherm op het houtskelet werd geplaatst (links) en doorboringen van het regenscherm door spouwankers (rechts). (foto's: Bruno Vanderschelden)

• Thermische performantie

Hoewel de V8 wandopbouw in Buggenhout zo goed als geen degradatierisico vertoont, is de thermische performantie ervan ook belangrijk. De resultaten voor de stijging in λ -waarde van de kalkhennep-isolatie tussen het houtskelet achter het regenscherm worden gegeven in Tabel 41. Daaruit blijkt dat de λ -waarde in de O-oriëntatie relatief ongevoelig is voor een toename in RE of het infiltratiepercentage. In de ZW-oriëntatie vormt de vochtbelasting op de gevel een grotere invloed: de λ -waarde neemt tot 68% toe. Zonder infiltratie is dit 15-25%, afhankelijk van de keuze van de RE.

Tabel 41: Overzicht van de jaarlijkse gemiddelde λ -waarde en stijging tegenover de droge toestand.

	ZW - min			ZW - max			O - min			O - max		
	REF	1%	10%	REF	1%	10%	REF	1%	10%	REF	1%	10%
$\lambda_{\text{gem,jaar}}$	0.071	0.072	0.098	0.077	0.082	0.104	0.069	0.070	0.070	0.070	0.070	0.071
% stijging	14%	15%	57%	24%	32%	68%	12%	12%	13%	12%	13%	14%
XX% $\lambda \uparrow < 5\%$ "acceptabel" XX% $\lambda \uparrow > 5\%$ "te grote stijging"												

Tot slot bekijken we in Tabel 42 de resultaten voor de toename van de warmtestroom tijdens het stookseizoen. Het vochtgehalte in de kalkhennep resulteert in een toename van de warmtestroom tot 36% in de ZW-oriëntatie. In de O-oriëntatie is dit effect opnieuw beperkter, maximaal tot 15% toename. Wel is het duidelijk dat het hygroscopisch gedrag van kalkhennep en de desbetreffende vochttopslag in het materiaal leidt tot niet-verwaarloosbare extra warmteverliezen.

Tabel 42: Overzicht van de toename van de warmtestroom tijdens het stookseizoen.

	ZW - min			ZW - max			O - min			O - max		
	REF	1%	10%	REF	1%	10%	REF	1%	10%	REF	1%	10%
toename warmtestroom	16%	18%	32%	22%	25%	36%	6%	7%	12%	8%	9%	15%
XX% $\text{HF} \uparrow < 5\%$ "acceptabel" XX% $\text{HF} \uparrow > 5\%$ "te grote stijging"												

5. Conclusie

In dit deel werd er gekeken naar de wandopbouw van een case study in Buggenhout. Ten eerste werden de **meetresultaten** van de meetcampagne besproken. Uit de temperatuurcurves kwam de thermische inertie van kalkhennep naar voren: in de laatste week van de meetcampagne werd een demping van 8-9°C met een faseverschuiving van 13-15u waargenomen over 26 cm kalkhennep. De curves met de relatieve vochtigheid bevestigen eerdere vaststellingen uit de simulaties dat er erg hoge relatieve vochtigheden optreden in kalkhennep.

Vervolgens werden een aantal 1D **simulaties** uitgevoerd waarin dezelfde tendensen terugkeerden. Een exacte overeenkomst kon niet kwantitatief vergeleken worden omdat er niet met hetzelfde klimaat, maar wel met het MRY werd gesimuleerd. Weliswaar werd de slagregenbelasting (RE), die een belangrijke parameter bleek uit de simulaties in DEEL IV, in Delphin gewijzigd op maat van de case study. Toch bleek dat er nood is aan een bronterm voor infiltratie in de simulaties om dezelfde grootteorde van relatieve vochtigheden in het isolatiemateriaal te bekomen zoals in de metingen. Dit betekent dus dat de 1D simulaties een onderschatting vormen van de realiteit, iets wat ook naar voor kwam in DEEL IV bij de vergelijking tussen simulaties en testopstellingen.

Voor de simulaties werden een aantal **degradatie**-indicatoren uitgerekend na 15 jaar. De simulaties gaven aan dat er binnen de gemaakte aannames geen risico op degradatie is in de zones waar een regenscherm zit (V8). Daarbij dienen echter twee kanttekeningen te worden gemaakt: in de simulaties is het regenscherm dan wel volledig waterdicht, maar in de realiteit is het regenscherm puntsgewijs geperforeerd door de spouwankers en zijn er tussen de ramen ook zones zonder regenscherm. Hoewel uit de *one-factor-at-a-time approach* bleek dat de baksteendikte niet meteen de meest invloedrijke parameter is, zou een breder buitenspouwblad hier wel de doorboringen van het regenscherm vermijden. Dat garandeert vervolgens een betere waterdichtheid van het regenscherm en dus een lager risico op houtdegradatie. Een simulatie zonder regenscherm (V9) wees er dan ook op dat er in combinatie met 10% infiltratie voor de kritische ZW-oriëntatie wel houtdegradatie kan optreden. Er dient benadrukt te worden dat het exacte infiltratiepercentage in de case study niet gekend is. Dit zal afhangen van lokale defecten en de uitvoeringskwaliteit. Daarom werden een aantal waardes aangenomen.

Daarnaast werd ook de **thermische performantie** op lange termijn bekeken. Analooq met bevindingen uit voorgaande delen daalt de isolerende werking van de isolatie omwille van een stijging in vochtgehalte te wijten aan het hygroscopisch gedrag van kalkhennep. Zonder infiltratie resulteert dit in 5 – 20 % toename van de warmtestroom gedurende het stookseizoen, met 10% infiltratie tot zelfs 10 – 35 %.

VI.

DEEL VI – Algemene conclusie en reflectie

Dit onderzoek naar het hygrothermisch gedrag van een innovatief gevelsysteem met metselwerk buitenschil en intern houtskelet met biobased isolatie werd uitgevoerd door middel van experimenten, simulaties en een meetcampagne.

Centraal stonden twee vragen door het verdwijnen van de luchtpouw uit de wandopbouw. Enerzijds werd onderzocht hoe regendicht het metselwerk was op basis van het principe van de vochtbuffering. Anderzijds werd gekeken naar de implicaties van vocht op de vochtgevoelige biobased isolatie, via de thermische prestaties en het degradatierisico van respectievelijk de isolatie en het houtskelet.

Het systeem toont potentieel vanwege zijn constructieve eenvoud en dampopen opbouw, maar een aantal aandachtspunten zijn van belang. Daarom worden de belangrijkste bevindingen hieronder gegroepeerd op basis van de centrale onderzoeksthema's.

- **Baksteen**

In deze studie werd de impact van bakstenen, zowel qua type als qua dikte, op de regendichtheid van het metselwerk geëvalueerd via berekeningstesten en simulaties. Hieruit werd duidelijk dat deze parameter in de simulaties minder belangrijk was dan in de experimenten. In de simulaties met kalkhennep bleek het baksteentype onbelangrijk, met uitzondering van de moderne baksteen ZI, die resulteerde in het minste degradatie en de beste thermische prestaties. Hoewel de baksteendikte in de simulaties een beperkte invloed had op de lange termijn resultaten, toonden de experimenten aan dat 14 cm metselwerk (type 2) aanzienlijk regendichter is dan 9 cm (type 1). De sprong naar 22 cm (type 3) leverde echter niet de verwachte regendichtheid, wat de ongeschiktheid van baksteendikte aan het contactoppervlak benadrukt. Een grotere baksteendikte biedt daarnaast het voordeel van een zelfdragende buitenschil, waardoor spouwankers overbodig worden. Dit verbetert de thermische prestaties door het elimineren van koudebruggen en in opbouwen waar toch nog een regenscherm wordt toegepast – zoals in de case study (V8) – vermijdt het perforaties van het regenscherm en vereenvoudigt het de werffase.

- **Voegwerk**

De voegen fungeerden als het voornaamste vochtpad in de experimenten, voornamelijk door de mindere verdichting van de stootvoegen. Uit de testresultaten bleek dat de opstellingen met kalkmortel de hoogste opname vertoonden, gevolgd door bastaardmortel en cementmortel. Deze bevinding werd gestaafd door de bepaling van hun A_w -waarde. Kalkmortel beschikt echter ook over de beste vochtbufferende eigenschappen: in geen enkele opstelling met kalkmortel werd diepe infiltratie in de kalkhennep-isolatie vastgesteld, ondanks de grootste gewichtstoename. Hieruit kan geconcludeerd worden dat kalkmortel een betere waterdichtheid vertoonde in de testen en op hygrothermisch vlak zeker perspectief biedt om opnieuw circulair metselwerk mogelijk te maken.

- **Infiltratie en waterdichtheid**

Door baksteen en voegwerk te combineren tot een geheel van metselwerk, werd de interactie tussen beide duidelijk. De kwaliteit van het contactoppervlak en de hechting tussen baksteen en mortel bleken cruciaal voor de regendoorslag in de experimenten, net als scheuren en de uitvoeringskwaliteit. Deze complexe aspecten ontbreken echter in de simulaties, hetgeen leidt tot een onderschatting van de realiteit. Hoewel in de 2D simulaties een grensweerstand werd aangebracht op het contactoppervlak, vertegenwoordigt deze alleen een extra weerstand loodrecht op het contactoppervlak, en niet het versterkte vochttransport parallel ermee. Een bronterm verkleint de kloof tussen realiteit en simulaties, maar de begroting ervan is door de genoemde fenomenen zeer complex, daarom wordt best een range check gehanteerd.

- **Van wandopbouwen met een capillaire onderbreking naar dampopen systemen op basis van vochtbuffering: impact op het houtskelet en de biobased isolatie**

In de simulaties met cellulose bleek het wegvallen van een capillaire barrière tegen vloeibaar vochttransport (luchtsponw of regenscherm) het verschil te maken tussen een acceptabele prognose en een verhoogd degradatierisico. Toepassing van cellulose is theoretisch mogelijk indien het metselwerk regendicht is, maar uit de testen bleek echter dat dit geen sinecure is. Het alternatief is dat het metselwerk via een hydrofobering of laag kalei impermeabel wordt gemaakt, maar uit de simulaties bleek dat deze ingreep voldoende performant moet zijn. Zodra er 10% van de originele regenbelasting kan infiltreren, zijn de degradatiefenomenen zelfs nefaster dan zonder deze beschermingslaag bij 100% regenbelasting.

In de simulaties met kalkhennep is het wegvallen van de luchtsponw in de opbouw de cruciale stap tussen een acceptabele prognose en een verhoogd degradatierisico. Het dampopen regenscherm is minder bepalend aangezien het minder effectief is als vochtwering door de hygroscopische aard van kalkhennep in de simulaties. Bovendien is de slagregenbelasting bepalend: de zuidwestelijke oriëntatie bleek veruit het meest kritisch, en de keuze voor de *Rain Exposure* bepaalde het verschil tussen wel of geen degradatie. Deze waarde werd conservatief ingeschat in de simulaties, zoals bleek uit de detailberekening voor de case study. De meetcampagne toonde duidelijk de thermische inertie van kalkhennep aan en bevestigde dat de hoge relatieve vochtigheden uit de simulaties in overeenstemming zijn met de realiteit, mits de regeninfiltratie in rekening wordt gebracht.

Beide isolatiematerialen zijn sterk hygroscopisch en capillair actief en daarom uiterst geschikt in een dampopen opbouw, maar het resulteert wel in een hoger vochtgehalte. Dit is het meest uitgesproken bij kalkhennep en zorgt voor een verminderde thermische prestatie van de isolatie.

Deze thesis onderzocht het hygrothermisch gedrag van innovatieve wandopbouwen via experimenten, simulaties en een meetcampagne. Er is echter altijd ruimte voor verder onderzoek, aangezien er keuzes en aannames gemaakt moesten worden. De testopstellingen werden zonder drukverschil en op kleine schaal getest om continue weging mogelijk te maken, wat resulteerde in verminderde hoogtewerking van de infiltratie in de isolatie en een aantal randeffecten. Testen op grotere opstellingen met een drukverschil kunnen hiervoor een oplossing bieden en nieuwe inzichten verschaffen.

Wat betreft de 1D simulaties is de betrouwbaarheid van materiaaleigenschappen voor biobased isolatiematerialen vaak nog een groot vraagteken. Er zijn weinig materialen gekarakteriseerd en beschikbaar in Delphin, waardoor er weinig keuze overblijft. Voorts is er behoefte aan de ontwikkeling van degradatiecriteria voor biobased materialen, waardoor in dit werk enkel ingegaan werd op houtrot en thermische performantie. Meer diepgaande 2D simulaties zijn nodig om enerzijds het effect van de aanwezigheid van de houten stijlen in het isolatiemateriaal te begroten, en anderzijds om de infiltratie doorheen het metselwerk meer in detail te simuleren in plaats van de huidige uniforme aanname.

Tot slot, het belang van het contactoppervlak tussen mortel en baksteen is cruciaal voor infiltraties doorheen metselwerk. Het modelleren van overgangszones in 2D simulaties met aangepaste materiaaleigenschappen als '*capillary highways*' zou hierin een meerwaarde kunnen bieden, maar het blijft een open vraag in hoeverre deze complexe fenomenen voorspelbaar of algemeen toepasbaar zijn.

VII.

Referenties

- ASHRAE. (2016). *ASHRAE 160 - Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings*.
- ASTM E514/E514M-20. (n.d.). *Standard Test Method for Water Penetration and Leakage Through Masonry*.
- Berge, B. (2009). *The ecology of building materials*. Routledge.
- Biobased Bouwen. (2024a). <https://www.biobasedbouwen.nl/definitie-biobased/>.
- Biobased Bouwen. (2024b). <https://www.biobasedbouwen.nl/producten/hennepvezel-isolatie-hempflax/>.
- BLAF. (2024). *Projectarchief*.
- Bottino-Leone, D., Larcher, M., Herrera-Avellanosa, D., Haas, F., & Troi, A. (2019). Evaluation of natural-based internal insulation systems in historic buildings through a holistic approach. *Energy*, 181, 521–531. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.139>
- Brepoels, D., & Kox, S. (2017). *Masterproef: karakterisatie van kalkhennep als binnenisolatiemateriaal voor verbouwingen*.
- Brischke, C., & Meyer-Veltrup, L. (2016). Modelling timber decay caused by brown rot fungi. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 49(8), 3281–3291. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0719-y>
- Brischke, C., & Rapp, A. O. (2008). Dose-response relationships between wood moisture content, wood temperature and fungal decay determined for 23 European field test sites. *Wood Science and Technology*, 42(6), 507–518. <https://doi.org/10.1007/s00226-008-0191-8>
- Brzyski, P., Gładcki, M., Rumińska, M., Pietrak, K., Kubiś, M., & Łapka, P. (2020). Influence of hemp shives size on hygro-thermal and mechanical properties of a hemp-lime composite. *Materials*, 13(23), 1–17. <https://doi.org/10.3390/ma13235383>
- Buildwise. (2014). *TV 252: vocht in gebouwen*.
- Buildwise. (2016). *TV 257 - Bepalingen op buitenisolatie (ETICS)*.
- Buildwise. (2020). *KALKHENNEP: Ontwerp- en uitvoeringsondersteuning, bijlage 1 - analyse en simulatie van de bouwtechnische prestaties van kalkhennepoepassingen*.
- Calle, K. (2020). *Renovatie van historische gevels: redding of doodsteek?* Universiteit Gent.
- Calle, K., Coupillie, C., Janssens, A., & Van Den Bossche, N. (2020). Implementation of rainwater infiltration measurements in hygrothermal modelling of non-insulated brick cavity walls. *Journal of Building Physics*, 43(6), 477–502. <https://doi.org/10.1177/1744259119883909>
- Calle, K., De Kock, T., Cnudde, V., & Van den Bossche, N. (2019). Liquid moisture transport in combined ceramic brick and natural hydraulic lime mortar samples: Does the hygric interface resistance dominate the moisture transport? *Journal of Building Physics*, 43(3), 208–228. <https://doi.org/10.1177/1744259119857762>
- Calle, K., & Van Den Bossche, N. (2021). Sensitivity analysis of the hygrothermal behaviour of homogeneous masonry constructions: Interior insulation, rainwater infiltration and hydrophobic treatment. *Journal of Building Physics*, 44(6), 510–538. <https://doi.org/10.1177/17442591211009937>
- Carbstone. (2024). *Infobrochure Carbstone*.
- Coupillie, C., Steeman, M., Van Den Bossche, N., & Maroy, K. (2017). *ScienceDirect Evaluating the hygrothermal performance of prefabricated timber frame façade elements used in building renovation*. www.sciencedirect.com/locate/procedia1876-6102
- Coupillie, C., & Van Den Bossche, N. (2017). *Na-isolatie spouwmuren (renofase)*. www.ugent.be

- De Mets, T., Prignon, M., & Knapen, E. (2023). *Lime-hemp as Wall Insulation-Hygrothermal Performance Analysis by Validated Simulations*.
- Derluyn, H., Dewanckele, J., Boone, M. N., Cnudde, V., Derome, D., & Carmeliet, J. (2014). Crystallization of hydrated and anhydrous salts in porous limestone resolved by synchrotron X-ray microtomography. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 324, 102–112. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2013.08.065>
- Derluyn, H., Janssen, H., & Carmeliet, J. (2011). Influence of the nature of interfaces on the capillary transport in layered materials. *Construction and Building Materials*, 25(9), 3685–3693. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.063>
- Devlieger, L. (2023). *Cursus Moderne Bouwecologieën*.
- Ekologio. (2016). *TF Houtwol / houtvezel*. <http://www.steico.com/nl/>
- EN 252:2014. (2014). *Field test method for determining the relative protective effectiveness of a wood preservative in ground contact*.
- EN ISO 15927-3:2009. (2009). *Hygrothermal performance of buildings - Calculation and presentation of climatic data. Part 3: Calculation of a driving rain index for vertical surfaces from hourly wind and rain data*.
- Evrard, A. (2008). *Transient hygrothermal behavior of Lime-Hemp Materials*. <https://www.researchgate.net/publication/283568943>
- Evrard, A., & De Herde, A. (2010). Hygrothermal performance of Lime-Hemp wall assemblies. *Journal of Building Physics*, 34(1), 5–25. <https://doi.org/10.1177/1744259109355730>
- Exie. (2024). *Technische fiche CaNaDry Wall Mix*.
- Fedorik, F., Zach, J., Lehto, M., Kymäläinen, H. R., Kuisma, R., Jallinoja, M., Illikainen, K., & Alitalo, S. (2021). Hygrothermal properties of advanced bio-based insulation materials. *Energy and Buildings*, 253. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111528>
- Frulleux, A., & Vandenbulcke, E. (2023). *Onderzoek naar de milieu-impact bij hergebruik van keramische gevelstenen*. Universiteit Gent.
- GANN. (2016). *Bedieningshandleiding Hydromette UNI 1*.
- Geldof, L. (2016). *Kwantificatie van waterinfiltratie bij raamaansluitingen*.
- Grint, N., Marincioni, V., & Elwell, C. A. (2020). *Sensitivity and Uncertainty analyses on a DELPHIN model: the impact of material properties on moisture in a solid brick wall*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20201720>
- Grudzińska, M., & Brzyski, P. (2019). The Occurrence of Thermal Bridges in Hemp-Lime Construction Junctions. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. <https://doi.org/10.3311/PPci.13377>
- Habtie, K., Van Den Bossche, N., & Van den Bulcke, J. (2022). *Hygrothermal behaviour of CLT: investigation of moisture tolerance through experiments and simulations*.
- Hall, C., & Hoff, W. D. (2021). *Water Transport in Brick, Stone and Concrete; Third Edition*. CRC Press.
- Hukka, A., & Viitanen, H. A. (1999). A mathematical model of mould growth on wooden material. In *Wood Science and Technology* (Vol. 33). Springer-Verlag.
- IEA. (1991). *IEA-Annex XIV. Condensation and energy*.
- Interreg FCRBE. (2021). *REUSE TOOLKIT - volle keramische baksteen*.

- Ip, K., & Miller, A. (2012). Life cycle greenhouse gas emissions of hemp–lime wall constructions in the UK. *Resources, Conservation and Recycling*, 69, 1–9.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.09.001>
- Janssens, A. (2021). *Syllabus Bouwfysische Aspecten van Gebouwen*. Universiteit Gent.
- Janssens, K., Feng, C., Marincioni, V., & Van Den Bossche, N. (2024). Comparison of different frost models with hygrothermal simulations to better understand frost damage in porous building materials. *Building and Environment*, 255, 111399.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111399>
- Kahangi Shahreza, S., Niklewski, J., & Molnár, M. (2021). Experimental investigation of water absorption and penetration in clay brick masonry under simulated uniform water spray exposure. *Journal of Building Engineering*, 43, 102583. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102583>
- Kehl, D. (2013). *Feuchtetechnische Bemessung von Holzkonstruktionen nach WTA*.
- Kymäläinen, H. R., & Sjöberg, A. M. (2008). Flax and hemp fibres as raw materials for thermal insulations. *Building and Environment*, 43(7), 1261–1269.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.03.006>
- Langmans, J. (2013). *FEASIBILITY OF EXTERIOR AIR BARRIERS IN TIMBER FRAME CONSTRUCTION*.
- Langmans, J., Desta, T. Z., Alderweireldt, L., & Roels, S. (2016). Field study on the air change rate behind residential rainscreen cladding systems: A parameter analysis. *Building and Environment*, 95, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.09.012>
- Latif, E., Lawrence, M., Shea, A., & Walker, P. (2015). Moisture buffer potential of experimental wall assemblies incorporating formulated hemp-lime. *Building and Environment*, 93(P2), 199–209.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.07.011>
- Lawrence, M., Shea, A., Walker, P., & de Wilde, P. (2013). Hygrothermal performance of bio-based insulation materials. *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials*, 166(4), 257–263. <https://doi.org/10.1680/coma.12.00031>
- Meeusen, J. (2006). *Na-isolatie van spouwmuren*. Universiteit Gent.
- Mensinga, P., Straube, J., & Schumacker, C. (2010). *Assessing the freeze-thaw resistance of clay brick for interior insulation retrofit projects*. <https://www.researchgate.net/publication/288364222>
- Møller, E. B. (2014). *Robust Internal Thermal Insulation of Historic Buildings*.
- NBN B 25-002-1. (2019). *Buitenschrijnwerk - Deel 1: Voorschrift van algemene prestaties - Vensters en vliesgevels*.
- NBN EN 1027:2016. (2016). *Ramen en deuren - Waterdichtheid - Beproevingsmethode*.
- NBN EN 12865:2001. (2001). *Hygrothermal performance of building components and building elements - Determination of the resistance of external wall systems to driving rain under pulsating air pressure*.
- NBN EN 15026:2023. (2023). *Hygrothermal performance of building components and building elements - Assessment of moisture transfer by numerical simulation*.
- NBN EN ISO 12571:2021. (2021). *Hygrothermische eigenschappen van bouwmaterialen en -producten - Bepaling van de hygroscopische sorptie-eigenschappen*.
- NBN EN ISO 15148:2003. (2003). *Hygrothermische prestatie van bouwmaterialen en -producten - Bepaling van de waterabsorptie door gedeeltelijke onderdompeling*.
- NEN 2778:1991. (1991). *Vochtwering in gebouwen - Bepalingsmethoden*.
- NEN-EN 16575:2014. (2014). *Biobased producten - Woordenlijst*.

- Nicolai, A., & Grunewald, J. (2005). *Delphin 5 User Manual and Program Reference*.
- Palumbo, M., Lacasta, A. M., Giraldo, M. P., Haurie, L., & Correal, E. (2018). Bio-based insulation materials and their hygrothermal performance in a building envelope system (ETICS). *Energy and Buildings*, 174, 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.042>
- Platt, S., Maskell, D., Shea, A., & Walker, P. (2022). Impact of fibre orientation on the hygrothermal properties of straw bale insulation. *Construction and Building Materials*, 349, 128752. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128752>
- Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. (2013). *Infoblad Trias Energetica en energieneutraal bouwen*.
- Rode, C., & Lund, M. (2016). *Moisture Physics: Combined Heat and Moisture Transfer in Building Constructions*. TU of Denmark.
- Rode, C., Peuhkuri, R., Time, B., Svennberg, K., Ojanen, T., Mukhopadhyaya, P., Kumaran, M., & Dean, S. W. (2007). Moisture Buffer Value of Building Materials. *Journal of ASTM International*, 4(5), 100369. <https://doi.org/10.1520/jai100369>
- Rode, C., Schou, M., & Lund, M. (2016). *Combined Heat and Moisture Transfer in Building Constructions*.
- Scheffler, G. A. (2008). *VALIDATION OF HYGROTHERMAL MATERIAL MODELLING UNDER CONSIDERATION OF THE HYSTERESIS OF MOISTURE STORAGE*. Dresden University of Technology.
- Seng, B., Magniont, C., & Lorente, S. (2019). Characterization of a precast hemp concrete. Part I: Physical and thermal properties. *Journal of Building Engineering*, 24. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.07.016>
- Steeman, M. (2010). *Hygrothermal modelling for building energy simulation applications*.
- Steeman, M. (2019). *Bouwfysica*.
- Steeman, M., Van, N., Bossche, D., & Calle, K. (2020). *Drying Potential of Wood Frame Walls Subjected to Accidental Water Infiltration*.
- Steskens, P., Loncour, X., Acke, A., Wijnants, J., Roels, S., & Vereecken, E. (2013). *Binnenisolatie van buitenmuren*. Vlaams Energie- en Klimaatagentschap . www.wtcb.be
- Technische Universität München. (2021). *Einfach bauen*. <https://www.einfach-bauen.net/>
- Temmerman, L. (2016). *Onderzoek naar de invloed van historische mortels op het hygrothermisch gedrag van metselwerk*.
- To Bio or not to Bio. (2024). <https://www.milieubewustisoleren.be/isolatiekenmerken/muurisolatie-spouw-massiefbouw>.
- United Nations Environment Programme. (2022). *2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*. <https://www.unep.org/resources/publication/2022-global-status-report-buildings-and-construction>
- van Balen, K., van Bommel, B., van Hees, R., van Hunen, M., van Rhijn, J., & van Rooden, M. (2003). *Kalkboek. Het gebruik van kalk als bindmiddel voor metsel- en voegmortels in verleden en heden*. Rijksdienst voor de Monumentenzorg.
- Van Belleghem, M., Steeman, M., Janssens, A., & De Paepe, M. (2015). Heat, air and moisture transport modelling in ventilated cavity walls. *Journal of Building Physics*, 38(4), 317–349. <https://doi.org/10.1177/1744259114543984>

- van Dam, J., & van den Oever, M. (2019). *Catalogus biobased bouwmaterialen 2019: het groene en circulaire bouwen*.
- Van Den Bossche, N., Janssens, A., Moore, T., & Lacasse, M. (2020). Development of numerical model for determination of pressure equalization in facades during wet conditions. *Building and Environment*, 178. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106919>
- Van Den Bossche, N., Lacasse, M. A., & Janssens, A. (2013a). A uniform methodology to establish test parameters for watertightness testing - Part I: A critical review. *Building and Environment*, 63, 145–156. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.12.003>
- Van Den Bossche, N., Lacasse, M. A., & Janssens, A. (2013b). A uniform methodology to establish test parameters for watertightness testing part II: Pareto front analysis on co-occurring rain and wind. *Building and Environment*, 63, 157–167. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.12.019>
- Van Goethem, S., Van Den Bossche, N., & Janssens, A. (2015). Watertightness assessment of blown-in retrofit cavity wall insulation. *Energy Procedia*, 78, 883–888. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.012>
- Van Linden, S. (2022). *Fourth Generation Watertightness: A Performance-Based Strategy to Control Rainwater Infiltration in Façade Systems* [Doctoral dissertation]. Faculty of Engineering and Architecture, Ghent University.
- Van Linden, S., & Van Den Bossche, N. (2022). Review of rainwater infiltration rates in wall assemblies. In *Building and Environment* (Vol. 219). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109213>
- Vandemeulebroucke, I., Caluwaerts, S., & Van Den Bossche, N. (2022). Decision framework to select moisture reference years for hygrothermal simulations. *Building and Environment*, 218, 109080. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109080>
- Vanderschelden, B., Calle, K., & Van Den Bossche, N. (2022). On the potential of clustering approaches for hygrothermal material properties based on three degradation risks in solid masonry constructions. *Journal of Building Physics*, 46(1), 36–76. <https://doi.org/10.1177/17442591221085734>
- Vanderschelden, B., & Van Den Bossche, N. (2020). *Analysis of clustering approaches to couple hygrothermal material properties with extended degradation risk assessment in masonry constructions*.
- Vanderschelden, B., Van Den Bossche, N., & Steeman, M. (2021, May 13). *Hygrothermal performance of bio-based insulation material in wood-frame walls exposed to unintended moisture sources*. <https://doi.org/10.14293/icmb210063>
- Vanderschelden, B., Van den Bossche, R., Van Den Bossche, N., Cnudde, V., & De Kock, T. (2024). The impact of lime as a replacement of cement-based mortar, on the water absorption and rain penetration of masonry. *SUBLime Conference*.
- Vereecken, E. (2013). *Hygrothermal analysis of interior insulation for renovation projects*.
- Vereecken, E., & Roels, S. (2012). Review of mould prediction models and their influence on mould risk evaluation. *Building and Environment*, 51, 296–310. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.11.003>
- Vereecken, E., & Roels, S. (2013). Hygric performance of a massive masonry wall: How do the mortar joints influence the moisture flux? *Construction and Building Materials*, 41, 697–707. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.024>
- Vereecken, E., & Roels, S. (2015). Capillary active interior insulation: do the advantages really offset potential disadvantages? *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 48(9), 3009–3021. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0373-9>

- Vereecken, E., Van Gelder, L., Janssen, H., & Roels, S. (2015). Interior insulation for wall retrofitting – A probabilistic analysis of energy savings and hygrothermal risks. *Energy and Buildings*, 89, 231–244. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.031>
- Vereecken, E., Vanoirbeek, K., & Roels, S. (2015). Towards a more thoughtful use of mould prediction models: A critical view on experimental mould growth research. *Journal of Building Physics*, 39(2), 102–123. <https://doi.org/10.1177/1744259115588718>
- Viitanen, H. (1996). *Factors affecting the development of mould and brown rot decay in wooden material and wooden structures: effect of humidity, temperature and exposure time*.
- Viitanen, H., & Ojanen, T. (2007). *Improved Model to Predict Mold Growth in Building Materials*.
- VLAIO. (2020). *KALKHENNEP: ontwerp- en uitvoeringsondersteuning*.
- Volf, M., Diviš, J., & Havlík, F. (2015). Thermal, moisture and biological behaviour of natural insulating materials. *Energy Procedia*, 78, 1599–1604. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.219>
- Willaert, E. (2019). De koevoet - isolatiematerialen. *De Koevoet*, 186(lente 2019).
- Woonder. (2024). <https://www.woonder.be/wat-is-natuurlijk-bouwen>.
- Zhao, J. (2012). *Development of a Novel Statistical Method and Procedure for Material Characterization and a Probabilistic Approach to Assessing the Hygrothermal Performance of Building Enclosure Assemblies*.

VIII.

Bijlagen

A. Technische fiches

A.1. Materialen

A.1.1. Exie - CaNaDry



Technische fiche CaNaDry | Korrelij

Afwerking

Elke stevige, damp-open plaat kan als afwerking worden gebruikt. Niet te gebruiken met (deels) afdichtingsmaterialen, zoals folies of pleisters op basis van siliconen of cement. Wij raden EXIE Boards aan, gegarandeerd damp-open, zeer sterk, ecologisch en brandwerend. Bovendien kan op deze beplating onmiddellijk de afwerking van uw keuze aangebracht worden. En dit de dag na de plaatsing, dus geen droogtijden!

Verwerking

Giet het product in een bekisting (tussen 2 dampopen platen of tussen muur en bekleding) en dam aan. Het product kan ook worden ingeblazen door middel van een EXIE-inblaasmachine. Het product kan verhard worden door het te bevochtigen en er een EXIE-bindmiddel aan toe te voegen.



1. Houten kader

Installeer de kader tegen de muur.

3. Plaatsing van de CaNaDry®

Manueel of ingeblazen met de EXIE-inblaasmachine

2. Plaatsing EXIE-Boards

4. Afwerking

Verf, pleister, kurk, behang...

Appliance



Dak

- Beplating
- 20 cm CaNaDry®
- Onderdak
- Dakbedekking



Muur

- Nieuwbouw 30 cm CaNaDry® in de houten kader of tegen de buitenmuur
- Bestaande muur 15-20 cm CaNaDry® tegen een bestaande muur



Vloer

- CaNaDry® floor mix kan geplaatst worden vanaf een dikte van 4 cm

Productprestaties

Soortelijk gewicht	175 kg/m ³ ± 2,5%
Thermische geleidbaarheid: λ_d	0,054 (W/mK)
Thermische geleidbaarheid: λ_{ui}	0,06 (W/mK)
Faseverschuiving	16 uur, met 24 cm
Droogtijd	1 uur
Schimmelwerend	

Ongedierte vrij

geluidsisolatie

CaNaDry® zorgt voor een zeer goede geluidsisolatie doordat de trillingen en geluidsgolven geabsorbeerd worden.

Vochtregulatie

CaNaDry® als vochtregulator. Bij een hoog vochtgehalte binnenshuis zal de kalkhennep het overtollige vocht opnemen en weer vrijgeven van zodra het vochtgehalte laag is. Geen condensatieproblemen mogelijk en er is gegarandeerd een comfortabel binnenklimaat.

CO₂ negatief

Hennep blinkt uit in de opname van CO₂. De planten nemen meer CO₂ op dan de uitstoot die geproduceerd wordt tijdens de teelt en het productieproces. Bovendien blijft de kalkhennep dankzij het voortdurende carbonatatieproces CO₂ opnemen na zijn verwerking en de plaatsing.

Opslag

CaNaDry® moet droog bewaard blijven en kan tot 12 maand na de productie geplaatst worden.

Beschikbaarheid

Big Bags 1m³
Zakken 120 l

Veiligheid

Door de aanwezigheid van gehydrateerde kalk:

- Irritatie op de luchtwegen
- Irritatie van de huid
- Gevaar voor oogschade

Voorzorgsmaatregelen

- Vermijd contact met de ogen
- Buiten het bereik van kinderen bewaren en gebruiken
- In geval van contact met de ogen, spoel de ogen overvloedig met water en neem contact op met een arts.
- Draag geschikte handschoenen.
- Draag tijdens de verwerking altijd de nodige oog-en gezichtsbescherming.

A.1.2. Ploegsteert – Decobloc



Déclaration des Performances / Prestatieverklaring / Declaration of Performance

DoP_DB780.0000_20210101

- Identification unique du type de produit / Unieke identificatiecode van het producttype / Unique identification of the product type: DB ALOË 288 x 138 x 138
- Usage prévu / Beoogd gebruik / Intended use: U-Briques pour maçonnerie non-protégée dans murs, poteaux et cloisons en maçonnerie. / U-Stenen voor onbeschermde metselwerk in metselwerkmuren, kolommen en scheidingswanden. / U-Products for use in unprotected masonry walls, columns or partitions.
- Nom et adresse fabricant / Naam en adres fabrikant / Name and address of the manufacturer: SA Briqueteries de / Steenbakkerijen van Ploegsteert nv
Touquetstraat 228, B-7783 Ploegsteert
- Système d'évaluation et de vérification de la constance des performances / Systeem voor de beoordeling en verificatie van de prestatiebestendigheid / System of assessment and verification of constancy of performance: 2+
- Organisme notifié / Certificerende instantie / Notified body: BCCA - NB 0749
- Performances déclarées / Verklaarde prestatie / Declared performances

Longueur / Lengte / Length	288	mm
Largeur / Breedte / Width	138	mm
Hauteur / Hoogte / Height	138	mm
Tolérances dimensionnelles / Maattolerantie / Dimensional tolerances	T2	
Plage / Maatspreiding / Range	R2	
Planéité des faces de pose / Vlakheid legvlakken / Flatness of bed faces	1	%
Parallélisme des faces de pose / Parallelisme van legvlakken / Parallelism of bed faces	NPD	
Configuration / Verschijningsvorm / Appearance	Groupe 2	
Pourcentage des vides / Percentage holle ruimtes / Percentage of perforation	<50	
Masse volumique apparente sèche / Bruto volumieke massa / Gross dry density	1050-D2	kg/m³
Masse volumique absolue sèche / Netto droge volumemassa / Net dry density	2000-D1	kg/m³
Résistance à la compression moy. $\perp$ à la face de pose / Gem. druksterkte $\perp$ op mortelbedvlak / Mean Compression strength $\perp$ perpendicular bed faces	≥ 25	N/mm²
Facteur de forme / Vormfactor / Shape factor	1.1	
Résistance à la compression normalisée / Genormaliseerde druksterkte / Normalized Compressive strength	27	N/mm²
Catégorie / Categorie / Category	I	
Dilatation due à l'humidité / Vochtexpansie / Moisture movement	NPD	
Adhérence mortier / Hechtsterkte mortel / Bond strength mortar	NPD	
Teneur en sels solubles actifs / Gehalte actieve oplosbare zouten / Active soluble salts content	S2	class
Réaction au feu / Brandreactie / Reaction to fire	A1	class
Absorption d'eau / Wateropneming / Water absorption	≤ 12	%
Taux initial d'absorption d'eau / Initiale wateropzuiging / Initial rate of water absorption	$1.5 < IW \leq 4.0$	kg/m².min
Propriétés thermiques - $\lambda_{10, 100, 200}$ (EN 1745 - 50/50 - F2) / Thermische eigenschappen - $\lambda_{10, 100, 200}$ (EN 1745 - 50/50 - F2) / Thermal properties - $\lambda_{10, 100, 200}$ (EN 1745 - 50/50 - F2)	0.28	
Durabilité contre gel/dégel : résistance au (dégel) / Duurzaamheid inzake vriezen en dooien / Durability against freeze/thaw: freeze/thaw resistance	F2	
Substances dangereuses / Gevaarlijke stoffen / Dangerous Substances	NPD	
Perméabilité à la vapeur d'eau - Valeur min. et max. / Dampdoorlatendheid - Min. en max. waarde / Water vapour permeability - Min and max value	05/10	

NEN EN 771-1 + A1:2015

- Les performances du produit identifié au point 1 sont conformes aux performances déclarées dans point 6. Cette déclaration de performances est établie sous la seule responsabilité du fabricant identifié sous point 3. / De prestatie van in punt 1 omschreven product zijn conform de in punt 6 aangegeven prestaties. Deze prestatieverklaring wordt verstrekt onder de exclusieve verantwoordelijkheid van de in punt 3 geïdentificeerde fabrikant. / Performances of the product identified by point 1 are in accordance with the declared performances in point 3. This DoP is issued under the sole responsibility of the manufacturer referred to in point 3.

Ploegsteert, 20210101

Maxime Busschaert, Directeur commercial / commercieel directeur / Commercial director

- 1 Identification unique du type de produit / Unieke identificatiecode van het producttype / DB ALOË 288 x 138 x 138
Unique identification of the product type
- 2 Usage prévu / Beoogd gebruik / Intended use U-Briques pour maçonnerie non-protégée dans murs, poteaux et cloisons en maçonnerie. / U-Stenen voor onbeschermde metselwerk in metselwerkmuren, kolommen en scheidingswanden. / U-Products for use in unprotected masonry walls, columns or partitions.
- 3 Nom et adresse fabricant / Naam en adres fabrikant / Name and address of the manufacturer SA Briqueteries de / Steenbakkerijen van Ploegsteert nv
Touquetstraat 228, B-7783 Ploegsteert
- 4 Système d'évaluation et de vérification de la constance des performances / Systeem voor de beoordeling en verificatie van de prestatiebestendigheid / System of assessment and verification of constancy of performance 2+
- 5 Organisme notifié / Certificerende instantie / Notified body BCCA - NB 0749
- 6 Performances déclarées / Verklaarde prestatie / Declared performances

Longueur / Lengte / Length	288	mm	NEN EN 771-1 + A1:2015
Largeur / Breedte / Width	138	mm	
Hauteur / Hoogte / Height	138	mm	
Tolérances dimensionnelles / Maattolerantie / Dimensional tolerances	T2		
Plage / Maatspreiding / Range	R2		
Planéité des faces de pose / Vlakheid legvlakken / Flatness of bed faces	1	%	
Parallélisme des faces de pose / Parallelisme van legvlakken / Parallelism of bed faces	NPD		
Configuration / Verschijningsvorm / Appearance	Groupe 2		
Pourcentage des vides / Percentage holle ruimtes / Percentage of perforation	<50		
Masse volumique apparente sèche / Bruto volumieke massa / Gross dry density	1050-D2	kg/m³	
Masse volumique absolue sèche / Netto droge volumemassa / Net dry density	2000-D1	kg/m³	
Résistance à la compression moy. $\perp$ à la face de pose / Gem. druksterkte $\perp$ op mortelbedvlak / Mean Compression strength $\perp$ perpendicular bed faces	≥ 25	N/mm²	
Facteur de forme / Vormfactor / Shape factor	1.1		
Résistance à la compression normalisée / Genormaliseerde druksterkte / Normalized compressive strength	27	N/mm²	
Catégorie / Categorie / Category	I		
Dilatation due à l'humidité / Vochtexpansie / Moisture movement	NPD		
Adhérence mortier / Hechtsterkte mortel / Bond strength mortar	NPD		
Teneur en sels solubles actifs / Gehalte actieve oplosbare zouten / Active soluble salts content	S2	class	
Réaction au feu / Brandreactie / Reaction to fire	A1	class	
Absorption d'eau / Wateropneming / Water absorption	≤ 12	%	
Taux initial d'absorption d'eau / Initiale wateropzuiging / Initial rate of water absorption	$1.5 < IW \leq 4.0$	kg/m².min	
Propriétés thermiques - λ_{10} , ISO, UNI (EN 1745 - 50:50 - F2) / Thermische eigenschappen - λ_{10} , ISO, UNI (EN 1745 - 50:50 - F2) / Thermal properties - λ_{10} , ISO, UNI (EN 1745 - 50:50 - F2)	0.28		
Durabilité contre gel/dégel : résistance au (dégel) / Duurzaamheid inzake vriezen en dooien / Durability against freeze/thaw: freeze/thaw resistance	F2		
Substances dangereuses / Gevaarlijke stoffen / Dangerous Substances	NPD		
Perméabilité à la vapeur d'eau - Valeur min. et max. / Dampdoorlatendheid - Min. en max. waarde / Water vapour permeability - Min and max value	05/10		

- 7 Les performances du produit identifié au point 1 sont conformes aux performances déclarées dans point 6. Cette déclaration de performances est établie sous la seule responsabilité du fabricant identifié sous point 3. / De prestatie van in punt 1 omschreven product zijn conform de in punt 6 aangegeven prestaties. Deze prestatieverklaring wordt verstrekt onder de exclusieve verantwoordelijkheid van de in punt 3 geïdentificeerde fabrikant. / Performances of the product identified by point 1 are in accordance with the declared performances in point 3. This DoP is issued under the sole responsibility of the manufacturer referred to in point 3.

Ploegsteert, 20210101



Maxime Busschaert, Directeur commercial / commercieel directeur / Commercial director

A.1.3. Ploegsteert – MX



Déclaration des Performances / Prestatieverklaring / Declaration of Performance

DoP_MX600.0708_20160101

- 1 Identification unique du type de produit / Unieke identificatiecode van het producttype / AMARANTICA 220 x 217 x 65
Unique identification of the product type
- 2 Usage prévu / Beoogd gebruik / Intended use
U-Briques pour maçonnerie non-protégée dans murs, poteaux et cloisons en maçonnerie. / U-Stenen voor onbeschermde metselwerk in metselwerkmuren, kolommen en scheidingswanden. / U-Products for use in unprotected masonry walls, columns or partitions.
- 3 Nom et adresse fabricant / Naam en adres fabrikant / Name and address of the manufacturer
SA Briqueteries de / Steenbakkerijen van Ploegsteert nv
Touquetstraat 228, B-7783 Ploegsteert
- 4 Système d'évaluation et de vérification de la constance des performances / Systeem voor de beoordeling en verificatie van de prestatiebestendigheid / System of assessment and verification of constancy of performance 2+
- 5 Organisme notifié / Certificerende instantie / Notified body
BCCA - NB 0749
- 6 Performances déclarées / Verklaarde prestaties / Declared performances

Longueur / Lengte / Length	220	mm	NEN EN 771-1 + A1:2015
Largeur / Breedte / Width	217	mm	
Hauteur / Hoogte / Height	65	mm	
Tolérances dimensionnelles / Maattolerantie / Dimensional tolerances	T1		
Plage / Maatspreiding / Range	R2		
Planéité des faces de pose / Vlakheid legvlakken / Flatness of bed faces	1	%	
Parallélisme des faces de pose / Parallelisme van legvlakken / Parallelism of bed faces	2		
Configuration / Verschijningsvorm / Appearance	Groupe 2		
Pourcentage des vides / Percentage holle ruimtes / Percentage of perforation	< 50		
Masse volumique apparente sèche / Bruto volumieke massa / Gross dry density	1150-D2	kg/m³	
Masse volumique absolue sèche / Netto droge volumemassa / Net dry density	2000-D1	kg/m³	
Résistance à la compression moy. $\perp$ à la face de pose / Gem. druksterkte $\perp$ op mortelbedvlak / Mean Compression strength $\perp$ perpendicular bed faces	≥ 30	N/mm²	
Facteur de forme / Vormfactor / Shape factor	0.7		
Résistance à la compression normalisée / Genormaliseerde druksterkte / Normalized Compressive strength	20	N/mm²	
Catégorie / Categorie / Category	I		
Dilatation due à l'humidité / Vochtexpansie / Moisture movement	NPD		
Adhérence mortier / Hechtsterkte mortel / Bond strength mortar	NPD		
Teneur en sels solubles actifs / Gehalte actieve oplosbare zouten / Active soluble salts content	52	class	
Réaction au feu / Brandreactie / Reaction to fire	A1	class	
Absorption d'eau / Wateropneming / Water absorption	≤ 12	%	
Taux initial d'absorption d'eau / Initiale wateropzuiging / Initial rate of water absorption	$1.5 < IW \leq 4.0$	kg/m².min	
Propriétés thermiques - $\lambda_{10, 300, \text{air}}$ (EN 1745 - 50:50 - F2) / Thermische eigenschappen - $\lambda_{10, 300, \text{air}}$ (EN 1745 - 50:50 - F2) / Thermal properties - $\lambda_{10, 300, \text{air}}$ (EN 1745 - 50:50 - F2)	0.44		
Durabilité contre gel/dégel : résistance au (dégel) / Duurzaamheid inzake vriezen en dooien / Durability against freeze/thaw: freeze/thaw resistance	F2		
Substances dangereuses / Gevaarlijke stoffen / Dangerous Substances	NPD		
Perméabilité à la vapeur d'eau - Valeur min. et max. / Dampdoorlatendheid - Min. en max. waarde / Water vapour permeability - Min and max value	05/10		

- 7 Les performances du produit identifié au point 1 sont conformes aux performances déclarées dans point 6. Cette déclaration de performances est établie sous la seule responsabilité du fabricant identifié sous point 3. / De prestatie van in punt 1 omschreven product zijn conform de in punt 6 aangegeven prestaties. Deze prestatieverklaring wordt verstrekt onder de exclusieve verantwoordelijkheid van de in punt 3 geïdentificeerde fabrikant. / Performances of the product identified by point 1 are in accordance with the declared performances in point 3. This DoP is issued under the sole responsibility of the manufacturer referred to in point 3.

Ploegsteert, 20160101

Maxime Busschaert, Directeur commercial / commercieel directeur / Commercial director

A.1.4. Carbstone – Carbonsteen

TECHNISCHE FICHE / FICHE TECHNIQUE

CARBSTONE - 290x140x190 - VOL

36

De CARBSTONE is een metselsteen bestemd voor gewoon, al dan niet dragend zicht-, binnen- en buitenmetselwerk van gebouwen en kunstwerken.	
CARBSTONE est une brique de maçonnerie destinée à la maçonnerie ordinaire, porteuse ou non porteuse, intérieure et extérieure de bâtiments et d'œuvres d'art.	
De CARBSTONE is geproduceerd met bijproducten van de roestvaststaalindustrie zonder cement. Naast het Stinox zand en granulaten vervult Carbinox de rol van binder samen met CO ₂ . Productie is uitgevoerd op een hydraulische pers met uitharding in een CO ₂ droogkamer. De inzet van bovengenoemde secundaire materialen en de opname van CO ₂ geven deze metselsteen een unieke negatieve CO ₂ footprint!! Hij neemt dus meer CO ₂ op dan hij verbruikt tijdens productie.	
CARBSTONE est produit avec des sous-produits de l'industrie de l'acier inoxydable sans ciment. Outre le sable et les agrégats Stinox, Carbinox joue le rôle de liant avec le CO ₂ . La production a été réalisée sur une presse hydraulique avec un durcissement dans une chambre de séchage au CO ₂ . L'utilisation des matériaux secondaires susmentionnés et l'absorption de CO ₂ confèrent à cette brique de maçonnerie une empreinte CO ₂ négative unique ! Elle absorbe donc plus de CO ₂ qu'elle n'en consomme lors de sa production.	
Identificatie/identification:	CARB - VB2 - 290x140x190 - VOL
categorie/catégorie:	I
maatafwijkingsklasse/classe de tolérance dimensionnelle:	D2
vlakheid van de zichtvlakken/planéité des surfaces visuelles (mm):	NPD
gemiddelde bruto droge volumemassa/la masse volumique sèche brute moyenne (kg/m³):	2200
minimale- en maximale gemiddelde bruto droge volumemassa la masse volumique sèche brute minimale et maximale (kg/m³):	2100 - 2300
minimale individuele bruto droge volumemassa	2100
la masse volumique sèche brute individuelle minimale (kg/m³):	
gemiddelde druksterkte (N/mm²)/la résistance à la compression moyenne (N/mm²):	12,0
genormaliseerde gemiddelde druksterkte	15
résistance moyenne normalisée à la compression (N/mm²):	
vorst/doorbestedheid volgens NBN B15-231/la résistance au gel/dégel selon NBN B15-231:	voldoet
vochtgedrag/variations dimensionnelles (mm/m):	≤ 0,45
wateropsorping door capillariteit/absorption d'eau par capillarité (g/m²/s):	≤ 8
brandreactieklasse/la réaction au feu - classe:	A1
afschuifhechtsterkte (N/mm²) via tabelwaarde (NBN EN 998-2)	0,15
adhérence valeurs fixes tableau EN 998-2 ann C (N/mm²):	
gevaarlijke bestanddelen/constituants dangereux:	conform Vlarema
waterdampdoorlatendheid (μ) via tabelwaarde (NBN EN 1745)	50/150
perméabilité à la vapeur d'eau (μ) d'une valeur tabulée dans la (NBN EN 1745):	
luchtgeluidsisolatie/isolation bruits aériens:	NPD
vormkenmerken/caractéristiques de forme:	groep 1
kwaliteitsklasse/classe de qualité:	15/2,2+
code van de soort metselsteen/le code du type d'élément de maçonnerie:	A2 - B2 - C - D
bruto droge volumemassa 90/90 (kg/m³)	2300
la masse volumique sèche brute 90/90 (kg/m³):	
rekenwaarde van de warmtegeleidingscoëfficiënt λ _{10,i}	-
valeur de calcul du coefficient de conductivité thermique λ _{10,i} (W/m.k):	
gemiddelde warmtegeleidingscoëfficiënt λ _{10,droog,metselsteen}	1,37
le coefficient de conductivité thermique moyen λ _{10,sec,unité} (W/m.k):	
warmtegeleidingscoëfficiënt λ _{10,droog,metselsteen, 90/90}	1,56
coefficient de conductivité thermique λ _{10,sec,unité, 90/90} (W/m.k):	
brandwerendheid volgens NBN EN 1996-1-2 ANB (2012) tabel N.B. 3.1 en 3.2:	
zonder gipsbepleistering:	niet dragend EI (minuten) 60
2-zijdige gipsbepleistering:	dragend REI (minuten) 120
kleur/couleur:	grijs
gewicht per metselsteen/poids par maçonnerie (kg):	-
aantal stuks per laag/nombre/unités/couche:	-
aantal stuks per pak/nombre/unités/paquet:	-
gewicht per pak/poids par paquet (kg):	-
afmetingen per pak/mention des dimensions par paquet (l x b) (mm):	-
- Alvorens de geleverde producten te openen, steeds controleren op beschadiging en breuk. In geval van beschadiging of breuk onmiddellijk Betonagglomeraten Gubbels nv op de hoogte brengen. Controleer eveneens de afmetingen en kleur zoals vermeld op het etiket of deze overeenkomen met de bestelling. Bij afwijkingen contact opnemen met Betonagglomeraten Gubbels nv. Er worden geen klachten aanvaard wanneer producten met zichtbare gebreken toch worden geplaatst. - avant d'ouvrir les produits en béton livrés, vérifiez toujours qu'ils ne sont pas endommagés ou cassés. En cas de dommage ou de casse, veuillez en informer immédiatement Betonagglomeraten Gubbels nv. Vérifiez également les dimensions et la couleur indiquées sur l'étiquette pour vous assurer qu'elles correspondent à la commande. En cas de divergences, veuillez contacter Betonagglomeraten Gubbels nv. Aucune réclamation ne sera acceptée si des produits en béton présentant des défauts visibles sont tout de même installés. - Klachten steeds binnen 7 dagen na levering melden. Er worden geen klachten aanvaard wanneer producten met zichtbare gebreken toch geplaatst worden. Bewaar steeds de etiketten die op de verpakking zijn aangebracht. De informatie op de label is belangrijk bij nalevering en bij het controleren van onze productiegegevens in geval van een klacht. - les plaintes doivent toujours être déposées dans les 7 jours suivant la livraison. Aucune réclamation ne sera acceptée si des produits en béton présentant des défauts visible sont tout de même placés. Conservez toujours les étiquettes attachées à l'emballage. Les informations figurant sur l'étiquette sont importantes pour les livraisons ultérieures et pour vérifier nos données de production en cas de plainte. - Het gebruik van natuurlijke en kunstmatige grondstoffen zorgen voor een unieke kleumancering. Voor een optimaal kleurbeeld dienen de producten uit de verschillende pakken goed te worden gemengd tijdens het plaatsen. Kleurverschillen eigen aan het product worden niet aanvaard als klacht. - l'utilisation de matières premières naturelles permet d'obtenir une nuance de couleur unique. Pour une image couleur optimale, les produits en béton des différents emballages doivent être bien mélangés lors de la mise en place. Les différences de couleur inhérentes au produit ne seront pas acceptées comme une plainte.	

datum: 1-5-2023
versie: 1,0

A.1.5. Arte Constructo – UNILIT 1320

UNILIT FORTE CALCE metselmortel voor structurele versteviging



OMSCHRIJVING

UNILIT FORTE CALCE is een traditionele, droog voormengde minerale metsel- en voegmortel op basis van natuurlijk hydraulische kalk als bindmiddel en passende toeslagstoffen met een aangepaste doorlopende korrelverdeling van 0 tot 2mm.

UNILIT FORTE CALCE kenmerkt zich door een trage maar sterke hechting, een hoge plasticiteit, een laag gehalte aan oplosbare zouten en een uitstekende waterdampdoorlaatbaarheid. Deze natuurlijk hydraulische kalkmortel is zeer stabiel en zorgvuldig bereid om problemen van microscheurtjes en een te snelle uitdroging te vermijden.

De natuurlijk hydraulische kalk, aangewend als bindmiddel, is in overeenstemming met de Europese norm EN 459-1. De UNILIT FORTE CALCE mortel is conform aan de Europese norm UNI EN 998-2

TOEPASSINGSGEBEID

UNILIT FORTE CALCE is een traditionele natuurlijke hydraulische kalkmortel zoals deze reeds vele eeuwen wordt gebruikt in ons cultureel erfgoed. Deze mortel is derhalve dan ook bijzonder geschikt voor allerlei toepassingen op traditionele ondergronden en dit zowel in de restauratie, renovatie als nieuwbouw.

Het product is beschikbaar in drie varianten met een drukweerstandsklass M5 - M10 - M15, conforma aan de norm EN 998-2

UNILIT FORTE CALCE kan onder andere gebruikt worden als verstevigingsmortel, drukverdelingslof, voor heropbouw van metselwerk, als verstevigingspleister, opvulmortel en versteviging van voegwerk, eventueel voorzien van inox of glasvezel wapeningsstaven. Dankzij de natuurlijke poriënstructuur en het lage gehalte aan oplosbare zouten is UNILIT FORTE CALCE uitermate geschikt om de vochtthuishouding in het metselwerk te onderhouden. Hierdoor kunnen praktisch alle problemen met betrekking tot vochtvlekken, vorstschade en zoutuitbloeiingen uitgesloten worden, dit voor zover de vocht- en zoutbelasting van de ondergrond niet te hoog is en de onderlaag in goede staat verkeert.

BESTEKKEN
structuur
Versteviging
Binnenpleister
Buitenpleister
Dak
Metsel- en voegwerk



UNILIT FORTE CALCE

TECHNISCHE GEGEVENS

Korrelgrootte (EN 1015-1)	
UNILIT FORTE CALCE	max. 2.0 mm
Soortelijke massa (EN 1015-10)	1800 - 1900 kg/m³
Druksterkte (EN 1015-11)	
	M5 : 10N/mm²
	M10 : 12N/mm²
	M15 : 17N/mm²
Hechtsterkte (EN 1015-12)	> 0.2 N/mm²
Elasticiteitsmodulus (EN 13412)	M5 : 10274N/mm²
	M10 : 10571N/mm²
	M15 : 14935N/mm²
Dampdiffusieweerstand (μ) (EN 1015-19)	15/35
Porositeit	8/10%
pH waarde	
verse mortel	> 10.5
uitgeharde mortel	~ 7
Capillariteit (EN 1015-18)	W< 0.5 kg/(m² x min ^{0.5})
Thermische geleiding (EN 1745)	1.11 W/(m²K)
Brandweerstandsklasse (EN 13501-1)	A1
Chloorgehalte (EN 1015-17)	< 0.05 %
Verhouding water / mortel	0.15 l/kg
Mengtijd	3 à 4 minuten
Verbruik	18 kg/m²/cm
Dikte	tussen 4 en 20mm
Maximale laagdikte	40mm
Kleur	beige
Verpakking (pallet 48 zakken)	papieren zak 25 kg

Deze fiche annuleert alle voorgaande.

Onze aanbevelingen en specificaties werden te goeder trouw verstrekt, op basis van courant onderzoek. Wij garanderen een stabiele kwaliteit betreffende de levering van onze producten, doch kunnen niet verantwoordelijk gesteld worden voor eventuele schade als gevolg van incorrect gebruik ervan. In ieder geval bevelen wij een grondig onderzoek van de ondergrond en de weersomstandigheden aan alvorens te beginnen met het aanbrengen van onze producten.

Het uittesten van de gekozen producten op een kleine testoppervlakte zal u in staat stellen de doeltreffendheid ervan te bepalen

VERWERKINGSVOORSCHRIFTEN

Voorafgaand dient de ondergrond te worden gereinigd van alle losse deeltjes, stof en vetten. Het reinigen gebeurt bij voorkeur met stoom onder lage druk teneinde zouten, organische afzettingen, zoals mossen en stof diep in de poriën te kunnen verwijderen.

Reiniging met stoom dient ruim van tevoren te worden uitgevoerd (minstens 2 dagen), daar achterblijvend vocht de hechting en de kwaliteit van de aangebrachte mortel sterk vermindert.

De mortel wordt gemengd met zuiver water in een verhouding van 3,75 tot 4,25 liter per zak van 25 kg kant en klare natuurlijk hydraulische kalkmortel. De menging dient te gebeuren met een traag draaiende elektrische menger gedurende 3 tot 4 minuten tot er een homogene en smeulige massa bekomen wordt. De mortel blijft gedurende 2 uur verwerkbaar.

De mortel wordt aangebracht tot de gewenste dikte.

Indien het project, waarvoor de verstevigingsmortel wordt gebruikt, wapeningen voorziet, wordt volgende werkwijze aanbevolen:

aanbrengen van een eerste laag FORTE CALCE, waarna de wapening onder lichte druk in de verse mortel wordt geplaatst. Daarna afwerken met een tweede laag.

Een droogtijd van 1 tot 2 dagen dient in acht genomen te worden.

De mortel mag niet aangebracht worden bij temperaturen lager dan +5°C. Nooit op een bevroren ondergrond aanbrengen, evenmin bij dichte mist. Tijdens droge en zonnige periodes dienen de nodige maatregelen getroffen te worden om een te snelle uitdroging van de vers aangebrachte mortelpasta te vermijden. De mortel dient tegen vorst en sterke bezonning beschermd te worden gedurende 48 tot 72 uren na het aanbrengen.

Het gebruik van ontvochtigingstoestellen en heteluchtkanonnen tijdens het drogen van de mortel is verboden.

OPMERKINGEN

In het geval de ondergrond waterafstotend behandeld is (siliconen, siloxanen of soortgelijke) of bij twijfel, raden we aan om contact op te nemen met onze technische dienst.

De stabiliteit van het product bedraagt minstens 6 maanden indien bewaard in de originele, hermetisch afgesloten verpakking in een gepaste omgeving, koel, droog en buiten bereik van vorst. Steeds afschermen van warmtebronnen.

A.1.6. Coeck – wit cement



VOORGEMENGDE MORTELS CEMENT WIT 42.5 N CEM II/B-LL



OPSLAG

Indien droog en in de originele verpakking ongeopend bewaard, blijft de kwaliteit van het materiaal behouden gedurende max. 12 maanden, vanaf de productiedatum.

INFO

Wit cement is een snel uithardende Portlandcement met hoge vroeg- en standaardsterktes, vervaardigd uit extreem zuiver kalksteen en fijngemalen zand. Wat dit cement zo uniek maakt, is de witte kleur, de hoge consistentie, het buitengewoon lage gehalte aan alkali en de hoge sulfaatbestendigheid. Het wit cement is drager van het CE label en conform de norm EN 197-1:2011.

KARAKTERISTIEKEN

- Beoogd gebruik : *Bereiding van beton, mortel, grout en andere mengsels voor de bouw en de vervaardiging van bouwproducten.*
- Reactie bij brand : *A1*
- Druksterkte : *Na 2 dagen ≥ 10 MPa
Na 28 dagen $\geq 42,5$ MPa*
- Chloridegehalte : *$\leq 0,1\%$ m*
- Droge volumemassa : *± 1450 kg/m*
- Waterbehoefte : *31 %*
- Begin binding : *2h40*

SAMENSTELLING

Belangrijkste bestanddelen en samenstelling:

- Portlandcementklinker : *65-79 %*
- Kalksteen : *21-35 %*
- Aanvullende bestanddelen : *0-5 %*

TOEPASSING

Wit cement is universeel bruikbaar voor de bereiding van beton, mortel en waar de kleur een belangrijke rol speelt. Voor een optimaal resultaat, moeten in elk geval de gangbare regels bij het aanmaken, het verwerken en de nazorg in acht genomen worden.

VERWERKING

- Vermijd onderdosering van cement, dit resulteert in een lagere duurzaamheid van het beton;
- Beperk de water/cementfactor. Een hoge W/C factor geeft lagere druksterktes en een poreuzer beton;
- Pas de verdichting aan, aan de vloeibaarheid van het beton om zo een optimale dichtheid te verkrijgen zonder dat er segregatie optreedt;
- Neem alle voorzorgsmaatregelen om een vroegtijdige uitdroging bij warm weer of wind te vermijden door een aangepaste curing te gebruiken (jute, vernevelen van water, curing-compound,...);
- Werk bij voorkeur tussen 5°C en 30°C. Bij te warm weer, zal de hitte de binding van beton of mortel versnellen. In geval van koud weer verloopt de binding van beton of mortel trager.

VOOR DE VEILIGHEIDSVOORSCHRIFTEN VERWIJZEN WIJ U NAAR HET VEILIGHEIDSGEINFORMATIEBLAD, VERKRIJGBAAR OP AANVRAAG OF VIA ONZE WEBSITE : WWW.COECK.BE

Onze informatie wordt steeds met de meeste zorg samengesteld. De technische gegevens, aanbevelingen, tekeningen en voorschriften worden alleen ten titel van inlichting gegeven. Coeck NV behoudt het recht hun kenmerken ten alle tijde te veranderen zonder voorafgaande vermelding. Deze productfiche vervangt alle voorgaande versies.

+32(0)3 880 75 00

info@coeck.be

www.coeck.be

20220405

A.1.7. Saint-Astier – witte pure kalk NHL 3.5

REYNCHÉMIE NV/SA
Industrieweg 25
Tel. +32-51-24.25.27
B-8800 ROESELARE (Belgium)
reynchemie@reynchemie.com

Uw partner in restauratie
en renovatie
Votre partenaire en
restauration et rénovation
Your partner in restauration
and renovation


REYNCHÉMIE

CHAUX PURE BLANCHE LC ** – NHL 3,5**
WITTE PURE NATUURLIJKE HYDRAULISCHE KALK (EN 459-1)

**SAINT-ASTIER**
LA CHAUX, L'EXCELLENCE POUR LA VIE

Kalkproducten Saint-Astier®



VOORDELEN VAN CHAUX PURE BLANCHE LC ****

- ✓ Respecteert de kleur van het gebruikte lokale zand
- ✓ Verzekert een constante tint
- ✓ Laat de ondergrond ademen
- ✓ Verzekert een duurzame constructie
- ✓ Zeer goede plasticiteit en damdoorlaatbaarheid
- ✓ Uitermate geschikt voor restauratie

Beschrijving

De witte natuurlijke hydraulische kalk NHL 3.5 van Saint-Astier® wordt geproduceerd door het branden en blussen van een uitzonderlijke krijt- en silicahoudende kalksteen zonder enige toevoeging. Het combineert een luchthardende en hydraulische binding en is geschikt voor het bereiden van mortels en pleisters.

Toepassingsgebied

De hydraulische kalk NHL 3.5 van Saint-Astier® is conform de recentste Europese Norm EN 459-1 voor het vervaardigen van:

- Voegmortels;
- Pleisters voor binnen en buiten;
- Verstevingen voor metselwerk in breuksteen en baksteen in oude gebouwen;
- Injecties voor de versteving van oud metselwerk;
- Kalkbeton en/of chapes voor vloeren.

Eigenschappen

De specifieke eigenschappen zoals plasticiteit, dampdoorlaatbaarheid maken hem uitermate geschikt voor de restauratie van gebouwen. Zijn witte natuurlijke tint respecteert nauwgezet de kleuren van het zand, zijn zuiverheid en geleidelijk opbouwende weerstand laten een gebruik op alle ondergronden toe, zonder toevoeging van cement.

Alle op basis van Saint-Astier® natuurlijke hydraulische kalkmortels kunnen tot 24 uren herwerkt worden (zie individuele technische fiches). Dit komt door de afwezigheid van cement of gips in de kalk en de minimale hoeveelheid aluminaten.

Ondergrond

Toegelaten:

- ✓ Oud metselwerk opgetrokken met een arme mortel (DTU 26.1);
- ✓ Metselwerk bepleisterd met een traditionele mortel conform DTU 26.1.

Uitgesloten:

- ✗ Pleisterlagen die enkel bestaan uit luchtkalk of gips, verf of dikke kunststofpleisters;
- ✗ Lichte hydraulische pleisterlagen met een lagere mechanische weerstand dan traditionele pleisters;
- ✗ Ondergronden met een helling van meer dan 10° ten opzichte van het verticale vlak;
- ✗ Waterafstotende ondergronden.

Mengverhoudingen volgens de professionele regels

Toepassing	NHL 3.5	Zand 0/4
Schraaplaag (3-5 mm):	1 emmer	1,5 emmers
Onderlaag (15-20 mm):	1 emmer	2 emmers*
Eindlaag:	1 emmer	2,5 emmers
Metselen van oude stenen:	1 emmer	2 emmers
Voegmortel:	1 emmer	2,5 emmers (zand 02-03)

*Bij deze samenstelling is het verbruik ongeveer 0,35 kg NHL 3.5 per m²/mm dikte.

Injectie puur: 25 kg kalk + 40 liter water

Injectiegrout: 25 kg kalk + 40 liter zand 0-1 tot 0-2 (ongeveer 55 kg)

- Pompcapaciteit: 1,1 m³/h, druk 3,1 bar maximum
- Om de vloeit te verhogen kan er bij de kalk caseïne toegevoegd worden (1% van het gewicht van de kalk). Hierdoor kan men er tussen de 25% en 50% minder water aan toevoegen.

Nota

De gebruikte doseringen van de kalk kunnen kleiner zijn in functie van de ondergrond en/of het gebruikte zand. Een toevoeging van het harstyp RC ACRYPLAST is nodig op gladde en niet-absorberende ondergronden (injectiegrout op basis van de NHL 2 zijn vloeibaarder).

Technische karakteristieken

Sterkte factor in MPa (N/mm ²) EN 459-1:	≥ 3,5
Residu zeef 0,09 mm:	6,5%
Volumieke massa:	650 g/dm ³
Vrije kalk na blussen Ca(OH) ₂ :	> 25%
Toevoegingen:	Geen
Witheid index:	72
Residu ongebluste kalk na het blussen:	< 1%

Mortels	Druksterkte – N/mm ²			
Mengverhouding kalk/zand (volumedelen)	EN459-1 (1 op 1)	1:2	1:2,5	1:3
7 dagen		0,75	0,57	0,53
28 dagen	3,5*	1,88	1,47	1,34
6 maanden		7,1	5,34	3,94
12 maanden		7,5	5,90	3,90
24 maanden		8,63	6,00	3,97
Verbruik voor 1m ³ mortel (kg ± 10%)		305	244	216
		Elasticiteitsmodulus – MPa		
28 dagen		9010	9000	8070
6 maanden		15260	13501	13150
12 maanden		15280	13620	13150
24 maanden		17480	13785	13670

*EN 459-1 (mix ratio 1:1 op volume met ISO 679 zand)

Karakteristiek	Normvereiste EN 459-1	NHL 3.5 St. Astier	Mineralogische samenstelling van de kalk
Gehalte vrije kalk (massa %)	≥ 25	> 25	CaCO ₃ : 75%
Gehalte SO ₃ (massa %)	≤ 2	0,45	SiO ₂ (oplosbaar): 11%
Druksterkte 28 dagen (MPa)	≥ 3,5 en ≤ 10	6 tot 8	SiO ₂ (onoplosbaar): 2%
Maalfijnheid 0,09 mm (massa %)	≤ 15	6,5	MgCO ₃ : 1%
Volumieke massa (kg/dm ³)	0,45 – 0,75	0,650	H ₂ O: 8%
			Andere: 3%

A.1.8. Pro Clima – Solitex UM Connect regenscherm

SOLITEX UM connect

Onderdakfolie met 3D-weefsellaag en geïntegreerde tape



Technische gegevens

Materiaal		
Structuurmat	polypropyleen	
Bescherm- en afdekvlies	polypropyleen microvezel	
Membraan	TEEE, monolithisch	
Geïntegreerde tape	butylrubber	

Eigenschap	Normering	Waarde
Kleur		antraciet
Oppervlaktedichtheid	NBN EN 1849-2	420 g/m ²
Dikte	NBN EN 1849-2	8,0 mm
Dampdiffusieweerstandsgetal μ	NBN EN ISO 12572	6
μ d-waarde	NBN EN ISO 12572	0,05 m
Brandgedrag	NBN EN 13501-1	E
Uv- en weerbestendig		3 maanden
Waterdichtheid bij naden met connect-verbindingen of bij verlijming met TESCON VANA	NBN EN 13859-1	W1
Materiaalgarantie, gedeponerd	ZVDH	ja
Waterkolom	NBN EN ISO 811	10.000 mm
Waterdichtheid niet-/verouderd*	NBN EN 13859-1	W1 / W1
Max. treksterkte lengte/dwars	NBN EN 13859-1 (A)	220 N/5 cm / 170 N/5 cm
Max. treksterkte lengte/dwars verouderd*	NBN EN 13859-1 (A)	185 N/5 cm / 160 N/5 cm
Rek lengte/dwars	NBN EN 13859-1 (A)	60 % / 70 %
Rek lengte/dwars verouderd*	NBN EN 13859-1 (A)	40 % / 50 %
Doorscheurweerstand lengte/dwars	NBN EN 13859-1 (B)	130 N / 135 N
*) Duurzaamheid na kunstmatige veroudering	NBN EN 1297 / NBN EN 1296	doorstaan
Koudbuiggedrag	NBN EN 1109	-40 °C
Temperatuurbestendigheid		bestendig van -40 °C tot +100 °C
Warmtegeleidingscoëfficiënt		0,04 W/(m·K)
CE-markering	NBN EN 13859-1	aanwezig

Toepassing

Te gebruiken als onderdakfolie of wandbeschotfolie voor geventileerde en ongeventileerde constructies in combinatie met alle dak- en gevelmaterialen zoals titaanzink, aluminium, roestvrij staal, verzinkt staal, koper enz. De 8 mm dikke 3D-weefsellaag van PP maakt de constructie betrouwbaarder, beschermt het beschot tegen vochtophoping en werkt geluidwerend bij regen of hagel. De onderdakfolie wordt daardoor aanbevolen door toonaangevende fabrikanten van metalen daken.

Leveringsvormen

Art.-nr.	GTIN	Lengte	Breedte	Inhoud	Gewicht	VE	Verpakking
12739	4026639127396	25 m	1,5 m	37,5 m ²	15 kg	1	10

De getoonde informatie heeft betrekking op de huidige stand van onderzoek en ervaringen uit de praktijk. Eventuele wijzigingen aan aanbevolen constructies, verwerking en doorontwikkeling en de daarmee gepaard gaande kwaliteitwijzigingen van de afzonderlijke producten worden voorbehouden. Wij informeren u graag over de actuele technische kennisstand ten tijde van de installatie.

Verdere informatie over de verwerking en de constructiedetails vindt u in de pro clima plannings- en toepassingaanbevelingen. Voor vragen kunt u contact opnemen met de technische hotline van pro clima BE ISOPROC cvba: +32 (0) 15 62 19 35 Email: technical@isoproc.be

MOLL

bauökologische Produkte GmbH
Rheintalstraße 35 - 43
D-68723 Schwetzingen
Fon: +49 (0) 62 02 - 27 82.0
eMail: info@proclima.de



A.2. Sensoren

A.2.1. HIH-4000

HIH-4000 Series

Table 1. Performance Specifications (At 5 Vdc supply and 25 °C [77 °F] unless otherwise noted.)

Parameter	Minimum	Typical	Maximum	Unit	Specific Note
Interchangeability (first order curve)	–	–	–	–	–
0% RH to 59% RH	-5	–	5	% RH	–
60% RH to 100% RH	-8	–	8	% RH	–
Accuracy (best fit straight line)	-3.5	–	+3.5	% RH	1
Hysteresis	–	3	–	% RH	–
Repeatability	–	±0.5	–	% RH	–
Settling time	–	–	70	ms	–
Response time (1/e in slow moving air)	–	5	–	s	–
Stability (at 50% RH)	–	1.2	–	% RH	–
Voltage supply	4	–	5.8	Vdc	2
Current supply	–	200	500	µA	–
Voltage output (1 st order curve fit)	$V_{OUT} = (V_{SUPPLY})(0.0062(\text{sensor RH}) + 0.16)$, typical at 25 °C				
Temperature compensation	True RH = (Sensor RH)/(1.0546 – 0.00216T), T in °C				
Output voltage temperature, coefficient at 50% RH, 5 V	–	-4	–	mV/°C	–
Operating temperature	-40[-40]	See Figure 1.	85[185]	°C[°F]	–
Operating humidity	0	See Figure 1.	100	% RH	3
Storage temperature	-50[-58]	–	125[257]	°C[°F]	–
Storage humidity	See Figure 2.			% RH	3

Specific Notes:

- Can only be achieved with the supplied slope and offset.
For HIH-4000-003 and HIH-4000-004 catalog listings only.
- Device is calibrated at 5 Vdc and 25 °C.
- Non-condensing environment.

General Notes:

- Sensor is ratiometric to supply voltage.
- Extended exposure to ≥90% RH causes a reversible shift of 3% RH.
- Sensor is light sensitive. For best performance, shield sensor from bright light.

FACTORY CALIBRATION DATA

HIH-4000 Sensors may be ordered with a calibration and data printout. See Table 2 and the order guide on the back page.

Table 2. Example Data Printout

Model	HIH-4000-003
Channel	02
Wafer	030996M
MRP	337313
Calculated values at 5 V	
V_{OUT} at 0% RH	0.826 V
V_{OUT} at 75.3% RH	3.198 V
Linear output for 3.5% RH accuracy at 25 °C	
Zero offset	0.826 V
Slope	31.483 mV/%RH
RH	$(V_{OUT} - \text{zero offset})/\text{slope}$ $(V_{OUT} - 0.826)/0.0315$
Ratiometric response for 0% RH to 100% RH	
V_{OUT}	$V_{SUPPLY} (0.1652 \text{ to } 0.7952)$



A.2.2. OM-DAQPRO-5300

Portable Handheld Data Logger

OM-DAQPRO-5300-UNIV



- ✓ 8-Channel Data Logger—Measures Voltage; Current; PT100 RTD; J, K, T Thermocouples; 2252 Ω or 10 K Ω Thermistors; Frequency/Pulse Input
- ✓ Alarm Output
- ✓ 16-Bit Sampling Resolution
- ✓ Fast USB Communications
- ✓ Rapid Sampling—Up to 4000 Samples/Sec (Single Channel Burst Mode)
- ✓ Large Data Storage—512 KB RAM
- ✓ Graphical Display—Shows Collected Data as Measured Values, Graphs or Tables
- ✓ Multiple Logging Sessions—Stores up to 100 Recording Sessions
- ✓ Powerful Analysis Software for Windows XP/VISTA/7

The OM-DAQPRO-5300-UNIV is an 8-channel portable data acquisition and logging system with graphic display and built-in analysis functions. The data logger is powered by an internal rechargeable battery and is capable of sampling, processing and displaying measurements without being connected to a computer.

The OM-DAQPRO-5300-UNIV is a professional, cost-effective, compact and stand-alone data logging system that can be used with a wide variety of applications. This 16-bit, high-resolution, 8-channel data logger has graphic displays and analysis functions for measuring voltage, current and temperature in real time. With its high-resolution and fast analog-to-digital converter (ADC), the OM-DAQPRO-5300-UNIV meets the majority of data logging requirements in most industrial applications. Its unique ability to display measured values and analyze them in real time on a graphical interface minimizes the need to download collected data to a computer for further analysis.



OM-DAQPRO-5300-UNIV.

Every OM-DAQPRO-5300-UNIV data logger is embedded with a unique serial number and can be loaded with a descriptive comment for safe identification.

The data logger is very easy to use because all its functions are broken down into an 8-icon menu. The four buttons on the data logger's front keypad can be used to browse every menu and execute any of the commands.

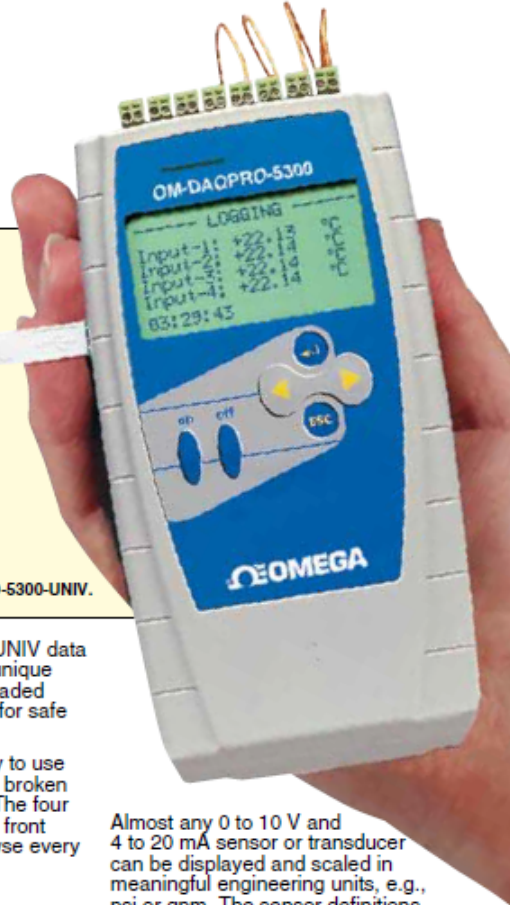
Inputs

The OM-DAQPRO-5300-UNIV has eight input channels for measuring voltage, current, temperature and pulses. User-selectable input types/ranges are 0 to 24 mA, 0 to 50 mV, 0 to 10 V, 2252 Ω or 10 K Ω thermistors, PT100 RTDs, type J/K/T thermocouple temperature sensors, internal temperature, pulse counter, frequency meter and up to 20 user-defined sensors (used for scaling analog voltage or current inputs in engineering units).

The OM-DAQPRO-5300-UNIV can record data from up to eight 2-wire or four 3-wire PT100 RTD inputs (two input channels are required for each 3-wire PT100 RTD input connected). Frequency/pulse counter is only available for input 1.

The data logger provides a simple and straightforward tool for defining up to 20 custom sensors.

OMEGA



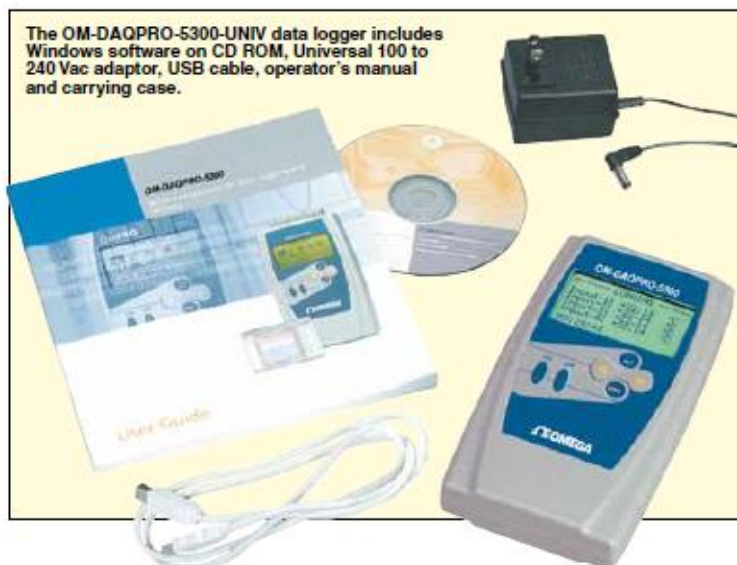
Almost any 0 to 10 V and 4 to 20 mA sensor or transducer can be displayed and scaled in meaningful engineering units, e.g., psi or gpm. The sensor definitions are stored in the data logger's memory and are added to the sensors list. The sensor's readings are displayed in the user-defined units both on the OM-DAQPRO-5300-UNIV's LCD screen and the Windows software.

The inputs use pluggable screw terminal blocks for easy connection. An internal clock and calendar keep track of the date and time of every sample measured.



OMEGACARE™ extended warranty program is available for models shown on this page. Ask your sales representative for full details when placing an order. OMEGACARE™ covers parts, labor and equivalent baners.

The OM-DAQPRO-5300-UNIV data logger includes Windows software on CD ROM, Universal 100 to 240 Vac adaptor, USB cable, operator's manual and carrying case.



OM-DAQPRO-5300-UNIV, with sensors, shown smaller than actual size

Outputs

The OM-DAQPRO-5300-UNIV can automatically activate an external alarm device, e.g., energize an audible alarm or turn on a warning light, when an input channel is outside a specified range (Input/Output 8 serves as either an input or an alarm output). The external alarm device (audible or visual alarm) is connected to the screw terminals of Input/Output 8. The alarm output is an open collector output, which is analogous to an electrical switch. High/low alarm levels and also whether the alarm output is activated during an out-of-limit condition can be set for each input channel individually.

Windows Software

The OM-DAQPRO-5300-UNIV system also comes with powerful Windows software. When the data logger is connected to a PC, live displays can be viewed at rates of up to 100 samples/sec, and automatic downloads can be carried out at higher rates.

The software can display the data in graphs, tables or meters; analyze data with various mathematical tools; or export data to a spreadsheet. The Windows software also enables you to set up the data logger and to send advanced commands such as alarm settings, triggering conditions and text notes.

Applications

- Quality Assurance
- Plant and Machine Condition Monitoring
- Field Monitoring Stations
- Automotive Testing
- HVAC
- Plant Trouble-Shooting
- Electricity Transients Failure Detection
- Environmental Monitoring
- Monitor Food, Drug and Electronic Equipment Storage Conditions
- Water Quality Testing
- Research

Specifications

INPUTS

Number of Inputs: 8 differential analog inputs

Input Type: Selectable type for each input: 0 to 24 mA, 0 to 50 mV, 0 to 10 V, 2252 Ω or 10 K Ω thermistor, PT100 RTD, J/K/T thermocouple, pulse and frequency (input 1 only)

0 to 24 mA

Range: 0 to 24 mA
Resolution: 4.76 μ A
Accuracy: $\pm 0.5\%$ FS
Loop Impedance: 21 Ω

0 to 50 mV

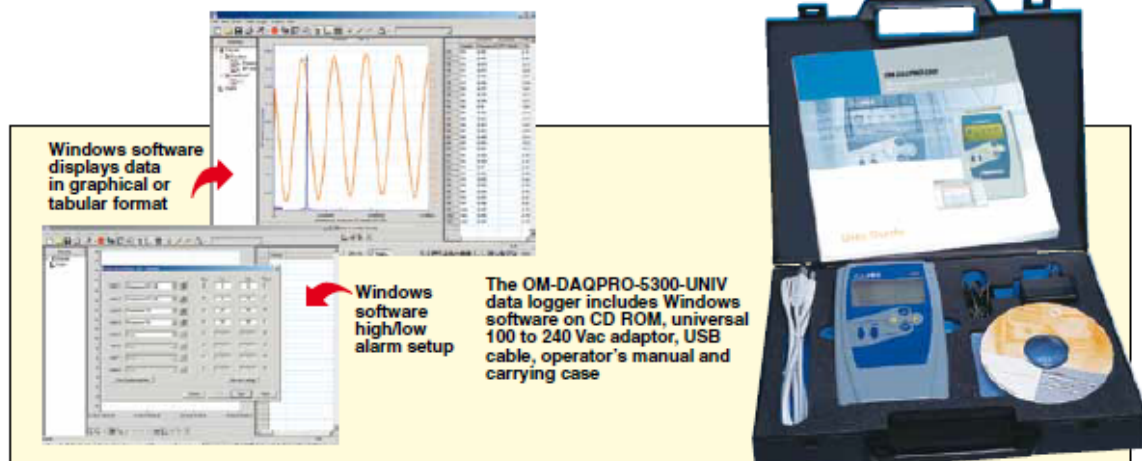
Range: 0 to 50 mV
Resolution: 3 μ V
Accuracy: $\pm 0.5\%$ FS
Input Impedance: 50 M Ω

0 to 10 V

Range: 0 to 10 V
Resolution: 200 μ V
Accuracy: $\pm 0.5\%$ FS
Input Impedance: 125 K Ω
TEMPERATURE THERMISTOR
Thermistor Type: 2252 Ω /10 K Ω Thermistor (OMEGA 44000 Series)
Range: -25 to 150°C (-13 to 302°F)
Resolution: 0.05°C
Accuracy: $\pm 0.5\%$ FS

TEMPERATURE PT100 RTD

RTD Type: 100 Ω Pt RTD, $\alpha = 0.00385$
Range: -200 to 400°C (-328 to 752°F)
Resolution: 0.1°C (7 m Ω)
Accuracy: -200 to -50°C, $\pm 0.5\%$ of reading; 50 to 400°C, $\pm 0.5\%$ of reading; -50 to 50°C, $\pm 0.5^\circ$ C
No. of RTD Inputs: Up to eight PT100 2-wire channels or four PT100 3-wire channels



INTERNAL TEMPERATURE

Range: -25 to 70°C (-13 to 158°F)
Resolution: 0.1°C (1µV)
Accuracy: ±0.5°C

PULSE COUNTER (INPUT 1 ONLY)

OPTOCOUPLER INPUT
Range: 0 to 65,000 counts
Resolution: 1 count
Input Signal: 0 to 5V
Input Impedance: 470 Ω
Bandwidth: 0 to 25 Hz

FREQUENCY METER (INPUT 1 ONLY)

OPTOCOUPLER INPUT
Range: 20 to 4000 Hz
Time Resolution: 6.5 µs
Input Signal: 0 to 5V
Input Impedance: 470 Ω

GENERAL

A/D SPECIFICATIONS

Noise: 30 µV RMS
Internal Linearity Error: ±0.08% of FSR
Offset Error: 0.1%

OPEN COLLECTOR ALARM OUTPUT (OUTPUT 8)

Maximum Current Sink: 50 mA @ 5 Vdc (fuse protected)
Input Impedance: 50 Ω

COMMUNICATION

USB 1.1 compliant

SAMPLING

Capacity: 512 KB (512,000 samples total)

Analog Sampling Rate: The number of sensors in use limits the maximum sampling rate:

1. Maximum sampling rate with one sensor is 4000 samples/sec
2. Maximum temperature sampling rate 1 sample/sec
3. Maximum sampling rate with two sensors or more is 1 sample/sec
4. Maximum sampling rate with two PT100 RTD sensors or more is every 10 seconds
5. Maximum sampling rate with five sensors or more and at least one thermistor or thermocouple (J, K or T) is every 10 seconds
6. Maximum sampling rate with seven sensors or more is every 10 seconds
7. Maximum sampling rate with eight PT100 RTD sensors or more is every 10 seconds
8. Data logger displays readings in real time at rates up to 1 sample/sec
9. Data logger software displays online readings at rates up to 1 sample/sec

Analog Sampling Resolution: 16-Bits

MAN/MACHINE INTERFACE

Keyboard: Full keyboard operation—enables manual programming of the data logger
Display: graphic LCD 64 x 128 pixels

POWER SUPPLY

Power: Internal rechargeable 7.2 V Ni-MH battery, built in battery charger, external 9 to 12 Vdc input via included universal 100 to 240 Vac adaptor
Battery Life: 25 hrs between charges

OPERATING TEMPERATURE

Operating Temperature Range: 0 to 50°C (32 to 122°F)

MECHANICAL

Enclosure: ABS plastic
Dimensions: 182 H x 100 W x 28 mm D (7.17 x 3.94 x 1.10")
Weight: 450 g (1.0 lb)

STANDARDS COMPLIANCE CE, FCC

Thermocouple Table

Thermocouple Type	Range	Accuracy*	Resolution
J	-200 to -50°C (-328 to -58°F) -50 to 50°C (-58 to 122°F) 50 to 1200°C (122 to 2192°F)	±0.5% of reading ±0.5°C ±0.5% of reading	0.1°C (1µV)
K	-250 to -50°C (-418 to -58°F) -50 to 50°C (-58 to 122°F) 50 to 1200°C (122 to 2192°F)	±0.5% of reading ±0.5°C ±0.5% of reading	0.1°C (1µV)
T	-200 to -50°C (-328 to -58°F) -50 to 50°C (-58 to 122°F) 50 to 400°C (122 to 752°F)	±0.5% of reading ±0.5°C ±0.5% of reading	0.1°C (1µV)

* Accuracy does not include cold junction compensation (CJC). CJC error: ±0.5°C

A.2.3. OM-CP-OCTPRO

OM-CP-OCTPRO

SPECIFICATIONS

GENERAL	
Dimensions	6.65 in x 4.40 in x 1.41 in (168.9 mm x 111.8 mm x 35.8 mm) <i>Data logger only</i>
Touch Screen Dimensions	5 inches
Number of Channels	8
Weight	1.3 lbs (20.8 oz)
IP Rating	IP20
Start Modes	Immediate Start & Delay Start
Memory	1,000,000 or 5,000,000 readings
Battery Type	Rechargeable 3.7 V Lithium Ion Battery Pack
Battery Life	- Continuous on-screen sampling: 7-9 hours depending on display setting and reading rate - Stand-by mode: 100 hours
Data Format	Exported .csv file format, .mtb or both
Time Accuracy	±1 minute/month
Operating Environment	0 °C to +50 °C (32 °F to +122 °F) 0 %RH to 95 %RH non-condensing
Enclosure Material	Polycarbonate, TPE Protective Boot
Calibration	Factory calibration is recommended annually
0 - 24 mA	
Range	-5 mA to 50 mA
Resolution	0.0001 mA
Accuracy	±0.024 mA (0 to 24 mA)
Input Impedance	30 Ω
0 - 100 mV	
Range	-100 mV to 2450 mV
Resolution	0.0001 mV
Accuracy	±0.1 mV (0 to 100 mV)
Input Impedance	1 GΩ
Maximum Voltage	3.0 V
0 - 10 V	
Range	-0.5 V to 12.0 V
Resolution	0.0001 V
Accuracy	± 0.01 V (-0.5 V to 12.0 V)
Input Impedance	1 GΩ
Maximum Voltage	25 V

Specifications subject to change. See Omega's terms and conditions at www.omega.com.

FREQUENCY / PULSE	
Maximum Count	4,000,000,000
Maximum Frequency	25 KHz
Input Signal	0 V to 12 V
Input Impedance	58 KΩ
TEMPERATURE PT-100 (2-WIRE RTD) (0.00385 CURVE)	
Range	-200 °C to +850 °C (Probe Dependent) (18.5 Ω to 390.5 Ω)
Resolution	0.01 °C
Accuracy	±0.1 °C (-200 °C to +400 °C) (Probe Dependent) ±0.034 Ω (18.5 Ω to 247.1 Ω)
TEMPERATURE PT-100 (3-WIRE RTD) (0.00385 CURVE)	
Range	-200 °C to +850 °C (Probe Dependent) (18.5 Ω to 390.5 Ω)
Resolution	0.01 °C
Accuracy	±0.1 °C (-200 °C to +400 °C) (Probe Dependent) ±0.034 Ω (18.5 Ω to 247.1 Ω)
TEMPERATURE PT-100 (4-WIRE RTD) (0.00385 CURVE)	
Range	-200 °C to +850 °C (Probe Dependent) (18.5 Ω to 390.5 Ω)
Resolution	0.01 °C
Accuracy	±0.1 °C (-200 °C to +400 °C) (Probe Dependent) ±0.034 Ω (18.5 Ω to 247.1 Ω)
TEMPERATURE NTC-1 (2252)	
Range	-25 °C to +150 °C (Probe Dependent) (29,380 Ω to 41.9 Ω)
Resolution	0.01 °C
Accuracy	±0.50% FSR (Probe Dependent)
TEMPERATURE NTC-2 (10K)	
Range	-25 °C to +150 °C (Probe Dependent) (102,900 Ω to 238 Ω)
Resolution	0.01 °C
Accuracy	±0.50% FSR (Probe Dependent)

RTD Note (All RTD Configurations)

Temperature Specifications based on ideal 100 Ω PT RTD Compliance with IEC 751(1983) and ITS-90. Accuracy based on 4-wire configuration.

BATTERY WARNING: Battery may explode or fire if mistreated. Do not disassemble or dispose of in fire. Do not charge except specified with charging condition. Do not heat above 212 °F, or short circuit. Do not crush or modify.

Product User Guide | 26

SPECIFICATIONS

THERMOCOUPLE TYPE	RANGE	RESOLUTION	ACCURACY
J	-200 °C to +760 °C	0.1 °C	±0.5 °C
K	-270 °C to +1370 °C	0.1 °C	±0.5 °C
T	-270 °C to +400 °C	0.1 °C	±0.5 °C
E	-270 °C to +980 °C	0.1 °C	±0.5 °C
R	-50 °C to +1760 °C	0.5 °C	±2.0 °C
S	-50 °C to +1760 °C	0.5 °C	±2.0 °C
N	-270 °C to +1300 °C	0.1 °C	±0.5 °C
B	50 °C to 1820 °C	0.5 °C	±2.0 °C

Measurement Accuracy

- At room temperature (25 °C ±10 °C) after 60 minute warm-up period.
- Temperature calibrated accuracy is thermocouple dependent.
- Accuracy does not include Cold Junction Compensation (CJC). CJC error: ±1.5 °C

Reading Rate Information

All channels will use the same reading rate.

Reading rates will be capped at 4 Hz when a temperature channel is selected.

- 4 KHz (Supports single channel of voltage or current measurement only)
- 2 KHz (Supports single channel of voltage or current measurement only)
- 1 KHz (Supports single channel of voltage or current measurement only)
- 500 Hz (Supports single channel of voltage or current measurement only)
- 250 Hz (Supports single channel of voltage or current measurement only)
- 100 Hz (Supports single channel of voltage or current measurement only)
- 50 Hz (Supports single channel of voltage or current measurement only)
- 25 Hz (Supports single channel of voltage or current measurement only)
- 10 Hz (Supports multiple channels of voltage or current measurement only)
- 4 Hz
- 1 Second
- 2 Seconds
- 5 Seconds
- 10 Seconds
- 15 Seconds
- 30 Seconds
- 1 Minute
- 2 Minutes
- 5 Minutes
- 10 Minutes
- 15 Minutes
- 30 Minutes
- 1 Hour
- 2 Hours
- 5 Hours
- 10 Hours
- 12 Hours
- 24 Hours

A.2.4. Hobo U12-011

HOB0® U12 Temp/RH Data Logger (Part # U12-011)

Inside this package:

- HOB0 U12 Temp/RH Data Logger
- Mounting kit with magnet, hook and loop tape, tie-wrap mount, tie wrap, and two screws.

Doc # 7660-C, MAN-U12-011
Onset Computer Corporation

Thank you for purchasing a HOB0 data logger. With proper care, it will give you years of accurate and reliable measurements.

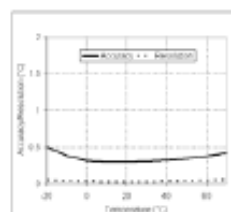
The HOB0 U12 Temperature/Relative Humidity Data Logger is a two-channel logger with 12-bit resolution and can record up to 43,000 measurements or events. The logger uses a direct USB interface for launching and data readout by a computer.

An Onset software starter kit is required for logger operation. Visit www.onsetcomp.com for compatible software.

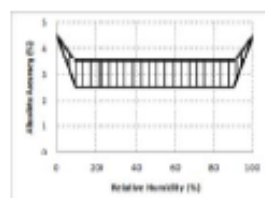


Specifications

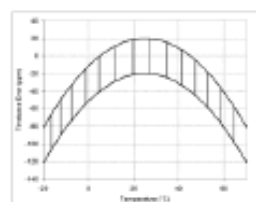
Measurement range	Temperature: -20° to 70°C (-4° to 158°F) RH: 5% to 95% RH
Accuracy	Temperature: $\pm 0.35^\circ\text{C}$ from 0° to 50°C ($\pm 0.63^\circ\text{F}$ from 32° to 122°F), see Plot A RH: $\pm 2.5\%$ from 10% to 90% RH (typical), to a maximum of $\pm 3.5\%$. See Plot B.
Resolution	Temperature: 0.03°C at 25°C (0.05°F at 77°F), see Plot A RH: 0.03% RH
Drift	Temperature: 0.1°C/year (0.2°F/year) RH: <1% per year typical, RH hysteresis 1%
Response time in airflow of 1 m/s (2.2 mph)	Temperature: 6 minutes, typical to 90% RH: 1 minute, typical to 90%
Time accuracy	± 1 minute per month at 25°C (77°F), see Plot C
Operating temperature	Logging: -20° to 70°C (-4° to 158°F) Launch/readout: 0° to 50°C (32° to 122°F), per USB specification
Battery life	1 year typical use
Memory	64K bytes (43,000 12-bit measurements)
Weight	46 g (1.6 oz)
Dimensions	58 x 74 x 22 mm (2.3 x 2.9 x 0.9 inches)
CE	The CE Marking identifies this product as complying with all relevant directives in the European Union (EU).



Plot A



Plot B



Plot C

Connecting the logger

The U-Family logger requires an Onset-supplied USB interface cable to connect to the computer. If possible, avoid connecting at temperatures below 0°C (32°F) or above 50°C (122°F).

1. Plug the large end of the USB interface cable into a USB port on the computer.
2. Plug the small end of the USB interface cable into the bottom of the logger as shown in the following diagram.

Important: Press this button for 3 seconds when logger is launched with Button Start or press for 1 second to record an event while logging.



USB interface cable plugged into logger

If the logger has never been connected to the computer before, it may take a few seconds for the new hardware to be detected. Use the logger software to launch and read out the logger.

Important: If you configure the logger to start with a button start, be sure to press and hold down the button on the front of the logger for at least three seconds when you want to begin logging.

You can read out the logger while it continues to log, stop it manually with the software, or let it record data until the memory is full. Refer to the software user's guide for complete details on launching, reading out, and viewing data from the logger.

Sample and event logging

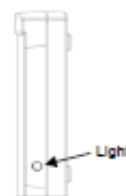
The logger can record two types of data: samples and events. Samples are the sensor measurements recorded at each logging interval (for example, the temperature every minute). Events are independent occurrences triggered by a logger activity. Examples of events recorded asynchronously during deployment include when the logger is connected to the host, when the battery is low, the end of a data file once the logger is stopped, and button pushes.

Press the button on the front of the logger for one second to record an event. Both a button up and down event will be recorded. This is useful if you want to mark the datafile at a particular point. For example, if the logger is located in an incubator, you might press the button each time the door is opened.

The logger stores 64K of data, and can record up to 43,000 samples and events combined.

Operation

A light (LED) on the side of the logger confirms logger operation.



The following table explains when the logger blinks during logger operation.

When:	The light:
The logger is logging	Blinks once every one to four seconds (the shorter the logging interval, the faster the light blinks); blinks when logging a sample
The logger is awaiting a start because it was launched in Start At Interval, Delayed Start, or Button Start mode	Blinks once every eight seconds until launch begins
The button on the logger is being pushed for a Button Start launch	Blinks once every second while pressing the button and then flashes rapidly once you release the button. The light then reverts to a blinking pattern based on the logging interval

A.2.5. Hobo Pro v2 (U23-002)

HOBO® Pro v2 (U23-00x) Manual



HOBO Pro v2 U23-004 shown

HOBO Pro v2 Logger

Models: U23-001A
U23-002A
U23-003
U23-004

Included Items:

- Clamp and mounting screws
- UV protective cap

Required Items:

- Coupler (COUPLER2-E) with USB Optic Base Station (BASE-U-4) or HOBO Waterproof Shuttle (U-DTW-1)
- HOBOWare Pro 3.7.19 or later (download at www.onsetcomp.com/hoboware-free-download)

Accessory:

- Replacement UV protective caps (U23-CAP)

The HOBO Pro v2 logger's environmentally rugged case is designed for years of reliable use in outdoor applications. It has enough memory to record over 42,000 12-bit measurements.

The logger uses an optical USB communications interface (via a compatible shuttle or base station) for launching and reading out the logger. The optical interface allows the logger to be offloaded without compromising the electronics. The USB compatibility allows for easy setup and fast downloads.

Specifications

Temperature Sensor

Operation Range	U23-001A internal sensor: -40 to 70°C (-40 to 158°F) U23-002A external temperature sensor: -40 to 70°C (-40 to 158°F) U23-003 and U23-004 external sensors: -40 to 100°C (-40 to 212°F), with tip and cable immersion in fresh water up to 50°C (122°F) for one year
Accuracy	U23-001A and U23-002A: $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$ from -40 to 0°C ($\pm 0.45^{\circ}\text{F}$ from -40 to 32°F), $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ from 0 to 70°C ($\pm 0.36^{\circ}\text{F}$ from 32 to 158°F) U23-003 and U23-004: $\pm 0.21^{\circ}\text{C}$ from 0° to 50°C ($\pm 0.38^{\circ}\text{F}$ from 32° to 122°F); see Plot A
Resolution	U23-001A and U23-002A: 0.04°C (0.072°F) U23-003 and U23-004: 0.02°C at 25°C (0.04°F at 77°F); see Plot A
Response Time (Typical to 90%)	U23-001A internal sensor: 10 minutes in air moving 1 m/sec U23-002A external temperature sensor: 3 minutes, 45 seconds in air moving 1 m/sec U23-003 and U23-004 external sensors: 3 minutes in air moving 1 m/sec; 30 seconds in stirred water
Drift	U23-001A and U23-002A: $< 0.01^{\circ}\text{C}$ (0.018°F) per year U23-003 and U23-004: $< 0.1^{\circ}\text{C}$ (0.18°F) per year

Relative Humidity Sensor (U23-001A, U23-002A only)

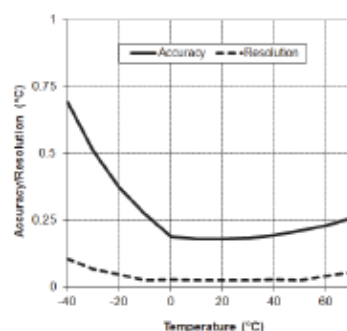
Operation Range	0 to 100% RH, -40° to 70°C (-40° to 158°F) Exposure to conditions below -20°C (-4°F) or above 95% RH may temporarily increase the maximum RH sensor error by an additional 1%
Accuracy	$\pm 2.5\%$ from 10% to 90% RH typical to a maximum of $\pm 3.5\%$ including hysteresis at 25°C (77°F); below 10% and above 90% $\pm 5\%$ typical
Resolution	0.05%
Response Time (Typical to 90%)	U23-001A: 40 minutes in air moving 1 m/sec with protective cap U23-002A: 15 seconds in air moving 1 m/sec
Drift	$< 1\%$ per year typical

Logger

Operation Range	-40° to 70°C (-40° to 158°F)
Real-time Clock	± 1 minute per month 0° to 50°C (32° to 122°F)
Battery	1/2 AA, 3.6 Volt lithium, user-replaceable (HP-B)
Battery Life (Typical Use)	3 years with 1 minute or greater logging interval
Memory (Non-Volatile)	64K bytes memory (approx. 21,000 temperature and RH measurements)
Materials	All models: ASA styrene polymer housing and mounting clamp; polypropylene protective cap; Buna-N o-ring(s); U23-001A, U23-002A only: ASA styrene polymer RH sensor cap; modified hydrophobic polyethersulfone membrane

Specifications (continued)

Cables	U23-001A: No cables U23-002A: One 184 cm (6 ft) PVC cable; sensor diameter 1 cm (0.38 in.) U23-003: Two 184 cm (6 ft) PVC cables; sensor diameter 0.5 cm (0.20 in.) U23-004: One 184 cm (6 ft) PVC cable; sensor diameter 0.5 cm (0.20 in.)
Environmental Rating	Electronics housing is NEMA 6P equivalent (tolerant of brief submergence); Units with RH sensors are NEMA 4 equivalent (splash-resistant)
Launch Modes	Immediate start; delayed start
Logging Interval	Fixed-rate or multiple logging intervals, with up to 8 user-defined logging intervals and durations; logging intervals from 1 second to 18 hours
Offload Modes	Offload while logging; stop and offload
Battery Indication	Battery voltage can be viewed in status screen and optionally logged in datafile. Low battery indication in datafile.
Weight	U23-001A: 57 g (1.5 oz); U23-002A: 118 g (3.1 oz); U23-003: 138 g (3.7 oz); U23-004: 102 g (2.7 oz)
Dimensions	Housing measures 10.2 × 3.8 cm (4.0 × 1.5 in.)
NIST Certificate	Temperature certificate available for additional charge
	The CE Marking identifies this product as complying with all relevant directives in the European Union (EU).



Plot A
(applies to U23-003 and U23-004 models only)

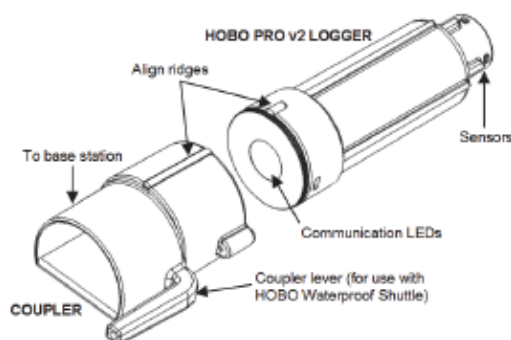
Connecting the Logger

The HOBO Pro v2 requires a coupler (COUPLER2-E) and USB-Optic Base Station (BASE-U-4) or HOBO Waterproof Shuttle (U-DTW-1) to connect to the computer.

IMPORTANT: USB 2.0 specifications do not guarantee operation outside the range of 0°C (32°F) to 50°C (122°F).

1. Install HOBOWare on your computer before proceeding.
2. Follow the instructions that came with your base station or shuttle to attach the base station or shuttle to a USB port on the computer.
3. Make sure the logger's communications window is clean and dry. (Use a clean, nonabrasive cloth, if necessary.) If the logger is damp, wipe off excess moisture.
4. Attach the coupler to the base station or shuttle, then insert the logger into the coupler with the ridge on the logger aligned with the ridge on the coupler.
5. If you are using the HOBO Waterproof Shuttle, briefly press the coupler lever to put the shuttle into base station mode.
6. If the logger has never been connected to the computer before, it may take a few seconds for the new hardware to be detected by the computer.
7. Use the logger software to launch the logger, check the logger's status, read it out, stop it manually with the software, or let it continue to record data until the memory is full. Or, use the HOBO Waterproof Shuttle to read out and relaunch the logger in the field.

Refer to the software's guide for complete details on launching, reading out, and viewing data from the logger.



Note: The first time you launch the logger, the deployment number will be greater than zero. Onset launches the loggers to test them prior to shipping.

Operation

A light (LED) in the communications window of the logger confirms logger operation. (In brightly lit areas, it may be necessary to shade the logger to see the LED blink.) This table explains when the light blinks during logger operation:

When:	The OK Light Does This:
The logger is logging	Blinks once every one to four seconds (the shorter the logging interval, the faster the light blinks); blinks when logging a sample.
The logger is awaiting a start because it was launched in Start At Interval or Delayed Start mode	Blinks once every eight seconds until logging begins

Sample and Event Logging

The logger can record two types of data: samples and events. Samples are the sensor measurements recorded at each logging interval (for example, temperature every minute). Events are independent occurrences triggered by a logger activity, such as Bad Battery or Host Connected. Events help you determine what was happening while the logger was logging.

The logger stores 64K of data, and can record over 42,000 12-bit measurements.

Deploying and Protecting the Logger

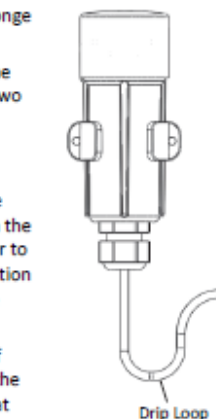
- To clean the logger's case, use a sponge with warm, soapy water.

- Use the included clamp to mount the logger to a surface. The clamp has two holes for the screws, 44 mm (1.7 inches) apart.

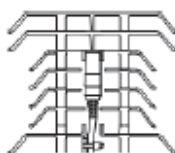
The clamp is slightly tapered to accommodate the logger. Install the clamp so the logger is oriented with the communication window facing up or to the side. This will prevent condensation from pooling on the sensor or cable grommet.

- A solar radiation shield is required if the logger with internal sensors or the external sensors will be in sunlight at any time.

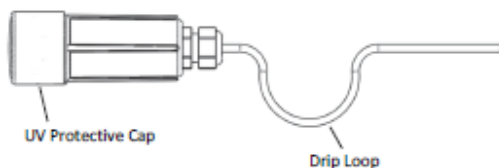
- The U23-001A logger must be mounted horizontally. If the U23-001A logger is being deployed in a solar radiation shield, it must be mounted horizontally as shown in this diagram.



- When deploying a U23-002A logger, the sensor must be mounted vertically. If the sensor is being deployed in a solar radiation shield, it must be mounted vertically as shown in this diagram.



- If the logger housing will be in sunlight, slide the included protective cap over the logger communication window to protect the window against UV light.



- When mounting the logger, be sure to attach the logger so the logger cable is not being pulled. Also leave about 5 cm (2 inch) of drip loop in the cable where it comes out of the logger (as shown in the above diagrams) to prevent water from entering the logger housing.

- If there are chewing rodents or other cable hazards present, the sensor cable should be protected in conduit.

- Periodically inspect the three desiccant packs located in the logger cap. If they are not bright blue, dry them following the instructions below.

To dry a desiccant pack, remove it from the logger cap and leave in a warm ($\leq 70^{\circ}\text{C}$ (158°F)), dry location until the bright blue color is restored. Refer to the Battery section for instructions on removing and replacing the logger cap.

If a desiccant pack remains pink and will not turn blue, replace it with a new desiccant pack (DESICCANT1).

- The HUM-RHPCB-x replacement RH sensors are not compatible with the U23-001A and U23-002A loggers.

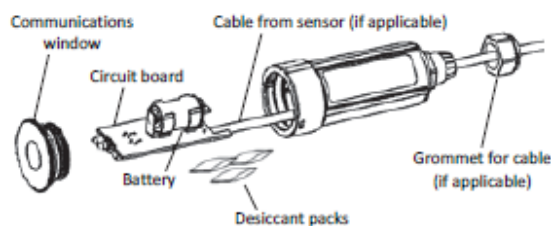
Battery

Typical battery life is about three years. Actual battery life is a function of the number of deployments, logging interval, and operation/storage temperature of the logger. To obtain a three-year battery life, use a logging interval of one minute or greater, and operate and store the logger at temperatures between 0° and 40°C (32° and 104°F).

Frequent deployments with logging intervals of less than one minute, and continuous storage/operation at temperatures above 40°C , will result in significantly lower battery life. For example, continuous logging at a one-second logging interval will result in a battery life of approximately one month.

The logger can report and log its own battery voltage. If the battery falls below 3.1 V, the logger will record a "bad battery" event in the datafile. If the datafile contains "bad battery" events, or if logged battery voltage repeatedly falls below 3.3 V, the battery is failing and should be replaced before the next deployment. To change the battery:

- Turn slightly counter-clockwise and pull to remove the protective cap. Loosen the cable grommet on the opposite end, if the logger has an external sensor.
- Carefully pull out the circuit board containing the battery. (If the logger has an external sensor, you will probably find it easier to push the cable(s) into the case to push the circuit board out.)
- Examine the desiccant packs that were packed into the case. If the desiccant is not bright blue, put the desiccant packs in a warm, dry place until the blue color is restored.



- Install a new 1/2 AA, 3.6 Volt lithium battery (part # HP-B). The negative end of the battery must face towards the communication LEDs.
- Use a clean, dry cloth to wipe away any moisture inside the case.

6. Push the board and the desiccant packs back into the case, taking care not to bend the communication LEDs. Align the board with the grooves inside the case. (If you try to put the board in upside-down, the battery will get in the way.)
7. Make sure O-ring on the protective cap is still in place. It should not be pinched, twisted, or trapping dirt or lint, which could interfere with the protective cap. If you are replacing it with a new O-ring from an RH sensor replacement kit, discard the old O-ring and place the new one into the same groove on the communications window. Apply a small dot of lubricant from the grease packet included in the kit on the O-ring. Spread the lubricant around the O-ring just enough to moisten it while avoiding getting it on the communications window.
8. Line up the bumps on the protective cap with the notches in the logger's case. Push and turn the cap slightly clockwise. Pull the slack in the sensor cable(s) if applicable. Hand-tighten the grommet and then turn an additional half turn with a wrench (do not force).



WARNING: Do not cut open, incinerate, heat above 100°C (212°F), or recharge the lithium battery. The battery may explode if the logger is exposed to extreme heat or conditions that could damage or destroy the battery case. Do not dispose of the logger or battery in fire. Do not expose the contents of the battery to water. Dispose of the battery according to local regulations for lithium batteries.

Solar Radiation Shield (RS3)



Items included:

- One assembled solar radiation shield
- One mounting bracket
- Six cable ties
- Two knurled nuts
- Two screws
- One hose clamp

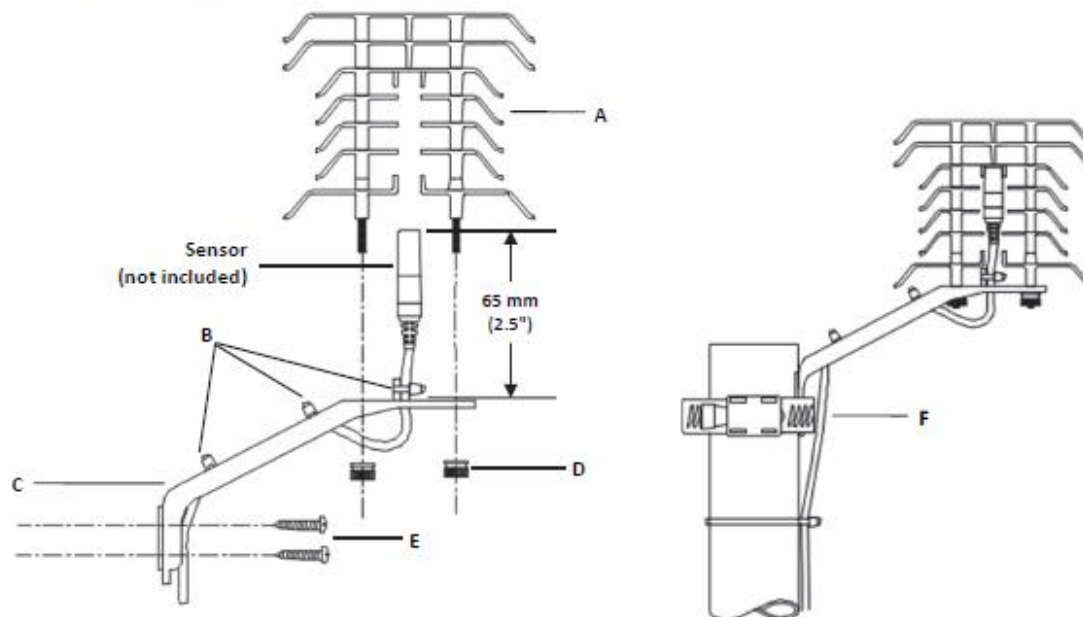
Specifications

Time Response	2.5 times faster than the RS1 and M-RSA
Wind Resistance	Tested in sustained winds up to 129 kph (80 mph) Tested in gusts up to 161 kph (100 mph)
Materials	Shield: ASA styrene (UV-stable) Bracket: Glass-filled nylon (UV-stable) Mounting hardware: Stainless steel and brass
Temperature	-40° to 75°C (-40° to 167°F)
Weight	113 g (4 oz)
Height	89 mm (3.5 inches); 159 mm (6.25 inches) with bracket
Diameter	102 mm (4 inches); bracket protrudes an additional 102 mm (4 inches) from shield
Mounting	Up to 51 mm (2 inches) mast diameter with hose clamp; unlimited with screws
Compatible Sensors	Onset part numbers S-THB-00X, S-TMA-M00X, S-TMB-M00X, TMCx-HB, TMCx-HD, W-TMB and external sensors from U23-00X or MX230x; NOT compatible with S-THA sensors.

Mount temperature or temp/RH sensor in shield as shown. Clearance between mounting bracket and radiation shield ceiling is 65 mm (2.5 in.). Measure the sensor's placement accordingly and secure the cable to the mounting bracket (C) with cable ties (B). Carefully place the radiation shield (A) over the sensor and attach to mounting bracket with knurled nuts (D), being careful not to over-tighten.

Attach mounting bracket to wall, post, or station mast. To use included screws (E) as shown in the diagram on the left, pre-drill 2.4 mm (3/32 in.) holes in wood, or 2.75 mm (7/64 in.) holes in metal.

Or, fasten with hose clamp (F) as shown in diagram on the right.



Note: This shield does not protect sensors from light reflected from below the shield at some angles. Avoid deploying this shield next to reflective surfaces if possible.

B. Inventarisatie van de wandopbouw van BLAF

Jaar	Code	Project	Binnenafwerking (mm)	Elektrospouw (mm)	Dampscherm/luchtdichting (mm)	Isolatie (mm)	Regendichting (mm)	Spouw (mm)	Buitenafwerking (mm)	Dikte
7	07-0073	dHL	gipskarton	12.5 regelwerk + vlaswol	45 Pavaplan 3f	8 cellulose/muurspanen	gebultineerde	22 ja	27.5 gevelsteen	100
10	10-0412	dHA	gipskarton	12.5 nee	0 OSB3	15 MW/CLS + PIR + XPS	179 houtvezelplaat	0 nee	0 steens	190
11	11-0417	rMSA	gipspleister + gipskarton	18 nee	0 OSB3	18 MW/CLS	180 nee	0 nee	0 steens	190
11	11-0443	sal	gipskartonplaat + OSB3	24 regelwerk + MW	51 OSB3	15 cellulose/houtskelet	220 houtvezelplaat	2 ja	70 steens (288 x 188 x 65)	190
13	13-0506	BSN	multiplex	18 nee	0 dampdicht scherm	1 MW/CLS + MW + MW/CLS	300 dampen scherm	1 ja	30 gevelsteen recup	90
13	13-0506	BSN	snelbouwsteen	140 nee	0 dampdicht scherm	1 MW/CLS + MW + MW/CLS	300 dampen scherm	1 ja	30 gevelsteen recup	90
13	13-0512	WST	gipskartonplaat	12.5 nee	0 OSB3	18 cellulose/houtskelet	266.5 gevelolie solex UM	1 ja	0 BLAF 1.0	188
14	14-0526	tmEK	gipskarton	12.5 nee	0 linello+OSB3	18 cellulose/houtskelet+cellulose	271.5 pro clima solex um	8 nee	0 BLAF 1.0	188
15	15-04-0122	pePL	gipskarton	12.5 nee	0 OSB3	15 MW/houtskelet	140 dampen scherm	8 MW + licht	120 BLAF 1.0	188
15	15-0544	psW	afwerking	nee	0 luchtdichting	1 MW/houtskelet	140 dampen gevelolie	1 ja	50 gevelsteen recup	90
15	15-0546	gKO	gipskarton	10 regelwerk	50 OSB3	MW/houtskelet+kingspan	214 dampen scherm	1 ja	20 gevelsteen Ploegsteert MX	217
15	15-0547	tmSN	OSB3+gebultineerde	30 nee	0 dampdicht scherm	1 MW/houtskelet	80 dampen scherm	1 nee	0 steens	210
15	15-0564	gCO	houtvezelplaat	20 nee	0 dampdicht hardboard	6 kalkhennep+houtwol/houtskelet	300 (winddicht)	1 ja	40 gevelsteen Ploegsteert DM	105
15	15-0564	gCO	bepleistering	15 nee	0 gereforceerd hardboard	6 kalkhennep+houtwol/houtskelet	300 (winddicht)	1 ja	40 gevelsteen Ploegsteert MX	217
15	15-0564	gCO	bepleistering	20 nee	0 gereforceerd hardboard	6 kalkhennep/houtskelet	300 (winddicht)	1 ja	40 gevelsteen Ploegsteert DM	105
15	15-0564	gCO	bepleistering	20 nee	0 gereforceerd hardboard	6 kalkhennep/houtskelet	300 (winddicht)	1 ja	40 gevelsteen Ploegsteert MX	217
15	15-0564	gCO	bepleistering	15 nee	0 gereforceerd hardboard	6 kalkhennep/houtskelet	300 (winddicht)	1 ja	40 gevelsteen Ploegsteert MX	217
16	16-0590	rMM	multiplex	18 nee	0 OSB3	18 CLS/cellulose+cellulose-XPS	290 nee	0 nee	0 Ploegsteert Barryblocc MS (288 x 188 x 90)	188
16	16-0612	eLB	CLT	100 nee	0 nee	0 houtwol	220 nee	0 ja	30 Snelbouwsteen Ploegsteert MX	217
17	17-0618	hkZ	gipskartonplaat	12.5 nee	0 OSB3	18 MW/houtskelet+MW (rotswol)	260 nee	0 ja	20 BLAF 1.0	188
17	17-0618	hkZ	gipskartonplaat	12.5 nee	0 OSB3	18 MW/houtskelet+MW (rotswol)	260 nee	0 ja	20 gevelsteen (klei van 1.0, andere dikte)	90
18	18-0633	eKL	OSB3	18 nee	0 nee	0 MW/houtskelet	140 dampen regenscherm	1 MW rotswol + licht	150 gevelsteen	90
18	18-0634	JO	gipskartonplaat	12.5 nee	0 OSB3	18 cellulose/houtskelet	100 houtvezelplaat	35 ja	70 gevelsteen betonsteen	90
18	18-0640	HE	gipskartonplaat	12.5 ja	60 OSB3	15 MW/houtskelet	140 gevelolie	1 MW + licht	150 gevelsteen sparo 1003A	88
18	18-0640	pkR	gipskartonplaat	12.5 nee	0 OSB3	15 cellulose/houtskelet	230 Cellt 4D houtvezelplaat	22 ja	140 gevelsteen recup	90
18	18-0647	dSGR	gipskartonplaat	12.5 nee	0 OSB3	15 cellulose/houtskelet+PUR	190 nee	0 nee	0 bestaand (metuulwerk+licht+metuulwerk)	350
19	19-0648	vaL	gipskartonplaat	12.5 nee	0 OSB3	18 MW/houtskelet+MW	240 nee	0 nee	0 bestaand	200
19	19-0648	vaL	gipskartonplaat	12.5 nee	0 OSB3	18 MW/houtskelet+MW	240 nee	0 nee	0 bestaand	250
19	19-0651	FB	leempleister	5 nee	0 Exie board	9 kalkhennep/houtskelet	140 nee	0 kalkhennep	200 gevelsteen Ploegsteert MX	217
19	19-0658	keSN	gipskartonplaat	12.5 nee	0 OSB3	18 MW/houtskelet	140 nee	MW mupan facade isover +	120 gevelsteen Ploegsteert MX	217
19	19-0658	keSN	multiplex	18 ja	60 OSB3	18 MW/houtskelet	180 gevelolie	0 gevelolie	0 gevelsteen Ploegsteert DM	105
20	20-0665	hCOB	gipskartonplaat / leempleister	12.5 nee	0 pavaplan 3f	8 kalkhennep/houtskelet	140 gevelolie	1 kalkhennep	260 decobloc	90
20	20-0665	hCOB	leempleister	12.5 nee	0 pavaplan 3f	8 kalkhennep/houtskelet	140 nee	0 kalkhennep	260 decobloc	90
20	20-0666	eAT	afwerking	12.5 nee	0 dampscherm+OSB	PUR/houtskelet	nee	0 isolatie	naïf/aanged metuulwerk	0
20	20-0670	pg	multiplex	12 nee	0 OSB3	15 MW/houtskelet (soconfort)	225 nee	0 houtvezelplaat + licht	65 gevelsteen decobloc / Barryblocc	188
20	20-0682	whrM	pleister + OSB-houtskelet	167.5 nee	0 OSB3	18 MW (rotswol) 2 lagen	210 gevelolie, tenzij spouw	1 ja	30 gevelsteen recup	90
21	21-0702	JS	gipskartonplaat	12.5 nee	0 OSB	15 houtwol/houtskelet	140 dampen gevelolie	1 houtwol	100 baksteen (288x138x138)	138
21	21-0702	JS	leempleister	20 nee	0 houtvezelplaat + pavaplan	40 kalkhennep/houtskelet	140 dampen gevelolie	1 kalkhennep (Exie)	260 Big Brick 2.0 (294 x 196 x 64)	196
21	21-0703	majA	pleister + gipskartonplaat	30 nee	0 pe-foile lichtdicht	1 MW/houtskelet+MW	190 nee	0 nee	0 bestaand	280
22	22-0713	lojaLe	leempleister	10 nee	0 Aagepan	16 kalkhennep/houtskelet	140 nee	0 kalkhennep	260 bestaand steens	290
22	22-0715	dew	tbd	???	tbd	16 kalkhennep/houtskelet	90 nee	0 kalkhennep	110 bestaand steens	tbd
22	22-0717	hBT	multiplex	18 ja	22 pe-foile lichtdicht	1 MW/houtskelet+MW	190 nee	0 bestaande snelbouw + spouw	240 bestaand	90
22	22-0727	saag	gipskartonplaat	???	0 OSB+dampscherm	MW/houtskelet	???	0 bestaande snelbouw + spouw	210 bestaand	90
22	22-0727	saag	gipskartonplaat	???	0 OSB+dampscherm	MW/houtskelet	???	0 nee	0 bestaand steens	200
22	22-0735	seebB	tbd	???	0 constructieve plaat	kalkhennep/houtskelet	300 nee	0 nee	0 transparante golfplaat	tbd

C. Datacollectie biobased isolatiematerialen

C.1. Per materiaal

Samples	bulk density soortelijke massa ρ_{bulk} [kg/m ³]	total porosity porositeit μ_{pore} [%, %]	specific heat capacity specifieke warmte capaciteit $c_{p,sp}$ [J/kg K]	thermal conductivity warmtegeleidingscoëfficiënt λ_{dry} [W/m K]	vapour diffusion resistance factor dampdifфуsieweerstandsfactor μ_{dry} [-]	capillarity waterabsorptie coëfficiënt q_{max} [g/m ² s]	moisture buffer value vochtbuffering capaciteit M_{mv} [kg/m ² s ^{0.5}]	curves	Informatie
TP = plaster, P = prefab, SP = sprayed									Brondgegevens
TP									TP = technische fiche
KALKHEMPEL									
Variabel				0.075	1.1-1.3	(F) 0.023 (F2) 0.008			WTCB bijlage 1
TP 20x20x7cm	192-305						3.06 ± 0.20 - 1.86 ± 0.14		N. Holcroft, A. Shea, Effect of compaction on moisture buffering of hemp-lime insulation, in: Proc. 1st Int. Conf. Bio-Based Build. Mater., Clermont-Ferrand, France, 2015, pp. 542-546.
SP		72					2.13 ± 0.06	x	F. Collet, S. Priet, Experimental investigation of moisture buffering capacity of sprayed hemp concrete, Constr. Build. Mater. 36 (2012) 98-105.
SP		78					1.94	x	F. Collet, J. Chamois, S. Priet, C. Larois, Comparison of the hygro-thermo-mechanical properties of three hemp concretes, Energy Build. 62 (2013) 234-240.
TP		79					2.14	x	F. Collet, J. Chamois, S. Priet, C. Larois, Comparison of the hygro-thermo-mechanical properties of three hemp concretes, Energy Build. 62 (2013) 234-240.
P	340			0.071	2.8				TF Ecohemp hempblock
TP	270			0.068					TF Ecohemp hempblock
BM	627			0.138	5.51	0.62			R. Walker, S. Pavla, Moisture transfer and thermal properties of hemp-lime concretes, Constr. Build. Mater. 64 (2014) 270-276.
CM	627			0.138	5.47	0.60			R. Walker, S. Pavla, Moisture transfer and thermal properties of hemp-lime concretes, Constr. Build. Mater. 64 (2014) 270-276.
G	565			0.126	5.56	0.63			R. Walker, S. Pavla, Moisture transfer and thermal properties of hemp-lime concretes, Constr. Build. Mater. 64 (2014) 270-276.
G-WR	569			0.129	5.71	0.64			R. Walker, S. Pavla, Moisture transfer and thermal properties of hemp-lime concretes, Constr. Build. Mater. 64 (2014) 270-276.
M	508			0.117	5.42	0.66			R. Walker, S. Pavla, Moisture transfer and thermal properties of hemp-lime concretes, Constr. Build. Mater. 64 (2014) 270-276.
M-WR	531			0.123	5.71	0.60			R. Walker, S. Pavla, Moisture transfer and thermal properties of hemp-lime concretes, Constr. Build. Mater. 64 (2014) 270-276.
TP 9.8x9.8x12 cm	290			0.14	1.8-2.9		3.47	x	E. Larois, A. Walker, S. Priet, P. Walker, Moisture buffer potential of experimental wall assemblies incorporating formulated hemp-lime, Build. Environ. 93 (2015) 199-209.
TP	453.8			0.08					Strandberg Buijs, Paulsen & Balkstein, Kistlin, (2019). Energy and moisture in historic masonry walls retrofitted w hemp-lime insulation. Hygrothermal Performance Analysis validated by Simulations (De Mets, Pigeon, Koepfen)
TP	300			0.115 ± 0.006	1	0.168		x	Envid 2008
TP	440 ± 20	73 ± 1		0.070 ± 0.15	4.85 ± 0.24				Lawrence, Hygrothermal performance of bio-based insulation materials
TP (CANdry wall)	175			0.054					TF Eco CanDry wall
TP (floormx Exie)	175			0.054					TF Eco CanDry wall
TP	300-400			0.087 ± 0.1			2.78		Y. Abdelkader, M.A. Khan, A. Khan, M. I. Alam, and M. Kavay, "Mechanical, Thermal, and Moisture Buffering Properties of Novel Insulating Hemp-Lime Composite Building Materials," (In English), Materials, Article vol. 13, no. 21, 18, Nov 2020, Art no. 5183, doi: 10.3390/ma13215183.
FHS (fine) TP	382.4	82.2		0.105 ± 0.007	12.37-4.94	0.121			R. Bryski, M. Gluski, M. Burincka, K. Pietrak, M. Kubiś, and P. Ładka, "Influence of Hemp Shives Size on Hygro-Thermal and Mechanical Properties of a Hemp-Lime Composite," (In English), Materials, Article vol. 13, no. 23, p. 17 Dec 2020, Art no. 5183, doi: 10.3390/ma13235183.
THS (thick) TP	376.9	81.7		0.0992 ± 0.009	12.18-5.57	0.147			P. Bryski, M. Gluski, M. Burincka, K. Pietrak, M. Kubiś, and P. Ładka, "Influence of Hemp Shives Size on Hygro-Thermal and Mechanical Properties of a Hemp-Lime Composite," (In English), Materials, Article vol. 13, no. 23, p. 17 Dec 2020, Art no. 5183, doi: 10.3390/ma13235183.
//	286	83		0.064 - 0.063	3 - 25		3.3		Palumbo, M., Licata, A. M., Holcroft, N., Shea, A., & Walker, P. (2019). Determination of hygrothermal parameters of experimental and commercial bio-based insulation materials. Construction and Building Materials, 124, 269-275.
P	466 ± 25	78 ± 4		0.103 ± 0.002 - 0.112 ± 0.007					Sere, B., Magniont, C., & Lorente, S. (2019). Characterization of a precast hemp concrete. Part I: Physical and thermal properties. Journal of Building Engineering, 24, 100540.
TP				0.080 ± 0.002 - 0.088 ± 0.003					Grudnicka, M., & Brzycki, P. (2019). The occurrence of thermal bridges in hemp-lime construction junctions. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 63(2), 377-387.
TP	450			0.1	5		1.9		Kalve, D., Cornuet, J., & Lawrence, P. (2015). Modeling the moisture buffering behavior of a coated bio-based building material by including hygrothermal properties of hemp shives. Energy and Buildings, 88, 91-99.
TP	478 ± 7	76.4 ± 0.1			10.58 ± 0.46 - 8.98 ± 0.47		2.66	x	Bahim, M., Douane, O., Le A. T., Pommis, G., Lailoudi, B., Cignin, A., ... & Langlet, T. (2019). Characterization of flax lime and hemp lime concretes: Hygro properties and moisture buffer capacity. Energy and Buildings, 182, 1091-1097.
TP (ellidals hieboven)	478 ± 7	76.4 ± 0.1			10.58 ± 0.46 - 8.98 ± 0.47	0.062	2.66		Bahim, M., Douane, O., Le A. T., Pommis, G., Lailoudi, B., Cignin, A., ... & Langlet, T. (2019). Characterization of flax lime and hemp lime concretes: Hygro properties and moisture buffer capacity. Energy and Buildings, 182, 1091-1097.
C1 (special: waterwast)	175 ± 3			0.052	8.42 - 2.77		3.07 ± 0.05	x	Hussain, A., Calabre-Holley, J., Lawrence, M., & Jang, Y. (2019). Hygrothermal and mechanical characterization of novel hemp shiv based thermal insulation composites. Construction and Building Materials, 212, 561-568.
C2 (special: waterwast)	200 ± 5			0.057	6.62 - 4.48		3.69 ± 0.01		Hussain, A., Calabre-Holley, J., Lawrence, M., & Jang, Y. (2019). Hygrothermal and mechanical characterization of novel hemp shiv based thermal insulation composites. Construction and Building Materials, 212, 561-568.
C3 (special: waterwast)	200 ± 5			0.053	7.54 - 4.37		2.99 ± 0.02		Hussain, A., Calabre-Holley, J., Lawrence, M., & Jang, Y. (2019). Hygrothermal and mechanical characterization of novel hemp shiv based thermal insulation composites. Construction and Building Materials, 212, 561-568.
4 mixtures	351 - 410				4.5			x	Gourlay, E., Gak, P., Marceau, S., Foy, C., & Mercier, S. (2017). Effect of water content on the acoustical and thermal properties of hemp concretes. Construction and Building Materials, 139, 513-523.
chanvrbloc P	300-330			0.07 ± 0.075					https://www.biobasedbouw.nl/producten/bouwen-kanvrbloc-hempbloey/
hempbeton duringo/hempcal	275				1.4				https://www.biobasedbouw.nl/producten/hempcal-hempbloey/
Kalkhemp	250			0.056 ± 0.06	3.5-4.8				TF Ecobouw Salland kalkhemp
TP50	412			0.098	29				Pietruszka, B., Golbewski, M., & Litwinski, P. (2019). Characterization of Hemp-Lime Bio-Composite. IOP Conference Series, 290(1), 02027.
TP60	366			0.088					Pietruszka, B., Golbewski, M., & Litwinski, P. (2019). Characterization of Hemp-Lime Bio-Composite. IOP Conference Series, 290(1), 02027.
TP650	346			0.084					Pietruszka, B., Golbewski, M., & Litwinski, P. (2019). Characterization of Hemp-Lime Bio-Composite. IOP Conference Series, 290(1), 02027.
TP550	317			0.084					Pietruszka, B., Golbewski, M., & Litwinski, P. (2019). Characterization of Hemp-Lime Bio-Composite. IOP Conference Series, 290(1), 02027.
TP500	309			0.08					Pietruszka, B., Golbewski, M., & Litwinski, P. (2019). Characterization of Hemp-Lime Bio-Composite. IOP Conference Series, 290(1), 02027.
P	466 ± 25	78 ± 4			1.49 - 2.30 ± 0.34	0.14 ± 0.01		x	Sere, B., Magniont, C., & Lorente, S. (2019). Characterization of a precast hemp concrete block. Part I: Hygro properties. Journal of Building Engineering, 24, 100579.
P	330			0.07	4.50				Aversa, P., Marro, A., Tripepi, C., Sabadini, S., Dorelli, G., Lauriola, P., Moletti, C., & Luprano, V. (2021). Hemp-lime buildings: Thermo-hygrometric behaviour of two case studies in North and South Italy. Energy and Buildings, 247, 111147. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111147
TP	288-445			0.117 ± 0.154			195 ± 15		Poupart, T., Tchotoup, J., Issaoui, N., & Amiri, O. (2023). Experimental Study of the Dimensional and Thermal Properties of Hemp Concrete under Accelerated Aging. Buildings, 13(10), 2414. https://doi.org/10.3390/buildings13102414
THS1, THS1.1, THS1.1.1	376.2 - 382.4			0.087 / 0.094 / 0.10 / 0.105		0.103 ± 0.17			Bryski, P., Giera, P., Gluski, M., Rumina, M., Suchorab, Z., & Jagod, G. (2023). Influence of the direction of the mixture compaction on the selected properties of a hemp-lime composite. Materials, 16(10), 4629. https://doi.org/10.3390/ma16104629

Samples <i>TP = ter plaatse; P = p/b/b; SP = sprayed</i>	Basic material parameters					curves			Informatie	
	bulk density dichttheit $\rho_{b,0}$ [kg/m ³]	total porosity porositeit $\phi_{t,0}$ & $\phi_{0,0}$ [%]	specific heat capacity specifieke warmtecapaciteit $c_{p,0}$, $c_{p,0,0}$, $c_{p,0,CE}$ [J/kg.K]	thermal conductivity warmtegeleidingscoëfficiënt $\lambda_{0,0}$, $\lambda_{0,0,0}$ [W/m.K]	vapour diffusion resistance factor dampdiffusieweerstandsfactor $\mu_{0,0}$ [-]	capillarity waterabsorptiecoëfficiënt [kg/m ² .√s]	moisture buffer value vochtbuffering [m ² .s/kg]	LCC	MFC	soortje
CALKEHNHP										
C2-H*	600	70		0.15 ± 0.01			1.63			Abbas, M. S., Gourdon, E., Glé, P., McGrogan, F., Ferroukh, M. Y., & Fabbri, A. (2021). Relationship between hygrothermal and acoustical behavior of hemp and sunflower composites. <i>Building and Environment</i> , 188, 107462.
H9B-G	353	78.6		0.095 ± 0.005			6.17			Abbas, M. S., Gourdon, E., Glé, P., McGrogan, F., Ferroukh, M. Y., & Fabbri, A. (2021). Relationship between hygrothermal and acoustical behavior of hemp and sunflower composites. <i>Building and Environment</i> , 188, 107462.
H9B-UK	392	71.5		0.101 ± 0.008			-			Abbas, M. S., Gourdon, E., Glé, P., McGrogan, F., Ferroukh, M. Y., & Fabbri, A. (2021). Relationship between hygrothermal and acoustical behavior of hemp and sunflower composites. <i>Building and Environment</i> , 188, 107462.
H9B-F	380	71.9		0.107 ± 0.007			-			Abbas, M. S., Gourdon, E., Glé, P., McGrogan, F., Ferroukh, M. Y., & Fabbri, A. (2021). Relationship between hygrothermal and acoustical behavior of hemp and sunflower composites. <i>Building and Environment</i> , 188, 107462.
C1-F	433	75		0.102 ± 0.01			-			Abbas, M. S., Gourdon, E., Glé, P., McGrogan, F., Ferroukh, M. Y., & Fabbri, A. (2021). Relationship between hygrothermal and acoustical behavior of hemp and sunflower composites. <i>Building and Environment</i> , 188, 107462.
S08	489.94			0.109						Majumder, A., Canale, L., Mastino, C. C., Piccio, A., Fratillo, A., & De'Isola, M. (2021). Thermal Characterization of Recycled Materials for Building Insulation. <i>Energies</i> , 2021, 14, 3564.
S07	459.06			0.107						Majumder, A., Canale, L., Mastino, C. C., Piccio, A., Fratillo, A., & De'Isola, M. (2021). Thermal Characterization of Recycled Materials for Building Insulation. <i>Energies</i> , 2021, 14, 3564.
TP	382			0.09 ± 0.113	2.80-4.73					Moitri, C., Arens, P., Isenhardt, A. E., Dorelli, G., Woloszyn, M., & Luperano, V. (2023). Hygrothermal behaviour of hemp lime walls: the effect of binder carbonation over time. <i>Building and Environment</i> , 233, 110219. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110219
P	330		1280	0.07	4.50					
HEMNEPVZEL										
Sample 3	30.2			0.0486	2.8					Korjenčić, A., Petránek, V., Zach, J., & Hroudová, J. (2011). Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources. <i>Energy and Buildings</i> , 43(9), 2518–2523.
Sample 4	29.6			0.0475	2.2					Korjenčić, A., Petránek, V., Zach, J., & Hroudová, J. (2011). Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources. <i>Energy and Buildings</i> , 43(9), 2518–2523.
Sample 5	33.1			0.0419	3.8					Korjenčić, A., Petránek, V., Zach, J., & Hroudová, J. (2011). Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources. <i>Energy and Buildings</i> , 43(9), 2518–2523.
Sample 6	82.1			0.0393	4					Korjenčić, A., Petránek, V., Zach, J., & Hroudová, J. (2011). Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources. <i>Energy and Buildings</i> , 43(9), 2518–2523.
hempeveel	36.2		2.75	0.052						Volf, M., Diviš, J., & Havlík, F. (2015). Thermal, moisture and biological behaviour of natural insulating materials. <i>Energy Procedia</i> , 78, 1599–1604. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.219
hemp fibre	40			0.038 - 0.040						Lawrence, M. B., Shea, A., Walker, P., & DeWyck, P. (2013). Hygrothermal performance of bio-based insulation materials. <i>Proceedings of the Institution of Civil Engineers</i> , 166(4), 257–265. https://doi.org/10.1080/00207179.2013.800941
hempeveel/hemp/hw	35		1800	0.037 - 0.040	<1.5					https://www.biobasedbouwen.nl/producten/thermonatuur-hemp-isolatie-thermo-hemp-premium/
hempeveel/thermo/hemp/premium +	30-42		2300	0.037 - 0.040	1-2					Shiaoni, S., D'Alessandro, F., Bianchi, F., & Adrià, F. (2016). Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. <i>Renewable & Sustainable Energy Reviews</i> , 62, 988–1011. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.045
hemp fiber	20-90		1600 - 1700	0.038 - 0.060	1-2					Shiaoni, S., D'Alessandro, F., Bianchi, F., & Adrià, F. (2016). Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. <i>Renewable & Sustainable Energy Reviews</i> , 62, 988–1011. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.045
hemp fiber and chips	29-82			0.039 - 0.049	21-4					Shiaoni, S., D'Alessandro, F., Bianchi, F., & Adrià, F. (2016). Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. <i>Renewable & Sustainable Energy Reviews</i> , 62, 988–1011. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.045
hemp	30-180		1600-1700	0.034 - 0.043	1.2-2.3					Shiaoni, S., D'Alessandro, F., Bianchi, F., & Adrià, F. (2016). Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. <i>Renewable & Sustainable Energy Reviews</i> , 62, 988–1011. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.045
hemp maten				0.040 - 0.041						Shiaoni, S., D'Alessandro, F., Bianchi, F., & Adrià, F. (2016). Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. <i>Renewable & Sustainable Energy Reviews</i> , 62, 988–1011. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.045
hemp fibre	41.1	97		0.040 - 0.044	2.3-3.0		2.3			Shiaoni, S., D'Alessandro, F., Bianchi, F., & Adrià, F. (2016). Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. <i>Renewable & Sustainable Energy Reviews</i> , 62, 988–1011. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.045
Thermo stopwolle hant	30-50		2300		1-2					Shiaoni, S., D'Alessandro, F., Bianchi, F., & Adrià, F. (2016). Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. <i>Renewable & Sustainable Energy Reviews</i> , 62, 988–1011. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.045
hemp	25			0.04						TF Thermo stopwolle hant
HF	38		1900 ± 312	0.0543 ± 0.0088	1.46 ± 0.02 - 1.77 ± 1.05	0.39 ± 0.07	0.7			Romano, A., Bras, A., Grammatikos, S., Shaw, A., & Riley, M. W. (2019). Bio-based and recycled materials: characterisation and hygrothermal assessment for passive relative humidity management. <i>Academic Journal of Civil Engineering</i> , 3(72), 378–383. https://doi.org/10.26168/ajcbe.2019.54
H1	100			0.042	3.0					Jerman, M., Plohar, I., Koci, V., & Černý, R. (2019). Thermal and hygro properties of biomaterials suitable for interior thermal insulation systems in historical and traditional buildings. <i>Building and Environment</i> , 154, 81–88. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.020
H2	107			0.05	0.63					Helouš, K. E., Urick, S., & Chabrová, T. (2020). Sorption properties of thermal insulation composed of flax or hemp fibers. <i>Slovak Journal of Civil Engineering</i> , 28(3), 47–52. https://doi.org/10.14718/sjce-2020-0023
H3	147			0.05	1.36	0.0120-0.0134				Šimon, J., & Šimon, J. (2020). Sorption properties of thermal insulation composed of flax or hemp fibers. <i>Slovak Journal of Civil Engineering</i> , 28(3), 47–52. https://doi.org/10.14718/sjce-2020-0023
CH	226.3			0.042	1.45					Donatelli, A., Arens, P., Terzi, R., Marciello, L., Agli, L., De Abajo, G., Arens, W., & Luperano, V. (2019). Influence of carding and pressing on hygrothermal properties and fire reaction of hemp fiber nonwoven mats. <i>Advances in Science and Engineering</i> , 11(2), 78–88. https://doi.org/10.1373/asc.2019.11.2.78
CPH	132.6			0.04	1.26					Kymäläinen, H., & Sjöberg, A. (2008). Flax and hemp fibres as raw materials for thermal insulations. <i>Building and Environment</i> , 43(7), 1261–1269. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.03.006
HSF	59.8			0.047	1.12					
hemp	20-45			0.040-0.060						

Samples <i>($\eta = \text{er plates}; P = \text{prepb}; S^p = \text{sprayed}$)</i>	Basic material parameters					curves		Informate	
	bulk density sourcedata $\rho_{dry,0}$ [kg/m ³]	total porosity porosity $\phi_{tot,0}$ [%]	specific heat capacity sourcedata $c_{p,0}$ [J/kg·K]	thermal conductivity wärmteleitfähigkeit $\lambda_{dry,0}$ [W/m·K]	vapour diffusion resistance factor dampdiffusionswiderstandsfaktor $\mu_{dry,0}$ [1]	capillarity waterabsorpt coefficient kg/(m ² ·s)	moisture buffer value vochtbuffering capacity [g/(m ² ·s·pV)]	LCC MRC	LCoptie MRC optie
STRO									
Strobaal	98		1.58	0.065					x
Strawl straw board	250-600			<0.02					
Strobaal	100-130			0.032-0.080					
Strobaal	50-150		600	0.080-0.067					
Stro				0.052-0.080					
Strobaal	100	90	2416	0.085			5.247		
Chopped straw board	300	90	2100	0.095	3	0.083		x	
Straw chaffing board (contour)	300		1500	0.111	3.3	0.08			
Straw bales	101-150		1800	0.049-0.050	3-4				
Straw				0.046-0.067					
Straw bales	100		2426	0.08	2				x
Straw bale	100	90	2000	0.085	2				
Wästerballe (Bio- Baustoffballe) (Sonnenleie)	95-120		1600	0.050-0.085	2.3	0.05			
Wästerstroh (Bio-Einlastron Sonnenleie)	115-141			0.058	1.3				
Straw bale	110-130			0.055-0.065					
Straw parallel	127			0.08	0.94-1.09		4-4.6		
Straw perpendicular	144			0.048	1.25-1.75		2.8-3.3		
Straw parallel	126			0.078					
Straw perpendicular	129			0.056					
Building straw	85-115		2000	0.048	2				
Straw	97	90	2000	0.064	1				
straw	440		900	0.18					
straw	241-531			0.071-0.12	4.80				
straw	356			0.072					
straw	200			0.0397			1.88-2.21		
straw	80	90	1200	0.046-0.088	1.30				x
straw	120	90	1200	0.055	1.30				
straw	88			0.0589-0.0667		non-cap			
STRO				0.12					

Voif, M., Dui, J., & Jwaik, F. (2015). Thermal, moisture and biological behaviour of natural insulating materials. *Energy Procedia*, 74, 1599–1604. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.219>

Lawrence, M. B., Shea, A., Walker, P., & De Wilde, P. (2013). Hygrothermal performance of bio-based insulation materials. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 166(4), 257–263. <https://doi.org/10.1680/jcoma.12.00031>

Lawrence, M. B., Shea, A., Walker, P., & De Wilde, P. (2013). Hygrothermal performance of bio-based insulation materials. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 166(4), 257–263. <https://doi.org/10.1680/jcoma.12.00031>

Schionti, S., D'Alessandro, F., Bianchi, F., & Adriaal, F. (2016). Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 62, 988–1011. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.045>

De Koevoet

Dubois, S., Torard, A., & Lebeau, F. (2013). Modeling the hygrothermal behavior of bio-based construction materials. *Journal of Building Physics*, 38(3), 245–261. <https://doi.org/10.1177/1744259113483810>

Dejahn (only thermal)

Ciuffi, E. (2016). Generation and application of a BIM-based repository of straw bale construction details (Diploma Thesis, Technische Universität Wien). *reposit'Um*. <https://doi.org/10.34776/hys.2016.24867>

Douzane, O., Promis, G., Roucourt, J., Le A. T., & Larget, T. (2016). Hygrothermal performance of a straw bale building in situ and laboratory investigations. *Journal of Building Engineering*, 8, 59–68.

Dubois, S., Evard, E., Blecker, C., and Lebeau, F. (2016) Temperature and moisture storage in crop-based materials Modelling a straw bale wall subject to a thermal shock. *Journal of Building Physics*, 39 (5)1-20

Theriel, A., Loue, A., and Biot, E. (2021). Moisture equilibrium in straw bales walls. in 28th Passive and low energy architecture conference, Lima, 7–9 November 2021.

Hochgermer, S. A. (2023). Bauteilkonstruktionen mit Strohbindenstoffen Erstellung eines Bauteilkatalogs repräsentativer Bauteilvarianten mit nicht-tragender Strohbindenstruktur. *reposit'Um*.

Hochgermer, S. A. (2023). Bauteilkonstruktionen mit Strohbindenstoffen Erstellung eines Bauteilkatalogs repräsentativer Bauteilvarianten mit nicht-tragender Strohbindenstruktur. *reposit'Um*.

IP15_11 BRE intro straw bale (Walker, Black, Sutton)

Plett, S., Maskeil, D., Shea, A., & Walker, P. (2012). Impact of fibre orientation on the hygrothermal properties of straw bale insulation. *Construction and Building Materials*, 349, 1287-92.

Plett, S., Maskeil, D., Shea, A., & Walker, P. (2012). Impact of fibre orientation on the hygrothermal properties of straw bale insulation. *Construction and Building Materials*, 349, 1287-92. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.03.013>

Plett, S., Maskeil, D., Walker, P., & Laborel-Prieux, A. (2020). Manufacture and characterisation of prototype straw bale insulation products. *Construction and Building Materials*, 252, 120895. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120895>

Plett, S., Maskeil, D., Walker, P., & Laborel-Prieux, A. (2020). Manufacture and characterisation of prototype straw bale insulation products. *Construction and Building Materials*, 252, 120895.

the strawbale building guideline_2019 (FASBA)

Thomson, A., Dick, K. J., & Walker, P. (2020). Steady-state and dynamic hygrothermal performance of rendered straw bale walls. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*.

Colinart, T., Vincelais, T., Lenormand, H., De Menibus, A. H., Hamard, E., & Lecompte, T. (2020). Hygrothermal properties of light-earth building materials. *Journal of Building Engineering*, 29, 101134. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101134>

Colinart, T., Vincelais, T., Lenormand, H., De Menibus, A. H., Hamard, E., & Lecompte, T. (2020). Hygrothermal properties of light-earth building materials. *Journal of Building Engineering*, 29, 101134. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101134>

Colinart, T., Vincelais, T., Lenormand, H., De Menibus, A. H., Hamard, E., & Lecompte, T. (2020). Hygrothermal properties of light-earth building materials. *Journal of Building Engineering*, 29, 101134. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101134>

Romano, A., Bras, A., Grammatikos, S., Shaw, A., & Riley, M. W. (2019). Bio-based and recycled materials: characterisation and hygrothermal assessment for passive relative humidity management. *Academic Journal of Civil Engineering*, 3(72), 378–383. <https://doi.org/10.26168/ajcbe.2019.54>

Thijl, G., Penne, F., Ouldoukhline, S., Ibrahim, M., & Bwolk, P. H. (2022). Hygrothermal performance of multilayer straw walls in different climates. *Construction and Building Materials*, 326, 126873. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126873>

Thijl, G., Penne, F., Ouldoukhline, S., Ibrahim, M., & Bwolk, P. H. (2022). Hygrothermal performance of multilayer straw walls in different climates. *Construction and Building Materials*, 326, 126873. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126873>

Langmans, J., Verschu, A., & Roels, S. (2014). On the hygrothermal performance of straw bale wall elements in Belgium. *Sustainability in Energy and Buildings* (SEEB-14), Vol 3 pp. 37–42.

Von Dam, J. (2019). Catalogus bio-based bouwmaterialen 2019 : Het groene en circulaire bouwen. <https://library.sur.nl/WebQuery/wurpubs/548194>

C.2. Per parameter

Volumieke massa (kg/m³)	Kalkhennep	Hennepvezel	Houtwol	Houtvezel	Vlas	Katoen	Stro	Cellulose
Gemiddelde	373.85	64.43	48.49	187.08	53.24	118.33	174.83	52.24
Mediaan	376.90	40.55	50.75	176.30	38.00	35.00	126.00	50.00
Standaardafwijking	114.26	51.10	13.60	71.21	39.39	155.15	127.69	26.67
Aantal waarden	49	22	16	44	13	4	26	33

Totale porositeit (%)	Kalkhennep	Hennepvezel	Houtwol	Houtvezel	Vlas	Katoen	Stro	Cellulose
Gemiddelde	76.54	97.00	95.67	80.60	95.00	-	90.00	94.79
Mediaan	77.20	97.00	96.00	89.00	95.00	-	90.00	94.63
Standaardafwijking	3.89	0.00	0.47	18.68	0.00	-	0.00	2.07
Aantal waarden	16	1	3	23	3	-	6	10

Specifieke warmtecapaciteit (J/kgK)	Kalkhennep	Hennepvezel	Houtwol	Houtvezel	Vlas	Katoen	Stro	Cellulose
Gemiddelde	1296.48	1956.20	2062.73	1738.62	1317.67	1600.00	1666.57	2017.45
Mediaan	1280.00	1750.00	2100.00	1700.00	1370.00	1600.00	1700.00	2020.00
Standaardafwijking	297.09	384.15	285.71	291.24	96.01	0.00	527.32	346.13
Aantal waarden	20	10	11	32	3	3	14	24

Warmtegeleidingscoëfficiënt (W/mK)	Kalkhennep	Hennepvezel	Houtwol	Houtvezel	Vlas	Katoen	Stro	Cellulose
Gemiddelde	0.094	0.043	0.043	0.054	0.044	0.046	0.072	0.040
Mediaan	0.095	0.040	0.040	0.044	0.040	0.039	0.067	0.038
Standaardafwijking	0.027	0.006	0.007	0.024	0.010	0.014	0.027	0.005
Aantal waarden	45	22	17	40	18	7	29	34

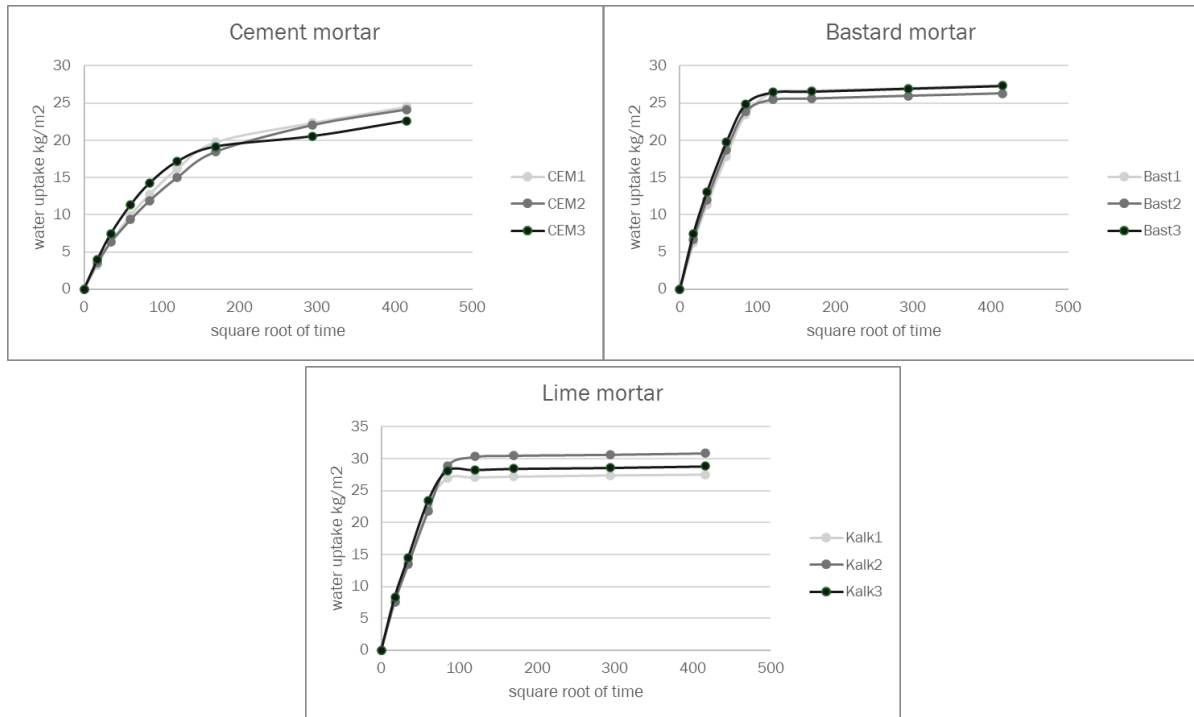
Dampdiffusieweerstandgetal (-)	Kalkhennep	Hennepvezel	Houtwol	Houtvezel	Vlas	Katoen	Stro	Cellulose
Gemiddelde	6.42	2.04	2.20	4.77	5.51	1.70	2.02	2.09
Mediaan	4.93	2.00	2.05	4.20	1.75	2.00	1.88	1.93
Standaardafwijking	5.76	1.00	0.93	2.91	11.02	0.54	1.02	1.30
Aantal waarden	29	18	13	38	14	4	13	29

Waterabsorptiecoëfficiënt (kg/m²vs)	Kalkhennep	Hennepvezel	Houtwol	Houtvezel	Vlas	Katoen	Stro	Cellulose
Gemiddelde	0.092	0.138	0.129	0.083	0.095	0.022	0.071	1.114
Mediaan	0.062	0.013	0.180	0.009	0.012	0.022	0.080	0.716
Standaardafwijking	0.045	0.178	0.073	0.232	0.147	0.000	0.015	1.221
Aantal waarden	12	2	3	23	3	1	3	5

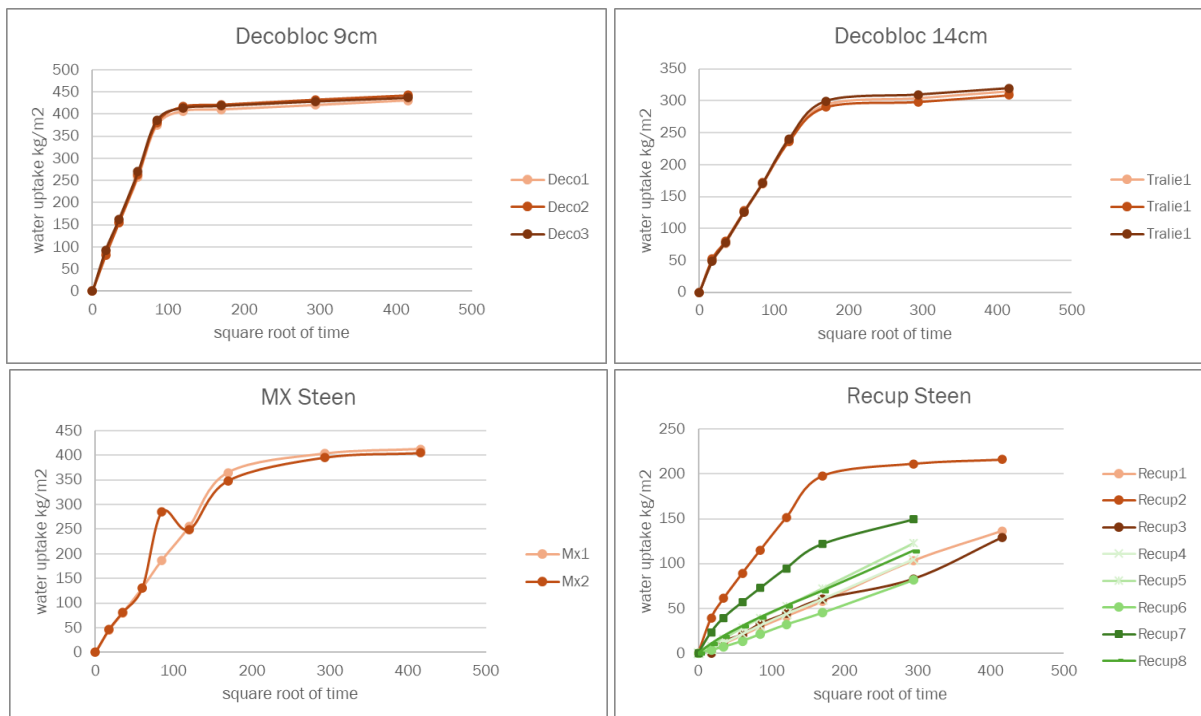
Moisture Buffer Value (g/m²%RV)	Kalkhennep	Hennepvezel	Houtwol	Houtvezel	Vlas	Katoen	Stro	Cellulose
Gemiddelde	2.756	1.500	1.940	1.783	-	-	3.434	2.893
Mediaan	2.660	1.500	2.050	1.905	-	-	3.300	2.893
Standaardafwijking	0.940	0.800	0.674	0.315	-	-	1.153	0.000
Aantal waarden	17	2	3	3	-	-	4	1

D. Resultaten capillaire absorptieproef

Hieronder worden de grafische resultaten getoond voor de mortelsamples:



Hieronder worden de grafische resultaten getoond voor de baksteensamples:



Hieronder de analytische resultaten:

Length	88.1	88.25	88	88.5	88.2	88.3	88	85	86.2	52.3	58.5	56
Width	40.5	39.75	40.15	38.9	39.1	39.3	39.5	39.8	38.65	180	190	185
Area [m2]	0.003568	0.003507938	0.003533	0.003443	0.003449	0.00347	0.003476	0.003383	0.003332	0.009414	0.011115	0.01036
Time	CEM1	CEM2	CEM3	Bast1	Bast2	Bast3	Kalk1	Kalk2	Kalk3	Recup1	Recup2	Recup3
0	248.429	252.125	218.192	230.193	219.079	231.014	237.294	264.502	241.557	1517.8	1522.3	1453.7
5	17.32050808	251.687	222.184	236.398	225.795	238.457	245.103	272.018	249.883	1523.5	1561.2	1466.5
20	34.64101615	254.744	225.652	241.502	231.085	244.038	251.278	277.922	256.092	1528.4	1583.4	1474.6
60	60	258.361	261.457	229.531	248.069	237.82	250.813	259.862	264.948	1537.5	1611.3	1486.5
120	84.85281374	261.209	264.035	232.473	253.668	242.997	255.895	264.243	293.387	1546.8	1637.6	1497.8
240	120	264.626	267.115	235.348	-	-	-	-	-	1558.8	1673.6	1514.1
480	169.7056275	268.203	-	-	-	-	-	-	-	1575.5	1720.2	1536.5
1440	293.9387691	-	-	-	-	-	-	-	-	1621	-	1583.1
2880	415.6921938	-	-	-	-	-	-	-	-	1654.3	-	1603.5
x	-	0.115789	0.105911249	0.141909	0.273811	0.278961	0.31925	0.336944	0.332116	0.33574	1.117545	0.368747
AW [g/m ² .s0.5]	-	32.45162	30.19188592	40.16451	79.53498	80.89074	83.22412	91.84403	99.68562	35.66387	100.5439	35.5933
AW [kg/m ² .s0.5]	-	0.032452	0.030191886	0.040165	0.079535	0.080891	0.083224	0.091844	0.099599	0.035664	0.100544	0.035593

Length	139.5	138.6	139.5	65.2	64.8	136.8	136.5	136.8	179	160	182	182
Width	144	144.2	142.9	223	223	285	285	285	52.48	56.08	53.28	52.75
Area [m2]	0.020088	0.019986	0.019935	0.01454	0.01445	0.038988	0.038903	0.038988	0.009394	0.008973	0.009697	0.007435
Time	Deco2.1	Deco2.2	Deco2.3	Mx1	Mx2	Deco1.1	Deco1.2	Deco1.3	Recup4	Recup5	Recup6	Recup8
0	2912.9	2856.3	2954.1	3678.9	3654.5	4132.7	4141.1	4128.8	1427.7	1331.5	1516.6	1398.7
5	17.32050808	2962.3	3002.9	3723.7	3700.9	4220	4221.7	4221.4	1432.5	1339.6	1520	1422
20	34.64101615	2989.8	2936.4	3758.7	3735.6	4286.9	4295.3	4290.5	1438.9	1347.4	1523.6	1438.3
60	60	3037.9	2983.7	3810	3785.5	4390.6	4403.6	4398.3	1448.7	1359.7	1530.1	1455.6
120	84.85281374	3083	3027.8	3865.7	3939.5	4507.2	4520.9	4515.2	1458.4	1370.6	1537.7	1471.5
240	120	3148.9	3092.7	3933.8	3904	-	-	-	1471.1	1384.2	1548.4	1493.5
480	169.7056275	-	-	4043.7	4002.8	-	-	-	1487.8	1403.8	1561.7	1520.8
1440	293.9387691	-	-	-	-	-	-	-	1532	1454.3	1598.2	1311
2880	415.6921938	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
x	1.911528	1.902885	1.94683	2.117892	2.09269	4.32828	4.434524	4.466322	0.357725	0.415273	0.281384	0.691812
AW [g/m ² .s0.5]	-	95.15772	95.21034	97.66111	145.6637	144.8188	111.0157	113.9907	38.08047	46.28126	29.01779	72.06002
AW [kg/m ² .s0.5]	-	0.095158	0.09521	0.097661	0.145664	0.144819	0.111016	0.113991	0.03808	0.046281	0.029018	0.07206
												0.050966

E. Resultaten testmuren

CEM 1

- Observaties
 - Bijna overal visueel nat
MAAR klein debiet of laat erdoor geraakt
(geen diepe infiltratie)
 - Tracer activatie sterker bij stootvoegen
 - Voegen vochtiger dan steen in “droge” zones



CEM 2

- Observaties
 - Duidelijk lek onderaan door crack voorzijde
=> capillaire absorptiehoog crack-zijde hoger
=> workmanship! (opvoegen)
 - Verder geen infiltraties (behalve randeffect)
(2 druppels bovenop: door openen kast)



CEM 3

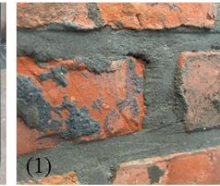
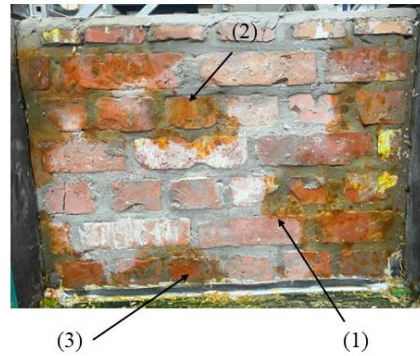
- Observaties
 - Bovenste laag uniform nat: runoff
 - Daaronder droger, lintvoeg weer nat
 - Bezande kanten als vochtpad
 - Vaak steen nat tot einde maar voeg er
boven, naast en onder droog



CEM 4

- Observaties

- Randeffecten
- Lokale spots bij continue interface i-e
 - (1) RO koppen 2 en 3
 - (2) Bovenste koppenlaag midden
 - (3) LO koppen 2 en 3 + crack voorzijde (geen capillaire absorptie want nergens anders)
- Streklagen minder duidelijk: geen continue interface!



CEM 5

- Observaties

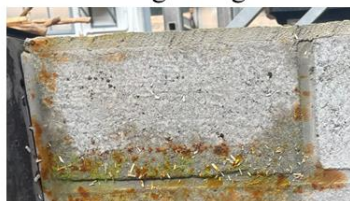
- Bovenaan mortel-bovenste steen: optrekkend vocht duidelijk => vochtpad hechting
- Moeilijker 1:1 binnen-buiten wegens hartvoeg
- Voegen wel duidelijk reden van infiltratie in geïsoleerde spots
 - Lintvoegen + runoff + capillaire absorptie in stootvoegen?



CEM 6

- Observaties

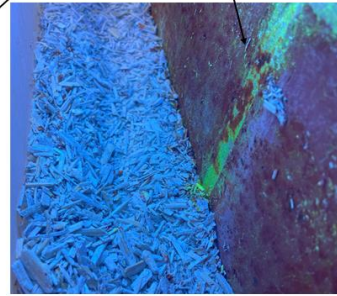
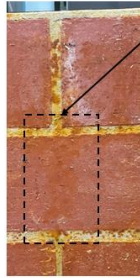
- Heel sterke infiltratie lintvoegen (hechting) => afstroom via kleurstof op steen
- Onder centrale steen **diep (5-6 cm)** in KH = snelle infiltratie, groot debiet
- Optrekken door stootvoegen of ook op contactopp infiltratie want halve stootvoeg droog



BAST 1

- Observaties

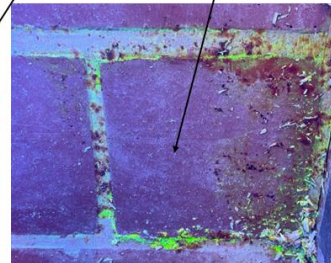
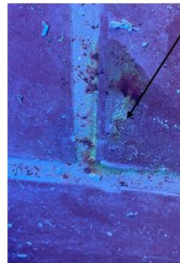
- Bovenste stootvoeg groen UV: groter debiet (niet enkel activatie, maar ook verdunning)
- Middelste steen eronder steeds kleur in KH => runoff?



BAST 2

- Observaties

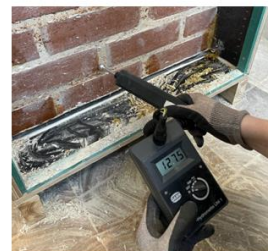
- Duidelijk nat vs droog in vlekken ! natte zones ~ afgebroken hoeken
- UV: vocht komt uit contactoppervlak (hogere verdunning scheidvlak)



BAST 3

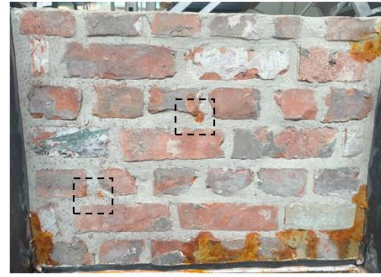
- Observaties

- Randeffecten verwaarlozen
- Enkele lokale spots bij stootvoeg contactopp! => typische capillaire abs bogen contactopp
- Voegen vochtig, net niet nat: lichte activatie her en der



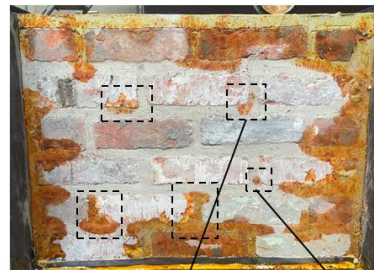
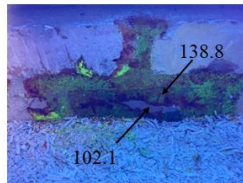
BAST 4

- Observaties
 - Nergens infiltratie TENZIJ lokale spots
=> bij stootvoegen + kopse stenen
 - Vlek RB randeffect (verwaarlozen)
 - Vlek O capillaire absorptie (verwaarlozen)



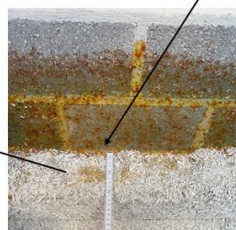
BAST 5

- Observaties
 - Niet
 - Randeffecten + cap. abs. verwaarlozen
 - Bovenste mortel runoff
 - Wel
 - Aantal voegen lokale spots
 - MO: droog vlekje midden in steen
=> én stootvoeg, én deel cap. abs. langs onder



BAST 6

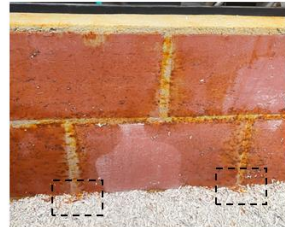
- Observaties
 - Infiltratie start plots over hele breedte
 - R stootvoeg in 2^e rij: **diepe** infiltratie en daarna ook L (tot 8-9 cm)
 - Ook veel tracer afgegaan aan oppervlak



KALK 1

- Observaties

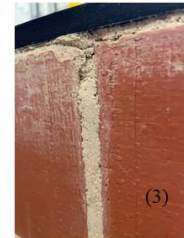
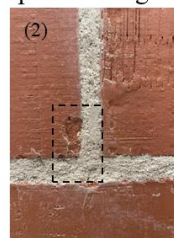
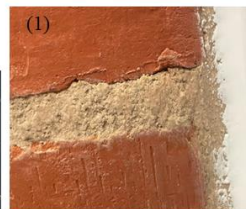
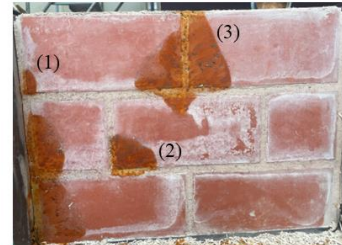
- Bovenste stootvoeg: duidelijkere vlek in KH
=> meer infiltratie langs stootvoeg
- Droge stukken steen
- Droog rond onderste stootvoeg: duidelijk scheidoppervlak
=> droge vlekken verbreden ook naar onder! ⇔ bij cap abs in stootvoegen



KALK 2

- Observaties

- (1) LB steen: vlek LO start tegen steen
=> geen randeffect: crack voorzijde!
- (2) Centrale steen vlek LO: enkel R steen van voeg nat
=> lek door kapotte hoek steen vooraan!
- (3) MB vlek: crack tegen steen ~ hoogteverschil cap. abs. boog



KALK 3

- Observaties

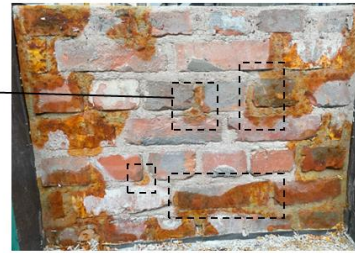
- Capillaire absorptiebogen rond stootvoegen
 - (1) Bezande kanten: sterke infiltratie
 - (2) Gezaagde kanten: voeg droog dus duidelijk beter dan zand
- Conclusie: contactoppervlak belangrijker dan dikte metselwerk



KALK 4

- Observaties

- 2^e rij vanaf onder: golfvormig capillair patroon
=> cap. abs. uit lintvoegen via stootvoegen
- Lokale spots rond koppenlagen
- Combinatie afstroom en cap opzuiging =>



KALK 5

- Observaties

- Aantal schilfers en kapotte stenen voorzijde
=> aanleiding tot infiltratie (lokale spots)
- Grotendeels lintvoegen + cap abs in stootvoegen
- LO cap abs (verwaarlozen), RO afstroom
WANT droge plek RO => zeker geen cap. abs. daar



KALK 6

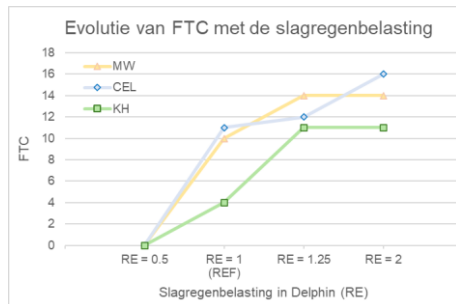
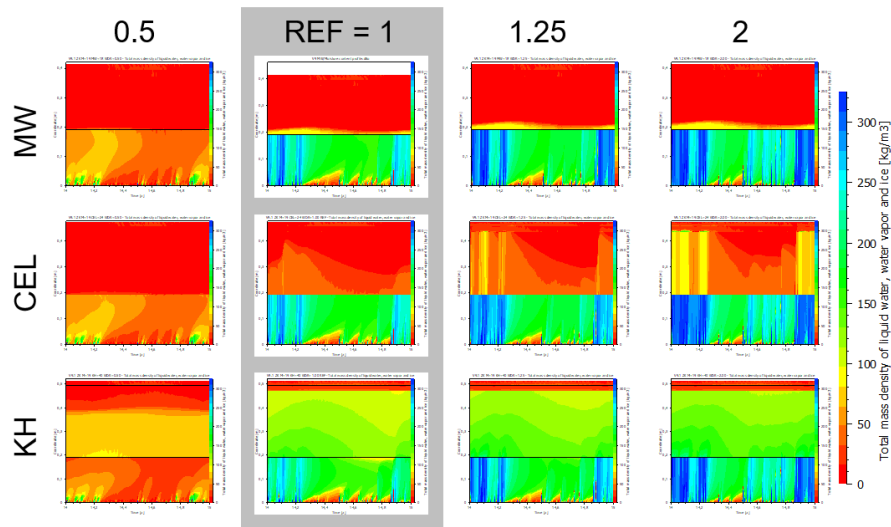
- Observaties

- Deel via voegen
- Verwaarlozen: O cap. abs. + randeffecten
- Binnenkomen door lintvoegen + optrekken cap. abs.
=> meer in stootvoegen want snellere absorptie daar
- Heel oppervlakkige infiltratie: minder diep dan andere mortels voor T6
=> bufferende kracht van kalkmortel!

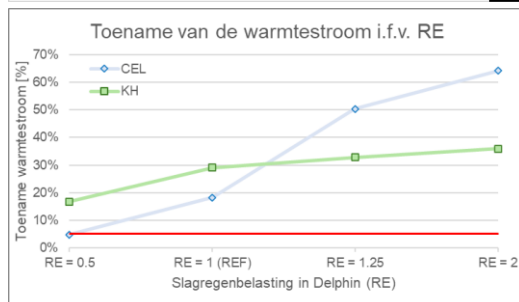


F. Resultaten simulaties: one-factor-at-a-time approach

- Rain Exposure

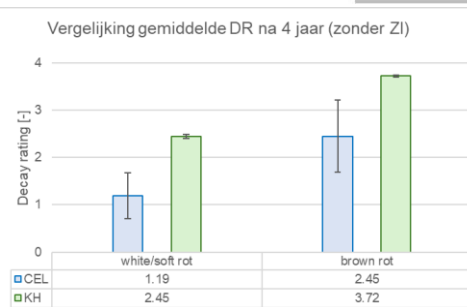
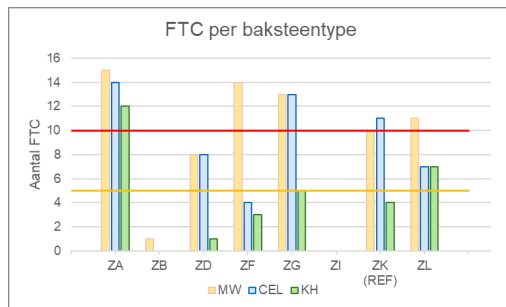
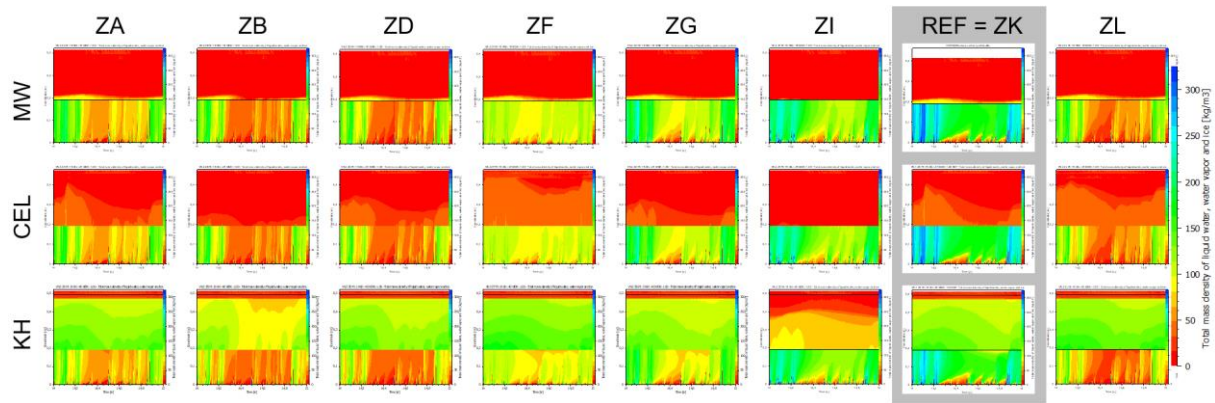


Decay Rating (DR) - EN 252		RE = 0.5	RE = 1 (REF)	RE = 1.25	RE = 2
MW	Witrot/zachtrot (1 jaar)	0	0	0.01	0.02
	Bruinrot (1 jaar)	0	0	0.04	0.05
	Witrot/zachtrot (4 jaar)	0	0	0.01	0.03
	Bruinrot (4 jaar)	0	0	0.04	0.14
CEL	Witrot/zachtrot (1 jaar)	0.00	0.10	0.14	0.10
	Bruinrot (1 jaar)	0.00	0.43	0.63	0.45
	Witrot/zachtrot (4 jaar)	0.00	1.53	2.15	1.61
	Bruinrot (4 jaar)	0.00	3.19	3.59	3.26
KH	Witrot/zachtrot (1 jaar)	0.05	0.17	0.16	0.15
	Bruinrot (1 jaar)	0.24	0.74	0.70	0.68
	Witrot/zachtrot (4 jaar)	0.74	2.44	2.34	2.29
	Bruinrot (4 jaar)	2.24	3.72	3.68	3.66



λ-waarde		RE = 0.5	RE = 1 (REF)	RE = 1.25	RE = 2
CEL	λ_gem,jaar	0.051	0.055	0.064	0.073
	% stijging	6%	15%	32%	51%
KH	λ_gem,jaar	0.084	0.124	0.129	0.132
	% stijging	36%	101%	108%	113%

- Baksteentype

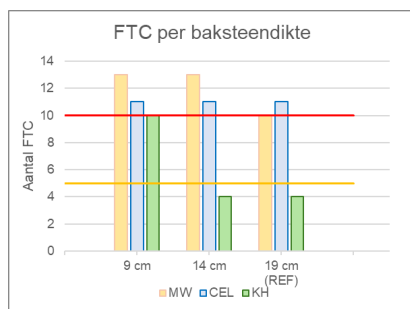
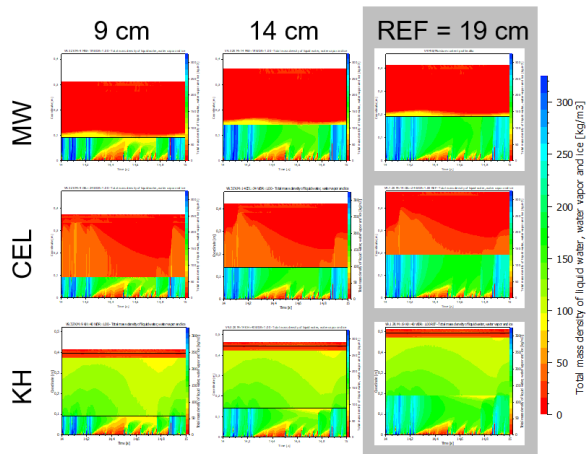


Decay Rating (DR) - EN 252		ZA	ZB	ZD	ZF	ZG	ZI	ZK (REF)	ZL
MW	Witrot/zachtrot (1 jaar)	0	0	0	0	0	0	0	0
	Bruinrot (1 jaar)	0	0	0	0	0	0	0	0
	Witrot/zachtrot (4 jaar)	0	0	0	0	0	0	0	0
	Bruinrot (4 jaar)	0	0	0	0	0	0	0	0
CEL	Witrot/zachtrot (1 jaar)	0.09	0	0.05	0.14	0.04	0	0.10	0.14
	Bruinrot (1 jaar)	0.39	0	0.23	0.63	0.16	0	0.43	0.63
	Witrot/zachtrot (4 jaar)	1.37	0	0.72	2.15	0.41	0	1.53	2.16
	Bruinrot (4 jaar)	3.05	0	2.19	3.59	1.52	0	3.19	3.59
KH	Witrot/zachtrot (1 jaar)	0.16	0.18	0.17	0.16	0.18	0.03	0.17	0.16
	Bruinrot (1 jaar)	0.73	0.80	0.77	0.71	0.78	0.11	0.74	0.72
	Witrot/zachtrot (4 jaar)	2.41	2.56	2.49	2.35	2.51	0.21	2.44	2.37
	Bruinrot (4 jaar)	3.70	3.76	3.74	3.68	3.74	0.90	3.72	3.69

λ -waarden		ZA	ZB	ZD	ZF	ZG	ZI	ZK (REF)	ZL
CEL	$\lambda_{\text{gem,jaar}}$	0.055	0.051	0.053	0.067	0.052	0.051	0.055	0.061
	% stijging	15%	6%	11%	38%	9%	6%	15%	26%
KH	$\lambda_{\text{gem,jaar}}$	0.126	0.113	0.124	0.130	0.123	0.084	0.124	0.129
	% stijging	104%	82%	100%	110%	98%	35%	101%	108%

Toename warmtestroom		ZA	ZB	ZD	ZF	ZG	ZI	ZK (REF)	ZL
CEL		19%	10%	13%	21%	13%	7%	18%	17%
KH		30%	25%	28%	30%	28%	19%	29%	31%

- **Baksteendikte**

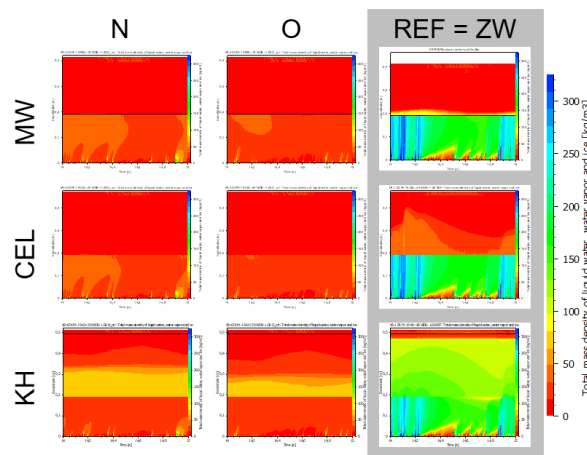


Decay Rating (DR) - EN 252		9 cm	14 cm	19 cm (REF)
MW	Witrot/zachtrot (1 jaar)	0.01	0.01	0
	Bruinrot (1 jaar)	0.04	0.04	0
	Witrot/zachtrot (4 jaar)	0.02	0.01	0
	Bruinrot (4 jaar)	0.07	0.04	0
CEL	Witrot/zachtrot (1 jaar)	0.11	0.10	0.10
	Bruinrot (1 jaar)	0.49	0.45	0.43
	Witrot/zachtrot (4 jaar)	1.73	1.60	1.53
	Bruinrot (4 jaar)	3.35	3.25	3.19
KH	Witrot/zachtrot (1 jaar)	0.17	0.17	0.17
	Bruinrot (1 jaar)	0.76	0.75	0.74
	Witrot/zachtrot (4 jaar)	2.48	2.45	2.44
	Bruinrot (4 jaar)	3.73	3.72	3.72

λ -waarden		9 cm	14 cm	19 cm (REF)
CEL	$\lambda_{\text{gem,jaar}}$	0.060	0.058	0.055
	% stijging	25%	19%	15%
KH	$\lambda_{\text{gem,jaar}}$	0.123	0.124	0.124
	% stijging	99%	100%	101%

Toename warmtestroom		9 cm	14 cm	19 cm (REF)
CEL		35%	24%	18%
KH		30%	30%	29%

- **Oriëntatie**



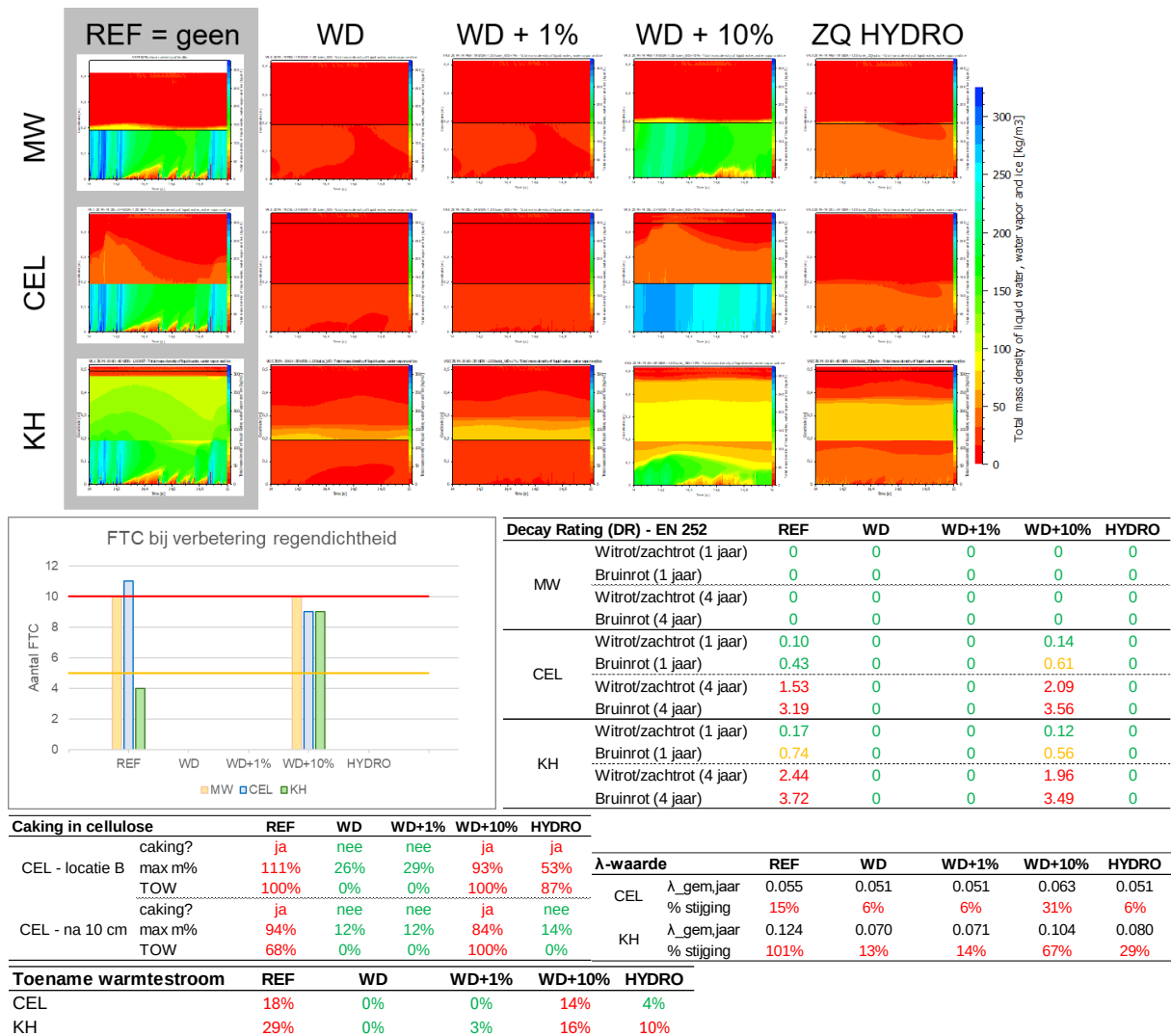
(Geen vorstrisico N en O)

Decay Rating (DR) - EN 252		N	O	ZW (REF)
MW	Witrot/zachtrot (1 jaar)	0.01	0.01	0
	Bruinrot (1 jaar)	0.03	0.03	0
	Witrot/zachtrot (4 jaar)	0.01	0.01	0
	Bruinrot (4 jaar)	0.03	0.03	0
CEL	Witrot/zachtrot (1 jaar)	0.01	0.01	0.10
	Bruinrot (1 jaar)	0.03	0.03	0.43
	Witrot/zachtrot (4 jaar)	0.01	0.01	1.53
	Bruinrot (4 jaar)	0.03	0.03	3.19
KH	Witrot/zachtrot (1 jaar)	0.01	0.01	0.17
	Bruinrot (1 jaar)	0.03	0.03	0.74
	Witrot/zachtrot (4 jaar)	0.01	0.01	2.44
	Bruinrot (4 jaar)	0.03	0.03	3.72

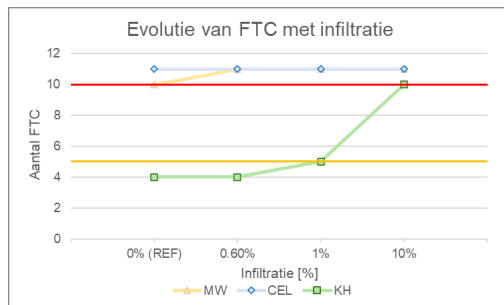
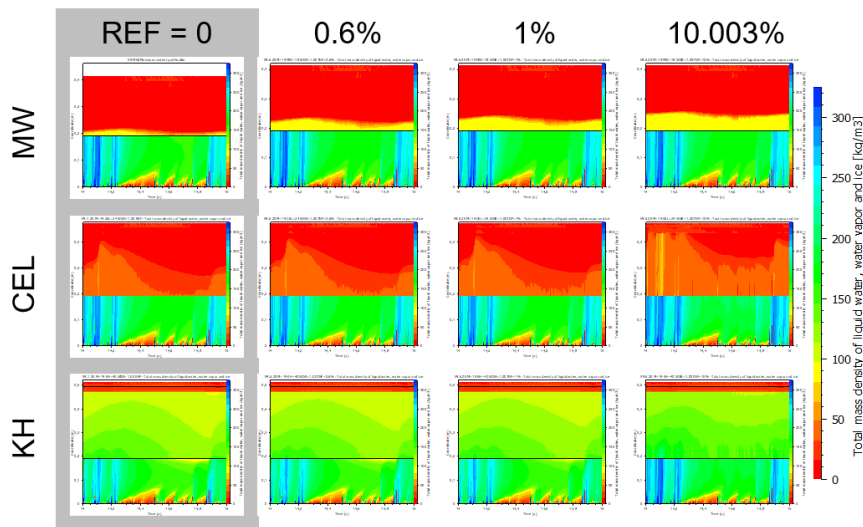
Toename warmtestroom		N	O	ZW (REF)
CEL		1%	1%	18%
KH		7%	5%	29%

λ -waarden		N	O	ZW (REF)
CEL	$\lambda_{\text{gem,jaar}}$	0.051	0.051	0.055
	% stijging	6%	6%	15%
KH	$\lambda_{\text{gem,jaar}}$	0.073	0.071	0.124
	% stijging	18%	14%	101%

- Kalei en hydrofobering



- Infiltratie



Decay Rating (DR) - EN 252		0% (REF)	0.60%	1%	10%
MW	Witrot/zachtrot (1 jaar)	0	0.07	0.14	0.30
	Bruinrot (1 jaar)	0	0.34	0.63	1.21
	Witrot/zachtrot (4 jaar)	0	1.16	2.16	3.21
	Bruinrot (4 jaar)	0	2.84	3.60	3.93
CEL	Witrot/zachtrot (1 jaar)	0.10	0.10	0.11	0.14
	Bruinrot (1 jaar)	0.43	0.48	0.51	0.62
	Witrot/zachtrot (4 jaar)	1.53	1.68	1.79	2.12
KH	Bruinrot (4 jaar)	3.19	3.31	3.39	3.58
	Witrot/zachtrot (1 jaar)	0.17	0.17	0.16	0.16
	Bruinrot (1 jaar)	0.74	0.73	0.73	0.70
	Witrot/zachtrot (4 jaar)	2.44	2.42	2.40	2.32
	Bruinrot (4 jaar)	3.72	3.71	3.70	3.67

λ-waarde	0% (REF)	0.6%	1%	10%
CEL				
λ _{gem,jaar}	0.055	0.056	0.056	0.063
% stijging	15%	16%	17%	32%
KH				
λ _{gem,jaar}	0.124	0.125	0.126	0.132
% stijging	101%	102%	103%	113%

Toename warmtestroom	0% (REF)	0.6%	1%	10%
CEL	18%	20%	21%	39%
KH	29%	46%	46%	49%

G.MRC en LCC van de gesimuleerde materialen (2D)

